ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΤΟΞΩΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΔΙΠΛΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΤΑΥΡΩΠΟΥ (ΛΙΜΝΗ ΠΛΑΣΤΗΡΑ)

ΛΙΑΡΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ :

ΔΡ. ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΑΤΤΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, Σ.Α.Τ.Μ – Ε.Μ.Π.

ΔΡ. ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.ΔΙ.Π. Σ.Α.Τ.Μ. – Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν με την συμβολή τους τόσο στο διάστημα της διπλωματικής, όσο και συνολικότερα στο διάστημα που φοιτώ στην Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, ο οποίος με την καθοδήγηση του, την υποστήριξη του και τις πολύτιμες γνώσεις του συνέβαλε τα μέγιστα για την περάτωση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μαρίνο Καττή για την συμβολή του στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και για την αποτελεσματική συνεργασία μας. Ακόμη οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Γιώργο Καπράλο ο οποίος με βοήθησε, με τις πολύτιμες γνώσεις του και τις παρουσιάσεις του, στην εκμάθηση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη της σε κάθε επιλογή της ζωής μου, όπου μαζί και με τη συμβολή των φίλων μου, με βοήθησαν ηθικά σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαιτέρως στην διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του τοξωτού φράγματος διπλής καμπυλότητας, του Ταυρωπού, στατικά και υπό σεισμικές συνθήκες. Αναλύεται το πρόβλημα των επιταχύνσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται στο φράγμα σε ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία του, ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός τοξωτού φράγματος. Στην ουσία εκτελέστηκαν όλες εκείνες οι αναλύσεις που πρέπει να γίνουν κατά τη διάρκεια της μελέτης ενός φράγματος, όσον αφορά την ευστάθεια του.

Στην εργασία αυτή γίνεται μία σύντομη περιγραφή στην διαδικασία επιλογής της θέσης και των τύπων των φραγμάτων, οι οποίοι αναφέρθηκαν εκτενώς στην συνέχεια. Έπειτα έγινε αναφορά στο τοξωτό φράγμα του Ταυρωπού (Λίμνη Πλαστήρα) και στα συμπαρομαρτούντα έργα του, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραμέτρους. Οι αναλύσεις εκπληρώθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Plaxis – 2D το οποίο είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιείται για την επίλυση γεωτεχνικών θεμάτων, δυσδιάστατα.

Πιο συγκεκριμένα, οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν σε πρώτη φάση στατικές, αρχικά χωρίς νερό και έπειτα με την παρουσία νερού όπου και εξετάστηκαν 3 διαφορετικές μέθοδοι που σχετίζονταν με την εφαρμογή των υδροστατικών πιέσεων. Σε δεύτερη φάση εφαρμόστηκαν σεισμικές δονήσεις στο φράγμα, συνδυάζοντας διάφορες περιπτώσεις στάθμης ταμιευτήρα, χρονοϊστοριών επιταχύνσεων και μεθόδου. Οι μέθοδοι που εκτελέστηκαν οι σεισμικές αναλύσεις ήταν η ψευδοστατική μέθοδος και η μέθοδος τάσεων – παραμορφώσεων.

Εν κατά κλείδι έγινε σύγκριση των προαναφερμένων αναλύσεων, μέσω των αποτελεσμάτων των μέγιστων επιταχύνσεων και των οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων , με πρωταρχικό στόχο την εξαγωγή διάφορων συμπερασμάτων που αφορούν τα ζητήματα της ευστάθειας του φράγματος Ταυρωπού, και δευτερευόντως την εύρεση μερικών επεκτάσεων της παρούσας εργασίας, ώστε να αναλυθεί το συγκεκριμένο φράγμα περαιτέρω.

Abstract

The target of this diploma thesis is the study of the double – curved arched dam of Tavropos, under static and seismic conditions. The problem of accelerations and stresses, which are developing at the dam, is being analyzed with the use of some characteristic points on it, in order to be identified the parameters that affect the stability of dam. In essence, all of those analyzes that need to be done during a study of stability of a dam, were being performed.

First of all, this thesis gives a brief description of the process that must been made to select the location and type of dams, which dams were mentioned extensively below. Afterwards a more specific reference was made for the arched dam of Tavropos (Lake Plastira) and for the co – existing constructions of this dam. Subsequently numerical analyzes were performed, specific parameters. Analysis was executed using Plaxis – 2D software. Plaxis – 2D is a finite element software which is mainly used to solve geotechnical issues in two dimensions.

More specifically, in the first phase analysis that carried out was static without water and afterwards with the presence of water. In static analysis with the presence of water were examined 3 different types that is related with the generation of water pressures. In the second phase seismic vibrations were applied in the numerical simulation, combining different cases, for instance different reservoir levels, different acceleration timelines and different method of seismic analysis. The method of seismic analysis which were used were the pseudostatic analysis and dynamic analysis.

In conclusion, a comparison between the above analysis that mentioned was made through the results of the maximum accelerations and maximum values of horizontal and vertical stresses, with the primary goal the outcome of conclusions that are related to stability issues of the Tavropo's dam. Secondary goal was to find and suggest some extensions of this thesis in order to analyze further the arched dam of Tavropos.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8

2. ΦΡΑΓΜΑΤΑ 12

2.1 Ιστορική αναδρομή φραγμάτων 12

2.2 Διαδικασία επιλογής τοποθεσίας και τύπου φράγματος 12

2.2.1 Πηγές άντλησης των δεδομένων επιλογής τοποθεσίας του φράγματος 13

2.2.2 Τύποι φραγμάτων 16

2.2.2.1 Φράγματα βαρύτητας 17

2.2.2.2 Φράγματα αντηριδωτά 18

2.2.2.3 Τοξωτά φράγματα 19

2.2.2.4 Φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC) 20

2.2.2.5 Χωμάτινα φράγματα 22

2.2.2.6 Λιθορριπτά φράγματα 23

2.3 Βοηθητικά έργα φράγματος 26

2.3.1 Ανάντη πρόφραγμα 26

2.3.2 Υπερχειλιστής – Εκχειλιστής 27

2.3.3 Εκκενωτής πυθμένα 29

2.3.4 Συστήματα εκτροπής 29

2.3.5 Άλλα έργα υδροληψίας 30

2.4 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις και τάσεις φραγμάτων 31

2.5 Οφέλη και επιπτώσεις φραγμάτων 32

2.5.1 Οφέλη Φραγμάτων 32

2.5.2 Επιπτώσεις φραγμάτων 33

2.6 Λόγοι αστοχιών φραγμάτων 34

3. Τοξωτό φράγμα Ταυρωπού (Λίμνη Πλαστήρα) 42

3.1 Η ιστορία της κατασκευής του φράγματος και γενικά στοιχεία 42

3.2 Υδρολογικά στοιχεία λεκάνης απορροής του φράγματος 44

3.3 Γεωλογία και σεισμολογία της περιοχής 45

3.4 Κατασκευή και γεωμετρία του φράγματος 47

3.5 Τα συνοδά έργα του φράγματος Ταυρωπού 48

3.6 Οι ωφέλειες από την λειτουργία του φράγματος Ταυρωπού 58

4. Αριθμητική προσομοίωση του φράγματος 62

4.1 Εισαγωγή 62

4.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε 62

4.2.1 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Input Program 64

4.2.2 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Calculation Program 73

4.2.3 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Output Program..... 76
4.2.4 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Curves Program 77
4.3 Στατικές Αναλύσεις..... 77
4.3.1 Στατική Ανάλυση χωρίς νερό στον ταμιευτήρα 78
4.3.2 Στατική Ανάλυση με παρουσία νερού στον ταμιευτήρα (+776 m)..... 81
4.3.2.1 Σύμπτυξη των αποτελεσμάτων για την στάθμη του ταμιευτήρα (+776 m).... 89
4.3.3 Στατική ανάλυση με παρουσία νερού στον ταμιευτήρα (+792 m)..... 90
4.3.3.1 Σύμπτυξη των αποτελεσμάτων για την στάθμη του ταμιευτήρα (+792 m).... 96
4.4 Σεισμικές Αναλύσεις..... 98
4.4.1 Ψευδοστατική ανάλυση 98
4.4.1.1 Ψευδοστατική ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού..... 100
4.4.1.2 Ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα – Μέθοδος Ground water calculation..... 116
4.4.1.3 Ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα – Μέθοδος δημιουργίας του νερού με την μορφή υλικού 139
4.4.2 Μέθοδος των τάσεων – παραμορφώσεων (Δυναμικές Αναλύσεις) 162
4.4.2.1 Δυναμική Ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος..... 164
4.4.2.2 Δυναμική ανάλυση με την παρουσία νερού (+ 776 m)..... 184
4.4.2.3 Δυναμική ανάλυση με την παρουσία νερού (+ 792 m)..... 204
4.4.2.4 Συγκεντρωτικός πίνακας επιταχύνσεων και τάσεων – Σεισμική διέγερση παλμού Ricker (f = 2Hz) 224
4.4.2.5 Συγκεντρωτικός πίνακας επιταχύνσεων και τάσεων – Σεισμική διέγερση 225A 225
4.4.2.6 Συμπεράσματα δυναμικών αναλύσεων..... 226
4.4.3 Σύγκριση δυναμικών αναλύσεων με τις ψευδοστατικές..... 227
5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 230
5.1 Συμπεράσματα 230
5.2 Προτάσεις..... 232
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 232

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Νερό, το πιο σημαντικό αγαθό. Ο πολύτιμος αυτός πόρος του πλανήτη Γη συμβάλλει τα μέγιστα στην ύπαρξη της ίδιας της ζωής. Χωρίς το νερό δεν θα υπήρχε ζωή για κανέναν ων πάνω στον πλανήτη. Η ύπαρξη των ανθρώπων, της χλωρίδας και της πανίδας και η συνέχιση τους εξαρτώνται από αυτό. Η μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη αλλά και η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού απαιτεί ολοένα και μεγαλύτερη ανάπτυξη των συστημάτων των υδατικών πόρων. Όλα τα παραπάνω μπορεί να τα δει κανείς ακόμα και αν ανατρέξει στο παρελθόν και στην ιστορία του ανθρώπου. Από την αρχαιότητα που οι άνθρωποι οργανώνονταν σε κοινωνίες, μεγάλοι πολιτισμοί αναπτύχθηκαν κοντά σε όχθες ποταμών και λιμνών. Οι πολιτισμοί αυτοί στην προσπάθεια τους να βελτιώσουν το βιοτικό τους επίπεδο δημιουργούσαν νέα τεχνολογικά έργα, για λόγους ύδρευσης και άρδευσης (αγροτική χρήση κυρίως). Ένα από αυτά τα τεχνολογικά έργα είναι και τα φράγματα. Πριν από περίπου 6000 χρόνια ο άνθρωπος στην προσπάθεια του να καλύψει τις ανάγκες του σε νερό κατασκεύασε τα πρώτα χωμάτινα φράγματα. Λέγεται πως το αρχαιότερο φράγμα κατασκευάστηκε στην Ιορδανία το 4000 π.Χ. περίπου και ήταν χωμάτινη όπως είναι φυσικό. Επίσης στην Ελλάδα το πρώτο φράγμα ήταν το Μυκηναϊκό Φράγμα Τίρυνθας (Ναύπλιο) που κατασκευάστηκε από τεράστιους ογκόλιθους πιθανότατα τον 13^{ο} αιώνα π.Χ. Σκοπός του φράγματος αυτού ήταν να εκτρέπει τα νερά ενός χειμάρρου που κατευθύνονταν στην αρχαία Τίρυνθα και προκαλούσε πλημμύρες. Το φράγμα αυτό εξακολουθεί να λειτουργεί ακόμη εδώ και 3000 χρόνια περίπου, προστατεύοντας έτσι την περιοχή από τις εποχιακές πλημμύρες. Η Ελλάδα αυτή τη στιγμή αριθμεί 135 μεγάλα φράγματα, με ύψος μεγαλύτερο από 15 μέτρα, ενώ παγκοσμίως υπάρχουν συνολικά 7000 μεγάλα φράγματα.

Το φράγμα είναι ένα τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος με σκοπό την αναχαίτιση της ροής. Το νερό που ουσιαστικά συγκρατείται μπροστά (ανάντη) από το ανάχωμα του φράγματος σχηματίζει μία τεχνητή λίμνη που ονομάζεται ταμιευτήρας του φράγματος. Στον ταμιευτήρα συνεπώς αποθηκεύεται νερό το οποίο, με βάση έναν ορθολογικό προγραμματισμό για την διαχείριση των υδατικών πόρων, θα αξιοποιηθεί για την κάλυψη μελλοντικών αναγκών του ανθρώπου. Οι ανάγκες αυτές είναι συνήθως ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής πέριξ του φράγματος από το οποίο αντλείτε το νερό. Επίσης το νερό του ταμιευτήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για να παραχθεί ενέργεια, στην περίπτωση των φραγμάτων υδροηλεκτρική ενέργεια, για τις γύρω περιοχές, ωστόσο τα φράγματα αυτά είναι πιο πολύπλοκες κατασκευές.

Τα φράγματα είναι έργα πολύ ιδιαίτερα και δύσκολα και δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν σε έναν συγκεκριμένο τρόπο κατασκευής. Εκτός της κατασκευής του φράγματος αυτού καθαυτού θα πρέπει να γίνουν και τα συμπαρομαρτούντα έργα του φράγματος, τα οποία είναι :

1. Το κυρίως ανάντη πρόφραγμα
2. Ο υπερχειλιστής – εκχειλιστής
3. Ο εκκενωτής πυθμένα
4. Συστήματα εκτροπής υδάτινων επιφανειών

Κάθε ένα φράγμα έχει την δική του λειτουργικότητα και το δικό του φυσικό περιβάλλον που το επηρεάζουν και ιδιαίτερα το φυσικό περιβάλλον είναι αυτό που επιδρά και κατά την φάση της κατασκευής αλλά και της λειτουργίας του. Γενικότερα η κατασκευή ενός φράγματος, μετά και την δημιουργία του ταμιευτήρα, φέρνει πολλές αλλαγές στο τοπίο

(την εικόνα της περιοχής) και διαταραχές στο φυσικό περιβάλλον. Ιδιαίτερα στην περιοχή που κατακλύζεται από τον ταμιευτήρα, το υπέδαφος καταπονείται από τις αναπτυσσόμενες πιέσεις λόγω του νερού. Εκτός όμως από τις πιέσεις, το νερό δημιουργεί επίσης προβλήματα διαβρώσεων του εδάφους και κατολισθήσεων στην περιοχή το φράγματος. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να είναι καταστροφικά για το φράγμα γι' αυτό και πρέπει να προβλέπονται από τους μελετητές στην φάση της προμελέτης και της μελέτης. Παρόλα τα προβλήματα αυτά, ζημιές μπορούν να προκληθούν και από φυσικούς παράγοντες, δηλαδή τον σεισμό. Τα φράγματα της είναι λογικό κινδυνεύουν από τους σεισμούς και κατά την φάση της κατασκευής τους αλλά και κατά τη φάση της λειτουργίας τους. Οι επιπτώσεις ενός σεισμού ενδεχομένως στην φάση της κατασκευής να μην είναι ιδιαίτερα καταστροφικές, εφόσον δεν γίνεται λόγος για ολική κατάρρευση της κατασκευής. Αντιθέτως στην φάση της λειτουργίας του οι επιπτώσεις μπορεί να είναι πάρα πολύ σημαντικές, αφού ακόμη και αν δεν καταρρεύσει το φράγμα, το νερό του ταμιευτήρα μπορεί να εξαπλωθεί κατάντη του φράγματος και να έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζωών και περιουσιών. Για το λόγο αυτό στις φάσεις προμελέτης και μελέτης θα πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση στην περιοχή κατασκευής του έργου και ιδιαιτέρως στην τοπογραφία, γεωλογία και σεισμολογία της περιοχής.

Οι μελέτες φραγμάτων που προαναφέρθηκαν παραπάνω χωρίζονται σε τέσσερα στάδια :

1. Προκαταρκτική Μελέτη
2. Προμελέτη
3. Οριστική Μελέτη
4. Μελέτη Εφαρμογής.

1. Στην φάση της προκαταρκτικής μελέτης προτείνονται διάφορες λύσεις σχετικά με τον τύπο και το ύψος του φράγματος, ενώ γίνεται και γενική περιγραφή της περιοχής και του υδατικού δυναμικού στην περιοχή που προτίθεται να κατασκευαστεί το φράγμα. Επίσης παρουσιάζεται η γεωλογία και βασικά γεωτεχνικά θέματα της ευρύτερης περιοχής, αλλά και διάφορες άλλες εναλλακτικές λύσεις σε ότι αφορά τη θέση, το ύψος και τον τύπο του φράγματος.

2. Στην προμελέτη των φραγμάτων ο σκοπός είναι η ανάλυση όλων των εναλλακτικών λύσεων και η επιλογή της λύσης η οποία διακρίνεται να είναι τεχνικοοικονομικά η καλύτερη ως προς την έκταση και την μορφή των έργων. Επίσης διερευνάται και η επίλυση όλων των βασικών προβλημάτων για την κατασκευή του.

3. Στην φάση της οριστικής μελέτης επιλύονται όλα τα επί μέρους προβλήματα που έχουν επισημανθεί στο προηγούμενο στάδιο (Προμελέτη). Σε κάποιες περιπτώσεις αυτό γίνεται με την εκτέλεση νέων μελετών και σε άλλες με την εκτέλεση συμπληρωματικών ερευνών. Ακόμη σκοπός της οριστικής μελέτης είναι η σύνταξη των οριστικών σχεδίων λεπτομερειών βασισμένων σε τοπογραφικά στοιχεία που έχουν προέλθει από εργασίες του πεδίου δηλαδή χάραξη επί του εδάφους. Στην οριστική αυτή μελέτη επιλύονται και τα κατασκευαστικά προβλήματα των έργων και γίνεται η σύνταξη των Τεχνικών προδιαγραφών για τις μεθόδους κατασκευής και τον έλεγχο της ποιότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Η μελέτη αυτή θα πρέπει να είναι ολοκληρωμένη ώστε να μπορεί να γίνει η κατασκευή των έργων με βάση τα στοιχεία που περιέχονται στην ίδια χωρίς να χρειάζεται να ανατρέξει κάποιος στα δύο προηγούμενα στάδια μελέτης.

4. Η μελέτη εφαρμογής ουσιαστικά είναι η εξέλιξη της οριστικής μελέτης και περιλαμβάνει τα τεύχη δημοπράτησης και συγγραφής υποχρεώσεων, τα σχέδια κατασκευαστικών λεπτομερειών για όλα τα έργα ενός φράγματος, τεύχη τεχνικών περιγραφών και προδιαγραφών και τον χρονικό προγραμματισμό του έργου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η κατανόηση των σταδίων που απαιτούνται κατά την φάση της μελέτης των φραγμάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό των φραγμάτων, όπου πολύτιμη είναι και η συνεισφορά του Τοπογράφου Μηχανικού με την βοήθεια και άλλων ειδικοτήτων της του Πολιτικού Μηχανικού και των Γεωλόγων. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός και η συχνή παρακολούθηση των φραγμάτων συμβάλλουν στην ύπαρξη μιας συνολικής εικόνας της συμπεριφοράς του φράγματος. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να προβλεφθούν έγκαιρα μελλοντικές αστοχίες. Το φράγμα το οποίο μελετάται είναι το φράγμα του Ταυρωπού, ταμιευτήρας του οποίου είναι η πολύ γνωστή λίμνη Πλαστήρα. Το φράγμα του Ταυρωπού είναι ένα τοξωτό φράγμα από σκυρόδεμα.

Αρχικά εξετάστηκε η κατασκευή του φράγματος αλλά και του υπεδάφους πάνω στο οποίο εδράζεται στατικά χωρίς παρουσία νερού ανάντη. Έπειτα με την παρουσία πλέον νερού στα ανάντη του φράγματος, αυτό εξετάστηκε ξανά στατικά λόγω των ωθήσεων που του ασκούνται από τον ταμιευτήρα του. Διακρίθηκαν δύο περιπτώσεις σε αυτό το στάδιο. Η πρώτη ήταν όταν το νερό ήταν στην Κατώτατη Στάθμη Υδροληψίας (Κ.Σ.Υ) ενώ η δεύτερη όταν το νερό βρισκόταν στην Ανώτατη Κανονική Στάθμη (Α.Κ.Σ). Στα επόμενα στάδια το φράγμα υποβλήθηκε σε διάφορες σεισμικές επιταχύνσεις, ενώ εξετάστηκε και ψευδοστατικά αλλά και δυναμικά. Σε πρώτη φάση το φράγμα εξετάστηκε με άδειο ταμιευτήρα, ενώ σε δεύτερη εξετάστηκε με το νερό να βρίσκεται στην Κατώτατη αλλά και στην Ανώτατη Στάθμη υδροληψίας. Στο στάδιο της μελέτης, όπου εξετάστηκε η σεισμική συμπεριφορά του φράγματος με την μέθοδο των τάσεων παραμορφώσεων αλλά και την ύπαρξη νερού, υπολογίστηκαν οι οριζόντιες επιταχύνσεις αλλά και οι τάσεις που ασκούνται στο σώμα του φράγματος εξαιτίας του σεισμού. Συγκρίνοντας τις δύο αυτές τελευταίες φάσεις, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το πως λειτουργεί το νερό σε σχέση με την επιτάχυνση του φράγματος σε χαρακτηριστικά σημεία. Το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση του φράγματος του Ταυρωπού είναι το Plaxis 2D. Το λογισμικό αυτό είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που είναι ειδικό για γεωτεχνικά έργα. Το φράγμα αυτό με την πολύπλοκη γεωμετρία προσομοιώθηκε δισδιάστατα και για το λόγο αυτό οι αναλύσεις που προέκυψαν, κυρίως με τη μέθοδο των τάσεων παραμορφώσεων, δίνουν αποτελέσματα (επιταχύνσεις σε χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος π.χ. στην στέψη του) που δεν είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικά σε σχέση με τα αληθινά. Αυτό συμβαίνει διότι οι πραγματικές συνθήκες πάκτωσης στα άκρα είναι πολύ δύσκολο να μεταφερθούν στο ομοίωμα. Παρόλα αυτά από τις αναλύσεις αυτές μπορούν να εξαχθούν πολλά και χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διαρθρώνεται σε 5 κεφάλαια :

Στο πρώτο κεφάλαιο που αποτελεί την εισαγωγή αναφέρθηκε η χρησιμότητα του νερού στην ζωή των ανθρώπων και η ανάγκη τους για την δημιουργία νέων τεχνολογικών κατασκευών ώστε να καλύπτουν τις καθημερινές ανάγκες τους. Έγινε επίσης μία μικρή αναδρομή στο πρώτο Ελληνικό φράγμα και μία περιγραφή του σκοπού της διπλωματικής αυτής, κάνοντας μια συνοπτική περιγραφή των σταδίων που χρησιμοποιούνται για τις μελέτες πριν την κατασκευή ενός φράγματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή των φραγμάτων και των κατηγοριών τους, της επίσης και των κριτηρίων με τα οποία επιλέγεται ο τύπος και η θέση του φράγματος. Αναλύονται επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φραγμάτων αλλά και τα προβλήματα και οι ζημιές που είναι δυνατό να προκληθούν από και προς τα φράγματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φράγμα του Ταυρωπού το οποίο είναι ένα τοξωτό φράγμα βαρύτητας. Αναφέρεται ο σκοπός του φράγματος αυτού, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του φράγματος και τα συμπαρομαρτούντα έργα που έγιναν στην ευρύτερη περιοχή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των αναλύσεων που προαναφέρθηκαν διεξοδικά. Επίσης περιγράφονται οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη του αντισεισμικού σχεδιασμού των φραγμάτων. Στη συνέχεια δίνονται οι αναλύσεις που έγιναν (στατικές, ψευδοστατικές και δυναμικές) της επίσης εικόνες των μετατοπίσεων και διαγράμματα των επιταχύνσεων και των ολικών τάσεων του φράγματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν μεταξύ τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που προέκυψαν μέσω της σύγκρισης τους (στο προηγούμενο κεφάλαιο) και αναφέρονται οι προτάσεις που προέκυψαν από την συγκεκριμένη διπλωματική.

Τέλος δίνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

2. ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Το φράγμα, της ήδη προαναφέρθηκε, είναι ένα τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός υδατορεύματος για να ανακόψει την συνέχεια της ροής του, με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντικές ανάγκες. Ένα φράγμα κατασκευάζεται με στόχο να καλύψει πολλές ανθρώπινες καθημερινές ανάγκες. Γενικότερα μπορεί να πει κανείς πως ο σκοπός της κατασκευής ενός φράγματος είναι :

1. Η άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών
2. Η ύδρευση οικισμών, πόλεων και βιομηχανικών περιοχών
3. Η ρύθμιση της παροχής φυσικών υδατορευμάτων της περιοχής
4. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
5. Η αντιπλημμυρική προστασία
6. Η δημιουργία τουριστικών εγκαταστάσεων

Το πιθανότερο είναι πως τα φράγματα κατασκευάζονται για να εξυπηρετούν παραπάνω από έναν σκοπούς. Τα φράγματα αυτά ονομάζονται πολλαπλής σκοπιμότητας. Παραδείγματος χάρη το φράγμα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία εξυπηρετεί τόσο τις ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης της ευρύτερης περιοχής της Καρδίτσας, όσο και τις ανάγκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικότερα η μελέτη της κατασκευής ενός φράγματος σχετίζεται και ανάλογα με τον σκοπό που αυτό είναι προγραμματισμένο να εξυπηρετήσει. Με αυτό τον τρόπο βρίσκεται δηλαδή ο καταλληλότερος τύπος φράγματος αλλά και οι διαστάσεις του (ύψος στέψης, πλάτος). Ωστόσο της ειπώθηκε και στην εισαγωγή τα φράγματα δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν, επειδή το καθένα έχει το δικό του φυσικό περιβάλλον, τη δικιά του λειτουργικότητα και τους δικούς του φυσικούς πόρους.

2.1 Ιστορική αναδρομή φραγμάτων

Η κατασκευή των τεχνικών αυτών έργων ξεκίνησε περίπου πριν από 6000 χρόνια, όταν και κατασκευάστηκαν τα πρώτα χωμάτινα φράγματα. Σκοπός του ανθρώπου ήταν να καλύψει τις βασικές καθημερινές του ανάγκες για νερό (ύδρευση) και των καλλιεργούμενων εδαφών του (άρδευση). Το αρχαιότερο γνωστό φράγμα χτίστηκε περίπου το 4000 π.Χ. στην πόλη Jawa της Ιορδανίας. Επίσης γίνονται αναφορές και για φράγμα που κατασκευάστηκε το 4000 π.Χ. στην Αίγυπτο, στον ποταμό Νείλο που διατηρήθηκε 4500 χρόνια. Το αρχαιότερο γνωστό φράγμα στην Ελλάδα είναι αυτό στην Μυκηναϊκή Αργολίδα, το Μυκηναϊκό Φράγμα Τίρυνθας. Σπουδαίο επίσης θεωρήθηκε και το αρκετά νεότερο φράγμα στην Ισπανία, το φράγμα Puentes (1753), ωστόσο καταστράφηκε το 1891.

Τα φράγματα είναι κατασκευές οι οποίες με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, βελτιώνονταν συνεχώς και γίνονταν όλο και πιο μεγάλες και πολύπλοκες. Επίσης άρχισαν να χρησιμοποιούνται περισσότερα υλικά για την κατασκευή τους ή και συνδυασμοί υλικών. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής, στην συμβολή της γεωλογίας αλλά και στην ανάπτυξη της γεωτεχνικής μηχανικής.

2.2 Διαδικασία επιλογής τοποθεσίας και τύπου φράγματος

Προτού αποφασιστεί η τοποθεσία της περιοχής που θα ανεγερθεί το φράγμα θα πρέπει να έχουν συγκεντρωθεί στην Προκαταρκτική Μελέτη όλα τα στοιχεία – δεδομένα που χρειάζονται για την περιοχή αυτή. Τα δεδομένα που χρειάζονται είναι :

1. Η τοπογραφία της περιοχής

2. Η γεωλογία της περιοχής
3. Το κλίμα της περιοχής
4. Η σεισμολογία της περιοχής
5. Τα υδατορεύματα και γενικότερα το νερό της περιοχής.

1. Η γνώση της τοπογραφίας της περιοχής χρειάζεται για να βρεθούν τα υψόμετρα και συνεπώς οι κλίσεις του εδάφους και οι οριζοντιογραφικές του ανωμαλίες.

2. Η γνώση της γεωλογίας της περιοχής είναι πολύ σημαντική αφού τα πετρώματα πάνω στα οποία θα εδράζεται το φράγμα θα πρέπει να είναι γνωστά ώστε να αποφασιστεί η δυνατότητα κατασκευής ενός ιδιόμορφου τεχνικού έργου στην περιοχή αυτή αλλά και ο τύπος του. Δηλαδή η γεωλογία της περιοχής σχετίζεται με τους σχηματισμούς του εδάφους, τη δομή του και τους βαθμούς διάβρωσης και αποσάθρωσης του εδαφικού υλικού.

3. Η γνώση του κλίματος της περιοχής επίσης είναι σημαντική, ώστε να γνωρίζει ο εκάστοτε μηχανικός αν η περιοχή έχει ανάγκη από νερό λόγω ξηρασίας, ή αν η περιοχή κινδυνεύει από πλημμύρες λόγω έντονων βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια του έτους.

4. Ίσως το πιο βασικό στοιχείο που θα πρέπει να είναι γνωστό κατά την μελέτη κατασκευής ενός φράγματος, είναι η σεισμολογία της περιοχής ή και της πέριξ περιοχής, στην οποία αυτό θα χτιστεί. Αρχικά θα πρέπει να μελετηθεί η ύπαρξη σεισμικών ρηγμάτων της περιοχής γύρω από το φράγμα. Ένα φράγμα δεν είναι δυνατό να χτιστεί σε μία περιοχή που κοντά του υπάρχει κάποιο ρήγμα, πόσο μάλλον πάνω σε ενεργό σεισμικό ρήγμα. Για το λόγο αυτό η κατασκευή του θα πρέπει να γίνεται σε κάποιο σημείο που να έχει αρκετή απόσταση από το πιο κοντινό σεισμικό ρήγμα της περιοχής. Επίσης θα πρέπει να είναι γνωστές και οι σεισμικές επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή, ερευνώντας τους παλαιότερους σεισμούς που έχουν συμβεί εκεί, αλλά και τα επίκεντρα των σεισμών.

5. Τέλος σημαντική είναι και η γνώση των ρεμάτων της περιοχής της επίσης και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Γνωστές επίσης θα πρέπει να είναι οι πηγές του νερού στην περιοχή, η χημική του σύνθεση αλλά και οι αρτεσιανές πιέσεις του.

Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται είτε από κοντά πηγαίνοντας στην εκάστοτε περιοχή, είτε από την επεξεργασία φύλλων χαρτών της περιοχής. Μετά την συγκέντρωση των δεδομένων αυτών το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση τους.

2.2.1 Πηγές άντλησης των δεδομένων επιλογής τοποθεσίας του φράγματος

Για την καλύτερη επιλογή του σημείου της περιοχής, στο οποίο θα κατασκευαστεί το φράγμα, χρησιμοποιούνται τοπογραφικοί χάρτες διάφορων κλιμάκων.

Παραδείγματος χάρη χρησιμοποιούνται φύλλα χάρτου κλίμακας 1:50000 με ισοδιάσταση 20 μέτρα, χάρτες κλίμακας 1:25000 με ισοδιάσταση 10 μέτρων έως και χάρτες 1:250000 με ισοδιάσταση 20 με 30 μέτρα. Επίσης υπάρχουν χάρτες λεκάνης απορροής με κλίμακες έως και 1:2000 και ισοδιάσταση 2 μέτρων, αλλά και χάρτες της περιοχής του ταμιευτήρα οι οποίοι έχουν ακόμη μεγαλύτερη ευκρίνεια και ακρίβεια αφού δίνονται σε κλίμακες έως και 1:200 με ισοδιάσταση 1 μέτρο. Τα φύλλα χάρτου της Ελλάδας δίνονται από Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Ωστόσο μπορεί κανείς να βρει τοπικούς χάρτες και μέσω του Εθνικού Κτηματολογίου.

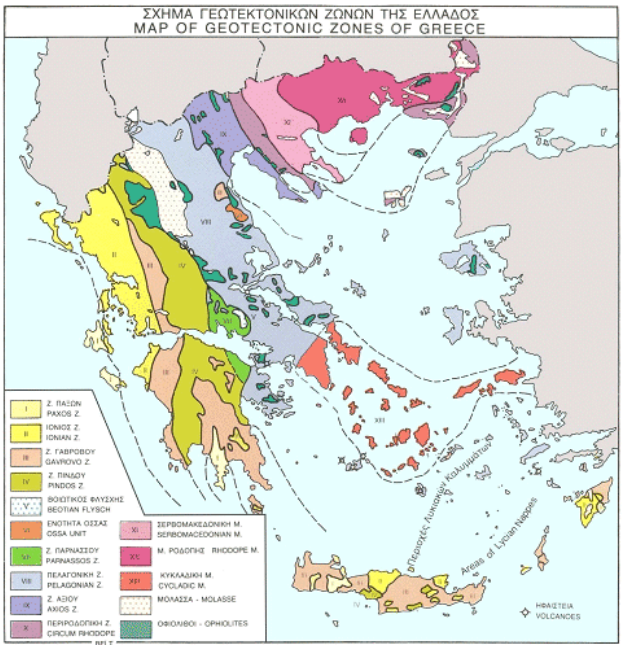
Εικόνα 2.1 Τοπογραφικό Χάρτης : Φύλλο Χάρτου ΤΥΜΠΑΚΙΟΝ 1:50000 (Πηγή : Γ.Υ.Σ.)

Άλλα εργαλεία για την επιλογή της θέσης του φράγματος είναι οι χρησιμοποίηση δορυφορικών εικόνων από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν αρκετά και σημαντικά δεδομένα για την περιοχή. Της για παράδειγμα την βλάστηση της περιοχής, την ύπαρξη υδάτινων επιφανειών, τις χρήσεις γης και άλλα.

Ιδιαίτερα λεπτομερής αλλά και χρονοβόρα και ακριβή είναι η αποτύπωση της περιοχής ενδιαφέροντος με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων. Η μέθοδος αυτή απαιτεί προγραμματισμό πτήσης και ίδρυση σημείων ελέγχου στο έδαφος για την λήψη αεροφωτογραφιών και για το λόγο αυτό θα έχει και το ανάλογο κόστος. Παρόλα αυτά μπορούν να παραχθούν χάρτες κλίμακας έως και 1:200 οι οποίοι θα είναι ιδιαίτερα κατατοπιστική σχετικά με την τοπογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής.

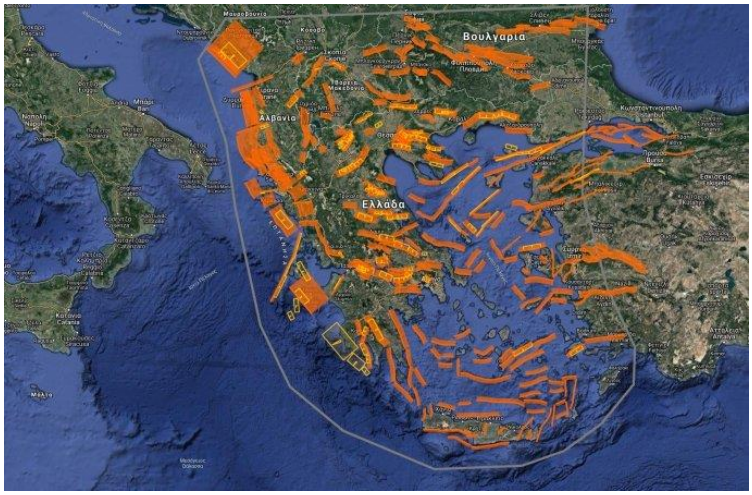
Δεδομένα για την τοπογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής μπορούν να αντληθούν επίσης από γεωμορφολογικούς χάρτες. Τα δεδομένα αυτά σχετίζονται προφανώς με τις κλίσεις που υπάρχουν στην περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και με την ύπαρξη υδατορευμάτων.

Αναφορά ωστόσο πρέπει να γίνει και στους γεωλογικούς χάρτες αφού η γνώση της γεωλογίας της περιοχής είναι εξίσου σημαντική. Τα δεδομένα που χρειάζεται να εξαχθούν από τους γεωλογικούς χάρτες είναι αρχικά τα εδάφη και οι ασυνέχειες μεταξύ τους. Επίσης τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις κλίσεις του εδάφους, την ύπαρξη υπογείων νερών, τις ισοϋψείς καμπύλες στην περιοχή και τις γραμμές ασυνεχειών μεταξύ των εδαφών. Οι γενικοί γεωλογικοί χάρτες είναι κλίμακας 1:5000 και 1:2500, ωστόσο υπάρχουν και χάρτες με περισσότερη λεπτομέρεια οι οποίοι είναι κλίμακας 1:1000 ή και ακόμα καλύτερα 1:500.



Εικόνα 2.2 Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας

Σε ότι αφορά την σεισμολογία της περιοχής, εκτός από τους γεωλογικούς χάρτες από τους οποίους προκύπτουν στοιχεία για τις ασυνέχειες των εδαφών μεταξύ τους, υπάρχουν και τεκτονικοί χάρτες οι οποίοι προκύπτουν μέσω των γεωλογικών χαρτών. Επίσης υπάρχουν πολλές βάσεις δεδομένων στην Ελλάδα, που έχουν δημιουργηθεί από πανεπιστημιακά ιδρύματα, και δίνονται πληροφορίες για τα επίκεντρα των σεισμών ενδιάμεσου και επιφανειακού βάθους.



Εικόνα 2.3 Ρήγματα Ελλάδας

2.2.2 Τύποι φραγμάτων

Η κατασκευή ενός φράγματος είναι αν μη τι άλλο πολυδάπανη. Μακροπρόθεσμα ωστόσο ένα τέτοιο έργο μπορεί να έχει μεγάλα οικονομικά οφέλη. Τα φράγματα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής τους, με το μέγεθος τους, την χρησιμότητα τους και την σκοπιμότητα τους.

Ανάλογα με τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής διακρίνονται σε :

1. Άκαμπτα φράγματα (από σκυρόδεμα)
    - Φράγματα Βαρύτητας
    - Αντηριδωτά Φράγματα
    - Τοξωτά Φράγματα
    - Μικτά Φράγματα RCC (από Ισχνό Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα)
2. Εύκαμπτα φράγματα
    - Χωμάτινα Φράγματα
    - Λιθορριπτά Φράγματα με πυρήνα
    - Λιθορριπτά Φράγματα με ασφαλτικό στοιχείο
    - Λιθορριπτά Φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

Ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται σε :

1. Μικρά Φράγματα
    - Το ύψος των φραγμάτων αυτών δεν ξεπερνάει τα 15 μέτρα
2. Μεγάλα Φράγματα
    - Το ύψος των φραγμάτων αυτών είναι πάνω από 15 μέτρα. Επίσης όμως μεγάλα φράγματα είναι και αυτά που το ύψος τους είναι από 5 έως 15 μέτρα ωστόσο :
        - Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3000000 m^3 (κυβικά μέτρα)
        - Το μήκος του υπερχειλιστή θα πρέπει να είναι μικρότερο από 500 μέτρα
        - Η μέγιστη ροή εκκένωσης θα πρέπει να είναι πάνω από 2000 m^3/s (κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο).

Ανάλογα με τη χρησιμότητά τους ταξινομούνται σε :

1. Φράγματα αποθήκευσης νερού
   Το νερό του εκάστοτε υδατορεύματος συγκρατείτε στο ανάντη μέρος του φράγματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται ο ταμιευτήρας του. Το νερό του ταμιευτήρα στην ουσία σχηματίζει μία τεχνητή λίμνη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανά πάσα στιγμή αν και εφόσον υπάρξει κάποιο πρόβλημα (π.χ. κάποια περίοδος ξηρασίας).
2. Φράγματα ρύθμισης
   Τα φράγματα αυτά ρυθμίζουν τη ροή του νερού της υδάτινης επιφάνειας που είναι χρειάζεται ή και δεν πρέπει να περάσει από το αντίστοιχο φράγμα. Δηλαδή είναι υπεύθυνα για την παροχή του νερού στους οικισμούς και την αποφυγή των πλημμυρών.

3. Φράγματα εκτροπής
   Τα φράγματα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται προσωρινά κατά την διάρκεια κατασκευής του βασικού φράγματος και βρίσκονται κοντά στην περιοχή των έργων. Ο ρόλος τους είναι να εκτρέπουν την πορεία της υδάτινης επιφάνειας προς κάποια άλλη κατεύθυνση για όσο εκτελούνται εργασίες στην περιοχή ανέγερσης του φράγματος. Υπάρχουν και περιπτώσεις όμως που τα φράγματα εκτροπής δεν είναι προσωρινά, αλλά αποτελούν συνοδό έργο του φράγματος με σκοπό την εκτροπή της ροή του νερού σε αγωγούς ώστε αυτό να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση ή άρδευση.
4. Φράγματα ανάσχεσης
   Σκοπός τους είναι η μείωση της ταχύτητας ροής της εκάστοτε υδάτινης επιφάνειας για τον εμπλουτισμό των υδροφορέων και την άμεση ανακοπή των καταστρεπτικών συνεπειών της.

Ανάλογα με την σκοπιμότητα τους ταξινομούνται σε :

1. Αρδευτικά
2. Υδρευτικά
3. Υδροηλεκτρικά (παραγωγή ενέργειας)

Τα φράγματα αυτά ενδέχεται να είναι διπλής ή και ακόμα πολλαπλής σκοπιμότητας με συνδυασμό των παραπάνω διακρίσεων ανά δύο ή και περισσότερων.

Αναλυτικότερα οι κατηγορίες των φραγμάτων ανάλογα με την γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής διακρίνονται σε :

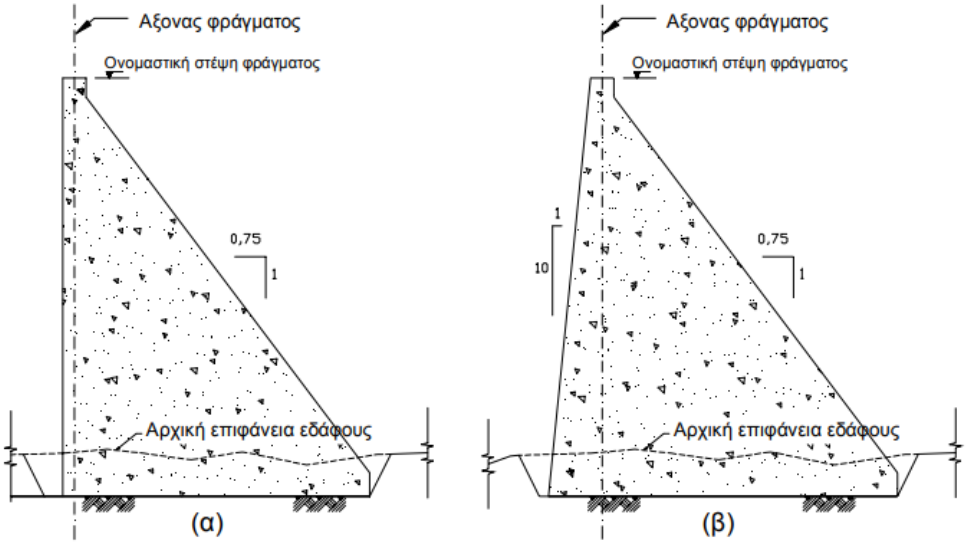
2.2.2.1 Φράγματα βαρύτητας

Τα φράγματα βαρύτητας είναι κατασκευασμένα αποκλειστικά από σκυρόδεμα και μόνο. Στα φράγματα αυτά το ίδιο το βάρος του εξασφαλίζει την παραλαβή των δυνάμεων ανατροπής και ολίσθησης που τους ασκεί του νερό του ταμιευτήρα. Το φράγμα βαρύτητας αντιστέκεται στην ολίσθηση λόγω ανάπτυξης δυνάμεων τριβής του υλικού του με τη θεμελίωση του. Επίσης αντιστέκεται στην ανατροπή λόγω των σταθεροποιητικών ροπών που δημιουργούνται από το ίδιο το βάρος του. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και φράγμα βαρύτητας. Τα φράγματα αυτά κατασκευάζονται κυρίως σε στενές κοιλάδες όπου τα εδάφη είναι βραχώδη και ημιβραχώδη. Τα εδάφη αυτά έχουν μεγάλη αντοχή και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι συνιζήσεις του φράγματος και οι καθιζήσεις του εδάφους. Σε σχέση με τα γεωφράγματα (χωμάτινα) πλεονέκτημα των φραγμάτων βαρύτητας είναι το γεγονός ότι ο υπερχειλιστής τους είναι τμήμα του φράγματος και όχι ξεχωριστό έργο που τοποθετείται στο ένα από τα δύο αντερείσματα, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ένα πρόσθετο κόστος.

Στα φράγματα αυτά αναπτύσσονται κυρίως υδροστατικές δυνάμεις στα ανάντη και ενδεχομένως στα κατάντη του φράγματος (σε μικρότερο βαθμό), το ίδιο το βάρος του φράγματος, η δύναμη της άνωσης και η ενεργός ορθή πίεση του εδάφους στη βάση του φράγματος αλλά και η δύναμη της τριβής με το έδαφος. Επίσης αναπτύσσονται δυνάμεις λόγω της πρόσκρουσης κορμών ή πάγου και λόγω κυματισμών στο ανάντη τμήμα του φράγματος. Σε περιπτώσεις σεισμού στο φράγμα αναπτύσσεται η υδροδυναμική πίεση του νερού του ταμιευτήρα αλλά και η αδρανειακή σεισμική δύναμη που ασκείται στο σώμα του φράγματος.

Εικόνα 2.4 Φράγμα Βαρύτητας Grande Dixence (Ελβετία)

(Πηγή : http://www.grande-dixence.ch/en)



Εικόνα 2.5 Διατομή φράγματος βαρύτητας

(Πηγή : Ν.Ι. Μουτάφης, Αθήνα 2009)

2.2.2.2 Φράγματα αντηριδωτά

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των αντηριδωτών φραγμάτων είναι η ύπαρξη κενών σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας και ουσιαστικά μπορεί να πει κανείς πως είναι κούφια φράγματα βαρύτητας. Κατά συνέπεια μειώνεται ο όγκος του σκυροδέματος του φορέα, άρα και το κόστος κατασκευής τους, αλλά αυξάνεται το μήκος της θεμελίωσης κατά μήκος της κοίτης της υδάτινης επιφάνειας. Το πλάτος θεμελίωσης πρέπει να είναι μεγάλο για να μειώνονται οι τάσεις που ασκούνται στο έδαφος. Τα αντηριδωτά φράγματα αποτελούνται από δύο μέρη. Το ένα μέρος είναι ένα λεπτό τοίχωμα σκυροδέματος (πλάκα) επίπεδο ή καμπυλωτό σχετικά μικρού βάρους που τοποθετείται κάθετα στον άξονα του υδατορεύματος που παραλαμβάνει την υδροστατική πίεση του ταμιευτήρα και την μεταβιβάζει στις αντηρίδες. Το δεύτερο μέρος αποτελείται από τις αντηρίδες οι οποίες είναι παράλληλες στο

υδατόρευμα και παραλαμβάνουν τις δυνάμεις από το τοίχωμα σκυροδέματος και τις μεταφέρουν στο έδαφος.

Γενικά όταν η κοιλάδα δεν είναι ιδιαίτερα στενή και άρα μήκος του φράγματος μπορεί να είναι μεγάλο και το ύψος σχετικά χαμηλό, τότε αντί για φράγμα βαρύτητας είναι καλύτερα να κατασκευαστεί αντηριδωτό φράγμα.

Εικόνα 2.6 Αντηριδωτό Φράγμα Λάδωνα (Νομός Αρκαδίας)

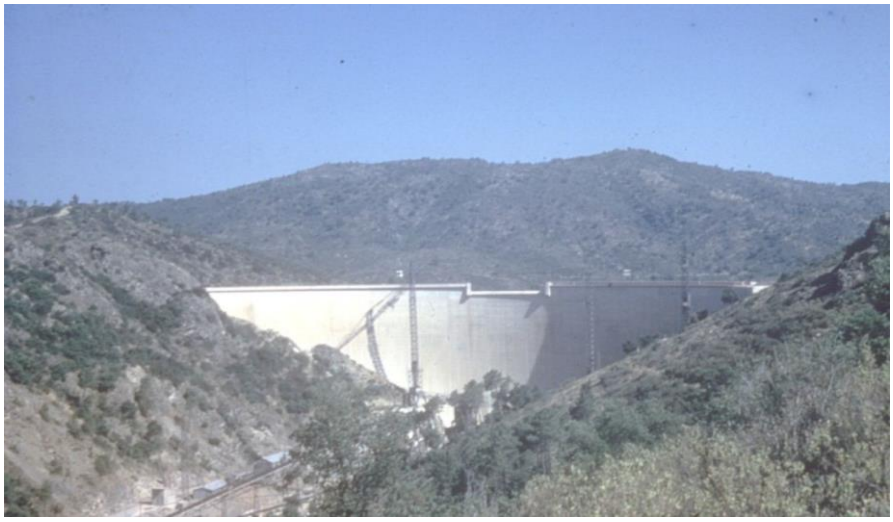
(Πηγή : https://www.e-gortynia.gr)

2.2.2.3 Τοξωτά φράγματα

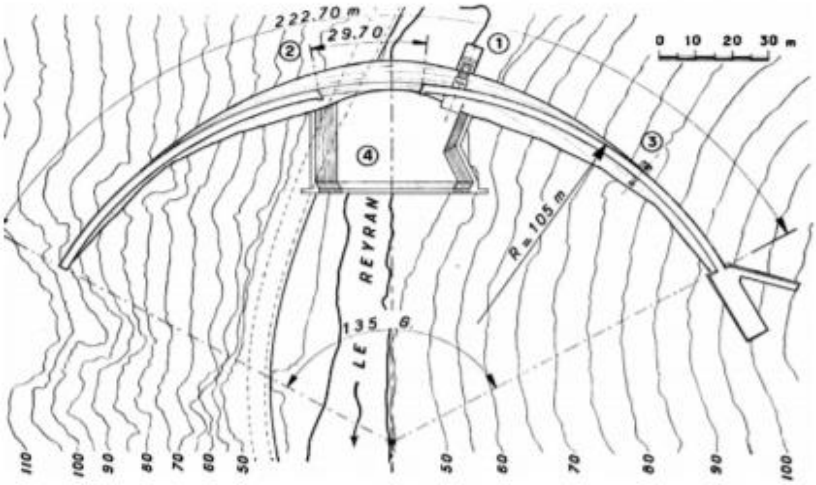
Τα τοξωτά φράγματα αποτελούνται επίσης και αυτά από σκυρόδεμα. Ονομάζονται τοξωτά διότι σε κάτοψη έχουν τοξοειδή μορφή. Τα φράγματα αυτά έχουν μικρό πάχος με αποτέλεσμα να επηρεάζονται αρκετά από την θερμοκρασία της περιοχής στην οποία αυτά εδράζονται. Επίσης επηρεάζονται και από το ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ανάντη πλευράς τους βρέχεται με νερό, ενώ η κατάντη πλευρά είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα. Έτσι δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στη συστοδιαστολή των δύο επιφανειών και αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις στον όγκο του σκυροδέματος. Η πίεση του νερού που εφαρμόζεται στην καμπυλωτή επιφάνεια του φράγματος μεταβιβάζεται στα πλευρά της κοιλάδας (αντερείσματα) με τη μορφή οριζοντίων δυνάμεων. Οι δυνάμεις που μεταφέρει το φράγμα στο έδαφος είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που δέχεται το έδαφος, σε σχέση με ένα φράγμα βαρύτητας που θα είχε το ίδιο ύψος. Γενικότερα τα τοξωτά φράγματα εδράζονται σε στενές και απότομες κοιλάδες ή φαράγγια που το έδαφος τους είναι βραχώδης. Ο βράχος πρέπει να είναι εξαιρετικής ποιότητας και να έχει πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, επειδή δέχεται πολύ μεγάλες δυνάμεις. Ένα τοξωτό φράγμα μπορεί να είναι απλής ή σε πολλές περιπτώσεις διπλής καμπυλότητας, με καμπύλωση του φορέα στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Επιπλέον χρειάζεται να υπάρχει ευνοϊκή διάταξη των ασυνεχειών των πετρωμάτων της περιοχής ως προς την διάταξη του φορέα του φράγματος στα αντερείσματα, ώστε ο συντελεστής ασφαλείας (ΣF) να είναι ικανοποιητικός έναντι ολίσθησης και ανατροπής.

Παρακάτω παρουσιάζεται το τοξωτό φράγμα Malpasset (κατάντη πλευρά φράγματος, κάτοψη, διατομή) στην περιοχή Var (Νότια Γαλλία) που είχε διάρκεια ζωής 5 χρόνια (1954-

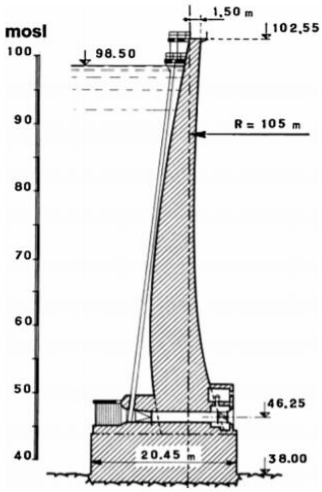
1959) και κόστισε τη ζωή σε 423 ανθρώπους λόγω της πλημμύρας που ακολούθησε από την κατάρρευση του.



Εικόνα 2.7 Κατάντη πλευρά του τοξωτού φράγματος Malpasset



Εικόνα 2.8 Κάτοψη τοξωτού φράγματος – Malpasset



Εικόνα 2.9 Τομή του φράγματος

(Πηγή : https://www.researchgate.net/figure/Highest-dam-cross-section-mosl-means-meter-over-sea-level-The-support-of-the-hollow_fig8_259164284)

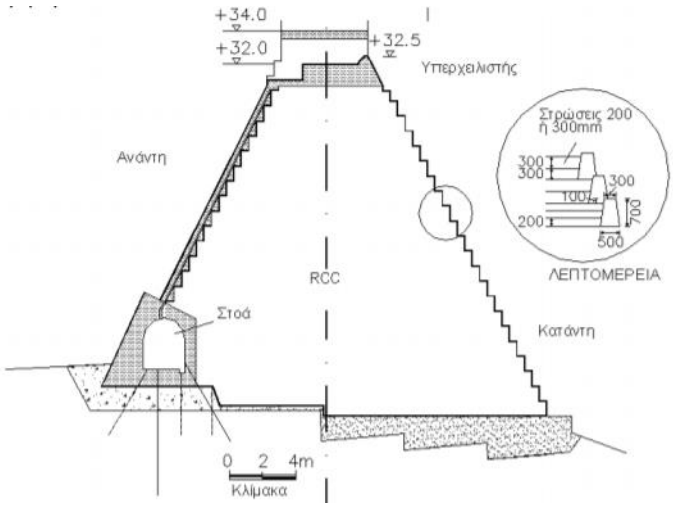
2.2.2.4 Φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC)

Τα φράγματα αυτά αποτελούνται από έναν διαφορετικό τύπο σκυροδέματος που συνδυάζει στην ουσία όλα τα θετικά του συμβατικού υλικού (σκυρόδεμα) με τον εύκολο και ταχύ χειρισμό του με τις μεθόδους των χωμάτινων φραγμάτων. Η φιλοσοφία του σχεδιασμού ενός φράγματος από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα είναι η ίδια με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Τα φράγματα RCC διαφέρουν σε σχέση με τα συμβατικά στο ότι απαιτείται η κατασκευή κλείδων που επιβάλλονται από τις γραμμές ανύψωσης. Στα φράγματα RCC η περιεκτικότητα σε τσιμέντο του σκυροδέματος είναι μικρότερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φράγματα βαρύτητας. Η ποσότητα τσιμέντου που λείπει από τα

φράγματα RCC αντικαθίσταται από ποσότητα ιπτάμενης τέφρας. Το μεγάλο πλεονέκτημα τους έναντι των άλλων φραγμάτων βαρύτητας είναι ότι η κατασκευή τους είναι οικονομικότερη. Τα εδάφη πάνω στα οποία θεμελιώνεται ένα τέτοιο φράγμα είναι τα βραχώδη, της σε όλα τα φράγματα σκυροδέματος, και βασικό είναι τα εδάφη αυτά να μην κάνουν απότομες γεωμετρικές αλλαγές αλλά και ο βαθμός διάβρωσης του βράχου να είναι μικρός. Δηλαδή θρυμματισμένα και παραμορφωμένα βραχώδη υλικά μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην θεμελίωση του φράγματος.

Εικόνα 2.10 Φράγμα Μαραθιάς (Μύκονος) – RCC με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

(Πηγή : http://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/Egeies_Beltioseis/kataskevasthenta_erga/fragmata_limnodexamenes/fragma_marathia_mykonou.pdf)



Εικόνα 2.11 Τυπική διατομή φράγματος στη θέση του υπερχειλιστή

(Πηγή : http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/3.1.pdf)

2.2.2.5 Χωμάτινα φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα ή αλλιώς γεωφράγματα κατασκευάζονται με γαιώδη υλικά (εδαφικά υλικά, αμμοχάλικα ποταμών, πλευρικά κορήματα). Στην ουσία τα χωμάτινα φράγματα είναι αναχώματα που σχηματίζονται από χωμάτινα υλικά ή χαλίκια που με στοιχεία που αντιστοιχούν σε τεχνητά υλικά. Δηλαδή τα χωμάτινα αυτά υλικά τοποθετούνται σε επάλληλες στρώσεις και συμπυκνώνονται με μηχανικά μέσα. Τα φράγματα αυτά μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε έδαφος, είτε αυτό είναι βραχώδες είτε ημιβραχώδες. Αυτό αποτελεί ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα φράγματα σκυροδέματος (ίσου ύψους) που δεν είναι δυνατό να θεμελιωθούν σε οποιαδήποτε εδάφη. Ωστόσο η θεμελίωση τους σε μαλακά εδάφη δεν ενδείκνυται λόγω των μεγάλων καθιζήσεων που παρουσιάζουν. Οι καθιζήσεις αυτές είναι αποτέλεσμα των κενών ανάμεσα στους κόκκους, των υλικών από τα οποία φτιάχνονται, μετά από τη συμπύκνωση των υλικών αυτών. Ένα ακόμη θετικό των φραγμάτων αυτών είναι ότι μπορούν να κατασκευαστούν αποκλειστικά από τα υλικά που υπάρχουν σε αφθονία στην περιοχή που κατασκευάζονται , με αποτέλεσμα να μειώνονται τα κόστη μεταφοράς υλικών.

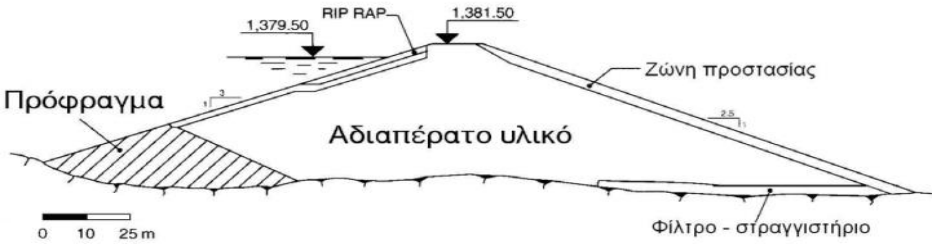
Η κατασκευή των γεωφραγμάτων δεν είναι μία απλή διαδικασία, κάθε άλλο μάλιστα χρειάζεται μεγάλη εμπειρία στην κατασκευή τους, της θα γινόταν και στους άλλους τύπους φραγμάτων. Τα γεωφράγματα αποτελούνται από δύο ζώνες, όπου η πρώτη ζώνη ονομάζεται κέλυφος, βρίσκεται κάτω από τον πυρήνα και αποτελείται από υλικό υψηλής διαπερατότητας, ενώ η δεύτερη ζώνη αποτελείται από τον πυρήνα του. Ο πυρήνας κατασκευάζεται με αργιλικό υλικό χαμηλής διαπερατότητας.

Τα χωμάτινα φράγματα ανάλογα με το κύριο υλικό και τον τρόπο που κατασκευάζονται διακρίνονται σε :

1. Ομοιογενή
2. Διαζωνισμένα (αδιαπέρατος πυρήνας)
3. Χωμάτινα φράγματα με διάφραγμα

1. Ομοιογενή χωμάτινα φράγματα

Τα φράγματα αυτά ονομάζονται ομοιογενή γιατί κατασκευάζονται μόνο από ένα υλικό χαμηλής διαπερατότητας. Στις κατασκευές αυτές συνήθως χρησιμοποιείται ιλύς ή αργιλικό υλικό. Επειδή το νερό μέσα σε ένα ομοιογενές φράγμα μπορεί να αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα ροής και υδραυλική κλίση, στο κατάντη πρανές, συνίσταται τα πρανή τους να κατασκευάζονται με μικρή κλίση. Κατά συνέπεια τα ομοιογενή φράγματα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μικρού ύψους. Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις μεγάλων κλίσεων, η ύπαρξη ζώνης φίλτρου – στραγγιστηρίου στο κατάντη κέλυφος μπορεί να βελτιώσει την κατάσταση και να μην προκληθούν διαβρώσεις.

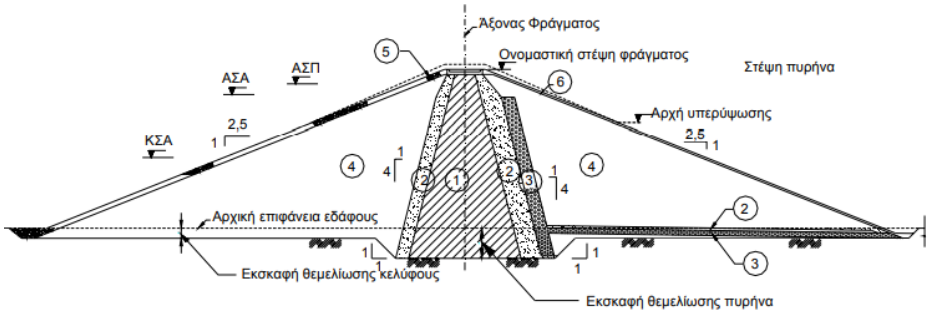


Εικόνα 2.12 Διατομή ομοιογενούς χωμάτινου φράγματος

(Πηγή : Ν.Ι. Μουτάφης, Αθήνα 2009)

2. Διαζωνισμένα φράγματα

Τα διαζωνισμένα φράγματα κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά στο ανάχωμα. Ουσιαστικά δημιουργούνται πάνω από 2 ζώνες στο φράγμα, όπου η κάθε ζώνη, με την χρήση διαφορετικών υλικών, εκπληρώνει ένα συγκεκριμένο σκοπό. Με την διαζώνηση βελτιώνονται οι ιδιότητες των υλικών. Διαθέτουν αργιλικό πυρήνα ο οποίος είναι αδιαπέρατος. Μπορεί επίσης να βρίσκεται στο κέντρο του φράγματος ή να είναι κεκλιμένος. Προστατεύεται κατάντη με στρώσεις ημιπερατών υλικών (ζώνη φίλτρου – στραγγιστηρίου). Το υπόλοιπο φράγμα αποτελείται από διαπερατά υλικά.



Εικόνα 2.13 Διατομή χωμάτινου φράγματος (διαζωνισμένο) με κεντρικό πυρήνα

(Πηγή : Ν.Ι. Μουτάφης, Αθήνα 2009)

Οι ζώνες από τις οποίες αποτελείται ένα διαζωνισμένο χωμάτινο φράγμα με αδιαπέρατο πυρήνα (κεντρικό ή κεκλιμένο) είναι οι εξής :

- Πυρήνας – Ζώνη 1 – Αδιαπέρατα υλικά
- Φίλτρο – Ζώνη 2 – Διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό
- Στραγγιστήριο ή Μεταβατική Ζώνη – Ζώνη 3 – Διαβαθμισμένο χαλικώδες υλικό
- Κελύφη (σώματα στήριξης) – Ζώνη 4 – Κερματισμένος βράχος, αμμοχάλικα, κορήματα
- Ζώνη προστασίας ανάντη πρανούς – Ζώνη 5 – Βράχοι, κροκάλες
- Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς – Ζώνη 6 - Κροκάλες

3. Χωμάτινα φράγματα με διάφραγμα

Κατασκευάζονται από διαπερατά γαιώδη υλικά και μία λεπτή μεμβράνη αδιαπέρατου υλικού το οποίο τοποθετείται στο ανάντη πρανές του φράγματος και εμποδίζει τη διέλευση του νερού μέσα στο φράγμα. Η λεπτή αυτή μεμβράνη ή στρώση αποτελείται στις περισσότερες περιπτώσεις από σκυρόδεμα.

2.2.2.6 Λιθορριπτά φράγματα

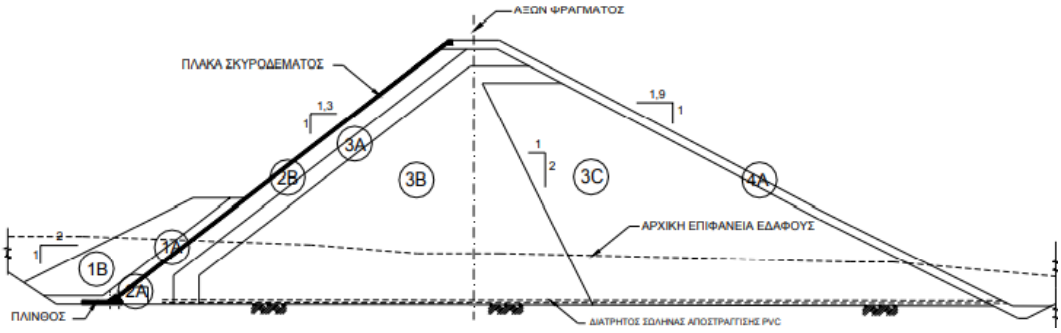
Τα λιθορριπτά φράγματα μοιάζουν αρκετά με τα χωμάτινα φράγματα στην λογική κατασκευής τους. Ωστόσο ένα λιθόρριπτο φράγμα κατασκευάζεται ως ένα ανάχωμα από φυσικούς ογκόλιθους μεγάλων διαστάσεων. Λόγω του μεγέθους του υλικού επιτρέπονται οι πιο μεγάλες κλίσεις, σε σχέση με τα χωμάτινα φράγματα, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η επιφάνεια στην οποία εδράζεται το φράγμα γεγονός που δημιουργεί προβλήματα αντοχής του εδάφους θεμελίωσης. Οι ογκόλιθοι που αποτελούν το σώμα στήριξης θα πρέπει να έχουν ακανόνιστο σχήμα και να έχουν έντονες γωνίες. Της είναι λογικό η εξόρυξη αυτών των ογκόλιθων στα λατομεία σημαίνει και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τα χωμάτινα φράγματα.

Τα λιθορριπτά φράγματα ανάλογα με τη μορφή του αδιαπέρατου στρώματος ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες :

1. Φράγματα με αδιαπέρατη μεμβράνη στην ανάντη πλευρά
2. Φράγματα με αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα (κεντρικός ή κεκλιμένος)

1. Φράγματα με αδιαπέρατη μεμβράνη στην ανάντη πλευρά

Τα φράγματα αυτά αποτελούνται από μία αδιαπέρατη μεμβράνη στα ανάντη, της φαίνεται και από το όνομα τους. Σκοπός της μεμβράνης είναι η συγκράτηση του ανάντη τμήματος λιθορριπής, ώστε αυτό να μην ολισθαίνει. Η μεμβράνη αυτή μπορεί να κατασκευάζεται από πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος, από ασφαλτοσκυρόδεμα ή και από συμπιεσμένο αργιλικό υλικό και τοποθετείται στο φράγμα μετά την κατασκευή του. Είναι δυνατό με το πέρας του χρόνου και κατά τη λειτουργία του φράγματος η ανάντη αυτή μεμβράνη να επισκευαστεί.



Εικόνα 2.14 Διατομή Λιθόρριπτου φράγματος με Ανάντη Πλάκα Σκυροδέματος (ΛΑΠΣ)

(Πηγή : Ν.Ι. Μουτάφης, Αθήνα 2009)

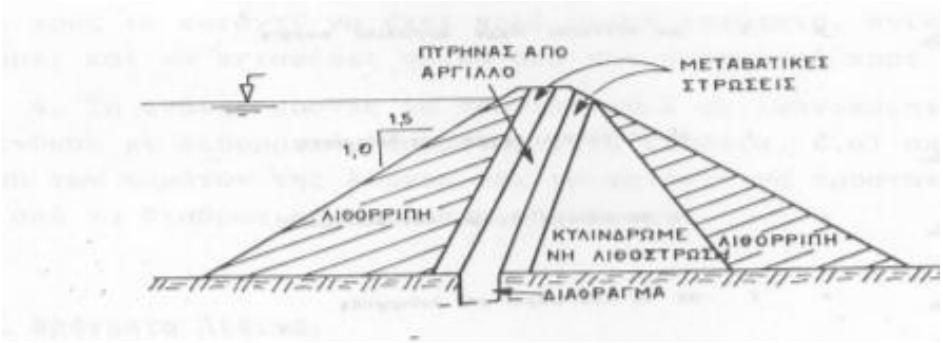
Οι ζώνες από τις οποίες αποτελείται ένα φράγμα τύπου ΛΑΠΣ είναι οι εξής :

- Αδιαπέρατα υλικά από δανειοθαλάμους – Ζώνη 1Α
- Τυχαία υλικά χωρίς χωρίς απαιτήσεις διαβάθμισης ή συμπύκνωσης – Ζώνη 1Β
- Λεπτόκοκκο υλικό φίλτρου διαβαθμισμένο από αμμοχάλικα – Ζώνη 2Α
- Αμμοχάλικα ποταμού διαβαθμισμένα και εμπλουτισμένα – Ζώνη 2Β
- Λιθορριπή, καλά συμπυκνωμένη, από λατομεία, με μέγιστη διάσταση μικρότερη των 0,5 μέτρων – Ζώνη 3Α
- Λιθορριπή, καλά συμπυκνωμένη, από λατομεία, με μέγιστη διάσταση μικρότερη του 1 μέτρου – Ζώνη 3Β
- Λιθορριπή, μέτρια συμπυκνωμένη, από λατομεία – Ζώνη 3C
- Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς – επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία - Ζώνη 4Α

2. Φράγματα με αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα (κεντρικός ή κεκλιμένος)

Στα φράγματα αυτά συνήθως ο πυρήνας τοποθετείται κεντρικά (στη μέση της διατομής), δίχως όμως να μην είναι εφικτή η τοποθέτησή του σε πλάγια θέση. Ενδιάμεσα στρώματα από συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά τοποθετούνται ανάμεσα στον πυρήνα και το λιθόρριπτο τμήμα του φράγματος, με σκοπό την αποφυγή καταστροφής του πυρήνα. Ο ρόλος των ενδιάμεσων αυτών στρωμάτων είναι επίσης να συγκρατούν τον πυρήνα και να μην επιτρέπουν τα λεπτά αργιλικά σωματίδια να ξεπλένονται από το διηθούμενο νερό. Τα φράγματα αυτά δεν εκτίθενται στους εξωτερικούς παράγοντες, παρουσιάζουν αυξημένη

αντοχή στον χρόνο και πλεονεκτούν σε περιπτώσεις σεισμών έναντι των χωμάτινων φραγμάτων.



Εικόνα 2.15 Διατομή φράγματος με αδιαπέρατο αργιλικό πυρήνα (κεκλιμένο)

Οι κεκλιμένοι πυρήνες έχουν και αυτή τα πλεονεκτήματα τους στην κατασκευή των φραγμάτων. Τα πλεονεκτήματα κατασκευής κεκλιμένων πυρήνων είναι τα εξής :

- Βελτίωση της θέσης θεμελίωσης του πυρήνα, λόγω της μορφολογίας του εδάφους
- Αποφυγή ζωνών του γεωφράγματος που παρουσιάζουν ανεπιθύμητες αδυναμίες
- Κατασκευή του μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του κατάντη μέρους του φράγματος
- Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν αρκετά αποθέματα σε άργιλο ο κεκλιμένος πυρήνας επειδή είναι πιο στενός σε σχέση με τον κεντρικό πλεονεκτεί.

Γενικότερα σε ότι αφορά τα γεωφράγματα είτε χωμάτινα είτε λιθορριπτά, ο πυρήνας τους είναι το πιο σημαντικό στοιχείο σε ότι αφορά την λειτουργία τους. Ο πυρήνας είναι το αδιαπέρατο στοιχείο του αναχώματος (θεωρητικά τουλάχιστον) που εξασφαλίζει τη στεγανότητα του φράγματος. Σε κάθε περίπτωση με τον όρο θεωρητικά εννοείτε πως σε όλους τους πυρήνες με την πάροδο του χρόνου διηθείται νερό και μελλοντικά δημιουργείται κανονικό δίκτυο ροής.

Ο αρχικός εντοπισμός των υλικών που είναι κατάλληλα για την δημιουργία πυρήνα γεωφράγματος γίνεται σε πλαίσια γεωλογικών μελετών, ενώ ο λεπτομερής έλεγχος των υλικών γίνεται στα πλαίσια των γεωερευνητικών εργασιών και περιλαμβάνει έλεγχο καταλληλότητας και έλεγχο επάρκειας υλικού. Ο έλεγχος καταλληλότητας και ιδιοτήτων, γίνεται με δειγματοληψίες υλικού είτε από γεωτρήσεις είτε από σκάμματα, είτε από τάφους. Τα εδαφικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του πυρήνα περιέχουν ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος μεγαλύτερο από 20% (το ποσοστό των λεπτόκοκκων μπορεί να ξεπεράσει το 90%). Δηλαδή όταν δεν υπάρχουν σε ποσοστό μεγαλύτερο από 20% στο σύνολο του υλικό, τότε προσδίδεται στο σύνολο η ιδιότητα της χαμηλής διαπερατότητας.

Το υψόμετρο της στέψης του πυρήνα αντιστοιχεί στην Ανώτατη Στάθμη Αποθήκευσης (Α.Σ.Α.) του ταμιευτήρα και σε πολλές περιπτώσεις φραγμάτων στην Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (Α.Σ.Π.). Στα περισσότερα φράγματα συνηθίζεται η στέψη του πυρήνα να είναι 1 με 2 μέτρα χαμηλότερη από τη στέψη του φράγματος. Αυτό λειτουργεί βοηθητικά ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υπερπήδησης του πυρήνα ακόμη και σε περιπτώσεις ακραίων πλημμυρικών γεγονότων.

Το πλάτος στέψης του πυρήνα για κατασκευαστικούς λόγους αλλά και λόγους αντιμετώπισης των μετακινήσεων της στέψης του φράγματος (ως αποτέλεσμα σεισμικών πιέσεων, καθίζησης και άλλα) θα πρέπει να είναι της τάξης των 4 με 6 μέτρων. Σε περιοχές με σοβαρά προβλήματα σεισμών, εφαρμόζονται ακόμη μεγαλύτερα πλάτη στέψης πυρήνα τα οποία είναι άνω των 6 μέτρων, ώστε σε περιπτώσεις καταστροφής – κατολίσθησης της στέψης του φράγματος να υπάρχει επαρκές πλάτος ώστε η κατολίσθηση να συμβεί μονάχα σε ένα μέρος της.

Σχετικά με τις κλίσεις των πρανών του πυρήνα, οι πιο συνηθισμένες κλίσεις είναι 1:5 και 1:4 (Ο:Κ), ενώ για περιπτώσεις προβληματικών θεμελιώσεων εφαρμόζονται ηπιότερες κλίσεις της τάξης του 1:2,5 (Ο:Κ). Ωστόσο σε περιπτώσεις προβληματικών θεμελιώσεων μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και αύξηση του πλάτους του πυρήνα που βρίσκεται στη βάση της θεμελίωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιώνεται η υδραυλική κλίση στην περιοχή που είναι η πιο επικίνδυνη.

2.3 Βοηθητικά έργα φράγματος

Τα συμπαρομαρτούντα έργα του φράγματος είναι και αυτά εξίσου σημαντικά για την σωστή και ομαλή λειτουργεία του. Χωρίς να λειτουργεί ένα από τα συνοδά τεχνικά έργα σωστά, τότε αναπόφευκτα θα επηρεαστεί και το φράγμα. Τα βοηθητικά, τεχνικά αυτά έργα είναι :

1. Το κυρίως ανάντη πρόφραγμα
2. Ο υπερχειλιστής – εκχειλιστής
3. Ο εκκενωτής πυθμένα
4. Τα συστήματα εκτροπής υδάτινων επιφανειών

2.3.1 Ανάντη πρόφραγμα

Τα προφράγματα αυτά κατασκευάζονται όταν στην περιοχή ανέγερσης του κυρίως φράγματος διέρχεται κάποια υδάτινη επιφάνεια. Σκοπός τους είναι η συγκράτηση του νερού, ώστε να είναι δυνατή και να εξελίσσεται ομαλά η κατασκευή του φράγματος.

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση με το πρόφραγμα του φράγματος του Μαραθώνα. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των έργων στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος και ενώ είχε κατασκευαστεί το πρόφραγμα, λόγω έντονων βροχοπτώσεων η παροχή του ποταμού Χαράδρου είχε αυξηθεί απότομα. Το σύστημα εκτροπής που ήταν και αυτό κατασκευασμένο δεν μπόρεσε να ανταπεξέλθει σε αυτούς τους όγκους νερού που δέχθηκε, με αποτέλεσμα την πλήρωση του χώρου ανάντη του προφράγματος. Έτσι το νερό υπερπήδησε το πρόφραγμα, το κατεδάφισε και κατέκλυσε τον χώρο των εργασιών που κατασκευαζόταν το φράγμα. Το συμβάν αυτό οφείλεται σε λάθος επιλογή της πλημμύρας σχεδιασμού του συστήματος εκτροπής. Οι επιπτώσεις από αυτό το γεγονός δεν αναφέρεται σε κάποια βιβλιογραφία.

Εικόνα 2.16 Κατάκλιση της περιοχής εργασιών λόγω υπερπήδησης του προφράγματος – Φράγμα Μαραθώνα

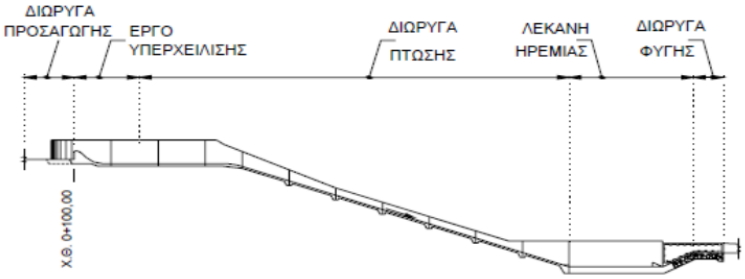
(Πηγή : Αρχείο ΕΥΔΑΠ)

2.3.2 Υπερχειλιστής – Εκχειλιστής

Οι περιπτώσεις μεγάλων παροχών νερού είναι ένα φαινόμενο που προβλέπεται σε κάθε κατασκευή φράγματος, είτε πρόκειται για περιοχή με μικρά ετήσια ύψη βροχόπτωσης είτε για περιοχή με μεγάλα. Οι αυξημένες παροχές νερού οδηγούν σε ανύψωση της στάθμης του νερού με αποτέλεσμα να κινδυνεύει το φράγμα αλλά και η κατάντη περιοχή του. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται οι υπερχειλιστές, οι οποίοι επιτρέπουν το πέρασμα μεγάλων παροχών νερού. Ο υπερχειλιστής που κατασκευάζεται σε κάθε περίπτωση μπορεί να διαφέρει. Παραδείγματος χάρη στα φράγματα βαρύτητας η θέση του υπερχειλιστή είναι μέσα στο φράγμα, ενώ στα χωμάτινα φράγματα κατασκευάζεται σήραγγα είτε πλευρικά του φράγματος, είτε κάτω από αυτό. Οι υπερχειλιστές μπορούν να διακριθούν επίσης σε ρυθμιζόμενους και απλούς. Οι ρυθμιζόμενοι διαθέτουν κινητά διαφράγματα που λειτουργούν ανάλογα με τις ποσότητες νερού που πρέπει να απομακρυνθούν. Οι απλοί είναι αυτοί που προκύπτουν από την διαμόρφωση ενός τμήματος του φράγματος, με σκοπό την ροή του νερού που περισσεύει. Μια άλλη εκδοχή υπερχειλιστή είναι αυτή που κατασκευάζεται στο πρανές της υδάτινης επιφάνειας κατακόρυφος αγωγός που καταλήγει σε σήραγγα (οριζόντιος αγωγός) με επένδυση σκυροδέματος. Η σήραγγα αυτή παρακάμπτει το φράγμα και οδηγεί το νερό στην υδάτινη επιφάνεια που βρίσκεται κατάντη του. Επιπλέον υπάρχουν και άλλες μορφές υπερχειλιστών της οι πλευρικοί υπερχειλιστές, οι ελεύθεροι, οι φρεατόδεις και οι υπερχειλιστές μορφής σιφώνα.

Οι πλευρικοί υπερχειλιστές κατασκευάζονται σε στενές κοιλάδες. Το νερό περνάει από τη στέψη του φράγματος και απομακρύνεται μέσα από έναν αγωγό που κατασκευάζεται παράλληλα στη στέψη του υπερχειλιστή. Στους ελεύθερους υπερχειλιστές το νερό υπερχειλίζει από τη στέψη και οδηγείται στον αγωγό που συνήθως είναι ένας ανοιχτός αγωγός ορθογωνικής διατομής κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι φρεατόδεις υπερχειλιστές αποτελούν μία λύση η οποία επιλέγεται όταν δεν είναι δυνατή η κατασκευή των παραπάνω τύπων που αναφέρθηκαν. Στην περίπτωση αυτή το νερό πέφτει μέσα σε ένα κατακόρυφο φρεάτιο και οδηγείται μετά το κατάντη του φράγματος. Τέλος οι υπερχειλιστές μορφής σιφώνα εφαρμόζονται όταν ο χώρος για την εγκατάσταση του υπερχειλιστή δεν επαρκεί και η ποσότητα του νερού που υπερχειλίζεται δεν πρόκειται να είναι ποτέ μεγάλη. Σε αυτόν τον τύπο υπερχειλιστή, η υπερχείλιση του νερού γίνεται αυτόματα.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως κάθε υπερχειλιστής έχει και κάποια βασικά τμήματα που συμβάλλουν στην πραγμάτωση του σκοπού για τον οποίον κατασκευάστηκε. Τα τμήματα αυτά, με τη σειρά που εισέρχεται το νερό στον υπερχειλιστή, είναι η διώρυγα προσαγωγής, το έργο υπερχείλισης, η διώρυγα πτώσης, η λεκάνη ηρεμίας και η διώρυγα φυγής.



Εικόνα 2.17 Μηκοτομή υπερχειλιστή – Βασικά τμήματα

(Πηγή : Α. Παπαδημητρίου, Αθήνα 2015)

Εικόνα 2.18 Πλευρικός υπερχειλιστής – Υδροηλεκτρικού Έργου Καστρακίου

Εικόνα 2.19 Κεντρικός υπερχειλιστής

(Πηγή : Ν.Ι. Μουτάφης)

2.3.3 Εκκενωτής πυθμένα

Ο εκκενωτής του πυθμένα τοποθετείται στο χαμηλότερο σημείο του ταμιευτήρα του φράγματος. Αποτελείται από το στόμιο εισόδου, τον αγωγό, τις θυρίδες και το έργο εξόδου. Το στόμιο εισόδου είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μην επιτρέπει την δημιουργία στροβιλισμών κατά την είσοδο του νερού στον αγωγό. Ο αγωγός συνήθως είναι σωληνωτός. Το μέγεθος της διατομής του αγωγού υπολογίζεται με βάση τις ποσότητες νερού που πρόκειται να διατεθεί και την ταχύτητα ροής.

2.3.4 Συστήματα εκτροπής

Πρόκειται για επιφανειακό αγωγό στη θεμελίωση του φράγματος ή υπόγειο (σήραγγα). Ο επιφανειακός αγωγός δεν διέρχεται μέσα από το σώμα του φράγματος. Είναι συνήθως αγωγοί μικρών διαστάσεων (μικρότερων των 2,5 μέτρων) κατασκευασμένοι από χάλυβα ή σκυρόδεμα και σχεδιασμένοι για μικρές παροχές. Το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλό σε σχέση με τους υπόγειους. Οι υπόγειοι αγωγοί (σήραγγες) σε αντέρεισμα φράγματος έχουν διαμέτρους από 3 έως 14 μέτρα και υψηλό κόστος κατασκευής. Οι αγωγοί αυτοί ξεκινούν με το στόμιο εισόδου σήραγγας εκτροπής απ' όπου εισέρχεται το νερό στον αγωγό. Το στόμιο εισόδου έχει ορθογωνική διατομή ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση θυροφραγμάτων. Επίσης οι σήραγγες εκτροπής μπορεί να έχουν κυκλική ή πεταλοειδής διατομή.

Εικόνα 2.21 Επιφανειακός αγωγός συστήματος εκτροπής ποταμού – φράγμα Μυλοχωρίου

Εικόνα 2.22 Στόμιο εισόδου υπόγειου αγωγού – Σύστημα εκτροπής ποταμού – φράγμα Συκιάς στον ποταμό Αχελώο

(Πηγή : Α. Παπαδημητρίου, Αθήνα 2015)

2.3.5 Άλλα έργα υδροληψίας

Οι υδροληψίες κατασκευάζονται στα υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ φράγματα) και ο ρόλος τους είναι ο έλεγχος και η ρύθμιση της παροχής του νερού που φεύγει από τον ταμιευτήρα του φράγματος και οδηγείται στο σύστημα προσαγωγής. Το σύστημα αυτό συνήθως αποτελείται από μία σήραγγα ή μία ανοικτή διώρυγα ή μόνο από αγωγό πτώσης. Οι υδροληψίες διακρίνονται σε χαμηλής και υψηλής πίεσης. Οι χαμηλής πίεσης τοποθετούνται σε έργα με καθημερινή ή εβδομαδιαία ρύθμιση όπου οι διακυμάνσεις της στάθμης είναι μικρές, ενώ οι υψηλής πίεσης τοποθετούνται σε με ετήσια ή υπερετήσια ρύθμιση όπου οι διακυμάνσεις της στάθμης είναι σημαντικές.

Οι διατάξεις μείωσης της ενέργειας είναι κατασκευές που συμβάλλουν στην μείωση της ενέργειας του νερού όταν αυτό ρέει εξερχόμενο από κλειστούς αγωγούς ή ελεύθερους υπερχειλιστές έτσι ώστε να επιτυγχάνονται συνθήκες ήρεμης ροής στην υδάτινη επιφάνεια που καταλήγει. Η λειτουργία των κατασκευών μείωσης της ενέργειας συνίσταται στη μείωση της ταχύτητας που επιτυγχάνεται με την τριβή του νερού στα τοιχώματα του αγωγού μέσω της δημιουργίας έντονων στροβιλισμών αλλά και του αέρα. Στην ουσία η λεκάνη ηρεμίας που κατασκευάζεται στην έξοδο του νερού από τον αγωγό υπερχείλισης είναι αυτή που μειώνει την κινητική ενέργεια του νερού με τη δημιουργία του υδραυλικού άλματος.

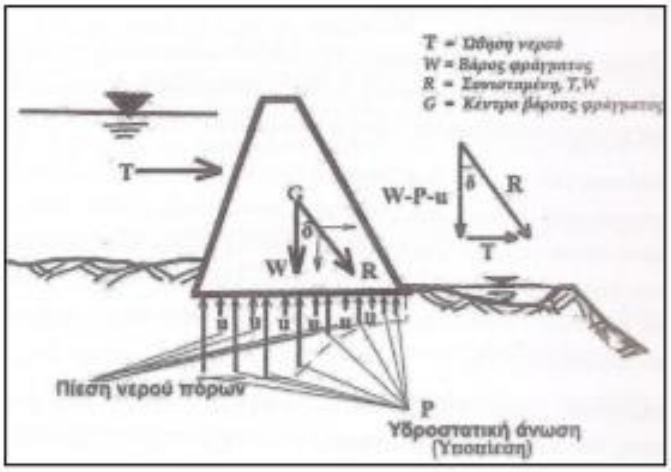
Οι κάδοι εκτροπής τοποθετούνται και αυτοί στα φράγματα με σκοπό την καταστροφή της ενέργειας. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κάδων εκτροπής, οι χαμηλοί και οι υψηλοί. Γενικότερα αυτοί που χρησιμοποιούνται είναι οι υψηλοί κάδοι οι οποίοι λειτουργούν με σκοπό ‘’το σπρώξιμο’’ του νερού στον αέρα, ψηλά από την κοίτη του αποδέκτη. Δηλαδή το νερό διοχετεύεται μέσα σε έναν ορθογώνιο αγωγό μικρής διαμέτρου όπου και αποκτά μεγάλη ταχύτητα κατά την κάθοδο του. Στο άκρο του αγωγού υπάρχει μία καμπυλότητα προς τα πάνω ώστε το νερό να ωθείται προς τα πάνω μακριά από το φράγμα, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η πιθανότητα διάβρωσης του φράγματος. Έπειτα το νερό πέφτει λόγω του βάρους του μακριά από το φράγμα έχοντας ωστόσο χάσει την ταχύτητα ροής του και την ενέργεια του.

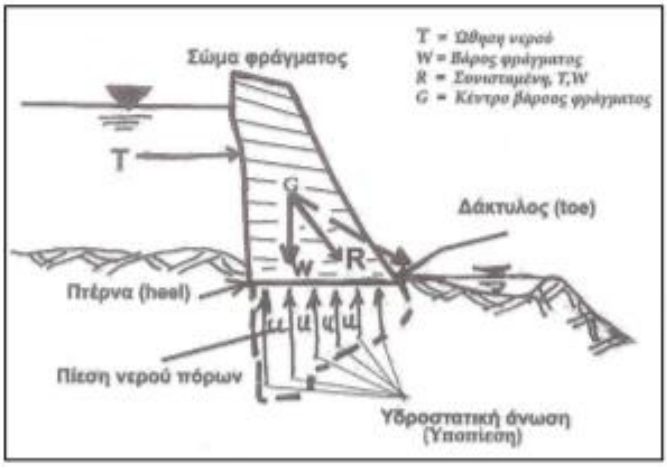
Οι αγωγοί πτώσης τοποθετούνται στα Υδροηλεκτρικά φράγματα και ορίζονται ως τμήματα αγωγών που μεταφέρουν το νερό από τον πύργο ισορροπίας ή το θάλαμο δικλείδων μέχρι το σταθμό παραγωγής. Σε περιπτώσεις που υπάρχει αγωγός προσαγωγής υπό πίεση και δεν υπάρχει δυνατότητα παρεμβολής πύργου ισορροπίας, τότε ο υπό πίεση αγωγός καλείται αγωγός πτώσης. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει αγωγός προσαγωγής τότε ως αγωγός πτώσης θεωρούνται τα τμήματα των αγωγών από την δεξαμενή φόρτισης μέχρι τον σταθμό παραγωγής. Οι αγωγοί πτώσης είναι σωληνωτοί αγωγοί κυκλικής συνήθως διατομής κατασκευασμένοι από χαλύβδινα ελάσματα ή από σκυρόδεμα. Οι αγωγοί πτώσης ακολουθούν κατά το δυνατό γραμμές μέγιστης κλίσης μεταξύ θαλάμου δικλείδων ή πύργου ισορροπίας και σταθμού παραγωγής. Οι αγωγοί αυτοί μπορούν να εγκαθίστανται επιφανειακά στο έδαφος. Οι ταχύτητες ροής του νερού που αναπτύσσονται μέσα στους αγωγούς αυτούς κυμαίνονται για μικρά και μεσαία ύψη πτώσης μεταξύ 1,5 και 4,5 m/sec (μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Για μεγάλα ύψη πτώσης αναπτύσσονται ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες της για παράδειγμα 6 m/sec.

2.4 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις και τάσεις φραγμάτων

Οι δυνάμεις που δρουν πάνω σε ένα φράγμα είναι οι εξής :

1. Το ίδιον βάρος του φράγματος (W) το οποίο δρα στο κέντρο βάρους του σώματος του φράγματος
2. Οι υδροστατικές πιέσεις (P) είναι δυνάμεις διαφορετικές, δηλαδή έχουν αυξημένη τιμή στο εσωτερικό τμήμα της βάσης του φράγματος οι οποίες ωστόσο προς το εξωτερικό τμήμα της βάσης του μειώνονται συνεχώς.
3. Η ώθηση του νερού του ταμιευτήρα (T) η οποία ξεκινά να εφαρμόζεται μετά την πλήρωση του. Η χειρότερη περίπτωση από πλευράς αυτών των ωθήσεων είναι όταν ασκούνται με οριζόντια διεύθυνση.
4. Οι πιέσεις του νερού των πόρων (u), δυνάμεις που μειώνουν το βάρος του φράγματος καθώς ενεργούν αντίθετα από αυτό στο βυθισμένο τμήμα του σώματος του φράγματος.
5. Η συνισταμένη δύναμη (R) θα πρέπει να έχει κλίση τέτοια ώστε να περιορίζεται μέσα στη βάση του σώματος του φράγματος (όσο η γωνία δ έχει μικρή τιμή). Δηλαδή το διάνυσμα της δύναμης αυτής να διατηρηθεί μέσα στη βάση του φράγματος με τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας. Αν η συνιστώσα της δύναμης R, που ωθεί το φράγμα προς τα κατάντη, είναι μεγάλη τότε το φράγμα θα αστοχήσει.
6. Η ροπή ανατροπής η οποία προκαλεί την ολίσθηση του φράγματος προς τα κατάντη. Η ανατροπή του φράγματος είναι συνέπεια της μικρής κλίσης του διανύσματος της δύναμης R (μεγάλη γωνία δ)
7. Υπόψη στο σχεδιασμό ενός έργου της τα φράγματα θα πρέπει να είναι και οι δυναμικές φορτίσεις. Μέσω σεισμικών δονήσεων μπορούν να προκληθούν επίσης υδροδυναμικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται από το νερό του ταμιευτήρα στο φράγμα.





Εικόνες 2.23 και 2.24 Ασκούμενες δυνάμεις σε φράγμα και Ασκούμενες δυνάμεις σε χωμάτινο φράγμα αντίστοιχα

(Πηγή : Στουρνάρας Β. ‘’ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ ΜΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ’’, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΘΗΝΑ ΕΜΠ, Νοέμβριος 2012)

2.5 Οφέλη και επιπτώσεις φραγμάτων

Κατασκευάζοντας ένα φράγμα οποιουδήποτε τύπου, οι αλλαγές που προκαλούνται στην περιοχή είναι ποικίλες και πολύ σημαντικές. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του φράγματος, την μορφολογία της ευρύτερης περιοχής, του εδάφους θεμελίωσης αλλά και από άλλους παράγοντες. Ο προσδιορισμός του μεγέθους των θετικών και αρνητικών επιπτώσεων ενός φράγματος δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί εκ των προτέρων. Για το λόγο αυτό απαιτείτε η διενέργεια περιβαλλοντικών μελετών (Μ.Π.Ε) για τον προσδιορισμών των επιπτώσεων ενός φράγματος στην ευρύτερη περιοχή.

2.5.1 Οφέλη Φραγμάτων

Με τη δημιουργία φράγματος σε μία περιοχή τα οφέλη μπορεί να είναι πολυάριθμα. Αρχικά τα φράγματα αλλάζουν άρδην το τοπίο, διότι από τη μία στιγμή στην άλλη μπορεί μία περιοχή που αποτελείται από κοιλάδες και κάποιο υδατόρευμα, να γεμίσει ολόκληρη με νερό και συνεπώς να σχηματιστεί μία όμορφη τεχνητή λίμνη. Από την δημιουργία της τεχνητής αυτής λίμνης τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν είναι :

1. Η αποθήκευση νερού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικές ανάγκες
    - Ύδρευση της ευρύτερης περιοχής του φράγματος
    - Έλεγχος της ποιότητας του πόσιμου νερού
    - Άρδευση των γύρω καλλιεργειών και συνεπώς αύξηση της παραγωγής των γεωργικών καλλιεργειών
2. Δημιουργία νέου περιβάλλοντος και άρα ανάπτυξη νέων υδρόβιων οργανισμών / ανάπτυξη ιχθυοκαλλιέργειας και δημιουργία νέας πανίδας εφόσον αποδημητικά πουλιά χρησιμοποιήσουν τον ταμιευτήρα για να βρουν τροφή και καταφύγιο.
3. Δημιουργία νέων υδάτινων επιφανειών και αύξηση των παροχών των ήδη υπάρχοντών.
4. Αύξηση του τουρισμού της περιοχής.
5. Αύξηση των θέσεων εργασίας λόγω της κατασκευής ενός τόσο σημαντικού έργου, αλλά και λόγω της τουριστικής εκμετάλλευσης του έργου αυτού.

Τα φράγματα ωστόσο δεν είναι μόνο η τεχνητή τους λίμνη (ταμιευτήρας). Πρέπει να επισημανθεί πως ένα φράγμα προσφέρει αντιπλημμυρική προστασία στην ευρύτερη περιοχή στην οποία αυτό κατασκευάζεται. Έπειτα από ακραίες καιρικές συνθήκες και έντονες βροχοπτώσεις, στις υδάτινες επιφάνειες (ποτάμια, ρέματα, λίμνες) αυξάνεται απότομα η παροχή του νερού. Αποτέλεσμα αυτού είναι να συγκεντρώνονται πολλές πιθανότητες στο να κατακλιστούν περιοχές (κατοικημένες ή χωράφια) με νερό και συνεπώς στο να χαθούν ανθρώπινες ζωές ή να καταστραφούν ιδιοκτησίες. Η προσφορά των φραγμάτων είναι να ελέγχουν τη στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα και στις περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων να επιτρέπουν τη ροή νερού, μέσω του υπερχειλιστή, να περάσει στην κατάντη πλευρά του και να μην χρειαστεί να φτάσει το νερό του ταμιευτήρα την ανώτατη κανονική στάθμη.

Σε περιπτώσεις κατασκευής ΥΗΕ φραγμάτων, στα οφέλη προστίθεται και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι καθαρή ανανεώσιμη ενέργεια με μηδενικό κόστος καυσίμου και χωρίς εκπομπές ρύπων. Η υδροηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσω μετατροπής της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική. Αρχικά η κινητική ενέργεια του νερού (μεγάλες ταχύτητες ροής) μετατρέπεται σε μηχανική μέσω της περιστροφής του στροβίλου, ο οποίος μειώνει την ταχύτητα του νερού

και την δύναμη με την οποία αυτό εισέρχεται. Έπειτα μέσω γεννήτριας πραγματοποιείται η μετατροπή της μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Συμπεραίνεται δηλαδή πως αν υπάρχει η απαραίτητη παροχή νερού στον ταμιευτήρα ώστε να μπορεί ένα μέρος του να αξιοποιηθεί από τις υδροηλεκτρικές κατασκευές του φράγματος, τότε η περιοχή θα έχει ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης.

Η συμβολή των φραγμάτων μπορεί να πει κανείς πως είναι μεγάλη για την οικονομική ανάπτυξη της περιοχής (και της χώρας) αλλά και για την περιβαλλοντική και περιφερειακή ανάπτυξη. Άλλωστε πολλές υποανάπτυκτες περιοχές, μετά την κατασκευή φράγματος κατόρθωσαν να αναπτυχθούν σε μεγάλο βαθμό.

2.5.2 Επιπτώσεις φραγμάτων

Παρά τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την κατασκευή ενός φράγματος, υπάρχουν και πολλά μειονεκτήματα τα οποία δυστυχώς είναι αναπόφευκτα. Οι συνέπειες ενός φράγματος εν τάχει αφορούν την αλλοίωση του τοπίου, την βιοποικιλότητα και το μικρόκλιμα της περιοχής, την ποιότητα του νερού και τις ανθρώπινες ζωές.

Αρχικά η κατασκευή φράγματος φέρνει αλλαγές στο φυσικό τοπίο, από τη στιγμή που στην περιοχή η οποία είναι ''της της γέννησε η φύση'' προστίθεται ένα τσιμεντένιο οικοδόμημα το οποίο είναι αντιαισθητικό για την φυσική ομορφιά της περιοχής.

Από την πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος και μετά, καλύπτονται από νερό περιοχές φυσικού κάλλους, δασικές εκτάσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις χώροι ιστορικής σημασίας. Επίσης οι κάτοικοι της περιοχής που προβλέπεται να δημιουργηθεί ο ταμιευτήρας, μερικές φορές αναγκάζονται να εγκαταλείψουν τις γεωργικές εκτάσεις τους και σπανιότερα ακόμη και τις κατοικίες τους.

Όσον αφορά την βιοποικιλότητα, η δημιουργία ενός ταμιευτήρα μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην θερμοκρασία της περιοχής και του οξυγόνου που είναι διαθέσιμο στο νερό, με αποτέλεσμα να προκαλούνται αλλαγές στην πανίδα. Οι υδρόβιοι οργανισμοί της περιοχής θα προσπαθήσουν να καταφύγουν σε άλλα νερά ώστε να καταφέρουν να επιβιώσουν, ενώ άλλα που θα προσπαθήσουν να περάσουν προς τα κατάντη του φράγματος θα εγκλωβιστούν και ενδεχομένως να μην καταφέρουν να ζήσουν. Συνέπεια των παραπάνω είναι η μείωση του πληθυσμού της πανίδας. Τα ψάρια επίσης επηρεάζονται και από την μεταβολή της χλωρίδας η οποία σε ένα μεγάλο μέρος της θα πρέπει να καταστραφεί (αυτή που είναι κοντά στις όχθες του ποταμού/υδάτινης επιφάνειας) ώστε να κατασκευαστεί το φράγμα. Της προαναφέρθηκε οι αλλαγές της θερμοκρασίας που θα προκληθούν αλλά και των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου θα επιφέρουν προβλήματα και στην υδρόβια βλάστηση.

Η ενδεχόμενη εναπόθεση και αλόγιστη χρήση τοξικών ουσιών στην περιοχή μπορεί να μολύνει το νερό του ταμιευτήρα της και τα υπόγεια νερά της περιοχής με αποτέλεσμα να υπάρχουν προβλήματα στην ύδρευση των οικισμών λόγω της κακής ποιότητας του νερού, γεγονός που θα έχει συνέπεια και στην υγεία των ανθρώπων της περιοχής.

Ένα ακόμη μειονέκτημα που προκύπτει από την κατασκευή μεγάλου φράγματος και συνεπώς την δημιουργία ταμιευτήρα μεγάλων διαστάσεων είναι οι αλλαγές του μικροκλίματος της περιοχής. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί πως προκαλούνται μεταβολές στην υγρασία (αύξηση της), λόγω της αυξημένης εξάτμισης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα και την θερμοκρασία της ευρύτερης περιοχής. Επίσης επηρεάζονται οι διευθύνσεις και η ταχύτητα των ανέμων λόγω της αλλαγής του ετήσιου βροχομετρικού ύψους.

Τέλος, το πιο απευκταίο σενάριο είναι η πιθανότητα αστοχίας του φράγματος. Σε περίπτωση αστοχίας ενός φράγματος είναι πιθανό να χαθούν ανθρώπινες ζωές, να καταστραφούν ιδιοκτησίες και να προκληθούν ανεπανόρθωτες ζημιές στο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, τα φράγματα αποτελούν πολύπλοκες κατασκευές οι οποίες είναι πολυδάπανες, χρονοβόρες και δύσκολες.

2.6 Λόγοι αστοχιών φραγμάτων

Αστοχίες στα φράγματα έχουν καταγραφεί πριν από πολλούς αιώνες και πιο συγκεκριμένα από το 1219 και δυστυχώς συνεχίζονται έως και σήμερα. Κάποιες από αυτές είχαν τραγικές συνέπειες λόγω του ότι χάθηκαν χιλιάδες ζωές, ενώ άλλες είχαν περιβαλλοντικές και οικονομικές καταστροφές. Το θετικό ωστόσο από τις αστοχίες του παρελθόντος είναι ότι μέσω αυτών έγιναν περισσότερο κατανοητή οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των φραγμάτων και οδηγούν σε αστοχίες. Πιο συγκεκριμένα αστοχία μπορεί να θεωρηθεί η ολική κατάρρευση ή η μετακίνηση αυτού ή των θεμελίων του, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση τεράστιων ποσοτήτων νερού στα κατάντη του φράγματος.

Οι λόγοι των αστοχιών σε ένα φράγμα συνήθως είναι οι παρακάτω :

1. Κατασκευαστικά λάθη – μη επαρκής μελέτη
2. Προβλήματα στη θεμελίωση του
3. Υπερχείλιση του ταμιευτήρα
4. Αστοχία πρανών
5. Διαρροή στο σώμα του φράγματος
6. Εσωτερική διάβρωση
7. Διασωλήνωση και διαρροή
8. Σεισμικές δονήσεις

<u>1. Κατασκευαστικά λάθη – μη επαρκής μελέτη</u>

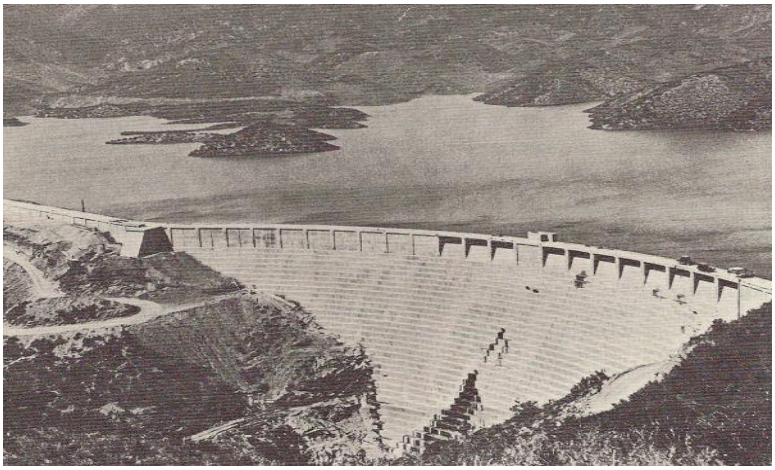
Τα κατασκευαστικά λάθη εμφανίζονται όταν δεν γίνεται επαρκής μελέτη και σωστός σχεδιασμός στην κατασκευή ενός φράγματος. Φεριπίν οι συνιζήσεις στο σώμα του φράγματος, οι εσωτερικές διαβρώσεις και οι διαρροές είναι αποτέλεσμα λανθασμένων επιλογών του τύπου των υλικών κατασκευής του έργου ή για παράδειγμα οι καθιζήσεις του εδάφους θεμελίωσης οφείλονται σε λάθος μελέτη του υποστρώματος πάνω στο οποίο εδράζεται το φράγμα.

<u>2. Προβλήματα στην θεμελίωση</u>

Σε σχέση με την αναφορά των καθιζήσεων του εδάφους που έγινε και παραπάνω, αυτές μπορούν να οφείλονται επίσης όταν το βάρος του τεχνικού έργου κατανέμεται άνισα με αποτέλεσμα να μπαίνει το θεμέλιο μέσα στο έδαφος. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως διαφορικές καθιζήσεις και συμβαίνει κυρίως στα χωμάτινα φράγματα. Ωστόσο μπορεί να συμβεί και στα φράγματα σκυροδέματος. Τα προβλήματα αυτά προκαλούνται λόγω της διαφορετικής σύστασης στα υλικά του εδάφους (συγκεκριμένα στο τμήμα που κατασκευάζεται το φράγμα). Επίσης προβλήματα στην θεμελίωση είναι δυνατό να συμβούν και από σεισμικές δονήσεις, λόγω της άνισης ανύψωσης και διήθησης των θεμελίων.

Αστοχία του φράγματος Saint Francis (ΗΠΑ)

Το τοξωτό αυτό φράγμα βαρύτητας κατασκευάστηκε μεταξύ του 1924 και 1926 και αποτέλεσε τμήμα του υδραγωγείου της πολιτείας του Los Angeles. Αστόχησε στις 12 Μαρτίου του 1928, ενώ τα θύματά του ήταν 600 ανθρώπινες ζωές. Η αστοχία προκλήθηκε της τελικά καταγράφεται από νεότερες απόψεις, λόγω των υλικών του αριστερού αντερείσματος, τα οποία ήταν προϊόντα παλαιότερης κατολίσθησης. Συνεπώς η γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών της θεμελίωσης δεν ήταν επαρκής.



Εικόνα 2.25 Τοξωτό φράγμα βαρύτητας St. Francis (Los Angeles, USA)

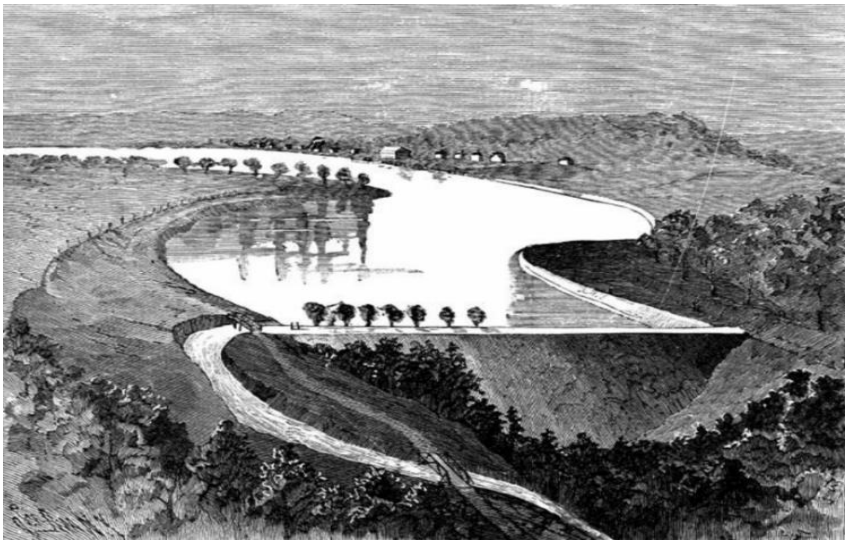
(Πηγή : http://floodlist.com/america/usa/st-francis-dam-flood-1928)

3. Υπερχείλιση του ταμιευτήρα

Ο ρόλος των υπερχειλιστών σε ένα φράγμα έχει ήδη αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο αυτό. Ωστόσο δεν έχει γίνει αναφορά στην περίπτωση που ένας υπερχειλιστής ξεχειλίζει. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί έπειτα από χρονικές περιόδους έντονης βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τον λανθασμένο σχεδιασμό του υπερχειλιστή. Αποτέλεσμα αυτού είναι η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα να αυξάνεται συνεχώς και στη συνέχεια να ξεπερνάει την στέψη του φράγματος και να περνάει στην κατάντη περιοχή του. Το φαινόμενο της υπερχείλισης του ταμιευτήρα επίσης συντελείται έπειτα από κατολισθήσεις βράχων στον ταμιευτήρα του φράγματος (αύξηση του νεκρού όγκου – μείωση της χωρητικότητας του ταμιευτήρα). Άλλη μία περίπτωση υπερχείλισης είναι η κατάρρευση του ανάντη προφράγματος. Απόρροια της κατάρρευσης αυτής είναι οι παραπάνω όγκοι νερού που θα δεχθεί το κυρίως φράγμα και εν συνεχεία τυχόν θέματα στην στατικότητα του φράγματος λόγω των νέων δυνάμεων που θα δεχθεί αλλά και κατάκλιση της κατάντη περιοχής (εκτάσεων γης) εάν και εφόσον προκληθεί υπερχείλιση.

Αστοχία του φράγματος South Fork (ΗΠΑ)

Το φράγμα αυτό κατασκευάστηκε στην Πενσυλβανία στις ΗΠΑ και ήταν ένα χωμάτινο φράγμα ύψους 21,9 μέτρων. Στις 31 Μαΐου του 1889 εξαιτίας των εκτεταμένων πλημμυρών, ο υπερχειλιστής δεν μπόρεσε να παραλάβει τις αυξημένες παροχές και να αποφορτίσει των ταμιευτήρα του φράγματος. Το νερό που απελευθερώθηκε είχε όγκο 20 εκατομμυρίων τόνων και κατέληξε 23 χιλιόμετρα μακριά κατάντη του φράγματος, στην περιοχή Johnstown καταστρέφοντας την ολοκληρωτικά. Από την αστοχία του φράγματος αυτού έχασαν την ζωή τους 2209 άνθρωποι. Το φράγμα αυτό αποτέλεσε παράδειγμα για τα φράγματα που κατασκευάστηκαν τα επόμενα χρόνια, ώστε να μην επαναληφθούν τα ίδια λάθη.



Εικόνα 2.26 Χωμάτινο φράγμα South Fork (Pennsylvania -1989)

(Πηγή : https://damfailures.org/case-study/south-fork-dam-pennsylvania-1889/)

Εικόνα 2.27 Η εικόνα από την περιοχή του φράγματος South Fork (Pennsylvania – 2013)

4. Αστοχία πρανών

Τα προβλήματα στα πρανή είναι μία συνηθισμένη αστοχία στα φράγματα. Αστοχία πρανών συμβαίνει όταν το σύνολο των οριζόντιων δυνάμεων που δρουν στη βάση του φράγματος είναι μεγαλύτερο από την τριβή που υπάρχει μεταξύ σώματος φράγματος και θεμελίωσης του. Αστοχία πρανών μπορεί να προκληθεί και στο ανάντη αλλά και στο κατάντη πρανές. Στο ανάντη πρανές αστοχία μπορεί να συμβεί όταν ο ταμιευτήρας του φράγματος είναι είτε άδειος είτε η στάθμη του είναι χαμηλή, ενώ όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος το νερό λειτουργεί προστατευτικά ή και βοηθητικά προς αυτό, λόγω του ότι αντισταθμίζει την μετακίνηση του (ολίσθηση). Από την άλλη το κατάντη πρανές είναι πιο κρίσιμο από το ανάντη όταν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος εξαιτίας του ότι δεν υπάρχει κάποιο ‘’αντιστάθμισμα’’ (στην περίπτωση αυτή νερό) ώστε να μην ολισθήσει.

5. Διαρροή στο σώμα του φράγματος

Αστοχίες εξαιτίας διαρροής στο σώμα του φράγματος προκαλούνται εξαιτίας της σύστασης των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του. Η αστοχία αυτή αφορά τα χωμάτινα φράγματα. Τα εδάφη χάρη στα οποία συμβαίνουν οι διαρροές ονομάζονται περατά. Τα περατά εδάφη μπορούν να επιφέρουν μεγάλες ζημιές λόγω διαρροής, είτε αυτά βρίσκονται στο έδαφος θεμελίωσης του φράγματος είτε βρίσκονται στα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται αυτό. Τα περατά εδάφη διαβρώνονται εύκολα εξαιτίας της επιφανειακής ροής του νερού μέσα στο έδαφος, εδάφη που πιο συγκεκριμένα είναι η ιλύς και η άμμος. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσονται οι πιέσεις των πόρων, οι οποίες είναι πιέσεις του νερού στα κενά διαστήματα του εδάφους που υπάρχουν μεταξύ και γύρω από τους κόκκους του υλικού. Οι πιέσεις πόρων μπορούν να αναπτυχθούν στον πυρήνα, στην θεμελίωση και στα κελύφη του φράγματος. Αυτές επηρεάζουν καθοριστικά την ευστάθεια του αναχώματος και για το λόγο αυτό λαμβάνονται σημαντικά υπόψη στις αναλύσεις ευστάθειας των πρανών του φράγματος. Για το λόγο αυτό στα χωμάτινα φράγματα χρησιμοποιούνται στραγγιστήρια ή μεταβατικές ζώνες υψηλής διαπερατότητας από χαλίκια και κροκάλες που μπορούν να απομακρύνουν από το ανάχωμα του φράγματος τα διηθούμενα νερά μέσα από τον πυρήνα του, τη θεμελίωση του και το κατάντη κέλυφος. Επίσης υπάρχουν και τα φίλτρα τα οποία είναι ζώνες προστασίας του πυρήνα από την διάπλυση του υλικού λόγω διήθησης του νερού. Τα φίλτρα αποτελούνται από υλικά αμμώδη και διαβαθμισμένα για να μπορούν να συγκρατούν το υλικό του πυρήνα και να οδηγούν τα διηθούμενα νερά με ασφάλεια έξω από αυτόν. Διαρροή στο σώμα του φράγματος επίσης μπορεί να συμβεί λόγω της μη επαρκής συμπύκνωσης του εδαφικού υλικού, της μη επαρκής αφαίρεσης εδαφικού υλικού (διαπερατού) στην περιοχή θεμελίωσης αλλά και λόγω ρωγμών που δημιουργούνται από τις καθιζήσεις σε ορισμένα σημεία του φράγματος.

Αστοχία του φράγματος Περδίκκα (Πτολεμαΐδα)

Το χωμάτινο αυτό φράγμα ύψους 30 μέτρων κατασκευάστηκε σε απόσταση 2 χιλιομέτρων από το χωρίο Περδίκκα στην Πτολεμαΐδα το 1962. Σκοπός του ήταν η κάλυψη των αναγκών σε υδροδότηση του βιομηχανικού κέντρου της πόλεως. Στην λεκάνη εντοπίζονται αργιλομαργαϊκά υλικά τα οποία καλύπτουν τον υποκείμενο καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο. Μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα αναπτύχθηκαν έντονες διαρροές. Αυτές έγιναν αντιληπτές από τους μηχανικούς και ανάγκασαν στην εκκένωση του ταμιευτήρα. Η

διαρροή πραγματοποιήθηκε με διάπλυση του αργιλομαργαϊκού σχηματισμού ο οποίος θεωρούταν στεγανός. Το φαινόμενο αυτό οδήγησε εν τέλει σε διασωλήνωση λόγω της ροής των υδάτων από τον ταμιευτήρα προς το υποκείμενο καρστικό υδροφόρο και στην συνέχει σε εσωτερική διάβρωση. Η αστοχία αυτή ευτυχώς δεν έλαβε τραγικές διαστάσεις. Παρά τη μη λειτουργία του φράγματος για τον αρχικό σκοπό του, μπορεί να πει κανείς πως έχει αλλάξει άρδην την τοπογραφία της ευρύτερης περιοχής και δημιούργησε συνθήκες υδροβιότοπου με την ανάπτυξη της χλωρίδας και πανίδας.

Εικόνα 2.28 Χωμάτινο φράγμα Περδίκκας

(Πηγή : ert.gr)

6. Εσωτερική διάβρωση

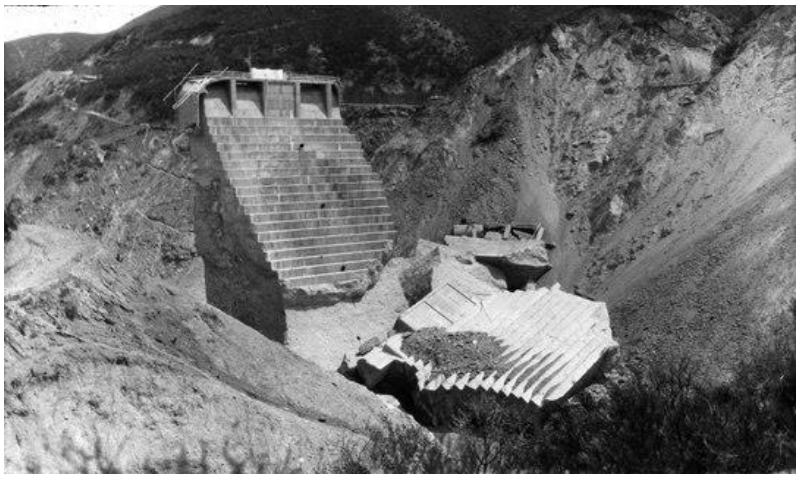
Η εσωτερική διάβρωση είναι ένα φαινόμενο το οποίο σχετίζεται άμεσα με την διαρροή. Συντελείται όταν οι δυνάμεις που ασκούνται από το νερό το οποίο ρέει εσωτερικά, στο σώμα του φράγματος, μέσα στους πόρους και τις ρωγμές του υλικού είναι τόσο ικανές ώστε να διαλύσουν και να μετακινήσουν σωματίδια υλικού έξω από τη δομή του φράγματος. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται κενά μέσα στο σώμα του φράγματος και το φράγμα μπορεί να αστοχήσει ακόμα και μέσα σε λίγες ώρες μετά από την εμφάνιση της, λόγω του ότι η εσωτερική διάβρωση εξαπλώνεται ταχύτατα.

7. Διασωλήνωση και διαρροή

Το φαινόμενο αυτό εξελίσσεται ως απόρροια της διαρροής και της εσωτερικής διάβρωσης. Οφείλεται στη διάβρωση που συντελείται στο φράγμα λόγω του νερού. Η διασωλήνωση εμφανίζεται στα κατάντη του φράγματος σαν μία τρύπα από την οποία εκλύεται νερό. Ουσιαστικά τα πρανή του φράγματος και η θεμελίωσή του, εάν περάσει το νερό και τα διαβρώσει, μπορούν να εξασθενίσουν και να προκληθούν ανεπανόρθωτες ζημιές στο φράγμα. Αυτού του τύπου οι αστοχίες εμφανίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις στα χωμάτινα φράγματα. Είναι πιθανόν να προκύψει διασωλήνωση και από τρύπες που ανοίγουν τα ζώα κατά μήκος του φράγματος.

Αστοχία του φράγματος Saint Francis (ΗΠΑ)

Της ήδη προαναφέρθηκε η αστοχία του φράγματος αυτού και στην ενότητα της θεμελίωσης, ένας ακόμη λόγος που συντέλεσε στην αστοχία αυτή ήταν εξαιτίας του φαινομένου της διασωλήνωσης που είχε ως αποτέλεσμα την διάβρωση της θεμελίωσης του φράγματος και κατολίσθηση του αριστερού αντερείσματος.



Εικόνα 2.29 Κατάρρευση του αριστερού αντερείσματος του φράγματος St. Francis (USA)

(Πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/St._Francis_Dam)

8. Σεισμικές δονήσεις

Ο σεισμός στα φράγματα μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις οι οποίες μπορεί να καταλήξουν σε ολισθήσεις πρανών (ανάντη και κατάντη) και συνιζήσεις των μη συνεκτικών ζωνών, αλλά και σε ρευστοποίηση των μη συνεκτικών ζωνών στην θεμελίωση. Επίσης μπορούν να συμβούν διαρρήξεις ενεργών ρηγμάτων οι οποίες αν συμβούν στην θεμελίωση ή στα αντερείσματα μπορούν να δημιουργήσουν ρηγματώσεις ή παραμορφώσεις στο φράγμα, ενώ αν συμβούν εντός του ταμιευτήρα μπορούν να προκαλέσουν έντονο κυματισμό. Τέλος οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις ή ακόμα και βροχοπτώσεις , οι οποίες μπορούν να φράξουν τον εκκενωτή πυθμένα του φράγματος και μείωση της λειτουργικότητας του ταμιευτήρα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να μελετηθεί η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής κατασκευής του φράγματος, τα ενεργά ρήγματα, οι σεισμικές επιταχύνσεις που έχουν συμβεί παλαιότερα και τα επίκεντρα των σεισμών.

Αστοχία του φράγματος Malpasset (Γαλλία)

Το φράγμα Malpasset ήταν τοξωτό φράγμα διπλής καμπυλότητας και κατασκευάστηκε κατά μήκος του ποταμού Reyran μεταξύ του 1952 και 1954. Το φράγμα αυτό κατέρρευσε στις 2 Δεκεμβρίου του 1959 προκαλώντας τον θάνατο σε 423 ανθρώπους. Από οικονομικής πλευράς η κατάρρευση του στοίχισε 68 εκατομμύρια δολάρια λόγω των ζημιών που προκάλεσε. Η θεμελίωση του είχε γίνει πάνω σε ισχυρούς γνεύσιους σχηματισμούς που είχαν καλά γεωτεχνικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά αστόχησε λόγω της παρουσίας ενός ρήγματος κάτω από την περιοχή θεμελίωσης του. Το ρήγμα αυτό λόγω των μεγάλων υδροστατικών πιέσεων που αναπτύχθηκαν κατά μήκος της επιφάνειας θεμελίωσης έκανε το φράγμα να ολισθήσει να υποχωρήσει και συνεπώς να αστοχήσει.

Η αστοχία του φράγματος αυτού ενδεχομένως ταίριαζε και με την κατηγορία των αστοχιών, λόγω προβλημάτων στη θεμελίωση ωστόσο επειδή υπήρχε ήδη ένα παράδειγμα, θεωρήθηκε πως ήταν καλύτερο να γραφτεί σε αυτόν τον τύπο αστοχίας.

Εικόνα 2.30 Τοξωτό φράγμα Malpasset (Γαλλία)

(Πηγή : https://damfailures.org/case-study/malpasset-dam-france-1959/)

Εικόνα 2.31 Σημερινή κατάσταση του φράγματος Malpasset

(Πηγή : https://www.ern.org/en/60-years-ago-the-malpasset-dam-frejus-france-broke/0)

Αστοχία του φράγματος Vajont (Ιταλία)

Το φράγμα Vajont ήταν ένα τοξωτό φράγμα διπλής καμπυλότητας, κατασκευασμένο σε στενή κοιλάδα. Ήταν ένα από τα ψηλότερα φράγματα αφού το ύψος του έφτανε τα 262 μέτρα ενώ το πάχος του στην βάση ήταν 27 μέτρα. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1959, ενώ τον Οκτώβρη του 1963 υπερπηδήθηκε από τα νερά του ταμιευτήρα εξαιτίας μεγάλης κατολίσθησης και καταστράφηκε. Η κατολίσθηση που προκάλεσε την αστοχία του φράγματος είχε όγκο 260 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων και διήρκησε μόνο 45 δευτερόλεπτα. Το κύμα που δημιουργήθηκε υπερπήδησε το φράγμα χωρίς να το βλάψει σοβαρά και ξεχύθηκε στο φαράγγι, φτάνοντας στην περιοχή Longarone, σκοτώνοντας πάνω από 2000 ανθρώπους και καταστρέφοντας την περιοχή αυτή. Μετά από αυτό η λειτουργία του φράγματος σταμάτησε. Πέρα από την καταστροφική κατολίσθηση που δημιουργήθηκε υπήρχε από του μηχανικούς μη επαρκής γνώση των συνθηκών ευστάθειας των πρανών στα οποία δημιουργήθηκε ο ταμιευτήρας του φράγματος.

Εικόνα 2.32 Τοξωτό φράγμα Vajont (Ιταλία) – εκτός λειτουργίας

(Πηγή : https://www.geotech.hr/en/vajont-a-tragedy-that-killed-more-than-2000-people/)

3. Τοξωτό φράγμα Ταυρωπού (Λίμνη Πλαστήρα)

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται πληροφορίες για την ιστορία της δημιουργίας του φράγματος του Ταυρωπού, για τα γενικά χαρακτηριστικά του, τα υδρολογικά στοιχεία της λεκάνης απορροής, τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, τη δομή τη γεωμετρία και την κατασκευή του. Επίσης γίνεται αναφορά στα συνοδά έργα του κυρίως φράγματος και στην λειτουργία του υδροηλεκτρικού σταθμού.

3.1 Η ιστορία της κατασκευής του φράγματος και γενικά στοιχεία

Η σύλληψη της ιδέας για την δημιουργία του φράγματος του Ταυρωπού και κατ' επέκταση της τεχνητής λίμνης προήλθε από τον στρατιωτικό Νικόλαο Πλαστήρα περίπου το 1925. Προς τιμήν του άλλωστε η τεχνητή αυτή λίμνη πήρε το όνομα του. Η ιδέα αυτή είχε σκοπό να δώσει τη λύση στα προβλήματα της άρδευσης του θεσσαλικού κάμπου, της ύδρευσης της Καρδίτσας και άλλων κοινοτήτων, αλλά και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας με την εκμετάλλευση της δύναμης του νερού. Κρίνοντας ο ίδιος ότι η ιδέα του είχε ωριμάσει άρχισε, περί το 1928, να καλεί ειδικούς επιστήμονες ώστε να μελετήσουν το έργο.

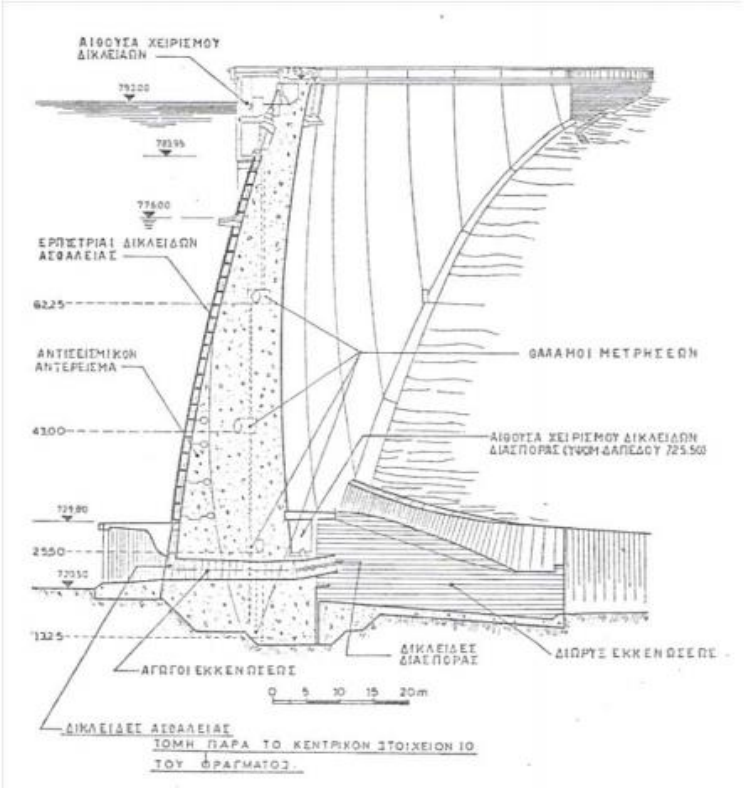
Η πρώτη μελέτη έγινε από τον Ελβετό μηχανικό Louis Senn ο οποίος προέβλεπε την κατασκευή τσιμεντένιου φράγματος στην περιοχή Κακαβάκια, σύμφωνα και με την ιδέα του Νικόλαου Πλαστήρα. Έπειτα το 1932 έγινε μία δεύτερη συμπληρωματική μελέτη από τον Έλληνα μηχανικό Α. Συράκο η οποία ωστόσο αφορούσε μόνο έργα άρδευσης. Μετά από την γερμανική κατοχή, η ιδέα αυτή ωρίμασε και άρχισε η υλοποίηση του οράματος του Νικόλαου Πλαστήρα, καθώς ήταν επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης των υδατικών πόρων της χώρας για την οικονομική της ανάπτυξη.

Η αρχική πρόταση από την νέα μελέτη που ανατέθηκε σε εταιρία το 1952, ανέφερε την κατασκευή ενός χωμάτινου φράγματος σε διαφορετική θέση, ωστόσο εν τέλει επιλέχθηκε η θέση Κακαβάκια το 1953. Μετά από διεθνή διαγωνισμό το έργο ανατέθηκε σε άλλη εταιρία την Omnium Lyonnais – Coteci co. και η σύμβαση υπογράφτηκε στις 5 Μαΐου του 1955. Η εταιρία αυτή άλλαξε τη μελέτη για χωμάτινο φράγμα, ακολουθώντας εν τέλει εκείνη του Louis Senn. Το 1955 ξεκίνησαν τα πρώτα έργα στον ποταμό Μέγδοβα ή Ταυρωπό και η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1959 όπου και άρχισε η πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα.

Το φράγμα δημιουργήθηκε στο οροπέδιο της Νευρόπολης, 25 χιλιόμετρα δυτικά της πόλης της Καρδίτσας. Η τεχνητή λίμνη Πλαστήρα σχηματίστηκε εκεί όπου υπήρχε παλιότερα ο ποταμός Ταυρωπός ο οποίος ''φιδογυρίζοντας'' κυλούσε ήρεμα για να συναντήσει τον ποταμό Αχελώο, στην περιοχή της Αιτωλίας. Από πολύ κόσμο τότε ακουγόταν η απορία σχετικά με το πως θα καταφέρει ο ποταμός Ταυρωπός, που είχε μικρή παροχή, να πλημμυρίσει την απέραντη έκταση που καλύπτει το υψίπεδο της Νευρόπολης και να σχηματιστεί εν τέλει η μεγάλη λίμνη. Ωστόσο αυτός ο ποταμός (παραπόταμος του Αχελώου) κατάφερε με την ανακοπή της ροής του, στην θέση Κακαβάκια, να γεμίσει με πολλά εκατομμύρια κυβικών μέτρων νερού την απέραντη λεκάνη του οροπεδίου της Νευροπόλεως και να την μεταβάλει μέσα σε λίγο καιρό σε μία από τις μεγαλύτερες και περισσότερο περιεκτικές σε νερό λίμνες της Ελλάδα. Η εξήγηση αυτού δόθηκε από τους μηχανικούς του έργου που μελέτησαν την κατασκευή του φράγματος, οι οποίοι δεν βασίστηκαν στα νερά που κατεβάζει μόνος του ο Ταυρωπός ξεκινώντας από τις πηγές του. Ολόκληρη η ορεινή περιοχή της Ευρυτανίας (Τυμφρηστός, Οξυά, Βαρδούσια, Καλιακούδα, Άγραφα), ολόκληρη σχεδόν η ανατολική πλευρά της νότιας πτέρυγας της οροσειράς της Πίνδου τροφοδοτούν τον ταμιευτήρα της Νευρόπολης με τους τεράστιους όγκους των νερών που σχηματίζονται από την τήξη του χιονιού, που μόνιμα σχεδόν υπάρχει το

μεγαλύτερο μέρος του χρόνου στις αναρίθμητες κορυφές τους. Οι ποταμοί Κρικελοπόταμος, Καρπενησιώτης, Αγραφιώτης και Καριτσιώτης είναι αυτοί που χρησιμεύουν ως αγωγοί που στέλνουν τα νερά των παραπάνω βουνών στον Ταυρωπό. Έτσι λοιπόν ο Ταυρωπός ποταμός παράλληλα με την καταλληλόλητα της μορφολογίας των περιοχών που αναφέρθηκαν κρίθηκε ικανός να τροφοδοτήσει με επαρκή και συνεχή υδραυλική δύναμη το μεγάλο αυτό έργο πολλαπλής σκοπιμότητας, του οποίου τα οφέλη στην εθνική οικονομία ήταν σημαντικότατα.

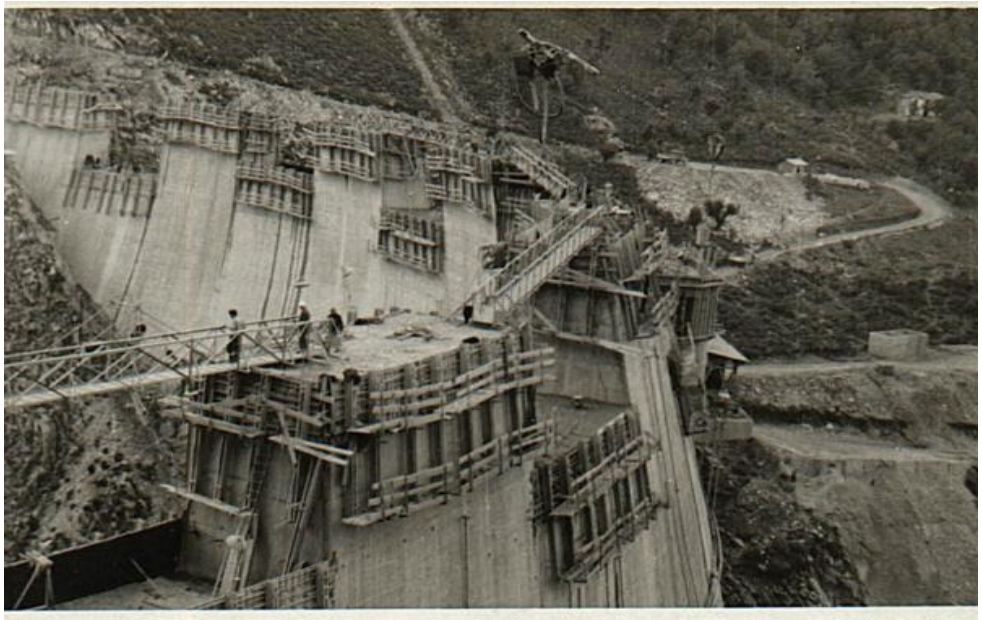
Η τεχνητή λίμνη που προέκυψε εν τέλει, η οποία είναι ευρέως γνωστή ως λίμνη Πλαστήρα, βρίσκεται σε υψόμετρο 800 μέτρων καταλαμβάνοντας μία έκταση της τάξης των 25200 στρεμμάτων περίπου με μήκος 12 χιλιομέτρων, πλάτος 4 χιλιομέτρων και βάθος περίπου 60 μέτρα (μέσο βάθος 47 μέτρα). Το τοξωτό φράγμα διπλής καμπυλότητας έχει ύψος 83 μέτρων από την βάση του και το ανάπτυγμα του τόξου της στέψης έχει μήκος 220 μέτρων. Το φράγμα έχει όγκο 100000 κυβικά μέτρα (m^3), ενώ το μέγιστο υψόμετρο της στέψης του αγγίζει τα 795,2 μέτρα. Ο ωφέλιμος όγκος του νερού, που περιλαμβάνεται μεταξύ της Κατώτατης Στάθμης (Κ.Σ) – 776 μέτρα και της Ανώτατης Κανονικής Στάθμης (Α.Κ.Σ) – 792 μέτρα, είναι 286,3 κυβικά εκατόμετρα (hm^3) ή (10^6 m^3). Ο ωφέλιμος αυτός όγκος αντιστοιχεί στον όγκο νερού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαμέσου του στομίου υδροληψίας. Για την δημιουργία του τεράστιου αυτού έργου χρειάστηκε να δεσμευτεί ένας αρκετά μεγάλος αριθμός περιουσιακών στοιχείων των κατοίκων των γύρων οικισμών. Τα περισσότερα ωστόσο ήταν χωράφια, αγροικίες και βοσκοτόπια. Παρόλα αυτά σε βάθος χρόνου επιστράφηκαν στους κατοίκους αυτά χρήματα στην διπλή και τριπλή αξία των δεσμευμένων περιουσιών τους.



Σχήμα 3.1 Διατομή του τοξωτού φράγματος Ταυρωπού

(Πηγή : ΚΑΝΤΑΡΤΖΗΣ Θ., ‘’ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟ ΦΡΑΓΜΑΤΑ Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΑΥΡΩΠΟΥ’’, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα 2012)

Για να πετύχει το φράγμα τους σκοπούς του, αφού είναι πολλαπλής σκοπιμότητας, οι τεχνικοί της ΔΕΗ με τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα κατάφεραν να αναστρέψουν τον ποταμό Ταυρωπό και να εκτρέψουν τα νερά του προς τον θεσσαλικό κάμπο, αντί για τον ποταμό Αχελώο. Η αναστροφή των νερών του Ταυρωπού λέγεται πως υπήρξε σωτήρια για την περιοχή του θεσσαλικού κάμπου, η οποία υποφέρει ιδιαίτερα την περίοδο του καλοκαιριού όπου επικρατεί ξηρασία. Τα νερά αυτά εκτός από την άρδευση του θεσσαλικού κάμπου αξιοποιούνται επίσης και για την ύδρευση της Καρδίτσας και των γύρω περιοχών. Εκτός από αυτά όμως τα νερά του Ταυρωπού είναι ικανά για να κινήσουν το μεγάλο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ενώθηκε με το εθνικό ενεργειακό σύστημα.



Εικόνα 3.1 Κατασκευή του τοξωτού φράγματος του Ταυρωπού (λίμνη Πλαστήρα)

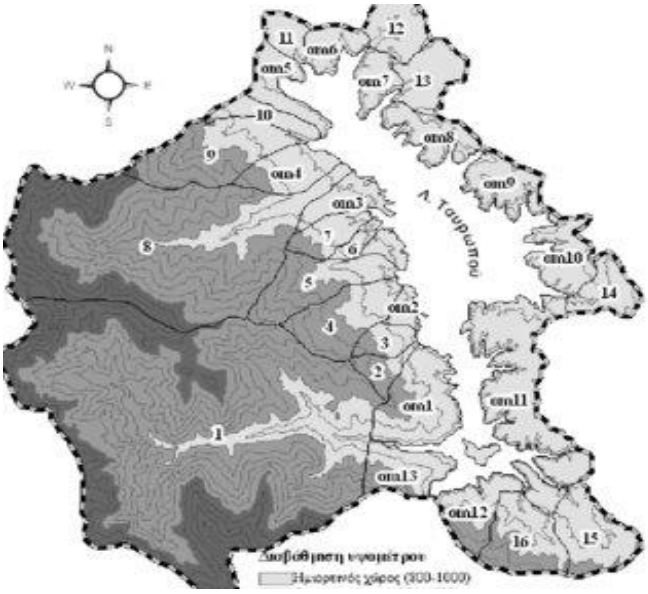
(Πηγή : newpost.gr)

3.2 Υδρολογικά στοιχεία λεκάνης απορροής του φράγματος

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Πλαστήρα απλώνεται περίπου σε 167 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km^2) και περιλαμβάνει αρκετά ρέματα με μικρότερες λεκάνες απορροής σε σχέση με το μέγεθος της λίμνης, τα οποία ρέματα εκβάλλουν στην λίμνη. Ο ποταμός Καριτσιώτης, ο οποίος αναφέρθηκε και προηγουμένως, πρέπει να επισημανθεί πως είναι ο μεγαλύτερος από όσους εκβάλλουν στην λίμνη και ότι η ροή του διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Άξιο αναφοράς είναι επίσης το γεγονός ότι από το 2001 και μέχρι σήμερα, στον ταμιευτήρα της λίμνης, φτάνουν και τα νερά της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερασιώτη μέσω σήραγγας εκτροπής.

Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι 2140 μέτρα, ενώ το μέσο και ελάχιστο υψόμετρο της είναι 1459 μέτρα και 800 μέτρα αντίστοιχα, γεγονός που καταδεικνύει πόσο ορεινή είναι η περιοχή στην οποία έχει χτιστεί το φράγμα. Η μέση παροχή της λεκάνης είναι 6,4 m^3 / second.

Η τεχνητή λίμνη η οποία σχηματίστηκε (ταμιευτήρας) από τα νερά του ποταμού Μέγδοβα (Ταυρωπός) έχει συνολικό όγκο – χωρητικότητα 400 hm^3 (ή 10^6 m^3), ενώ ο ωφέλιμος όγκος, της αναφέρθηκε και προηγουμένως, αντιστοιχεί σε 286,3 hm^3. Η συνολική επιφάνεια του ταμιευτήρα είναι 25,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km^2), το μέγιστο μήκος είναι 12 χιλιόμετρα (km), το μέγιστος πλάτος 4 χιλιόμετρα (km) ενώ το μέγιστο βάθος 60 μέτρα (m). Επίσης δεν έγινε αναφορά προηγουμένως, στο ανώτατο υψόμετρο του πυθμένα του ταμιευτήρα, το οποίο είναι στα 750 μέτρα (m).



Σχήμα 3.2 Λεκάνη Απορροής φράγματος Ταυρωπού

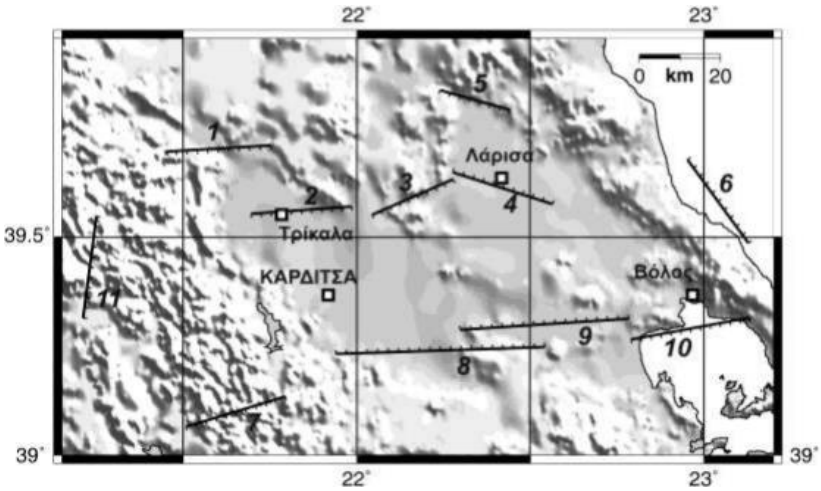
(Πηγή : https://www.researchgate.net/publication/281320917_To_cheimarriko_periballon_tes_lekanes_trophodosias_tes_limnes_Plastera)

3.3 Γεωλογία και σεισμολογία της περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή του νομού Καρδίτσας βρίσκεται μεταξύ της υποπελαγονικής και της ζώνης Ολονού Πίνδου και αποτελούν τη δυτική ζώνη των οφειολίθων της Ελλάδας. Στην περιοχή υπάρχει πλήρης ανάπτυξη της οφειολιθικής ακολουθίας αλλά και τα ασβεστολιθικά ιζήματα, που είναι είτε νηριτικά είτε πελαγικά. Πάνω από αυτά βρίσκεται φλύσχης που είναι το τελευταίο ίζημα της αλπικής ορογένεσης που έπληξε την Ελλάδα. Οι δύο ζώνες που αναφέρθηκαν, αντιστοιχούν σε μία παλιά ωκεάνια περιοχή με ιζήματα πετρολογικά. Η υποπελαγονική ζώνη αποτελούσε το χώρο της κατωφέρειας της πελαγονικής προς τον ωκεανό. Πιο συγκεκριμένα το νοτιοδυτικό μέρος του νομού, στο οποίο βρίσκεται το υπό μελέτη φράγμα του Ταυρωπού (καταλαμβάνει το 50% της έκτασης), απαρτίζεται από την οροσειρά της Πίνδου και τις απολήξεις της. Το ανάγλυφο της έχει αυτήν την ιδιαίτερη εικόνα λόγω των τριτογενών αλπικών πτυχώσεων των σχηματισμών που καταλαμβάνουν τους παλαιογεωγραφικούς χώρους της ζώνης της Πίνδου. Οι πτυχώσεις αυτές σε συνδυασμό με τα τεκτονικά γεγονότα που ακολούθησαν, οδήγησαν στην δημιουργία των οροσειρών. Οροσειρές οι οποίες στην περιοχής μελέτης έχουν κυρίως βόρεια έως και βορειοδυτική κατεύθυνση.

Στην περιοχή ενδιαφέροντος συναντά κανείς κοιτάσματα μαγγανίου τα οποία βρίσκονται μέσα σε διαβάσες και δολερίτες, αλλά δεν είναι εκμεταλλεύσιμα. Επίσης υπάρχουν κοιτάσματα χρωμίτη μικρού μεγέθους τα οποία βρίσκονται σε περιδοτιτεδουνίτες, σερπεντινίτες άλλα ούτε αυτά είναι διαθέσιμα προς εκμετάλλευση και αξιοποίηση. Τέλος στο δυτικό ορεινό τμήμα, της περιοχής μελέτης, επικρατούν οι ασβεστόλιθοι και οι ραδιολαρίτες.

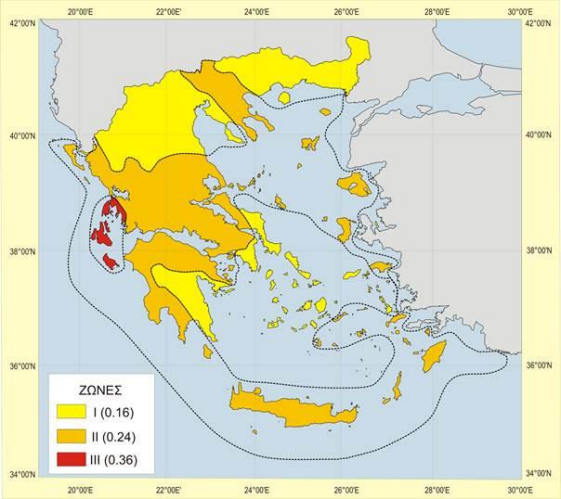
Επίσης πρέπει να γίνει αναφορά και στα ρήγματα που επικρατούν στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος του Ταυρωπού. Εκεί επικρατεί κυρίως εφελκυστικό πεδίο τάσεων και οι τάσεις αυτές έχουν ως συνέπεια την δημιουργία κανονικών ρηγμάτων των οποίων η διεύθυνση είναι κάθετη προς την διεύθυνση της τάσης. Δηλαδή στην περιοχή τα σεισμικά ρήγματα αναμένεται να έχουν διεύθυνση Ανατολής – Δύσης και κλίση προς το βορρά ή το νότο. Το μεγαλύτερο από τα ρήγματα της ευρύτερης περιοχής, τα οποία είναι 11, είναι το ρήγμα των Σοφάδων που βρίσκεται νοτιοανατολικά της Καρδίτσας και έχει μήκος περίπου 50 χιλιομέτρων (km). Από σεισμολογικά στοιχεία έχει προκύψει ότι το ρήγμα αυτό είναι κανονικό, δηλαδή βυθίζεται το πάνω τέμαχός του προς την λεκάνης της Καρδίτσας. Ο μεγαλύτερος σεισμός στην Καρδίτσα έγινε στις 30 Απριλίου του 1954, ήταν 7 Ρίχτερ που προήλθε από το ρήγμα αυτό. Έπειτα από λεπτομερής μελέτες η σεισμικότητα που επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή της Καρδίτσας αναφέρεται σε σεισμούς με μεγέθη 6, 6,5 και 7 ρίχτερ με μέση περίοδο επανάληψης 15, 35 και 83 χρόνια αντίστοιχα. Οι πιθανότητες γένεσης ενός ισχυρού σεισμού, μεγέθους της τάξης των 6,3 ή και μεγαλύτερου στην περιοχή της Καρδίτσας, είναι περίπου 33% σε μία δεκαετία.



Σχήμα 3.3 Τα 11 ρήγματα της Θεσσαλίας και των γύρω περιοχών

(Πηγή : Δ.Γ. Παναγιωτόπουλος, Κ.Β. Παπαζάχος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας)

Επίσης η περιοχή μελέτης, βρίσκεται στην δεύτερη ζώνη σεισμικής επιτάχυνσης (a) της Ελλάδας η οποία αντιστοιχεί σε 0,24 g ή σε 2,35 m/s².



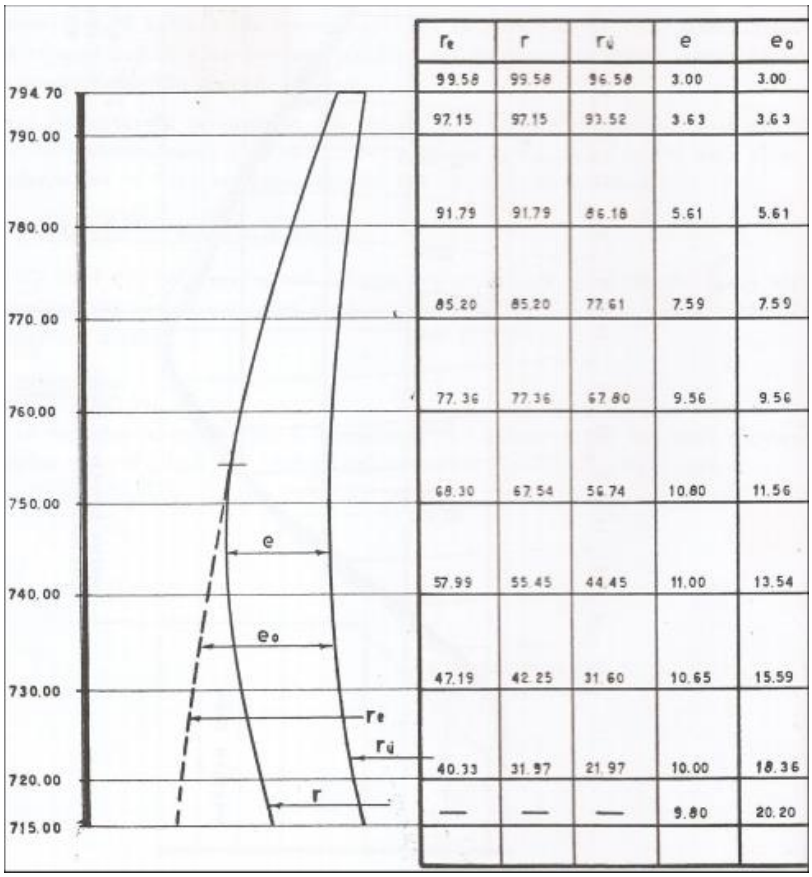
Σχήμα 3.4 Χάρτης ζωνών σεισμικών επιταχύνσεων Ελλάδας
(Πηγή : http://download.pi.gr/Seismic_response.pdf)

3.4 Κατασκευή και γεωμετρία του φράγματος

Το φράγμα του Ταυρωπού είναι το μοναδικό τοξωτό φράγμα με διπλή καμπυλότητα στην Ελλάδα. Θεμελιώθηκε πάνω σε στρώμα συμπαγών ασβεστόλιθων λίγο διαπερατών σε βάθος 4 – 5 μέτρων κάτω από την κοίτη του ποταμού. Σχετικά με την κατασκευή του φράγματος είναι γνωστό πως κατασκευάστηκαν διαφραγματικές κουρτίνες σε βάθος 24 και 40 μέτρων αντίστοιχα. Αναφέρεται επίσης πως για την κατασκευή του αλλά και των συνοδών του έργων χρησιμοποιήθηκαν περίπου 95000 κυβικά μέτρα σκυροκονιάματος, δηλαδή αδρανών υλικών (άμμου και χαλικιού) και τσιμέντου. Το τσιμέντο συνδυάστηκε με 10% πρόσμιξη θηραϊκής γης στο κλίνκερ και σε ποσότητα 250 kg/m³. Χρησιμοποιήθηκε αερακτικό FRO-8. Υπολογίστηκε πως το έργο μόνο του φράγματος απαίτησε 803000 σάκους τσιμέντου δηλαδή 40150 τόνους. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε σε ολόκληρο το τεχνικό έργο του Ταυρωπού ήταν εξ ολοκλήρου ελληνικής κατασκευής.

Αναλύοντας στατικά το φράγμα μπορεί να ειπωθεί με ευκολία πως αυτό αποτελείται από δύο μέρη, τα οποία είναι :

1. Ο πραγματικός θόλος
2. Και η πρόσθετη ζώνη σκυροδέματος ανάντη του φράγματος που λειτουργεί στην περίπτωση αυτή ως αντισεισμικό έρεισμα



r_e	r	$r_ü$	e	e_0
99.58	99.58	96.58	3.00	3.00
97.15	97.15	93.52	3.63	3.63
91.79	91.79	86.18	5.61	5.61
85.20	85.20	77.61	7.59	7.59
77.36	77.36	67.80	9.56	9.56
68.30	67.54	56.74	10.80	11.56
57.99	55.45	44.45	11.00	13.54
47.19	42.25	31.60	10.65	15.59
40.33	31.97	21.97	10.00	18.36
—	—	—	9.80	20.20

Σχήμα 3.4 Τα πάχη (e) του φράγματος Ταυρωπού (διατομή) στα διάφορα υψόμετρα του

(Πηγή : Διπλωματική Εργασία Β. Στουρνάρας, Αθήνα Νοέμβριος 2012, ΕΜΠ)

Τα πάχη (e) αναφέρονται στα πάχη του κυρίως θόλου του φράγματος, ενώ τα πάχη (e_0) αναφέρονται στα πάχη του κυρίως θόλου συμπεριλαμβανομένου και του αντισεισμικού ερείσματος.

Το αντισεισμικό αυτό έρεισμα που κατασκευάστηκε ανάντη του φράγματος, από σκυρόδεμα, έχει ως στόχο την εξασφάλιση της σταθερότητας των τμημάτων των τόξων που δεν έχουν υποβληθεί σε τσιμεντενέσεις με αποτέλεσμα να είναι θεωρούνται κρίσιμα με ανατροπή προς τα ανάντη σε περίπτωση σεισμικής δόνησης με κατεύθυνση προς τα κατάντη.

Οι δυνάμεις που δέχεται το σώμα του κύριου θόλου είναι το ίδιο βάρος του, οι πρόσθετες επιβαρύνσεις λόγω σεισμών και θερμοκρασίας και οι υδροστατικές πιέσεις που δέχεται από το νερό του ταμιευτήρα.

3.5 Τα συνοδά έργα του φράγματος Ταυρωπού

Τα βασικά έργα που συγκροτούν το όλο αυτό τεχνικό έργο του Ταυρωπού είναι 3 και είναι :

1. Το μεγάλο τοξωτό φράγμα διπλής καμπυλότητας που εκτρέπει τα νερά του ποταμού Ταυρωπού στην θέση Κακαβάκια.
2. Η σήραγγα προσαγωγής
3. Το εργοστάσιο ή ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής που είναι σε μικρή απόσταση ανατολικά του χωριού Βλάσδο, το οποίο βρίσκεται στην κλιτύ του βουνού.

Το συνολικό όμως έργο πέρα από τα τρία βασικά μέρη του συνθέτετε και από άλλα 7 επί μέρους έργα (συνολικά 3+7 έργα) τα οποία είναι :

4. Ο ταμιευτήρας της Νευρόπολης που συνθέτει την σημερινή λίμνη Πλαστήρα
5. Η τάφρος προσαγωγής και οι πύργοι υδροληψίας
6. Ο υδατόπυργος ή πύργος εκτονώσεως
7. Ο υπό πίεση αγωγός που εξασφαλίζει την υδατόπτωση για την κίνηση του εργοστασίου
8. Ο υποσταθμός γραμμής υψηλής τάσεως
9. Το φράγμα εξισώσεως

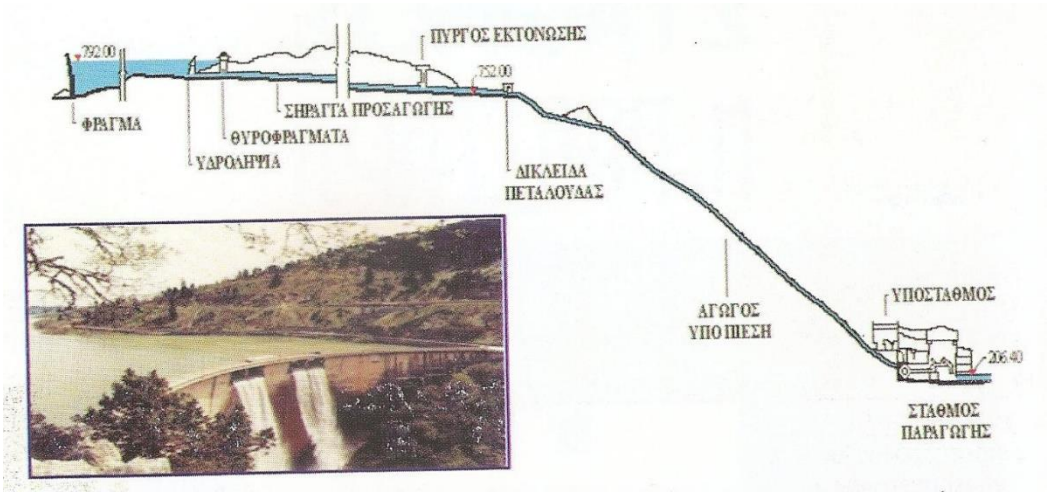
<u>Σύντομη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του υδροηλεκτρικού αυτού έργου</u>

Το φράγμα εκτροπής κατασκευάστηκε για τον σχηματισμό της λίμνης Πλαστήρας όπου συγκεντρώνονται και αποταμιεύονται τα νερά του Ταυρωπού και των άλλων πηγών που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Όταν η στάθμη του ταμιευτήρα βρίσκεται στο σημεία όπου εξασφαλίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα (286,3 hm^3) το νερό οδηγείται στην τάφρο προσαγωγής από τις διελεύσεις των δύο πύργων, των εσχάρων και των θυρίδων υδροληψίας, με αποτέλεσμα να γεμίζει τη μεγάλη σήραγγα προσαγωγής μήκους 2691 μέτρων και μέσω αυτής να περνά από τον υδατόπυργο στην έξοδο της σήραγγας και να φθάνει στον υπό πίεση αγωγό μήκους 2985 μέτρων. Από εκεί λόγω της μεγάλης κλίσης του υπό πίεση αγωγού, το νερό πέφτει, με μέγιστη πίεση περίπου 56,5 ατμοσφαιρών, στο σημείο ένωσης του αγωγού με τις τροφοδοτικές διακλαδώσεις που οδηγούν στους στροβιλοεναλλακτήρες του εργοστασίου. Η μεγάλη πίεση που ασκείτε στο νερό, του προκαλεί μεγάλη δύναμη η οποία είναι απαραίτητη ώστε το νερό να δίνει κίνηση στους δύο υδροστροβίλους που διαθέτει κάθε γεννήτρια. Η κίνηση αυτή μεταδίδεται στις γεννήτριες που με την λειτουργία τους παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται είναι ανάλογη της δυναμικότητας της κάθε γεννήτριας, δηλαδή ανάλογη με την ισχύ της. Οι γεννήτριες που υπάρχουν είναι 3 και η κάθε μία έχει ισχύ ίση με 40000 kW, δηλαδή η εγκατεστημένης ισχύς του εργοστασίου αντιστοιχεί σε 120000 kW.

Το παραγόμενο ρεύμα μέσω αγωγών μεταφέρεται στους μετασχηματιστές. Οι μετασχηματιστές είναι 3, ένας για κάθε γεννήτρια και βρίσκονται στη νότια πλευρά έξω από το εργοστάσιο. Το παραγόμενο ρεύμα έρχεται από τις γεννήτριες με τάση 15000 Volt και μετατρέπεται σε 150000 Volt μέσω των μετασχηματιστών. Η μετατροπή της τάσης αυτής είναι απαραίτητη γιατί χωρίς αυτήν θα χρειαζόταν για την μεταφορά του ρεύματος εναέρια γραμμή πολύ μεγάλης διατομής, πράγμα που τεχνικώς ήταν αδύνατο. Με την τάση των 150000 Volt το ρεύμα μεταφέρεται στον παρακείμενο σταθμό εναέριων διακοπτών, ο οποίος αποτελεί την αφετηρία των δύο γραμμών υψηλής τάσης και διοχετεύεται στους υποσταθμούς της Λαμίας και των Τρικάλων. Εν τέλει, το ρεύμα αυτό ενώνεται με το εθνικό δίκτυο μεταφοράς και καταλήγει στον μεγάλο υποσταθμό του Ρουφ όπου και γίνεται η κατανομή του.

Το νερό που κινεί τις 3 ηλεκτρογεννήτριες καταλήγει να περνά από τις τρεις μηχανές, μία για κάθε γεννήτρια και να ξεχύνεται στην τάφρο (κανάλι) διαφυγής του, που έχει επενδυθεί με σκυρόδεμα σε μία απόσταση 200 περίπου μέτρων. Η ποσότητα του νερού που περνάει από την τάφρο διαφυγής είναι 7 με 9 κυβικά μέτρα το δευτερόλεπτο. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί με το νερό της κάθε μηχανής και άρα η συνολική ποσότητα φτάνει τα 21 με 27 κυβικά μέτρα το δευτερόλεπτο. Έπειτα το νερό διοχετεύεται διαμέσου της τάφρου στο φράγμα εξισώσεως. Πρόκειται για ένα χωμάτινο ανάχωμα που βρίσκεται δυτικά λίγο έξω

από την πόλη της Καρδίτσας και με το οποίο σχηματίστηκε μία άλλη λίμνη, η οποία είναι χωρητικότητας περίπου 500 κυβικών μέτρων. Με το νερό που αποθηκεύεται στην λίμνη εξισώσεως, εξασφαλίζεται η άρδευση ενός τμήματος της πεδιάδας της Καρδίτσας κυρίως κατά τους θερινούς μήνες. Η πεδιάδα της Καρδίτσας φτάνει περίπου τα 600000 στρέμματα, ενώ με τα νερά που κατεβαίνουν από την λίμνη του Ταυρωπού, για να κινήσουν το ομώνυμο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής, εξασφαλίζεται η άρδευση 114000 στρεμμάτων, δηλαδή του ενός πέμπτου περίπου όλης της εκτάσεως της θεσσαλικής γης.



Εικόνα 3.2 Παραστατική Απεικόνιση των έργων του ΥΗΕ Ταυρωπού

(Πηγή : Διπλωματική Εργασία Β. Στουρνάρας, Αθήνα Νοέμβριος 2012, ΕΜΠ)

1. Το μεγάλο τοξωτό φράγμα εκτροπής

Το ένα από τα τρία βασικά επί μέρους τμήματα του ΥΗΕ Ταυρωπού, έχει ήδη παρουσιαστεί παραπάνω, ωστόσο στο σημείο αυτό θα αναφερθούν κάποιες άλλες σημαντικές πληροφορίες που αξίζει να γνωρίζει κανείς. Κατασκευάστηκε στη θέση Κακαβάκια, δυτικά του χωριού Καστανιά και 40 χιλιόμετρα περίπου νοτιοδυτικά της Καρδίτσας. Στην θέση αυτή η στενωπός που σχηματίζεται επί της συμβολής των δύο υψωμάτων, γεμάτα από έλατα, είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες τόσο από τεχνικής πλευράς όσο και από οικονομικής άποψης. Για του λόγου το αληθές, σχετικά με το πόσο ευνοϊκές ήταν οι συνθήκες από τεχνικής άποψης, το φράγμα του Ταυρωπού έχει μήκος στέψης 220 μέτρα με λίμνη χωρητικότητας 400 εκατομμυρίων κυβικών, ενώ το φράγμα του Λάδωνα έχει μήκος στέψης 102 μέτρα και ταμιευτήρα χωρητικότητας 50 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων.

Στο σημείο όπου θεμελιώθηκε το φράγμα, ο ποταμός Ταυρωπός εισχωρούσε σε ένα πολύ στενό φαράγγι, το οποίο τώρα γεφυρώθηκε για την ανέγερση του φράγματος. Οπότε για την κατασκευή του φράγματος χρειάστηκε η εκτροπή του ποταμού, με αποτέλεσμα να κατασκευάσουν ένα προσωρινό πρόφραγμα αλλά και μία προσωρινή σήραγγα εκτροπής μήκους 145 μέτρων και εσωτερικής διαμέτρου 5,26 μέτρων η οποία είναι επενδυμένη με σκυρόδεμα, ενώ το τελευταίο τμήμα της (μήκους περίπου 60 μέτρων) είναι σκαμμένο σε βράχο χωρίς επένδυση. Γενικότερα για την κατασκευή του φράγματος χρειάστηκε να γίνουν οι εξής βοηθητικές εργασίες :

- Διάνοιξη οδών προσπελάσεως στην θέση Κακαβάκια
- Διάνοιξη μίας σήραγγας που οδηγούσε στο λατομείο, για προμήθεια των αδρανών υλικών (αμμοχάλικο)
- Κατασκευή σιλό από οπλισμένο σκυρόδεμα για την αποθήκευση των αδρανών υλικών και του τσιμέντου
- Τοποθέτηση αναμικτήρα για την Παρασκευή του σκυροκονιάματος, με ανάμειξη αδρανών υλικών και τσιμέντου
- Κατασκευή τριών υδατοδεξαμενών για την τροφοδότηση της μπετονιέρας με νερό αλλά και για την ψύξη των μηχανών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος
- Τοποθέτηση τριών μηχανών ντίζελ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις διακοπής του ρεύματος.
- Τοποθέτηση σιλό από σίδερο για την αποθήκευση τσιμέντου ιταλικής προελεύσεως
- Κατασκευή δύο βάσεων από οπλισμένο σκυροκονίαμα για την εγκατάσταση και κίνηση μικρών βαγονιών.
- Εγκατάσταση λυόμενων οικημάτων για την στέγαση του προσωπικού του εργοταξίου (450-500 άτομα)
- Κατασκευή γραφείων, συνεργείων, φαρμακείου και εστιατορίου για τις ανάγκες του προσωπικού.

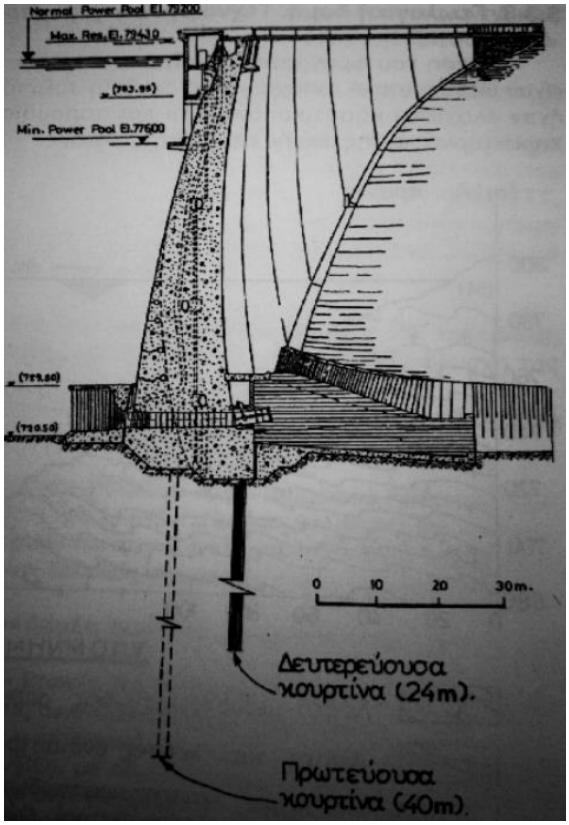
Οι προκαταρκτικές αυτές εργασίες και εγκαταστάσεις ολοκληρώθηκαν το 1959 και από εκεί και πέρα η κατασκευή του φράγματος περατώθηκε με γοργούς ρυθμούς.

Εικόνα 3.3 Η κατασκευή του τοξωτού φράγματος διπλής καμπυλότητας, Ταυρωπού

(Πηγή : https://plastiras-ota.gr/building/fragma/)

Στο εσωτερικό του φράγματος έχουν κατασκευαστεί 3 ελλειψοειδείς γαλαρίες ύψους 2 μέτρων η κάθε μία, για την παρακολούθηση των φυσιολογικών παραμορφώσεων του. Από την αρχή της κατασκευής του έγιναν μελέτες στις οποίες ελήφθησαν υπόψη οι πιο δυσμενείς περιπτώσεις σεισμών και υδροστατικών πιέσεων. Έτσι εξασφαλίστηκε η πλήρης στατική επάρκεια του φράγματος. Ωστόσο για λόγους ασφάλειας αλλά και στατιστικής παρακολούθησης το φράγμα εξετάζεται, μέσω εκκρεμών και κλινομέτρων που έχουν τοποθετηθεί μέσα στις 3 ελλειψοειδείς γαλαρίες. Επίσης η υπηρεσία του φράγματος μετρά τακτικά τις διαρροές του. Οι τεχνικοί της ΔΕΗ με τη μέθοδο των τσιμεντενέσεων (διαφραγματικές κουρτίνες 40 και 24 μέτρων) που εφάρμοσαν στο φράγμα και στην γύρω

περιοχή του , όπου ήταν δυνατόν να διαρρέει από ρωγμές και άλλα ανοίγματα του υπεδάφους, περιόρισαν τις απώλειες σε νερό σε περίπου 3 λίτρα το λεπτό, δηλαδή 190 λίτρα της ώρα. Η ποσότητα αυτή κρίνεται, αναλογικά με την έκταση της λίμνης και την χωρητικότητας της σε νερό, ασήμαντη.



Σχήμα 3.5 Διαφραγματικές κουρτίνες στο φράγμα Ταυρωπού

(Πηγή : Πτυχιακή Εργασία Ευστάθιος Ντόας, Πάτρα 2018)

2. Η σήραγγα προσαγωγής

Η σήραγγα αυτή αρχίζει από τον πύργο δικλείδων υδροληψίας και τελειώνει στον πύργο εκτονώσεως η υδατόπυργο. Έχει μήκος 2691 μέτρων και διατομή 3,5 μέτρων. Εσωτερικώς έχει επενδυθεί με σκυρόδεμα, που η συνολική ποσότητα του ήταν περίπου 17000 κυβικά μέτρα (m^3). Για την ποσότητα αυτή χρησιμοποιήθηκαν περίπου 4500 τόνοι ελληνικού τσιμέντου. Η κλίση της σήραγγας είναι 0,006[5]. Οι εργασίες διανοίξεως της σήραγγας ξεκίνησαν τον Μάρτιο του 1956 και τελείωσαν τον Απρίλιο του 1959 μαζί με όλες τις άλλες σχετικές κατασκευές.

3. Το εργοστάσιο ή ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής

Στη βάση του υπό πίεση αγωγού έχει οικοδομηθεί το εργοστάσιο ή ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, ο οποίος αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το εργοστάσιο αυτό αποτελείται από τις ηλεκτρογεννήτριες, τους υδροστροβίλους, τους μετασχηματιστές, τα μηχανήματα ακριβείας του θαλάμου ελέγχου, τον υπαίθριο σταθμό διακοπτών και τις γραμμές μεταφοράς ρεύματος (μαζί με τους πυλώνες στους οποίους στηρίζονται). Το εργοστάσιο

ηλεκτροπαραγωγής του Ταυρωπού έχει μήκος 75 μέτρων, πλάτος 25 μέτρων και ύψος 12,5 μέτρων. Η κατασκευή του είναι από μπετό, ενώ για την ανέγερση του χρησιμοποιήθηκαν 35000 σάκοι ελληνικού τσιμέντου που αντιστοιχούν σε 1750 τόνους.

Κάτω από την οροφή του μεγάλου θαλάμου όπου βρίσκονται οι στρόβιλοι και οι γεννήτριες, κινούνται δύο συζυγείς γερανογέφυρες ανοίγματος 14 μέτρων και ανυψωτικής δυνάμεως και 65 τόνων η κάθε μία για την διαρκή συντήρηση των μηχανών. Η ανέγερση του εργοστασίου ξεκίνησε τον Μάιο του 1958 και ολοκληρώθηκε τον Σεπτέμβριο του 1959. Ο θάλαμος ελέγχου βρίσκεται κοντά στην είσοδο του εργοστασίου και είναι το μέρος που τοποθετούνται τα μηχανήματα και ο πίνακας ελέγχου. Από τον θάλαμο αυτόν γίνεται ο έλεγχος ολόκληρου του υδροηλεκτρικού έργου και ο χειρισμός των μηχανημάτων. Το συνολικό εμβαδό του εργοστασίου είναι 4800 τετραγωνικά μέτρα. Τέλος όλα τα μηχανήματα που χρειάζονται για την κίνηση του εργοστασίου, τοποθετήθηκαν κατά 90% από τους τεχνικούς της ΔΕΗ, ενώ το 10% από τους Γάλλους της εταιρίας που ανέλαβε το έργο αυτό.

Εικόνα 3.4 Το εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής

(Πηγή : https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf)

4. Ο ταμιευτήρας της Νευρόπολης (λίμνη Πλαστήρα)

Την 1η Οκτωβρίου του 1959 το φράγμα του Ταυρωπού άρχισε να κατακλύζεται με τα νερά του ομώνυμου ποταμού δίνοντας το έναυσμα για την μεταμόρφωση του τοπίου με τον σχηματισμό της μεγάλης λίμνης. Η περιοχή αυτή που μέχρι τότε αποτελούνταν από αγρούς και από δάση με ψηλά πλατάνια και λεύκες, μέρα με τη μέρα άρχιζε να πλημμυρίζει από νερά, ενώ σε διάστημα 10 μηνών η στάθμη του νερού είχε φτάσει στο υψόμετρο 784,8 μέτρα. Μεταφράζοντας το παραπάνω στοιχείο, συμπεραίνεται πως η λίμνη δέχτηκε στην

κοίτη της περίπου 240000000 κυβικά μέτρα (m^3) νερού στο διάστημα ενός υδρολογικού έτους. Η ανώτατη στάθμη αποθήκευσης της λίμνης Πλαστήρας είναι σε υψόμετρο 792 μέτρων, δηλαδή στο ίδιο υψόμετρο που βρίσκονται και οι υπερχειλιστές του φράγματος Η συνολική επιφάνεια της λίμνης είναι 25,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km^2), ενώ η ωφέλιμη χωρητικότητα ανέρχεται στα 286,3 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (hm^3). Δηλαδή για να λειτουργήσει το υδροηλεκτρικό έργο, πρέπει να εξασφαλιστεί η ωφέλιμη αυτή χωρητικότητα που είναι απαραίτητη για την τροφοδότηση του εργοστασίου. Στη λίμνη εκτός από τις φυσιολογικές διαρροές που σημειώνονται στην περιοχή του φράγματος, της αναφέρθηκε παραπάνω, σημειώνονται απώλειες που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική εξάτμιση. Από παρατηρήσεις που έγιναν από την υπηρεσία της ΔΕΗ, διαπιστώθηκε ότι οι απώλειες αυτές ήταν 43 χιλιοστά (mm) της επιφάνειας της λίμνης δηλαδή περίπου 512000 κυβικά μέτρα (m^3) τους ανοιξιάτικους μήνες και 168 χιλιοστά (mm) της επιφάνειας της λίμνης, δηλαδή περίπου 2000000 κυβικά μέτρα (m^3) τους καλοκαιρινούς μήνες. Τους χειμερινούς μήνες η εξάτμιση σχεδόν μηδενίζεται.

Υπερχειλιστές Ταυρωπού

Οι υπερχειλιστές του φράγματος βρίσκονται σε υψόμετρο 792 μέτρων (m) και αποτελούνται από δύο ζεύγη ελεύθερων στομίων περίπου στο μέσο της στέψης, τα οποία οδηγούν το νερό στην κατάντη πλευρά του φράγματος μετά από πτώση 70 μέτρων (m). Τα στόμια έχουν διαστάσεις 3,5 x 2,5 μέτρα, ενώ συνολικά το άνοιγμα των υπερχειλιστών είναι 14 x 2,5 μέτρα και η μέγιστη παροχή τους 460 m^3/s στην ανώτατη στάθμη της λίμνης που βρίσκεται σε υψόμετρο 794,3 μέτρων. Ο συγκεκριμένος τύπος υπερχειλιστή είναι ιδανικός για τοξωτά φράγματα καθώς δεν είναι ξεχωριστό έργο και αποτελεί και οικονομικότερη λύση. Η λειτουργία των υπερχειλιστών διακρίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο η κινητική ενέργεια του νερού καταστρέφεται κατά τη διάρκεια της πτώσης, ενώ στο δεύτερο κατά την πρόσκρουση του νερού στο κατάντη μέρος του φράγματος διώρυγα με ενισχυμένο σκυρόδεμα και κλίση προς τα κατάντη οδηγεί το νερό στην παλιά κοίτη του ποταμού.

Εικόνα 3.5 Οι δύο υπερχειλιστές του φράγματος Ταυρωπού σε λειτουργία

(Πηγή : https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf)

Ένα φράγμα της αυτό του Ταυρωπού με μικρό όγκο σκυροδέματος, είναι δυνατό εκτός από απρόβλεπτα φυσικά φαινόμενα, να καταστραφεί και από ανθρώπινη δραστηριότητα, της κάποια έκρηξη στο κέντρο της ανάντη πλευράς. Για την αποφυγή του προβλήματος αυτού στο έργο προστέθηκαν δύο ακόμα κατασκευές ασφαλείας. Οι κατασκευές αυτές είναι οι εκκενωτές πυθμένα και η σήραγγα εκτροπής.

Εκκενωτές πυθμένα Ταυρωπού

Οι εκκενωτές πυθμένα αποτελούνται από δύο δίδυμους αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 2,2 μέτρα ο καθένας. Ανάντη του φράγματος η είσοδος των αγωγών είναι κατασκευασμένη με ειδικές εσχάρες από σκυρόδεμα που εμποδίζουν τη διέλευση μεγάλων αντικειμένων που βρίσκονται στον πυθμένα του ταμιευτήρα και αποτελούν τον νεκρό του όγκο. Μετά την είσοδο στους αγωγούς υπάρχει θυρόφραγμα το οποίο μπορεί να απομονώσει τον αγωγό για επισκευές και συντήρηση. Το θυρόφραγμα ελέγχεται από δωμάτιο το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο 789,95 μέτρων. Εκτός από το έργο εισόδου, το βασικότερο κομμάτι κάθε εκκενωτή αποτελεί το έργο εξόδου. Πρόκειται για μία βαλβίδα κοίλης φλέβας σχεδιασμένης κατάλληλα για την αποτόνωση της ενέργειας του νερού, διασπείροντας τη ροή του νερού. Οι εκκενωτές ανοίγουν μέσω ενός συστήματος από δύο ηλεκτρικούς κινητήρες που μετακινούν προς τα πίσω το κυλινδρικό κάλυμμα της βαλβίδας και επιτρέπουν με τον τρόπο αυτό τη ροή του νερού. Οι εκκενωτές μπορούν να ανοίξουν και χειροκίνητα, ωστόσο το δωμάτιο στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο υδραυλικός μηχανισμός ανοίγματος των βαλβίδων βρίσκεται στη χαμηλότερη προσβάσιμη στοά στο σώμα του φράγματος σε υψόμετρο 725 μέτρων, με αποτέλεσμα στις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης η πρόσβαση στο χαμηλό σημείο αυτό να είναι εξαιρετικά επικίνδυνη. Τέλος εκκενωτής απαιτείται να δουλεύει ανά τακτά χρονικά διαστήματα, για την απομάκρυνση των φερτών που καθιζάνουν στην είσοδο του και μειώνουν την ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα.

Εικόνα 3.6 Εκκενωτές πυθμένα Ταυρωπού

(Πηγή : Δ. Δημόπουλος - Ι.Π. Στεφανάκος , Αθήνα ΕΜΠ http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/10.1.pdf)

5. Η τάφρος προσαγωγής και οι πύργοι υδροληψίας

Η τάφρος προσαγωγής και οι πύργοι υδροληψίας κατασκευάστηκαν για την διάνοιξη της μεγάλης σήραγγας προσαγωγής μήκους 2691 μέτρων. Από την τάφρο υδροληψίας το νερό της λίμνης διοχετεύεται στη σήραγγα προσαγωγής και από εκεί στον υπό πίεση αγωγό, για να οδηγηθεί με πτώση στο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής. Η τάφρος αυτή έχει μήκος περίπου 200 μέτρων και μέσα σε αυτήν έχει κατασκευαστεί ένας αγωγός από σκυρόδεμα

160 μέτρων και διαμέτρου 3,5 μέτρα. Στην είσοδο του αγωγού έχει κατασκευαστεί ένα κτίσμα που βρίσκεται μέσα στη λίμνη και ονομάζεται πύργος εσχάρων υδροληψίας, σε απόσταση 160 μέτρων από ένα άλλο κτίσμα που λέγεται πύργος δικλείδων υδροληψίας και που αποτελεί την είσοδο της μεγάλης σήραγγας προσαγωγής. Ο πύργος εσχάρων υδροληψίας έχει ύψος 27 μέτρων και οι εσχάρες που βρίσκονται στη βάση του χρησιμεύουν για την διέλευση του νερού της λίμνης. Ο πύργος δικλείδων υδροληψίας έχει ύψος 28 μέτρων και αποτελείται από μία δικλείδα προφράξεως, μια δικλείδα κυλιόμενη και ένα φρέαρ καθόδου με κλίμακες που χρησιμεύει για να κατεβαίνουν τα συνεργεία για τον καθαρισμό της σήραγγας ή για άλλου είδους εργασίες μέσα σε αυτήν.

6. Ο υδατόπυργος ή πύργος εκτονώσεως

Ο πύργος εκτονώσεως βρίσκεται στην έξοδο της σήραγγας προσαγωγής και πρόκειται για ένα τσιμεντένιο κτίσμα, ύψους 46 μέτρων που αποτελεί ένα είδος συνδέσμου της σήραγγας προσαγωγής και του υπό πίεση αγωγού. Ο σκοπός του πύργου αυτού είναι να κατευνάζει την απότομη πίεση του νερού, το οποίο θα είχε σοβαρές συνέπειες για τα τοιχώματα του υπό πίεση αγωγού. Ωστόσο αυτό θα πρέπει να γίνεται μόνο σε περιπτώσεις όπου σταματά η λειτουργία του εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής και άρα η διοχέτευση του νερού της λίμνης από τη σήραγγα προσαγωγής και τον χαλύβδινο αγωγό υπό πίεση.

Δίπλα στον υδατόπυργο υπάρχει και ένα μικρό κτήριο το οποίο ονομάζεται αμμοσυλλέκτης και ο σκοπός του είναι η συλλογή της άμμου που συσσωρεύεται με τον χρόνο στην σήραγγα και που φτάνει μέχρι τον πύργο εκτονώσεως. Θεωρείται απαραίτητο έργο για την εξασφάλιση της καθαρότητας και διαύγειας του νερού που διοχετεύεται μέσω του χαλύβδινου υπό πίεση αγωγού στους στροβίλους και τις ηλεκτρογεννήτριες.

7. Ο υπό πίεση αγωγός

Ο υπό πίεση αγωγός είναι χαλύβδινος με ισχυρά τοιχώματα και βάρους περίπου 4900 τόνων γαλλικής κατασκευής. Ο αγωγός αυτός είναι μήκους 2985 μέτρων, διατομής 3 μέτρων στην είσοδο και 2,4 μέτρων στην έξοδο. Εσωτερικός ο αγωγός βάφεται και καθαρίζεται κάθε τρία χρόνια ώστε να μην είναι δυνατή η οξείδωση του. Αυτό φυσικά σημαίνει ότι η λειτουργία του εργοστασίου σταματάει για λίγες μέρες.

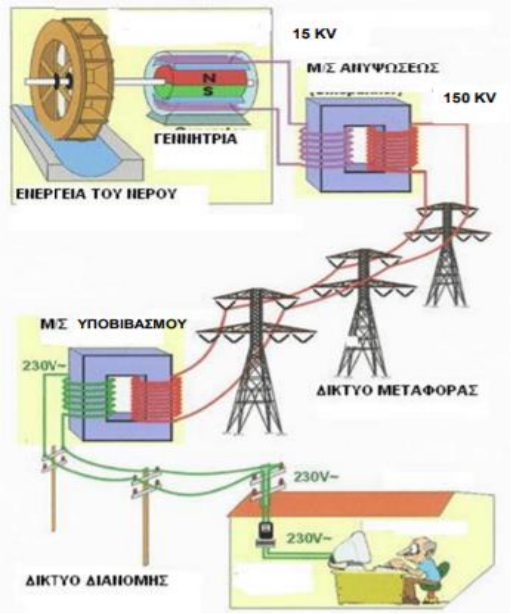
Τα βάθρα για την τοποθέτηση του αγωγού αυτού άρχισαν να κατασκευάζονται τον Δεκέμβριο του 1957 ενώ η μεταφορά και τοποθέτηση των σωλήνων έγινε τον Φεβρουάριο του 1959. Τον Μάιο του 1960 ολοκληρώθηκε το έργο του χαλύβδινου αγωγού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η υπηρεσία της ΔΕΗ τοποθέτησε φώτα κατά μήκος του αγωγού ανά μικρά διαστήματα, με το αποτέλεσμα να είναι πολύ όμορφο και επιβλητικό.

Εικόνα 3.7 Ο υπό πίεση αγωγός (κάτω αριστερά) που οδηγεί το νερό στο εργοστάσιο

(Πηγή : https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf)

8. Ο υποσταθμός υψηλής τάσεως

Στην νότια πλευρά του εργοστασίου, έξω από αυτό τοποθετήθηκαν οι δύο μετασχηματιστές και αργότερα και ο τρίτος που της προαναφέρθηκε μετατρέπουν το ρεύμα των 15000 Volt σε 150000 Volt. Λίγα μέτρα πιο μακριά βρίσκεται και ο υπαίθριος σταθμός εναέριων διακοπτών, από τον οποίο εκκινεί η γραμμή υψηλής τάσεως των 150000 Volt. Ο χειρισμός του υπαίθριου αυτού σταθμού εναέριων διακοπτών γίνεται αυτομάτως από τον θάλαμο ελέγχου του εργοστασίου.



Εικόνα 3.8 Η διαδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας

(Πηγή : https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf)

9. Το φράγμα εξισώσεως

Το επαναρρυθμιστικό αυτό χωμάτινο φράγμα ή φράγμα εξισώσεως κατασκευάστηκε από το υπουργείο Γεωργίας για την άρδευση της πεδιάδας της Καρδίτσας από τα εξερχόμενα νερά του εργοστασίου. Τοποθετήθηκε στο χωριό Μητρόπολη και βρίσκεται περίπου 1000 μέτρα βόρεια από το εργοστάσιο. Το ύψος του χωμάτινου φράγματος αυτού είναι 15 μέτρα, ενώ η χωρητικότητα του ταμιευτήρα της λίμνης που σχηματίστηκε είναι 500000 κυβικά μέτρα (m^3) νερού.

Άξιο αναφοράς επίσης και σχετικό με τα έργα του ΥΗΕ Ταυρωπού είναι το γεγονός ότι και μετά τη λειτουργία του φράγματος, απασχολείται μόνιμο προσωπικό της τάξης των 22 ατόμων. Το προσωπικό αυτό αποτελείται από χειριστές μηχανημάτων, μηχανικούς, βοηθούς – εργάτες κ.α. Για την εγκατάσταση του ολιγάριθμου αυτού προσωπικού της, η ΔΕΗ προχώρησε στην οικοδόμηση ενός μόνιμου οικισμού που αποτελείται από 17 οικήματα για οικογένειες, 2 για μεμονωμένα άτομα, 1 εστιατόριο που είναι και αίθουσα συγκεντρώσεων, 1 ξενώνας και μία εκκλησία η οποία αφιερώθηκε στην μνήμη του Αγίου Νικολάου. Γενικότερα έχει διαμορφωθεί ένα σύνολο σύγχρονου οικισμού ώστε να εξασφαλιστεί η άνετη διαμονή του μόνιμου προσωπικού.

3.6 Οι ωφέλειες από την λειτουργία του φράγματος Ταυρωπού

Τα πλεονεκτήματα που προέκυψαν από την κατασκευή και λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου του Ταυρωπού είναι πολλές και σημαντικές. Τα πλεονεκτήματα αυτά αναφέρονται παρακάτω.

- Μετά από την κατασκευή του ΥΗΕ Ταυρωπού και την λειτουργία του, έγινε προσθήκη 250000000 κιλοβατώρων ανά έτος στο εθνικό ενεργειακό σύστημα. Το νούμερο αυτό αφορούσε αποκλειστικά και μόνο τις πρώτες 2 ενεργειακές μονάδες των 80000 kW, ενώ με την λειτουργία της τρίτης μονάδας που πραγματοποιήθηκε τα τέλη του 1962 ή αρχές 1963, η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που προστέθηκε στο εθνικό δίκτυο συνολικά και από τις 3 μονάδες του εργοστασίου ανήλθε σε 375000000 κιλοβατώρες. Η ποσότητα αυτή συνέβαλε σημαντικά στην βελτίωση και εξισορρόπηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που είχε ιδιαίτερη συμβολή στην αδιάκοπη παροχή ρεύματος στις ηλεκτροδοτούμενες περιοχές της χώρας.

- Απόρροια του προηγούμενου πλεονεκτήματος είναι η αδιαμφισβήτητη συνεισφορά που προσφέρει το υδροηλεκτρικό αυτό έργο στην προσπάθεια κάλυψης των αναγκών η οποία είναι διαρκώς αυξανόμενη. Πιο συγκεκριμένα το έργο αυτό θεωρείται έργο αιχμής, προορισμένο να καλύπτει τα σημειούμενα σε ηλεκτρική ενέργεια στις ώρες του εικοσιτετράωρου όπου η ζήτηση είναι τόσο μεγάλη ώστε να υπερφορτώνεται το εθνικό δίκτυο. Η ΔΕΗ συνεπώς με το έργο αυτό προνοεί για τις δυσμενείς περιπτώσεις όπου η τάση του ρεύματος πέφτει γεγονός που είναι φυσικό να σημειώνεται από τη στιγμή που η τεχνολογία προχωρά συνεχώς και δεν επιτρέπεται σε μία χώρα της η Ελλάδα η ηλεκτρική ενέργεια να μην θεωρείται δεδομένη σε οποιαδήποτε γωνιά της.

- Ο αγροτικός πληθυσμός της πεδιάδας της Καρδίτσας και γενικότερα οι κάτοικοι της περιοχής ευεργετήθηκαν από την λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου του Ταυρωπού. Η προσφορά του έργου στην δυτική Θεσσαλία χαρακτηρίζεται το λιγότερο ως πολύτιμή. Με την άρδευση των 114000 στρεμμάτων γης, καθ' όλη τη διάρκεια του καλοκαιριού κάθε χρόνο, από τα νερά του Ταυρωπού θα τριπλασιαστεί η απόδοση, κατά στρέμμα, των αγροτεμαχίων της πεδιάδας της Καρδίτσας. Βασική προϋπόθεση γι' αυτό ήταν τα χωράφια αυτά να γίνουν ποτιστικά, μετά την κατασκευή του φράγματος εξισώσεως στο χωριό Μητρόπολη. Το φράγμα εξισώσεως κατασκευάστηκε κανονικά με αποτέλεσμα να σωθούν τα ξερά αυτά μέχρι τότε χωράφια που η μόνη πηγή τους σε νερό ήταν τα νερά της βροχής. Από την μετατροπή των χωραφιών σε ποτιστικά ήταν δυνατή και η αναδιάρθρωση των καλλιεργειών τους και αντί των δημητριακών που υπήρχαν στο μεγαλύτερο ποσοστό των χωραφιών, καλλιεργήθηκαν και άλλα είδη πιο προσοδοφόρα για τους αγρότες, της ο καπνός, το βαμβάκι και η μηδική. Επακόλουθο της αύξησης της απόδοση των αγρών και της αλλαγής των καλλιεργειών ήταν και η αύξηση του εισοδήματος των αγροτών της περιοχής.

- Επίσης σημαντική ωφέλεια που προέκυψε από την κατασκευή του ΥΗΕ Ταυρωπού ήταν και η εξασφάλιση αποδοτικής εργασίας στους μόνιμα υποαπασχολούμενους κατοίκους της ορεινής αυτής περιοχής, επί 4 ολόκληρα χρόνια. Μπορεί ο αριθμός των εργαζομένων να ποίκιλλε από χρόνο σε χρόνο ωστόσο κατά την περίοδο του καλοκαιριού του 1959 όπου οι εργασίες είχαν φτάσει στο πικ τους, σε σχέση με την ένταση, ο αριθμός των απασχολούμενων στο έργο ήταν πάνω από 2000 άτομα. Και το σημαντικότερο αυτού ήταν πως το 95% από αυτούς προερχόταν από τα γύρω χωριά, δηλαδή το Μορφοβούνι, το Νεοχώρι και τον Μεσενικόλα.

- Για τις ανάγκες της κυκλοφορίας των τεχνικών συνεργείων που ασχολήθηκαν με την κατασκευή των διάφορων τμημάτων του έργου, κατασκευάστηκαν από την αρχή άλλα και επισκευάστηκαν πολλοί δρόμοι. Πρόκειται για οδικό δίκτυο 95 περίπου χιλιομέτρων, που εξυπηρετεί πλέον έναν ικανό αριθμό χωριών που προηγουμένως αντιμετώπιζαν σοβαρά προβλήματα επικοινωνίας με την πόλη της Καρδίτσας αλλά ακόμα και μεταξύ τους. Στο οδικό δίκτυο των 95 περίπου χιλιομέτρων που κατασκευάστηκε από τα ειδικά συνεργεία της ΔΕΗ περιλαμβάνονται και οι 2 περιφερειακοί δρόμοι. Ο πρώτος είναι αυτός που αρχίζει από το εργοστάσιο στο χωριό Βλάσδο, περνά από την Μονή της Κορώνης και τον αυχένα Τσαρδάκι και μέσω του χωριού Καστανιά καταλήγει στα Κακαβάκια όπου είναι η θέση του φράγματος. Ο δεύτερος είναι αυτός που αρχίζει από το Βλάσδο και ενώνει τα χωριά Μεσενικόλας, Μορφοβούνι, Κερασιά, Πεζούλα και ολοκληρώνεται στο Νεοχώρι.

- Για την εκτέλεση του έργου χρειάστηκε να εγκατασταθούν ηλεκτρικές γραμμές για την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων που βρίσκονταν στα εργοτάξια. Έτσι πολύ πριν δοκιμαστεί η τροφοδοσία του εθνικού ενεργειακού συστήματος, σε πολλά ορεινά χωριά της θεσσαλικής περιφέρειας δοκιμάστηκε η ηλεκτροφώτιση των κατοικιών μέσω του ΥΗΕ Ταυρωπού Γεγονός που ήταν πολύ ελπιδοφόρο ώστε και αυτοί οι άνθρωποι να έχουν μία σταθερή και αξιόπιστη τάση ρεύματος, χωρίς να προκαλούνται προβλήματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

- Με την δημιουργία του φράγματος και την πλήρωση του ταμιευτήρα του (λίμνη Πλαστήρα) η υπηρεσία της ΔΕΗ εξασφάλισε και έναν άλλο πόρο ζωτικής σημασίας στους κατοίκους των γύρω περιοχών. Συνεργεία της διεύθυνσης αλιείας του υπουργείου Βιομηχανίας έριξαν στην λίμνη που διαμορφώθηκε μεγάλες ποσότητες λιμναίων ψαριών, παραδείγματος χάρη οι πέστροφες, οι οποίες πολλαπλασιάζονται με ταχύς ρυθμούς. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η λίμνη να γεμίσει με τέτοιου είδους ψάρια και να δημιουργηθούν νέες ευκαιρίες επαγγελματικής απασχόλησης των κατοίκων της ορεινής περιοχής της δυτικής Θεσσαλίας. Και μπορεί να πει κανείς πως εξασφαλίστηκε και πολύτιμη και σχετικά φθηνή τροφή για τον πληθυσμό της περιοχής.

- Τελευταία αλλά εξίσου σημαντική ή ίσως και περισσότερο σημαντική από τις παραπάνω ωφέλειες του έργου είναι η προσφορά στην τουριστική αξιοποίηση της περιοχής της λίμνης. Το φράγμα έχει μεταβάλλει άρδην το τοπίο και μπορεί να πει κανείς πως είναι από τις εξαιρετικά ελάχιστες περιπτώσεις που μία ανθρώπινη παρέμβαση έδωσε νέα πνοή στη φύση και δημιούργησε ένα ειδυλλιακό περιβάλλον με τα πολύ όμορφα φιόρδ που θυμίζουν Σκανδιναβία. Σε συνδυασμό με τα δέντρα που καθρεφτίζονται στα νερά της λίμνης και τα χωριά γύρω γύρω συνθέτετε ένα απερίγραπτα όμορφο τοπίο. Επίσης το ότι η λίμνη αυτή βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο (792 μέτρα από την μέση στάθμη της θάλασσας) της εξασφαλίζει ένα θαυμάσιο ορεινό κλίμα όπου τα θεόρατα βουνά της Πίνδου και των Άγραφων που την περιβάλλουν είναι γύρω στους 7 με 8 μήνες το χρόνο κατάλευκα από το χιόνι.

Εικόνα 3.9 Φιόρδ στην λίμνη Πλαστήρα

(Πηγή : https://www.i-diakopes.gr/toyrismos/toyristikoi-proorismoi/limni-plastira-to-meros-poy-ta-fiord-paizoyn-me-ta-dentra-poy-kathreftizontai-sta-nera-tis-omorfis-limnis/)

Τη λίμνη μπορεί να την επισκεφτεί κανείς και τις 4 εποχές του χρόνου, ενώ για την πραγματοποίηση του γύρου της λίμνης χρειάζεται να διαθέσει κανείς μόνο μία ημέρα, λόγω του ότι η συνολική απόσταση είναι γύρω στα 100 χιλιόμετρα. Η

ευρύτερη περιοχή της λίμνης συγκεντρώνει ένα πλήθος από εντυπωσιακά αξιοθέατα, της θρησκευτικά μνημεία με βασικότερο την μονή της Κορώνης όπου από εκεί οραματίστηκε το 1925 ο αείμνηστος Νικόλαος Πλαστήρας την κατασκευή του έργου αυτού. Για το λόγο αυτό κιόλας η ΔΕΗ χάρισε στο μοναστήρι μία διώροφη οικοδομική πτέρυγα με μεγάλο αριθμό δωματίων. Εκτός από ενδιαφέροντα θρησκευτικά μνημεία, υπάρχουν και μουσεία, πέτρινα γεφύρια και γραφικά χωριά. Αυτά σε συνδυασμό με τα πυκνά δάση, τα πανύψηλα βουνά και τα επιβλητικά σπήλαια χαρίζουν μια φανταστική θέα στην λίμνη. Γύρω από την λίμνη υπάρχουν δεκάδες χωριά και το καθένα έχει τη δική του ομορφιά και φυσιογνωμία.

Με τον τρόπο αυτό το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο του Ταυρωπού εκτός από τα ανεκτίμητα πλεονεκτήματα που προσφέρει στην τοπική και γενική οικονομία, εξασφαλίζει και έναν άλλο σπουδαίο πόρο ζωτικής σημασίας για τους Θεσσαλούς κατοίκους.

Εικόνα 3.10 Φράγμα Ταυρωπού (ανάντη πλευρά του φράγματος και ταμιευτήρας)

Εικόνα 3.11 Χωριό γύρω από την λίμνη Πλαστήρα

4. Αριθμητική προσομοίωση του φράγματος

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω διαφορετικών αναλύσεων, διαφορετικών υδατικών σταθμών και διαφορετικών σεισμικών επιταχύνσεων. Το μοντέλο του εδάφους θεμελίωσης του φράγματος θα είναι πάντα το ίδιο, διότι πρόκειται για πραγματικό φράγμα και συνεπώς οι συνθήκες του εδάφους είναι πραγματικές. Αρχικά δημιουργήθηκε το προσομοίωμα του φράγματος του Ταυρωπού σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ώστε να διεξαχθούν οι αναλύσεις για τις διάφορες συνθήκες που θα αναλυθούν παρακάτω. Το προσομοίωμα αυτό προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική διατομή του φράγματος.

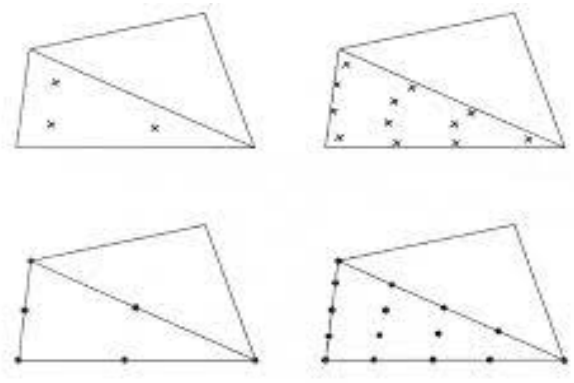
Το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε ήταν η ανάλυση και μελέτη του τοξωτού φράγματος διπλής καμπυλότητας του Ταυρωπού. Λήφθηκαν υπόψη διάφορες παράμετροι για περιπτώσεις διαφορετικών φορτίσεων οι οποίες αναφέρθηκαν και στο πρώτο κεφάλαιο της εισαγωγής και θα γίνει διεξοδική ανάλυση παρακάτω. Οι αναλύσεις αυτές σχετίζονται με όλες τις πιθανές ωθήσεις που μπορεί να δεχτεί το φράγμα ανά πάσα στιγμή κατά τη λειτουργία του. Για την προσομοίωση του προβλήματος έγινε χρήση δύο λογισμικών.

4.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Plaxis 2D το οποίο είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για δισδιάστατη ανάλυση της ευστάθειας και εκτίμηση διαφορετικών γεωτεχνικών ζητημάτων. Από το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εξάγει κανείς χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά εδάφους και κατασκευής υπό την επίδραση ψευδοστατικών και δυναμικών φορτίσεων.

Στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων τα προβλήματα μπορούν να απεικονισθούν είτε σαν μοντέλα επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) είτε σαν αξονοσυμμετρικά μοντέλα παραμόρφωσης με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (οριζόντια x και κατακόρυφη διεύθυνση y). Το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιείται σε σχήματα με ομοιόμορφη διατομή όπου οι συνιστώσες των τάσεων δε μεταβάλλονται κατά την διεύθυνση ενός από των 2 αξόνων. Το αξονοσυμμετρικό μοντέλο παραμόρφωσης (axisymmetric model) χρησιμοποιείται κυρίως σε κυκλικές κατασκευές της αγωγούς. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στην ουσία αντιμετωπίζει το μοντέλο που πρόκειται να προσομοιωθεί ως έναν αριθμό περιοχών που ονομάζονται στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται σε ένα συγκεκριμένο αριθμό πεπερασμένων κόμβων. Τα τεχνητά πεπερασμένα στοιχεία είναι τριγωνικά ή τετράπλευρα και επίσης υπάρχουν και οι κόμβοι. Υπάρχουν τα 6-κομβικά τριγωνικά στοιχεία και τα 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία. Τα 6-κομβικά δίνουν μικρότερη ακρίβεια στους υπολογισμούς των τάσεων και παραμορφώσεων. Χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα τους σε αξονοσυμμετρικά μοντέλα, ενώ δεν συνίστανται σε υπολογισμούς συντελεστών ασφαλείας. Τα 15-κομβικά τριγωνικά στοιχεία δίνουν υψηλή ακρίβεια στους υπολογισμούς των τάσεων και παραμορφώσεων. Χρησιμοποιούνται σε πιο δύσκολα γεωτεχνικά προβλήματα, ωστόσο είναι ιδιαίτερα απαιτητικά σε αποθηκευτικό χώρο και χρόνο υπολογισμού. Οι μετατοπίσεις των κόμβων στο πρόγραμμα εμφανίζονται ως μεταβλητές. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων θα πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων. Το πρόβλημα εκφράζεται ως σύστημα εξισώσεων που επιλύονται με σύγχρονες και σύνθετες αριθμητικές μεθόδους όπου οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους. Επίσης υπάρχουν και τα

σημεία τάσης όπου σε αντίθεση με τις μετατοπίσεις, οι τάσεις υπολογίζονται στο εσωτερικό των στοιχείων



Εικόνα 4.1 Στα 2 πάνω σχήματα παρατηρούνται 3 σημεία τάσεων (αριστερά) και 12 σημεία τάσεων (δεξιά), ενώ στα 2 κάτω σχήματα παρατηρούνται τα 6 κομβικά στοιχεία (αριστερά) και τα 15 κομβικά στοιχεία (δεξιά)

(Πηγή : http://www.archimedes.teiwest.gr/images/ypoergo_10/PE4_26112015.pdf)

Σε κάθε νέα μοντελοποίηση ορίζεται η γεωμετρία της διατομής πρώτα η οποία συνήθως περιλαμβάνει την θεμελίωση και τους εδαφικούς σχηματισμούς ή ένα αντιπροσωπευτικό κομμάτι του εδάφους. Το μοντέλο γεωμετρίας στην παρούσα διπλωματική είναι μία δισδιάστατη αναπαράσταση ενός πραγματικού προβλήματος και αποτελείται από σημεία γραμμές και συμπλέγματα. Το μέγεθος του μοντέλου είναι αρκετά μεγάλο, ώστε τα όρια να μην επηρεάσουν τα αποτελέσματα του προβλήματος που μελετάται. Τα στοιχεία σε ένα γεωμετρικό μοντέλο είναι τα σημεία, οι γραμμές και τα συμπλέγματα. Τα σημεία αποτελούν την αρχή και το πέρας των γραμμών, ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την τοποθέτηση αγκυρών, των σημείων δυνάμεων και των σταθερών σημείων. Οι γραμμές συμβάλλουν στον καθορισμό των φυσικών ορίων της γεωμετρίας, των ορίων του μοντέλου, τον διαχωρισμό στρωμάτων του εδάφους, τον διαχωρισμό των σταδίων σε μία κατασκευή. Όσον αφορά τα συμπλέγματα πρόκειται για περιοχές που περικλείονται από τις γραμμές. Μέσα στο ίδιο σύμπλεγμα οι ιδιότητες του εδάφους ή των υλικών είναι ομοιογενείς. Τα συμπλέγματα δηλαδή μπορούν να είναι μέρη της κατασκευής ενός έργου ή στρώματα εδάφους.

Το ειδικό αυτό λογισμικό δισδιάστατης απεικόνισης παραμορφώσεων και αναλύσεων Plaxis 2D αποτελείται από 4 υποπρογράμματα.

1. Το Input Program στο οποίο εισάγονται οι μονάδες των μεγεθών μήκους, χρόνου, δύναμης αλλά και οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης. Έπειτα σχεδιάζεται το γεωμετρικό μοντέλο με την βοήθεια των εργαλείων σχεδίασης που υπάρχουν στο λογισμικό αυτό. Επίσης εισάγονται τα χαρακτηριστικά των υλικών (φυσικά και μηχανικά) για την κατασκευή του έργου και για την πιστή απεικόνιση του εδάφους θεμελίωσης. Καθορίζονται επίσης και οι αρχικές συνθήκες ώστε να μπορείς να προχωρήσεις στο επόμενο υποπρόγραμμα.

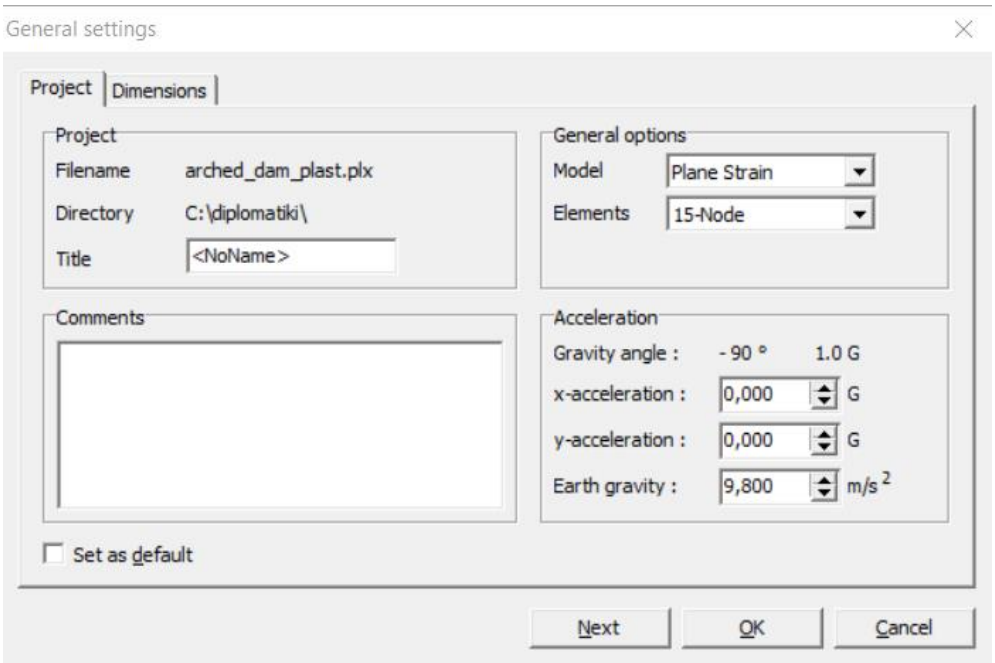
2. Το Calculation Program στο οποίο δημιουργούνται τα στάδια υπολογισμού ανάλογα με το πως έχει σχεδιαστεί το έργο. Έπειτα υλοποιούνται οι υπολογισμοί με σκοπό να βρεθεί να ο συντελεστής ασφαλείας και να οδηγηθεί ο χρήστης στο άνοιγμα του επόμενου υποπρογράμματος.

3. Το Output Program είναι το πρόγραμμα στο οποίο δίνονται τα αποτελέσματα και η παρουσίαση των παραπάνω υπολογισμών. Δίνονται οι συνολικές μετακινήσεις και οι αστοχίες του εκάστοτε γεωμετρικού μοντέλου, οι πιέσεις των πόρων, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται σε αυτό και άλλα.

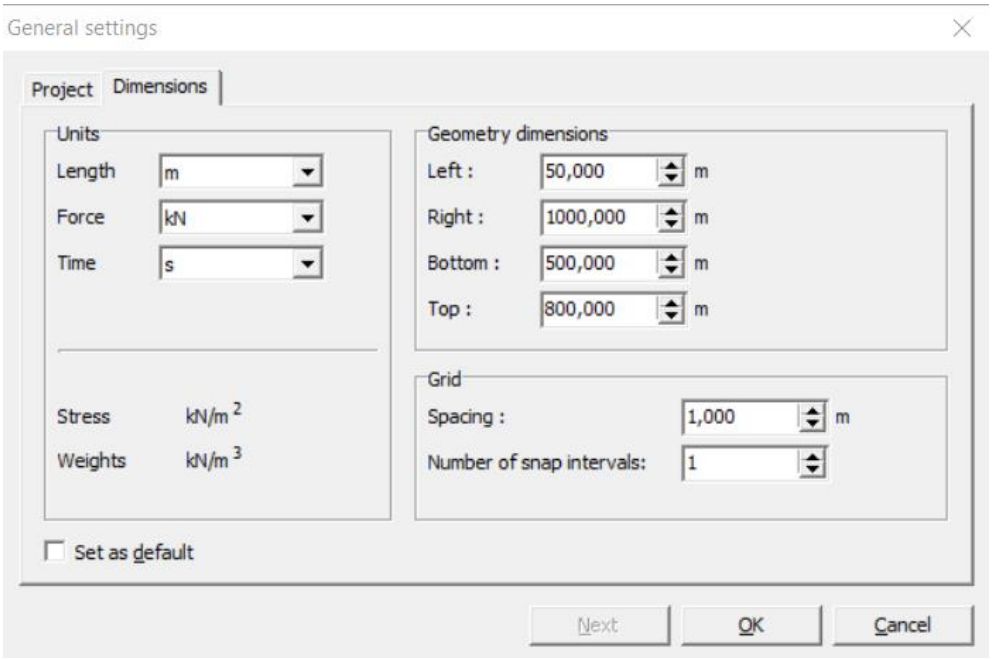
4. Το Curves Program δίνεται ώστε τα αποτελέσματα που εξήχθησαν να απεικονισθούν πάνω σε διαγράμματα. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει αναφορά στα κρίσιμα σημεία τα οποία επιλέγονται στο 2° υποπρόγραμμα, ώστε να μπορέσουν να δημιουργηθούν τα διαγράμματα των μετατοπίσεων των κρίσιμων σημείων που επιλέχθηκαν, αλλά και διαγράμματα επιταχύνσεων για τα κρίσιμα σημεία του μοντέλου, της και διάφορα άλλα διαγράμματα.

4.2.1 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Input Program

Της αναφέρθηκε και στην περιγραφή του Input Program σε αυτό πρέπει να εισαχθούν οι γενικές ρυθμίσεις. Αρχικά έγινε εισαγωγή του ονόματος του αρχείου που πρόκειται να γίνουν οι αναλύσεις, έπειτα επιλέχθηκε ο τύπος του προτύπου και ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Επίσης καθορίζονται οι μονάδες των μεγεθών που αναφέρθηκαν και προηγουμένως, οι επιταχύνσεις (αν χρειάζονται) και οι διαστάσεις και η πυκνότητα του καννάβου.

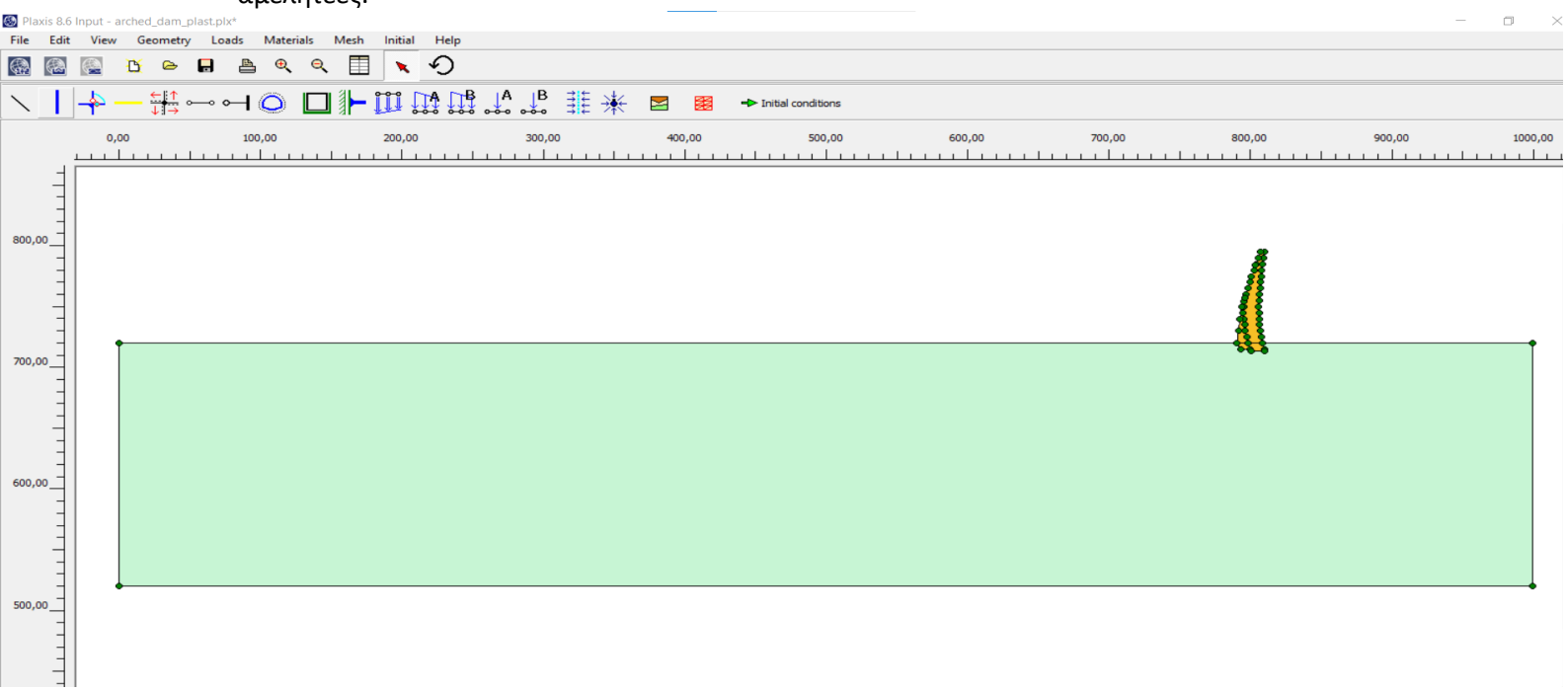


Εικόνα 4.2 Γενικές Ρυθμίσεις – Καθορισμός ονόματος, προτύπου, τύπου στοιχείων και επιταχύνσεων



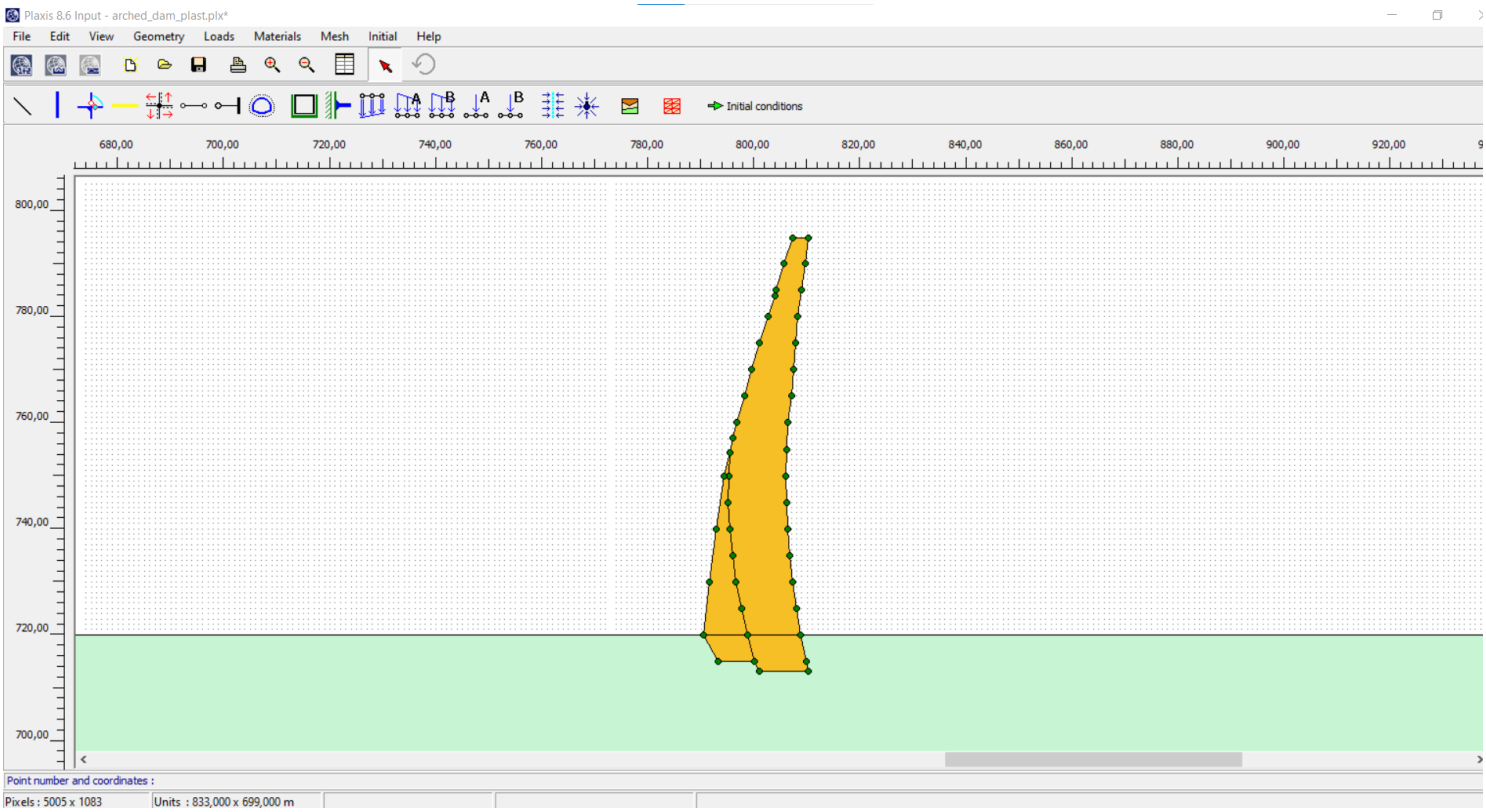
Εικόνα 4.3 Γενικές Ρυθμίσεις – Εισαγωγής μονάδων μέτρησης, διαστάσεων και πυκνότητας καννάβου

Στην συνέχεια στο Input Program σχεδιάστηκε το γεωμετρικό μοντέλο με το οποίο απεικονίστηκε όσο το δυνατόν πιστότερα η διατομή του τοξωτού φράγματος του Ταυρωπού. Το προσομοίωμα αυτό αποτελείται από σημεία, γραμμές και συμπλέγματα. Η εδαφική στρώση που στην περίπτωση που μελετάται είναι βράχος, σχεδιάστηκε με ύψος 200 μέτρων, ενώ το ύψος του φράγματος είναι 80 μέτρα (από 715 m έως 794,7 m). Η ανάλυση της παραμόρφωσης του προσομοιώματος έγινε σε δύο διαστάσεις, συνεπώς οι παραμορφώσεις στον κάθετο στην επιφάνεια του προσομοιώματος αναμένεται να είναι αμελητέες.



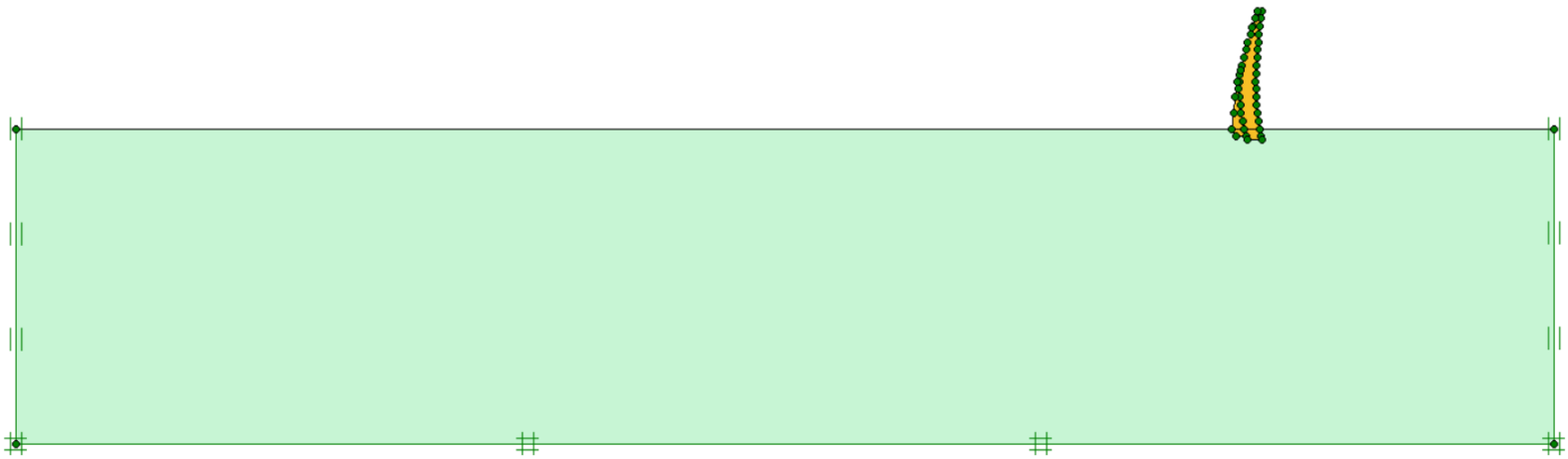
Εικόνα 4.4 Προσομοίωμα της διατομής του φράγματος Ταυρωπού

Το πρόσομοίωμα αυτό φτιάχτηκε χάρη στα σχήματα 3.1 (σελίδα 37) και 3.4 (σελίδα 42) που παρουσιάστηκαν στο 3ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



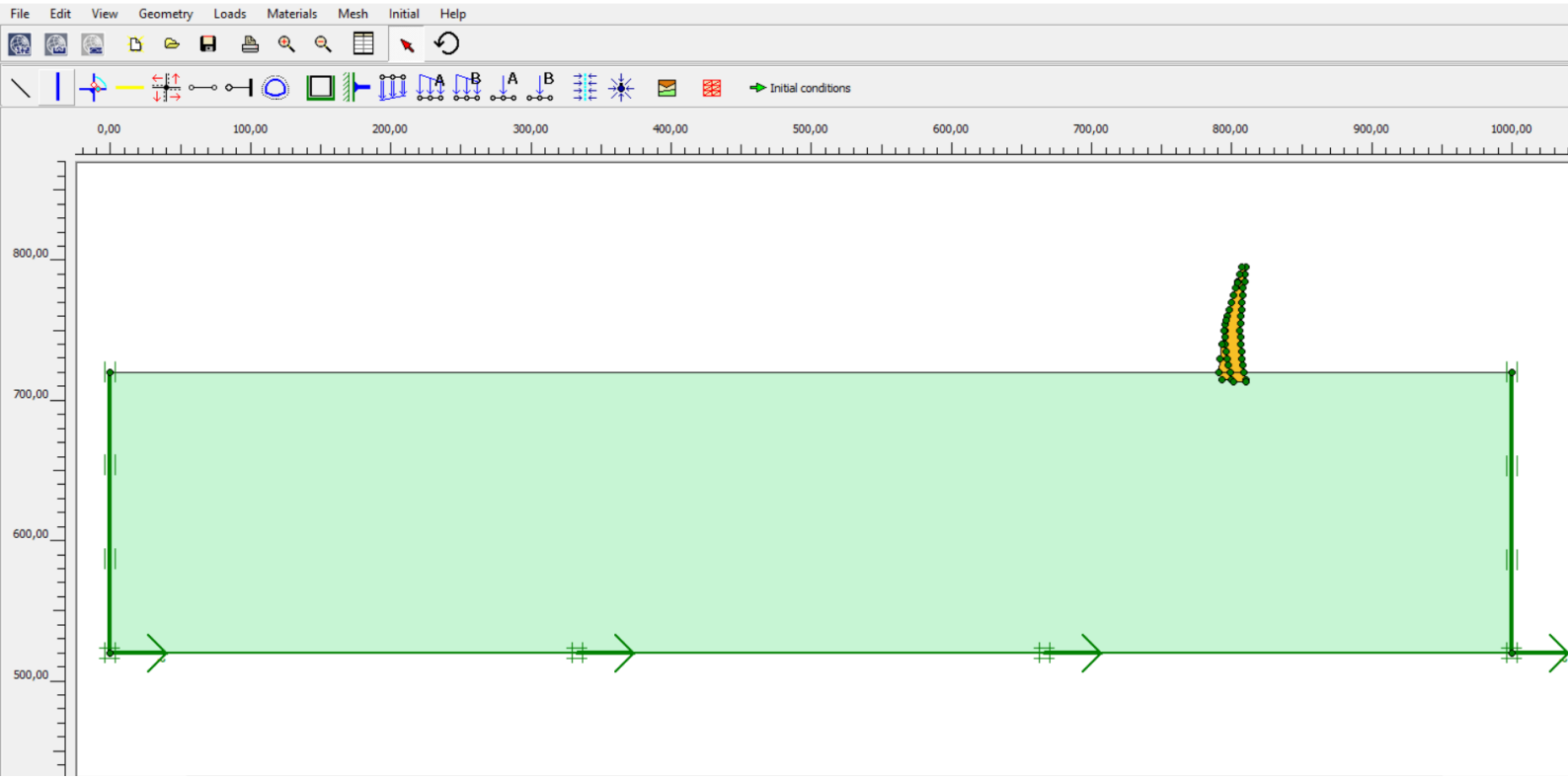
Εικόνα 4.5 Εστίαση στο προσομοίωμα του σώματος του φράγματος

Έπειτα από τη δημιουργία του προσομοιώματος του φράγματος και της εδαφικής στρώσης πρέπει να γίνει ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών του μοντέλου. Με την επιλογή του εργαλείου standard fixities από το μενού loads γίνεται αυτόματα τοποθέτηση γενικών οριακών συνθηκών. Δηλαδή στα κατακόρυφα όρια είναι σαν να συμβαίνει κάποια ‘’πάκτωση’’ με αποτέλεσμα να υπάρχει μηδενική οριζόντια μετατόπιση σε αυτά. Αυτό σημαίνει πως η κύλιση επιτρέπεται μόνο στον άξονα των x. Επίσης πάκτωση εφαρμόζεται και στα κάτω όρια, ωστόσο σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν μηδενικές μετατοπίσεις και στους 2 άξονες, ώστε η βάση του μοντέλου να μην μπορεί να κουνηθεί.



Εικόνα 4.6 Συνοριακές συνθήκες στο μοντέλου του εδάφους

Επίσης πολύ σημαντικό όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, είναι και τα τυπικά όρια σεισμού αν και εφόσον γίνεται λόγος για ανάλυση του φράγματος υπό σεισμικές συνθήκες. Με το εργαλείο Standard Earthquake Boundaries μέσω του μενού Loads γίνεται η εισαγωγή των τυπικών ορίων σεισμού στο μοντέλο της εδαφικής στρώσης και τώρα το μοντέλο είναι έτοιμο να δεχθεί σεισμικές επιταχύνσεις.



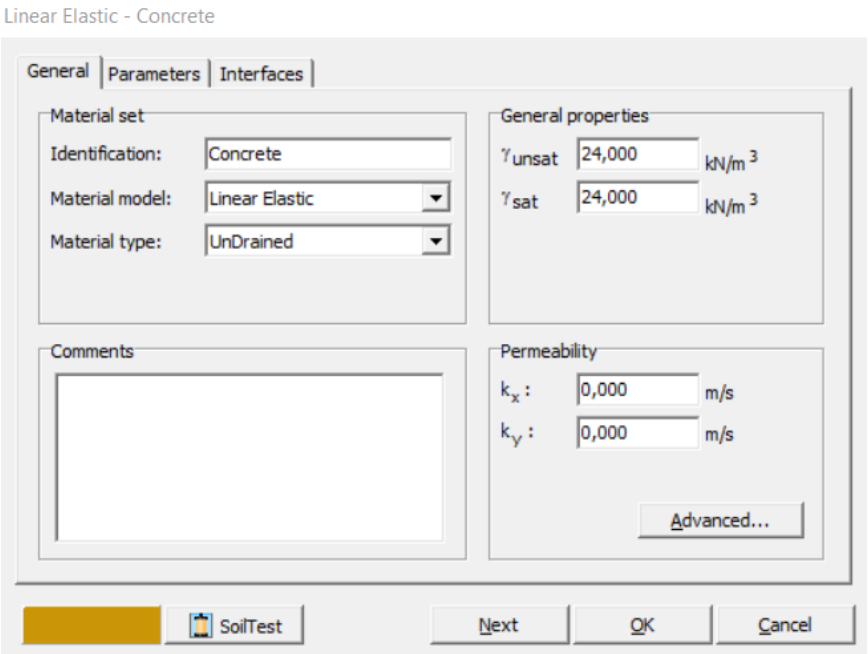
Εικόνα 4.7 Συνοριακές συνθήκες για δυναμικές και ψευδοστατικές αναλύσεις

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των υλικών και ο προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους μέσω του εργαλείου Material data set. Μέσω του εργαλείου αυτού μπορείς να δώσεις τον τύπο του υλικού στα συμπλέγματα, δηλαδή τα στοιχεία που αποτελούνται από γραμμές που ορίζουν μία κλειστή επιφάνεια. Το εργαλείο έχει κάποια στάνταρ υλικά αποθηκευμένα ωστόσο για την παρούσα διπλωματική, για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν νέα υλικά. Μοντέλο των 2 υλικών αυτά είναι το linear elastic που χρησιμοποιεί τον νόμο του Hooke για ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Αυτό σημαίνει πως η γραμμική ελαστικότητα δεν μπορεί να μεταβληθεί με την διεύθυνση στο υλικό. Οι παράμετροι του υλικού που έπρεπε να εισαχθούν για το μοντέλο linear elastic είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), ο συντελεστής Poisson (ν), το ξηρό (γ_{unsat}) και ειδικό (γ_{sat}) βάρος του νερού, η διαπερατότητα κατά τη διεύθυνση x και y (k_x ,k_y). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν και οι 2 συντελεστές Rayleigh (α και β) οι οποίοι σχετίζονται με την απόσβεση του κάθε υλικού ως προς την σεισμική δόνηση.

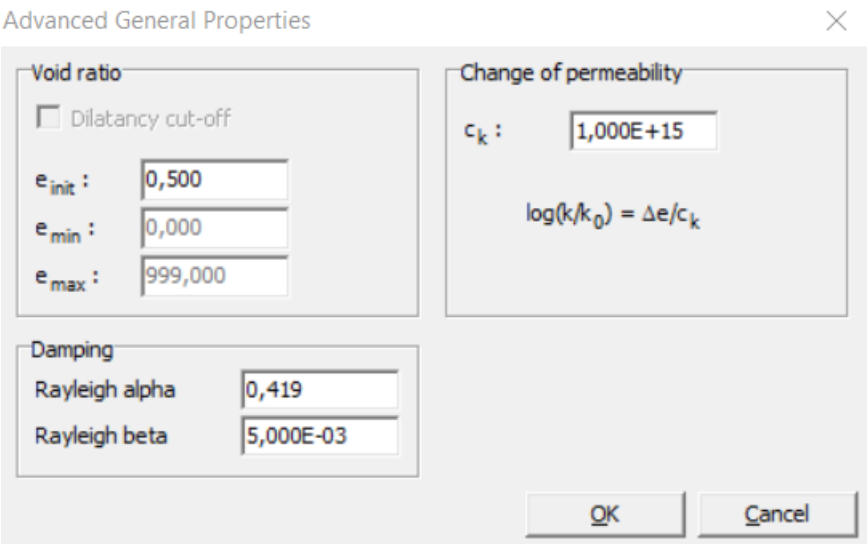
Το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) συμβολίζει την σκληρότητα του υλικού ή την ακαμψία του. Μεγαλύτερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας σημαίνει πως το υλικό είναι πιο άκαμπτο. Ο συντελεστής Poisson (ν) εκφράζει και αυτός την ελαστικότητα του υλικού, ενώ οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 0,5. Όσο το ν είναι κοντά στο 0 το υλικό είναι άκαμπτο, ενώ όταν πλησιάζει το 0,5 είναι περισσότερο εύκαμπτο. Παραδείγματος χάρη το

νερό έχει συντελεστή Poisson (ν) ίσο με 0,5. Για τους συντελεστές απόσβεσης Rayleigh α και β, αρχικά επιλέχθηκαν μέσω στάνταρ τιμών, ενώ στην συνέχεια με την εύρεση των διαγραμμάτων επιταχύνσεων κρίσιμων σημείων (στις δυναμικές αναλύσεις) επαληθεύτηκε η εγκυρότητα των τιμών αυτών μέσω του λογισμικού SeismoSignal της SeismoSoft. Οι αναλύσεις που έγιναν μέσω του λογισμικού SeismoSignal παρουσιάζονται παρακάτω.

Ιδιότητες του υλικού του σκυροδέματος

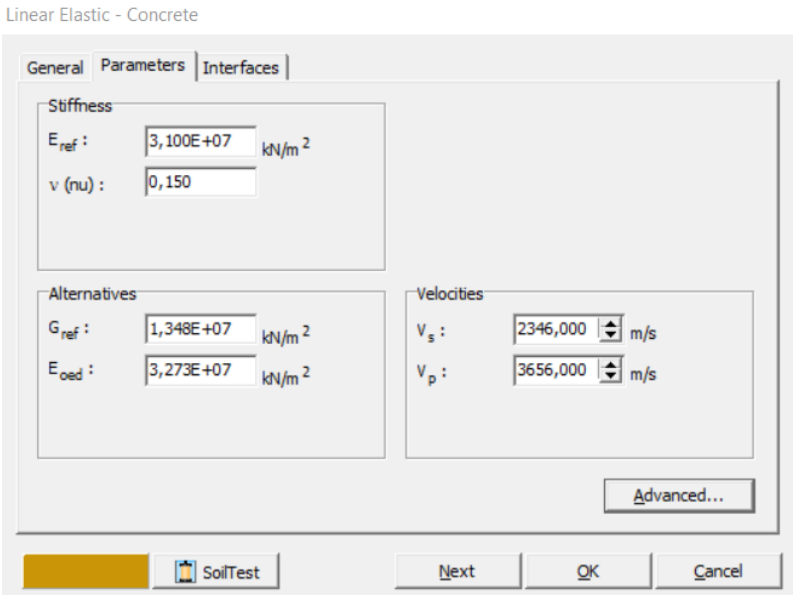


Εικόνα 4.8 Γενικές ιδιότητες του σκυροδέματος (υλικό φράγματος)



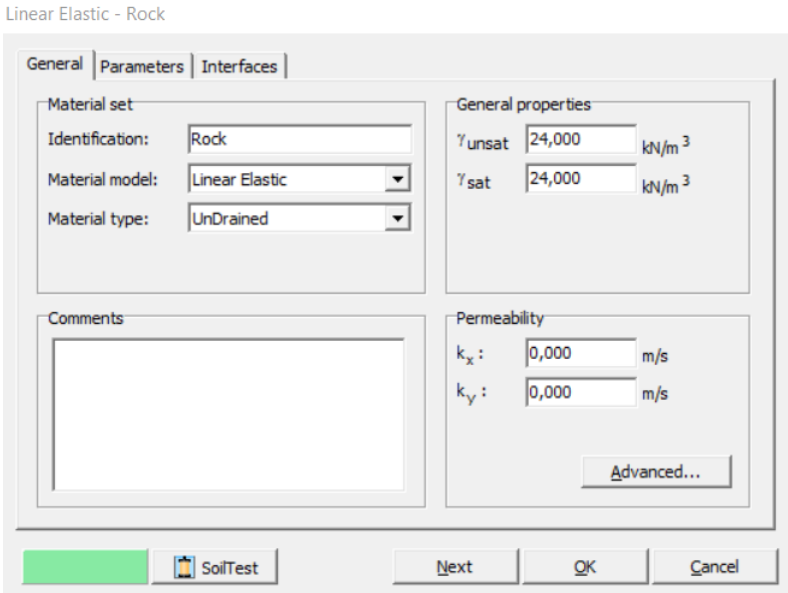
Εικόνα 4.9 Συντελεστές απόσβεσης Rayleigh alpha και Rayleigh beta

Το ποσοστό απόσβεσης που επιλέχθηκε για το σκυρόδεμα είναι ίσος με 5 % και αντιστοιχεί σε συντελεστές α = 0,419 και β = 0,005. Ενδεχομένως η επιλογή αυτή στη συνέχεια να αποδειχτεί λανθασμένη και να χρειαστεί να αλλάξουν οι τιμές αυτές.

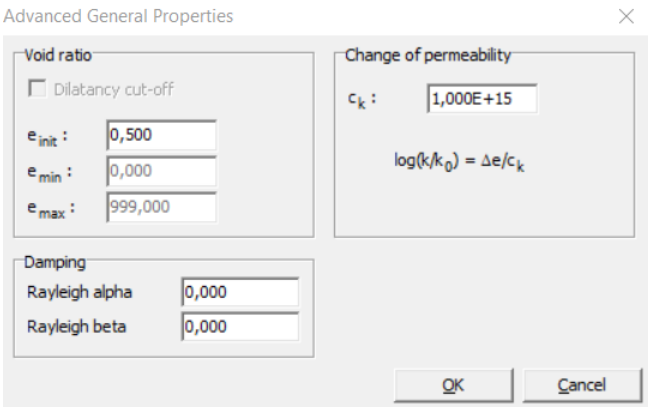


Εικόνα 4.10 Παράμετροι του υλικού του σκυροδέματος

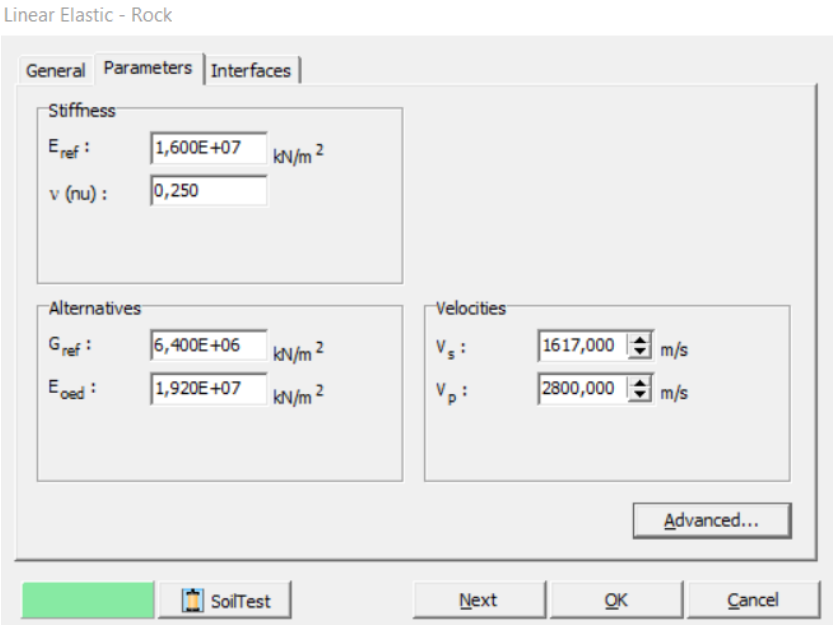
<u>Ιδιότητες του υλικού της βραχομάζας</u>



Εικόνα 4.11 Γενικές ιδιότητες του υλικού της βραχομάζας



Εικόνα 4.12 Συντελεστές απόσβεσης για το υλικό της βραχομάζας (Δεν χρησιμοποιήθηκαν)



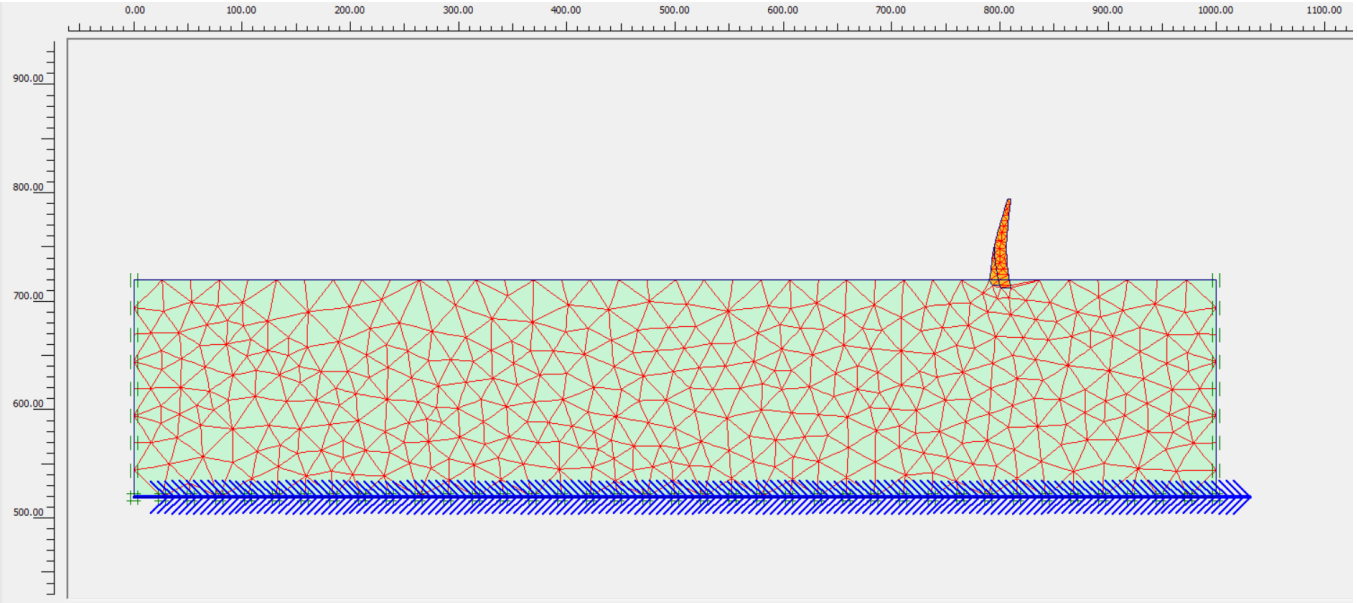
Εικόνα 4.13 Παράμετροι του υλικού της βραχομάζας

	Βραχώδες Υλικό	Σκυρόδεμα
Ειδικό ξηρό βάρος γ_{unsat}	24 KN/m³	24 KN/m³
Ειδικό βάρος βρεγμένου υλικού γ_{sat}	24 KN/m³	24 KN/m³
Υδατοπερατότητα κατά x (k_x)	0 m	0 m
Υδατοπερατότητα κατά y (k_y)	0 m	0 m
Λόγος Poisson ν	0,25	0,15
Μέτρο ελαστικότητας E_{ref}	16000000 KN/m²	31000000 KN/m²
Διατμητικά κύματα V_s	1617 m/s	2346 m/s

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων των δύο υλικών

Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση της γεωμετρία του προσομοιώματος και καθοριστούν και τα στοιχεία με τα χαρακτηριστικά τους, γίνεται ο καθορισμός του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Στο λογισμικό Plaxis 2D με την εντολή Generate Mesh το γεωμετρικό μοντέλο διαιρείται σε τριγωνικά σχήματα δύο διαστάσεων που σχηματίζουν ένα πλέγμα. Είναι πλήρως αυτοματοποιημένη αυτή η διαδικασία βασιζόμενη στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του προσομοιώματος. Δίνεται η δυνατότητα πύκνωσης των τριγώνων αυτών δηλαδή πύκνωση του δικτύου της επιφάνειας του μοντέλου μέσω της εντολής Global Coarseness. Όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο αυτό τόσο πιο χρονοβόρα γίνεται και η διαδικασία επίλυσης, αλλά η ανάλυση θα είναι πιο λεπτομερής. Το λογισμικό δίνει τη

δυνατότητα διαφόρων επιλογών πυκνότητας του δικτύου, της πολύ αραιό, αραιό, μέτριο, πυκνό και πολύ πυκνό. Στην παρούσα διπλωματική το δίκτυο που εφαρμοζόταν ήταν πάντα πολύ πυκνό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το γεωμετρικό αυτό δίκτυο εφαρμοσμένο στο φράγμα και την εδαφική στρώση.

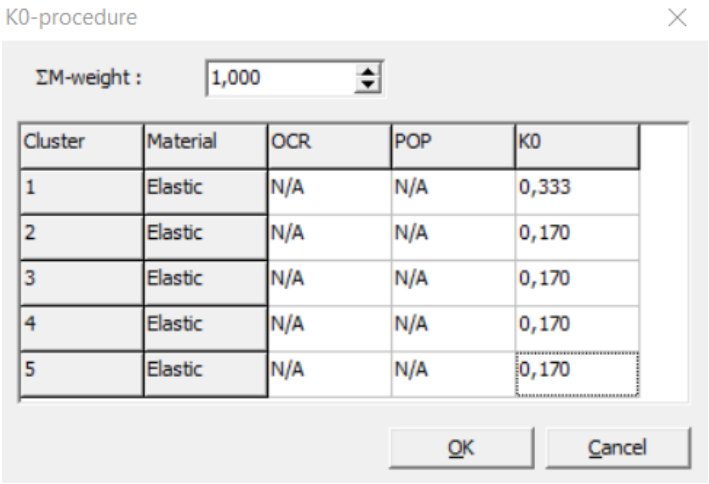


Εικόνα 4.14 Απεικόνιση του γεωμετρικού δικτύου του προσομοιώματος (πολύ πυκνό)

Με το πέρας και αυτού του σταδίου, ολοκληρώνεται η γεωμετρία του προσομοιώματος και έπονται οι αρχικές συνθήκες του. Σε αυτή τη φάση γίνεται η ενεργοποίηση των γεωστατικών και υδροστατικών τάσεων, μέσω της εντολής initial conditions που περνάει τον χρήστη σε άλλη καρτέλα. Στην καρτέλα αυτή πραγματοποιείται ο υπολογισμών των πιέσεων των πόρων του νερού, αφού καθοριστεί η φρεατική στάθμη ή φρεατικό επίπεδο (αν υπάρχει) και ο προσδιορισμός των αρχικών ενεργών και ολικών τάσεων που ασκούνται στη γεωμετρία του προσομοιώματος. Το φρεατικό επίπεδο ορίζεται στο προσομοίωμα με την εντολή Phreatic Level. Σε μία στατική ανάλυση ωστόσο, χωρίς την παρουσία νερού οι πιέσεις των πόρων του νερού θα είναι ίσοι με το μηδέν.

Κατά τον προσδιορισμό των υδροστατικών δυνάμεων εκτός από την στάθμη του φρεατικού επιπέδου είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη οι εδαφικές συνθήκες και η υδατοπερατότητα του υλικού. Η δημιουργία των υδροστατικών αυτών συνθηκών γίνεται με την εντολή Generate Water Pressures. Επίσης μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει κλειστό όριο ροής μέσω της εντολής Closed Flow Boundary που υπάρχει στην γραμμή εργαλείων. Το κλειστό όριο ροής τοποθετείται στο όριο του προσομοιώματος με στόχο να εξασφαλίζει πως δεν θα υπάρξουν διαρροές πέρα από αυτό.

Για τον προσδιορισμό των αρχικών ενεργών και ολικών τάσεων εμφανίζεται μία νέα καρτέλα μέσω της εντολής Generate initial stresses, η οποία ονομάζεται K-0 procedures. Ο προσδιορισμός των αρχικών τάσεων γίνεται για κάθε σύμπλεγμα του εδαφικού υλικού του προσομοιώματος και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Cluster	Material	OCR	POP	K0
1	Elastic	N/A	N/A	0,333
2	Elastic	N/A	N/A	0,170
3	Elastic	N/A	N/A	0,170
4	Elastic	N/A	N/A	0,170
5	Elastic	N/A	N/A	0,170

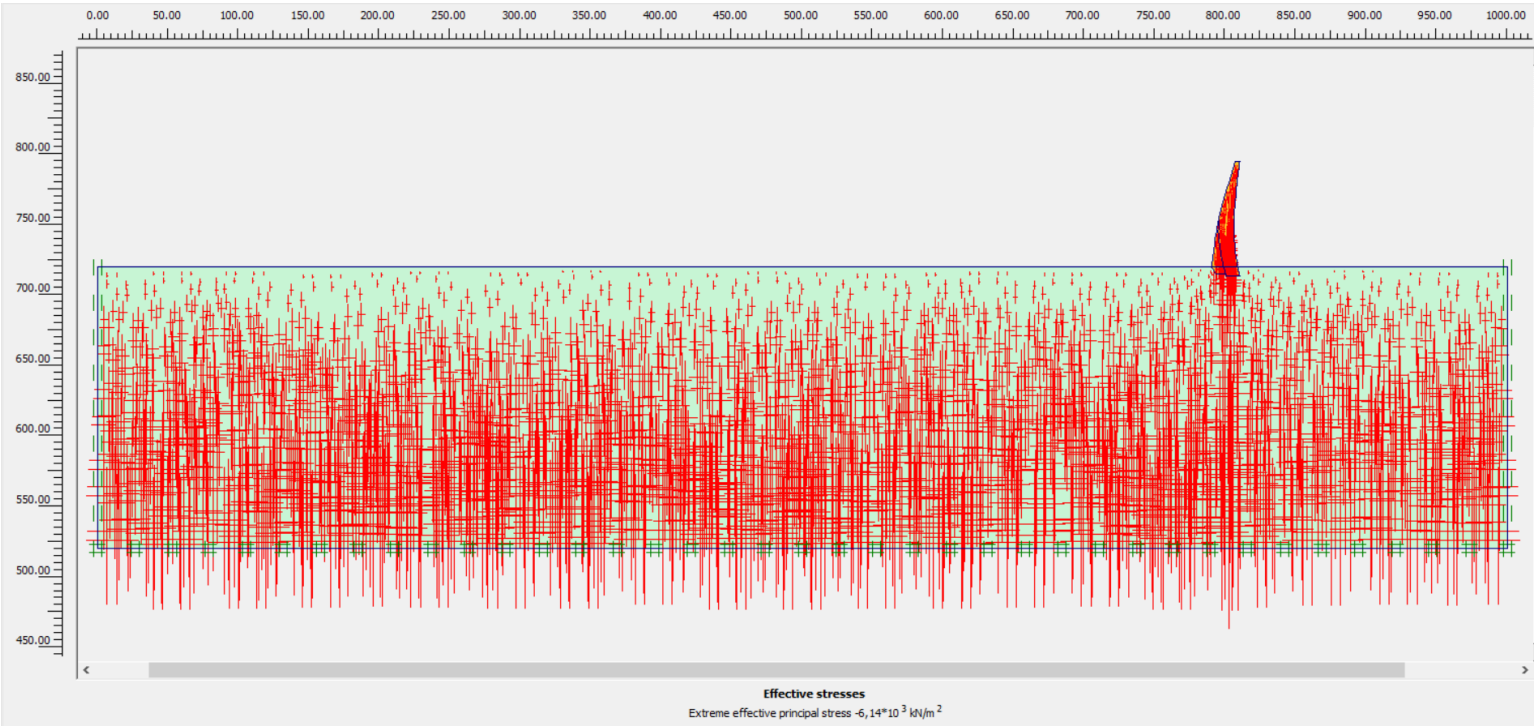
Εικόνα 4.15 Προσδιορισμός της τιμής K0

Η τιμή αυτή K0 βγαίνει από τον τύπο K0 = ν/(ν-1).

Για το πρώτο σύμπλεγμα που αναφέρεται στο βραχώδες εδαφικό στρώμα ισχύει ότι K0 = 0,25/(1-0,25) = 0,25/0,75 = 0,333

Για τα υπόλοιπα συμπλέγματα που αφορούν και τα 4 το σώμα του φράγματος (σκυρόδεμα) ισχύει ότι K0 = 0,15/(1-0,15) = 0,15/0,85 = 0,17

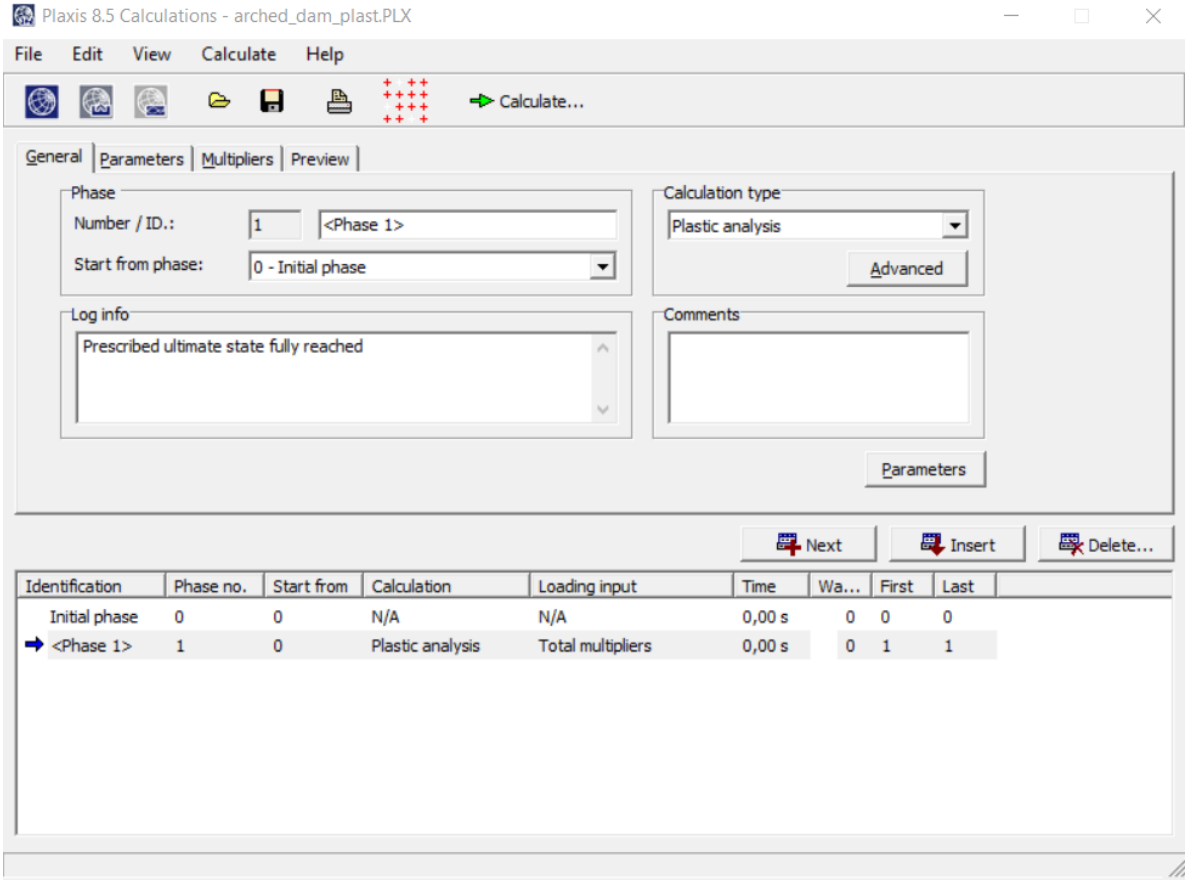
Έτσι προσδιορίζονται οι ενεργές τάσεις που ασκούνται στο φράγμα και στον βράχο, οι οποίες παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.16 Προσδιορισμός ενεργών τάσεων στο προσομοίωμα (ισούνται με -6400 KN/m²)

4.2.2 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Calculation Program

Με το πέρας των αρχικών συνθηκών στο προσομοίωμα, το επόμενο βήμα είναι η μετάβαση στο 2ο υποπρόγραμμα για την πραγματοποίηση των υπολογισμών. Αυτό μπορεί να γίνει πατώντας την εντολή Calculate, εάν κάτι από τα παραπάνω (στο Input Program) δεν έχουν γίνει τότε δε είναι δυνατό να προχωρήσουμε στο επόμενο υποπρόγραμμα.

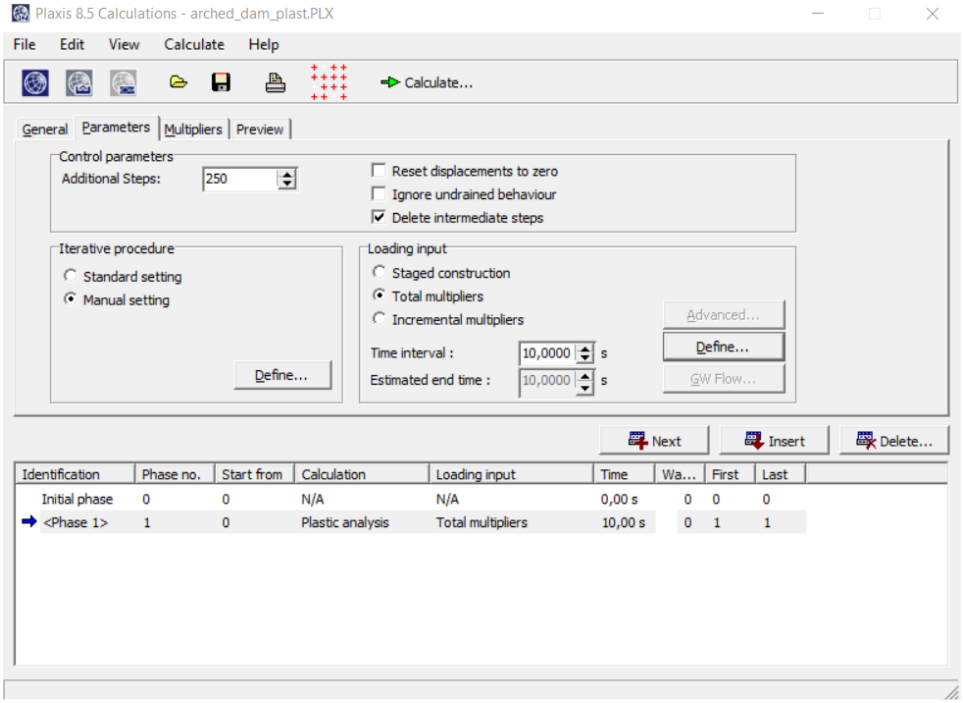


Εικόνα 4.17 Παράθυρο του 2ου υποπρογράμματος για τον υπολογισμό

Παρατηρεί κανείς βλέποντας την παραπάνω εικόνα πως η πρώτη φάση (Phase 1) αποτελείται από το στάδιο των αρχικών συνθηκών που ορίστηκε στο προηγούμενο υποπρόγραμμα. Δίνεται η δυνατότητα από το Plaxis ο χρήστης μέσω της εντολής Next Phase να εισάγει όσες φάσεις θέλει. Η κάθε φάση ορίζεται από τη γεωμετρία του προτύπου και από το ποιο κομμάτι του (σύμπλεγμα) θα επιλέξει ο χρήστης για να υπολογίσει. Ο καθορισμός αυτού του κομματιού γίνεται με την εντολή Define η οποία σε οδηγεί στο 1ο υποπρόγραμμα ώστε να μπορείς να ενεργοποιείς ή να απενεργοποιείς το σύμπλεγμα που επιθυμείς.

Επίσης στα δεξιά του παραθύρου αυτού υπάρχει το Calculation type όπου σου δίνει την επιλογή να επιλέξεις τον τύπο του υπολογισμού για το πρότυπο. Υπάρχουν 4 διαφορετικοί τύποι υπολογισμών οι οποίοι είναι η ελαστοπλαστική ανάλυση των παραμορφώσεων (Plastic), η ανάλυση στερεοποίησης (Consolidation), ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας μέσω της σταδιακής μείωσης των φ και c παραμέτρων (Phi/c reduction) και τέλος η δυναμική ανάλυση των παραμορφώσεων (Dynamic analysis). Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του μοντέλου (Plastic) και η δυναμική ανάλυση (Dynamic analysis) που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις

γεωτεχνικών υπολογισμών για στατικές αναλύσεις και περιπτώσεις υπολογισμού αναλύσεων σεισμικής συμπεριφοράς μοντέλων, αντίστοιχα.

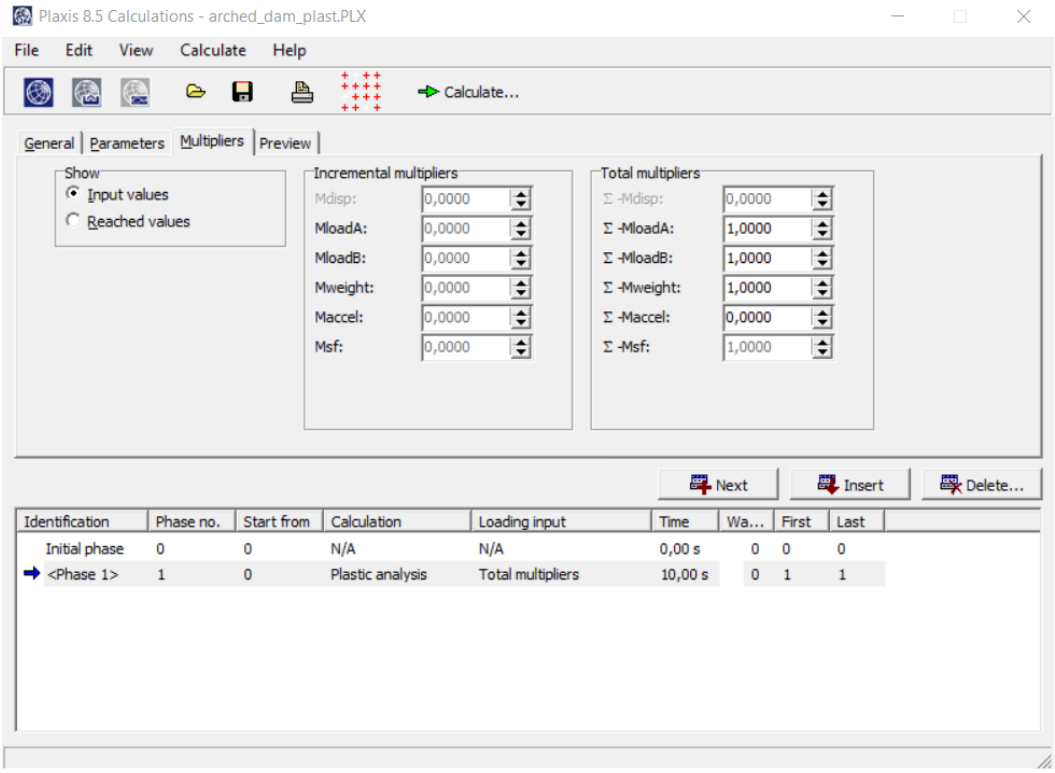


Εικόνα 4.18 Καρτέλα Parameters στο 2^{ο} υποπρόγραμμα του Plaxis – 2D

Στην επόμενη καρτέλα (Parameters) μετά την καρτέλα (General) καθορίζονται οι παράμετροι της ανάλυσης που πραγματοποιείται σε κάθε στάδιο. Ορίζεται δηλαδή ο μέγιστος αριθμός βημάτων που θα χρησιμοποιηθεί για την ολοκλήρωση της φάσης που έχει επιλεχθεί, μέσω της εντολής Additional Steps. Η καρτέλα αυτή δίνει επίσης την δυνατότητα στον χρήστη να διαγράψει τις όποιες παραμορφώσεις έχουν διαμορφωθεί από προηγούμενη φάση υπολογισμού, με την εντολή Reset Displacements to Zero. Επίσης δίνεται η δυνατότητα εξαίρεσης (προσωρινά) των επιρροών της μη – στραγγιστικής συμπεριφοράς σε καταστάσεις που το υλικό έχει καθοριστεί ως μη στραγγιστικό, μέσω της εντολής Ignore undrained behavior, και η δυνατότητα εξοικονόμησης αποθηκευτικού χώρου στον υπολογιστή μέσω της εντολής Delete intermediate steps. Τέλος μέσω της εντολής Time interval μπορεί να καθοριστεί ο χρόνος διάρκειας της κάθε φάσης, μέσω της εντολής Staged construction ορίζονται οι υδροστατικές συνθήκες και σε κάθε μία φάση υπολογισμού ξεχωριστά να επιλεγούν συγκεκριμένα τμήματα – συμπλέγματα στη γεωμετρία του προσομοιώματος και μέσω των εντολών Total multipliers και Incremental multipliers να καθοριστούν οι συνολικοί πολλαπλασιαστές και οι πολλαπλασιαστές προσαύξησης αντίστοιχα.

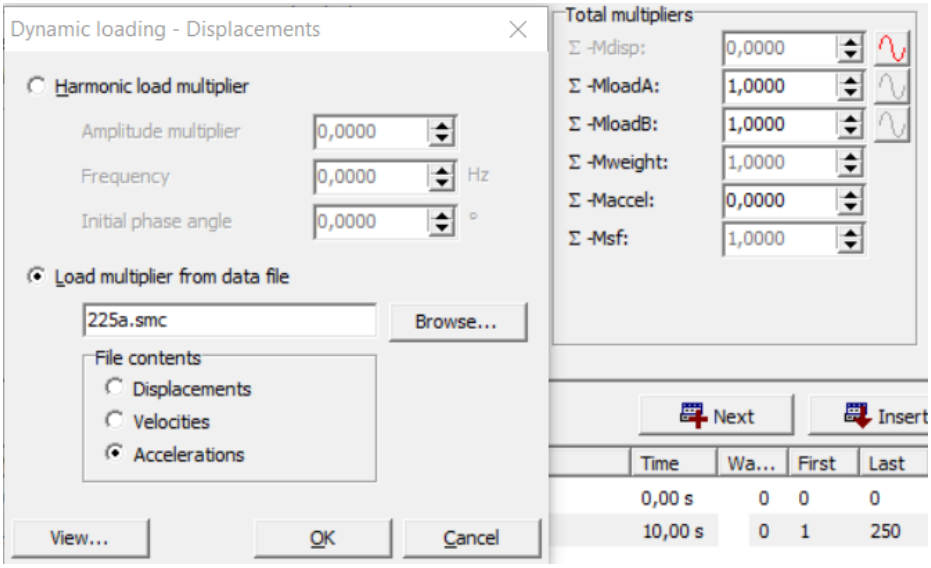
Επιλέγοντας την εντολή Total multipliers και πατώντας το Define, το πρόγραμμα σε οδηγεί κατευθείαν στην 3^{η} καρτέλα (Multipliers). Στην καρτέλα αυτή υπάρχει μία πληθώρα επιλογών, της τα Mdisp, ΣMdisp για τον έλεγχο των προβλεπόμενων μετατοπίσεων, τα MloadA, ΣMloadA, MloadB, ΣMloadB για τον έλεγχο των διανεμημένων φορτίων των σημείων της αυτά εισήχθησαν στα συστήματα φόρτωσης των A και B, επίσης τα Mweight, ΣMweight για τον έλεγχο της αναλογίας της καθορισμένης βαρύτητας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, τα Maccel, ΣMaccel για τον έλεγχο του μεγέθους των ψευδοστατικών δυνάμεων στο προσομοίωμα και τα Msf, ΣMsf που σχετίζονται με την μείωση της γωνίας

της εσωτερικής τριβής του εδαφικού υλικού, με σκοπό την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας, και άλλα.



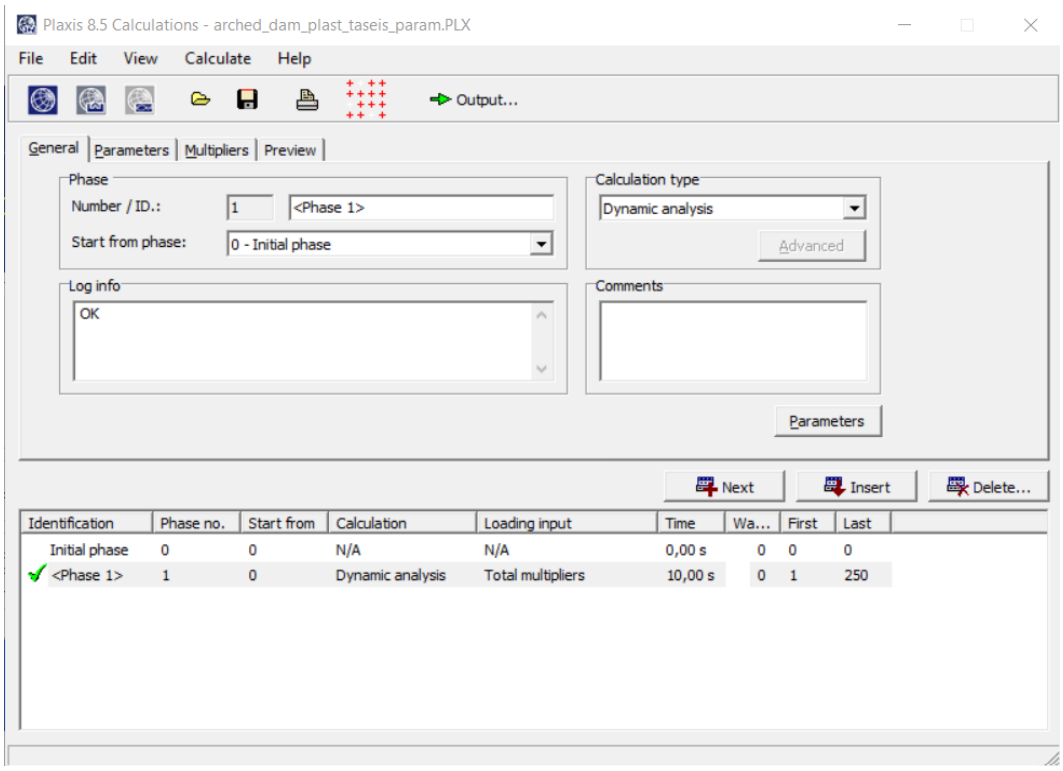
Εικόνα 4.19 Καρτέλα Multipliers του 2ου υποπρογράμματος του Plaxis – 2D

Στην παρούσα διπλωματική δεν έγινε κάποια αλλαγή στους πολλαπλασιαστές αυτούς και συνεπώς έμειναν έτσι της φαίνονται και στην εικόνα 4.19 παραπάνω, όσον αφορά τις στατικές αναλύσεις. Ωστόσο για τις ψευδοστατικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ο πολλαπλασιαστής Σ-Maccel ίσως με 1, ενώ για τις δυναμικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το Σ-Mdisp για την εισαγωγή των σεισμικών επιταχύνσεων που επιλέχθηκαν.



Εικόνα 4.20 Εισαγωγή της σεισμικής επιτάχυνσης του σεισμού του Plaxis -225A (δυναμική ανάλυση)

Πολύ σημαντικό επίσης για την ανάλυση των αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν κατά την μέθοδο υπολογισμού πεπερασμένων στοιχείων, είναι το να επιλεχθούν τα ''κρίσιμα'' σημεία πάνω στο προσομοίωμα ή τα σημεία σε χαρακτηριστικές θέσεις του μοντέλου. Με την εντολή Select Points που βρίσκεται πάνω από τις καρτέλες που αναφέρθηκαν, ανοίγει ένα νέο παράθυρο με το δίκτυο του προσομοιώματος, πάνω στο οποίο μπορούν να επιλεχθούν τα ''κρίσιμα'' σημεία. Αυτά παρουσιάζονται παρακάτω, σε κάθε ανάλυση ξεχωριστά. Τέλος πατώντας την εντολή Calculate, η οποία είναι ακριβώς μετά την εντολή Select Points, ανοίγει ένα νέο παράθυρο διαλόγου στο οποίο γίνεται η διαδικασία της επίλυσης. Με το τέλος της επίλυσης, κλείνει το παράθυρο αυτό και το πρόγραμμα επιστρέφει τον χρήστη στην καρτέλα του υπολογισμού, όπου φαίνεται αν υπολογισμός έγινε ή υπήρξε κάποια αστοχία ανάμεσα στα υλικά του εδάφους και της κατασκευής, ενώ υπάρχει και το Log info που εξηγεί τυχόν προβλήματα.



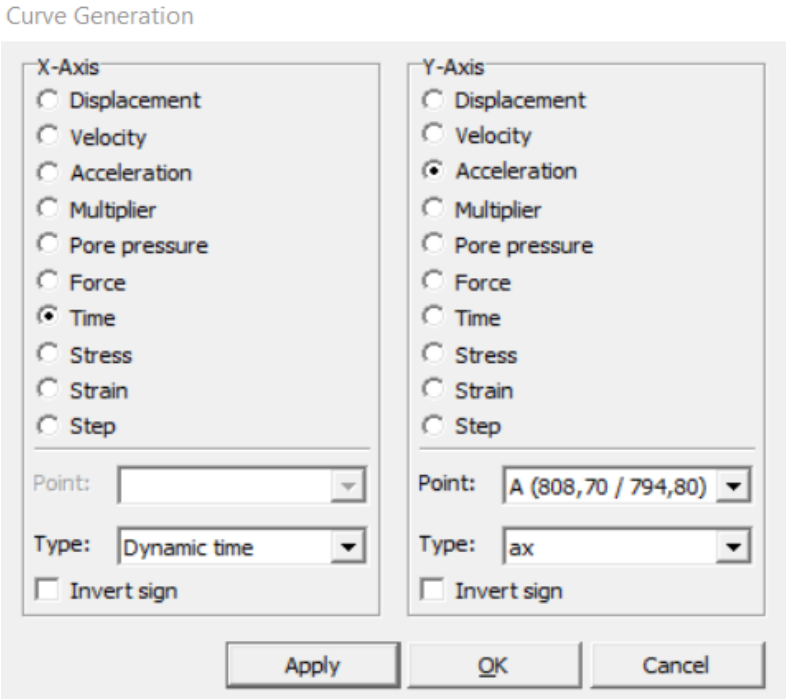
Εικόνα 4.21 Παράθυρο ολοκλήρωσης επίλυσης της δυναμικής ανάλυσης

4.2.3 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Output Program

Με την πραγμάτωση και του υπολογισμού, το πρόγραμμα αυτόματα εμφανίζει, της φαίνεται και στην εικόνα 4.21, την επιλογή – εντολή Output, η οποία οδηγεί τον χρήστη στο 3° υποπρόγραμμα. Το υποπρόγραμμα αυτό δείχνει πρώτα την παραμόρφωση του δικτύου και αναφέρει την συνολική μετατόπιση του αυτό έχει υποστεί εξαιτίας της βαρύτητας και της παρουσίας νερού στον ταμιευτήρα (αν υπάρχει), σε κάθε στάδιο ανάλυσης. Επίσης δίνεται μία πληθώρα επιλογών δηλαδή οι μετατοπίσεις μπορούν να αναπαρασταθούν με βελάκια, με γραμμές περιγράμματος ή χρωματικές παλέτες. Μπορούν να παρουσιαστούν ακόμη οι κατακόρυφες ολικές τάσεις (sig – yy'), οι οριζόντιες ολικές τάσεις (sig – xx'), οι υπερπιέσεις των πόρων, ο βαθμός εμποτισμού του προσομοιώματος, οι οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις και ταχύτητες που αναπτύσσονται στο μοντέλο και πολλά άλλα.

4.2.4 Ρυθμίσεις στο λογισμικό Plaxis – 2D – Curves Program

Έχοντας τελειώσει τον υπολογισμό, από το 2ο υποπρόγραμμα μπορείς να μεταφερθείς απευθείας στο 4ο με την εντολή Go to curves program. Μπορείς ωστόσο να μεταφερθείς και από το 3ο υποπρόγραμμα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Στο Curves program υλοποιείται ο σχεδιασμός των καμπυλών. Αρχικά δίνεται η δυνατότητα επιλογής του αρχείου αναλύσεων που χρειάζεται να σχεδιαστούν οι καμπύλες. Αφού αυτό επιλεγεί εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο, μέσω του οποίου επιλέγεται η γραφική παράσταση που θέλει ο χρήστης να σχεδιάσει. Δηλαδή δίνεται η δυνατότητα επιλογής των παραμέτρων που θα εμφανίζονται στον άξονα x και στον y. Έπειτα πρέπει να γίνει η επιλογή και των χαρακτηριστικών σημείων του προσομοιώματος που είχαν επιλεγεί στο 2ο υποπρόγραμμα, ώστε να δημιουργηθούν τα διαγράμματα. Σε κάθε διάγραμμα μπορείς να προσθέσεις όσα σημεία θέλεις.



Εικόνα 4.22 Παράθυρο επιλογής δεδομένων για τον σχεδιασμό των καμπυλών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν 2 τύποι διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα Acceleration – Time (a_x – t), (a_y – t) και Displacement – Time (U_x – t), (U_y – t).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού Plaxis – 2D. Πραγματοποιήθηκαν στατικές και δυναμικές αναλύσεις.

4.3 Στατικές Αναλύσεις

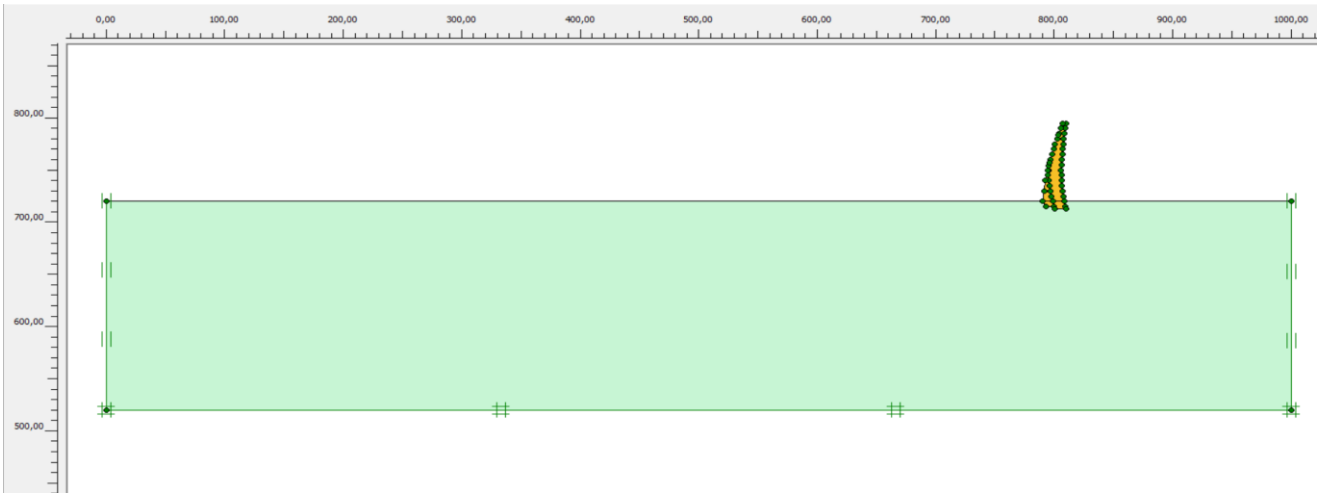
Η στατική φόρτιση αποτελεί πάντα το πρώτο στάδιο των αναλύσεων σε μία μελέτη. Στις στατικές αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνονται :

- Η στατική ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα
- Η στατική ανάλυση με παρουσία νερού στην Κατώτατη Στάθμη Υδροληψίας του ταμιευτήρα (+776 m) βασισμένη στις παρακάτω μεθόδους :
    - Μέθοδος υπογείων υδάτων (Ground water calculation)
    - Μέθοδος φρεατικού επιπέδου (Phreatic Level)
    - Νερό με την μορφή υλικού (μέσω της δημιουργίας υλικών στο Plaxis – 2D)

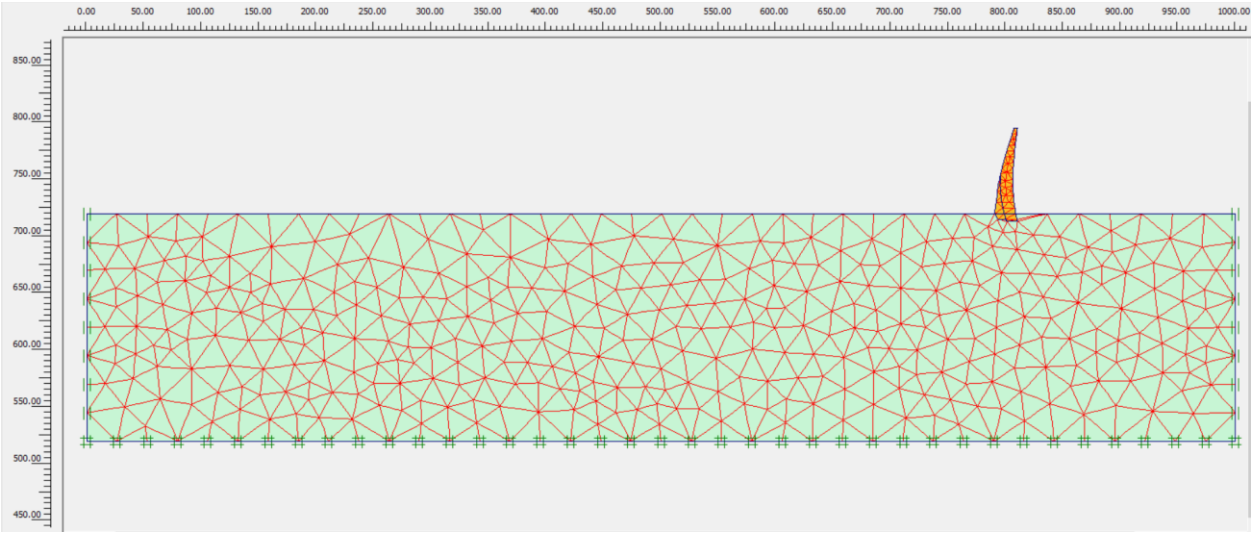
- Η στατική ανάλυση με παρουσία νερού στην Ανώτατη Κανονική Στάθμη του ταμιευτήρα (+792 m) βασισμένη στις παρακάτω μεθόδους :
    - Μέθοδος υπογείων υδάτων (Ground water calculation)
    - Μέθοδος φρεατικού επιπέδου (Phreatic Level)
    - Νερό με την μορφή υλικού (μέσω της δημιουργίας υλικών στο Plaxis – 2D)

4.3.1 Στατική Ανάλυση χωρίς νερό στον ταμιευτήρα

Στο στάδιο αυτής της ανάλυσης το προσομοίωμα (φράγματος και εδάφους) δεν δέχεται καμία υδροστατική πίεση. Οι δυνάμεις που δέχεται είναι αποκλειστικά το ίδιον βάρος του και η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του σώματος του φράγματος και της εδαφικής στρώσης. Επίσης η ενεργός και η ολική ορθή πίεση του εδάφους στην βάση του φράγματος. Οι πιέσεις των πόρων επίσης θα είναι μηδενικές. Εφαρμόστηκε επίσης μηδενική οριζόντια μετατόπιση (u_x) στα κατακόρυφα όρια, και μηδενικές μετατοπίσεις στα κάτω όρια (βάση της εδαφικής στρώσης ή του προσομοιώματος). Η κύλισης συνεπώς επιτρέπεται μόνο στον οριζόντιο άξονα των x.

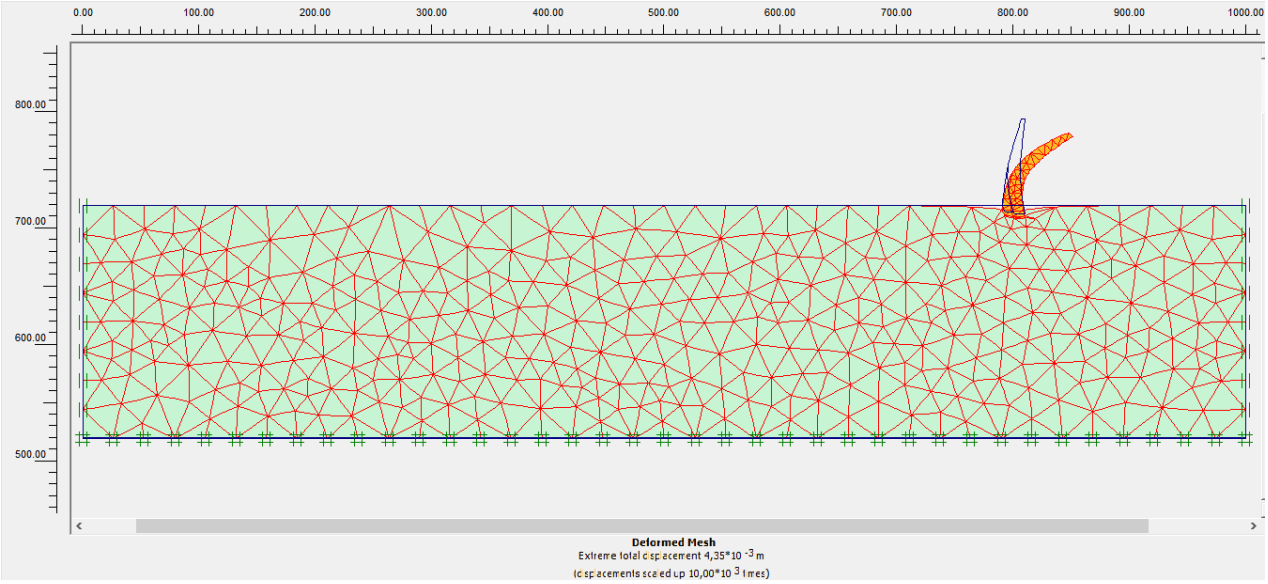


Εικόνα 4.23 Προσομοίωμα ανάλυσης



Εικόνα 4.24 Δίκτυο προσομοιώματος ανάλυσης

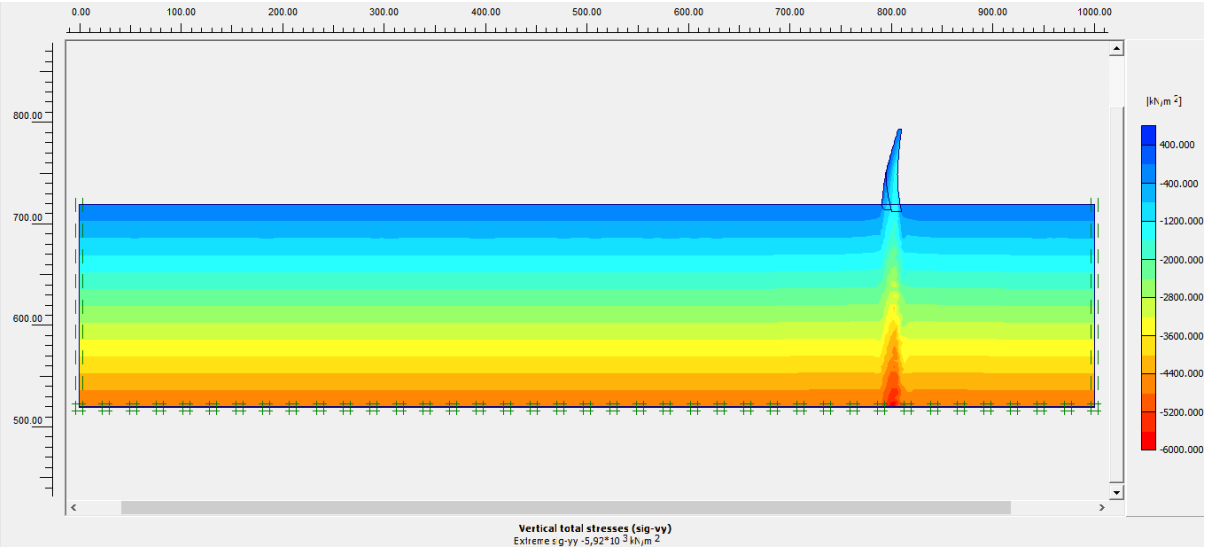
Έπειτα από τον υπολογισμό του σταδίου αυτού, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα :



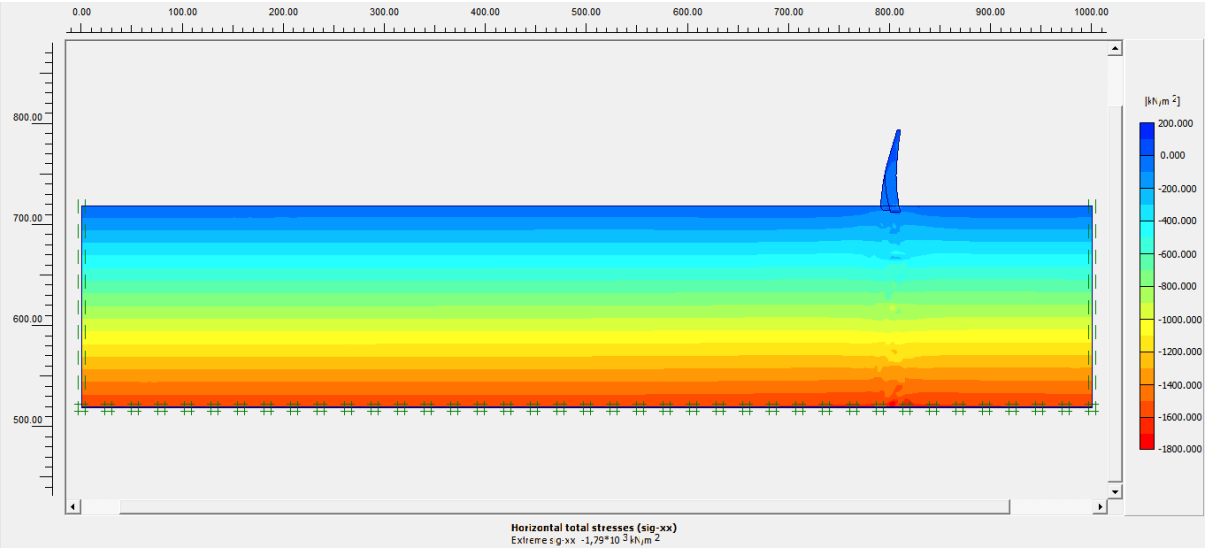
Εικόνα 4.25 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του προσομοιώματος

Βάσει του υπολογισμού παρατηρείται πως οι παραμορφώσεις του προτύπου είναι 0,0043 μέτρα γεγονός που οφείλεται στην σκληρότητα του σκυροδέματος από το οποίο έχει κατασκευαστεί το φράγμα. Το σκυρόδεμα έχει σχεδόν διπλάσιο μέτρο ελαστικότητας από την εδαφική στρώση (βραχομάζα).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες τάσεις που αναπτύσσονται στο προσομοίωμα, ενώ ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις κατακόρυφες τάσεις. Επίσης γίνεται επιλογή των χαρακτηριστικών σημείων ώστε να βρεθούν οι θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση του φράγματος.



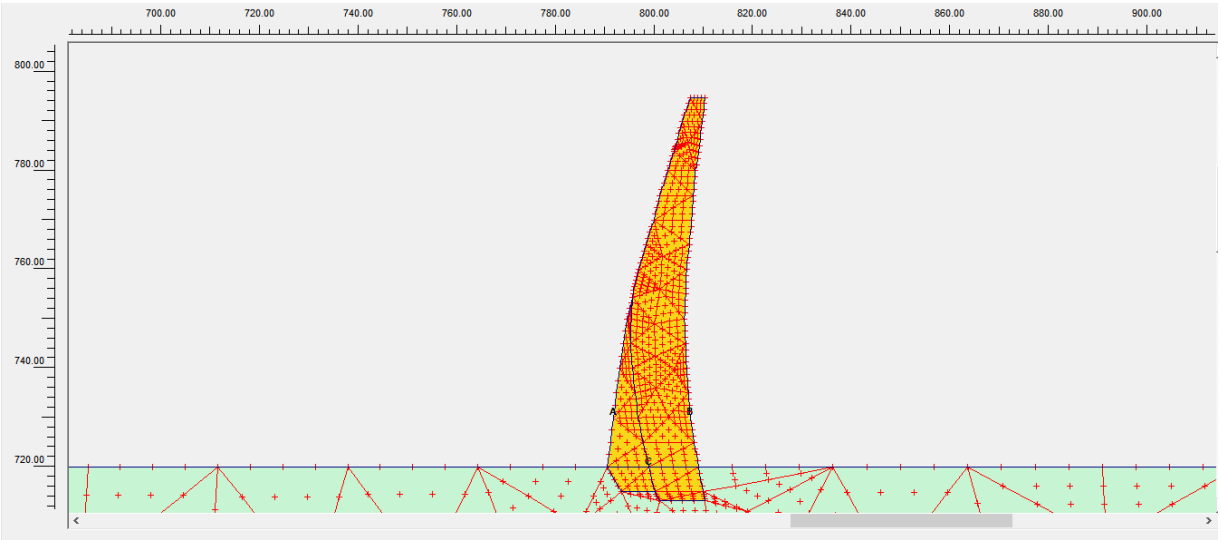
Εικόνα 4.26 Αποτέλεσμα οριζόντιων ολικών τάσεων στο προσομοίωμα



Εικόνα 4.27 Αποτέλεσμα κατακόρυφων ολικών τάσεων στο προσομοίωμα

Οι κατακόρυφες τάσεις στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν, της φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, γύρω στα 1800 KN/m² , διότι [h * γ = (794,7-720) * 24 = 1792,8 KN/m² , όπου γ το ειδικό βάρος του σκυροδέματος]. Ο ισχυρισμός αυτός αποδεικνύεται και από την εικόνα 4.27 στην οποία η χρωματική παλέτα στα δεξιά, ταξινομεί τις τιμές των κατακόρυφων τάσεων.

Επιλογή των χαρακτηριστικών σημείων στη βάση του σώματος του φράγματος :



Εικόνα 4.28 Χαρακτηριστικά σημεία στη βάση του φράγματος, A, B και C

Συγκρίνοντας τις εικόνες 4.26 και 4.27 συμπεραίνει κανείς πως οι οριζόντιες ολικές τάσεις είναι μικρότερες από τις κατακόρυφες. Αυτό μεταφράζεται στο ότι υπάρχει θλίψη στο σώμα του φράγματος. Επιλέχθηκαν έτσι τα τρία σημεία στην βάση του φράγματος για να υπολογιστούν οι θλιπτικές τάσεις. Ωστόσο λόγο του σχήματος του φράγματος είναι πολύ πιθανό να μην υπάρχουν μόνο θλιπτικές τάσεις αλλά και εφελκυστικές.

Τα σημεία A και B επιλέχθηκαν να είναι συμμετρικά, 10 μέτρα πάνω από την βάση του φράγματος, δηλαδή A (791.6, 730) και B (807.2, 730) ενώ το C βρίσκεται ακριβώς πάνω στην βάση του φράγματος και αντιστοιχεί στην θέση C (798.8, 720).

Οι τάσεις στα χαρακτηριστικά σημεία θα είναι :

Σημείο A Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-228,27	-80,43	96,75	-1014,20	-185,20	-1247,30

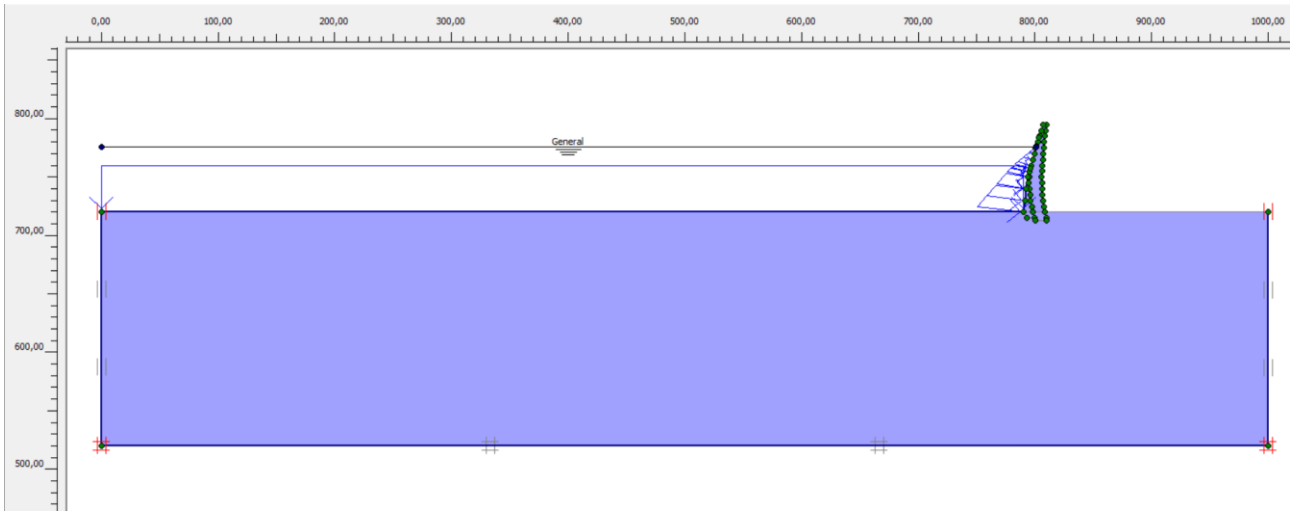
Πίνακας 4.2 Οι τάσεις που αναπτύσσονται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος

Παρατηρείται λοιπόν οι οριζόντιες ολικές τάσεις τείνουν να εφελκύσουν το σημείο B, ενώ όλες οι υπόλοιπες τάσεις και στα 3 σημεία είναι θλιπτικές. Οι μέγιστες τάσεις παρουσιάζονται στο σημείο C το οποίο είναι λογικό αφού είναι η βάση του φράγματος και δέχεται τις περισσότερες δυνάμεις. Επίσης αν και συμμετρικά, στα σημεία A και B υπάρχει μεγάλη διαφορά στις κατακόρυφες τάσεις, λόγω του ότι το φράγμα δέχεται και οριζόντιες δυνάμεις εκτός της βαρύτητας του.

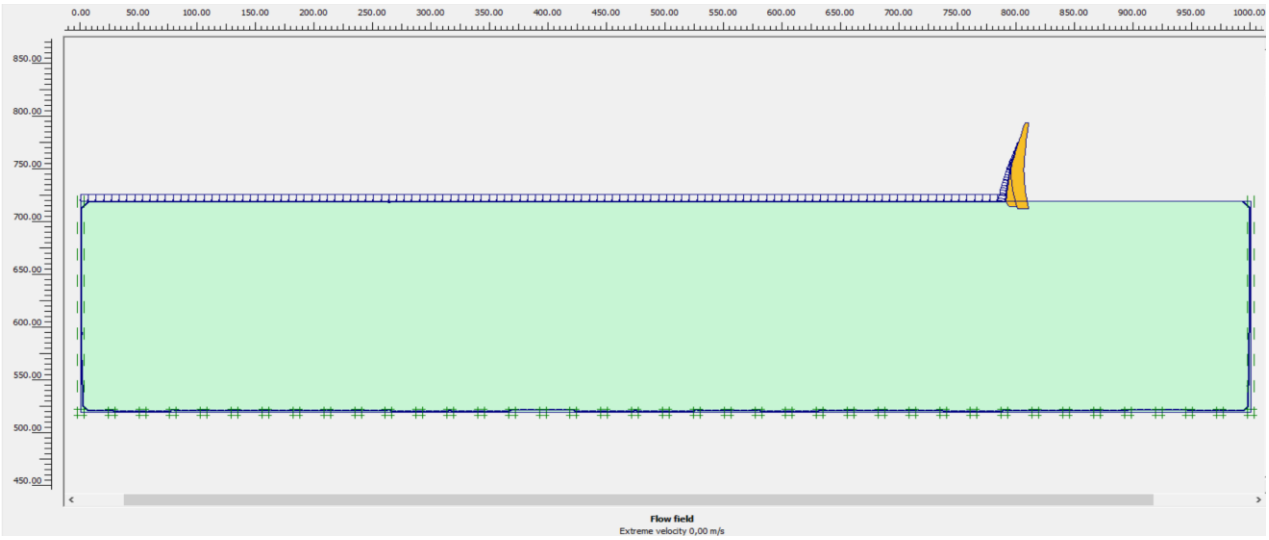
4.3.2 Στατική Ανάλυση με παρουσία νερού στον ταμιευτήρα (+776 m)

- Μέθοδος Ground Water Calculation

Στο στάδιο αυτό πλέον υπάρχουν και οι υδροστατικές ωθήσεις λόγω της παρουσίας νερού στον ταμιευτήρα, ενώ ενδέχεται να δημιουργούνται και κυματισμοί στην κορυφή του ταμιευτήρα γεγονός που συνιστά μία πρόσθετη δύναμη για το φράγμα. Για το λόγο αυτό μία πρώτη σκέψη είναι πως το φράγμα θα καταπονηθεί περισσότερο. Σε αυτό το στάδιο η στάθμη του νερού του ταμιευτήρα ορίστηκε στην Κατώτατη Στάθμη (+776 m) και οι υπολογισμοί έγιναν με την μέθοδο των υπογείων υδάτων (Ground Calculation Water), εντολή του λογισμικού Plaxis – 2D στο Input Program.



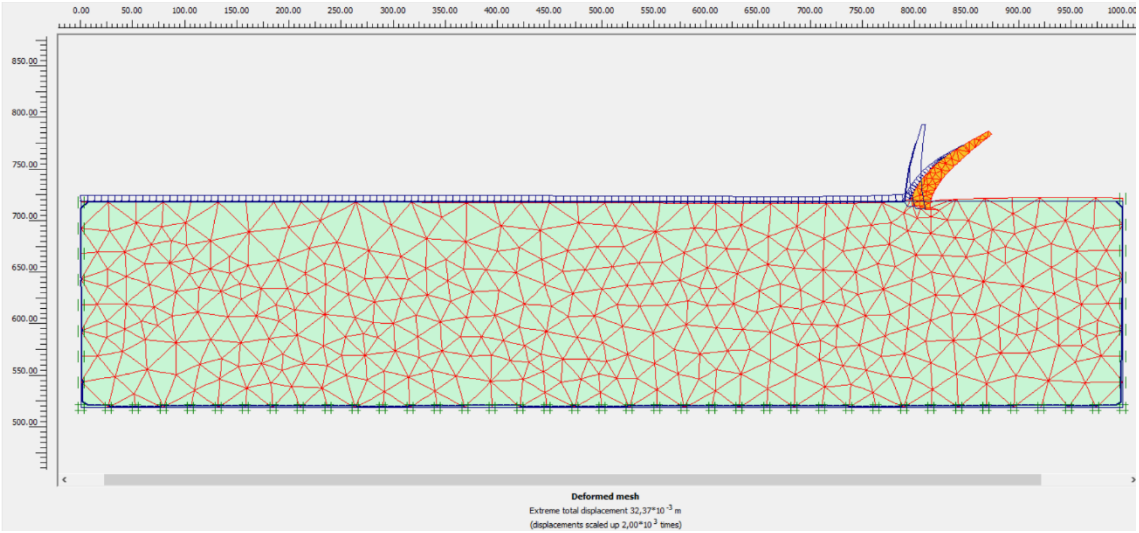
Εικόνα 4.29 Εισαγωγή της στάθμης του νερού στο προσομοίωμα



Εικόνα 4.30 Ταχύτητα υπόγεια ροής – Κατώτατη Στάθμη (+776 m)

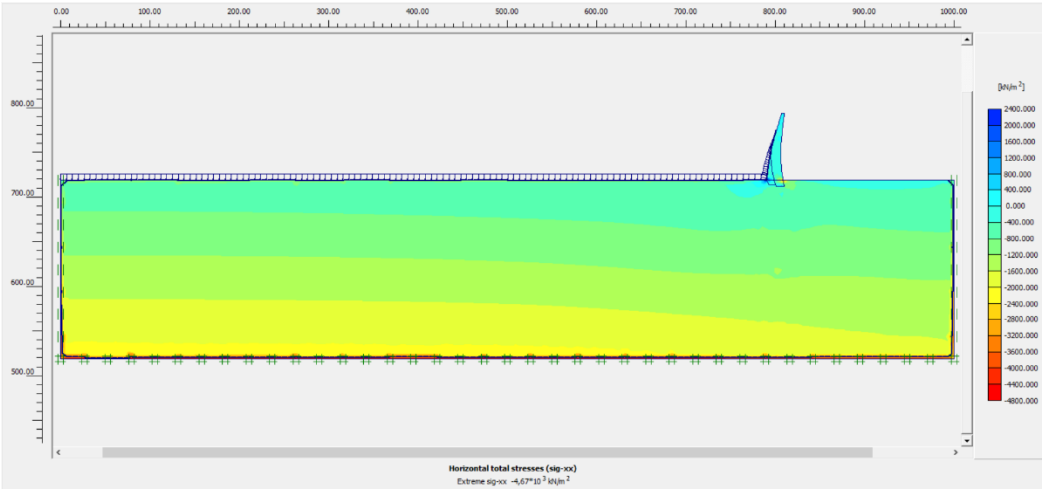
Η ταχύτητα υπόγειας ροής είναι 0 (m/s) επειδή η εδαφική στρώση και το σώμα του φράγματος ορίστηκαν σαν αδιαπέρατα υλικά.

Μετά τον υπολογισμό αυτού του σταδίου (στατικής ανάλυσης με κατώτατη στάθμη) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :

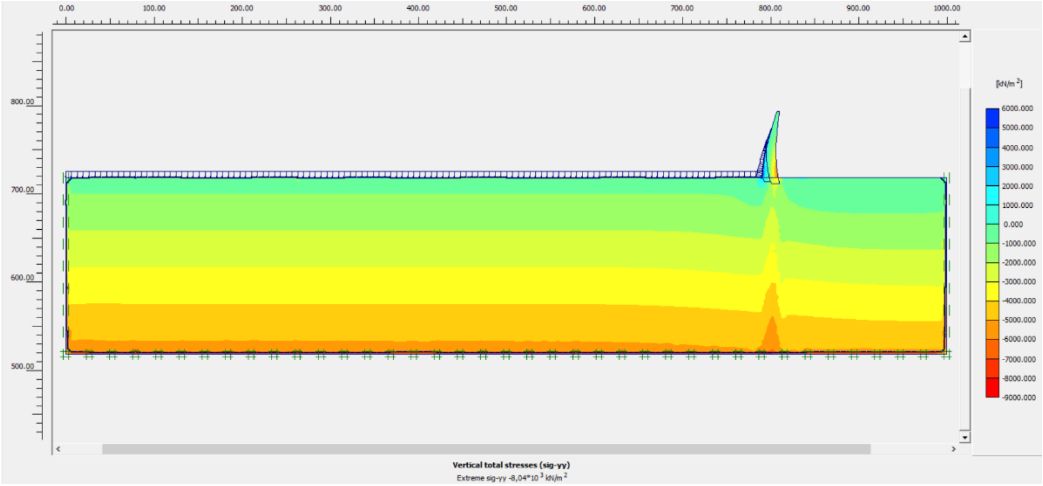


Εικόνα 4.31 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος (+776 m) – Ground water calculation

Οι παραμορφώσεις του μοντέλου είναι της τάξης των 0,032 m (32,4 * 10^{-3}), γεγονός που δείχνει ότι ο αρχικός ισχυρισμός, πως το φράγμα με την ύπαρξη του νερού πλέον θα καταπονηθεί περισσότερο, αποδεικνύεται αληθής. Οι παραμορφώσεις έχουν σχεδόν δεκαπλασιαστεί σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από την στατική ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού.



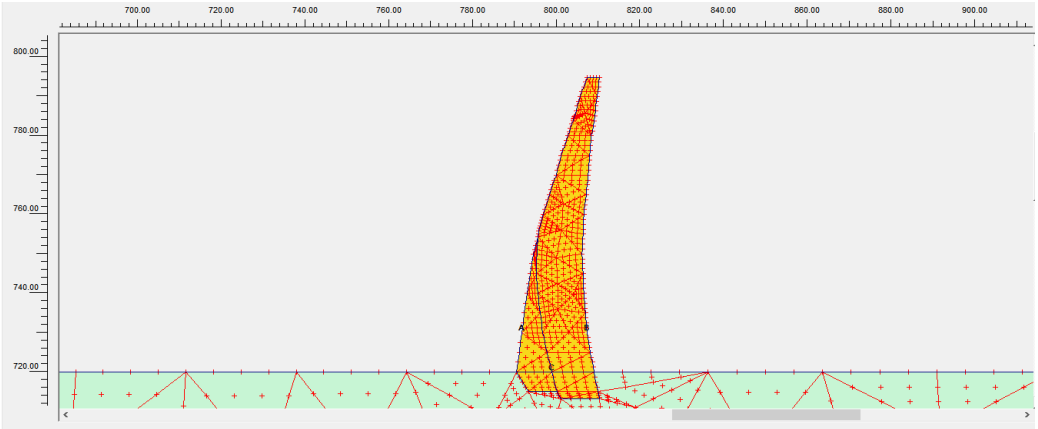
Εικόνα 4.32 Οριζόντιες ολικές τάσεις (+776 m) – Ground water calculation



Εικόνα 4.33 Κατακόρυφες ολικές τάσεις (+776 m) – Ground water calculation

Οι κατακόρυφες ολικές τάσεις που ασκούνται στην βάση του φράγματος θα είναι της τάξης των (γ * h = 24 * 74,7) δηλαδή 1800 KN/m².

Τα χαρακτηριστικά σημεία που τοποθετήθηκαν στην βάση του φράγματος είναι τα ίδια με αυτά της στατικής ανάλυσης χωρίς την παρουσία νερού.



Εικόνα 4.34 Χαρακτηριστικά σημεία για τον υπολογισμό των τάσεων που ασκούνται στο σώμα του φράγματος (+776 m) – Ground water calculation

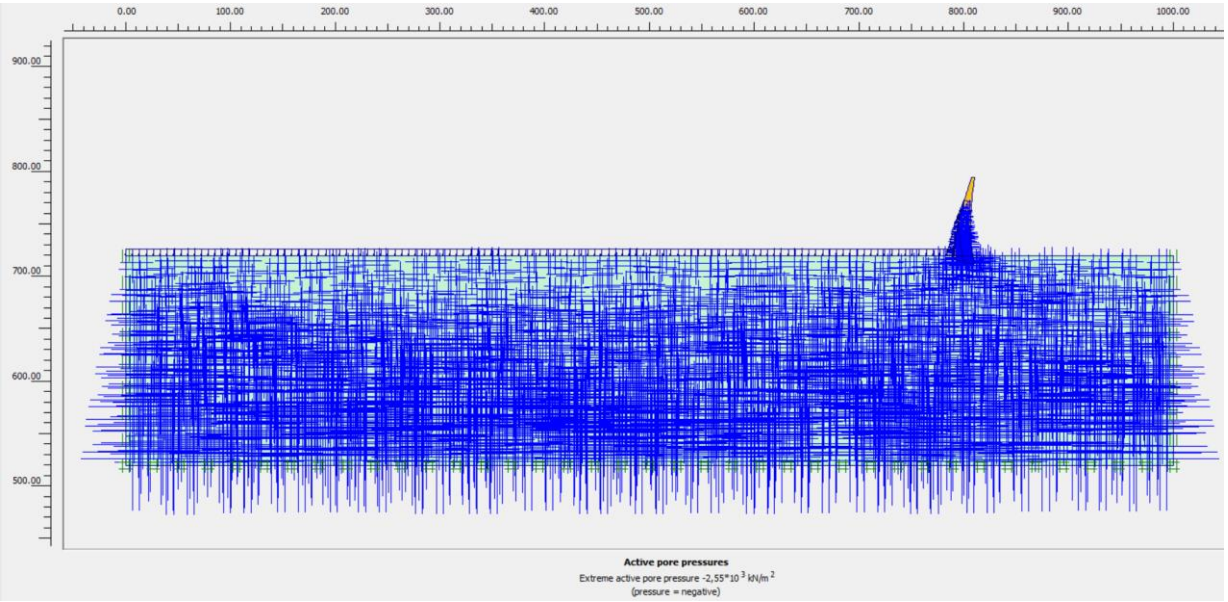
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των συγκεκριμένων σημείων :

Σημείο A Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-1804,4	1677	1889	-3053,5	-275,7	-1160,3

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος – Ground Water Calculation (+776 m)

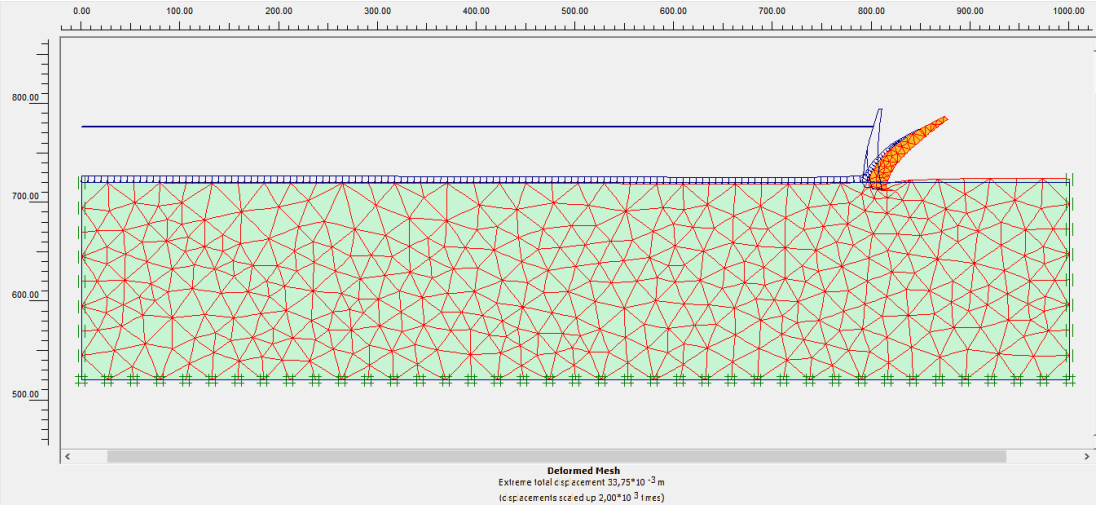
Παρατηρείται πως το νερό στον ταμιευτήρα λειτουργεί εν τέλει επιβαρυντικά για το φράγμα καθώς στα σημεία A και B, που βρίσκονται ανάντη και κατάντη του φράγματος κοντά στην βάση, ενώ για την βάση του φράγματος το νερό φαίνεται να λειτουργεί θετικά μιας που οι κατακόρυφες τάσεις έχουν μειωθεί, όχι όμως και οι οριζόντιες. Επίσης παρατηρείται πως το σημείο A δέχεται κατακόρυφες εφελκυστικές τάσεις, ενώ το σημείο B οριζόντιες εφελκυστικές. Ειδικότερα το κατάντη πρανές του φράγματος (σημείο B) φαίνεται πως είναι το πιο κρίσιμο όταν υπάρχει νερό στον ταμιευτήρα του φράγματος.

- <u>Μέθοδος Phreatic Level</u>

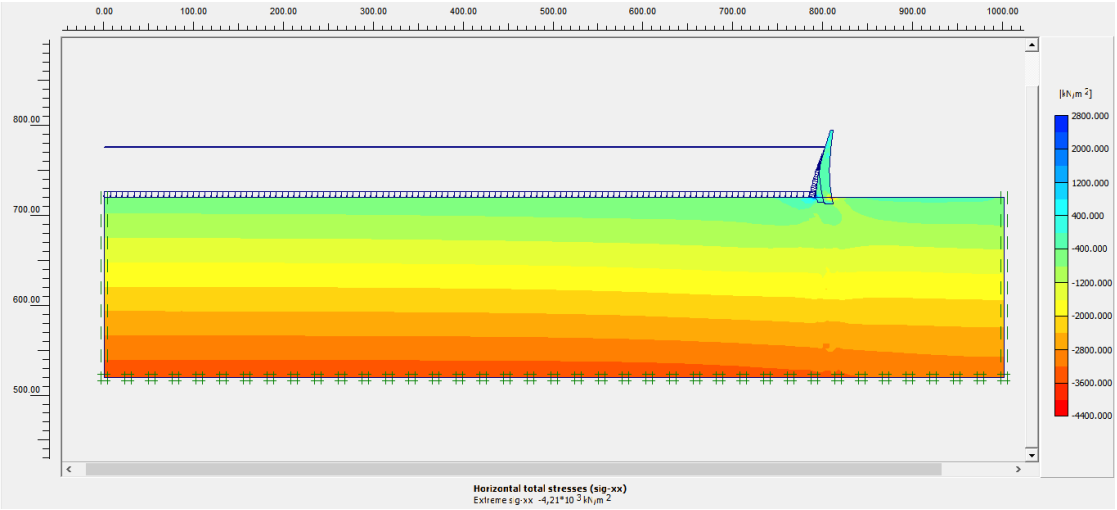


Εικόνα 4.35 Αποτέλεσμα ενεργών πιέσεων πόρων (+776 m)

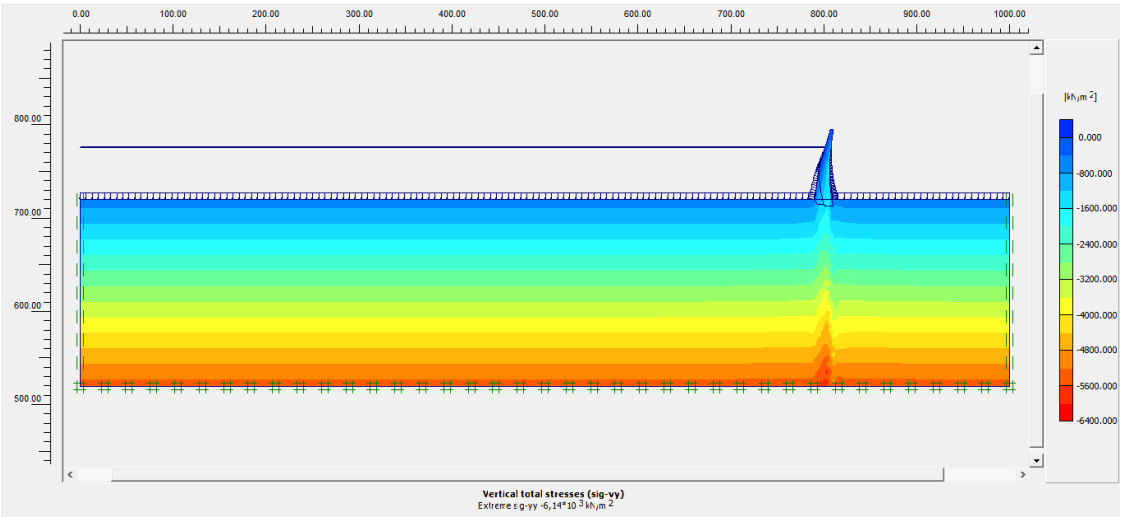
Με τον υπολογισμό του σταδίου αυτού με τη μέθοδο ίδιες φρεατικής στάθμης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα :



Εικόνα 4.36 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος – Phreatic Level



Εικόνα 4.37 Οριζόντιες ολικές τάσεις – Phreatic Level



Εικόνα 4.38 Κατακόρυφες ολικές τάσεις – Phreatic Level

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει πως οι παραμορφώσεις του προσομοιώματος με τη μέθοδο των υπογείων υδάτων (Ground water calculation) ήταν λίγο πιο μικρές σε σχέση με την μέθοδο ίδιες φρεατικής στάθμης (Phreatic Level). Παρόλα αυτά οι οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις που προέκυψαν από την μέθοδο την μέθοδο των υπογείων υδάτων ήταν μεγαλύτερες από αυτές που προέκυψαν για την άλλη μέθοδο.

Για το λόγο αυτό ακολουθούν τα αποτελέσματα των τάσεων για τα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία είναι ίδια, ώστε να φανεί εάν τα παραπάνω αποτελέσματα είναι στο ίδιο μήκος κύματος με την ανάλυση.

Σημείο A Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-1773,7	1689	2192	-2811,2	-90,8	-738,8

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος – Phreatic Level (+776 m)

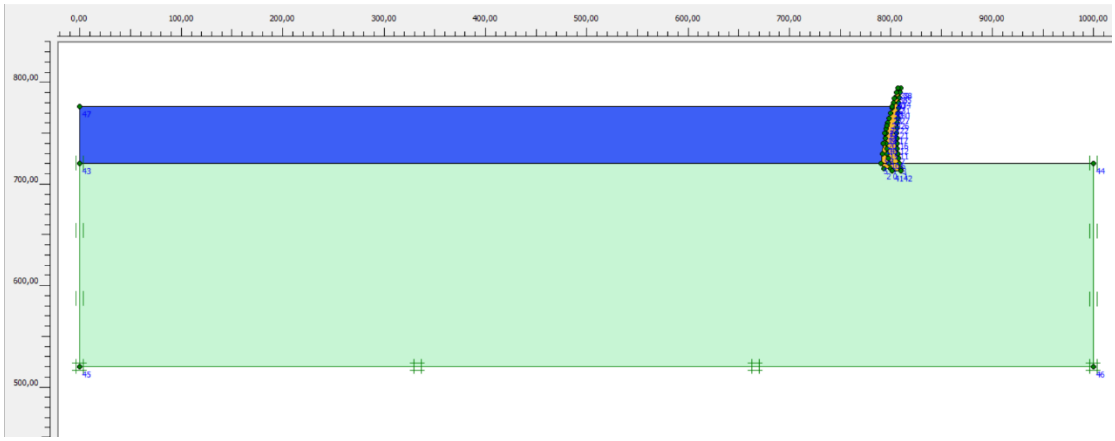
Πρώτη διαφορά των δύο αυτών μεθόδων είναι πως, στην 2η (φρεατικής στάθμης) οι οριζόντιες ολικές τάσεις στο A είναι μικρότερες σε σχέση με την 1η μέθοδο, ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις αυξάνονται ελάχιστα. Αντιστρόφως ανάλογα αυτό ισχύει και με το σημείο B, όπου στην 2η μέθοδο οι οριζόντιες ολικές τάσεις αυξάνονται, ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις μειώνονται. Ίδιες οι τάσεις στο σημείο C είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με αυτές ίδιες μεθόδου υπογείων υδάτων, γεγονός που αναφέρθηκε και προηγουμένως παρατηρώντας ίδιες εικόνες του προσομοιώματος.

- <u>Μέθοδος δημιουργίας του νερού, ως υλικό δημιουργημένο στο λογισμικό Plaxis – 2D</u>

Σε αυτό το στάδιο, εξετάστηκε το μοντέλο στατικά με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα, για στάθμη νερού +776 m, ενώ το νερό είναι με την μορφή υλικού στο προσομοίωμα. Η ανάλυση αυτή δοκιμάστηκε και παρουσιάζεται, λόγω του ότι το λογισμικό Plaxis – 2D επιτρέπει την δημιουργία υλικών με ίδιες ιδιότητες του νερού. Το υλικό αυτό τοποθετήθηκε ανάντη του φράγματος και οι μηχανικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

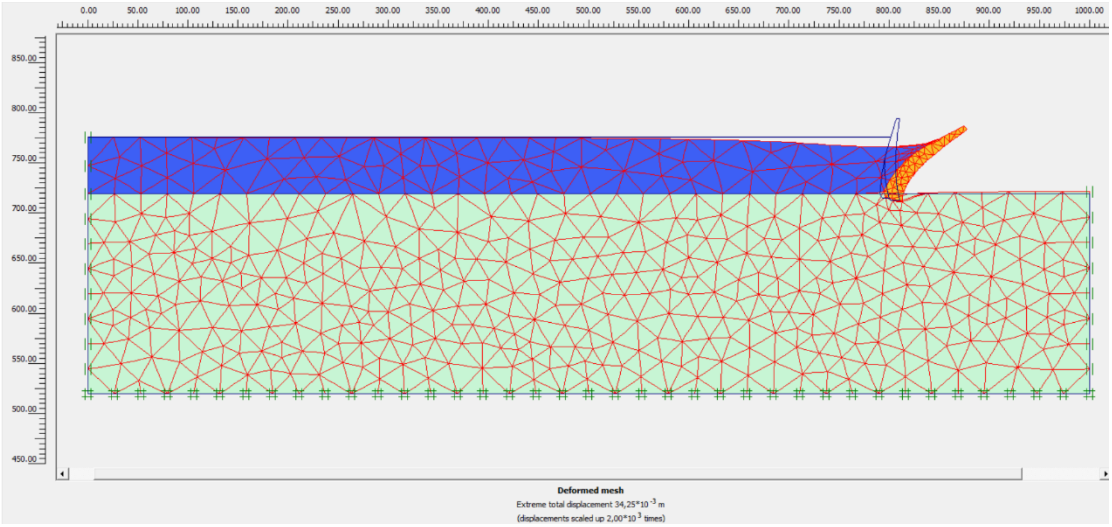
	Νερό
Ειδικό ξηρό βάρος γunsat	10 KN/m³
Ειδικό βάρος βρεγμένου υλικού γsat	10 KN/m³
Υδατοπερατότητα κατά x (kx)	1 m/s
Υδατοπερατότητα κατά y (ky)	1 m/s
Λόγος Poisson ν	0,499
Μέτρο Ελαστικότητας Eref	1224 KN/m²
Διατμητικά κύματα Vs	20 m/s

Πίνακας 4.5 Μηχανικές ιδιότητες του υλικού του νερού

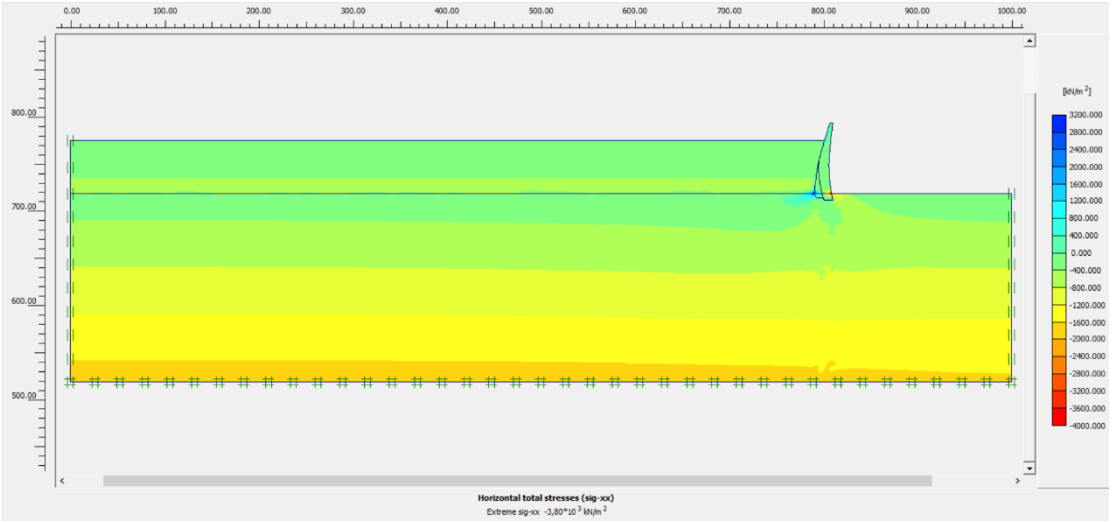


Εικόνα 4.39 Προσομοίωση του νερού στο ήδη υπάρχον μοντέλο (+776 m)

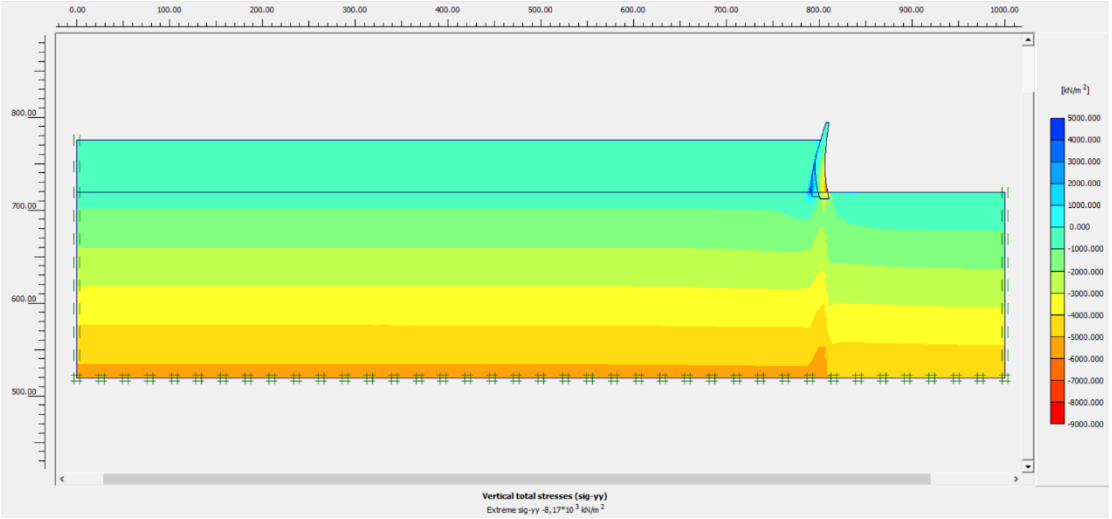
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής ακολουθούν παρακάτω :



Εικόνα 4.40 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του προσομοιώματος (+776 m)



Εικόνα 4.41 Οριζόντιες ολικές τάσεις (+776 m)



Εικόνα 4.42 Κατακόρυφες ολικές τάσεις (+776 m)

Οι παραμορφώσεις του προσομοιώματος είναι της τάξης του 0,034 μέτρων, οι μέγιστες οριζόντιες ολικές τάσεις είναι -3800 KN/m², ενώ οι μέγιστη τιμή των κατακόρυφων τάσεων είναι -8170 KN/m². Με την μέθοδο αυτή μπορεί να πει κανείς πως παρατηρείται μία αύξησης στις κατακόρυφες ολικές τάσεις, αλλά μείωση στις οριζόντιες.

Τα χαρακτηριστικά σημεία στο σώμα του φράγματος παραμένουν ως έχουν, δηλαδή είναι τα Α,Β και C και ακολουθεί ο πίνακας των τάσεων των χαρακτηριστικών αυτών σημείων.

Σημείο Α Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο Α Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο Β Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο Β Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-1976,90	1384,00	2088	-3066,70	-296,12	-1193,40

Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος – Νερό με την χρήση υλικού (+776 m)

Με την μέθοδο χρησιμοποίησης του νερού με την μορφή υλικού διαπιστώνεται πως η μόνη σχετική μείωση στις τάσεις που προέκυψε είναι αυτή στις κατακόρυφες ολικές τάσεις που δέχεται το ανάντη τμήμα του φράγματος (σημείο Α). Κατά τα άλλα στις οριζόντιες τάσεις και των 3 σημείων υπάρχει αύξηση, της και στις κατακόρυφες τάσεις των σημείων Β και C ωστόσο η διαφορά είναι αρκετά μικρή.

4.3.2.1 Σύμπτυξη των αποτελεσμάτων για την στάθμη του ταμιευτήρα (+776 m)

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των τάσεων που αφορούν την στατική ανάλυση με ή χωρίς νερό στον ταμιευτήρα.

Στάθμη νερού ταμιευτήρα +776 m	Σημείο Α Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο Α Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο Β Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο Β Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Στατική Ανάλυση	-228,27	-80,43	96,75	-1014,20	-185,20	-1247,30
Στατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation)	-1804,40	1677	1889	-3053,50	-275,70	-1160,30
Στατική Ανάλυση με νερό (Phreatic Level)	-1733,70	1689	2192	-2811,20	-90,75	-738,90
Στατική Ανάλυση με νερό (σαν υλικό)	-1976,90	1384	2088	-3066,70	-296,12	-1193,40

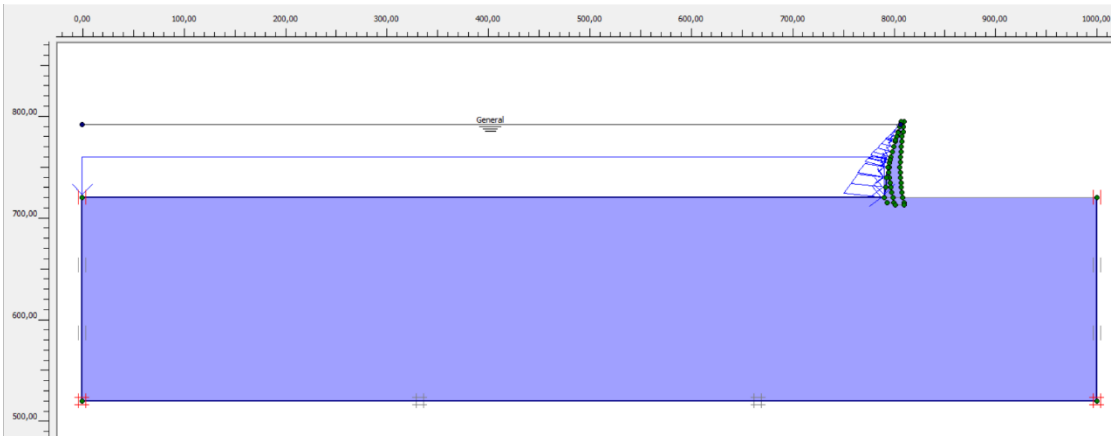
Πίνακας 4.7 Συγκεντρωτικός πίνακας των τάσεων που προκύπτουν στην στατική ανάλυση για στάθμη νερού +776 m.

Το γενικότερο συμπέρασμα που εξάγεται από τον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα είναι πως το σημείο Α, ανάντη πλευρά του φράγματος, δέχεται εφελκυστικές τάσεις, ενώ το σημείο Β, κατάντη πλευρά του φράγματος, που δέχεται θλιπτικές τάσεις φαίνεται να ζορίζεται αρκετά, ιδιαίτερα μετά την ύπαρξη νερού στον ταμιευτήρα. Όσον αφορά το σημείο C, βάση του φράγματος, ενώ η στατική ανάλυση χωρίς νερό έδειξε πως το φράγμα ζορίζεται από τα δεξιά και κοντά στην βάση (σημεία Β και C), παρόλα αυτά παρατηρείται πως με την πλήρωση του ταμιευτήρα αντιδρά καλύτερα σε σχέση με τα άλλα δύο σημεία τα οποία είναι και συμμετρικά. Ειδικότερα με την μέθοδο της φρεατικής στάθμης που υλοποιήθηκε μέσω σχετικής εντολής στο λογισμικό Plaxis – 2D, η βάση του φράγματος παρουσιάζει μεγάλη μείωση στις τάσεις που δέχεται.

4.3.3 Στατική ανάλυση με παρουσία νερού στον ταμιευτήρα (+792 m)

- <u>Μέθοδος Ground Water Calculation</u>

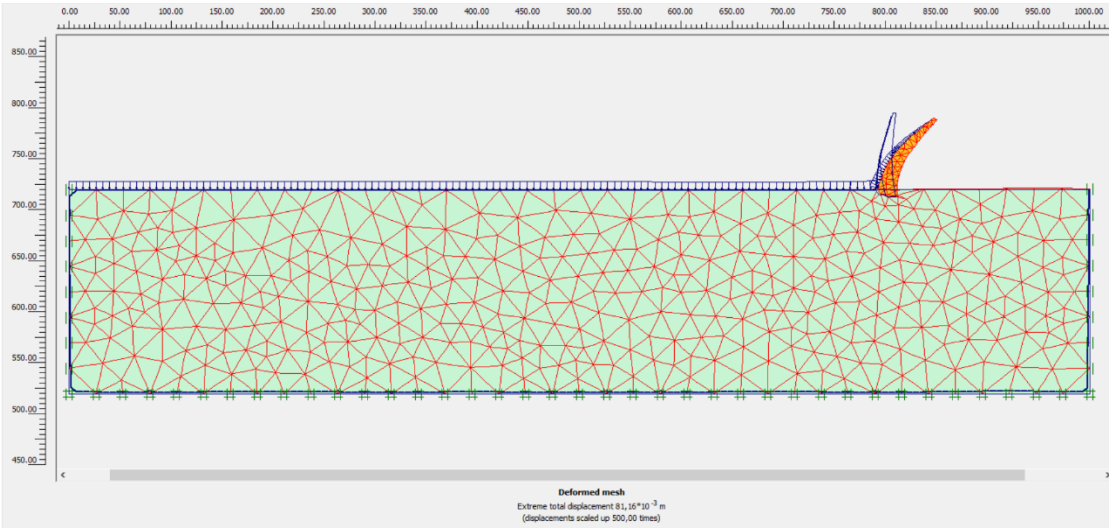
Το νερό του ταμιευτήρα στα 792 μέτρα αγγίζει σχεδόν την ανώτατη στάθμη του. Συγκεκριμένα στα 792 μέτρα βρίσκεται η στάθμη στέψης των υπερχειλιστών του φράγματος. Στην ουσία οι δύο στάθμης που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στην ανώτατη και κατώτατη στάθμη λειτουργίας του υπερχειλιστή.



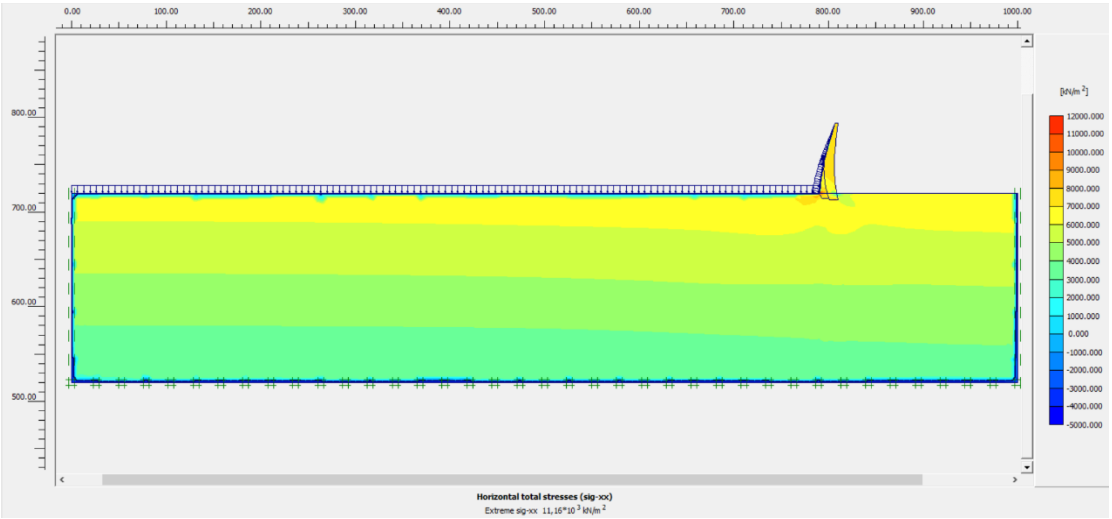
Εικόνα 4.43 Διαμόρφωση της νέας στάθμης στον ταμιευτήρα του φράγματος (+792 m)

Δίκτυο ροής δεν αναπτύσσεται στην εδαφική θεμελίωση, καθώς της και στην προηγούμενη περίπτωση, αυτή αποτελείται από αδιαπέρατο βράχο, γεγονός που δεν πρόκειται να αλλάξει για τις αναλύσεις.

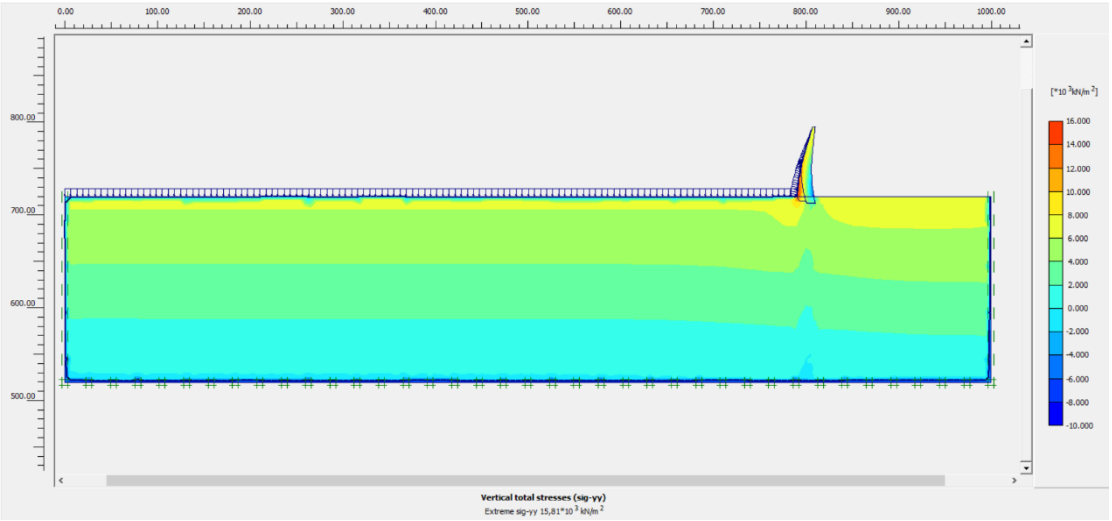
Τα αποτελέσματα από την επίλυση του νέου προβλήματος ήταν :



Εικόνα 4.44 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου – Ground water calculation (+792 m)



Εικόνα 4.44 Οριζόντιες ολικές τάσεις – Ground water calculation (+792 m)



Εικόνα 4.45 Κατακόρυφες ολικές τάσεις – Ground water calculation (+792 m)

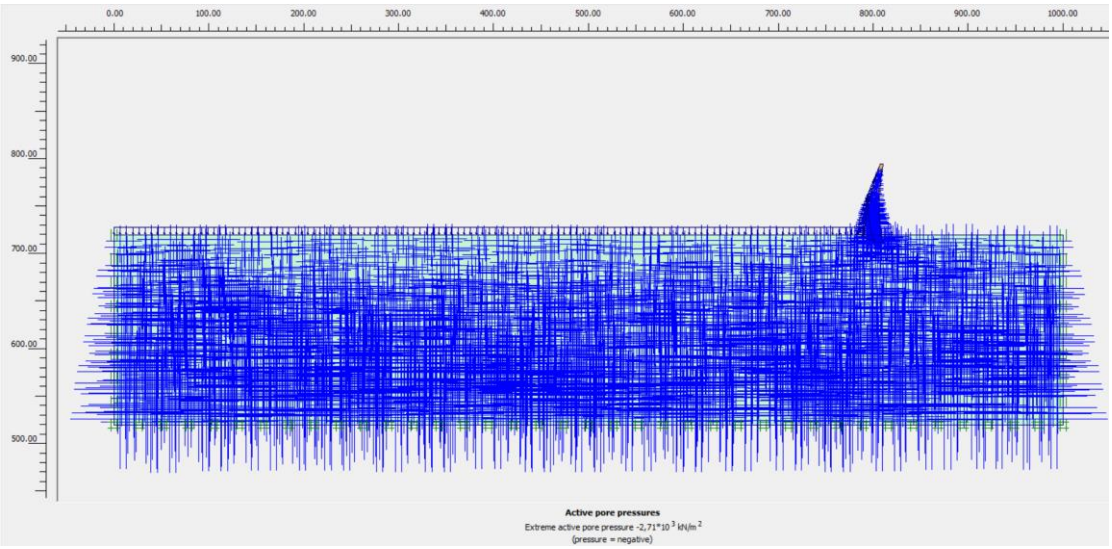
Με την νέα στάθμη πλέον, υπάρχει αύξηση της παραμόρφωσης του δικτύου, η αύξηση αυτή είναι των 5 εκατοστών, αφού από τα περίπου 0,03 m ανήλθε στα 0,08 m. Επίσης άλλο ένα γρήγορο συμπέρασμα είναι πως η μέγιστη τιμή της κατακόρυφης τάσης έχει σχεδόν διπλασιαστεί, ενώ η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ολικής τάσης είναι κοντά στον τετραπλασιασμό. Σε κάθε περίπτωση αναμένεται μεγάλη αύξηση στα αποτελέσματα των τάσεων για τα χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία πρέπει να αναφερθεί πως δεν έχουν αλλάξει.

Σημείο A Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-4235,3	4178	4955	-6020,6	-285,55	-1158,7

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος – Ground water calculation (+792 m)

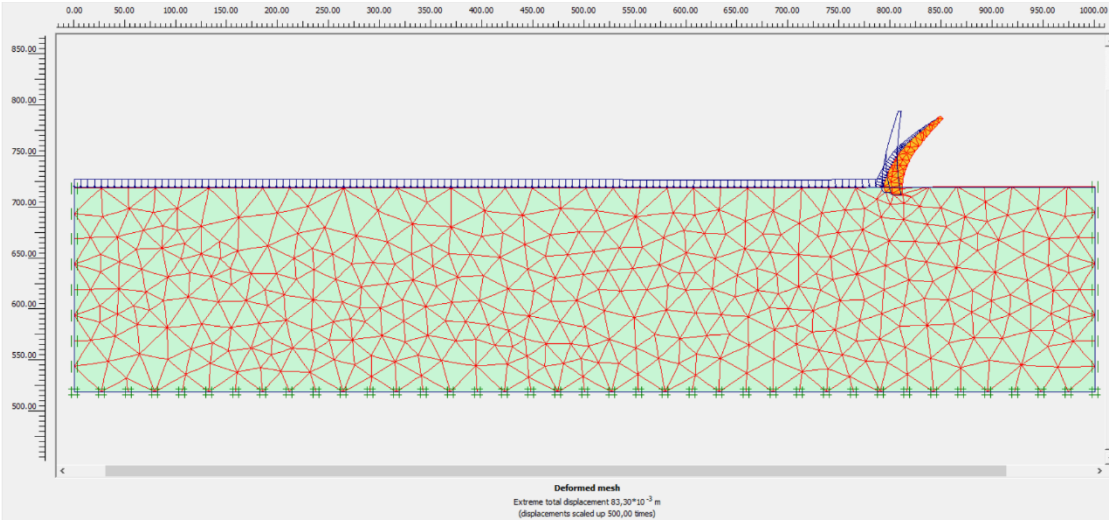
Στην στάθμη αυτή παρατηρείται πως έχουμε διπλασιασμό, και κάτι παραπάνω, των τάσεων που δέχονται τα σημεία A και B, σε σχέση με την ίδια μέθοδο για την στάθμη των 776 μέτρων. Τα σημεία αυτά είναι συμμετρικά και είναι λογικό να εμφανίζουν κάποιες παρόμοιες συμπεριφορές. Το σημείο B ωστόσο είναι κατάντη του φράγματος και γι' αυτό οι τάσεις (ειδικά οι κατακόρυφες) είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το σημείο A, αφού καταπονείται περισσότερο. Γεγονός που συμβαίνει σε κάθε φράγμα και ήταν ούτως ή άλλως γνωστό. Το αξιοσημείωτο των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αυτής είναι το γεγονός ότι στο σημείο C οι τάσεις είναι σχεδόν οι ίδιες και με την προηγούμενη στάθμη.

- <u>Μέθοδος Phreatic Level</u>

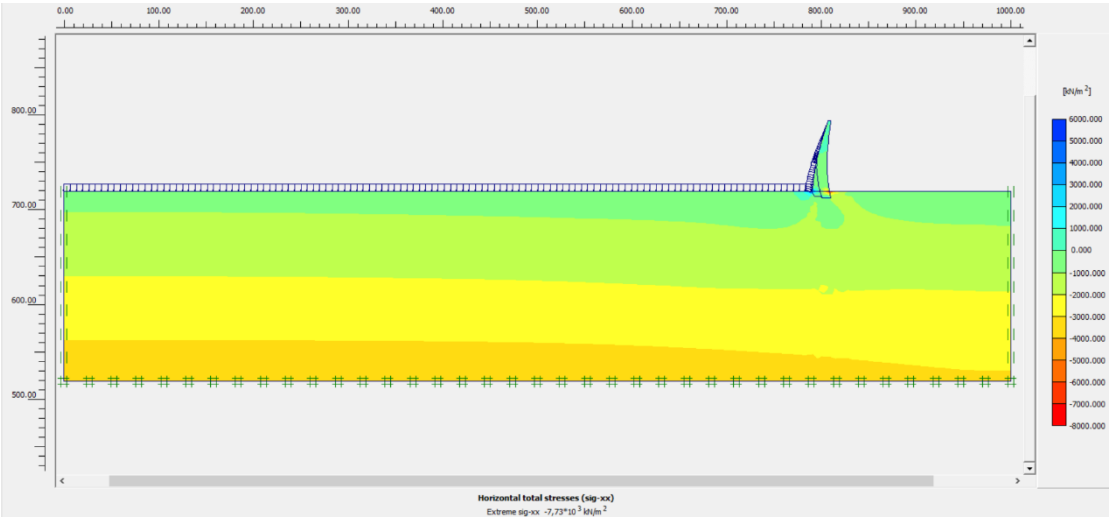


Εικόνα 4.46 Αποτέλεσμα ενεργών πιέσεων πόρων (+792 m)

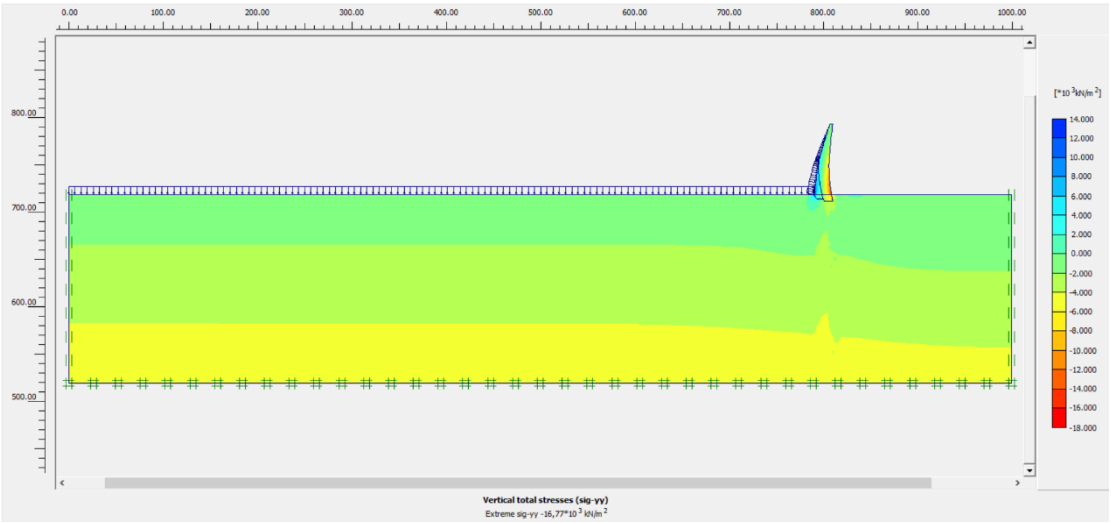
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επίλυσης με την μέθοδο της φρεατικής στάθμης.



Εικόνα 4.47 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου – Phreatic Level (+792 m)



Εικόνα 4.48 Οριζόντιες ολικές τάσεις – Phreatic Level (+792 m)



Εικόνα 4.49 Κατακόρυφες ολικές τάσεις – Phreatic Level (+792 m)

Της και με την κατώτατη στάθμη υδροληψίας, έτσι και με την στάθμη των 792 μέτρων, η μέθοδος επίλυσης της φρεατικής στάθμης, παρουσιάζει μία αύξηση των 2 χιλιοστών στην παραμόρφωση του προσομοιώματος σε σχέση με την μέθοδο των υπογείων υδάτων. Επίσης οι οριζόντιες ολικές τάσεις μειώνονται αρκετά ενώ οι κατακόρυφες τάσεις αυξάνονται ελάχιστα.

Σημείο A Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-4117	4208	5355	-5665,4	-92,02	-742,1

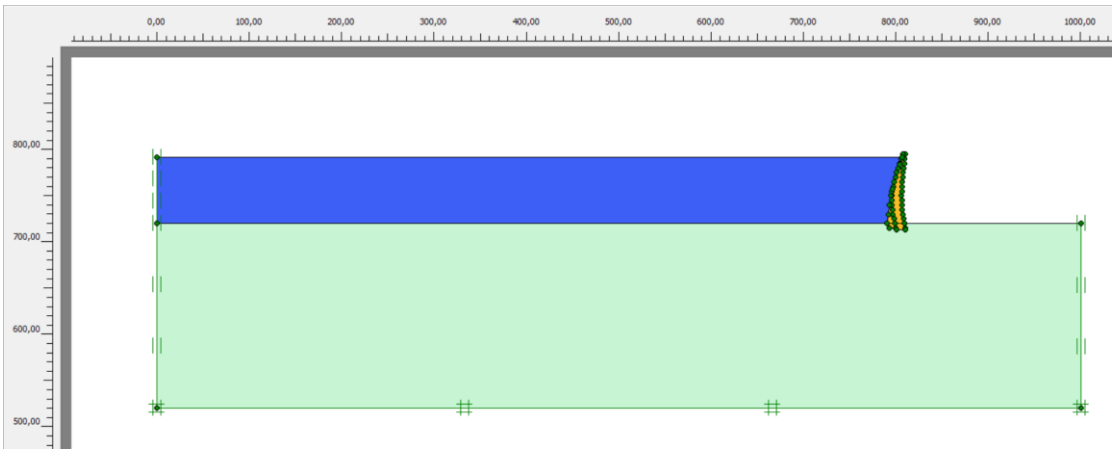
Πίνακας 4.9 Αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος –Phreatic Level (+792 m)

Αρχικά παρατηρείται μία πολύ σημαντική μείωση στις κατακόρυφες ολικές τάσεις του σημείου B, που με την προηγούμενη μέθοδο είχαν πιάσει το πικ τους. Παρόλα αυτά αυξάνονται οι οριζόντιες ολικές τάσεις για το σημείο B, ενώ μειώνονται για το σημείο A. Οι κατακόρυφες ολικές τάσεις παραμένουν σχεδόν ίδιες για το σημείο που έχει επιλεχθεί στην ανάντη πλευρά του φράγματος και τείνουν να το εφελκύσουν. Στο σημείο C, της και με την προηγούμενη περίπτωση στάθμης που αναλύθηκε έτσι και σε αυτήν οι κατακόρυφες ολικές τάσεις μειώνονται κατά το 1/3 σχεδόν, ενώ οι οριζόντιες ολικές τάσεις τείνουν να μηδενιστούν.

- <u>Μέθοδος δημιουργίας του νερού, ως υλικό δημιουργημένο στο λογισμικό Plaxis – 2D</u>

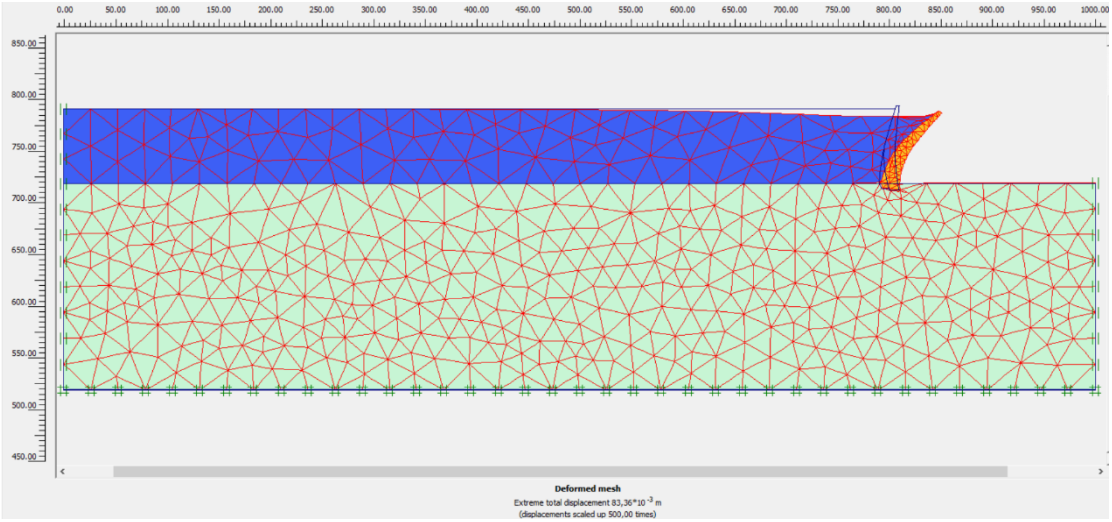
Το υλικό του νερού και σε αυτήν την περίπτωση στάθμης παρέμεινε το ίδιο της και πριν, δηλαδή δεν υπήρξε κάποια αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες του.

Το προσομοίωμα του υλικού του νερού τοποθετημένο ανάντη του φράγματος :

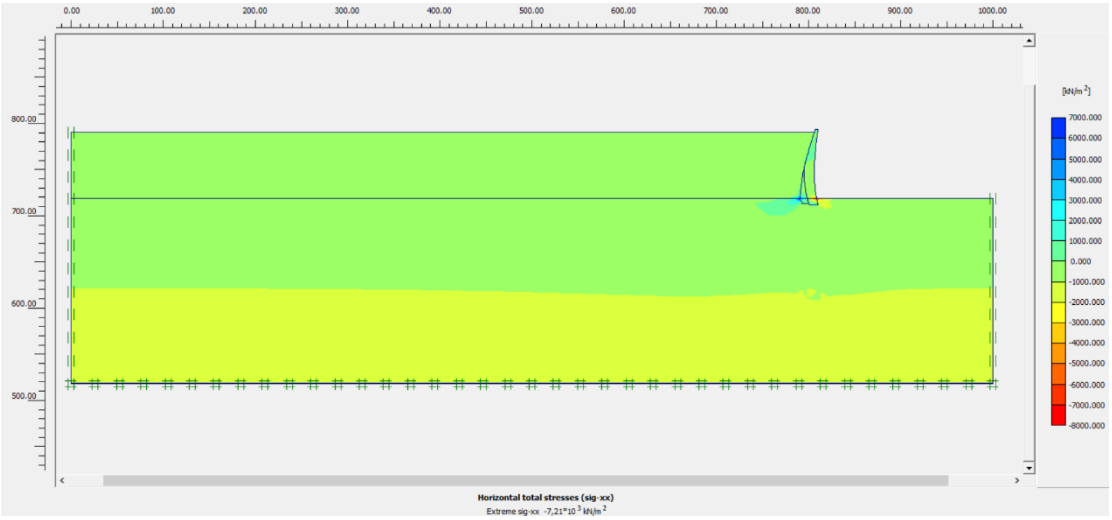


Εικόνα 4.50 Το μοντέλο της στατικής ανάλυσης με την παρουσία νερού (+792 m)

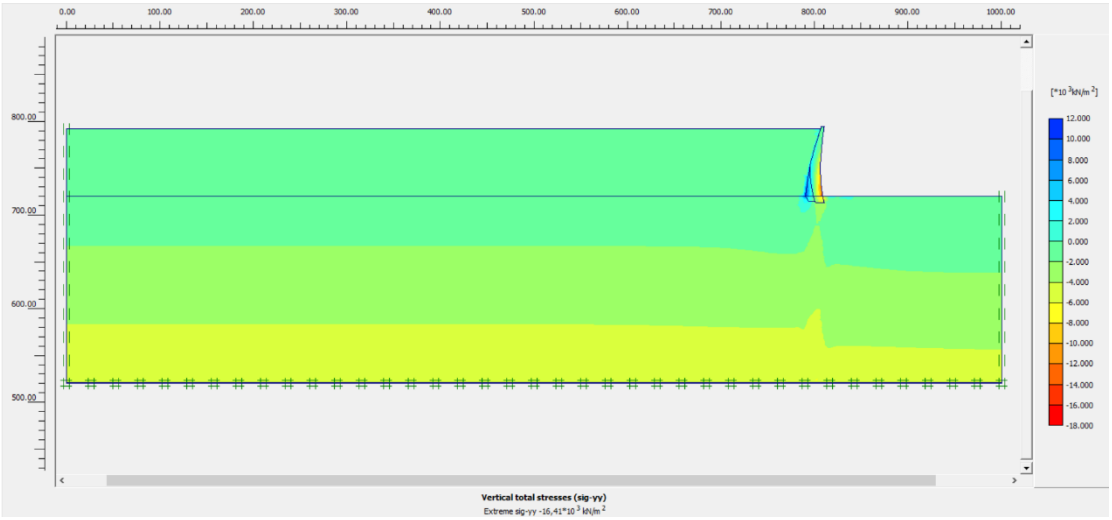
Τα αποτελέσματα από την επίλυση με την μέθοδο δημιουργίας του νερού στο Plaxis – 2D :



Εικόνα 4.51 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του προτύπου (+792 m)



Εικόνα 4.52 Οριζόντιες ολικές τάσεις (+792 m)



Εικόνα 4.53 Κατακόρυφες ολικές τάσεις (+792 m)

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται βλέποντας όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις 3 μεθόδους για την στάθμη των 792 m νερού, είναι πως η μέθοδος αυτή είναι αρκετά κοντά με την 2η μέθοδο της φρεατικής στάθμης. Παρατηρείται δηλαδή σχεδόν ίδια παραμόρφωση στο δίκτυο ενώ οι μέγιστες τιμές οριζόντιας και κατακόρυφης τάσης είναι θλιπτικές και στις δύο αυτές μεθόδους. Η μόνη με τα διαφορετικά αποτελέσματα είναι η μέθοδος των υπογείων υδάτων (Ground water calculation) όπου οι μέγιστες τιμές οριζόντιας και κατακόρυφης τάσης που προέκυψαν ήταν εφελκυστικές.

Σημείο A Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες ολικές τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
-4484,4	3777	4554	-5798,1	-343,64	-1326,7

Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος – Νερό με τη μορφή υλικού (+792 m)

Μέσω των αποτελεσμάτων αυτών ο πρώτος ισχυρισμός που μπορεί να γίνει με απόλυτη σιγουριά είναι πως οι τάσεις είτε οριζόντιες είτε κατακόρυφες έχουν σχεδόν διπλασιαστεί ή εντελώς διπλασιαστεί στα σημεία A και B, σε σύγκριση πάντα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ίδια μέθοδο για στάθμη ταμιευτήρα ίση με 776 μέτρα. Στο σημείο C υπάρχει μία μικρή αύξηση αλλά σε καμία περίπτωση διπλασιασμός. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με τις άλλες δύο μεθόδους, οι κατακόρυφες ολικές τάσεις στο σημείο A και οι οριζόντιες ολικές στο σημείο B έχουν την μικρότερη τιμή που έχει προκύψει. Ωστόσο το σημείο C δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους.

4.3.3.1 Σύμπτυξη των αποτελεσμάτων για την στάθμη του ταμιευτήρα (+792 m)

Στον πίνακα που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα, παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των τάσεων που αφορούν την στατική ανάλυση με ή χωρίς νερό στον ταμιευτήρα.

Στάθμη νερού ταμιευτήρα +792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Στατική Ανάλυση	-228,27	-80,43	96,75	-1014,20	-185,20	-1247,30
Στατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation)	-4235,3	4178	4995	-6020,6	-285,55	-1158,7
Στατική Ανάλυση με νερό (Phreatic Level)	-4177	4208	5335	-5665,4	-92,02	-742,1
Στατική Ανάλυση με νερό (σαν υλικό)	-4484,4	3777	4554	-5798,1	-343,64	-1326,7

Πίνακας 4.11 Συγκεντρωτικός πίνακας των τάσεων που προκύπτουν στην στατική ανάλυση για στάθμη νερού +792 m.

4.3.4 Πίνακας παρουσίασης όλων των στατικών αναλύσεων με την παρουσία νερού

H = + 776 m / H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (kN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (kN/m²)
Στατική Ανάλυση με νερό (Ground Water calculation)	-1804,4 / -4235,3	1677 / 4178	1889 / 4955	-3053,5 / -6020,6	-275,7 / -285,55	-1160,3 / -1158,7
Στατική Ανάλυση με νερό (Phreatic Level)	-1733,7 / -4177	1689 / 4208	2192 / 5335	-2811,3 / -5665,4	-90,75 / -92,02	-738,9 / -742,1
Στατική Ανάλυση με νερό (σαν εδαφικό υλικό)	-1976,9 / -4484,4	1384 / 3777	2088 / 4554	-3066,7 / -5798,1	-296,12 / -343,64	-1193,4 / -1326,7

Πίνακας 4.12 Συγκεντρωτικός πίνακας των στατικών αναλύσεων υπό την παρουσία νερού

Τα γενικότερα συμπεράσματα από τους παραπάνω πίνακες είναι πως με την αύξηση του νερού του ταμιευτήρα κατά 16 m οι τάσεις αυξάνονται, σε άλλες περιπτώσεις είναι κοντά στον διπλασιασμό, ενώ σε άλλες διπλασιάζονται, σχολιάζοντας πάντα τα σημεία που βρίσκονται ανάντη και κατάντη του φράγματος. Το σημείο στην βάση του φράγματος από την άλλη, που δεν είναι συμμετρικό της είναι τα άλλα δύο, παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Στην 1 από τις 3 μεθόδους οι τάσεις αυξάνονται μερικώς, ενώ στις 2 πρώτες είναι σχεδόν ίδιες. Γεγονός πολύ ενθαρρυντικό για το έδαφος θεμελίωσης του φράγματος αλλά και για την βάση του, καθώς φαίνεται να μην κινδυνεύουν από φαινόμενα της οι καθιζήσεις και οι συνιζήσεις αντίστοιχα. Η στάθμη των 792 μέτρων είναι ήδη πολύ υψηλή οπότε κατά πάσα πιθανότητα το φράγμα δεν πρόκειται να δεχθεί αυτά τα νούμερα των τάσεων.

4.4 Σεισμικές Αναλύσεις

Στα φράγματα, της έχει αναφερθεί και σκτο κεφάλαιο της εισαγωγής, εκτός από τις στατικές αναλύσεις πρέπει να γίνονται και σεισμικές. Οι σεισμοί είναι μία από τις πιο σημαντικές αιτίες πρόκλησης βλαβών στα φράγματα, ακόμα και πρόκλησης κατάρρευσης. Για την κατασκευή ενός φράγματος σε μία περιοχή, θα πρέπει να μελετάται πολύ καλά η σεισμικότητα της περιοχής και οι επιταχύνσεις τις οποίες αυτή αναπτύσσει. Επίσης θα πρέπει να μελετάται πολύ καλά και η γεωλογία και οι τεκτονικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής.

Οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν στα φράγματα, καθιζήσεις του εδάφους θεμελίωσης και συνιζήσεις του σώματος του φράγματος, αλλά και ρωγμές. Επίσης μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της στάθμης του νερού (κυματισμοί) με συνέπεια την υπερπήδηση του νερού στα κατάντη του πρανές και στην χειρότερη των περιπτώσεων κατάρρευση του υπερχειλιστή και της κατασκευής. Ακόμη μπορούν να δημιουργηθούν διαρροές και εν συνεχεία εσωτερική διάβρωση εξαιτίας της δημιουργίας ρωγμών στο φράγμα. Και άλλα προβλήματα της θέματα στην ευστάθεια των πρανών του φράγματος, και προβλήματα ρευστοποίησης λόγω των υπερπιέσεων που δημιουργούνται στα αναχώματα και στα θεμέλια του φράγματος. Τέλος ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει κατολισθήσεις μεγάλων όγκων εδαφικών υλικών, που πέφτουν στον ταμιευτήρα με αποτέλεσμα να δημιουργείται υπερχείλιση του νερού.

Επειδή οι παραπάνω περιπτώσεις αστοχιών και βλαβών είναι εξαιρετικά σημαντικές για την ευστάθεια του φράγματος, θα πρέπει να μελετάται εξ αρχής και να υπολογίζεται η σεισμική ευστάθεια του. Οι μέθοδοι υπολογισμού της σεισμικής ευστάθειας του φράγματος που μελετήθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι :

1. Η ψευδοστατική μέθοδος
2. Η μέθοδος των τάσεων – παραμορφώσεων

4.4.1 Ψευδοστατική ανάλυση

Οι ψευδοστατικές αναλύσεις αποτελούν την πιο απλή μέθοδο και συχνά χρησιμοποιείται για μία πρώτη εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας των πρανών. Συνήθως αν τα αποτελέσματα που προκύψουν από την ανάλυση δείξουν ότι τα πρανή είναι ασφαλής μπορεί να μη χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη μέθοδος και η μελέτη να αρκεστεί στην ψευδοστατική. Ωστόσο σε περιπτώσεις εδαφών με υψηλές πιέσεις πόρων, ακόμα και αν ο συντελεστής ασφαλείας είναι εντάξει, ενδέχεται αυτός να είναι αναληθείς.

Η σεισμική δόνηση στην μέθοδο αυτή εφαρμόζεται με οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις, οι οποίες επιταχύνσεις παράγουν αδρανειακές δυνάμεις, οριζόντια F_h και κατακόρυφη F_v δύναμη αντίστοιχα. Οι δυνάμεις αυτές δρουν στο κέντρο βάρους της μάζας αστοχίας του πρανούς λόγω ότι η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως ισοδύναμο στατικό. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται μέσω των σχέσεων :

$$Fh = \frac{ah*w}{g} = k_h * w$$

$$Fv = \frac{av*w}{g} = k_v * w$$

όπου, a_h είναι η οριζόντια ψευδοστατική επιτάχυνση

a_v η κατακόρυφη ψευδοστατική επιτάχυνση

k_h είναι αδιάστατος σεισμικός συντελεστής της οριζόντιας κίνησης

και, k_v αδιάστατος σεισμικός συντελεστής της κατακόρυφης κίνησης

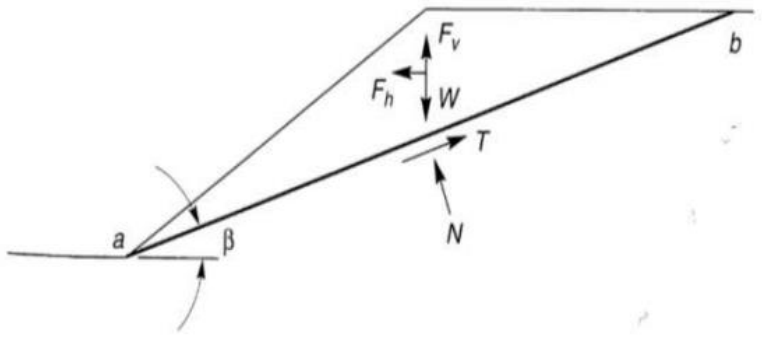
Ο συντελεστής ασφαλείας, με βάση τις δυνάμεις που αναφέρθηκαν και δρουν στο πρανές, υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση :

$$FS = \frac{Αντιστεκόμενη\ δύναμη}{Κινητήρια\ δύναμη} = \frac{c*lab+[(w-Fv)*cos\beta-Fh*sin\beta]*tan\varphi}{(W-Fv)*sin\beta+Fh*cos\beta}$$

όπου, c είναι η δύναμη συνοχής του υλικού,

l_{ab} το μήκος της επιφάνειας του πρανούς αστοχίας

και φ είναι η γωνία τριβής του υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές.



Εικόνα 4.54 Οι δυνάμεις που δρουν στη ψευδοστατική μέθοδο

(Πηγή : Kramer S.L., Geotechnical Earthquake Engineering, 1996)

Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο συντελεστών ασφαλείας σε επίπεδες και κυκλικές επιφάνειες αστοχίας. Σε περίπτωση που αυτός είναι αρκετά μεγαλύτερος του 1 τότε η ευστάθεια της κατασκευής είναι σε καλό επίπεδο. Σε περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με το 1 ή κοντά στο 1 τότε η ευστάθεια είναι σε οριακή κατάσταση, ενώ αν είναι μικρότερος του 1 τότε υπάρχει πρόβλημα με το πρανές που εξετάζεται.

Ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την οριζόντια ψευδοστατική δύναμη F_h η οποία για φ μεγαλύτερο του 0 αυξάνει τον παρονομαστή

(κινητήρια δύναμη) και μειώνει τον αριθμητή (αντιστεκόμενη δύναμη). Στην ουσία δηλαδή εξαρτάται από τον συντελεστή k_h ο οποίος καθορίζει το μέγεθος της οριζόντιας ψευδοστατικής δύναμης. Αντιθέτως η κατακόρυφη ψευδοστατική δύναμη F_v επιδρά πολύ λιγότερο στον συντελεστή ασφαλείας με αποτέλεσμα να μην λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη η επίδρασης της.

Οι κατηγορίες που θα εξεταστούν στο στάδιο των ψευδοστατικών αναλύσεων αποτελούνται από 4 διαφορετικές οριζόντιες ψευδοστατικές επιταχύνσεις και περιγράφονται παρακάτω :

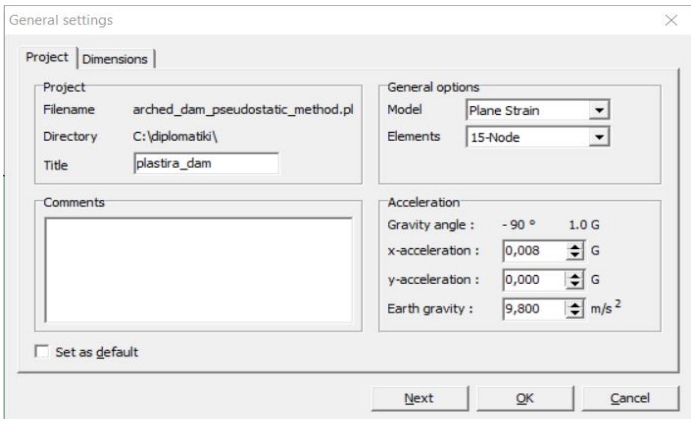
- Η ψευδοστατική ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα, για τις παρακάτω σεισμικές επιταχύνσεις :
    - A = ± 0,08 g
    - A = ± 0,12 g
    - A = ± 0,16 g
    - A = ± 0,24 g
- Η ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα (+776 και +792 m) με τη χρήση του υπολογισμού υπόγειων υδάτων (Ground Water Calculation), για τις παρακάτω σεισμικές επιταχύνσεις :
    - A = ± 0,08 g
    - A = ± 0,12 g
    - A = ± 0,16 g
    - A = ± 0,24 g
- Η ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα (+776 και +792 m) με τη χρήση του νερού σαν υλικό (δημιουργήθηκε μέσω του Material Data Set στο λογισμικό Plaxis – 2D), για τις παρακάτω σεισμικές επιταχύνσεις :
    - A = ± 0,08 g
    - A = ± 0,12 g
    - A = ± 0,16 g
    - A = ± 0,24 g

4.4.1.1 Ψευδοστατική ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού

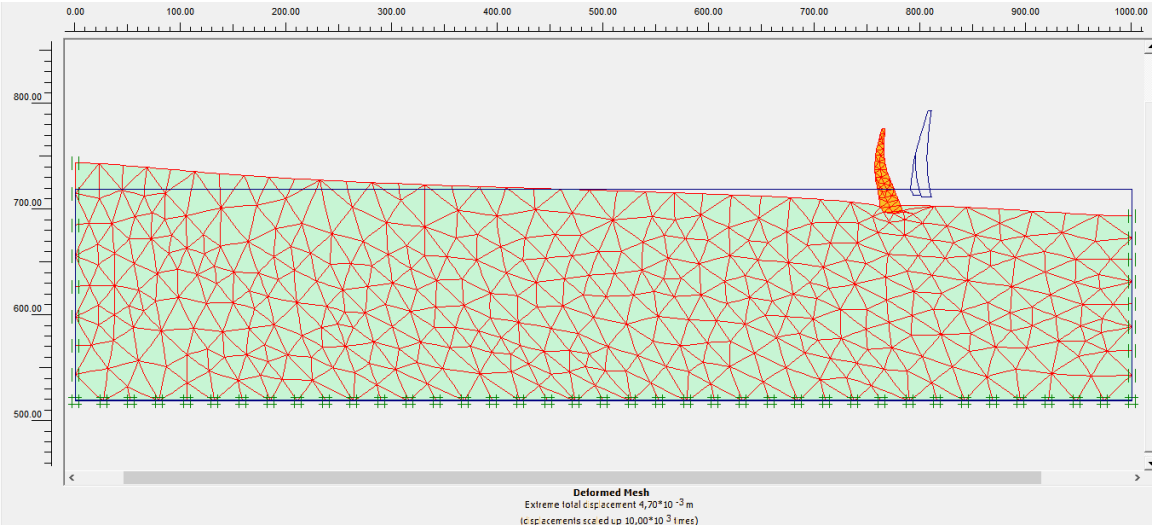
- A = ± 0,08 g (σεισμική επιτάχυνση)

<u>Σεισμική επιτάχυνση : + 0,08 g</u>

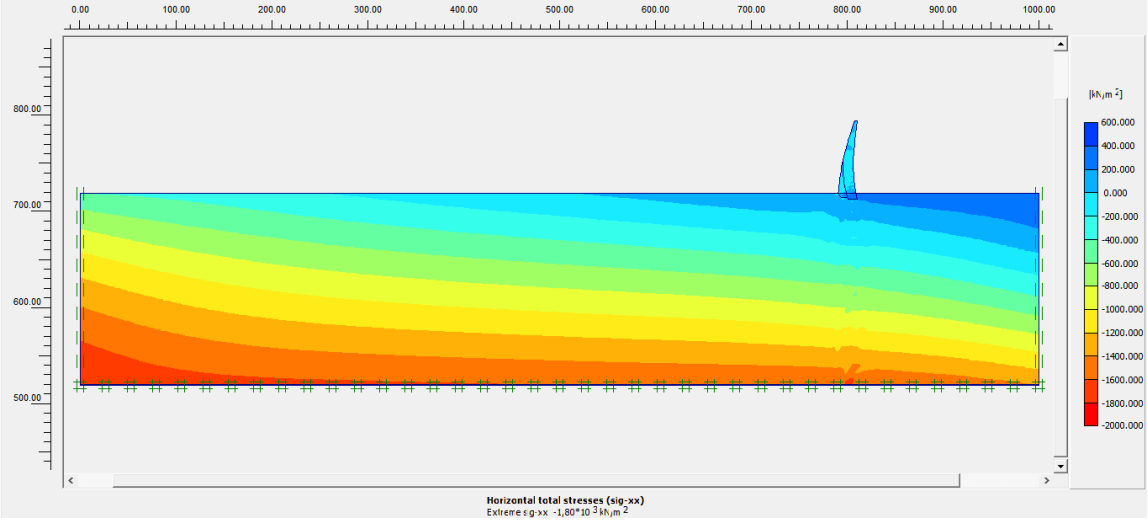
Η εισαγωγή της σεισμικής επιτάχυνσης των 0,08 g εισάγεται μέσω του λογισμικού του Plaxis – 2D στο 1^{ο} υποπρόγραμμα (Input Program) πατώντας Files και στην συνέχεια General Settings.



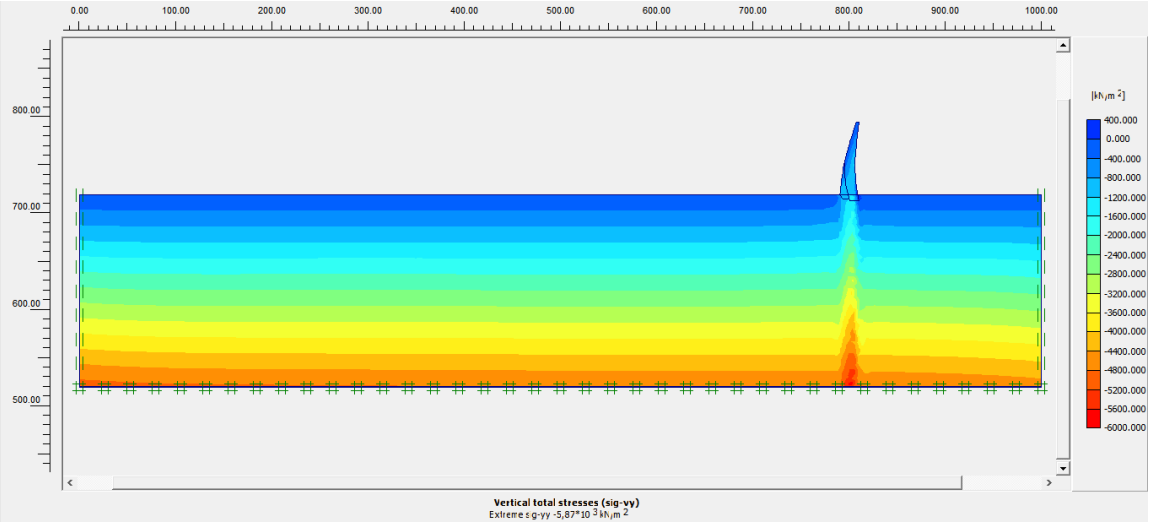
Εικόνα 4.55 Εισαγωγή σεισμικής επιτάχυνσης (οριζόντια επιτάχυνση a_h)



Εικόνα 4.56 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου



Εικόνα 4.57 Οριζόντιες ολικές τάσεις

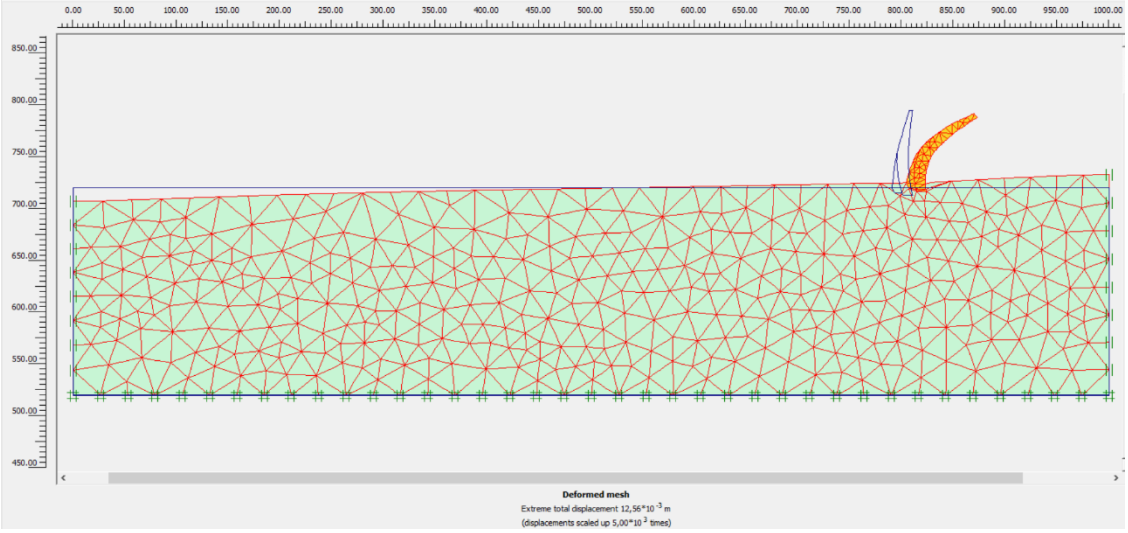


Εικόνα 4.58 Κατακόρυφες ολικές τάσεις προσομοιώματος

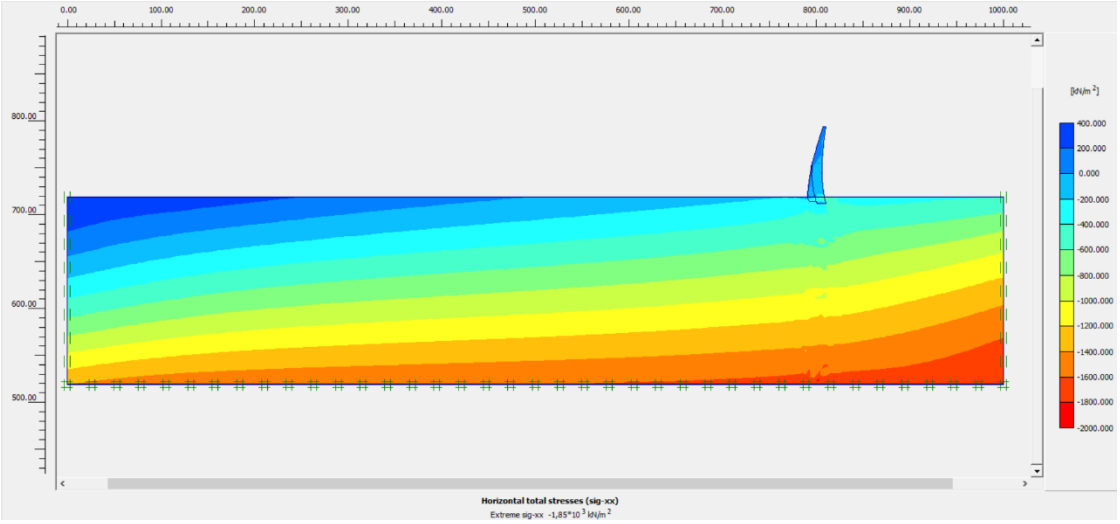
Παρατηρήθηκε πως το φράγμα μετακινείται προς τα αριστερά, αντίθετα δηλαδή από την οριζόντια αδρανειακή δύναμη που του εφαρμόστηκε με φορά προς τα δεξιά, ενώ η εδαφική στρώση στην οποία εδράζεται το φράγμα παρατηρείται πως έχει καθιζάνει ελάχιστα στην δεξιά πλευρά του μοντέλου και ''φουσκώσει'' στα αριστερά. Η παραμόρφωση του δικτύου προσομοιώματος υπολογίστηκε στα 4,7 * 10^{-3} m. Οι κατακόρυφες και οριζόντιες ολικές τάσεις είναι πολύ κοντά σε αυτές που είχαν προκύψει στην στατική ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα.

Το φράγμα δεν είναι σε καμία περίπτωση συμμετρικό, οπότε επιβάλλεται η ανάλυση του και με την εφαρμογή της αδρανειακής δύναμης προς τα αριστερά.

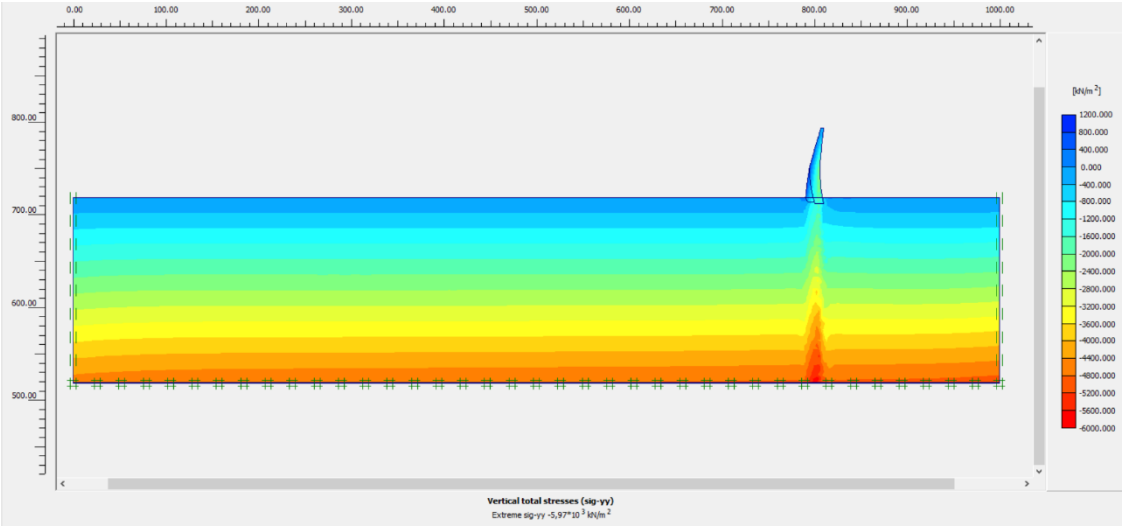
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,08 g</u>



Εικόνα 4.59 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.60 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.61 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

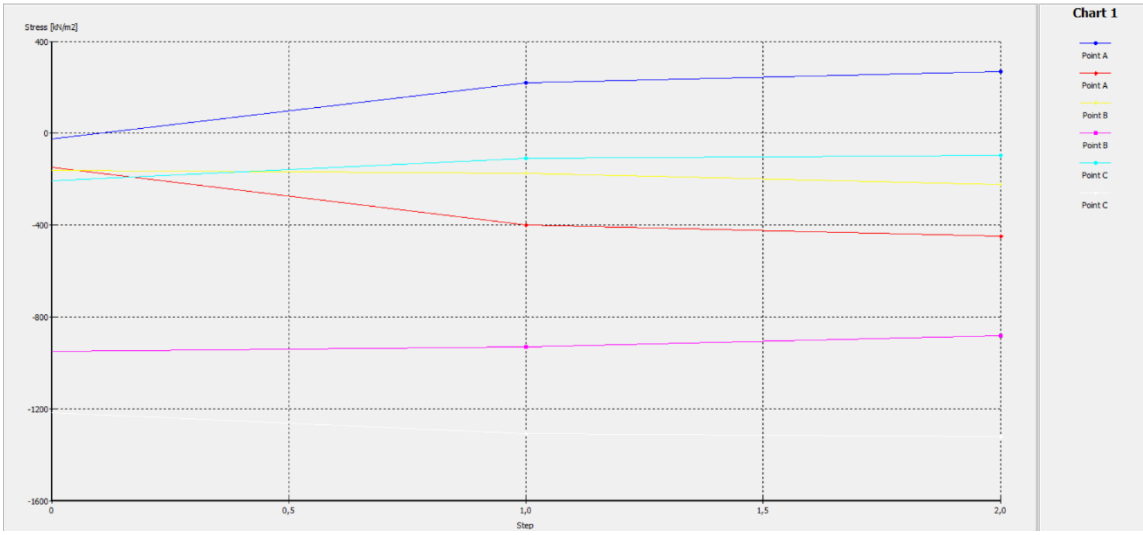
Εφαρμόζοντας την αδρανειακή οριζόντια δύναμη F_h προς τα αριστερά παρατηρείται μεγαλύτερη μετατόπιση του φράγματος με κατεύθυνση προς τα δεξιά, ενώ μπορεί να πει κανείς πως η μετατόπιση έχει σχεδόν τριπλασιαστεί σε σχέση με την εφαρμογή της επιτάχυνσης στα δεξιά. Επίσης η εδαφική στρώση στην περίπτωση αυτή έχει καθιζάνει στην αριστερή πλευρά του μοντέλου και διογκωθεί στην δεξιά, αντιστρόφως ανάλογα δηλαδή σε σχέση με πριν. Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων έχει αυξηθεί ελάχιστα της και η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων που αναπτύσσονται στο προσομοίωμα αυτό.

-	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (+0,08g)	220,4	-398,6	-175,1	--929,1	-108,88	-1305,1
	267	-446,65	-221,94	-880,98	-95,9	-1317,7
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,08g)	-358,7	198,2	406,2	-1527,2	-269,84	-1147,7

Πίνακας 4.13 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,08 g

Μέσω του συγκεντρωτικού πίνακα προκύπτουν δύο στάδια στην ψευδοστατική ανάλυση χωρίς νερό με θετική φορά σεισμικής επιτάχυνσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την επεξεργασία στο υποπρόγραμμα Calculation χρησιμοποιήθηκε μόνο μία φάση (Phase 1) για τις ψευδοστατικές αναλύσεις.

Το αποτέλεσμα του 4^{ου} υποπρογράμματος Curves Program, για την ψευδοστατική ανάλυση με θετική φορά σεισμικής επιτάχυνσης για A = +0,08 g ήταν :



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα τάσεων οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών – Ψευδοστατική Ανάλυση με A = +0,08 g

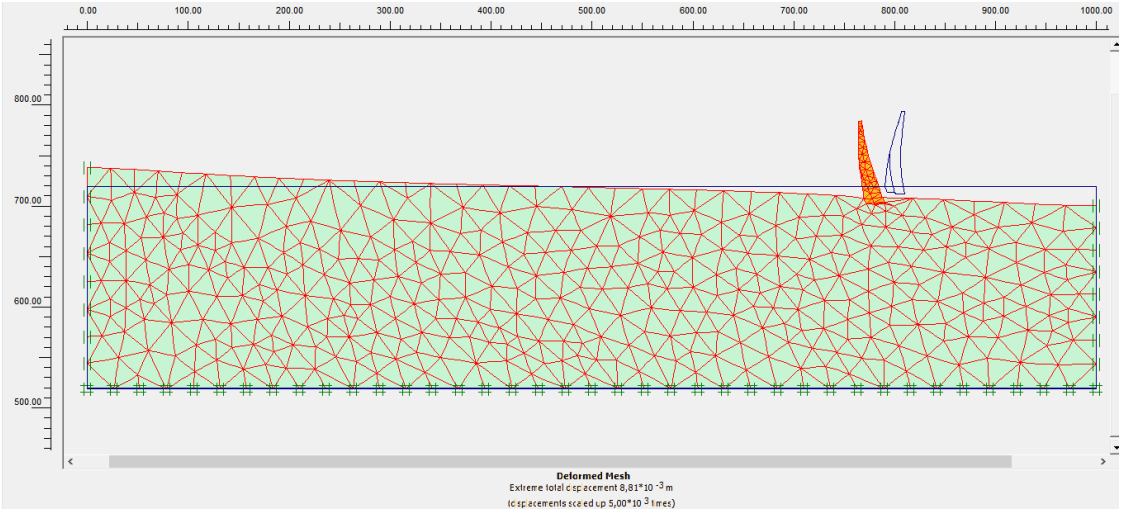
Στην ψευδοστατική ανάλυση με θετική φορά (δεξιά) παρατηρούνται θλιπτικές τάσεις, εκτός από τις οριζόντιες ολικές τάσεις της ανάντη πλευράς του φράγματος που είναι εφελκυστικές. Παρατηρώντας τον πίνακα 4.13 φαίνεται πως οι τάσεις και στα 3 χαρακτηριστικά σημεία ταιριάζουν πολύ με αυτά της στατικής ανάλυσης χωρίς νερό, γεγονός που δείχνει πως πρόκειται για μία σεισμική επιτάχυνση πολύ μικρή που δεν επιφέρει κάποια παραπάνω επιβάρυνση στο φράγμα.

Στην ψευδοστατική ανάλυση με αρνητική φορά παρατηρείται πως σε σχέση με την ανάλυση της θετικής φοράς, αυξάνονται οι οριζόντιες ολικές τάσεις αλλά μειώνονται σημαντικά οι κατακόρυφες ολικές τάσεις, γεγονός πολύ θετικό για την ευστάθεια του φράγματος. Ωστόσο η κατάντη πλευρά του φράγματος φαίνεται πως είναι αρκετά κρίσιμη, αφού η κατακόρυφη ολική τάση στο σημείο B όχι μόνο δεν μειώθηκε αλλά αυξήθηκε αρκετά σε σχέση με την ψευδοστατική ανάλυση με θετική φορά.

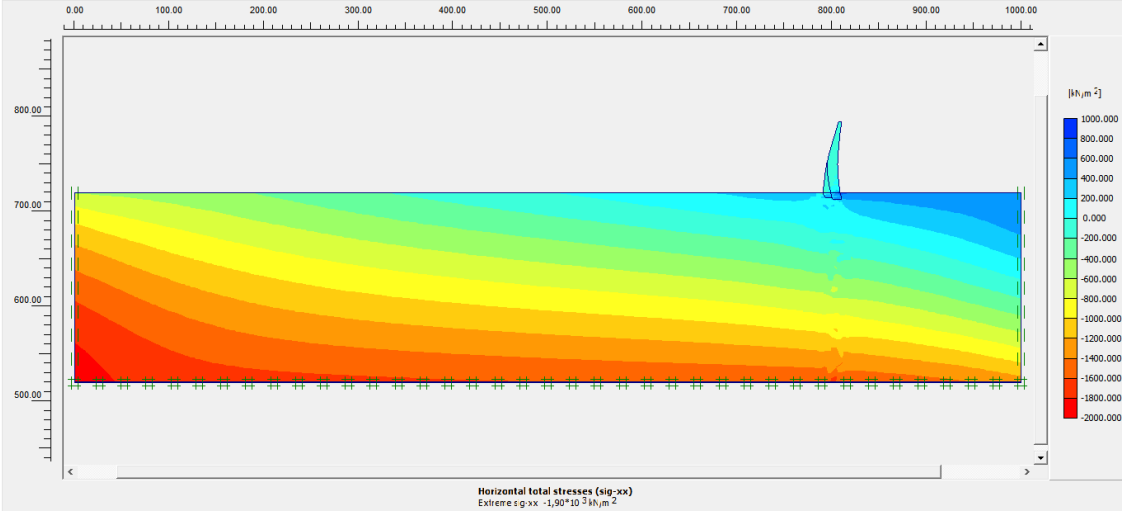
- A = ± 0,12 g (σεισμική επιτάχυνση)

<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,12 g</u>

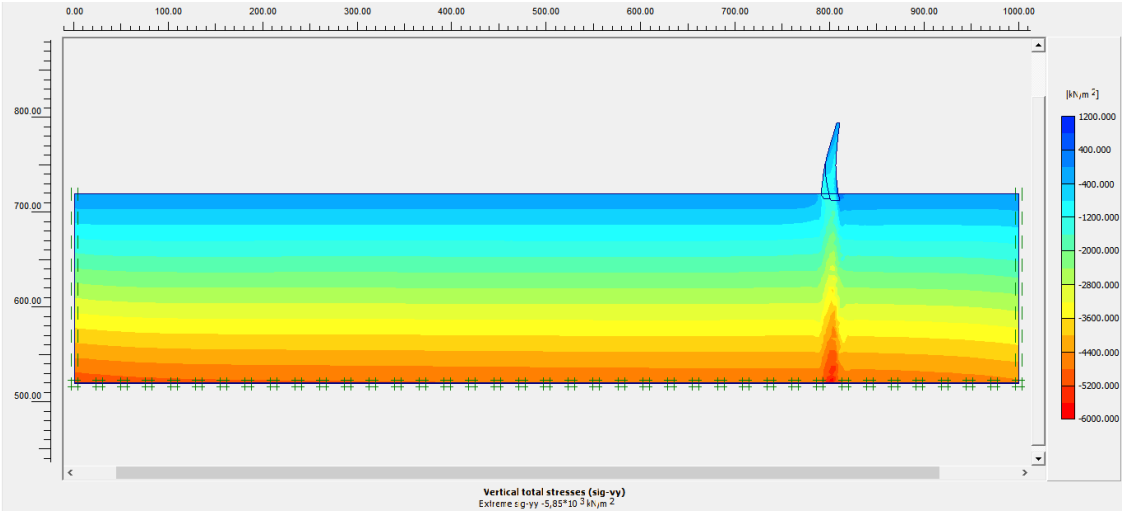
Η σεισμική αυτή επιτάχυνση έχει αυξηθεί μεν σε σχέση με την προηγούμενη ωστόσο ακόμη είναι μικρότερη από την τιμή επιτάχυνσης που ισχύει για την περιοχή έδρασης του φράγματος του Ταυρωπού.



Εικόνα 4.62 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



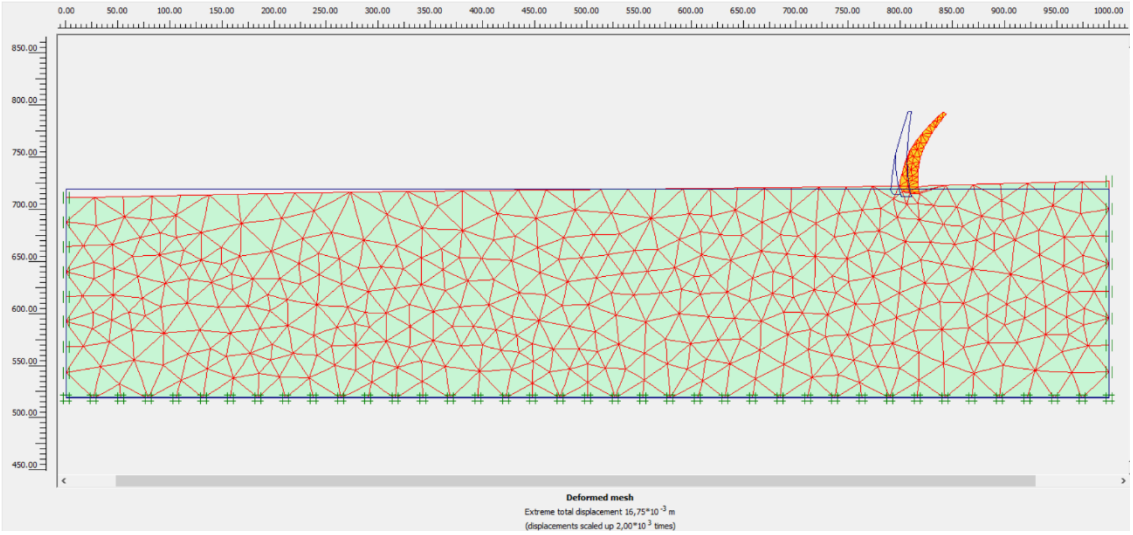
Εικόνα 4.63 Οριζόντιες ολικές τάσεις



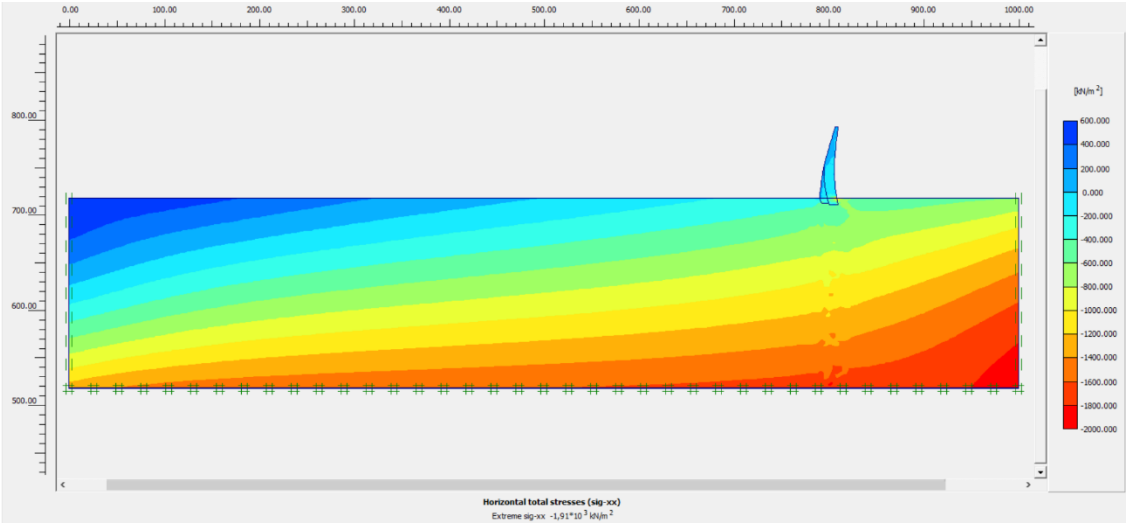
Εικόνα 4.64 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η παραμόρφωση του δικτύου του προτύπου τείνει να διπλασιαστεί σε σχέση με αυτήν που προέκυψε από την σεισμική επιτάχυνση των + 0,08 g, ωστόσο είναι μικρότερη από αυτήν από την επιτάχυνση των - 0,08 g. Οι μέγιστες κατακόρυφες και οριζόντιες ολικές τάσεις που αναπτύχθηκαν στο προσομοίωμα είναι ίδιες με αυτές που προέκυψαν και στην προηγούμενη ανάλυση (A = ± 0,08 g). Και στο σημείο αυτό γεννάτε το ερώτημα εάν και οι τάσεις στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος θα είναι ίδιες ή σχεδόν ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.13.

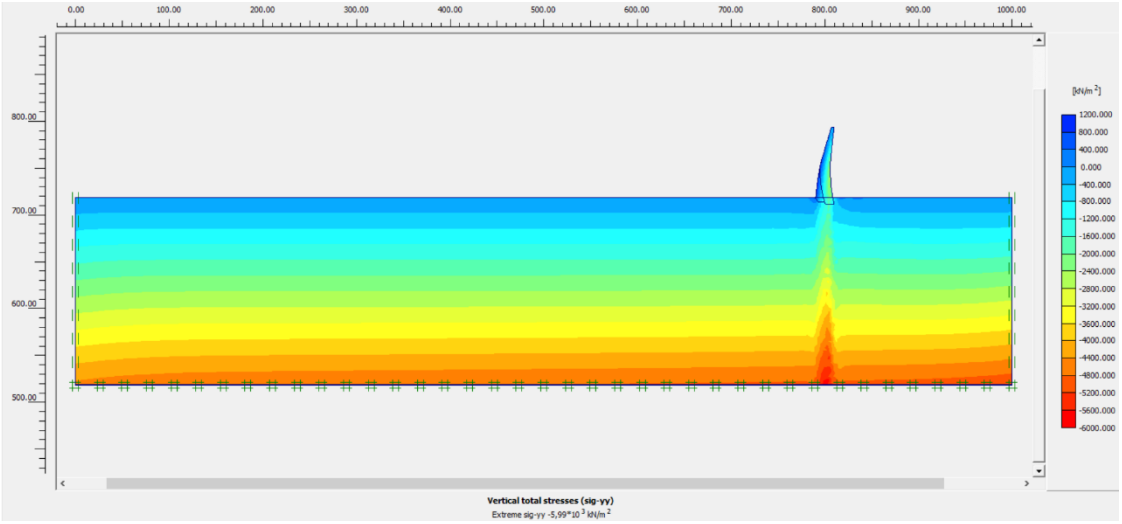
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,12 g</u>



Εικόνα 4.65 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου



Εικόνα 4.66 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.67 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Με την εφαρμογή της αδρανειακής δύναμης προς τα αριστερά το φράγμα μετακινείται προς τα δεξιά, ενώ η μετατόπιση του σχεδόν έχει διπλασιαστεί σε σχέση με την άσκηση της δύναμης προς τα δεξιά. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις έχουν αυξηθεί ελάχιστα.

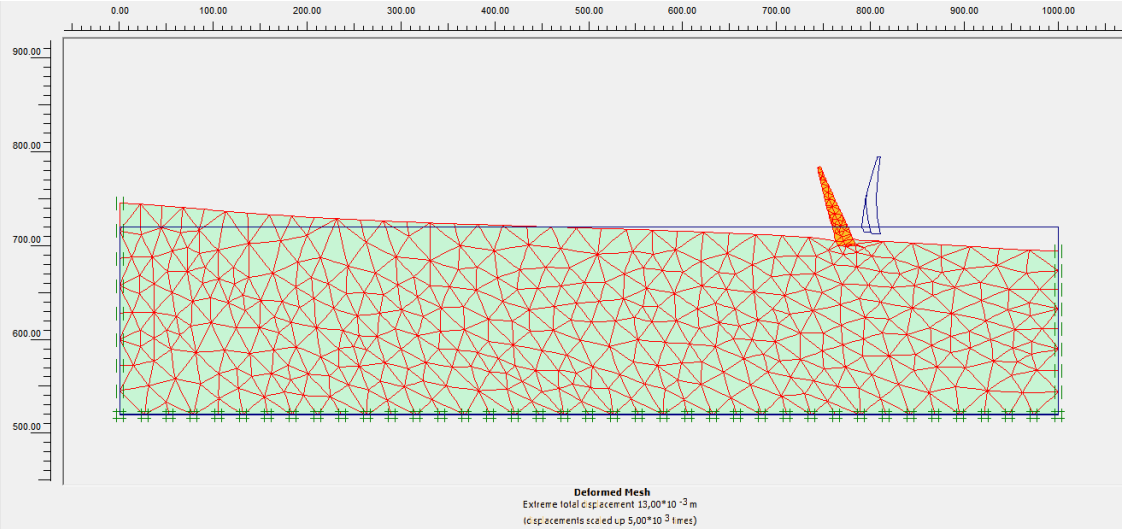
-	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (+0,12g)	298,7	-479,3	-253,7	--848,3	-87,1	-1326,3
	423,5	-607,9	-378,98	-719,4	-52,4	-1360,3
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,12g)	-515,2	359,4	563,2	-1688,7	-313,3	-1105,1

Πίνακας 4.14 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,12 g

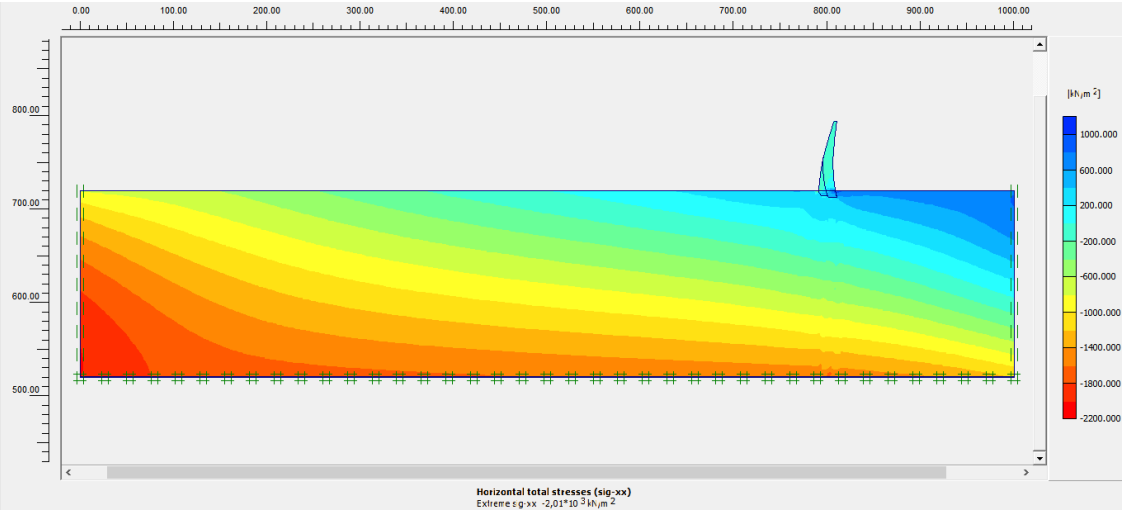
Από τον παραπάνω πίνακα καταλαβαίνει κανείς πως το σημείο B (κατάντη τμήμα του φράγματος) είναι το κρίσιμο σημείο της ανάλυσης εφαρμόζοντας την αδρανειακή δύναμη προς τα αριστερά, καθώς οι κατακόρυφες ολικές τάσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Παρόλα αυτά στα σημεία A και C οι κατακόρυφες ολικές τάσεις έχουν μειωθεί. Όσον αφορά τις οριζόντιες ολικές τάσεις, αυτές αυξάνονται σημαντικά όταν εφαρμόζεται η αδρανειακή δύναμη προς τα αριστερά.

- A = ± 0,16 g

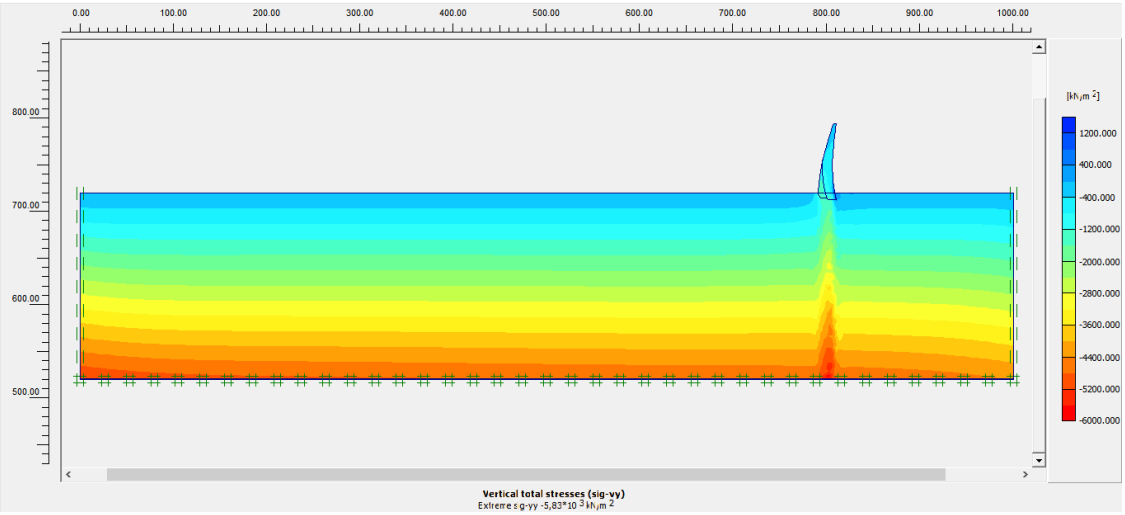
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,16 g</u>



Εικόνα 4.68 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου



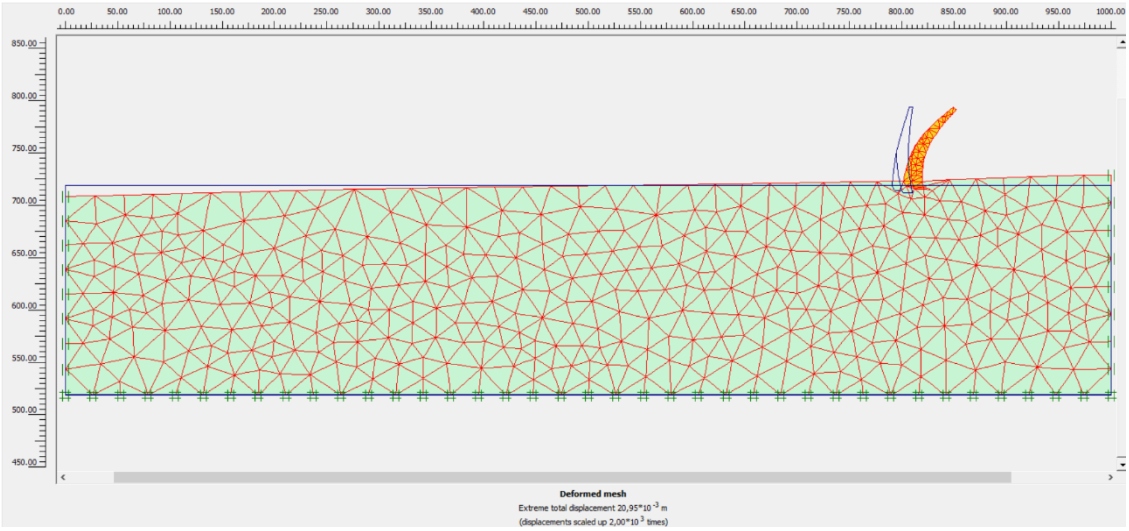
Εικόνα 4.69 Οριζόντιες ολικές τάσεις



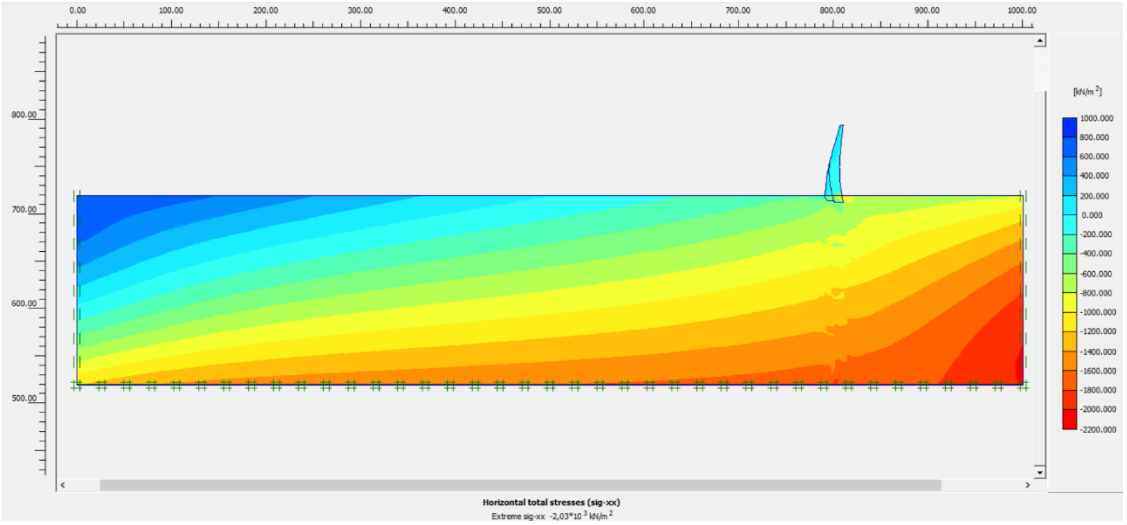
Εικόνα 4.70 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Το φράγμα μετακινείται προς τα αριστερά, λόγω της αδρανειακής δύναμης που εφαρμόζεται προς τα δεξιά. Φαίνεται πως η μετατόπιση του προτύπου ακολουθεί μία γεωμετρική πρόοδο καθώς αυξάνεται κατά περίπου $4*10^{-3}$ μέτρα και της είναι λογικό έχει διπλασιαστεί σε σχέση με την επιτάχυνση των 0,08 g, αφού έχει διπλασιαστεί και η επιτάχυνση. Οι τάσεις παρουσιάζουν μία μικρή αύξηση.

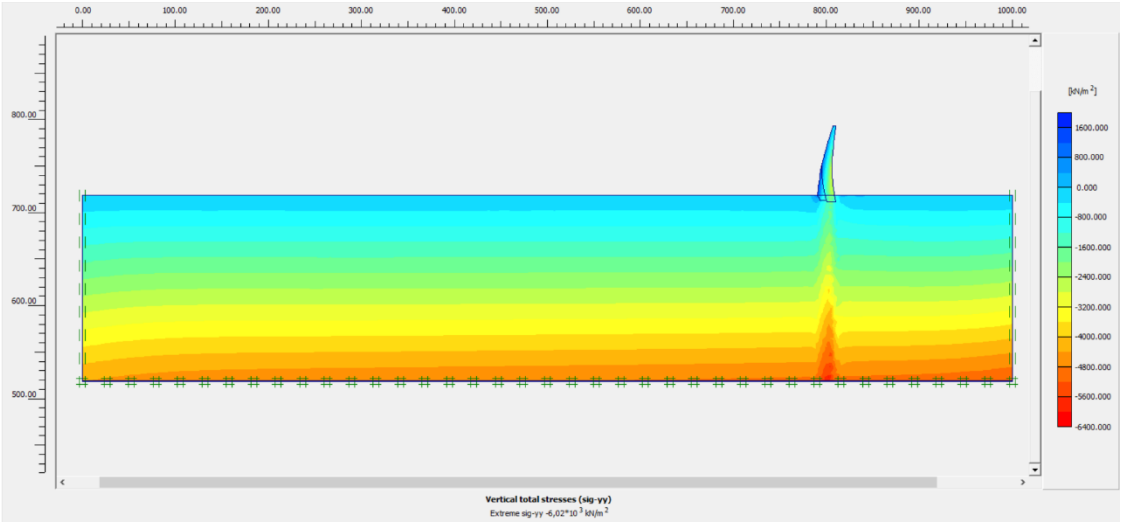
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,16 g</u>



Εικόνα 4.71 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.72 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.73 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Το φράγμα κατά τα γνωστά μετακινείται προς τα δεξιά, η μετατόπιση του δικτύου είναι περίπου $7*10^{-3}$ μέτρα μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει από την οριζόντια επιτάχυνση με θετικό πρόσημο, και επίσης είναι περίπου $4*10^{-3}$ μέτρα μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει από την οριζόντια επιτάχυνση (- 0,12 g). Οι μέγιστες τιμές των τάσεων έχουν αυξηθεί σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις αλλά η αύξηση είναι μικρή.

-	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (+0,16g)	440,9	-652,8	-396,5	-701,4	-47,6	-1365
	579,9	-769,1	-536	-557,9	-8,9	-1402,8
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,16g)	-671,6	520,6	720,3	-1850,2	-356,8	-1062,6

Πίνακας 4.15 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,16 g

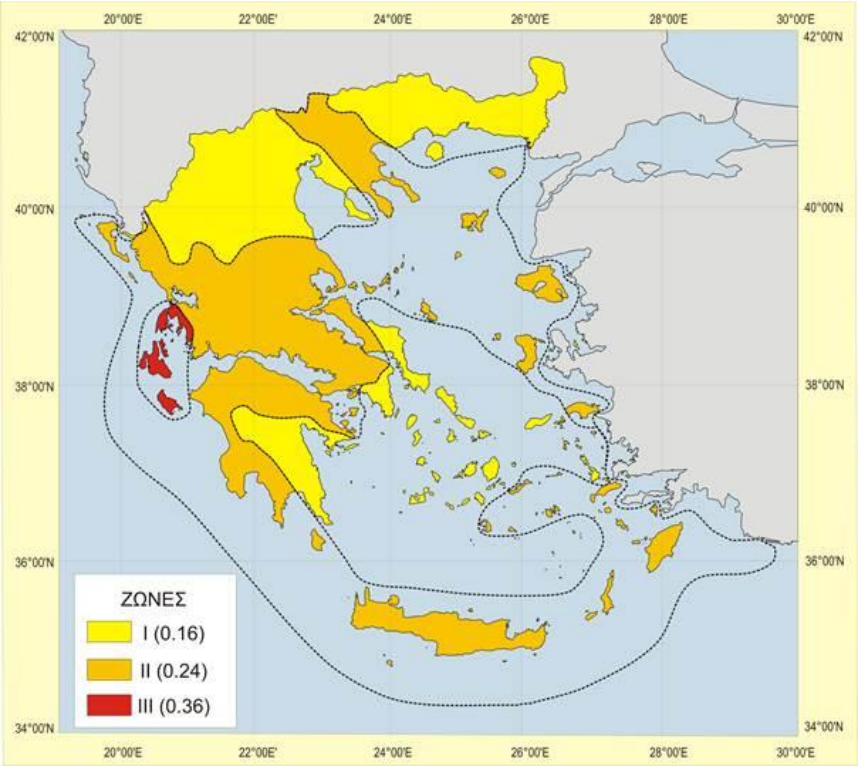
Παρατηρείται μία γενικότερη αύξηση των τάσεων , εκτός των οριζόντιων ολικών τάσεων που παρατηρούνται στο σημείο C (βάση του φράγματος), η οποία είναι λογική λόγω της αύξησης της οριζόντιας επιτάχυνσης. Οι οριζόντιες ολικές τάσεις στο σημείο C παρατηρείται πως έχουν σημειώσει τις μικρότερες τιμές που έχουν παρατηρηθεί σε όλο το στάδιο της ψευδοστατικής ανάλυσης. Παρόλα αυτά οι κατακόρυφες ολικές τάσεις στο σημείο B, με την χρήση της οριζόντιας επιτάχυνσης με αρνητικό πρόσημο, έχουν αυξηθεί πάρα πολύ ιδιαίτερα σε σχέση με τις κατακόρυφες τάσεις που προέκυψαν από την εφαρμογή της αδρανειακής δύναμης προς τα δεξιά. Περίεργο επίσης είναι το γεγονός ότι στο σημείο A οι κατακόρυφες ολικές τάσεις στην περίπτωση του – 0,16 g είναι εφελκυστικές ενώ στην

περίπτωση του + 0,16 g είναι θλιπτικές, ενώ ακριβώς το αντίθετο γίνεται με τις οριζόντιες ολικές τάσεις του σημείου Α.

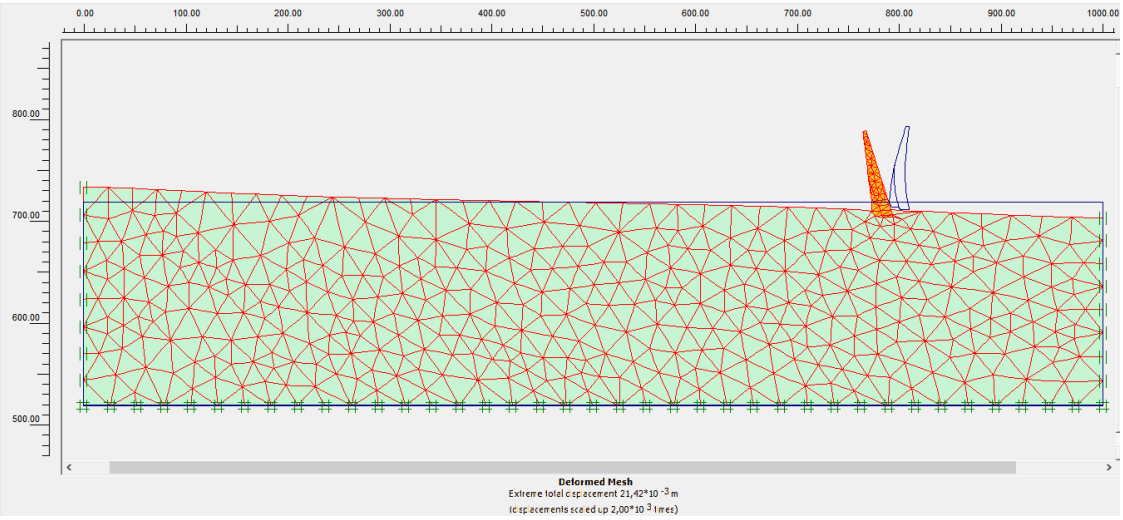
- A = ± 0,24 g

<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,24 g</u>

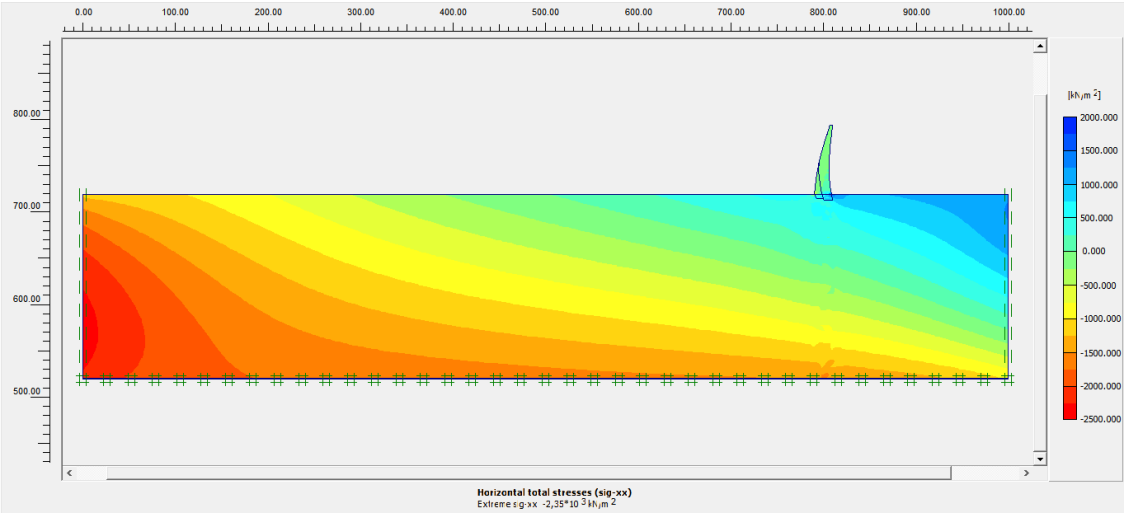
Η σεισμική αυτή επιτάχυνση αφορά περισσότερο από όλες τις άλλες επιταχύνσεις, το φράγμα το οποίο μελετάται, λόγω του ότι η ευρύτερη περιοχή της Καρδίτσας βρίσκεται στην ζώνη σεισμικής επιτάχυνσης των 0,24 g.



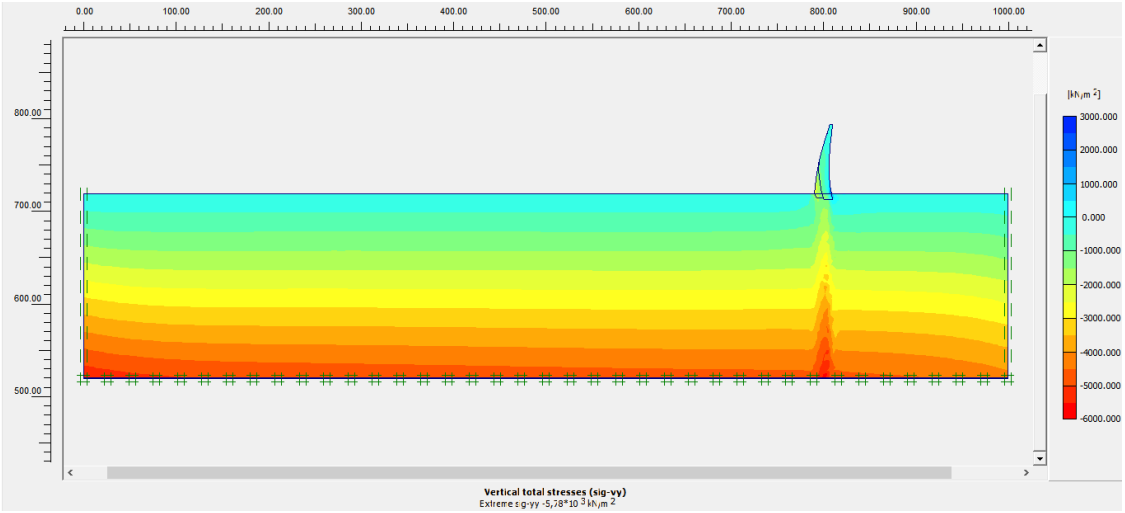
Εικόνα 4.74 Ζώνες σεισμικών επιταχύνσεων στην Ελλάδα



Εικόνα 4.75 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου



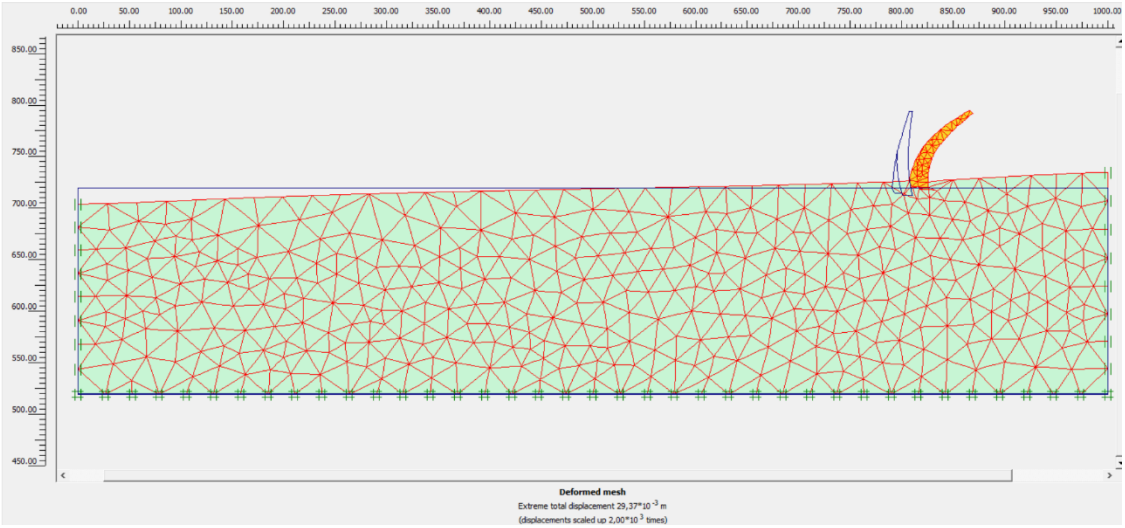
Εικόνα 4.76 Οριζόντιες ολικές τάσεις



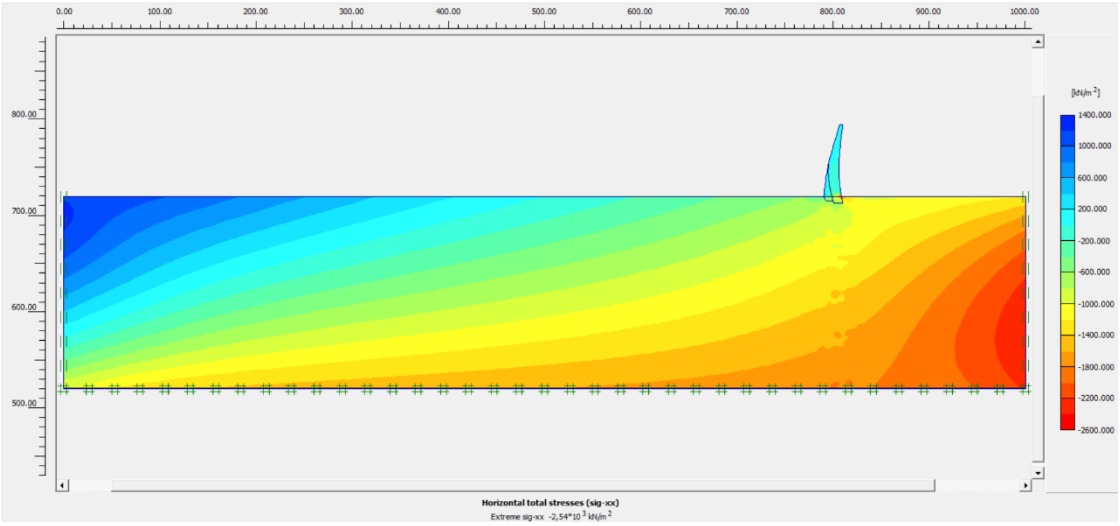
Εικόνα 4.77 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μέγιστη τιμή των τάσεων φαίνεται πως έχει μειωθεί ελάχιστα σε σχέση με την επιτάχυνση των + 0,16 g γεγονός που δεν αναμενόταν σε καμία περίπτωση. Από την άλλη η μέγιστη τιμή των οριζόντιων τάσεων έχει μία μικρή αύξηση. Οι παραμορφώσεις του προτύπου φαίνεται πως ακολουθούν ακόμη την αύξηση με γεωμετρική πρόοδο καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση κατά $8*10^{-3}$ m, ενώ ο διπλασιασμός της παραμόρφωσης σε σχέση με την οριζόντια επιτάχυνση των + 0,12 g φαίνεται να μην αποδεικνύεται στην περίπτωση αυτή.

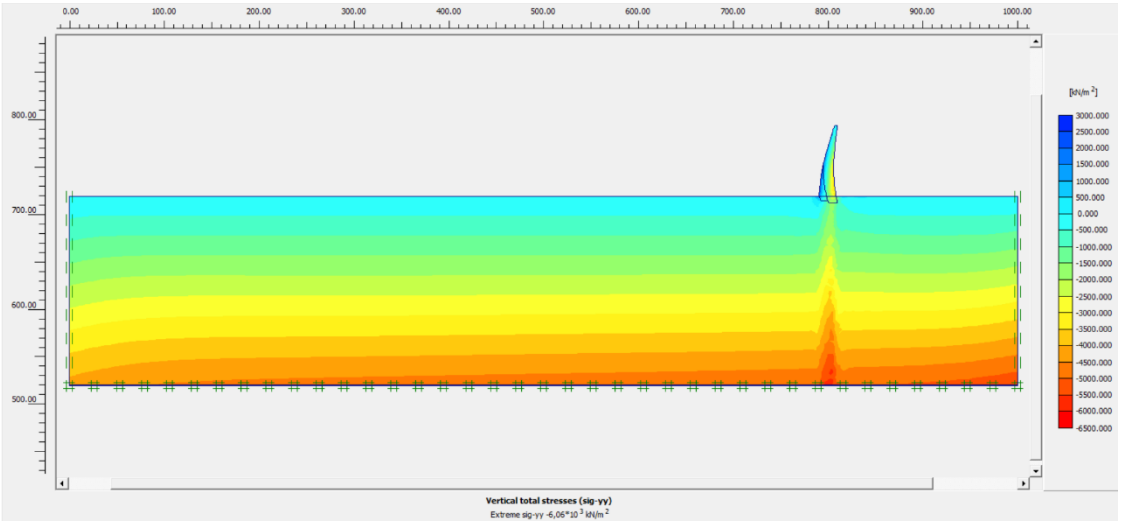
Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,24 g



Εικόνα 4.78 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.79 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.80 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Οι παραμορφώσεις στο δίκτυο του προσομοιώματος έχουν πιάσει την μέγιστη τιμή τους που είναι 29,37*10^{-3} m, ενώ το ίδιο ισχύει και για τις τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό γεγονός που αναμένεται να αποτυπωθεί και στον πίνακα των τάσεων για τα χαρακτηριστικά σημεία που ακολουθεί.

-	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (+0,24g)	749,8	-944,1	-706,5	--382,5	38,3	-1448,9
	892,8	-1091,5	-850,1	-234,8	78,1	-1487,8
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,24g)	-984,5	843	1034	-2173,3	-443,8	-977,6

Πίνακας 4.15 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,24 g

Της ήταν λογικό και αναμενόμενο με την αύξηση της σεισμικής επιτάχυνσης που ασκήθηκε στο προσομοίωμα, αυξήθηκαν και οι τάσεις οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά των κατακόρυφων ολικών τάσεων που παρατηρούνται για το σημείο B καθώς υπάρχει κατακόρυφη αύξηση της τιμής των τάσεων όταν στο φράγμα ασκείτε η αδρανειακή δύναμη προς τα αριστερά. Κάτι αντιστρόφως ανάλογο αλλά όχι με τόσο μεγάλες διαφορές στην τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων συμβαίνει στο σημείο C.

4.4.1.1.1 Συγκεντρωτικός πίνακας ψευδοστατικών αναλύσεων χωρίς νερό

-	Σημείο Α Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο Α Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο Β Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο Β Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (0,08g)	220,4	-398,6	-175,1	-929,1	-108,9	-1305,1
	267	-446,7	-221,9	-880,98	-95,9	-1317,7
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,08g)	-358,7	198,2	406,2	-1527,2	-269,8	-1147,7
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (0,12g)	298,7	-479,3	-253,7	-848,3	-87,1	-1326,3
	423,5	-607,9	-378,98	-719,4	-52,4	-1360,3
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,12g)	-515,2	359,4	563,2	-1688,7	-313,3	-1105,1
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (0,16g)	440,9	-625,8	-396,5	-701,4	-47,6	-1365
	579,9	-769,1	-536	-557,9	-8,9	-1402,8
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,16g)	-671,6	520,6	720,3	-1850,2	-356,8	-1062,6
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (+0,24g)	749,8	-944,1	-706,5	--382,5	38,3	-1448,9
	892,8	-1091,5	-850,1	-234,8	78,1	-1487,8
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,24g)	-984,5	843	1034	-2173,3	-443,8	-977,6

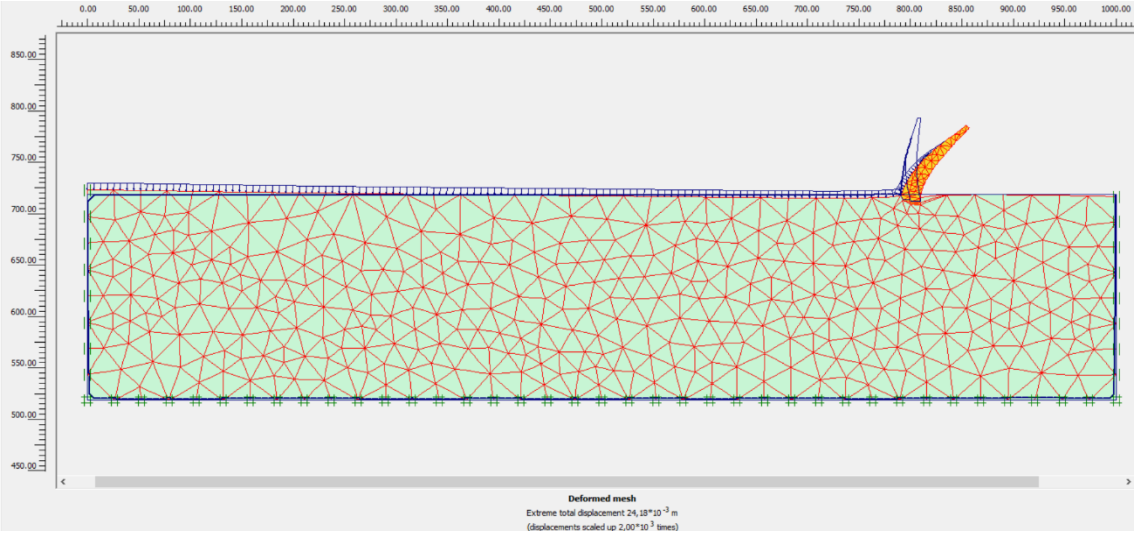
Πίνακας 4.16 Συγκεντρωτικός πίνακας των ψευδοστατικών αναλύσεων χωρίς νερό

Τα αποτελέσματα του πίνακα αυτού φαίνεται να κινούνται σε λογικά πλαίσια καθώς φαίνεται πως αυξάνονται με κάποια σχετική πρόοδο. Αυτό αφορά περισσότερο τα δύο χαρακτηριστικά σημεία που είναι συνευθειακά και λιγότερο το σημείο που είναι στην βάση του φράγματος. Παρατηρείται πως οι τιμές των κατακόρυφων συγκεκριμένα τάσεων στην βάση του φράγματος δεν ακολουθούν κάποια γεωμετρική πρόοδο, ωστόσο έχουν μία αυξητική τάση τουλάχιστον αυτές που προκύπτουν από τις αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται προς τα δεξιά. Οι κατακόρυφες τάσεις που προκύπτουν από τις αδρανειακές δυνάμεις με φορά προς τα αριστερά φαίνεται να έχουν μειούμενη πορεία, με αποτέλεσμα να είναι η μόνη ''παραφωνία'' του παραπάνω πίνακα.

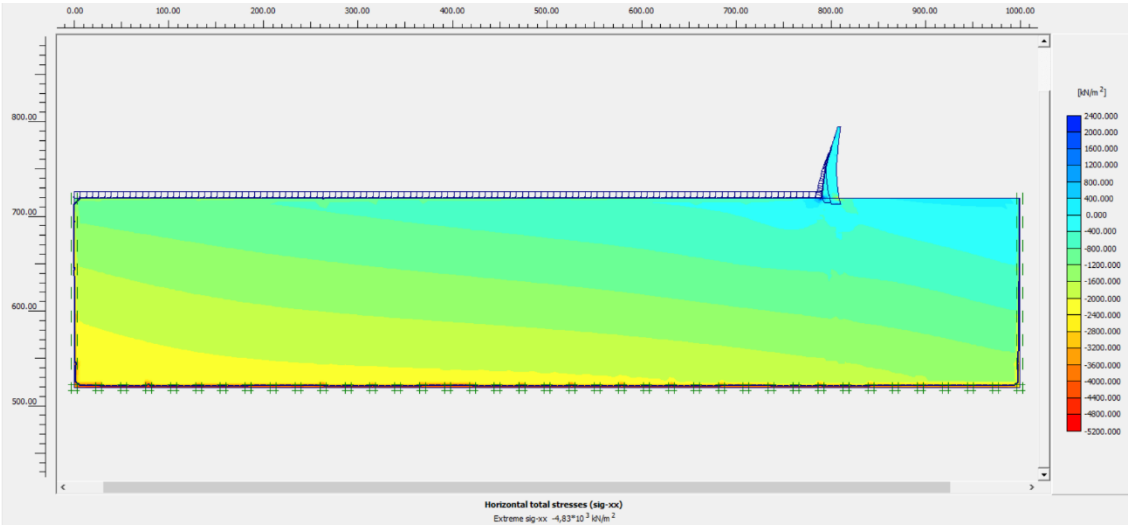
4.4.1.2 Ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα – Μέθοδος Ground water calculation

- A = ± 0,08 g – H = 776 m

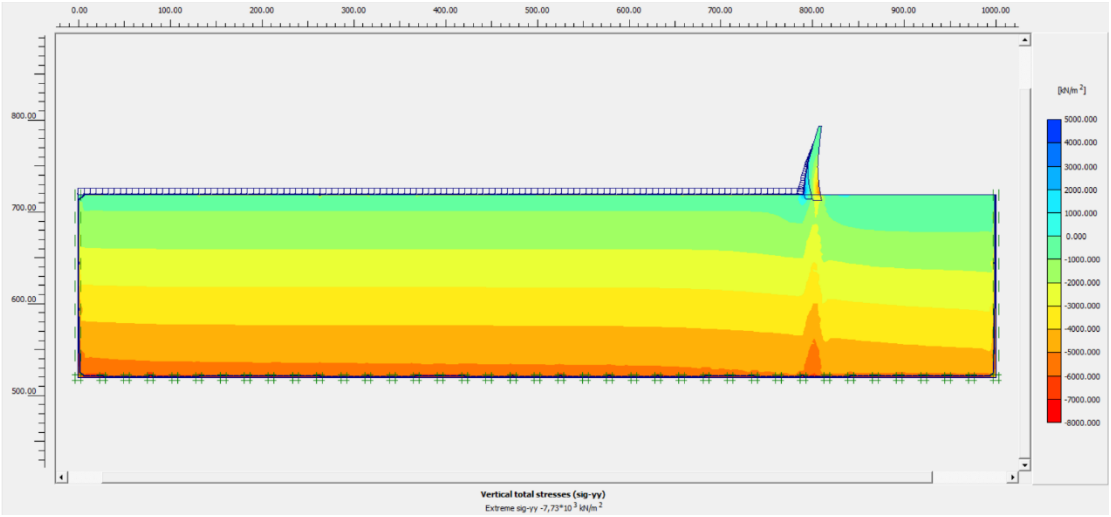
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = + 0,08 g και H = 776 m</u>



Εικόνα 4.81 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου



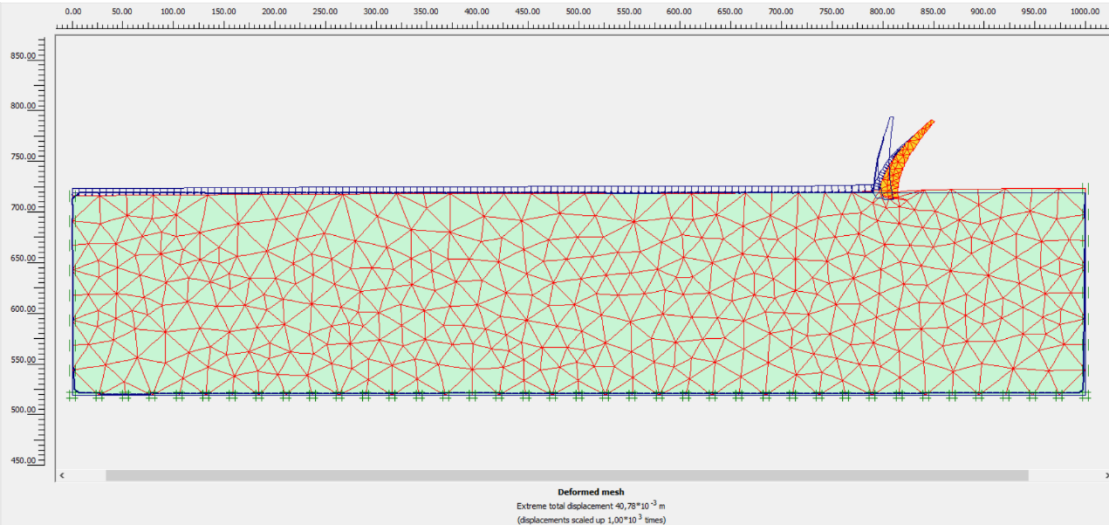
Εικόνα 4.82 Οριζόντιες ολικές τάσεις



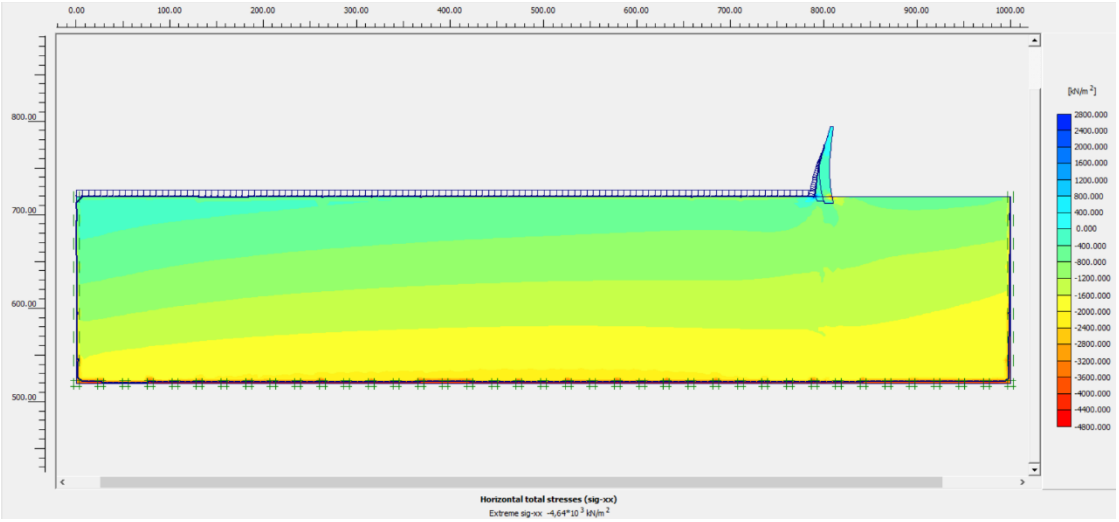
Εικόνα 4.83 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Είναι φανερό πως λόγω της παρουσίας του νερού πλέον η μετατόπιση του φράγματος από εκεί που ήταν προς τα αριστερά (χωρίς το νερό) τώρα είναι προς τα δεξιά, ανάλογη με την φορά της αδρανειακής δύναμης που ασκείται. Οι παραμορφώσεις του προσομοιώματος είναι της τάξης των $24*10^{-3}$ m, γεγονός που δείχνει πως η παρουσία του νερού εξαπλασιάζει την μετατόπιση. Επίσης και οι τάσεις έχουν αυξηθεί σε σημαντικό βαθμό.

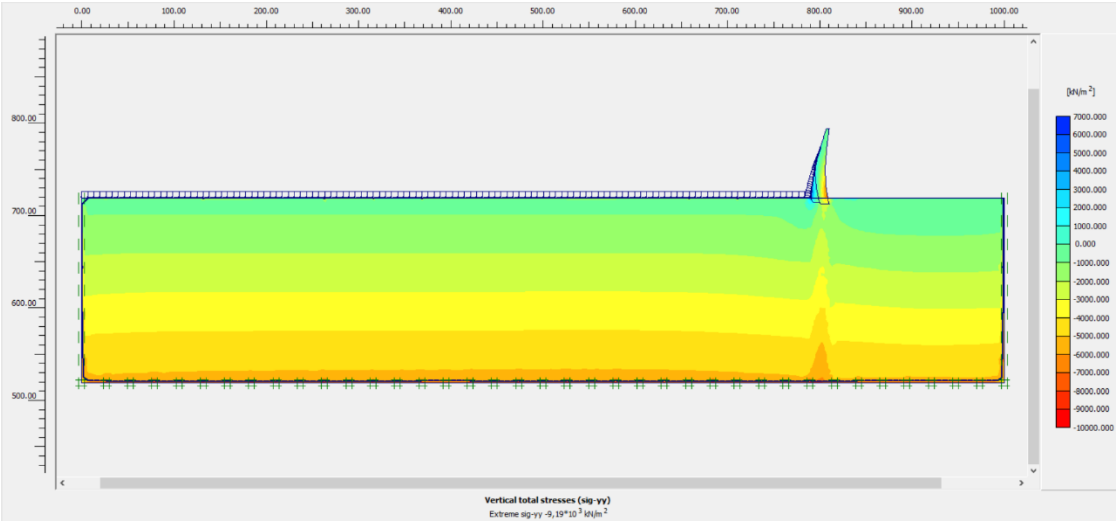
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,08 g και H = 776 m</u>



Εικόνα 4.84 Παραμόρφωση του δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.85 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.86 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης του δικτύου ($40,78*10^{-3}$) δείχνει απόλυτα το κατά πόσο το νερό σε συνδυασμό με την αδρανειακή δύναμη μπορεί να καταπονήσει ένα φράγμα και την εδαφική του στρώση. Επίσης παρατηρείται διπλασιασμός στη μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αλλά και μεγάλη αύξηση στην μέγιστη τιμή των κατακόρυφων τάσεων σε σχέση με αυτές που είχαν προκύψει από τις ψευδοστατικές αναλύσεις χωρίς την παρουσία νερού.

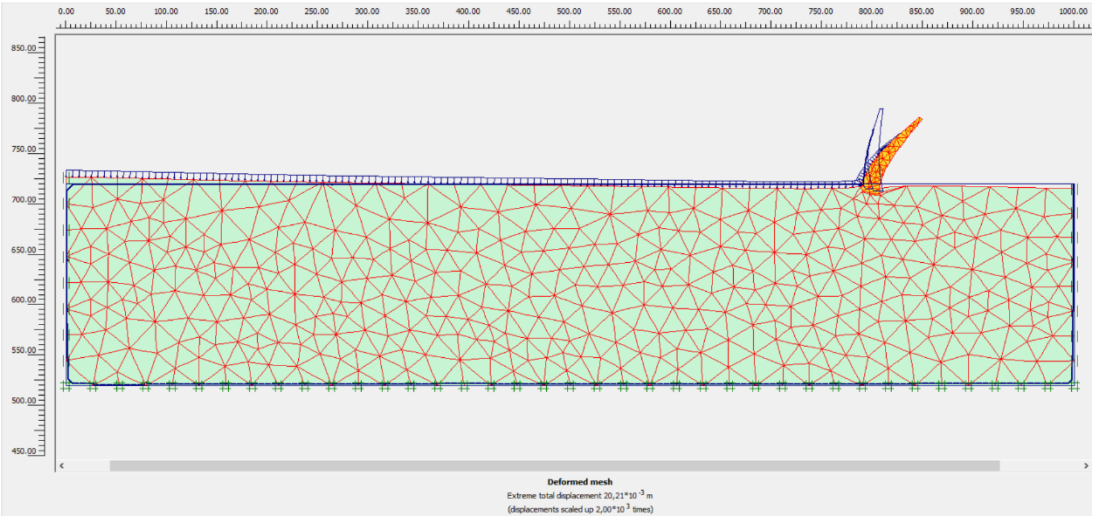
H = +776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (0,08g)	-1544,5	1409	1629	-2785,9	-198,3	-1219,7
	-1497,1	1360	1581	-2737	-184,9	-1232,8
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,08g)	-2122,8	2005	2209	-3383	-359,7	-1061,9

Πίνακας 4.17 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,08 g – Ground water calculation

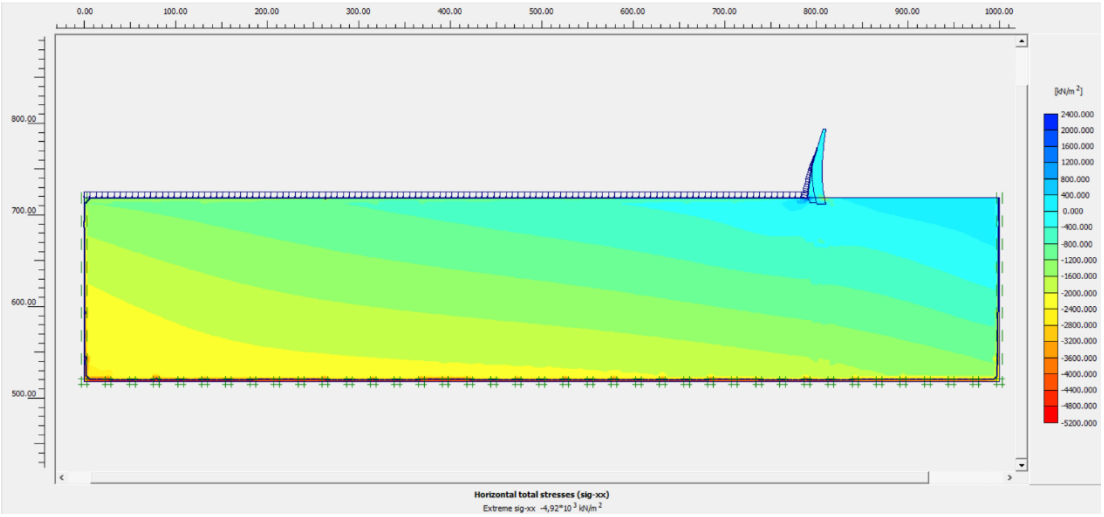
Παρόλο που η σεισμική επιτάχυνση είναι μόνο 0,08 g, οι τιμές των τάσεων παρατηρείται πως είναι πολύ κοντά ή και μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που είχαν προκύψει από την σεισμική επιτάχυνση των 0,24 g χωρίς ωστόσο την παρουσία νερού. Υπάρχει επίσης και ένα μοτίβο στον πίνακα το οποίο αφορά το γεγονός πως οι οριζόντιες ολικές τάσεις των σημείων A και C και οι κατακόρυφες ολικές τάσεις των σημείων B και C είναι όλες θλιπτικές, ενώ οι κατακόρυφες ολικές του σημείου A και οι οριζόντιες ολικές του σημείου B είναι όλες εφελκυστικές.

- A = ± 0,12 g – H = 776 m

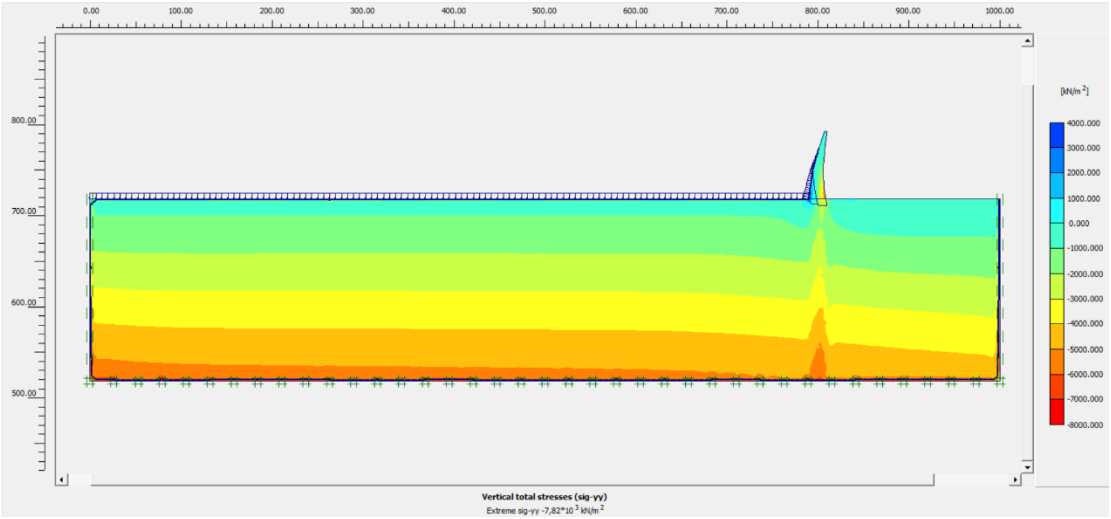
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = + 0,12 g και H = + 776 m</u>



Εικόνα 4.87 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου



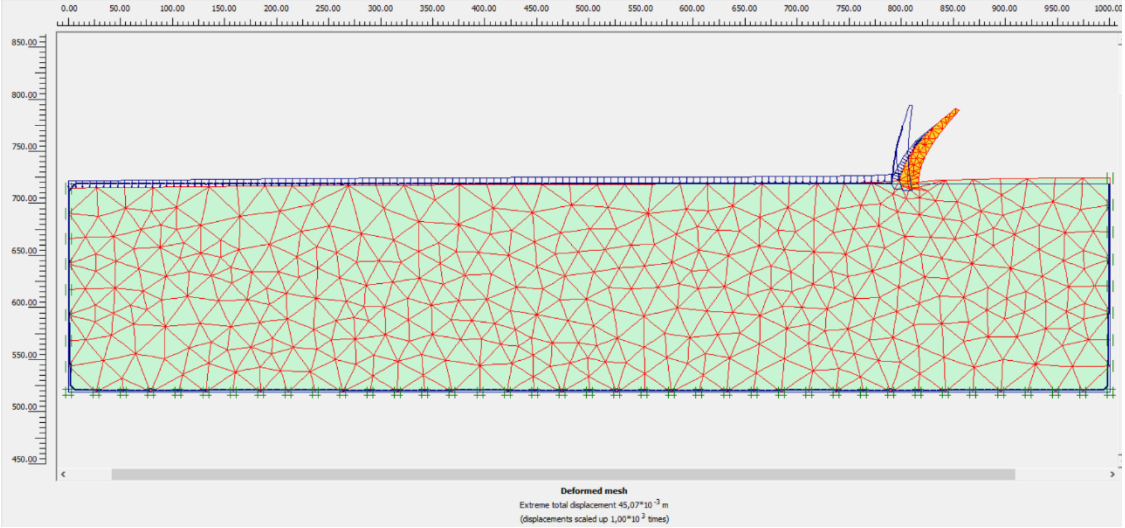
Εικόνα 4.88 Οριζόντιες ολικές τάσεις



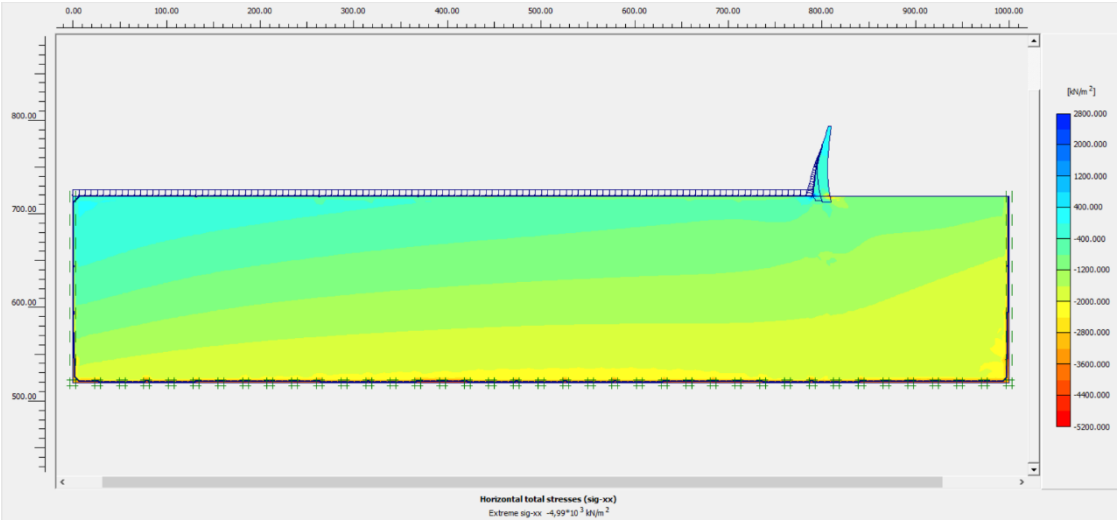
Εικόνα 4.89 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Από τις παραπάνω εικόνες προκύπτει πως οι κατακόρυφες και οριζόντιες ολικές τάσεις έχουν αυξηθεί ελάχιστα κατά $0,09*10^3$ KN/m^2 δηλαδή 90 KN/m^2. Οι μετατοπίσεις του προσομοιώματος μειώθηκαν σε σχέση με την επιτάχυνση + 0,08 g κατά $4*10^{-3}$ μέτρα γεγονός που δείχνει ότι ίσως το νερό να έχει και ευεργετικά αποτελέσματα στο φράγμα κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

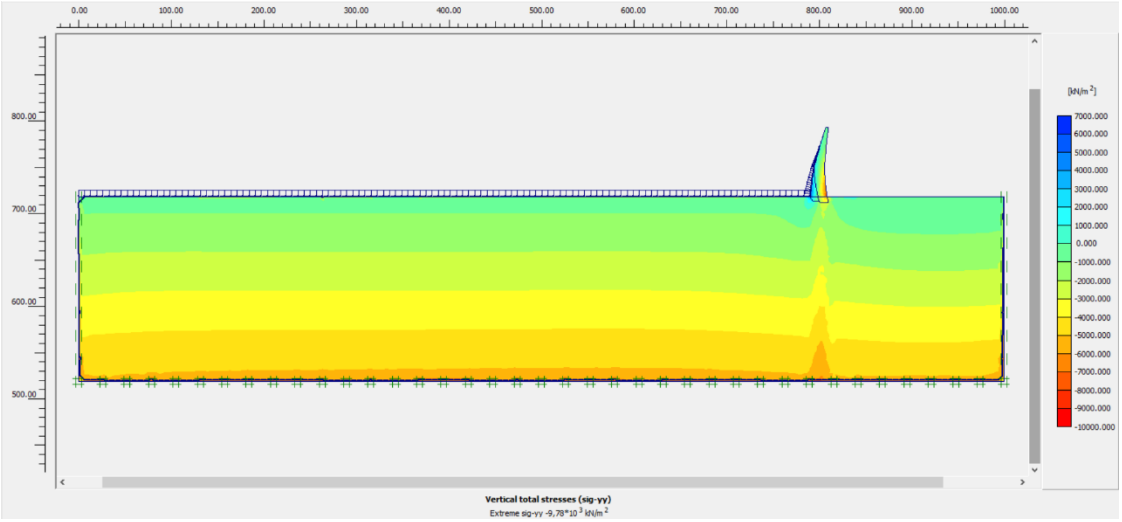
Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,12 g και H = + 776 m



Εικόνα 4.90 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.91 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.92 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μείωση της μετατόπισης που προέκυψε πηγαίνοντας από την ψευδοστατική ανάλυση με νερό (+776 m) και σεισμική επιτάχυνση + 0,08 g σε ανάλυση με επιτάχυνση + 0,12 g, δεν ισχύει και στην περίπτωση της αλλαγής από επιτάχυνση – 0,08 g σε επιτάχυνση – 0,12 g αφού η μετατόπιση αυξάνεται κατά περίπου $4*10^{-3}$ μέτρα. Επίσης η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αυξάνονται κατά $0,3*10^{3}$ KN/m^2, ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων αυξάνεται κατά $0,6 *10^{3}$ KN/m^2.

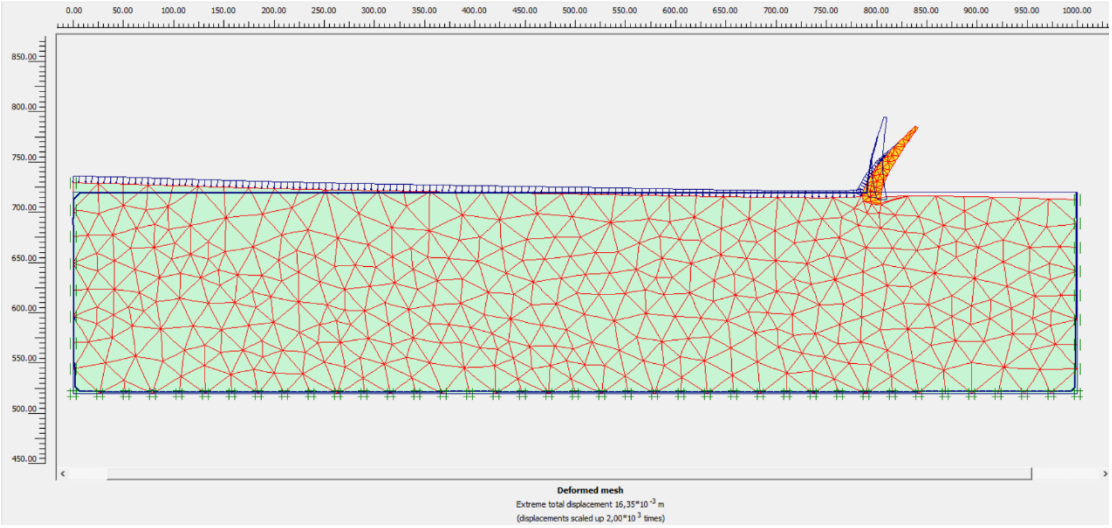
H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (0,12g)	-1401,9	1262	1486	-2638,7	-157,2	-1259,9
	-1347,7	1206	1431	-2582,8	-141,8	-1274,9
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,12g)	-2286,3	2173	2373	-3551,9	-403,4	-1019,1

Πίνακας 4.18 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,12 g – Ground water calculation

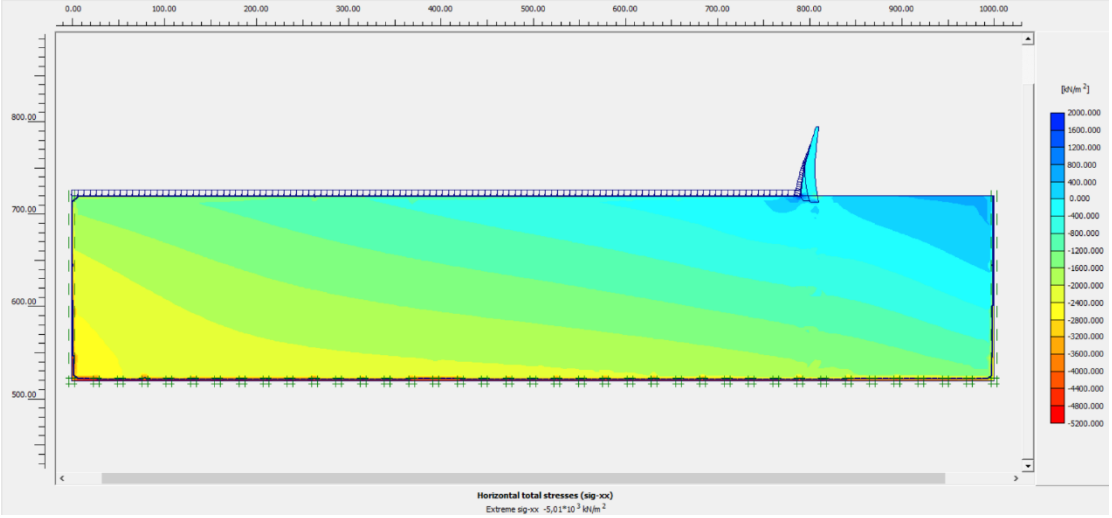
Ίδιο μοτίβο και στην περίπτωση των αναλύσεων αυτών, εννοώντας τις εφελκυστικές τάσεις που προκύπτουν στα σημεία A και B, κάτι που ήδη έχει προαναφερθεί και γίνεται από την πρώτη ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος. Οι τιμές των τάσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή της αδρανειακής δύναμης προς τα δεξιά παρουσιάζουν μία μείωση σε σχέση με αυτές που παρουσιάστηκαν για την σεισμική επιτάχυνση των 0,08 g, για όλα τα σημεία. Αντιθέτως οι τιμές των τάσεων που προκύπτουν από την άσκηση της δύναμης προς τα αριστερά φαίνεται πως αυξάνονται. Γεγονός που προκαλεί έντονο προβληματισμό και θα πρέπει να εξεταστεί περισσότερο βλέποντας και τις υπόλοιπες αναλύσεις.

- A = ± 0,16 g – H = 776 m

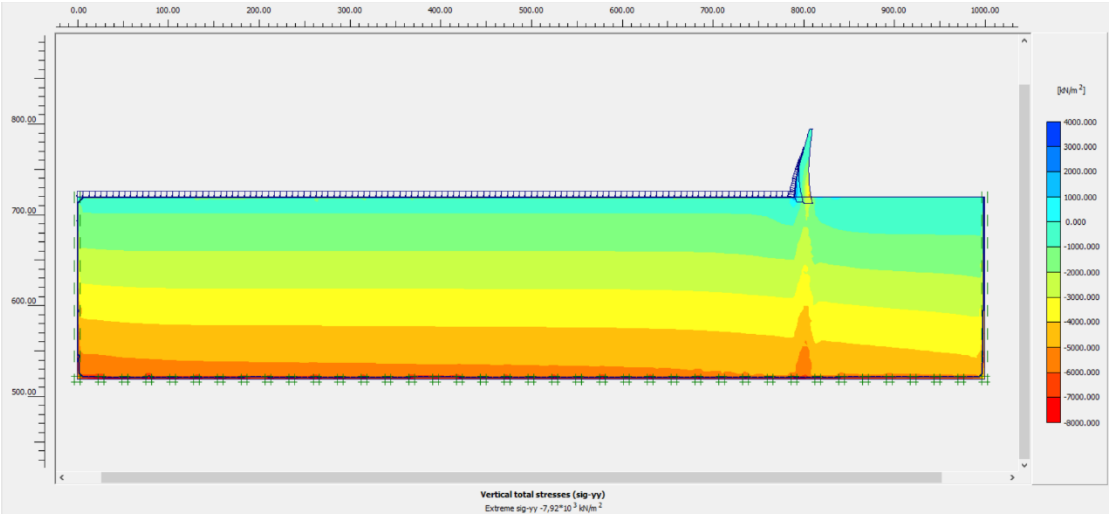
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,16 g και H = 776 m</u>



Εικόνα 4.93 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του μοντέλου



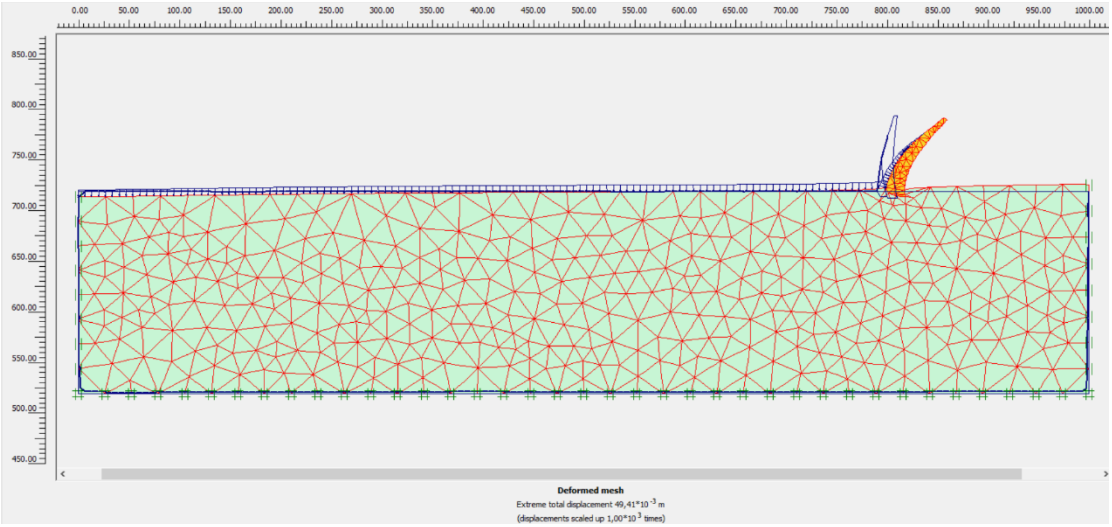
Εικόνα 4.94 Οριζόντιες ολικές τάσεις



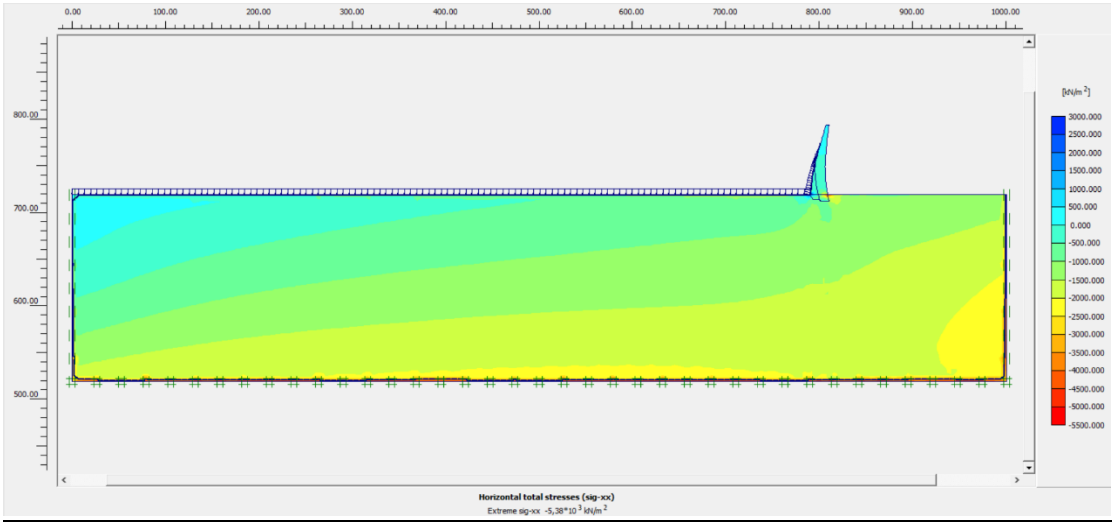
Εικόνα 4.95 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση μειώθηκε και άλλο αυξάνοντας την σεισμική επιτάχυνση κατά περίπου άλλα $4*10^{-3}$ μέτρα. Αντιθέτως η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά $0,09*10^{3}$ KN/m^2 ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά $0,1*10^{3}$ KN/m^2 δηλαδή 100 KN/m^2.

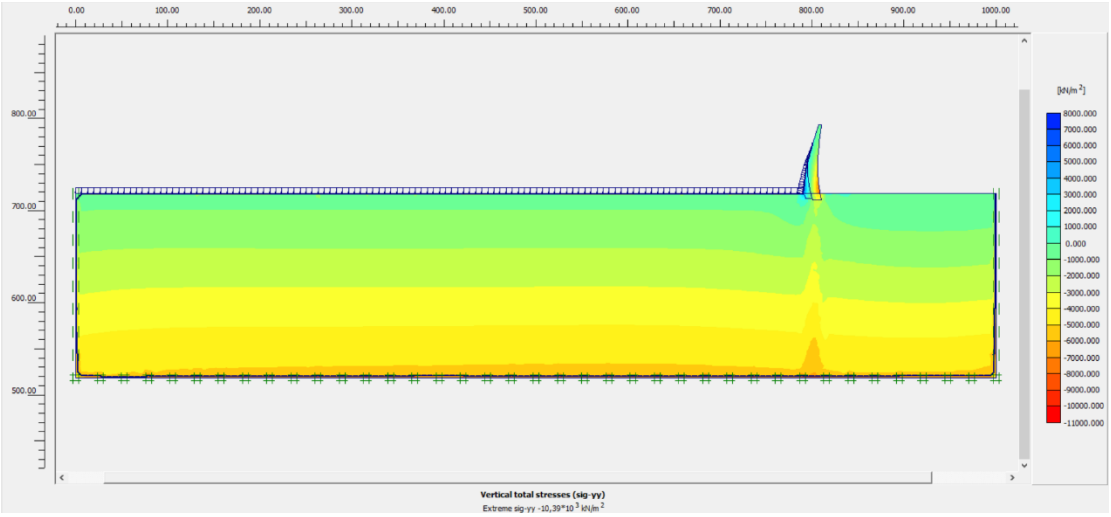
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,16 g και H = 776 m</u>



Εικόνα 4.96 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου



Εικόνα 4.97 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.98 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του προσομοιώματος είναι 45,07*10^{-3} m, ενώ η αύξηση της μετατόπισης σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη επιτάχυνση των -0,12 g είναι της τάξης των 4*10^{-3} m. Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά 0,39*10^3 KN/m^2 , ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων αυξήθηκε 0,61*10^3 KN/m^2.

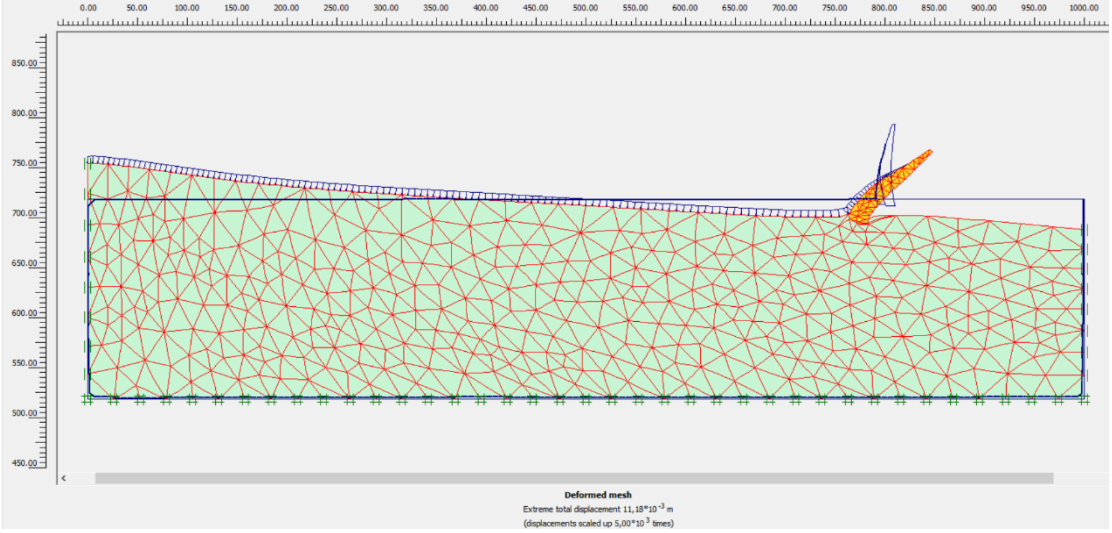
H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (0,16g)	-1259,6	1115	1343	-2492	-115,6	-1300,6
	-1201	1055	1284	-2431,6	-98,8	-1317
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,16g)	-2452,5	2345	2540	-3723,7	-447,3	-976,2

Πίνακας 4.19 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,16 g – Ground water calculation

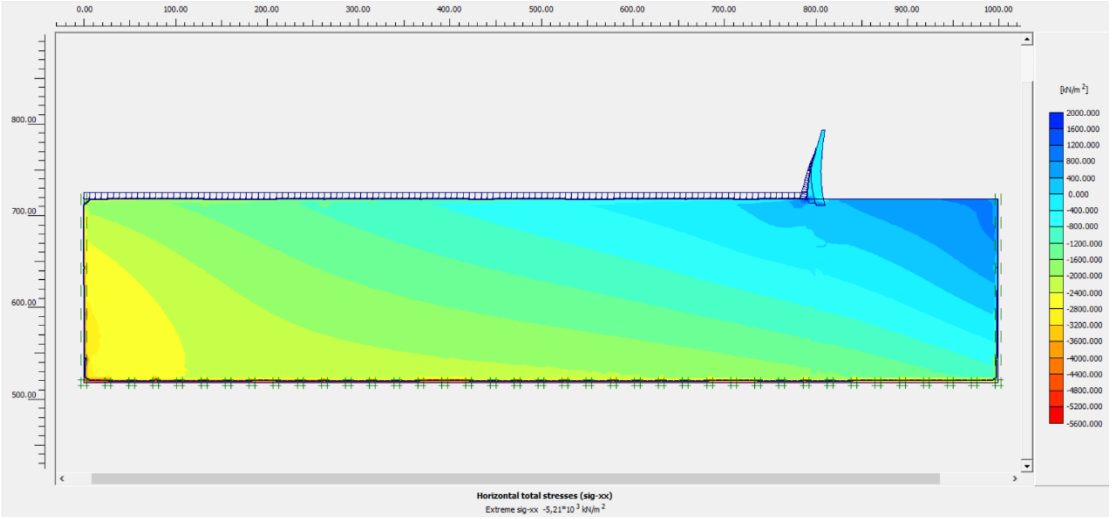
Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μείωση των τάσεων και για τα 3 σημεία όταν η δύναμη ασκείται προς τα δεξιά (θετικό πρόσημο στην επιτάχυνση). Από την άλλη όταν η δύναμη ασκείται προς τα αριστερά οι τάσεις αυξάνονται σε σχέση με την επιτάχυνση που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ανάλυση (-0,12 g). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι είτε οι επιταχύνσεις με θετικό πρόσημο δίνουν λανθασμένα αποτελέσματα, είτε οι επιταχύνσεις με αρνητικό πρόσημο.

- A = ± 0,24 g – H = 776 m

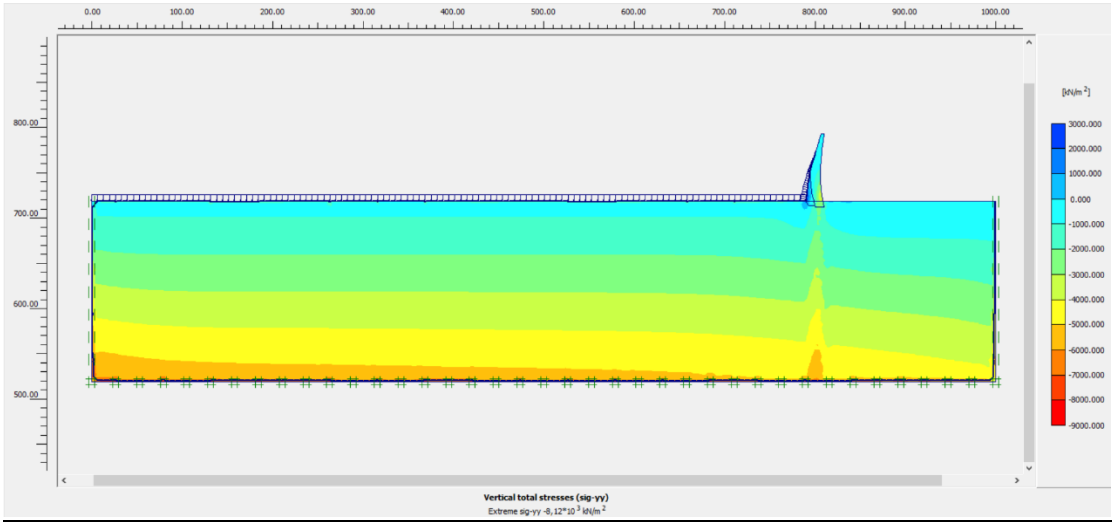
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,24 g και H = + 776 m</u>



Εικόνα 4.99 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου



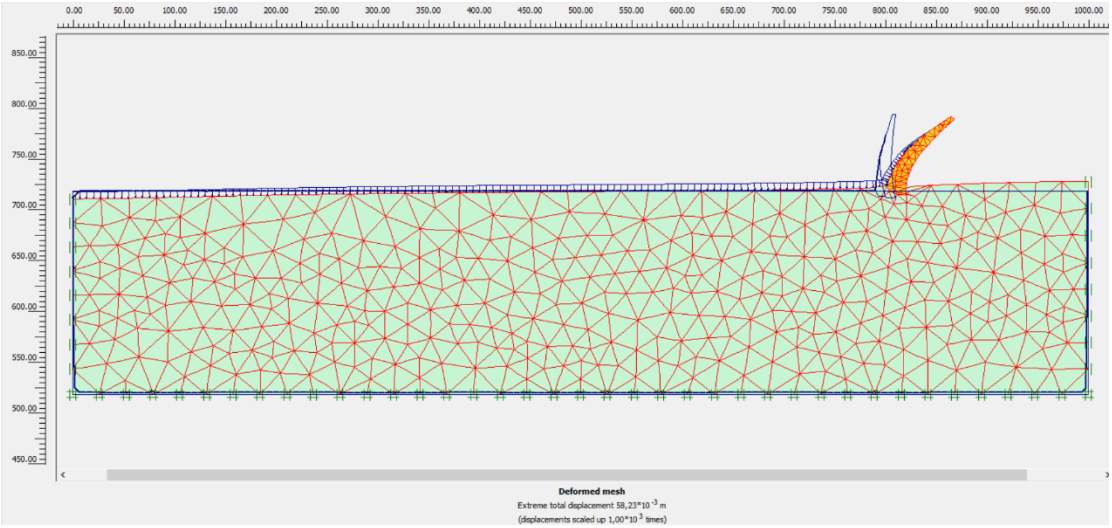
Εικόνα 4.100 Οριζόντιες ολικές τάσεις



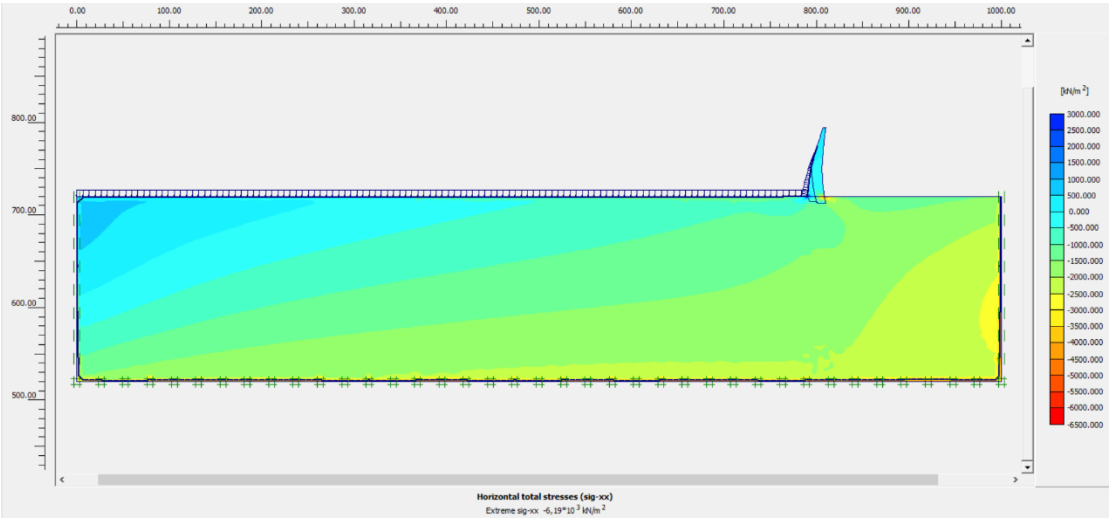
Εικόνα 4.101 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του μοντέλου με την εφαρμογή της σεισμικής επιτάχυνσης των + 0,24 g έγινε $11,18*10^{-3}$ m και δηλαδή μειώθηκε κατά $5*10^{-3}$ μέτρα. Οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών τάσεων αυξήθηκαν κατά $0,2*10^{-3}$ KN/m^2.

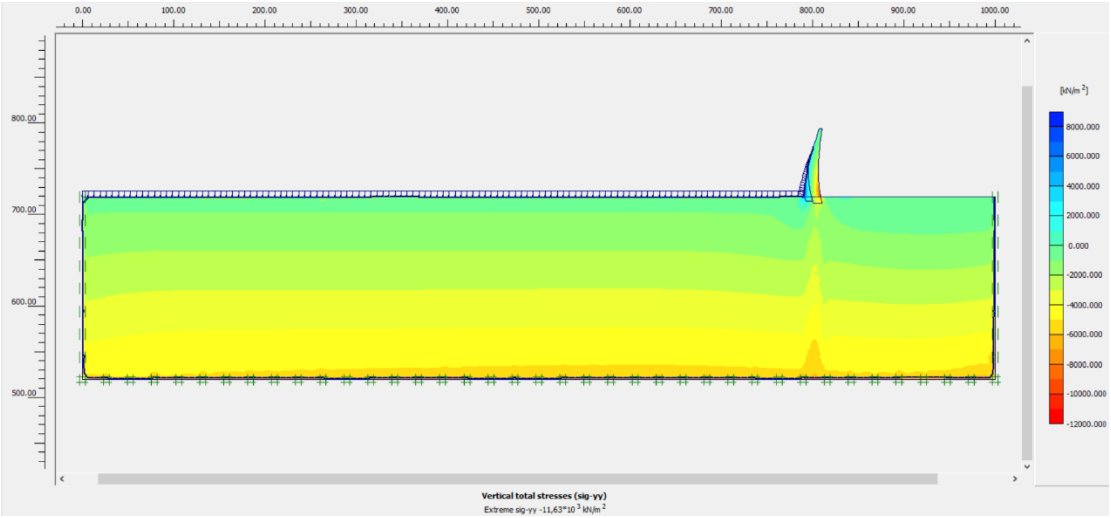
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,24 g και H = + 776 m</u>



Εικόνα 4.102 Αποτέλεσμα παραμορφώσεων του δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.103 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.104 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του προτύπου είναι 58,23*10^{-3} m που σημαίνει πως αυξήθηκε κατά 8,8*10^{-3} μέτρα δηλαδή 0,009 μέτρα, δηλαδή 9 χιλιοστά. Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά 0,8*10^3 KN/m^2 , ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά 1,3*10^3 KN/m^2.

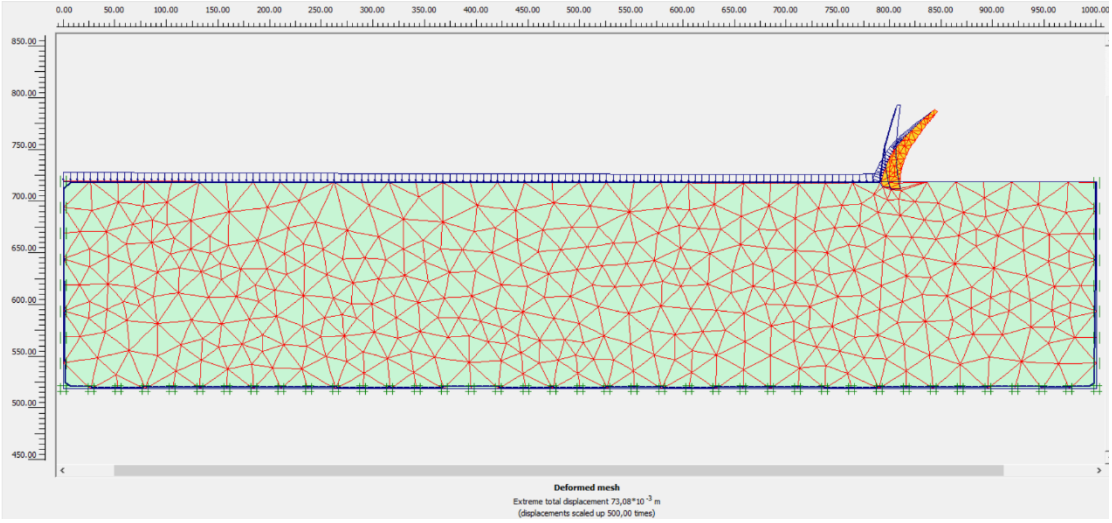
H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (0,24g)	-978,1	825,1	1061	-2201,8	-31,4	-1383
	-915,7	760,8	998,3	-2137,5	-13,2	-1400,7
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,24g)	-2792,9	2695	2883	-4075,8	-535,6	-890

Πίνακας 4.20 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,24 g – Ground water calculation

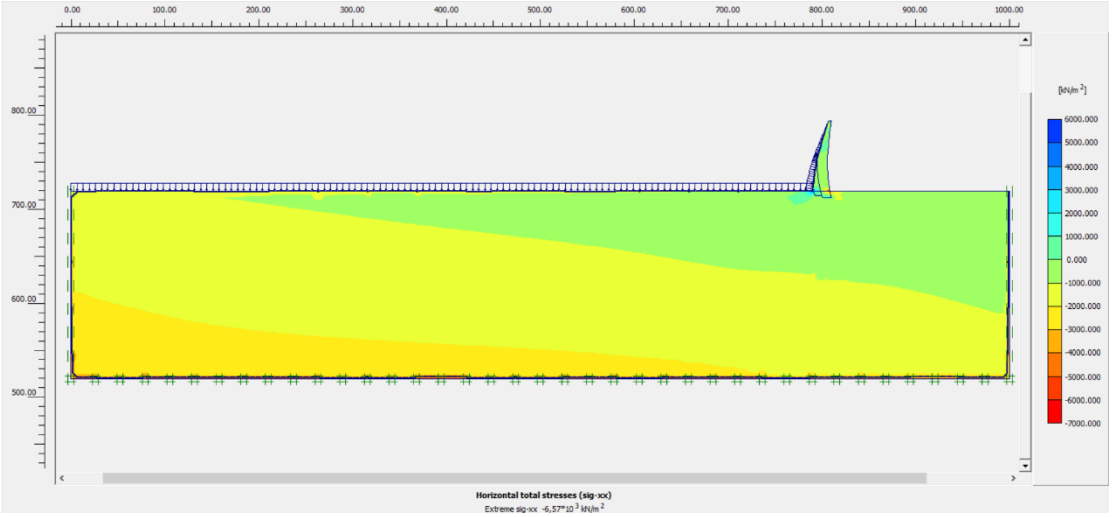
Συνεχίζεται το ίδιο ακριβώς μοτίβο με αποτέλεσμα οι οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις να μειώνονται και για τα 3 σημεία, όταν η επιτάχυνση είναι + 0,24 g, ενώ οι τάσεις αυξάνονται εφαρμόζοντας την επιτάχυνση - 0,24 g. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει και μία συσχέτιση των μειώσεων και των αυξήσεων που εμφανίζονται, αφού όσο μειώνονται για παράδειγμα οι κατακόρυφες τάσεις του σημείου B σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση με την επιτάχυνση + 0,16 g, τόσο αυξάνονται οι κατακόρυφες τάσεις του ίδιου σημείου σε σχέση με την ανάλυση με επιτάχυνση – 0,16 g.

- A = ± 0,08 g – H = 792 m

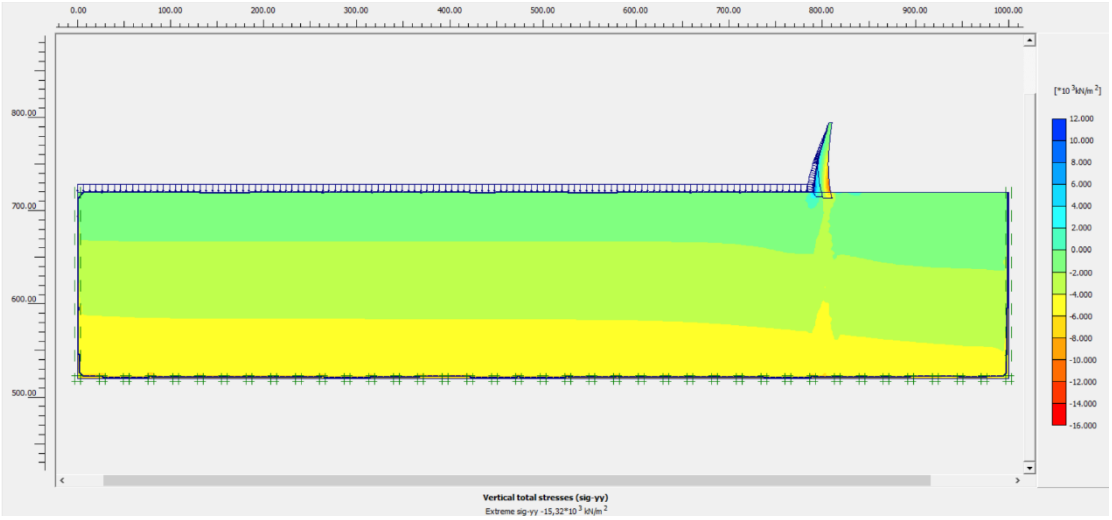
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,08 g – H = + 792 m</u>



Εικόνα 4.105 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου



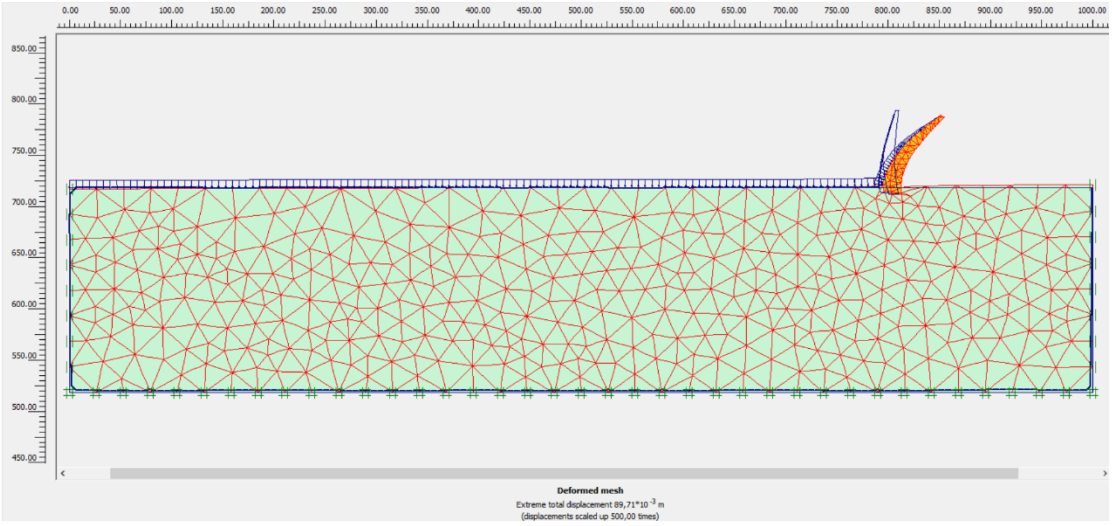
Εικόνα 4.106 Οριζόντιες ολικές τάσεις



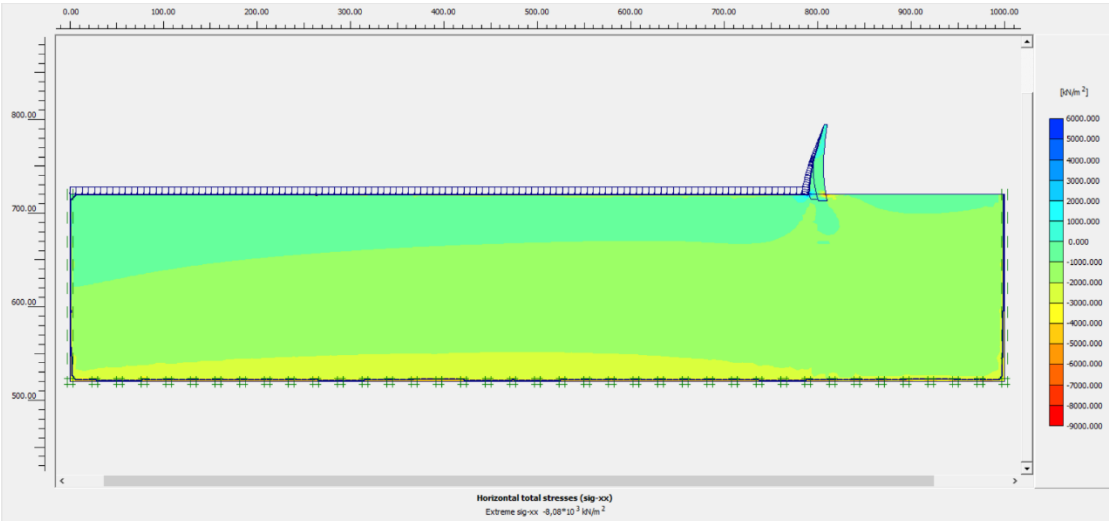
Εικόνα 4.107 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του προσομοιώματος είναι της τάξης των 73*10^{-3} m, ενώ στην αντίστοιχη οριζόντια επιτάχυνση για την στάθμη των 776 μέτρων ήταν 20,2*10^{-3} m και άρα προκύπτει μία γενναία αύξηση η οποία οφείλεται στην αύξηση της στάθμης κατά 16 μέτρα. Αύξηση παρατηρείται και στις μέγιστες τιμές οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών τάσεων, γεγονός λογικό αφού η στάθμη του νερού του ταμιευτήρα βρίσκεται στην στάθμη στέψης του υπερχειλιστή.

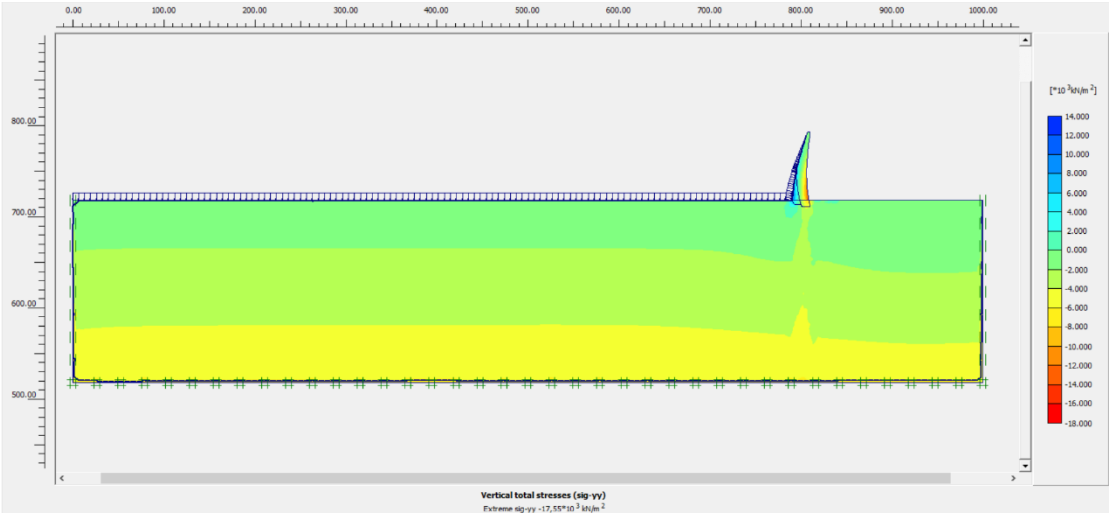
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,08 g και H = + 792 m</u>



Εικόνα 4.108 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του μοντέλου



Εικόνα 4.109 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.110 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Της και στις ψευδοστατικές αναλύσεις χωρίς νερό, έτσι και εδώ υπάρχει αύξηση των μετατοπίσεων του προσομοιώματος και των τάσεων που ασκούνται σε αυτό, όταν αλλάζει η φορά των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται στο προσομοίωμα. Δηλαδή όταν η δύναμη αρχικά εξετάζεται για άσκηση από τα δεξιά και στη συνέχεια εξετάζεται με φορά προς τα αριστερά. Οι μετατοπίσεις είναι της τάξεως των $90*10^{-3}$ μέτρων.

H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (0,08g)	-3991,8	3928	4332	-5567,4	-202,6	-1215,7
	-3995,7	3870	4276	-5509,6	-186,4	-1231,5
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,08g)	-4562	4515	5308	-6384,9	-373,5	-1073,4

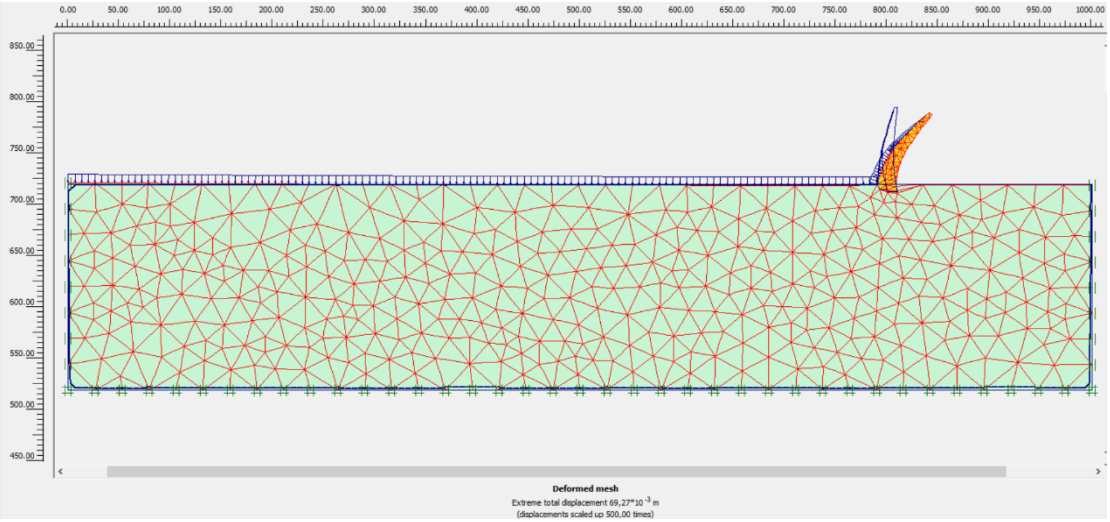
Πίνακας 4.21 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,08 g – Ground water calculation

Οι διαφορές που προκύπτουν από την αλλαγή της στάθμης από 776 σε 792 μέτρα, είναι κυρίως στα σημεία A και B όπου σε αυτά οι οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις σε αρκετές περιπτώσεις διπλασιάζονται και σε άλλες συμβαίνει και κάτι παραπάνω από απλό

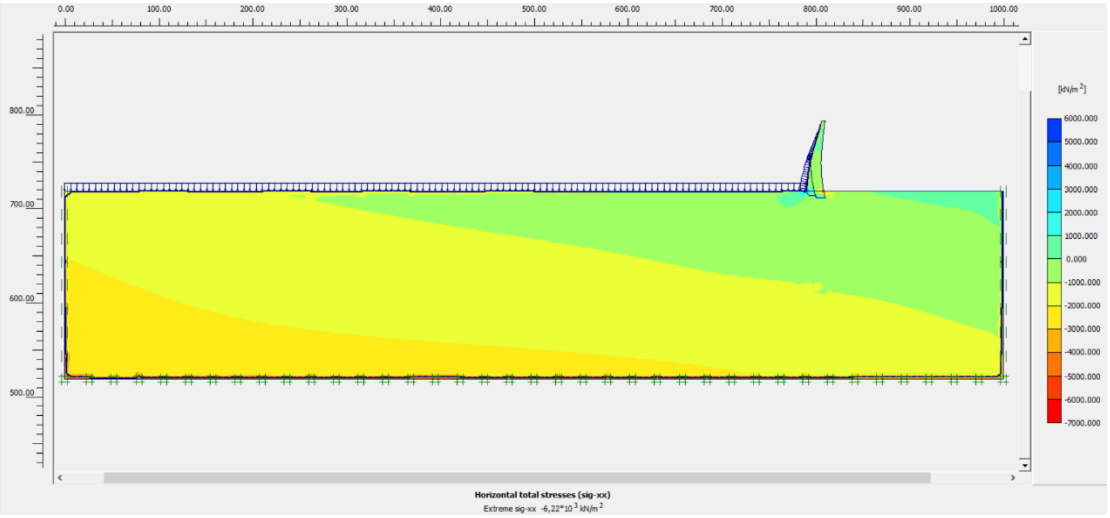
διπλασιασμό. Αυτό προφανώς συμβαίνει επειδή τα δύο αυτά σημεία είναι συνευθειακά και το γεγονός ότι στο σημείο Β οι τάσεις είναι μεγαλύτερες αποδεικνύει τον αρχικό συλλογισμό ότι το κατάντη πρανές του φράγματος είναι το πιο κρίσιμο. Παραδόξως στο σημείο C δεν υπάρχουν αλλαγές στις τάσεις, πράγμα που σημαίνει πως η αύξηση του νερού του ταμιευτήρα δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την θεμελίωση του φράγματος.

- A = ± 0,12 g – H = 792 m

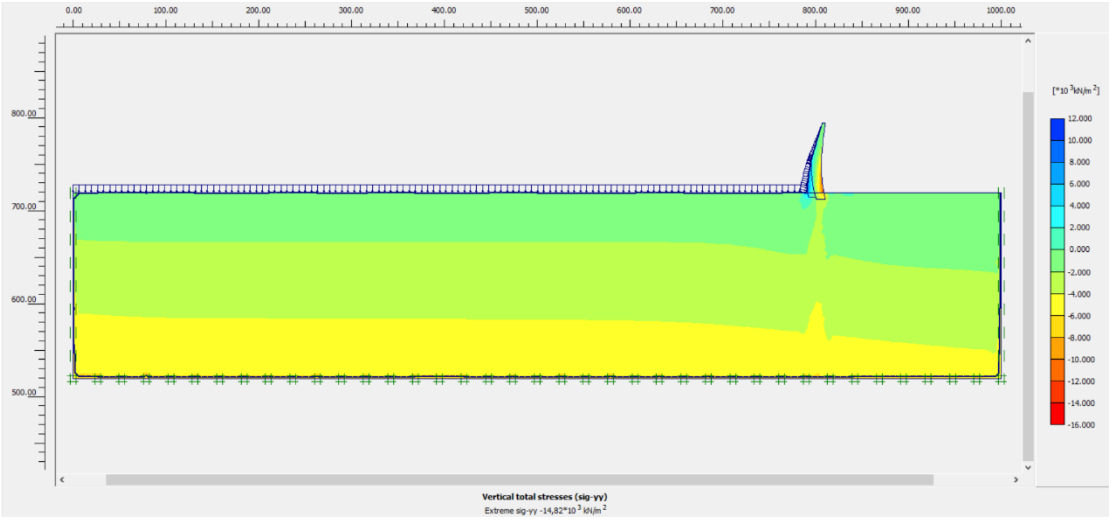
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,12 g και H = + 792 m</u>



Εικόνα 4.111 Παραμόρφωση δικτύου προσομοιώματος



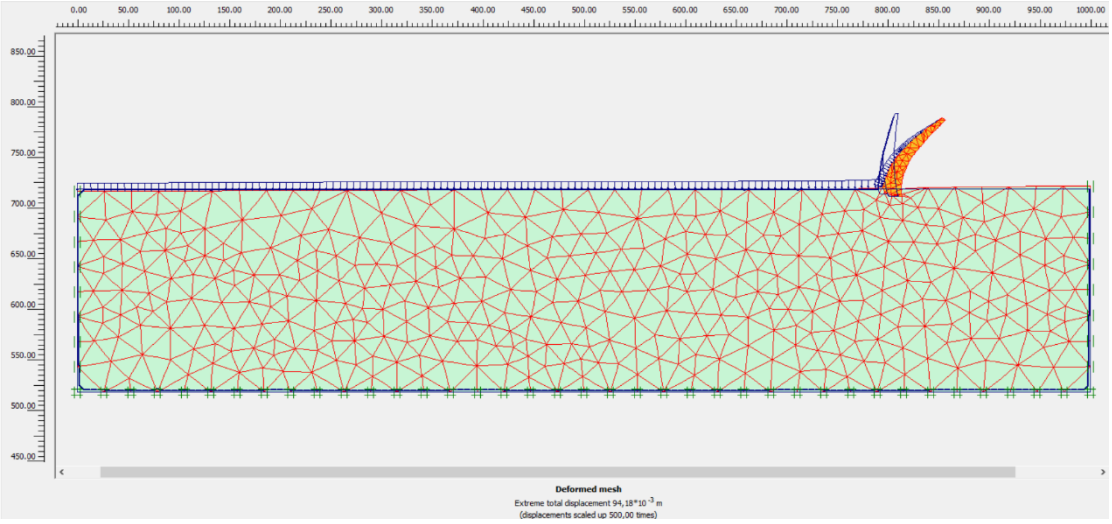
Εικόνα 4.112 Οριζόντιες ολικές τάσεις



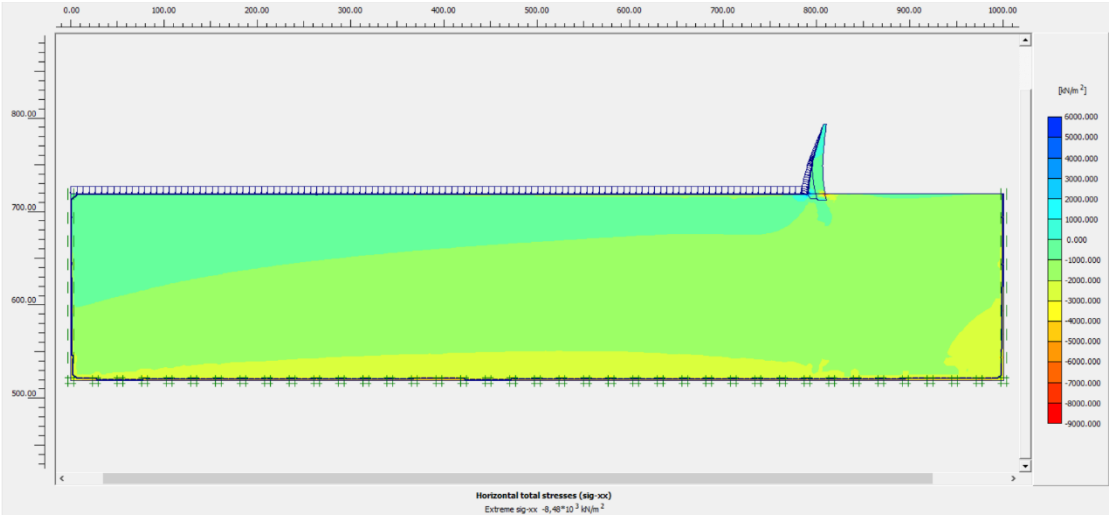
Εικόνα 4.113 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του προσομοιώματος είναι 69,3*10^{-3} μέτρα, που σημαίνει πως αυτή μειώθηκε κατά περίπου 4*10^{-3} μέτρα. Ακριβώς δηλαδή της και η μείωση της μετατόπισης που παρατηρήθηκε στην περίπτωση της στάθμης των +776 μέτρων στον ταμιευτήρα. Επίσης η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων μειώθηκε κατά 0,3*10^3 KN/m^2, ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων μειώθηκε κατά 0,5*10^3 KN/m^2.

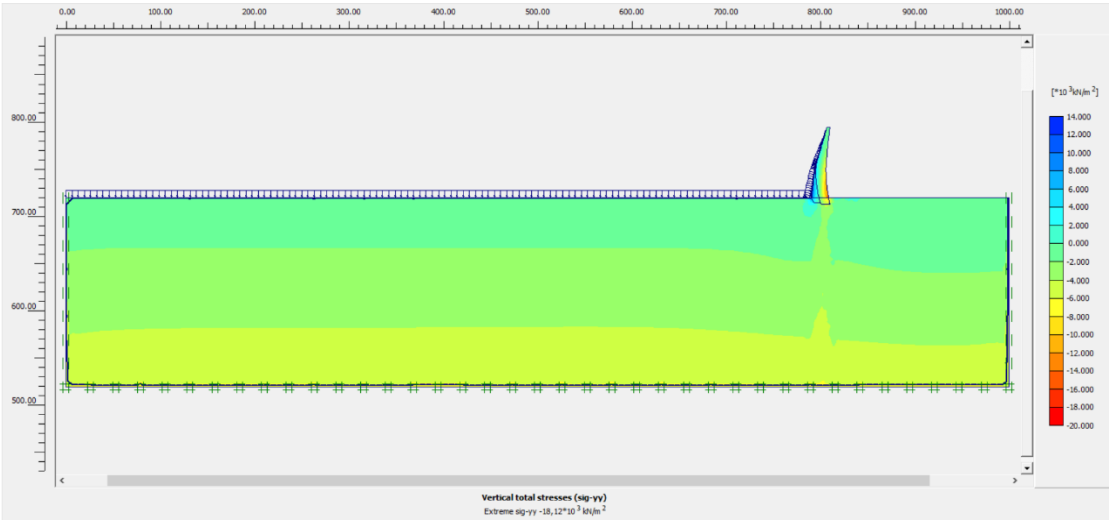
<u>Σεισμική επιτάχυνση A = - 0,12 g και H = + 792 m</u>



Εικόνα 4.114 Παραμόρφωση δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.115 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.116 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπισης του προσομοιώματος είναι 94,2*10^{-3} m, δηλαδή επήλθε αύξηση περίπου 4,5*10^{-3} μέτρων σε σχέση με την μετατόπιση που προέκυψε από την οριζόντια επιτάχυνση των – 0,08 g. Ακόμη η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά 0,4*10^3 KN/m^2, ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά 0,57*10^3 KN/m^2.

H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (0,12g)	-3860,3	3792	4201	-5432,6	-162,3	-1255,1
	-3795,9	3726	4136	-5366,4	-143,3	-1273,7
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,12g)	-4735,3	4694	5497	-6579	-417,7	-1030,5

Πίνακας 4.22 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,12 g – Ground water calculation

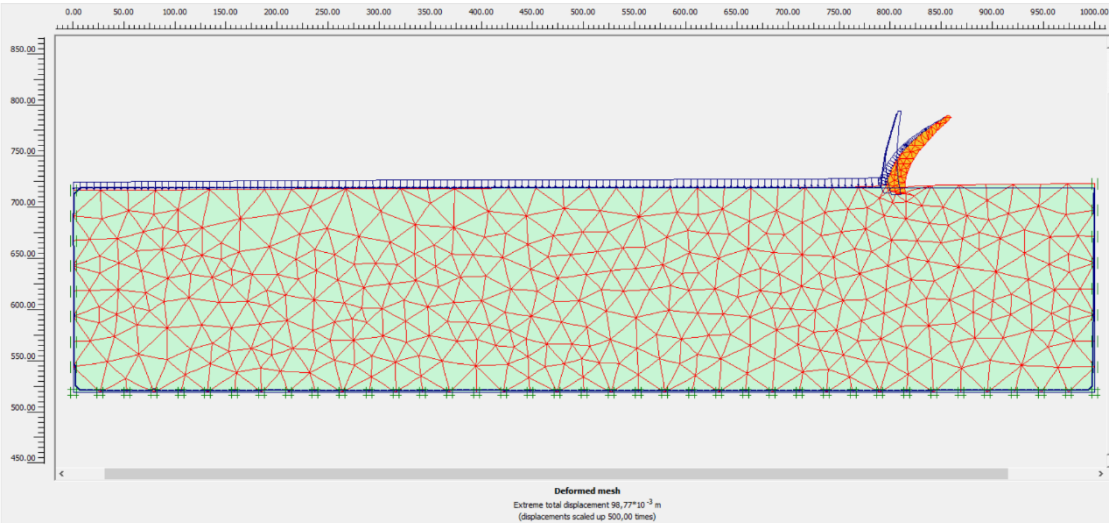
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως εξαιτίας του ότι τα αποτελέσματα δεν ακολουθούν κοινή πορεία, δηλαδή οι τάσεις που προκύπτουν όταν η αδρανειακή δύναμη εφαρμόζεται προς τα δεξιά μειώνονται όσο αυξάνεται η επιτάχυνση, ενώ οι τάσεις που προκύπτουν όταν η αδρανειακή δύναμη εφαρμόζεται προς τα αριστερά αυξάνονται όσο αυξάνεται και σεισμική επιτάχυνση, επιβάλλεται η επιλογή της μιας από τις δύο φορές ως σωστή.

Η μείωση των τάσεων όσο αυξάνεται η οριζόντια επιτάχυνση είναι ένα πολύ περίεργο γεγονός που θα μπορούσε να συνδεθεί με την παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα, εάν και εφόσον συνδεόταν με ένα και μόνο σημείο, της το σημείο A που είναι ανάντη του φράγματος. Στην περίπτωση εκείνη θα μπορούσε να πει κανείς πως το νερό συντελεί θετικά στην ευστάθεια του ανάντη πρανούς, ωστόσο οι αναλύσεις και στις 2 στάθμες δείχνουν πως μειώνονται οι τάσεις και του σημείου B (κατάντη πρανές). Για τον λόγο αυτό οι ψευδοστατικές αναλύσεις με θετικό πρόσημο επιτάχυνσης θεωρούνται λανθασμένες, μόνο όταν υπάρχει νερό στον ταμιευτήρα και άρα θα συνεχιστεί η ανάλυση μόνο με τις αδρανειακές δυνάμεις προς τα αριστερά, όπου σε αυτές υπάρχει λογική στα αποτελέσματα τους.

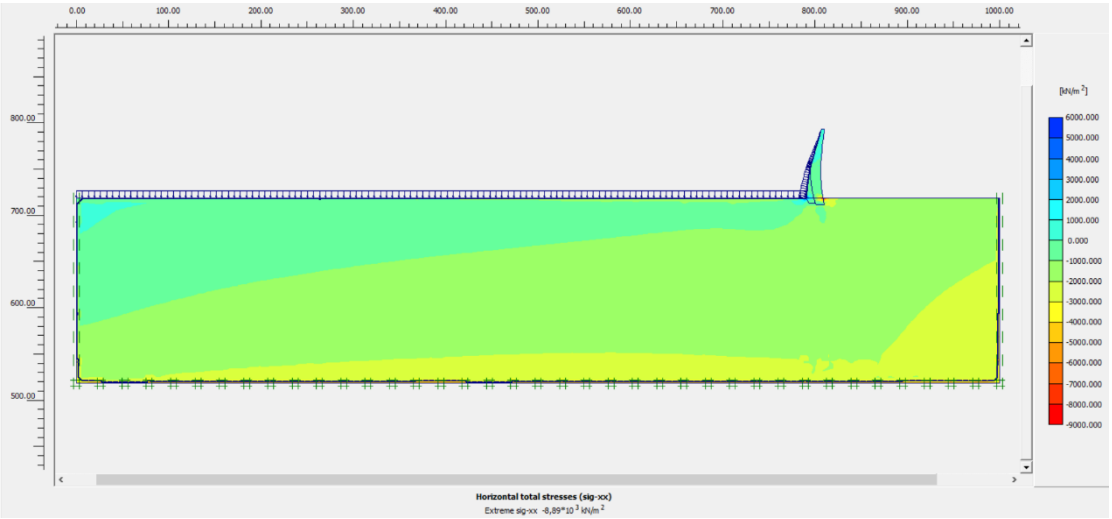
Επίσης στους συγκεντρωτικούς πίνακες που θα ακολουθήσουν για τις ψευδοστατικές αναλύσεις με την παρουσία νερού όπου χρησιμοποιήθηκε οριζόντια επιτάχυνση με θετικό πρόσημο (αδρανειακή δύναμη προς τα δεξιά), θα διαγραφούν.

- A = ± 0,16 g – H = 792 m

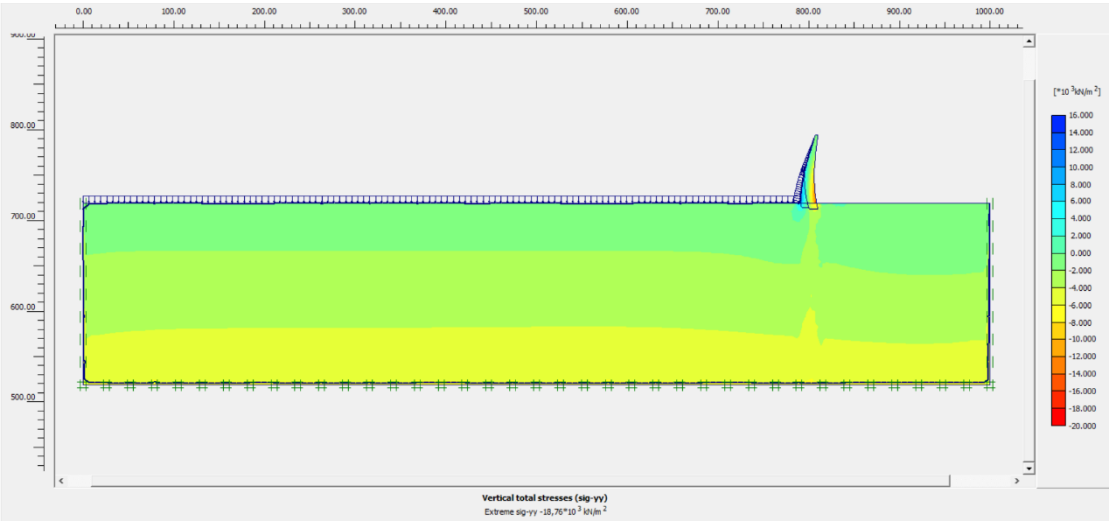
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,16 g – H = + 792 m</u>



Εικόνα 4.117 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.118 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.119 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του προσομοιώματος είναι γύρω στα 98,8*10^{-3} μέτρα, ενώ η μετατόπιση που προέκυψε από τη οριζόντια επιτάχυνση – 0,120 g ήταν 94,2*10^{-3} μέτρα, άρα υπάρχει μία αύξηση των 4,6*10^{-3} μέτρων. Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων έχει αυξηθεί κατά 0,4*10^3 KN/m^2 δηλαδή 400 KN/m^2, ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων έχει αυξηθεί κατά 0,6*10^3 KN/m^2 δηλαδή 600 KN/m^2.

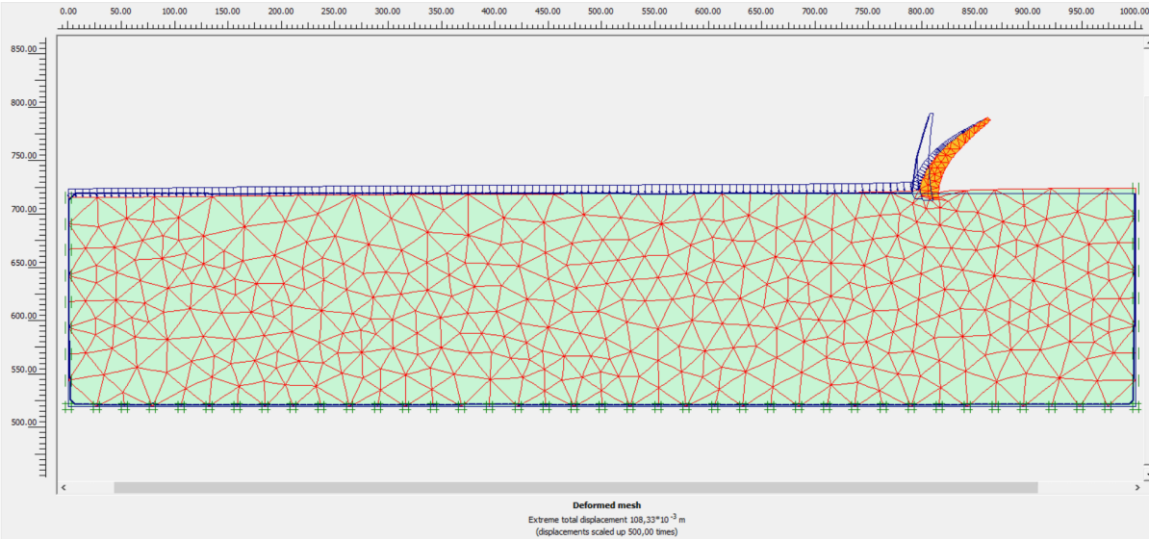
H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,16 g)	-4915,2	4879	5692	-6780,9	-462	-987,5

Πίνακας 4.23 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,16 g – Ground water calculation

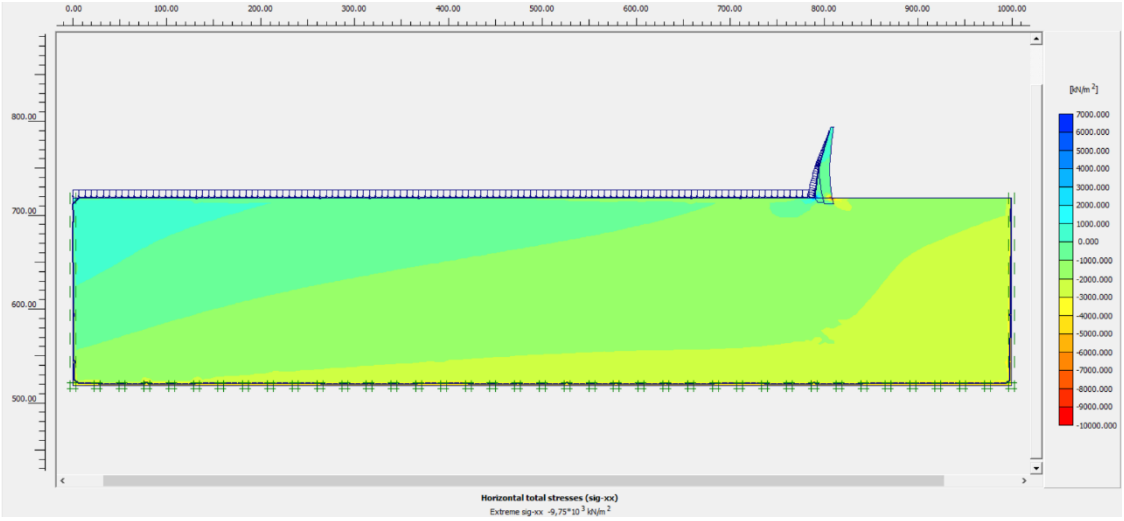
Οι τάσεις των χαρακτηριστικών σημείων A και B είτε οριζόντιες ολικές είτε κατακόρυφες έχουν αυξηθεί περίπου κατά 200 KN/m^2, γεγονός πολύ λογικό αφού η σεισμική επιτάχυνση αυξήθηκε. Από την άλλη οι οριζόντιες ολικές τάσεις στο σημείο C έχουν αυξηθεί κατά περίπου 45 KN/m^2, ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις στο ίδιο σημείο έχουν μειωθεί κατά περίπου 45 KN/m^2.

- A = ± 0,24 g – H = 792 m

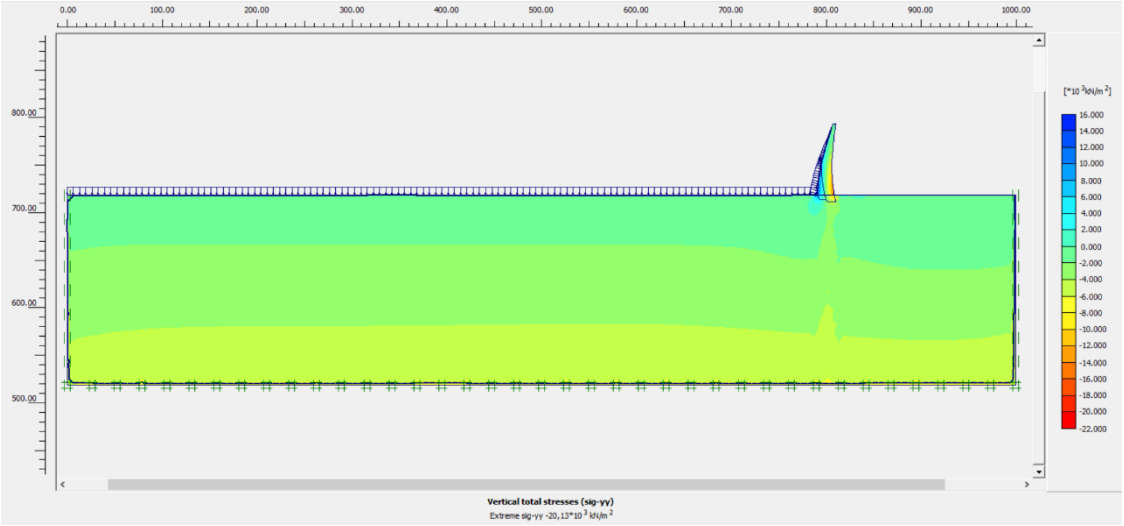
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,24 g και H = + 792 m</u>



Εικόνα 4.120 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.121 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.122 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση του προσομοιώματος αυξήθηκε κατά περίπου $10*10^{-3}$ μέτρα, σε σχέση με την προηγούμενη σεισμική επιτάχυνση (- 0,16 g) και ανέρχεται στα $108,33*10^{-3}$ m. Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων αυξήθηκε κατά περίπου $0,9*10^{3}$ KN/m^2 , ενώ η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων τάσεων αυξήθηκε κατά περίπου $1,4*10^{3}$ KN/m^2, συνεπώς παρατηρούνται αρκετά μεγάλες αυξήσεις στις τάσεις, αν και έγινε και μεγάλη αύξηση στην οριζόντια επιτάχυνση που ασκήθηκε στο προσομοίωμα

H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,24g)	-5294,2	5269	6107	-7207,6	-551,2	-901,1

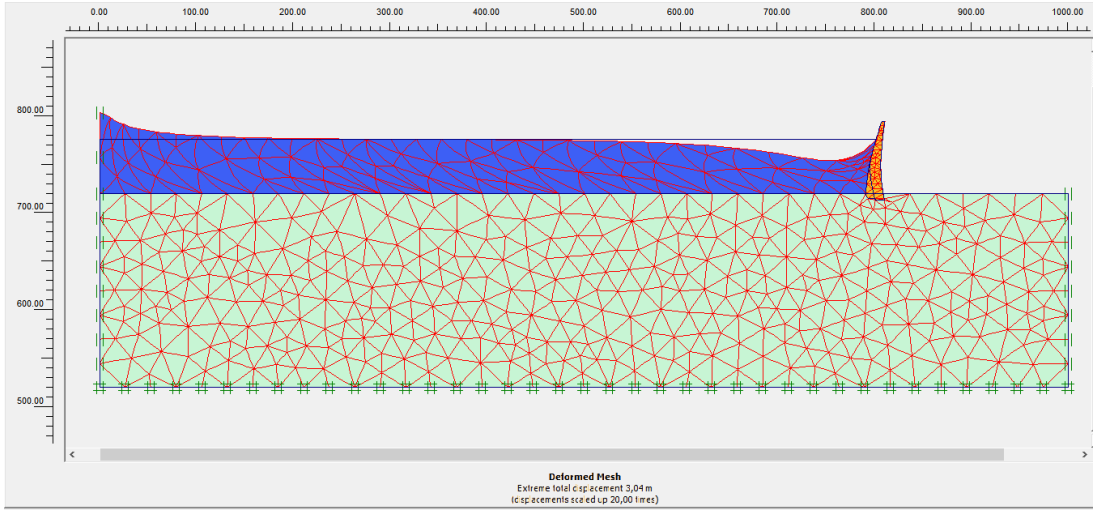
Πίνακας 4.24 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,24 g – Ground water calculation

Οι τάσεις στα χαρακτηριστικά σημεία A και B έχουν αυξηθεί κατά 300 με 400 περίπου KN/m^2, ενώ οι οριζόντιες ολικές τάσεις του σημείου C έχουν αυξηθεί κατά 90 KN/m^2. Οι κατακόρυφες ολικές τάσεις του σημείου στην βάση του φράγματος μειώθηκαν κατά περίπου 90 KN/m^2.

4.4.1.3 Ψευδοστατική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα – Μέθοδος δημιουργίας του νερού με την μορφή υλικού

- A = ± 0,08 g – H = 776 m

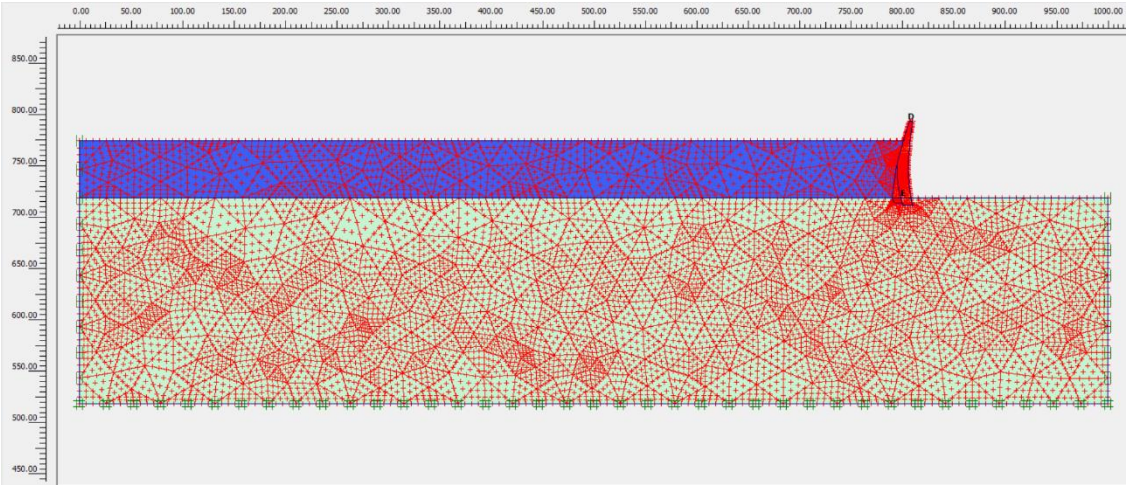
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,08 g και H = + 776 m</u>



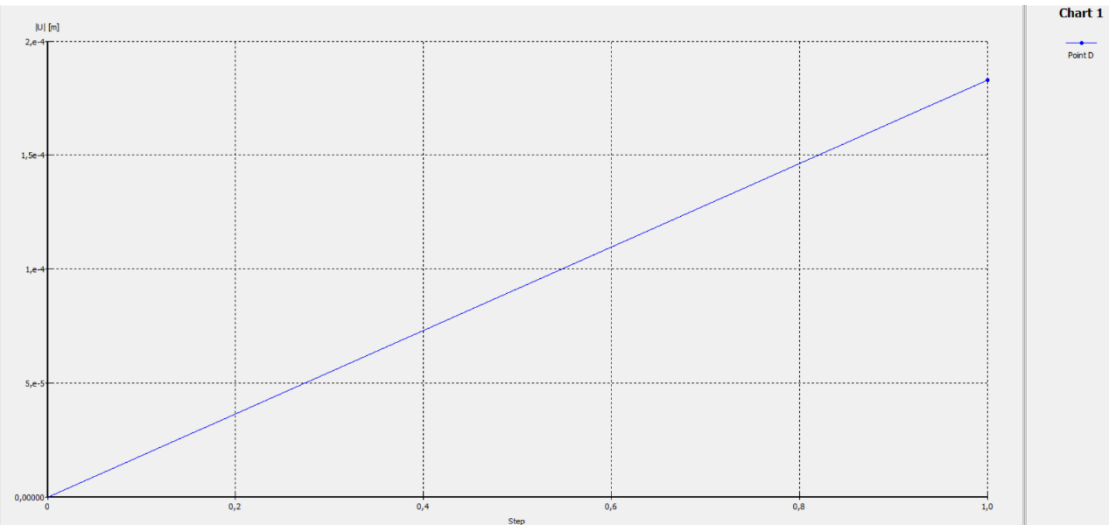
Εικόνα 4.123 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί πως η ολική μετατόπιση του δικτύου που δίνει το λογισμικό, δεν αφορά το φράγμα αλλά το υλικό του νερού.

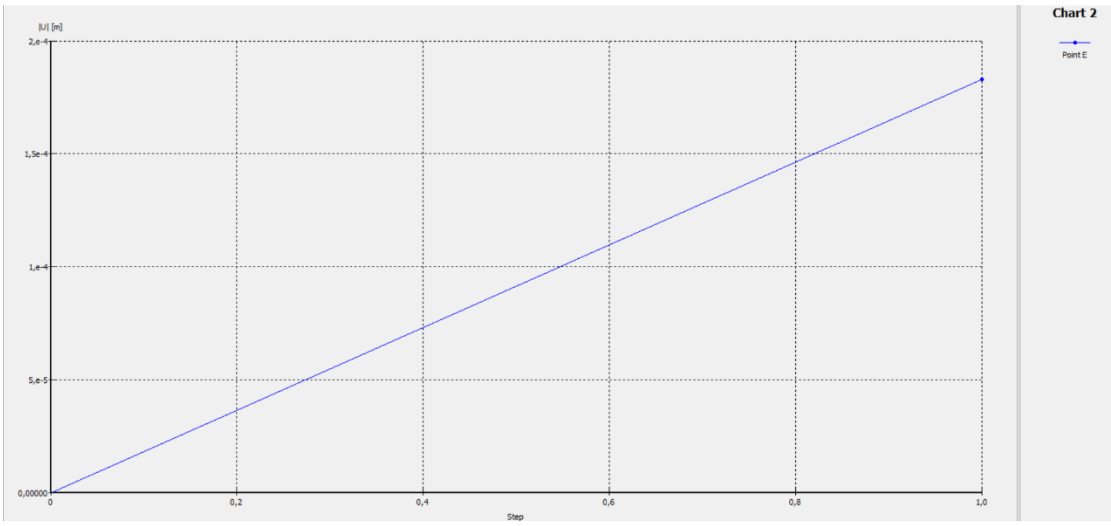
Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκαν 2 χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο φράγμα, ένα στην κορυφή της στέψης του (D) και ένα ακριβώς στην βάση του (E). Έπειτα μέσω του 4^{ου} υποπρογράμματος, Plaxis Curves βρέθηκαν οι μετατοπίσεις των 2 αυτών σημείων μέσω διαγράμματος μετατόπισης.



Εικόνα 4.124 Χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο φράγμα για την εύρεση της μετατόπισης του

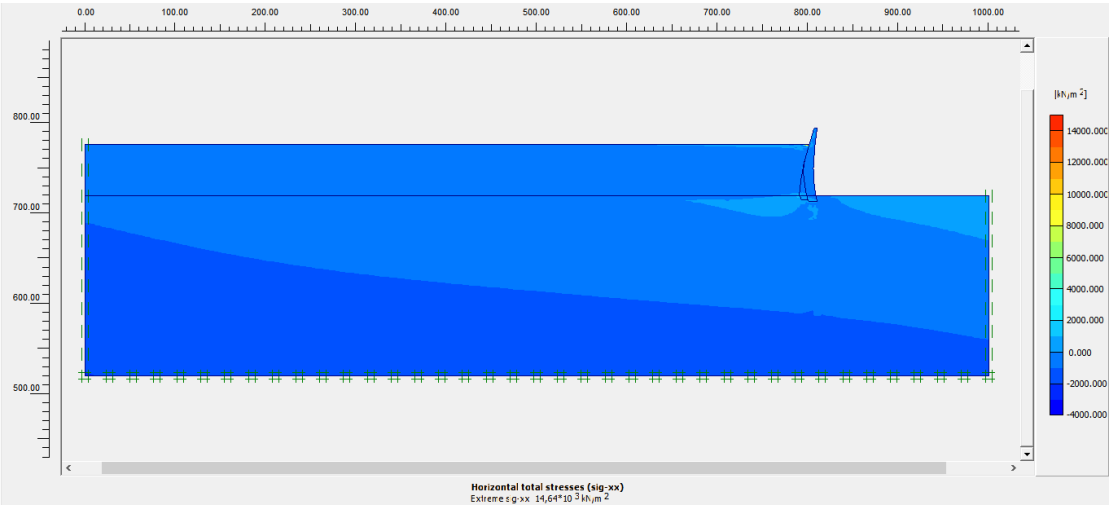


Εικόνα 4.125 Διάγραμμα μετατόπισης του σημείου D (Στέψη φράγματος)

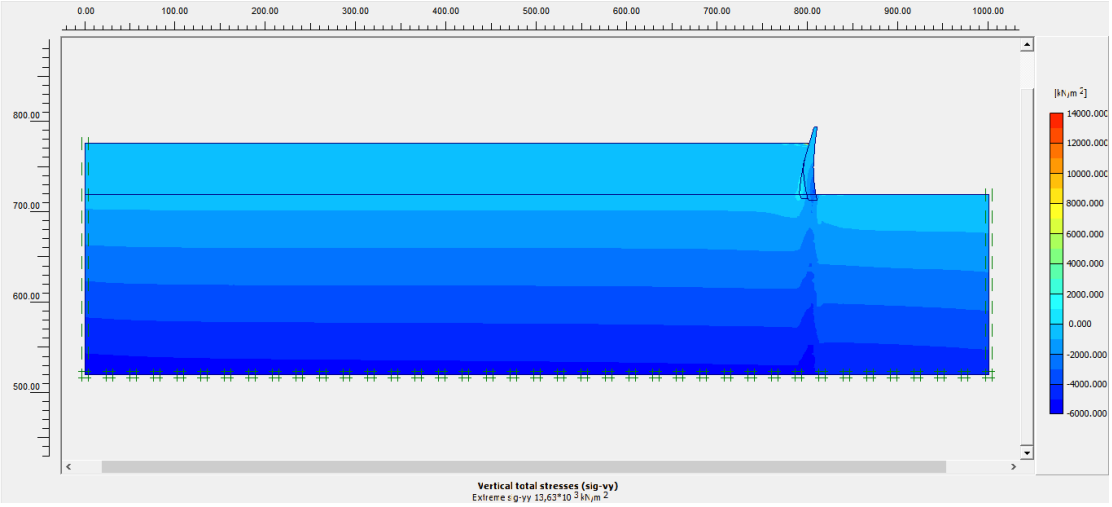


Εικόνα 4.126 Διάγραμμα μετατόπισης του σημείου E (Βάση φράγματος)

Η μετατόπιση του σημείου D και E είναι η ίδια και είναι $1,83*10^{-4}$ μέτρα.



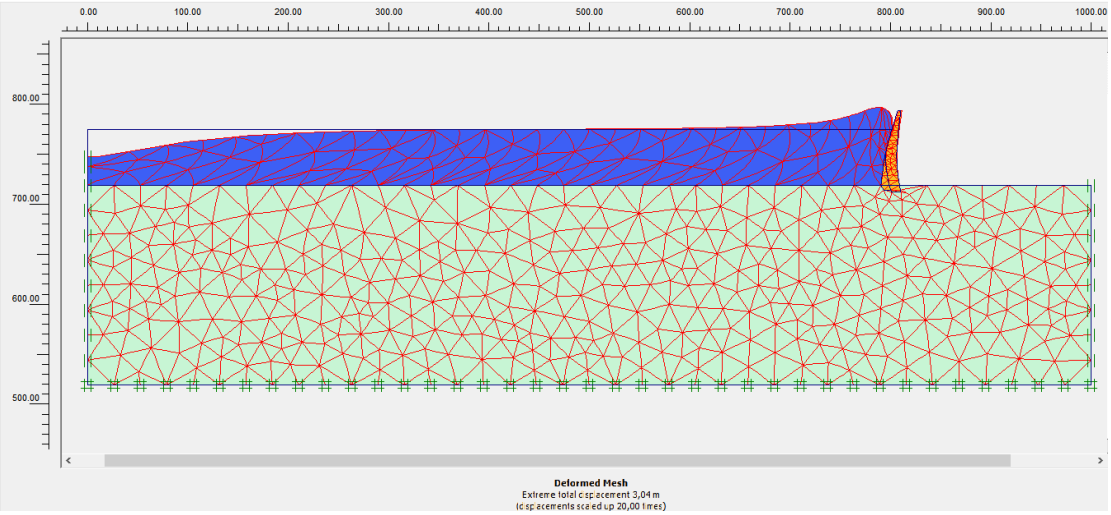
Εικόνα 4.127 Οριζόντιες ολικές τάσεις



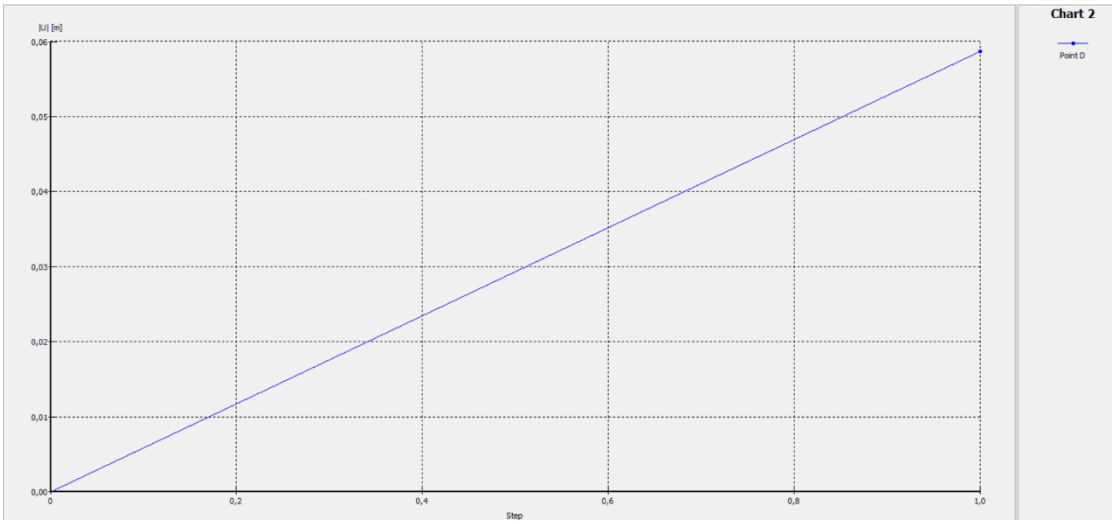
Εικόνα 4.128 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η χρησιμοποίηση της αδρανειακής δύναμης προς τα δεξιά για την ψευδοστατική ανάλυση με χρήση του νερού με μορφή εδαφικού υλικού, είναι υπό εξέταση, αφού της παρατηρήθηκε και με την μέθοδο Ground water calculation δεν δίνει ικανοποιητικά και λογικά αποτελέσματα.

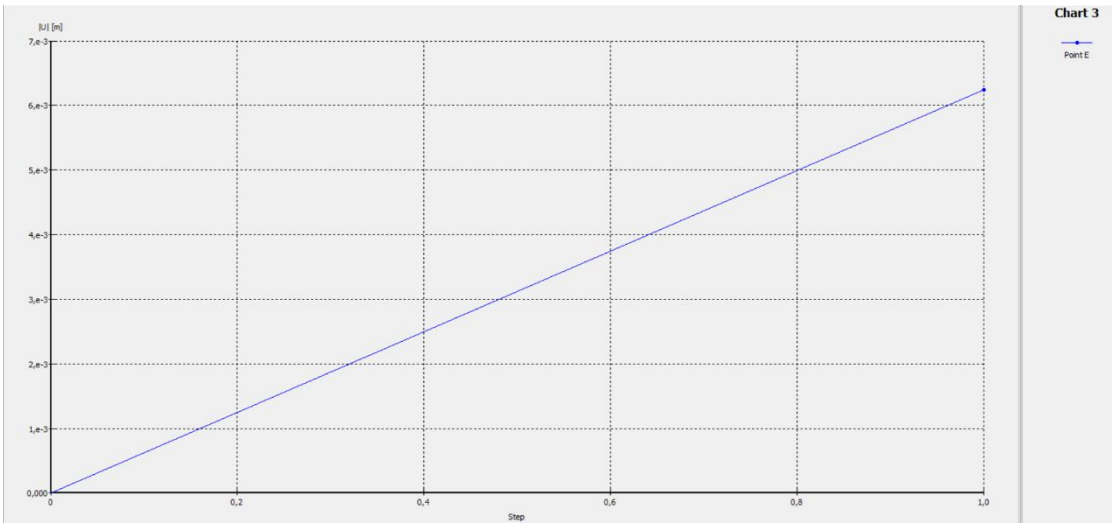
Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,08 g και H = + 776 m



Εικόνα 4.129 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου

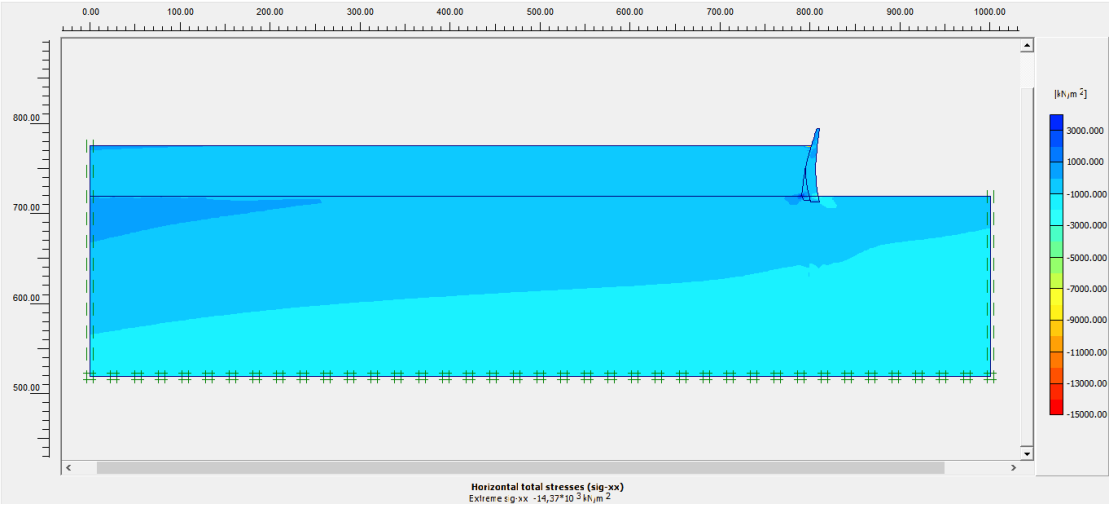


Εικόνα 4.130 Διάγραμμα μετατόπισης του σημείου D (Στέψη του φράγματος)

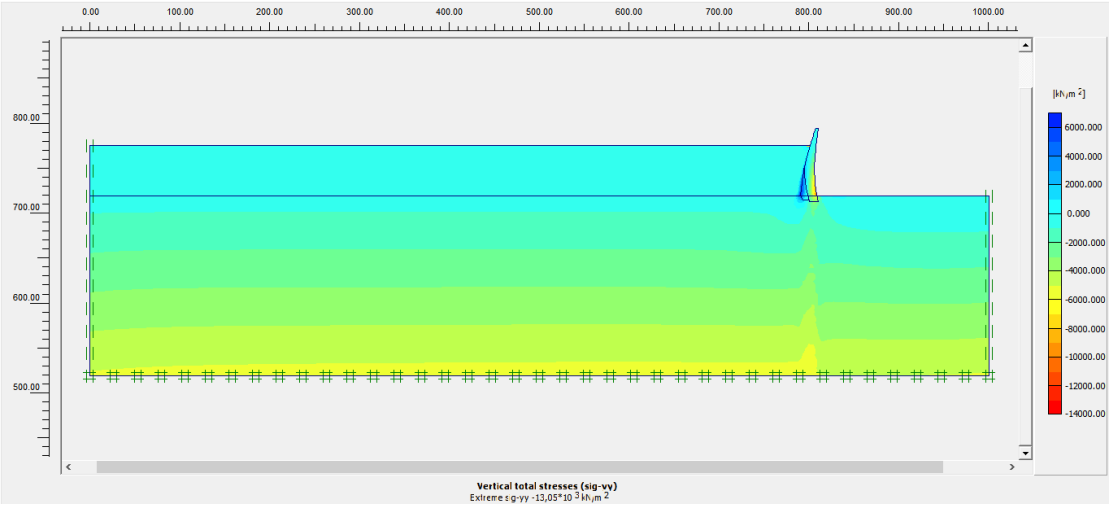


Εικόνα 4.131 Διάγραμμα μετατόπισης του σημείου E (Βάση του φράγματος)

Οι μετατοπίσεις των δύο αυτών χαρακτηριστικών σημείων στην περίπτωση αυτή δεν συμπίπτουν. Η μετατόπιση της κορυφής του φράγματος είναι 0,059 μέτρα ενώ η μετατόπιση της βάσης του είναι 6,25*10^{-3} μέτρα.



Εικόνα 4.132 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.133 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων για την σεισμική επιτάχυνση των - 0,08 g φαίνεται πως είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει για την σεισμική επιτάχυνση των + 0,08 g, ενώ το αντίθετό ισχύει για την μέγιστη τιμή των ολικών τάσεων. Επίσης οι μετατοπίσεις που προέκυψαν από τα – 0,08 g φαίνονται πιο λογικές και συγκρίσιμες με αυτές που υπήρχαν και στις προηγούμενες αναλύσεις, ενώ οι μετατοπίσεις που προέκυψαν από τα + 0,08 g είναι πάρα πολύ μικρές και είναι περίεργο και το γεγονός ότι κορυφή και βάση έχουν την ίδια τιμή.

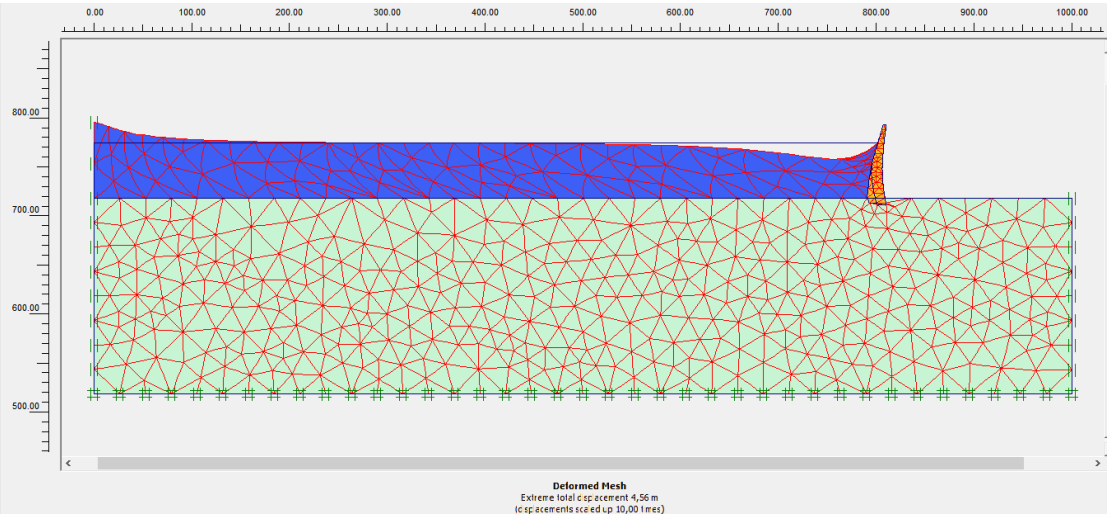
H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (0,08g)	-872,3	246,6	882,3	-1824,2	-175,26	-1310,80
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,08g)	-3081,4	2521	3293	-4308,9	-418,03	-1074,90

Πίνακας 4.25 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,08 g – Νερό με την μορφή υλικού

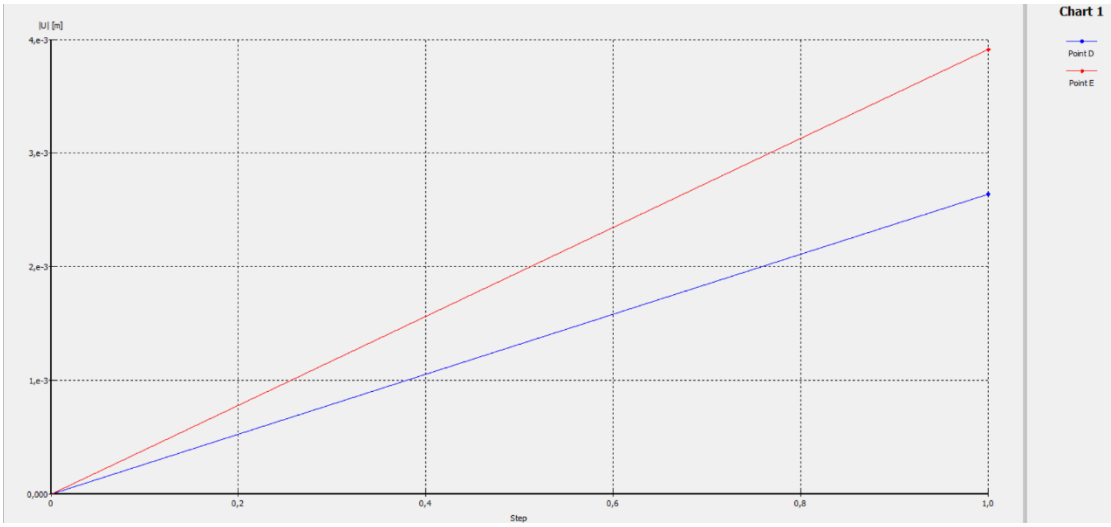
Τα αποτελέσματα των τάσεων δεν ταιριάζουν καθόλου ανάμεσα στις 2 αυτές επιταχύνσεις που στην ουσία είναι η ίδια επιτάχυνση με διαφορετική φορά εφαρμογής. Οι τάσεις είναι κοντά μόνο στο σημείο C γεγονός που συνέβαινε και στις αναλύσεις με την μέθοδο του Ground water calculation.

- A = ± 0,120 g – H = 776 m

<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = + 0,120 g και H = + 776 m</u>

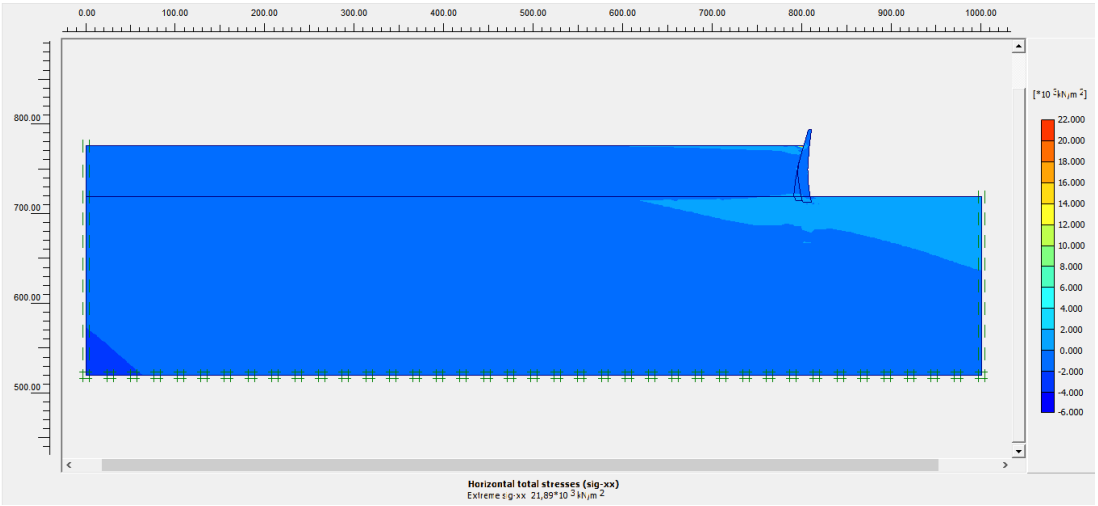


Εικόνα 4.134 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου προσομοιώματος

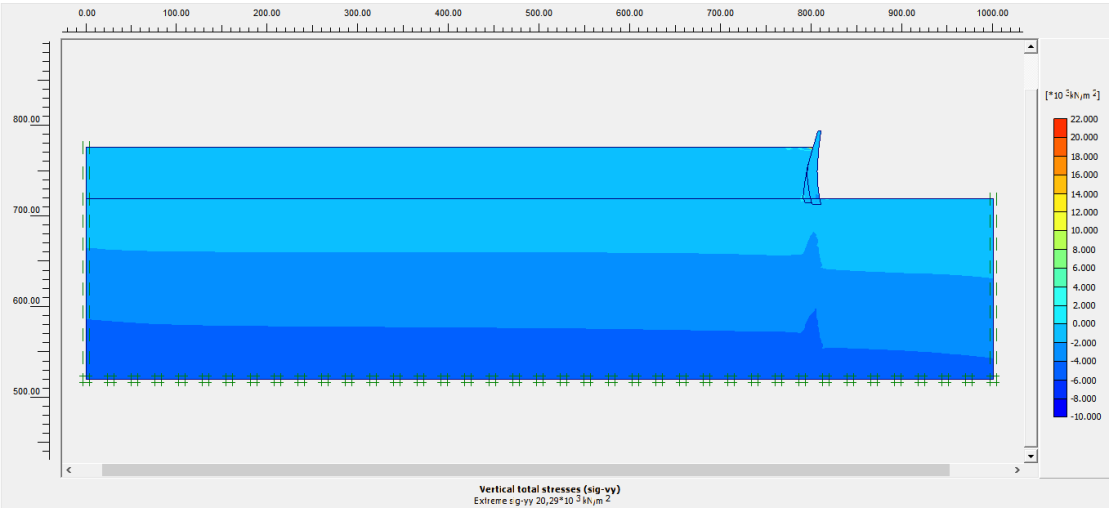


Εικόνα 4.135 Διάγραμμα μετατόπισης των σημείων D και E

Η μετατόπιση του σημείου D που βρίσκεται στην στέψη του φράγματος είναι 2,64*10^{-3} μέτρα, ενώ η μετατόπιση του σημείου E που βρίσκεται στην βάση του φράγματος είναι 3,91*10^{-3} μέτρα.

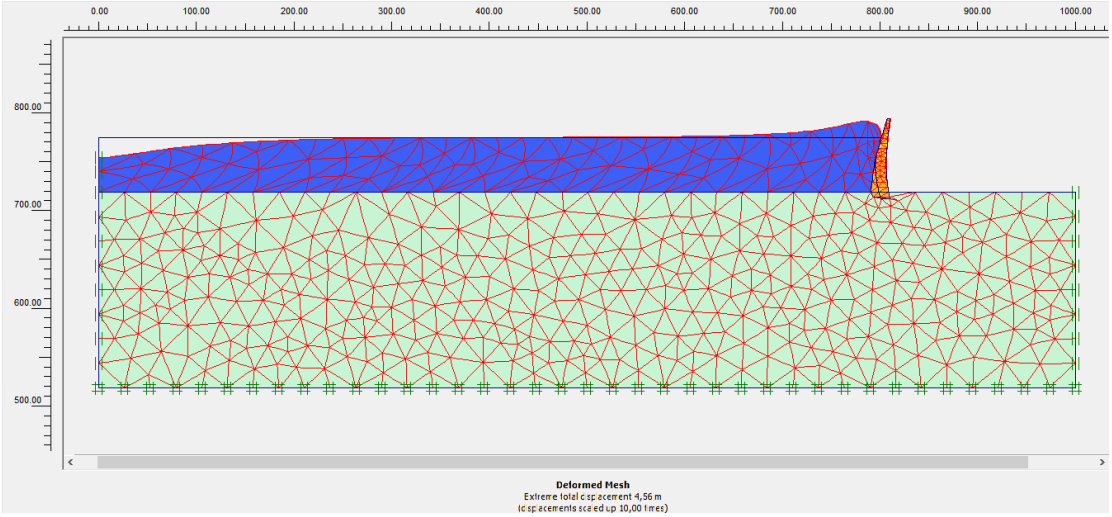


Εικόνα 4.136 Οριζόντιες ολικές τάσεις

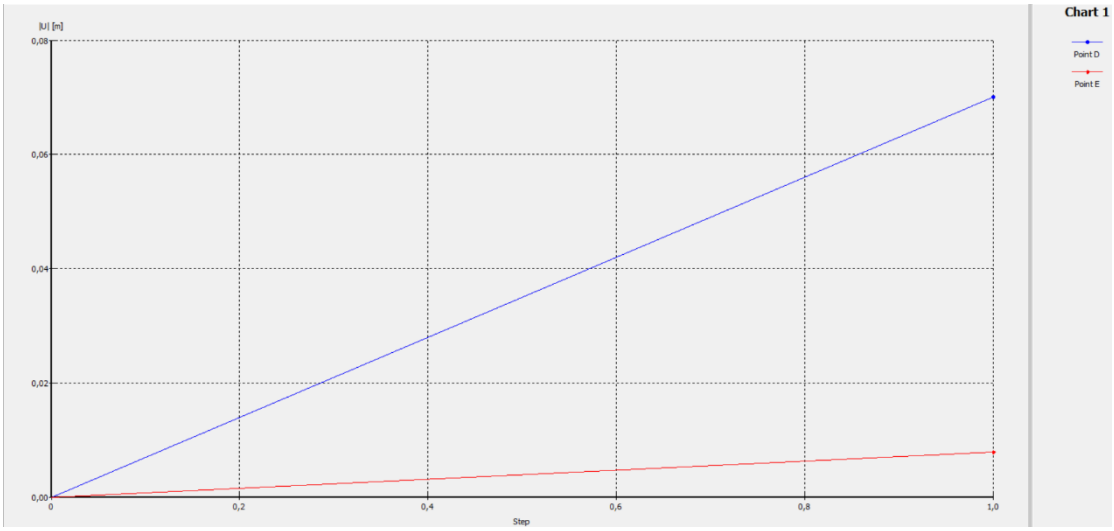


Εικόνα 4.137 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

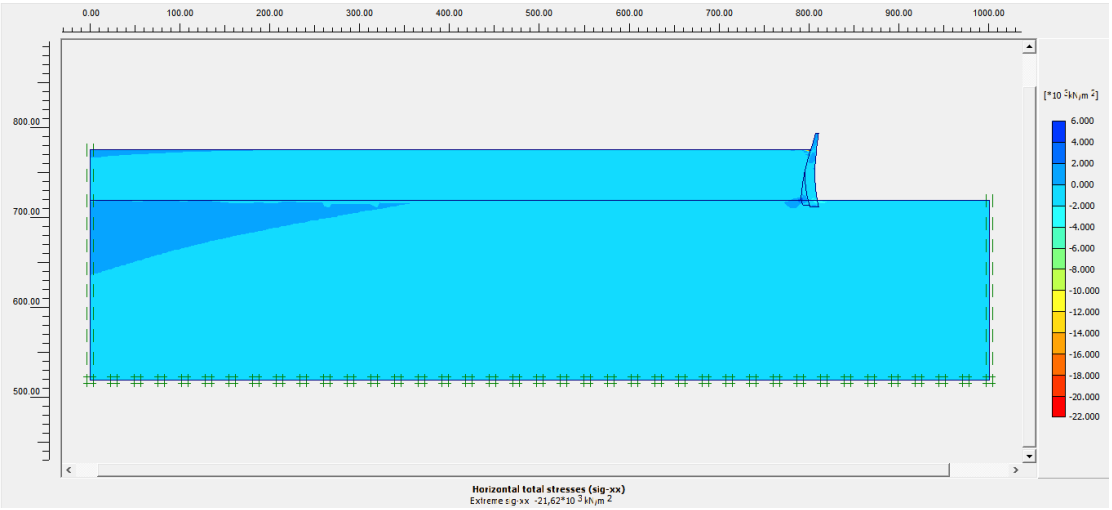
Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,120 g και H = + 776 m



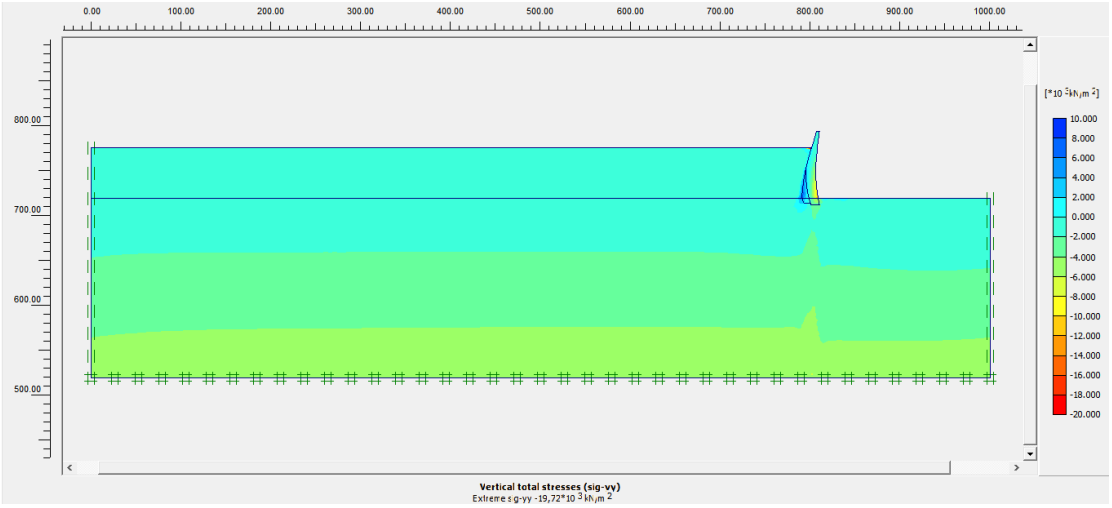
Εικόνα 4.138 Παραμορφώσεις δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.139 Διάγραμμα μετατόπισης των σημείων D και E



Εικόνα 4.140 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.141 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση στην κορυφή του φράγματος είναι 0,07 μέτρα, ενώ στην βάση του είναι $7,93*10^{-3}$ μέτρα. Οι μέγιστες τιμές οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων φαίνεται να είναι λίγο μεγαλύτερες με την εφαρμογή της οριζόντιας επιτάχυνσης + 0,080 g, κάτι που πρέπει να αποτυπωθεί και στον πίνακα που ακολουθεί παρακάτω.

H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (0,12g)	-320	-321,9	279,5	-1203	-114,57	-1369,80
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,12g)	-3633,7	3090	3896	-4930,1	-478,72	-1015,90

Πίνακας 4.26 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = ± 0,120 g – Νερό με την μορφή υλικού

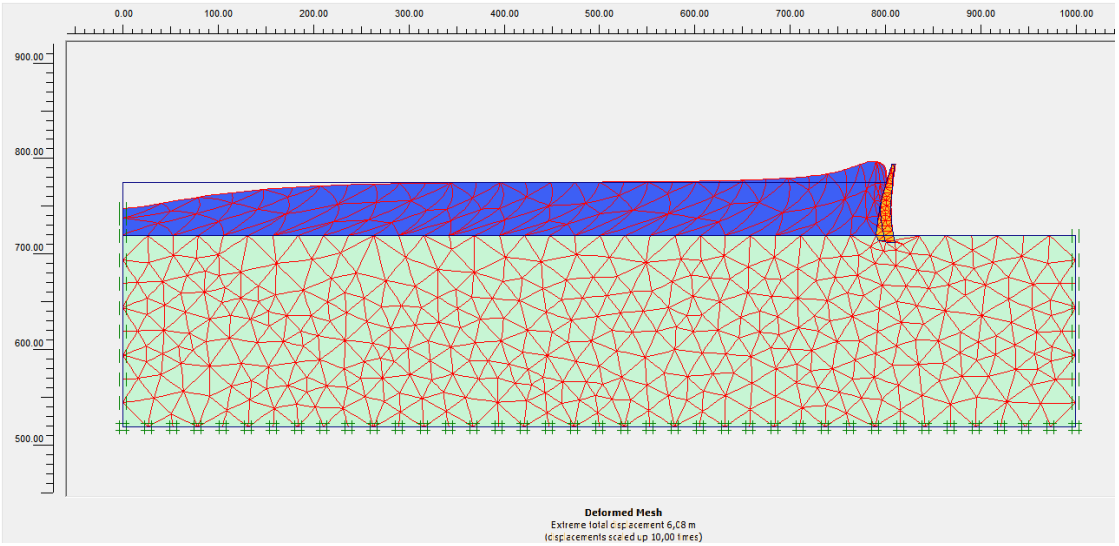
Οι τάσεις των σημείων A και B που προέκυψαν από την σεισμική επιτάχυνση των – 0,12 g φαίνεται να αυξάνονται σε σχέση με την επιτάχυνση των – 0,080 g κατά περίπου 500 με 600 KN/m^2 . Για το σημείο C υπάρχει επίσης αύξηση, στις οριζόντιες ολικές τάσεις, η οποία όμως είναι πολύ μικρότερη, κοντά στα 60 KN/m^2.

Οι τάσεις των σημείων A και B που προκύπτουν από την οριζόντια επιτάχυνση + 0,12 g μειώνονται κατά περίπου 600 KN/m^2 , ενώ στο σημείο C οι οριζόντιες ολικές τάσεις μειώνονται κατά 60 KN/m^2 και οι κατακόρυφες ολικές τάσεις αυξάνονται. Το γεγονός αυτό κρίνεται ως λανθασμένο, αφού είναι παράλογο με την αύξηση της σεισμικής επιτάχυνσης να μειώνονται οι τάσεις που ασκούνται στο σώμα του φράγματος. Για το λόγο αυτό δεν θα

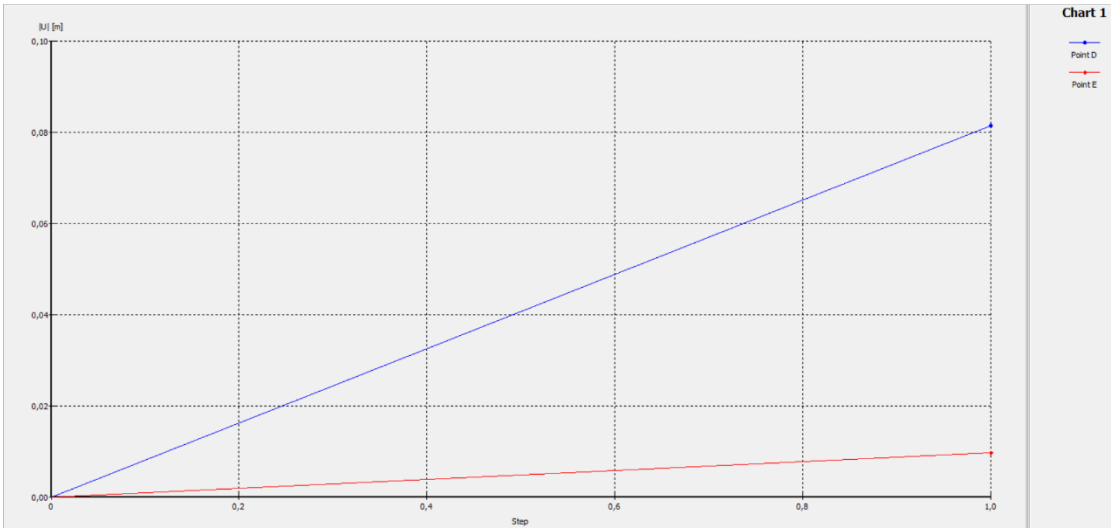
συνεχιστεί περαιτέρω η ψευδοστατική ανάλυση με θετικά πρόσημα στην οριζόντια επιτάχυνση.

- A = ± 0,160 g – H = 776 m

<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,160 g και H = + 776 m</u>

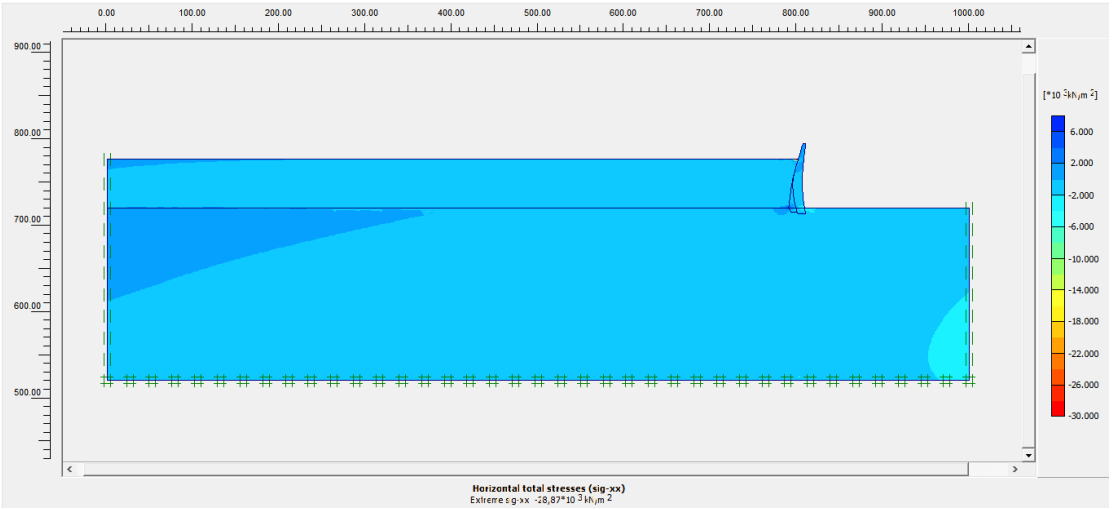


Εικόνα 4.142 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος

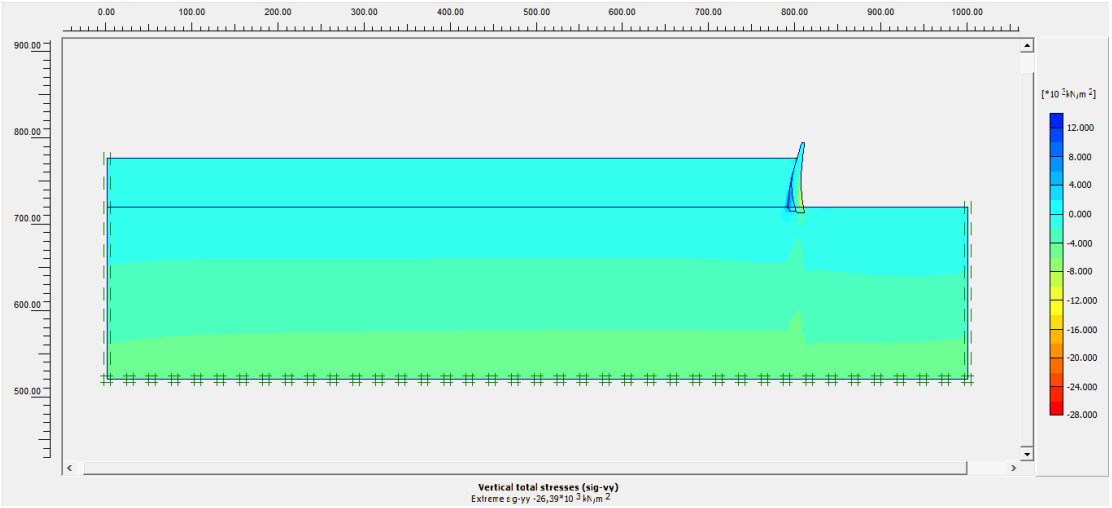


Εικόνα 4.143 Διάγραμμα μετατόπισης σημείων D και E

Η μετατόπιση του σημείου D, σημείο στην στέψη του φράγματος, είναι 0,08 μέτρα ενώ η μετατόπιση του σημείου E, σημείο στην βάση του φράγματος, είναι $9,66*10^{-3}$.



Εικόνα 4.144 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.145 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών τάσεων φαίνεται να είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με τις τιμές που έδωσε η οριζόντια επιτάχυνση των – 0,120 g. Η αύξηση αυτή φαίνεται να είναι της τάξης των $7*10^3$ KN/m^2 δηλαδή 7000 KN/m^2 που είναι ιδιαίτερα μεγάλο νούμερο. Ωστόσο αυτό μένει να φανεί αν έχει αποτυπωθεί και στον πίνακα των τάσεων ή όχι.

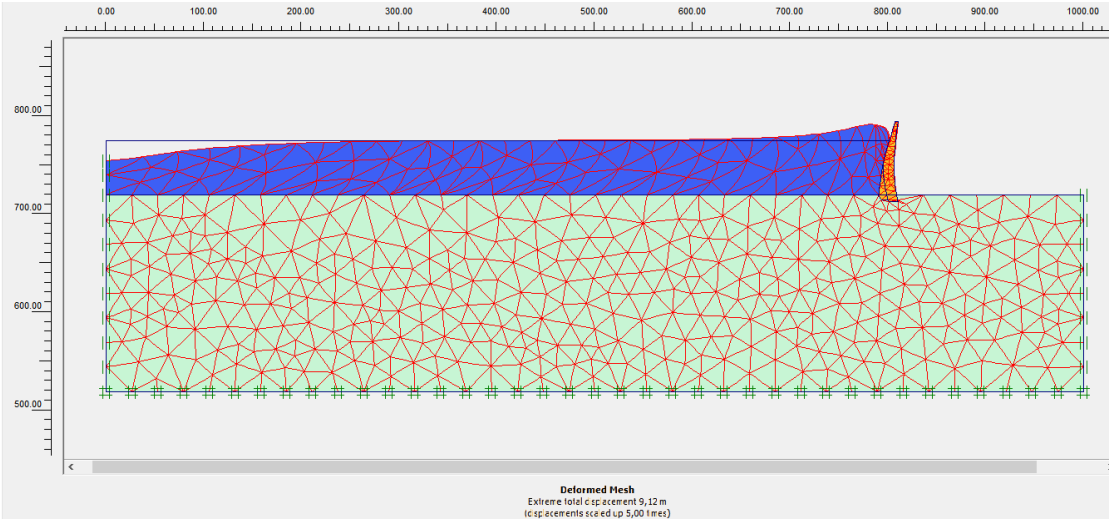
H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,16g)	-4186	3658	4499	-5551,3	-539,41	-956,87

Πίνακας 4.27 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,160 g – Νερό με την μορφή υλικού

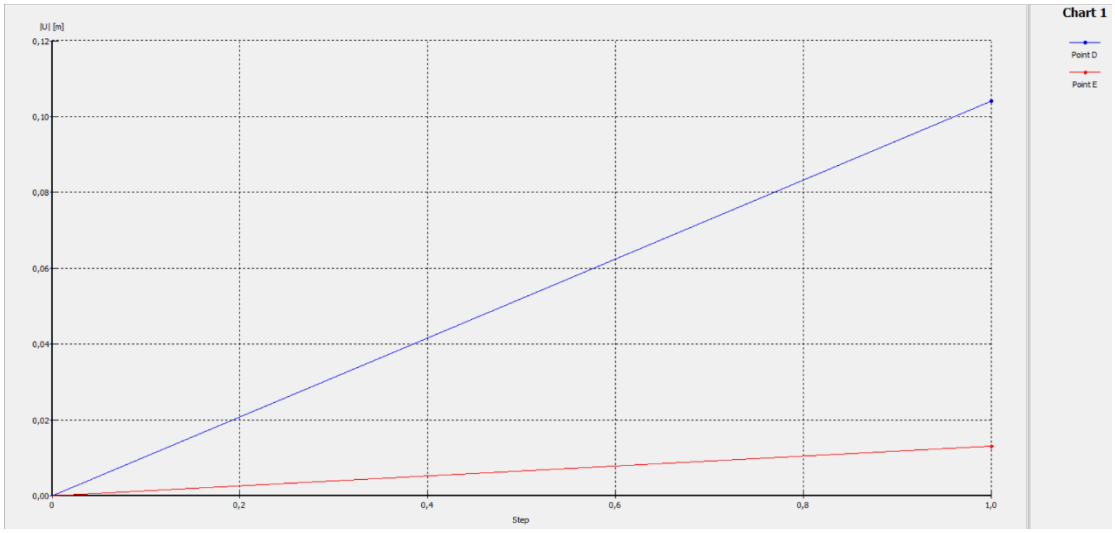
Οι τιμές των τάσεων για τα σημεία A και B έχουν αυξηθεί περίπου 500 με 600 KN/m^2, σε σχέση με τις τιμές που δόθηκαν για σεισμική επιτάχυνση – 0,120 g. Για το σημείο C οι οριζόντιες ολικές τάσεις αυξήθηκαν κατά περίπου 60 KN/m^2, ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις μειώθηκαν κατά 60 KN/m^2, γεγονός που συνέβη και με τη μέθοδο υπολογισμού Ground water calculation. Επίσης η αύξηση που αναφέρθηκε των 7000 KN/m^2, δεν αποτυπώθηκε ευτυχώς σε καμία περίπτωση στον πίνακα.

- A = ± 0,240 g – H = 776 m

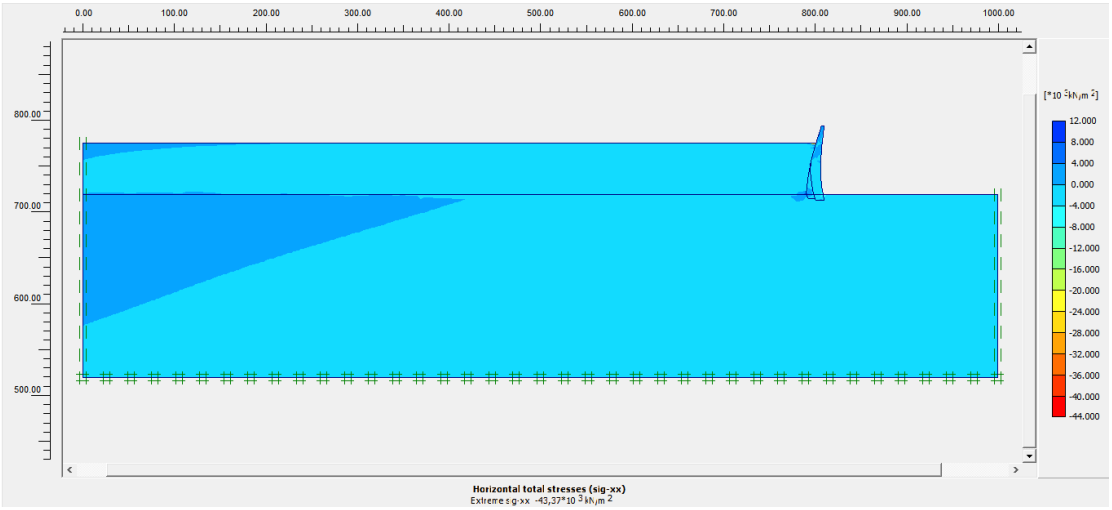
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,240 g και H = + 776 m</u>



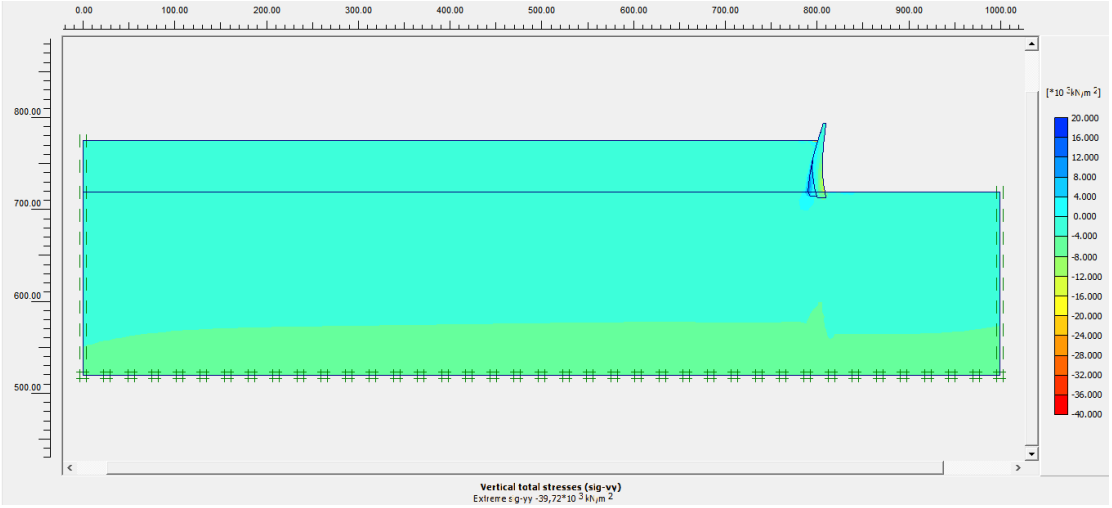
Εικόνα 4.146 Παραμόρφωση δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.147 Διάγραμμα μετατόπισης σημείων D και E



Εικόνα 4.148 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.149 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Η μετατόπιση της κορυφής του φράγματος ανέρχεται στα 0,104 μέτρα, ενώ η μετατόπιση της βάσης του ανέρχεται στα 0,013 μέτρα, γεγονός που δείχνει ότι οι μετατοπίσεις στο σώμα του φράγματος έχουν φτάσει στις μέγιστες τιμές τους. Το ίδιο ισχύει και για τις οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις οι οποίες έχουν αυξηθεί σε σχέση με την σεισμική επιτάχυνση των – 0,160 g κατά $14,5*10^3$ και $13,3*10^3$ KN/m^2 αντίστοιχα. Οι τάσεις αυτές παρά είναι μεγάλες και δεν αναμένεται να επαληθευτούν και στον πίνακα των τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων του φράγματος.

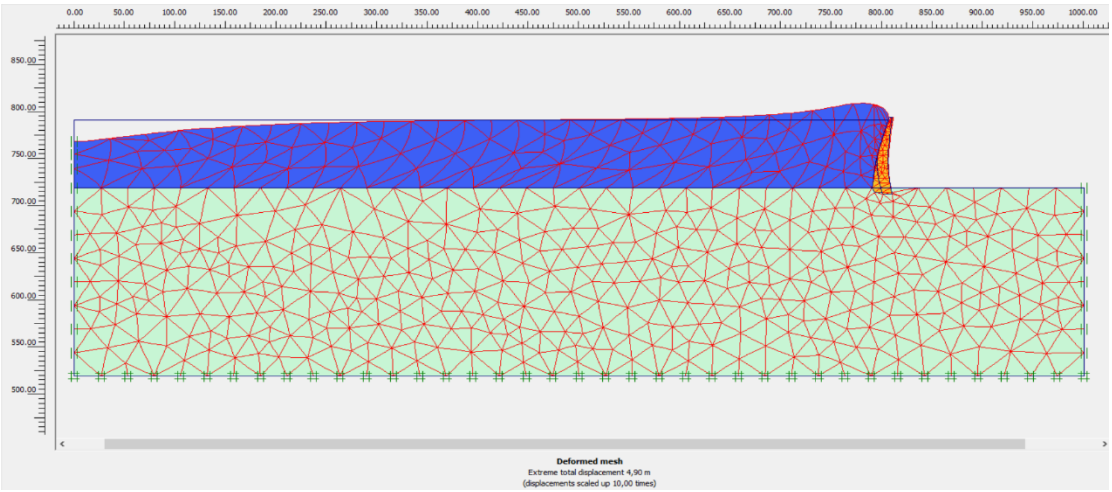
H = + 776 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,24g)	-5290,5	4795	5705	-6793,7	-660,8	-838,9

Πίνακας 4.28 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,240 g – Νερό με την μορφή υλικού

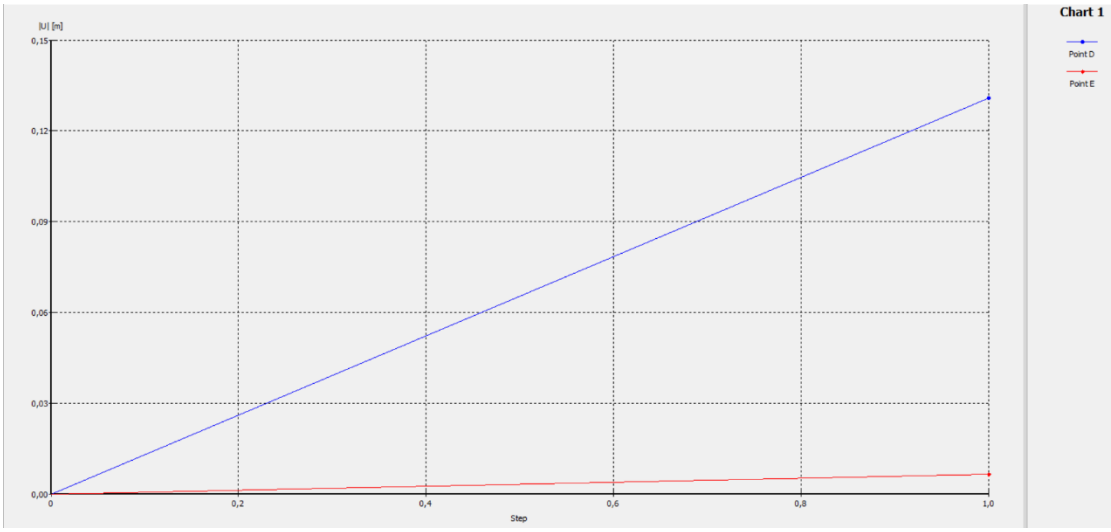
Προηγουμένως υπήρχε αύξηση 500 με 600 KN/m^2, για τις τάσεις των σημείων A και B, αυξάνοντας την σεισμική επιτάχυνση είτε από τα – 0,080 g στα – 0,120 g, είτε από τα – 0,120 g στα – 0,160 g. Στην περίπτωση αυτή ωστόσο όπου η σεισμική επιτάχυνση αυξήθηκε από τα – 0,160 στα – 0,240 g υπάρχει αύξηση, των τάσεων των σημείων A και B, η οποία ανέρχεται περίπου στα 1100 με 1200 KN/m^2 . Γεγονός που δείχνει ότι ακολουθείται ένα πρότυπο και αυτές οι ψευδοστατικές αναλύσεις ''δένουν'' μεταξύ τους. Στο σημείο C υπάρχει αύξηση των οριζόντιων ολικών τάσεων κατά 120 KN/m^2 , ενώ στις κατακόρυφες ολικές τάσεις σημειώθηκε μείωση περίπου 120 KN/m^2.

- A = ± 0,08 g – H = 792 m

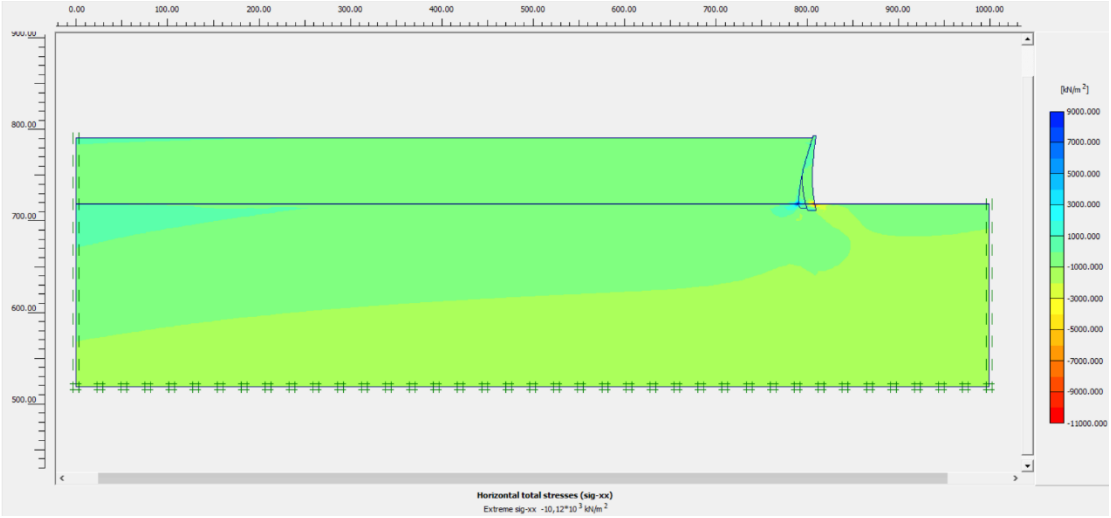
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,080 g και H = + 792 m</u>



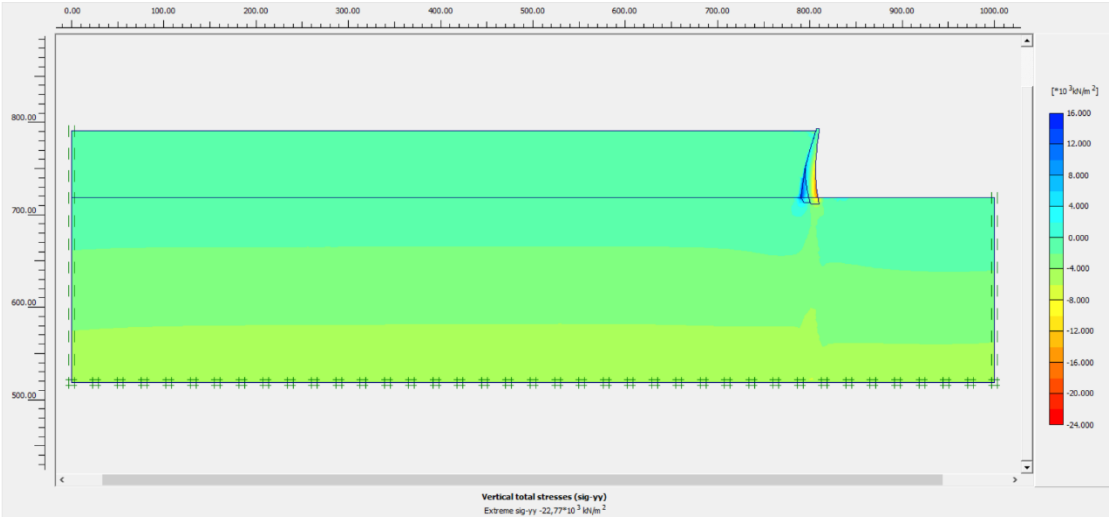
Εικόνα 4.150 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.151 Διάγραμμα μετατόπισης των σημείων D και E



Εικόνα 4.152 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.153 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

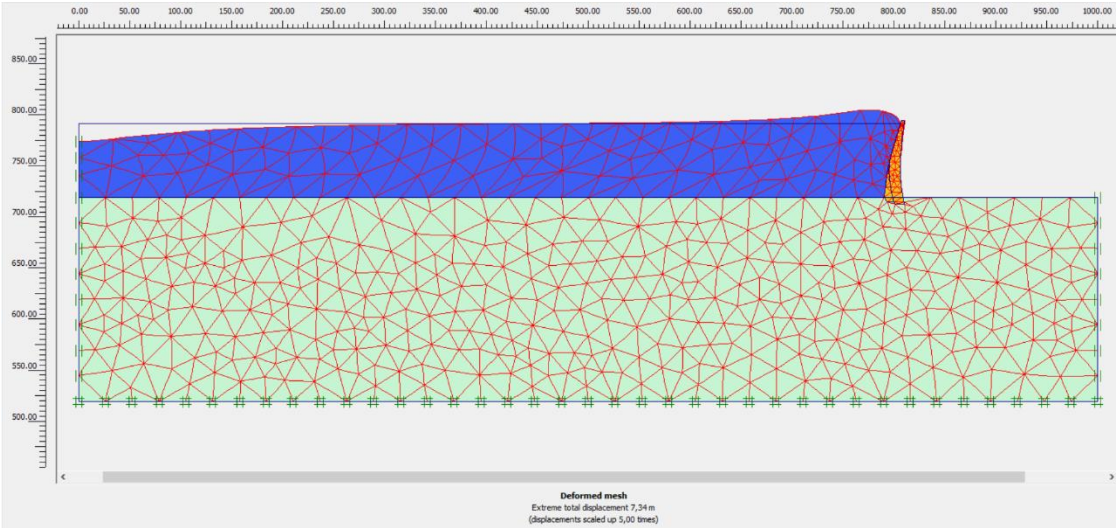
H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,08g)	-6536,7	5891	7235	-8371,9	-478,44	-1203,4

Πίνακας 4.29 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,080 g – Νερό με την μορφή υλικού

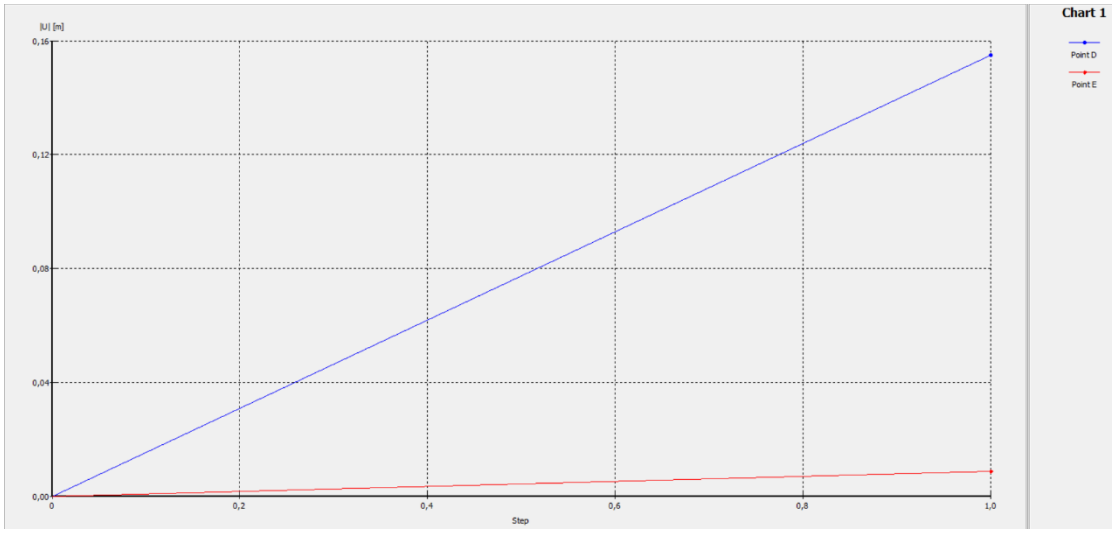
Αρχικά η μετατόπιση του σημείου D, που βρίσκεται στη στέψη του φράγματος, είναι 0,13 μέτρα, ενώ η μετατόπιση του σημείου E, που βρίσκεται στην βάση του φράγματος, είναι 0,007 μέτρα. Οι τιμές των τάσεων των σημείων A και B, που προέκυψαν για τη στάθμη ταμιευτήρα + 792 μέτρα και σεισμική επιτάχυνση – 0,080 g έχουν διπλασιαστεί σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για στάθμη ταμιευτήρα ίση με + 776 μέτρα. Στο σημείο της βάσης του φράγματος (σημείο C) παρατηρείται μικρή αύξηση της τάξης των 60 KN/m^2 των οριζόντιων ολικών τάσεων και αύξηση περίπου 100 KN/m^2 των κατακόρυφων ολικών τάσεων.

- A = ± 0,12 g – H = 792 m

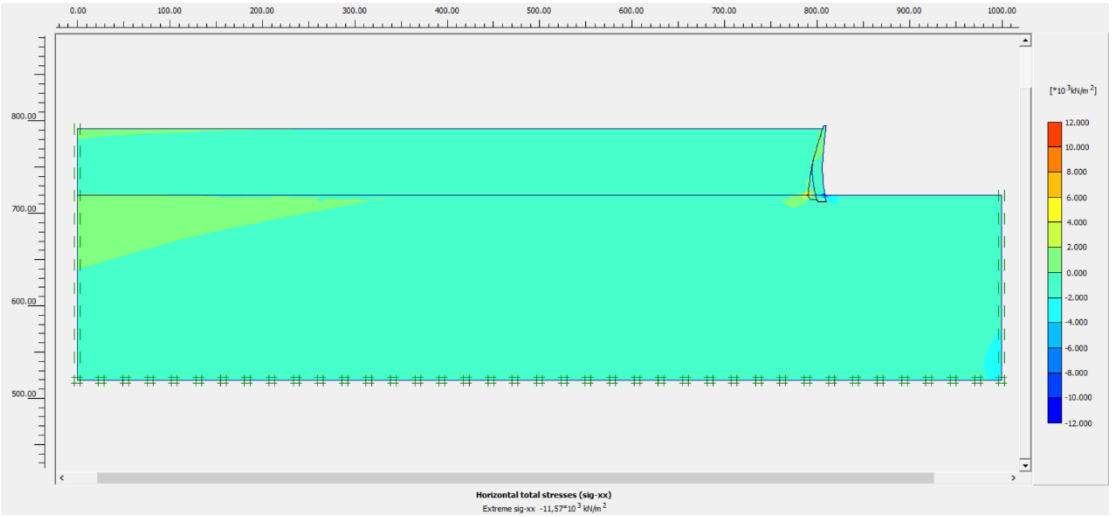
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,120 g και H = + 792 m</u>



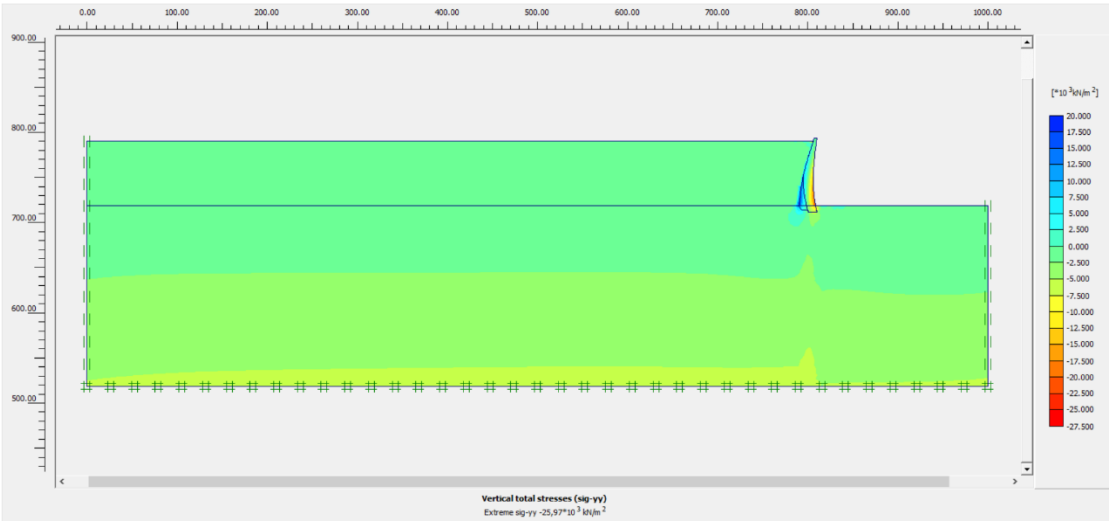
Εικόνα 4.154 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.155 Διάγραμμα μετατόπισης των σημείων D και E



Εικόνα 4.156 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.157 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

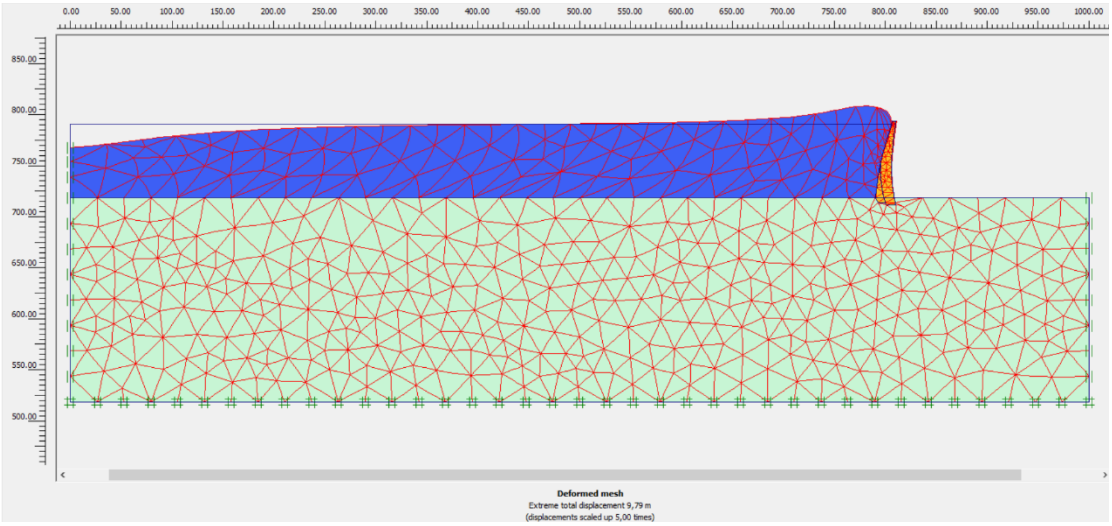
H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,12g)	-7563	6948	8381	-9553,3	-541,15	-1142,5

Πίνακας 4.30 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,120 g – Νερό με την μορφή υλικού

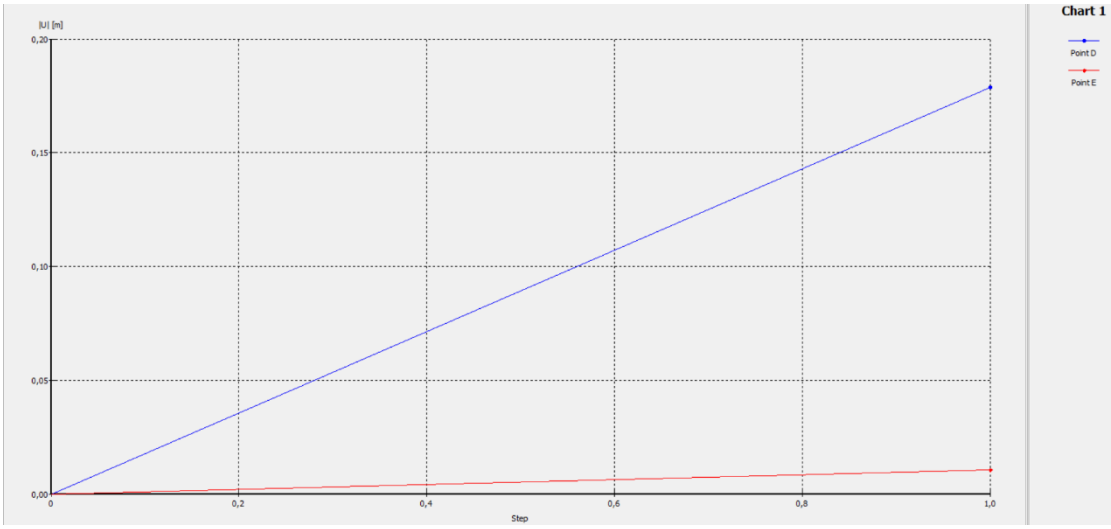
Η μετατόπιση της κορυφής του φράγματος ανέρχεται στα 0,155 μέτρα, ενώ η μετατόπιση της βάσης του φράγματος είναι 0,009 μέτρα. Όσον αφορά τις οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις των σημείων A και B επήλθε μία αύξηση της τάξης των 1000 – 1100 KN/m^2 , σε σχέση με τις τάσεις που προέκυψαν από την σεισμική επιτάχυνση – 0,080 g. Στο σημείο C υπάρχει αύξηση των οριζόντιων ολικών τάσεων κατά περίπου 60 KN/m^2 ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις μειώθηκαν κατά 60 KN/m^2.

- A = ± 0,16 g – H = 792 m

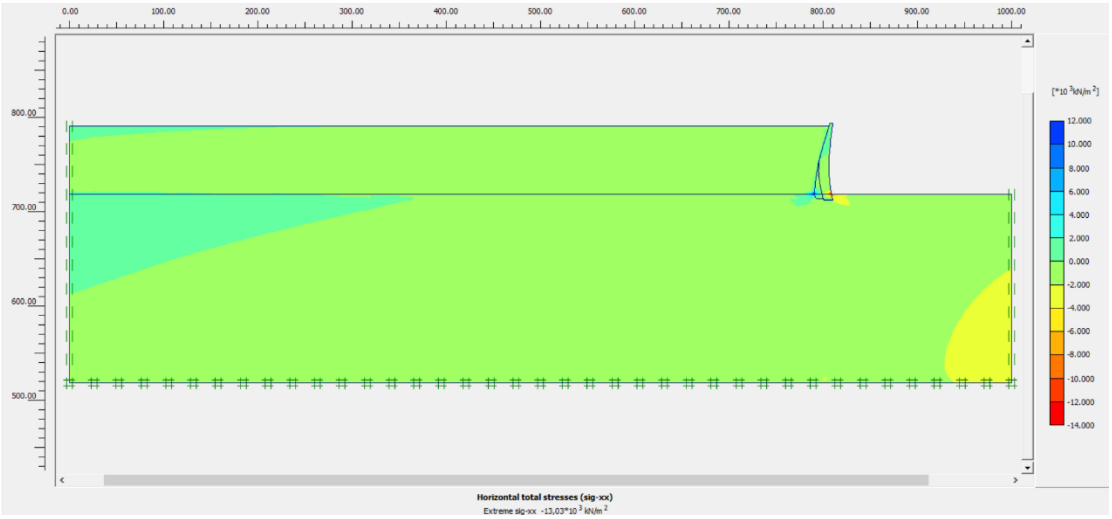
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = = 0,160 g και H = + 792 m</u>



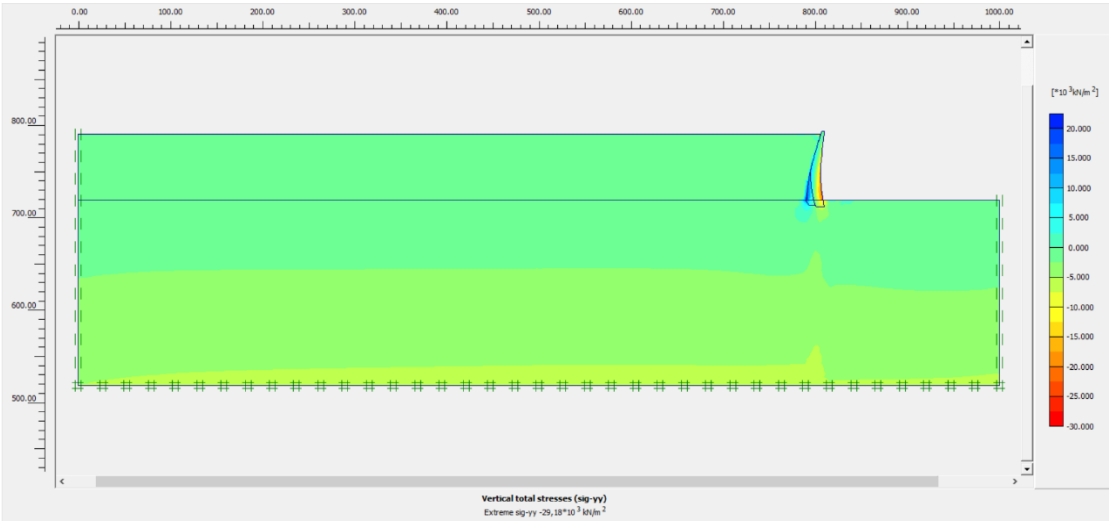
Εικόνα 4.158 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



Εικόνα 4.159 Διάγραμμα μετατόπισης των σημείων D και E



Εικόνα 4.160 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.161 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

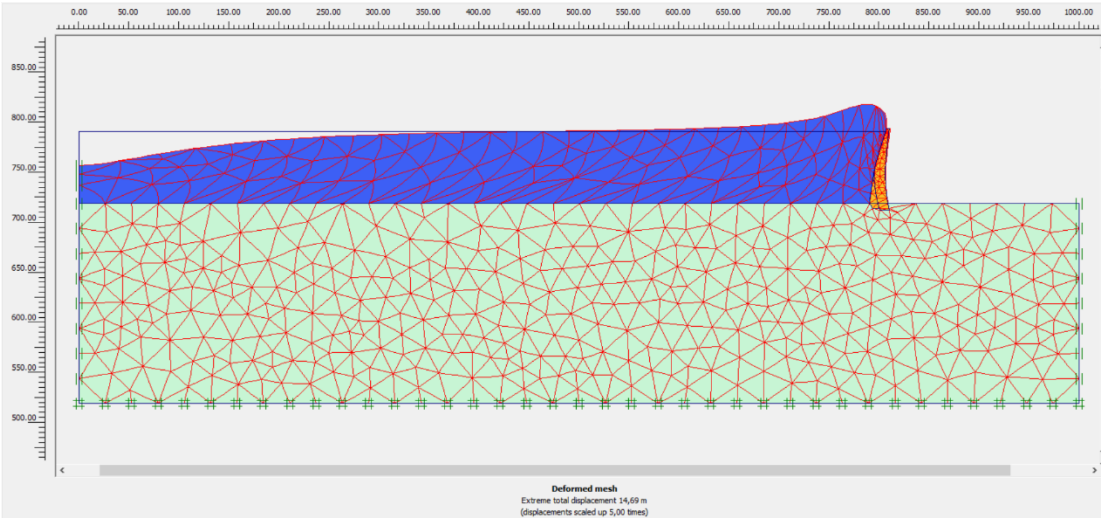
H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,16g)	-8589,3	8005	9528	-10735	-603,87	-1081,6

Πίνακας 4.31 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,160 g – Νερό με την μορφή υλικού

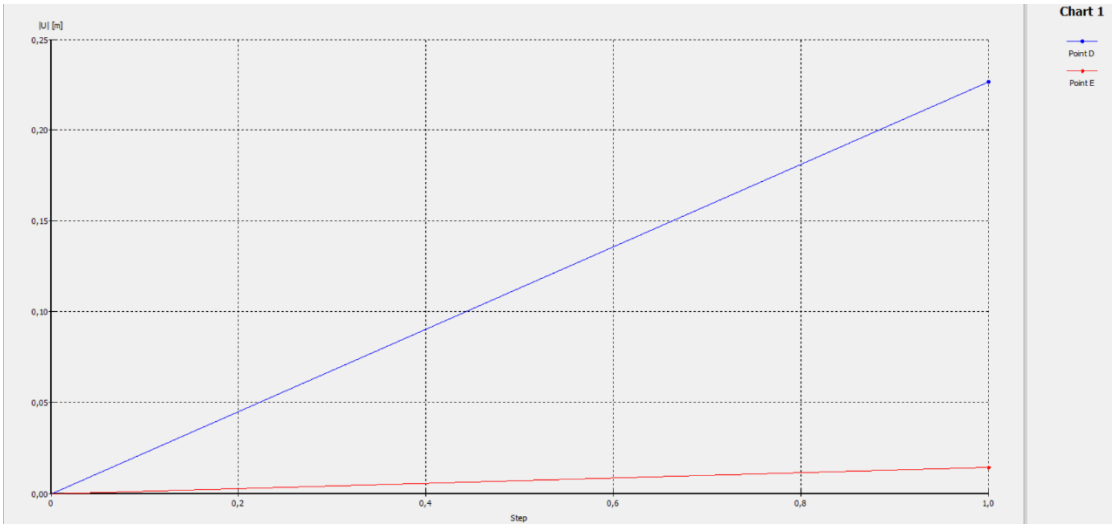
Η μετατόπιση της στέψης του φράγματος είναι 0,179 μέτρα (σημείο D) ενώ η μετατόπιση τη βάσης του φράγματος είναι 0,011 μέτρα (σημείο E). Οι τάσεις των σημείων A και B είναι αυξημένες και σε αυτήν την περίπτωση κατά 1000 με 1050 KN/m^2 σε σχέση με την προηγούμενη σεισμική επιτάχυνση, ενώ για το σημείο C ισχύουν ακριβώς τα ίδια, δηλαδή οι οριζόντιες ολικές αυξάνονται κατά 60 KN/m^2 , ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις μειώνονται κατά περίπου 60 KN/m^2 .

- A = ± 0,24 g – H = 792 m

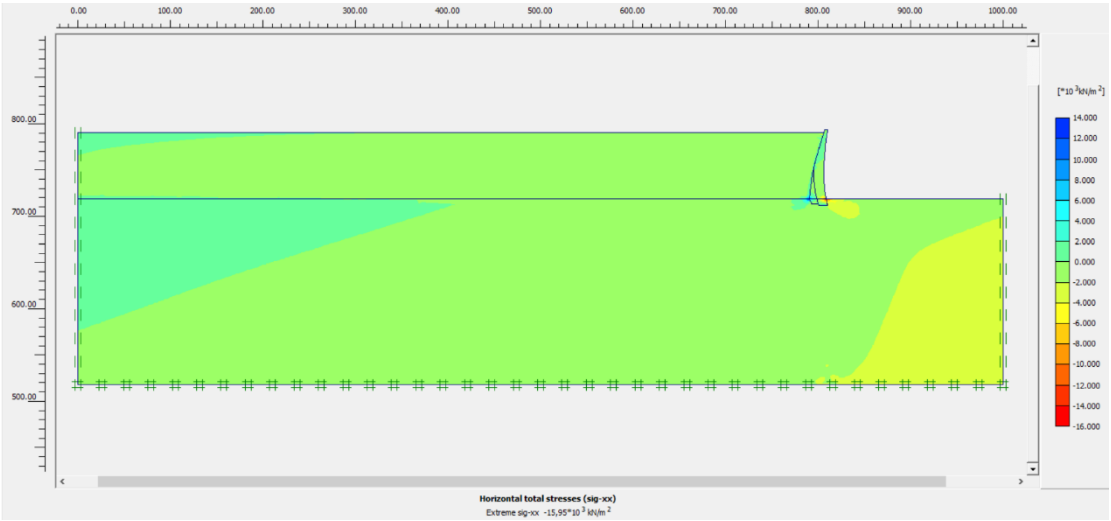
<u>Σεισμική Επιτάχυνση A = - 0,24 g και H = + 792 m</u>



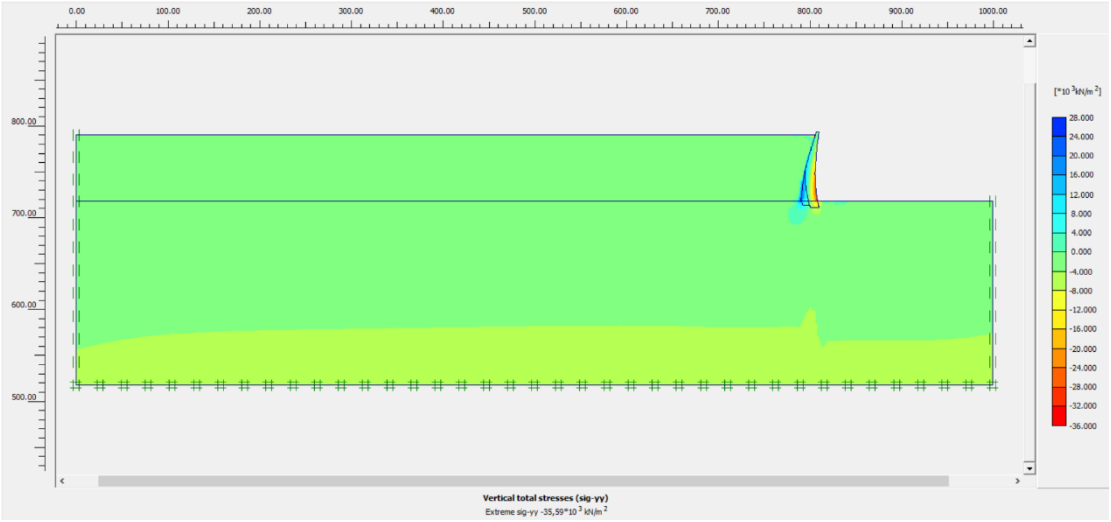
Εικόνα 4.162 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου



Εικόνα 4.163 Διάγραμμα μετατόπισης σημείων D και E



Εικόνα 4.164 Οριζόντιες ολικές τάσεις



Εικόνα 4.165 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

H = + 792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,24g)	-10642	10120	11820	-13098	-729,3	-959,9

Πίνακας 4.32 Πίνακας τάσεων των χαρακτηριστικών σημείων για σεισμική επιτάχυνση A = -0,240 g – Νερό με την μορφή υλικού

Οι μετατοπίσεις του φράγματος έχουν φτάσει την μέγιστη τιμή τους με την ψευδοστατική αυτή ανάλυση, της και οι τάσεις για τα σημεία του ανάντη και κατάντη πρανούς. Η μετατόπιση της κορυφής του φράγματος είναι 0,23 μέτρα, ενώ η μετατόπιση της βάση του φράγματος 0,014 μέτρα. Οι τάσεις των σημείων A και B έχουν αυξηθεί γύρω στα 1500 με 2000 KN/m^2 σε σχέση με τι αντίστοιχες τάσεις που προέκυψαν από την σεισμική επιτάχυνση των – 0,160 g. Οι οριζόντιες ολικές τάσεις του σημείου C (βάση του φράγματος) έχουν αυξηθεί κατά 120 KN/m^2 , ενώ οι κατακόρυφες ολικές τάσεις έχουν μειωθεί κατά 120 KN/m^2.

4.4.1.3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας ψευδοστατικών αναλύσεων με την παρουσία νερού

H = +776 m / +792 m	Σημείο A Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,08g)	-2122,8 / - 4562	2005 / 4515	2209 / 5308	-3383 / - 6384,9	-359,7 / - 373,5	-1061,9 / - 1073,4
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,12g)	-2286,3 / - 4735,3	2173 / 4694	2373 / 5497	- 3551,9 / - 6579	- 403,4 / - 417,7	-1019,1 / - 1073,4
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,16g)	-2452,5 / - 4915,2	2345 / 4879	2540 / 5692	-3723,7 / - 6780,9	-447,3 / - 462	-976,2 / -987,5
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,24g)	-2792,9 / - 5294,2	2695 / 5269	2883 / 6107	-4075,8 / - 7207,6	-535,6 / - 551,2	-890 / 901,1

Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,08g)	-3081,4 / -6536,7	2521 / 5891	3293 / 7235	-4308,9 / -8371,9	-418 / -478,44	-1074,9/-1203,4
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,12g)	-3633,7 / -7563	3090 / 6948	3896 / 8381	-4930,1 / -9553,3	-478,7 / -541,2	-1015,9 / -1142,5
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,16g)	-4186 / -8589,3	3658 / 8005	4499 / 9528	-5551,3 / -10735	-539,4 / -603,9	-956,9 / -1081,6
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,24g)	-5290,5 / -10642	4795 / 10120	5705 / 11820	-6793,7 / -13098	-660,8 / -729,3	-838,9 / -959,9

Πίνακας 4.33 Συγκεντρωτικός πίνακας ψευδοστατικών αναλύσεων με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος

Πρώτο συμπέρασμα της ανάλυσης αυτής είναι ότι το νερό επηρεάζει την ανάντη και κυρίως την κατάντη πλευρά του φράγματος η οποία είναι και η πιο κρίσιμη κατά τη διάρκεια μίας σεισμικής επιτάχυνσης.

Επόμενο συμπέρασμα είναι πως το νερό επηρεάζει σε αρκετά μικρότερο βαθμό την βάση του φράγματος, ενώ μπορεί να πει κανείς πως σε συνδυασμό με την σεισμική επιτάχυνση λειτουργεί και ευεργετικά, αφού όσο αυτή μεγαλώνει τόσο μειώνονται οι κατακόρυφες ολικές τάσεις που δέχεται η βάση.

Ένα ακόμη συμπέρασμα είναι το γεγονός ότι η μέθοδος των υπογείων υδάτων (Ground water calculation) που δίνεται από το λογισμικό Plaxis – 2D δίνει μικρότερες τιμές των τάσεων που ασκούνται στο φράγμα, σε σχέση με τη μέθοδο δημιουργίας του νερού με την μορφή υλικού. Το ποια από τις δύο μεθόδους είναι η πιο σωστή αναμένεται να αποδειχτεί, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων, που θα γίνει σε επόμενο στάδιο.

Τέλος μπορεί να πει κανείς πως και στις δύο μεθόδους η αύξηση της στάθμης του ταμιευτήρα από + 776 σε + 792 μέτρα, μπορεί να επιφέρει διπλασιασμό των τάσεων που ενεργούν στις δύο πλευρές του φράγματος (σημεία Α και Β). Ωστόσο στο σημείο της βάσης του φράγματος, C, δεν διπλασιάζονται οι τάσεις παρά μόνο αυξάνονται σε μικρό βαθμό.

4.4.2 Μέθοδος των τάσεων – παραμορφώσεων (Δυναμικές Αναλύσεις)

Η μέθοδος αυτή είναι πιο ακριβής από τη μέθοδο των ψευδοστατικών αναλύσεων και εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με στόχο τον υπολογισμό των αδρανειακών επιταχύνσεων που ενεργούν στο σώμα του φράγματος (και του προσομοιώματος) αλλά και των παραμορφώσεων που δημιουργούνται σε αυτό κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Πρόκειται για μία μέθοδο αρκετά δαπανηρή και για το λόγο αυτό επιλέγεται μόνο για μεγάλα φράγματα, των οποίων οι περιπτώσεις αστοχιών μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπανόρθωτες βλάβες για τα ίδια και για την φύση. Επίσης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το φράγμα εδράζεται πάνω σε ενεργά ρήγματα.

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και απαιτεί μεγάλες βάσεις δεδομένων και δεξιότητες του χειριστή. Απαιτείται ακριβής χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς τάσεων – παραμορφώσεων των υλικών στο προσομοίωμα καθώς και το ιστορικό των σεισμών που αντιπροσωπεύουν τον σεισμό σχεδιασμού της ευρύτερης περιοχής της κατασκευής. Επίσης τα προσομοιώματα απαιτείται να είναι αντιπροσωπευτικά της κατασκευής και του εδάφους στο οποίο αυτή εδράζεται.

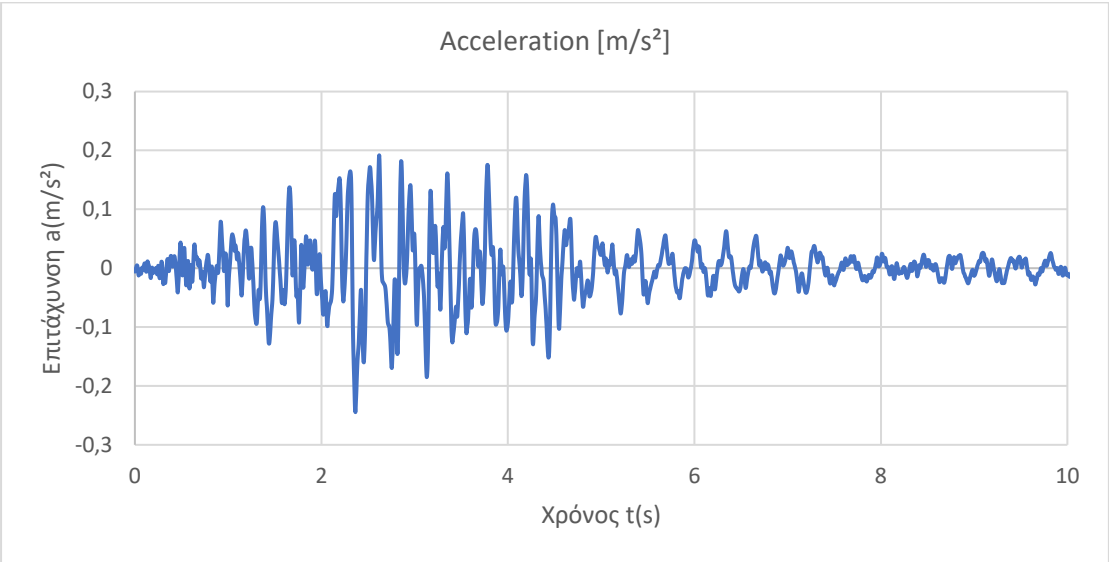
Για το αριθμητικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο πρώτο στάδιο των αναλύσεων (στατικών), προσδιορίζεται η δυναμική απόκριση του προσομοιώματος (φράγμα και έδαφος θεμελίωσης) χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σεισμικές διεγέρσεις :

1. Παλμός Ricker των 2Hz
2. Πραγματική σεισμική δόνηση (225A του λογισμικού Plaxis – 2D)

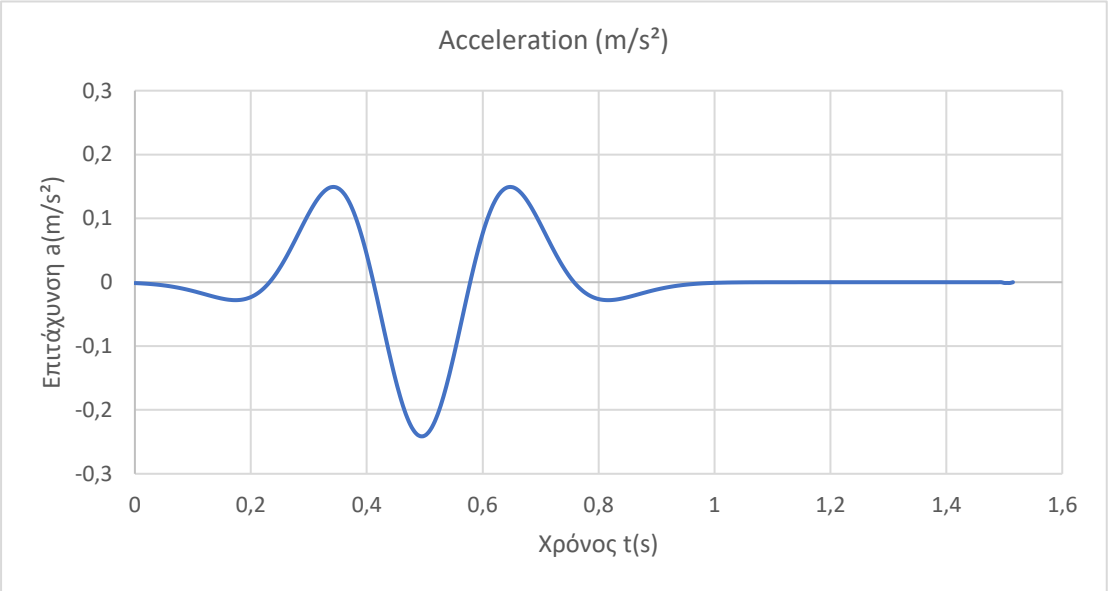
Οι σεισμικές δονήσεις αυτές αντιπροσωπεύουν σεισμούς μεγέθους και μέγιστης επιτάχυνσης παρόμοιας με εκείνα του σεισμικού σχεδιασμού της περιοχής της Καρδίτσας (ευρύτερη περιοχή του φράγματος).

Στην βάση του μοντέλου τοποθετήθηκε μία οριζόντια φόρτιση και εκατέρωθεν τοποθετήθηκαν δύο απορροφητικά όρια ώστε να μην είναι δυνατή η ανάκλαση της οριζόντιας δυναμικής φόρτισης. Η απόσβεση του υλικού του φράγματος λαμβάνεται και πάλι υπόψη μέσω των σταθερών του Rayleigh. Για απόσβεση υλικού $\xi = 5\ \%$ και ιδιοπερίοδο- $T = 0,5$ sec, οι σταθερές a και b προκύπτουν ίσες με 0,419 και 0,005 αντίστοιχα και παρέμειναν αμετάβλητες καθ’ όλη τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Για το υλικό της εδαφικής στρώσης δεν λήφθηκε υπόψη η απόσβεση υλικού, καθώς έπειτα από δοκιμές δεν προ έκυπτε κάποια διαφορά της αναλύσεις. Της θεωρήθηκε πως το φράγμα παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά και δεν υπάρχουν μόνιμες παραμορφώσεις λόγω σεισμικής δόνησης.

Η κάθε σεισμική διέγερση εφαρμόστηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα για χρονική διάρκεια 10 δευτερολέπτων. Παρακάτω παρατίθενται οι χρονοϊστορίες των σεισμικών διεγέρσεων.



Διάγραμμα 4.1 Χρονοϊστορία επιτάχυνσης σεισμικής διέγερσης 225A

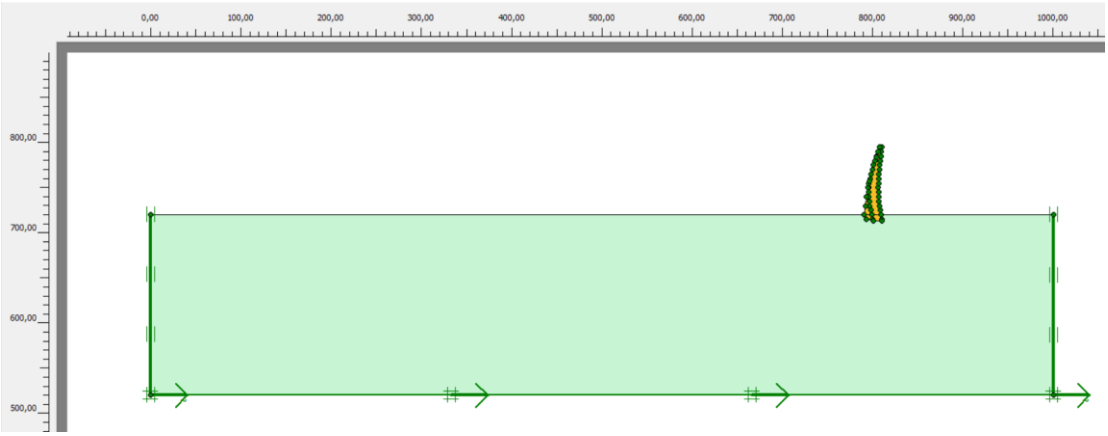


Διάγραμμα 4.2 Χρονοϊστορία του παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα f = 2 Hz

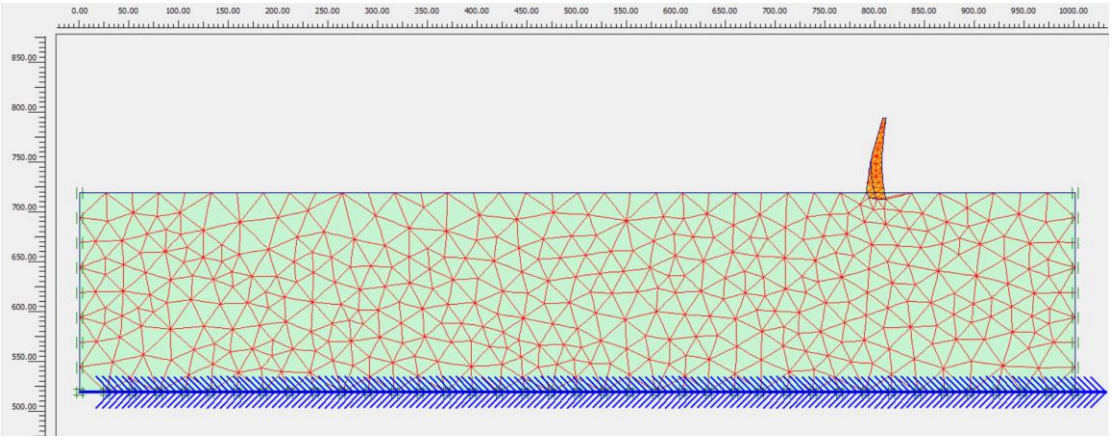
Η χρονοϊστορία της σεισμικής επιτάχυνσης του παλμού Ricker (f=2Hz) από το 1,515 sec και πέρα δίνει επιτάχυνση ίση με το 0 και για το λόγο αυτό δεν συνεχίζεται το διάγραμμα μέχρι τα 10 sec, στην ουσία δηλαδή θα ήταν μία ευθεία γραμμή.

4.4.2.1 Δυναμική Ανάλυση χωρίς την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος

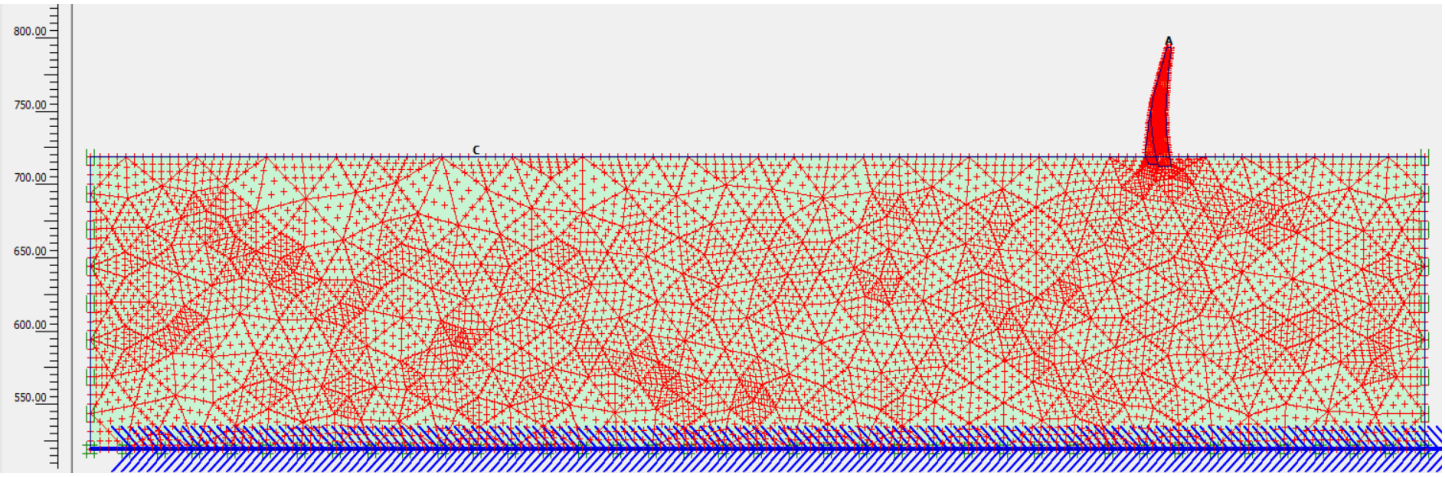
Μέθοδος τάσεων – παραμορφώσεων χωρίς την παρουσία νερού – Ricker (f=2Hz)



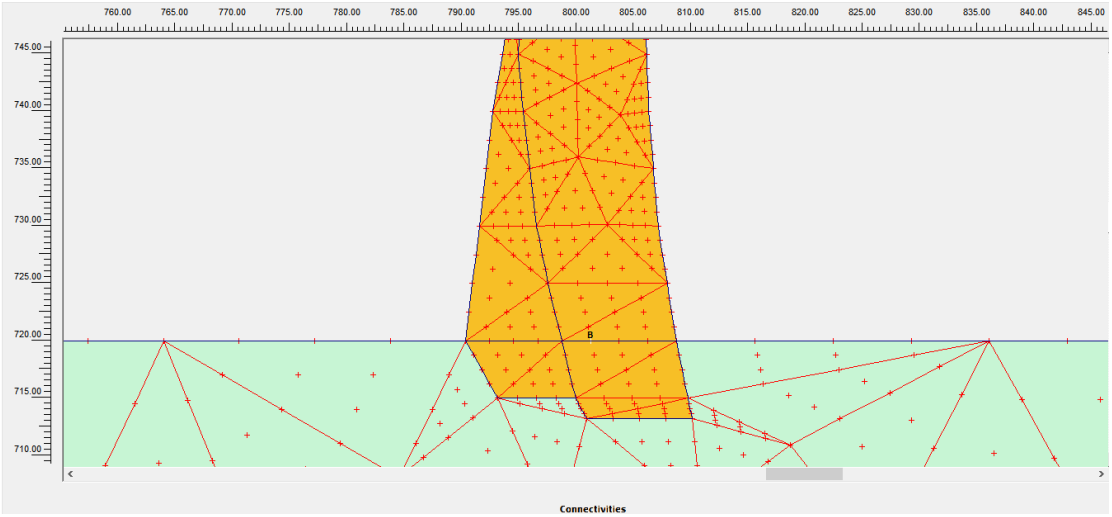
Εικόνα 4.166 Αριθμητικό προσομοίωμα



Εικόνα 4.167 Δίκτυο προσομοιώματος

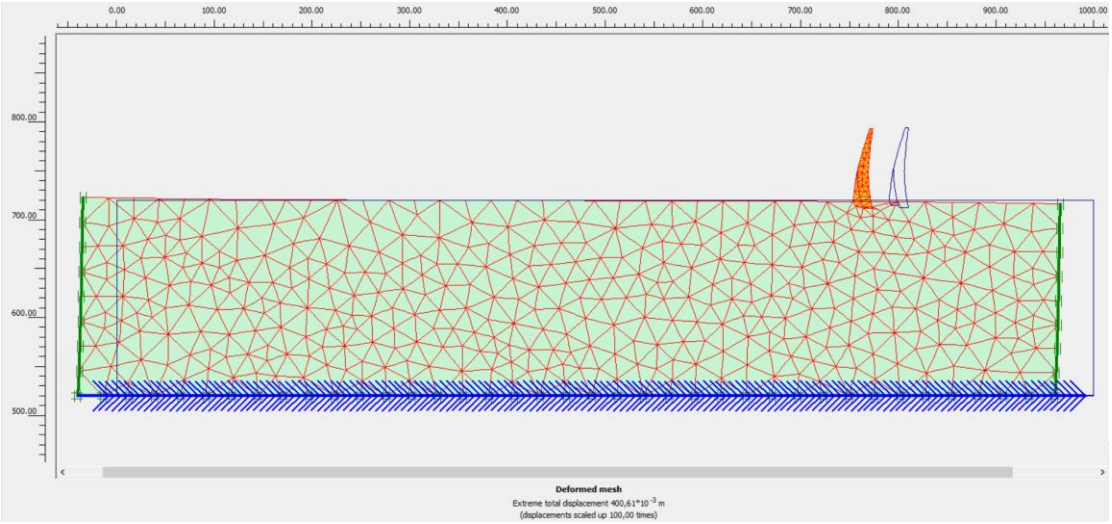


Εικόνα 4.168 Χαρακτηριστικά σημεία του προσομοιώματος για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης (A και C)



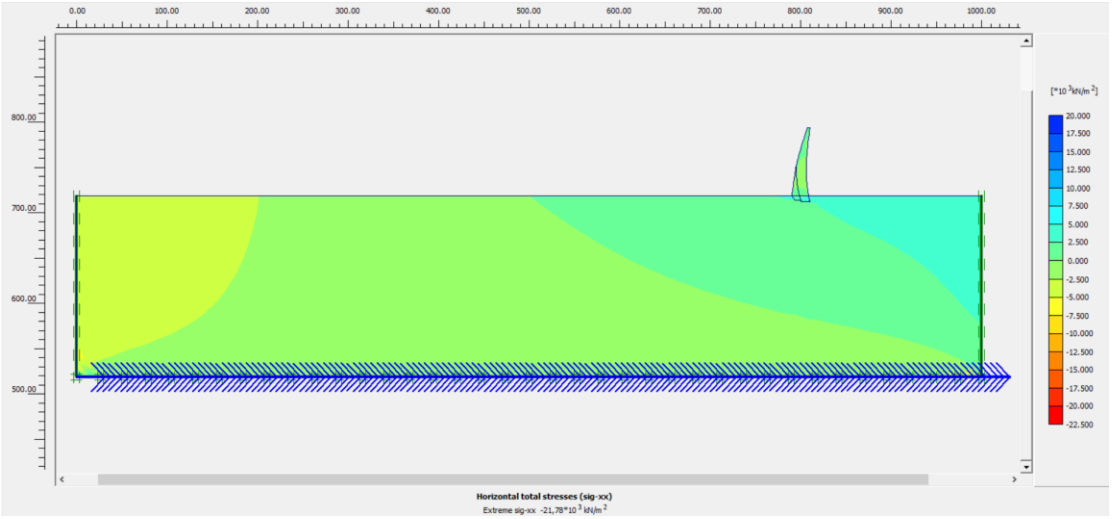
Εικόνα 4.169 Χαρακτηριστικά σημεία του προσομοιώματος για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης (B)

Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται πάνω στο φράγμα και στην εδαφική στρώση κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Το A βρίσκεται στην κορυφή του φράγματος, το B στην βάση του ενώ το C σε σημείο της τα αριστερά του μοντέλου πάνω στην εδαφική στρώση.

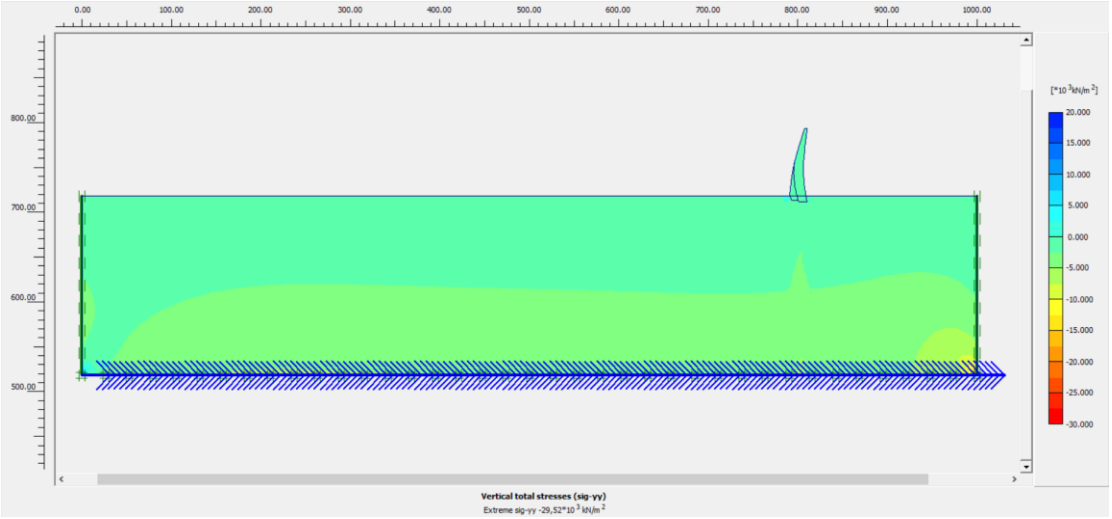


Εικόνα 4.170 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος

Το δίκτυο του μοντέλου παρόλο που η σεισμική δόνηση εφαρμόστηκε από τα αριστερά της τα δεξιά, φαίνεται να μετακινείται της τα αριστερά. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης του προσομοιώματος είναι 0,4 μέτρα.



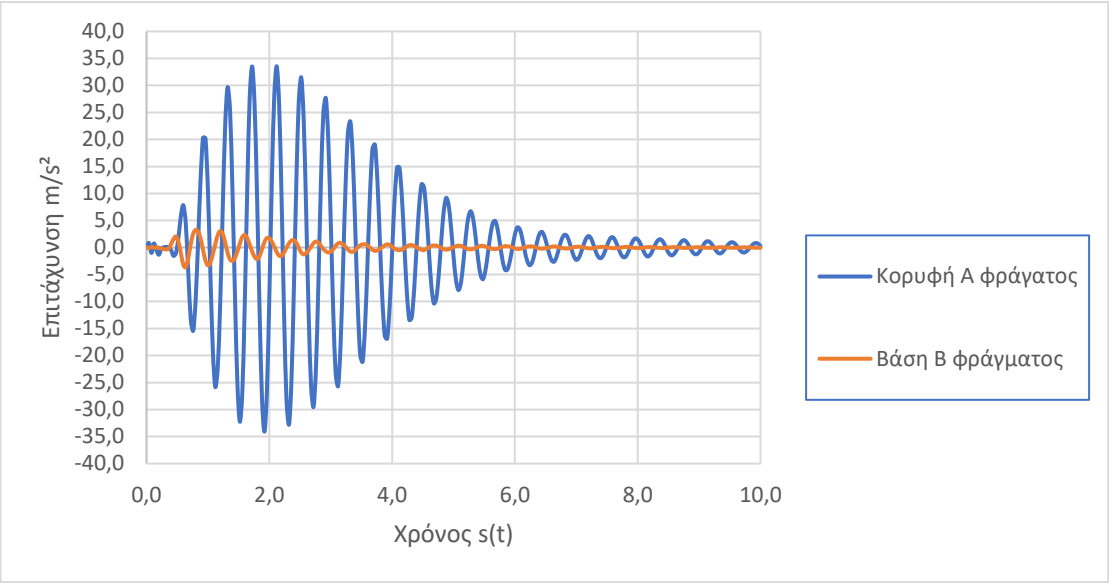
Εικόνα 4.171 Οριζόντιες ολικές τάσεις



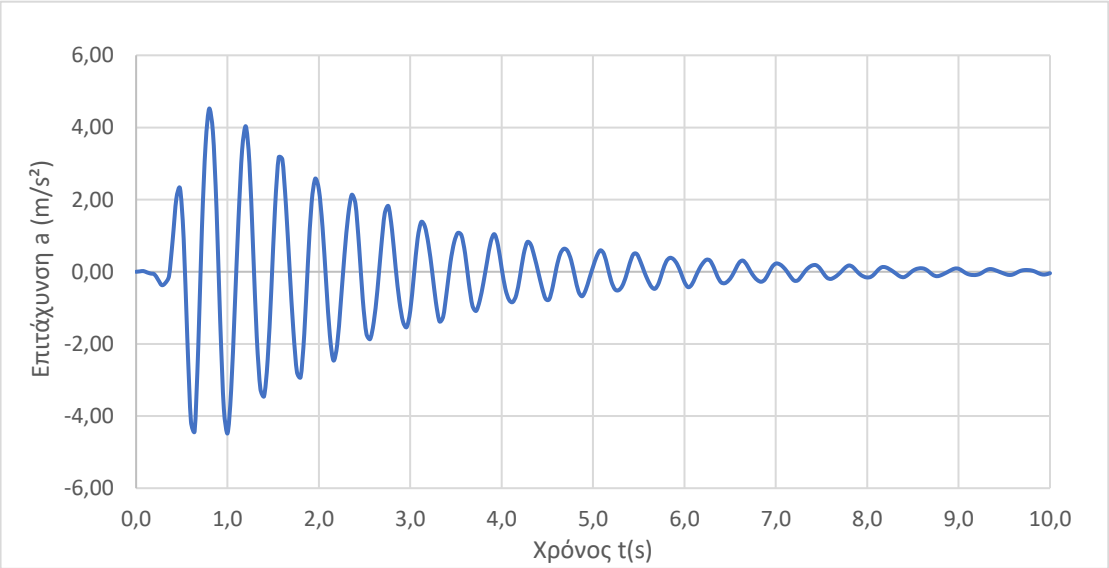
Εικόνα 4.172 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Οι κατακόρυφες τάσεις στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν, γύρω στα 1800 KN/m² , αφού [h * γ = (794,7-720) * 24 = 1792,8 KN/m² , όπου γ το ειδικό βάρος του σκυροδέματος].

<u>Ακολουθούν οι επιταχύνσεις, τα φάσματα Fourier και απόκρισης.</u>



Διάγραμμα 4.3 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β



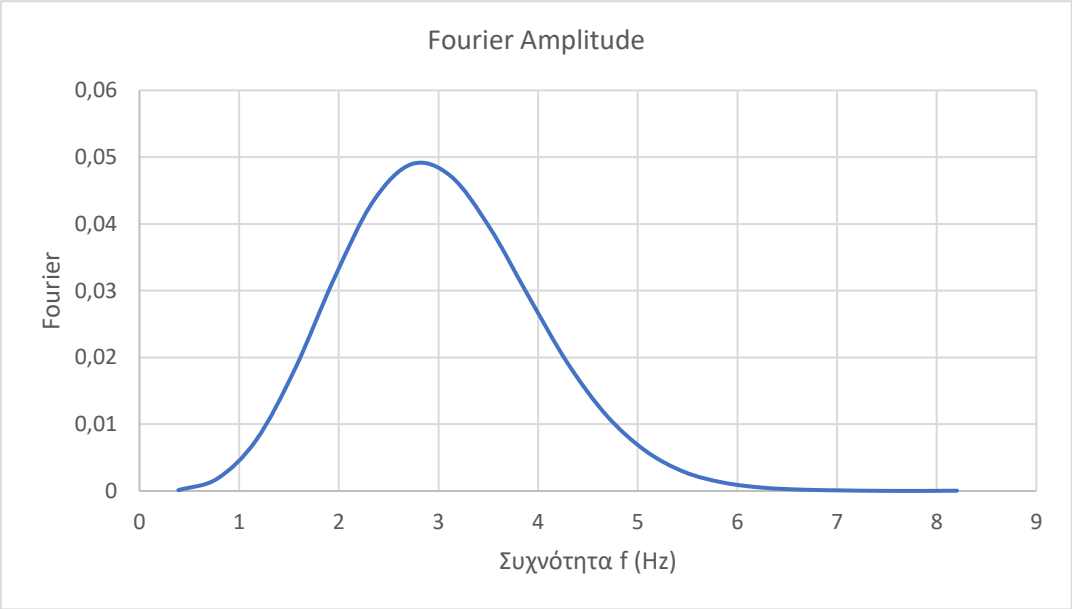
Διάγραμμα 4.4 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας κορυφής της εδαφικής στρώσης σημείο C

Το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στο σημείο Α ισούται με 33,6 m/s^2 και το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στο σημείο C ισούται με 4,52 m/s^2 , γεγονός πολύ ανησυχητικό για την συνέχεια των αναλύσεων, αφού οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται είναι απίστευτα μεγάλες και θα έχουν καταστρεπτικές συνέπειες για το φράγμα, ενώ ακόμη δεν έχει προστεθεί το νερό.

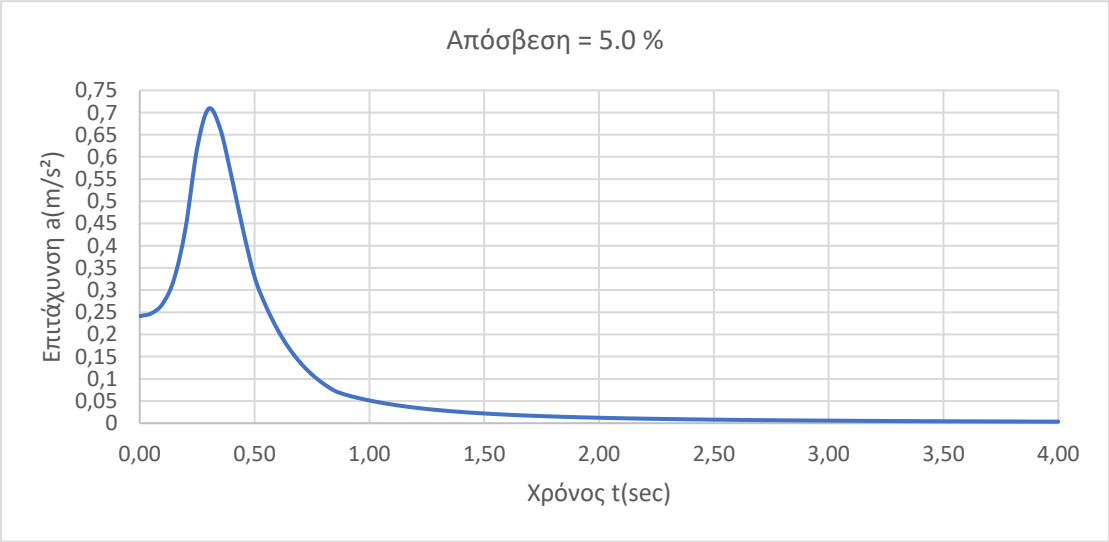
Για το λόγω αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής ενίσχυσης μέσω του λογισμικού SeismoSignal της εταιρίας SeismoSoft, ώστε να εξεταστεί εάν και εφόσον ο συντελεστής απόσβεσης του υλικού του φράγματος επιλέχθηκε σωστά ή ήταν μια λανθασμένη επιλογή. Το λογισμικό αυτό αποτελεί έναν αποτελεσματικό και γρήγορο τρόπο επεξεργασίας δυναμικών δεδομένων. Το λογισμικό αυτό φιλτράρει δεδομένα συχνότητας και ξεχωρίζει της συχνότητες που δεν είναι χρήσιμες της υπολογισμούς. Το λογισμικό αυτό υπολογίζει φάσματα Fourier και φάσματα απόκρισης που ενδιαφέρουν για της ανάγκες της παρούσας διπλωματικής. Της δίνει την δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης των φασμάτων Fourier.

Για την δημιουργία των φασμάτων Fourier χρειάζονται τα αντίστοιχα φάσματα χρονοϊστοριών στα χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου που έχουν ήδη επιλεχθεί. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής ενίσχυσης AF στο σύστημα. Ο συντελεστής ενίσχυσης είναι ο λόγος του φάσματος Fourier στην κορυφή του φράγματος της το φάσμα Fourier στη βάση του. Το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται ο συντελεστής ενίσχυσης AF αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος.

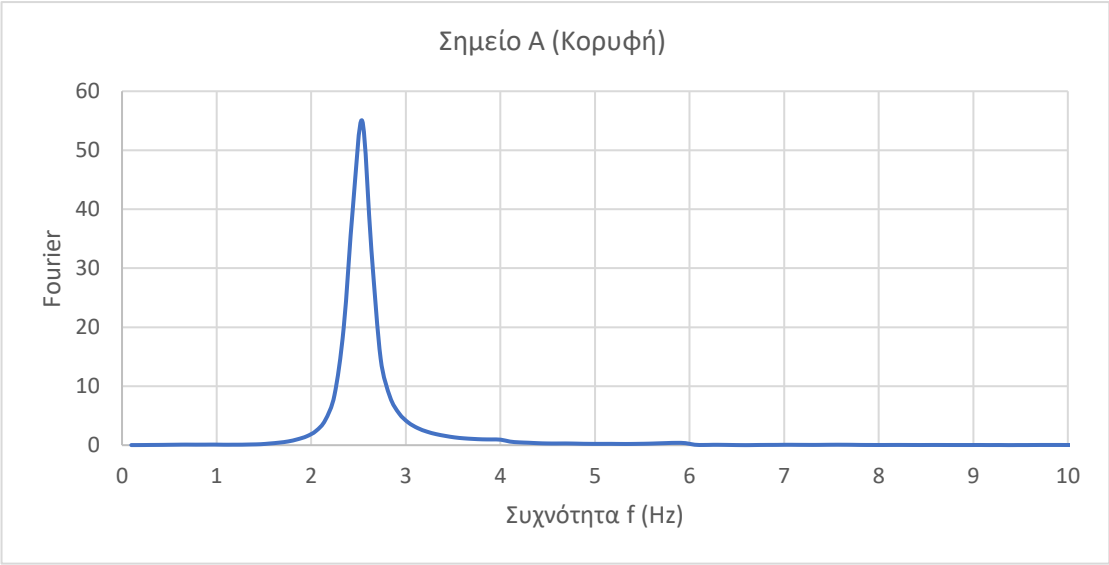
$$AF\ (f) = \frac{Fourier\ Amplitude\ (f),\ Point\ A}{Fourier\ Amplitude\ (f),\ Point\ B}$$



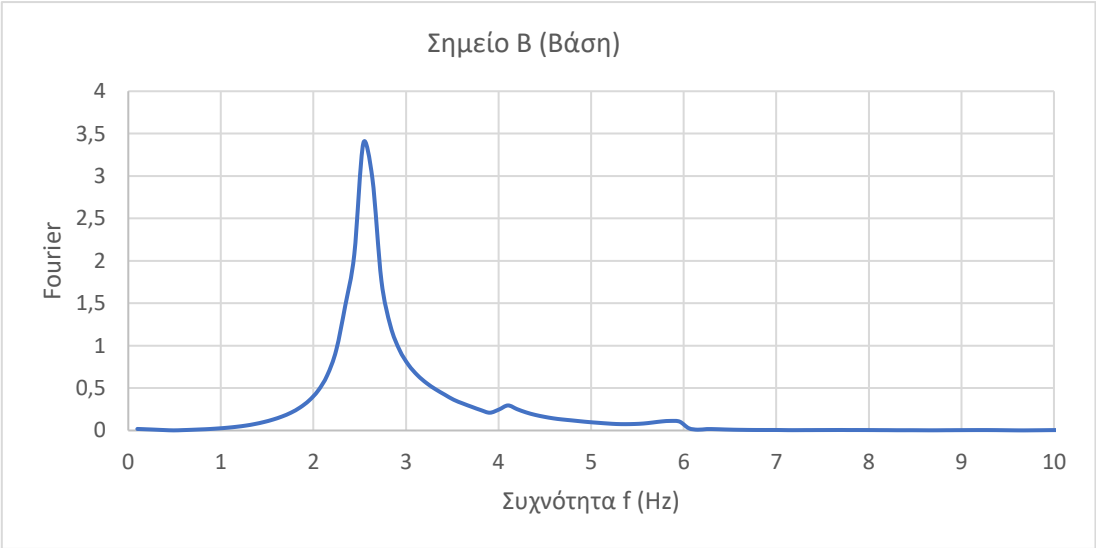
Διάγραμμα 4.5 Το φάσμα Fourier της σεισμικής δόνησης του παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα τα 2 Hz



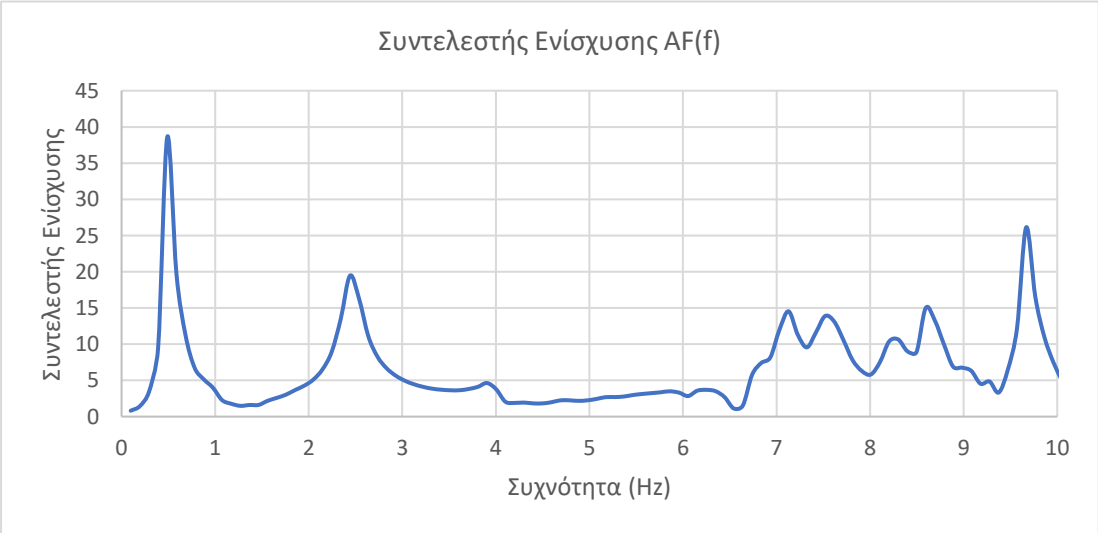
Διάγραμμα 4.6 Φάσμα Απόκρισης της σεισμική δόνησης του παλμού Ricker (f=2Hz) για απόσβεση 5 %



Διάγραμμα 4.7 Το φάσμα Fourier του σημείου Α (κορυφή του φράγματος)



Διάγραμμα 4.8 Το φάσμα Fourier του σημείου Β (βάση του φράγματος)



Διάγραμμα 4.9 Συντελεστής ενίσχυσης AF(f) φράγματος

Παρατηρείται ότι το φάσμα Fourier στα 2,5 Hz περίπου εικοσαπλασιάζεται στην κορυφή σε συγκριτικά με το αντίστοιχα φάσμα στην βάση του φράγματος. Πιο συγκεκριμένα 16πλασιάζεται στα 2,54 Hz.

Ο μέγιστος συντελεστής ενίσχυσης AF ισούται με 38,6 στα 0,49 Hz, ωστόσο δεν θεωρείται το σημείο στο οποίο υπάρχει ιδιοσυχνότητα καθώς το φάσμα Fourier δεν δίνει τόσο αξιόπιστα αποτελέσματα για συχνότητες μικρότερες του 2. Για το λόγο αυτό ιδιοσυχνότητα παρατηρείται στα 2,44 Hz με συντελεστή ενίσχυσης AF = 19,5. Ιδιοσυχνότητα της υπάρχει στα 7,1 Hz με συντελεστή ενίσχυσης AF = 14,5 και στα 9,7 Hz με συντελεστή ενίσχυσης 26,1 ωστόσο σε αυτές της περιπτώσεις ισχύει πως μετά τα 4 με 5 Hz τα αποτελέσματα δεν της είναι χρήσιμα.

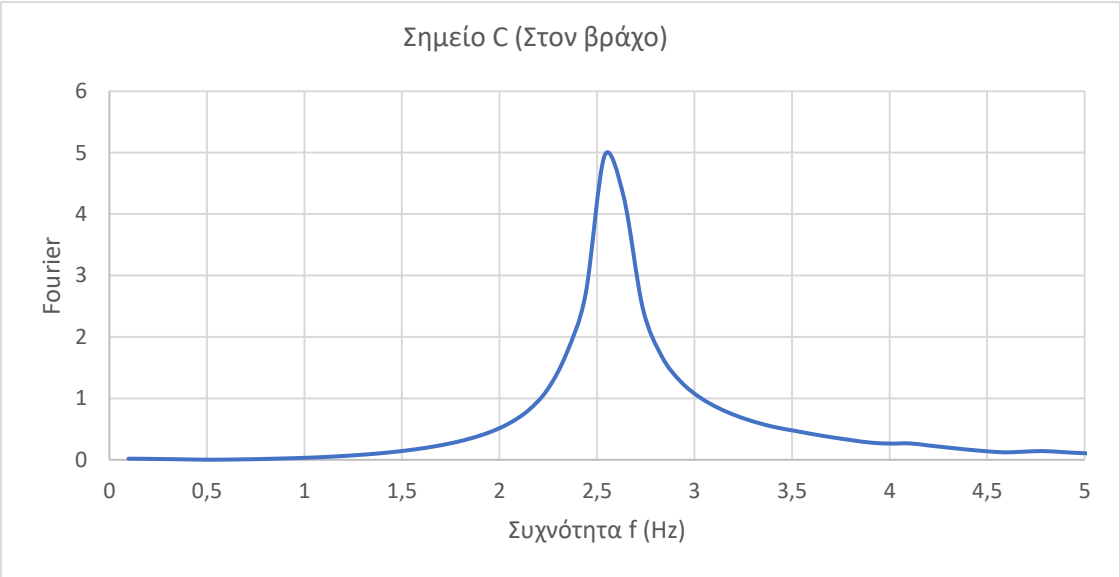
Για την εδαφική στρώση ισχύει ότι η ιδιοσυχνότητα δίνεται από την σχέση :

$$fs = \frac{Vs}{4*H}$$

η οποία υπάρχει στην βιβλιογραφία (Gazetas 1983, Mylonakis et al. 2006).

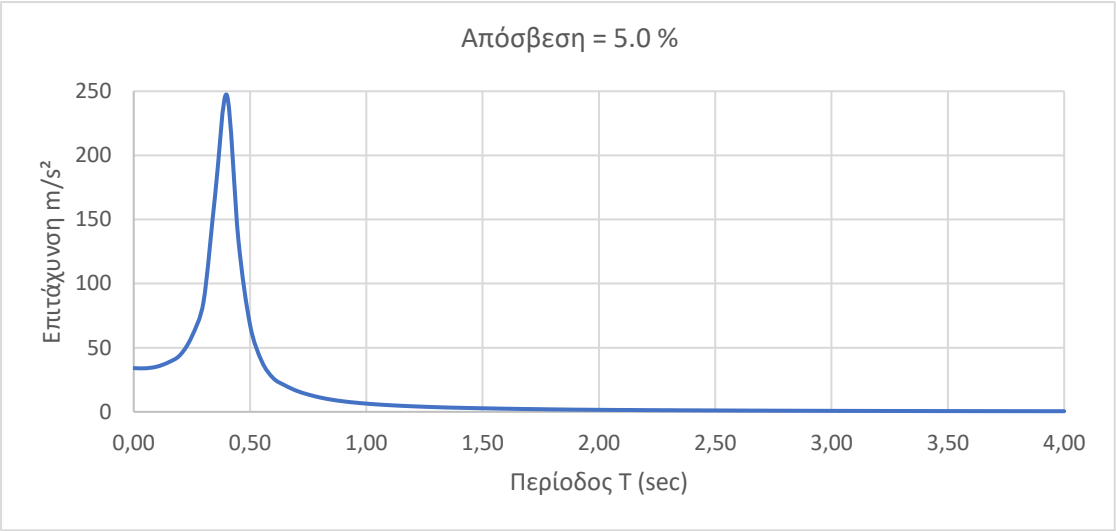
$$Fs = \frac{1617}{4*200} = 2{,}02 \text{ Hz}$$

Επομένως η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος θα είναι ίση με 2 Hz.

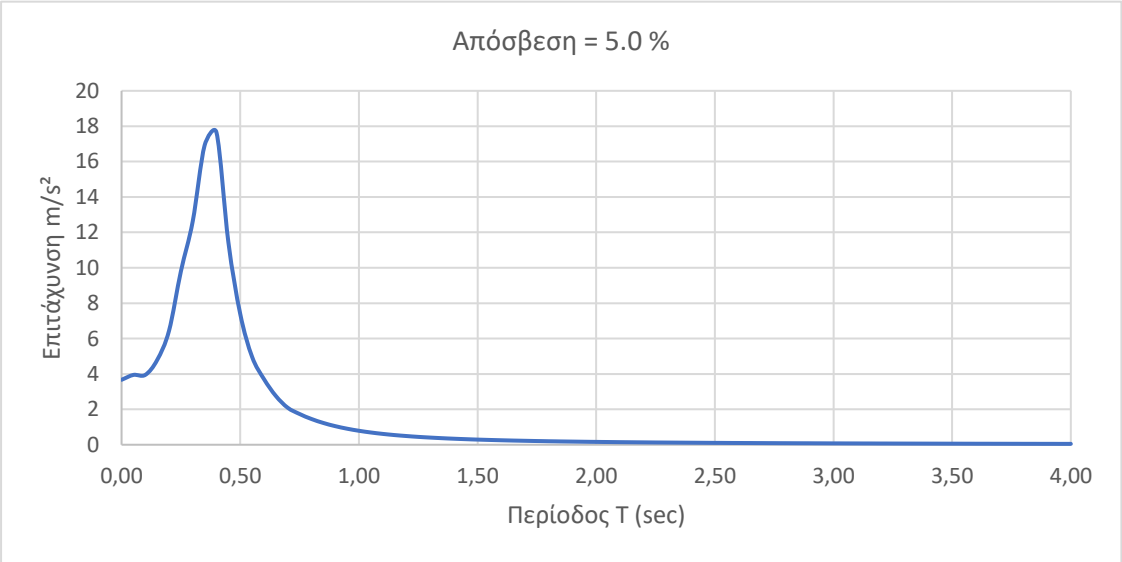


Διάγραμμα 4.10 Το φάσμα Fourier του σημείου C (εδαφική στρώση)

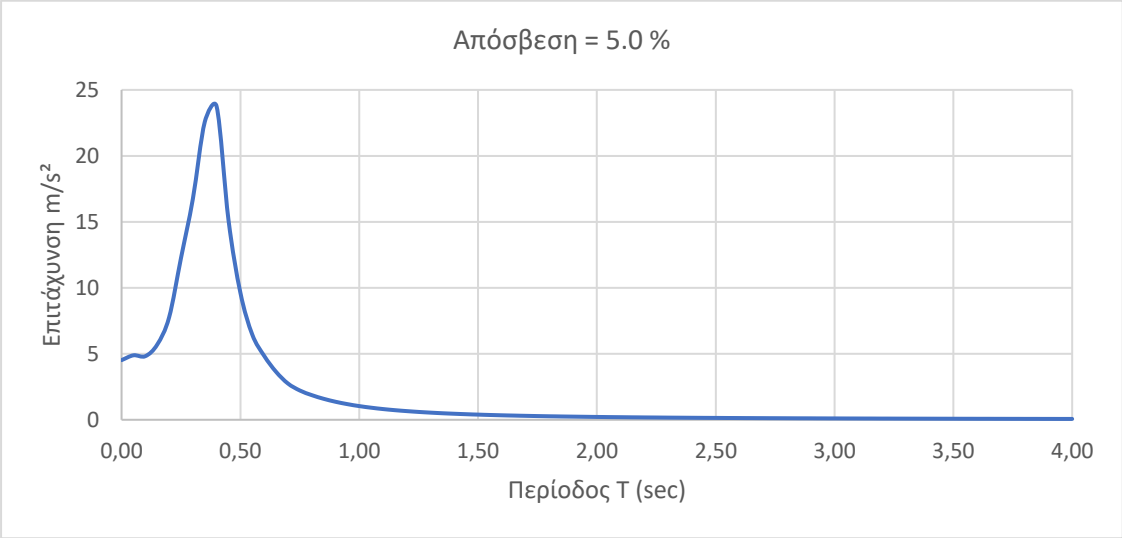
Παρόλα αυτά αποδεικνύεται πως η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης παρατηρείται στα 2,5 Hz, γεγονός που της δείχνει πως το σημείο B και το C συντονίζονται ή καλύτερα επηρεάζονται από το φράγμα.



Διάγραμμα 4.11 Φάσμα απόκρισης σημείου Α (κορυφή φράγματος) για απόσβεση 5%



Διάγραμμα 4.12 Φάσμα απόκρισης σημείου Β (βάση φράγματος) για απόσβεση ίση με 5%

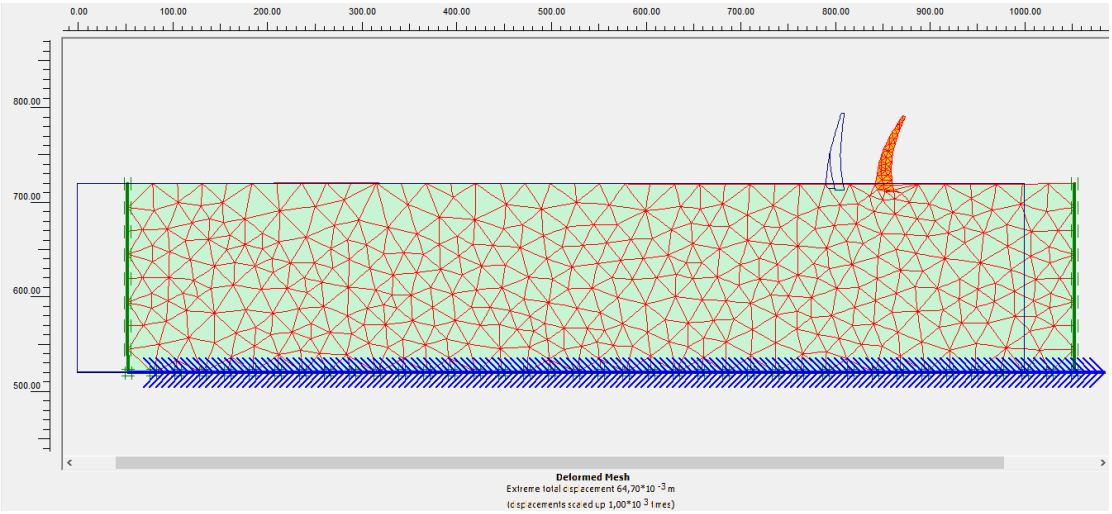


Διάγραμμα 4.13 Φάσμα απόκρισης σημείου C (εδαφική στρώση) για απόσβεση ίση με 5%

Από τα φάσματα απόκρισης των 3 χαρακτηριστικών σημείων προκύπτει πως οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων αρχικά είναι πολύ μεγάλες και δευτερευόντως σημειώνονται 0,1 sec αργότερα απ' ότι αναμενόταν, αν δει κανείς το διάγραμμα 4.6 που αφορά στο φάσμα απόκρισης της σεισμικής διέγερσης του παλμού Ricker (f = 2 Hz). Η επιτάχυνση που προκύπτει από το φάσμα απόκρισης του σημείου Α είναι σχεδόν 14 φορές μεγαλύτερη από την επιτάχυνση του σημείου Β.

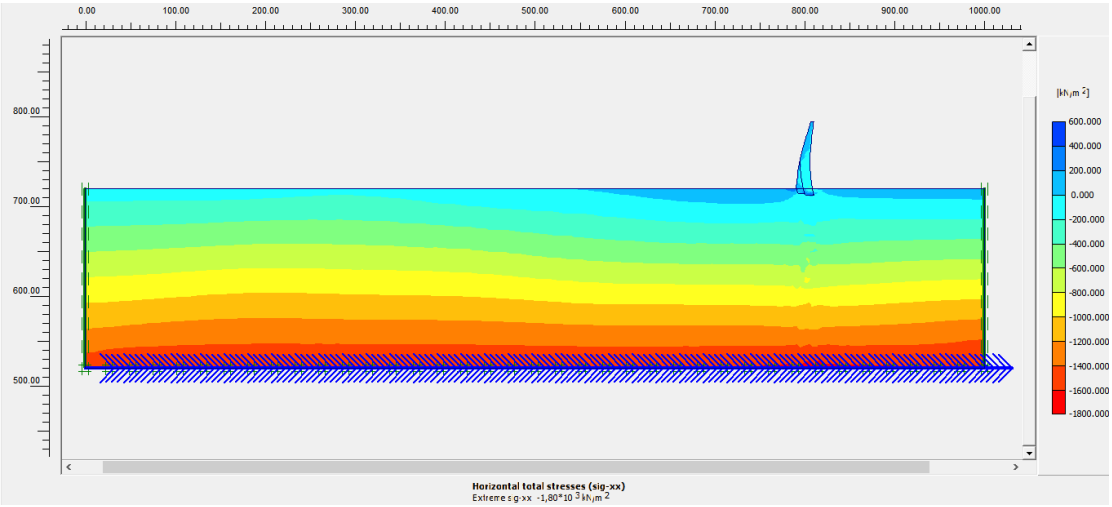
Επόμενο βήμα είναι να βρεθούν τα φάσματα Fourier και για την σεισμική διέγερση 225Α του λογισμικού Plaxis – 2D, ώστε να βρεθεί εάν υπάρχει ενίσχυση.

<u>Μέθοδος τάσεων – παραμορφώσεων χωρίς την παρουσία νερού – σεισμική διέγερση 225Α</u>

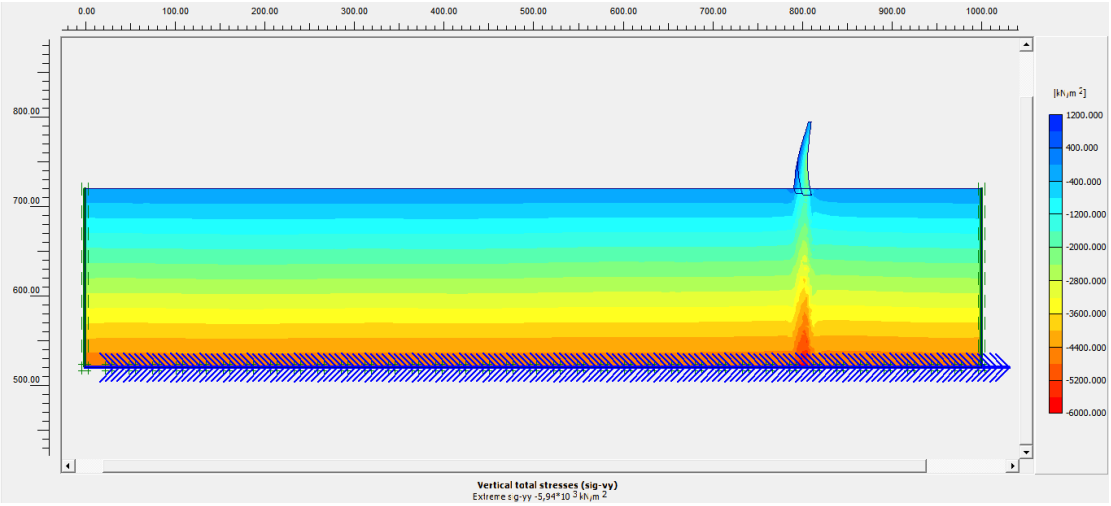


Εικόνα 4.173 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου

Η μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος του φράγματος και της εδαφικής στρώσης είναι 64,7*10^{-3} m, δηλαδή 0,0065 μέτρα ή περίπου 7 χιλιοστά. Η μετατόπιση αυτή είναι μικρότερη από την μετατόπιση που προέκυψε από την σεισμική διέγερση του παλμού Ricker (f = 2 Hz) και μοντέλο μετατοπίζεται της τα δεξιά, ανάποδα δηλαδή σε σχέση με την προηγούμενη διέγερση.



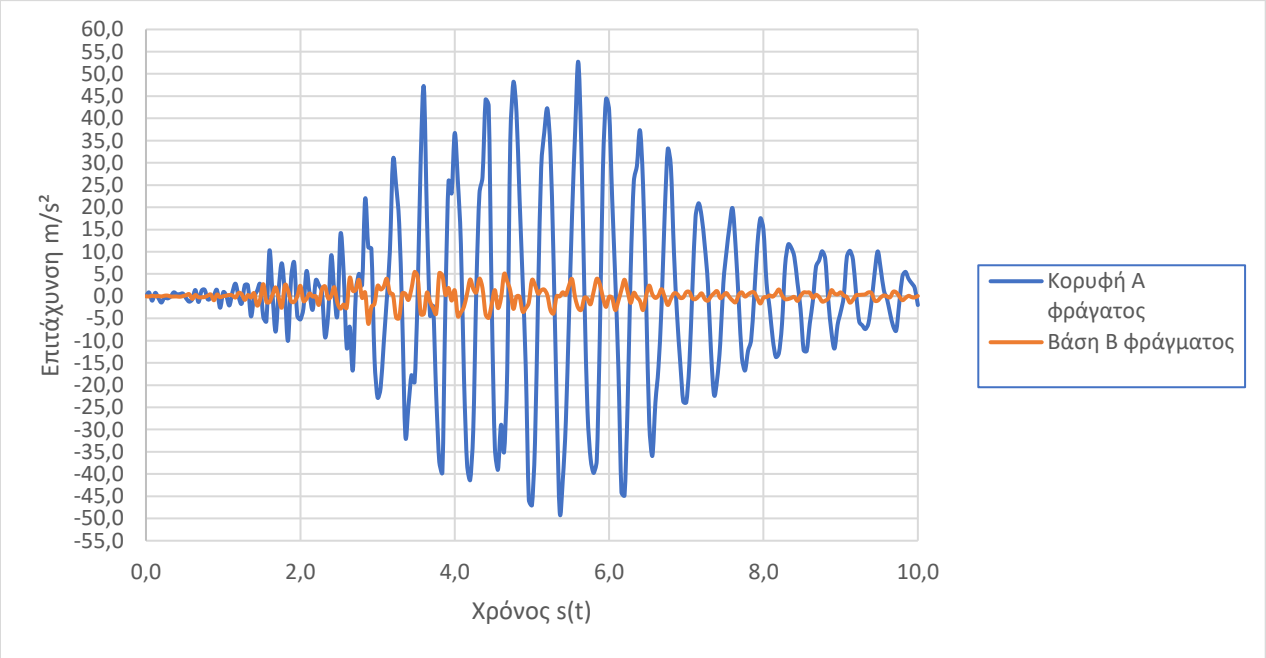
Εικόνα 4.171 Οριζόντιες ολικές τάσεις



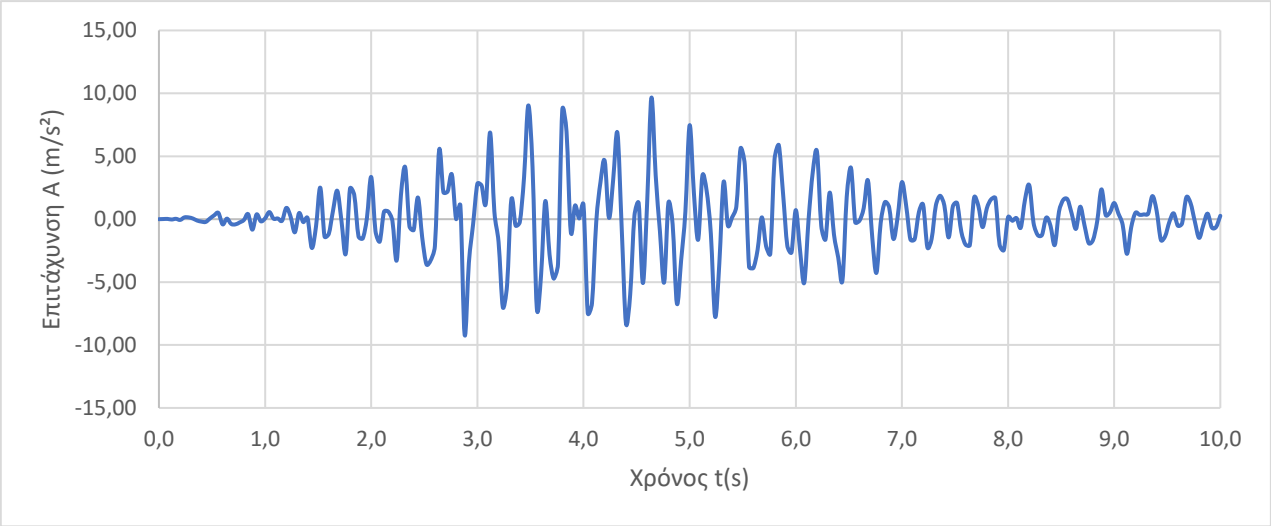
Εικόνα 4.172 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Οι κατακόρυφες τάσεις στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν, γύρω στα 1800 KN/m² , αφού [h * γ = (794,7-720) * 24 = 1792,8 KN/m² , όπου γ το ειδικό βάρος του σκυροδέματος] κάτι το οποίο αποδεικνύεται και από την παραπάνω εικόνα.

<u>Σεισμική δόνηση 225Α – Επιταχύνσεις – Φάσματα Fourier και απόκρισης</u>

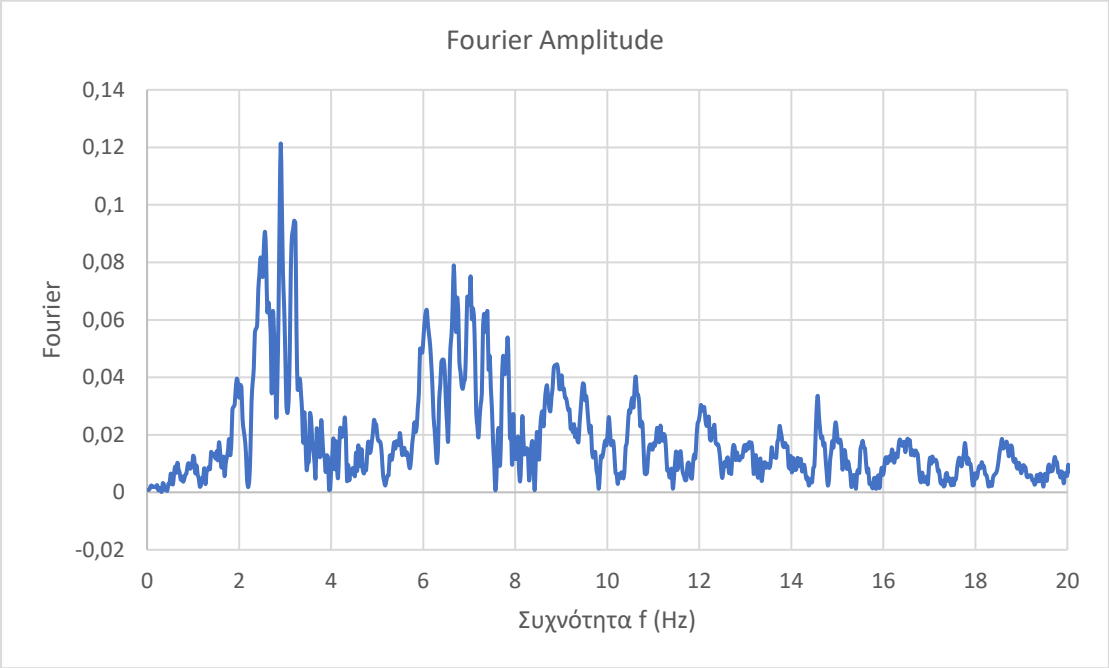


Διάγραμμα 4.14 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για σεισμική διέγερση 225Α

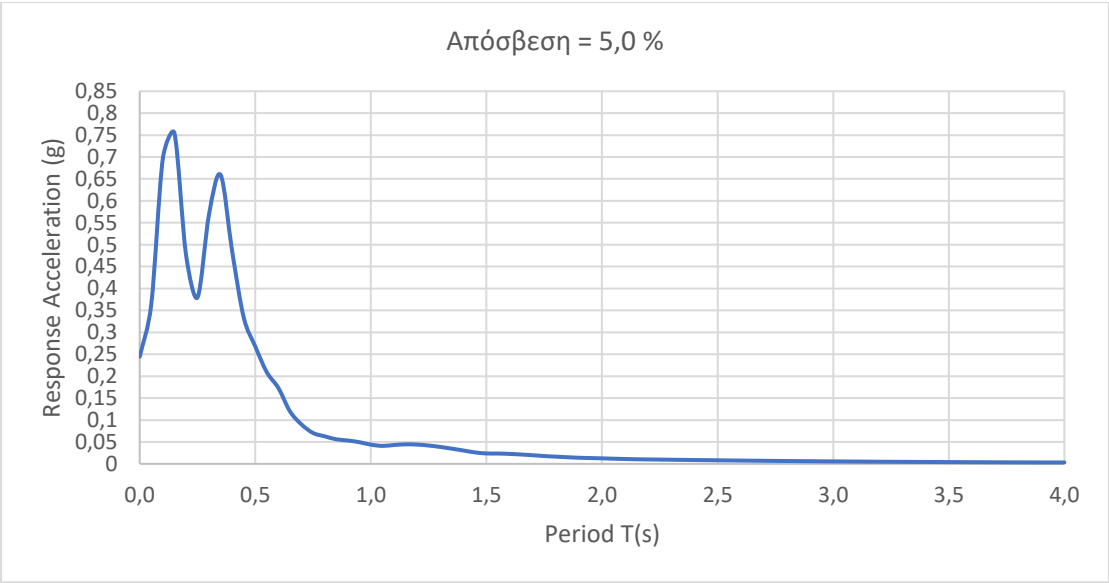


Διάγραμμα 4.15 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείο C, για σεισμική διέγερση 225A

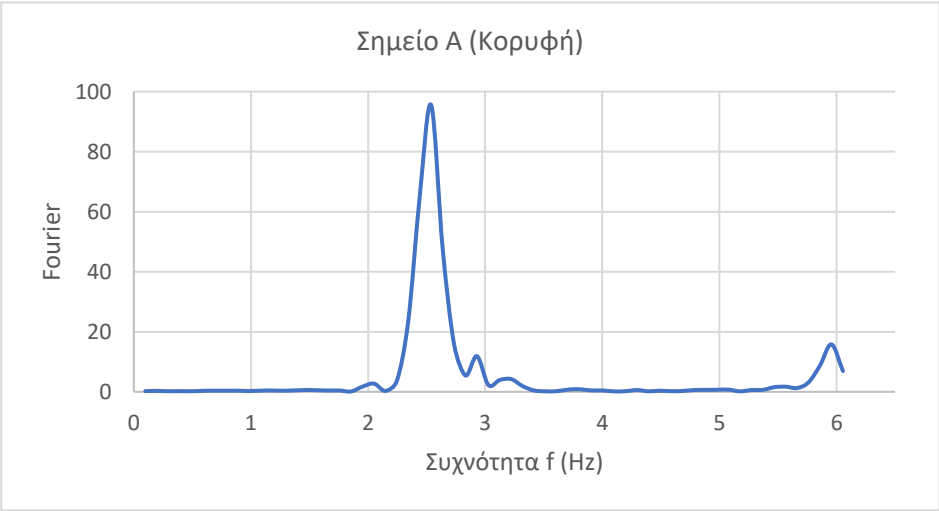
Το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στο σημείο A ισούται με 52,7 m/s^2 και το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στο σημείο C ισούται με 9,65 m/s^2. Σε αυτήν την περίπτωση οι επιταχύνσεις των τριών χαρακτηριστικών σημείων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που είχαν προκύψει από την προηγούμενη σεισμική δόνηση.



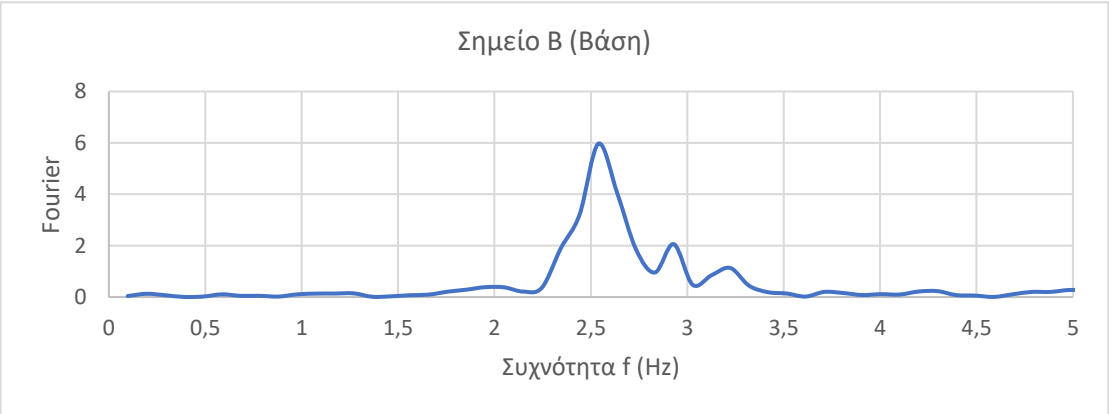
Διάγραμμα 4.16 Το φάσμα Fourier της σεισμικής διέγερσης 225A του λογισμικού Plaxis – 2D



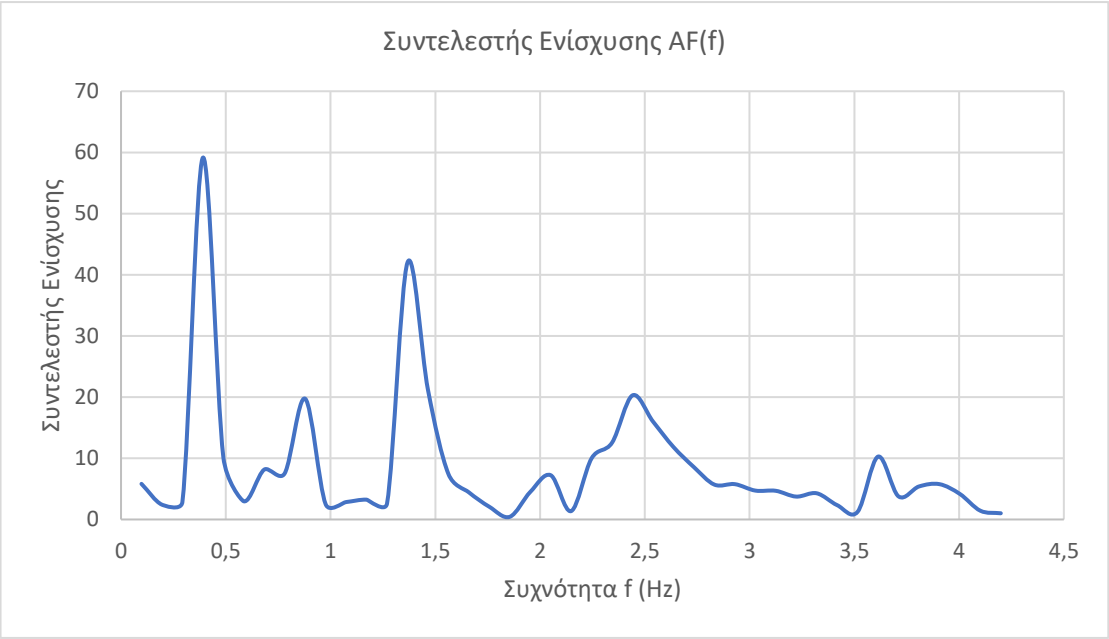
Διάγραμμα 4.17 Φάσμα απόκρισης της πραγματικής σεισμικής δόνησης 225A



Διάγραμμα 4.18 Φάσμα Fourier του σημείου A (κορυφή φράγματος)

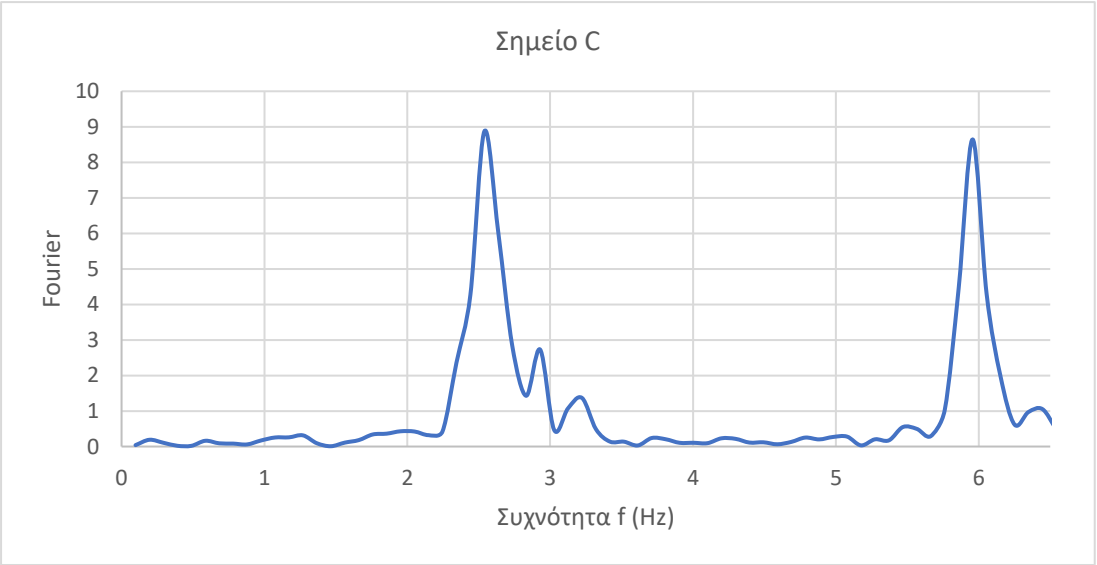


Διάγραμμα 4.19 Φάσμα Fourier του σημείου B (βάση φράγματος)



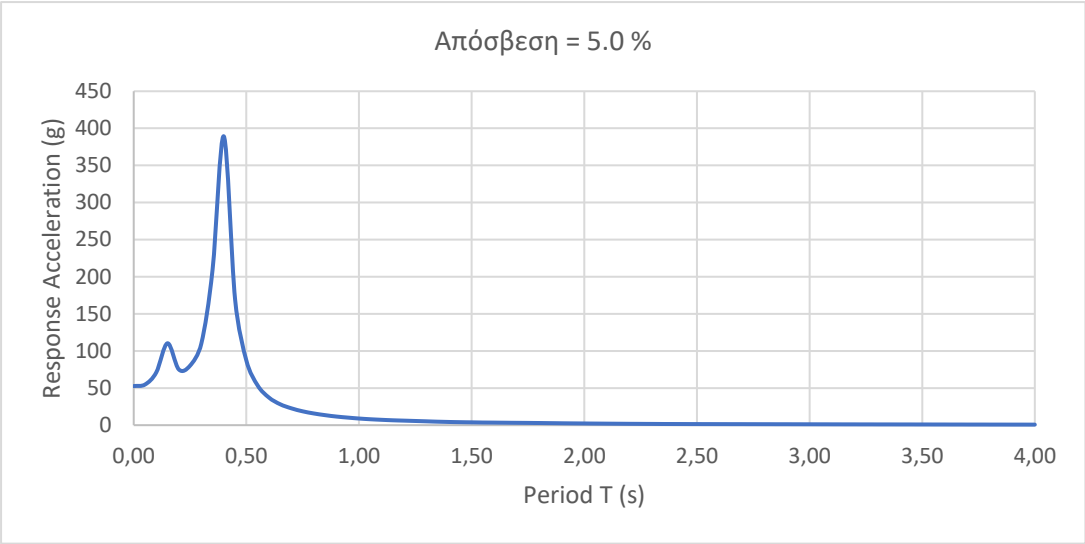
Διάγραμμα 4.20 Συντελεστής ενίσχυσης AF(f) φράγματος

Παρατηρείται ότι το φάσμα Fourier στα 2,5 Hz περίπου εικοσαπλασιάζεται στην κορυφή σε συγκριτικά με το αντίστοιχα φάσμα στην βάση του φράγματος. Πιο συγκεκριμένα 16πλασιάζεται στα 2,54 Hz. Ο μέγιστος συντελεστής ενίσχυσης AF ισούται με 59,2 στα 0,39 Hz, ωστόσο δεν θεωρείται το σημείο στο οποίο υπάρχει ιδιοσυχνότητα καθώς το φάσμα Fourier δεν δίνει τόσο αξιόπιστα αποτελέσματα για συχνότητες μικρότερες του 2. Για το λόγο αυτό ιδιοσυχνότητα παρατηρείται στα 2,44 Hz με συντελεστή ενίσχυσης AF = 20,3. Ιδιοσυχνότητα υπάρχει και στα 3,61 Hz με συντελεστή ενίσχυσης AF = 10,3.

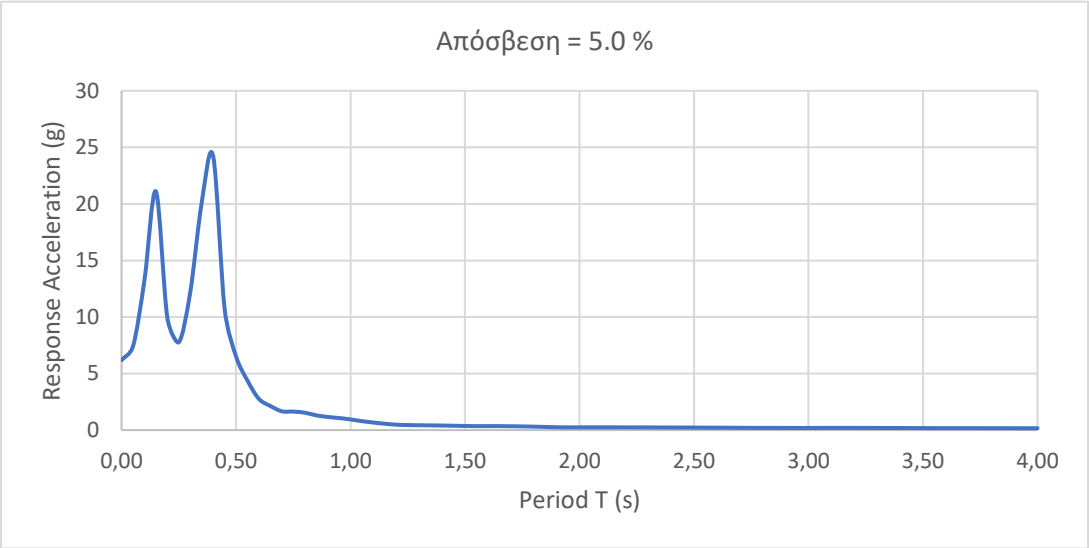


Διάγραμμα 4.21 Φάσμα Fourier της εδαφικής στρώσης (σημείο C)

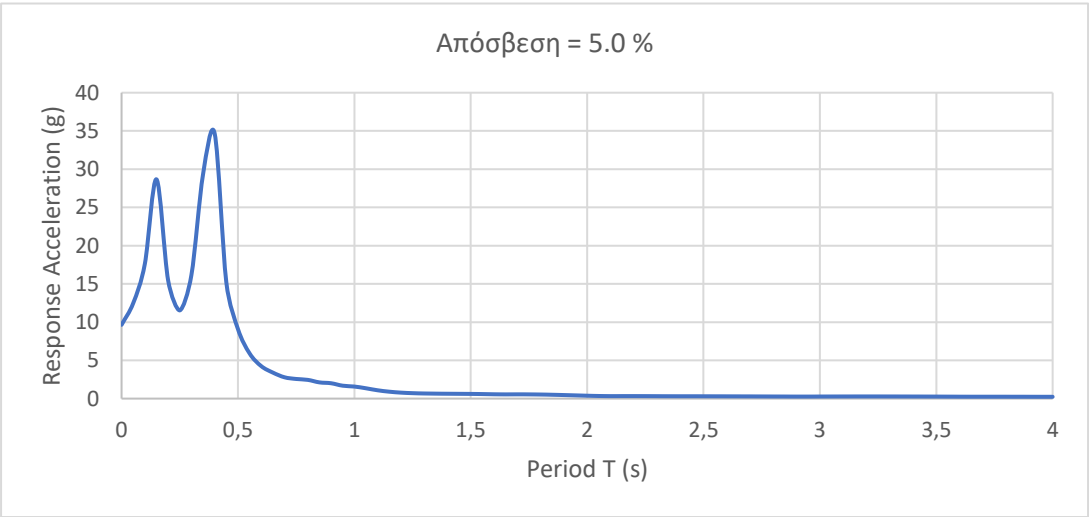
Προκύπτει πως είτε γίνει δυναμική ανάλυση με την σεισμική διέγερση του παλμού Ricker (f= 2 Hz) είτε με τον πραγματικό σεισμό 225A η ιδιοσυχνότητα και των τριών χαρακτηριστικών σημείων είναι η ίδια, f = 2,54 Hz. Όπως προαναφέρθηκε, το φράγμα συντονίζεται και δεν προκύπτει ενίσχυση σε κάποιο από τα 3 σημεία. Το φράγμα δηλαδή έχει την ίδια συμπεριφορά. Επομένως οι συντελεστές απόσβεσης θα μείνουν ως έχουν.



Διάγραμμα 4.22 Φάσμα απόκρισης σημείου Α – σεισμική διέγερση 225Α

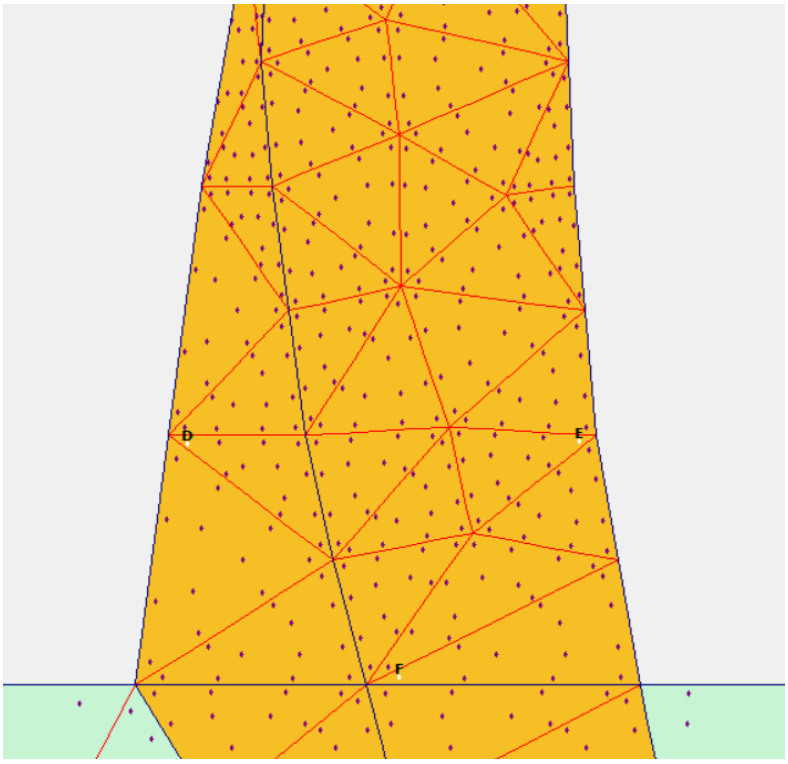


Διάγραμμα 4.23 Φάσμα απόκρισης σημείου Β – σεισμική διέγερση 225Α



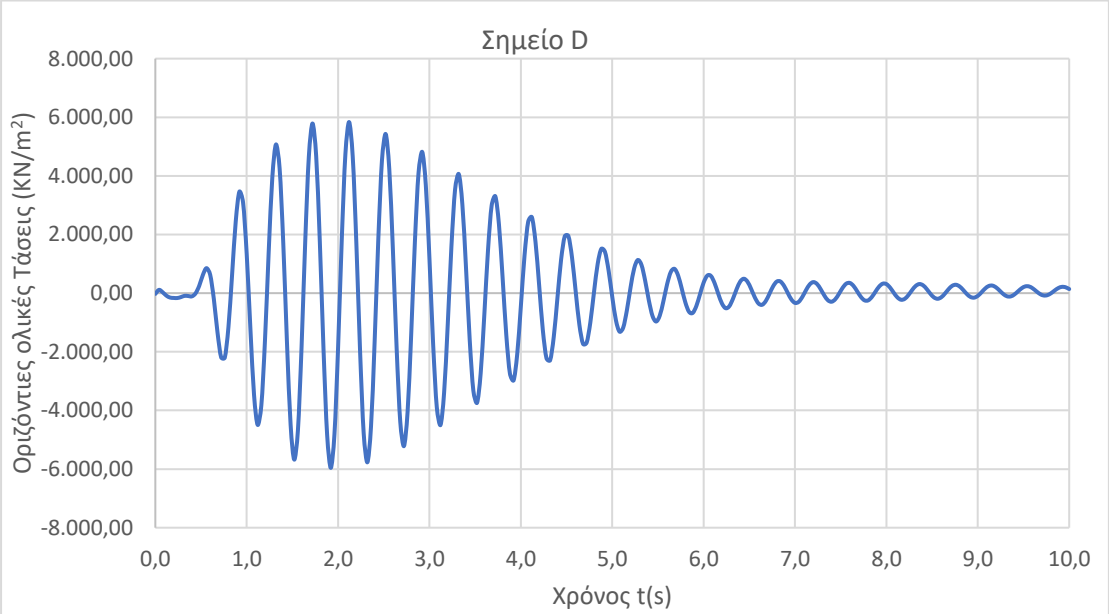
Διάγραμμα 4.24 Φάσμα απόκρισης σημείου C – σεισμική διέγερση 225Α

Σε επόμενο βήμα παρατίθενται οι χρονοϊστορίες των τάσεων, που αναπτύσσονται στο φράγμα. Για τον λόγο αυτό επιλέγονται 3 χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία θα είναι ίδια για όλες τις δυναμικές αναλύσεις. Τα σημεία αυτά είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά που είχαν επιλεγεί για την εύρεση των τάσεων στις ψευδοστατικές αναλύσεις.



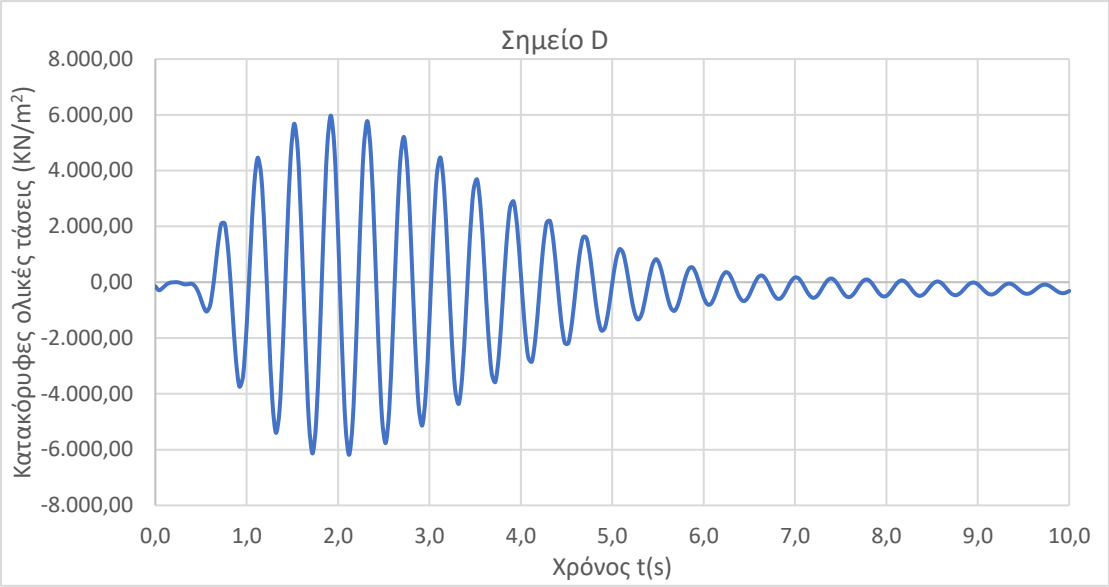
Εικόνα 4.173 Χαρακτηριστικά σημεία στο φράγμα για τον υπολογισμό των τάσεων

<u>Σεισμική δόνηση Ricker (f = 2Hz) - Τάσεις</u>



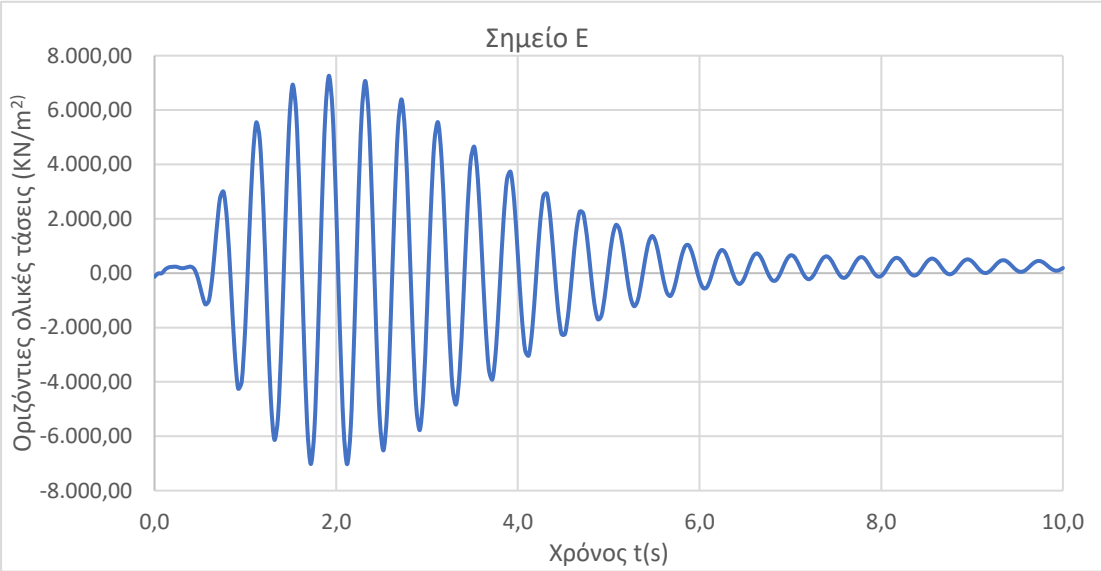
Διάγραμμα 4.25 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D (ανάντη πλευρά του φράγματος)

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι - 5960 KN/m^2.



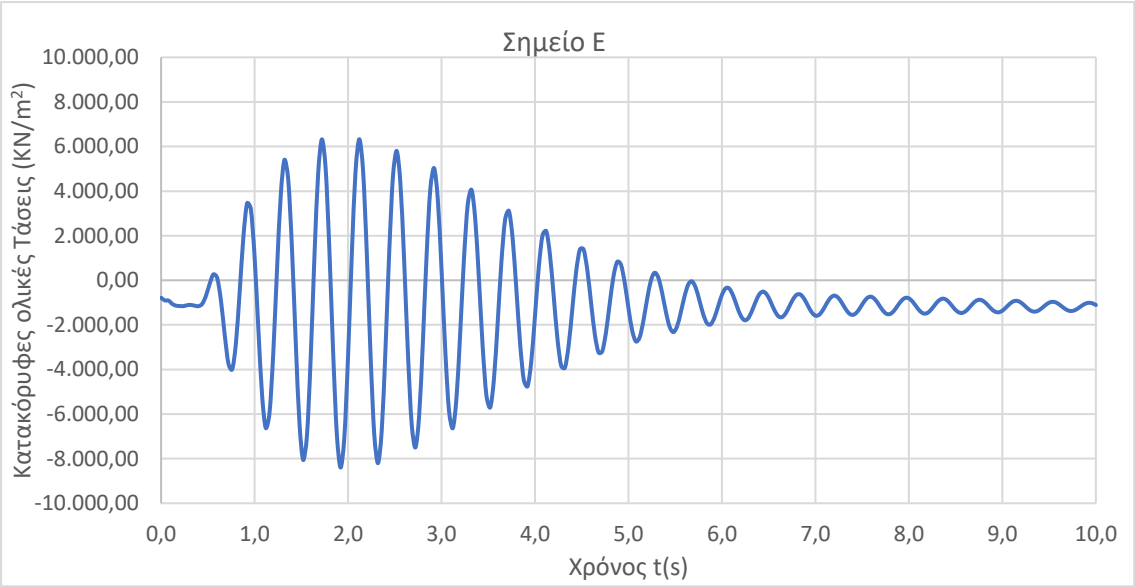
Διάγραμμα 4.26 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 2,12 δευτερόλεπτα και είναι - 6190 KN/m^2.



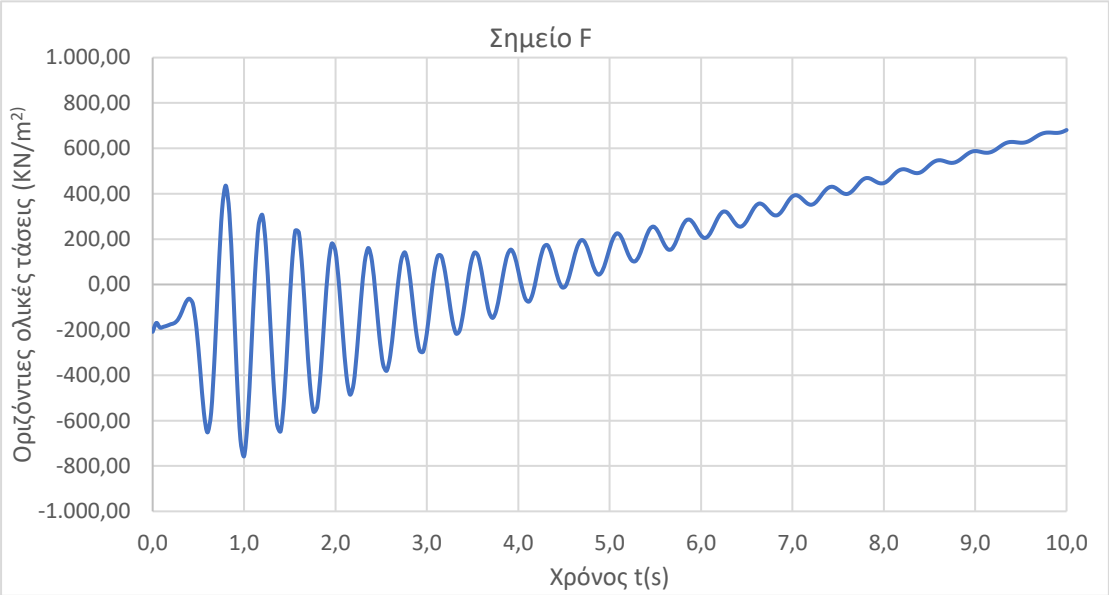
Διάγραμμα 4.27 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου E (κατάντη πλευρά του φράγματος)

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 2,12 δευτερόλεπτα και είναι + 7260 KN/m^2.



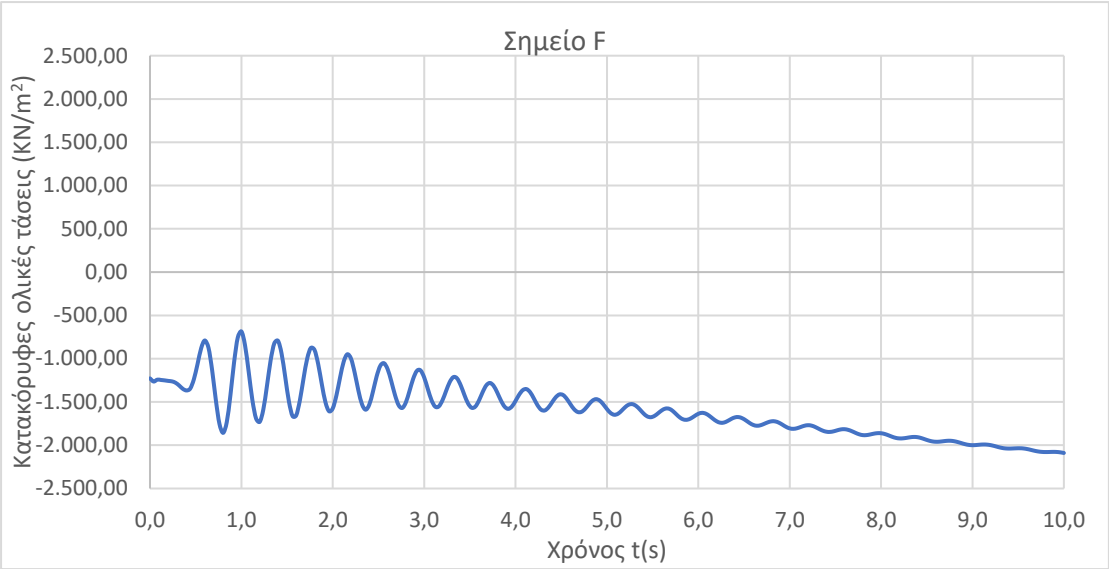
Διάγραμμα 4.28 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι - 8400 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.29 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F (θεμελίωση του φράγματος)

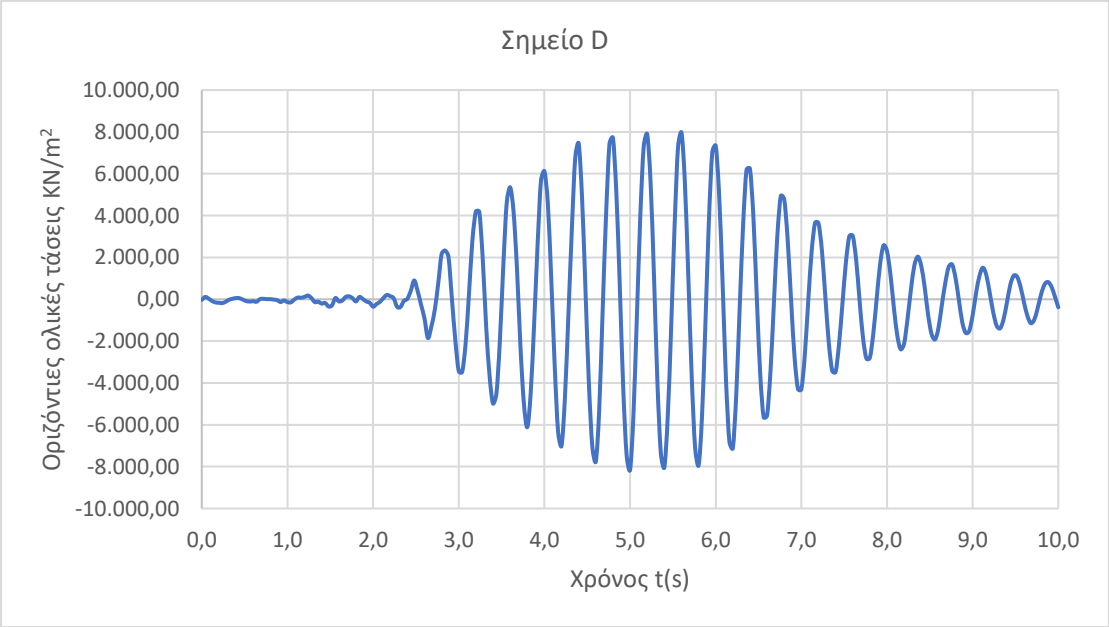
Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στο 1 δευτερόλεπτο και είναι - 757 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.30 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

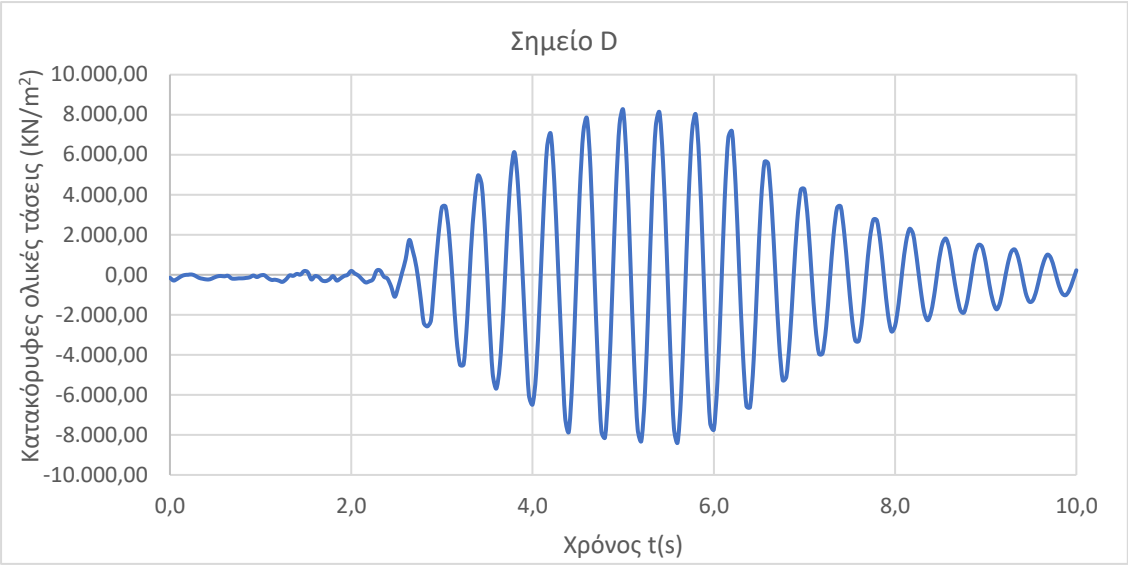
Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 10 δευτερόλεπτα και είναι – 2090 KN/m^2.

<u>Σεισμική δόνηση 225A -Τάσεις</u>



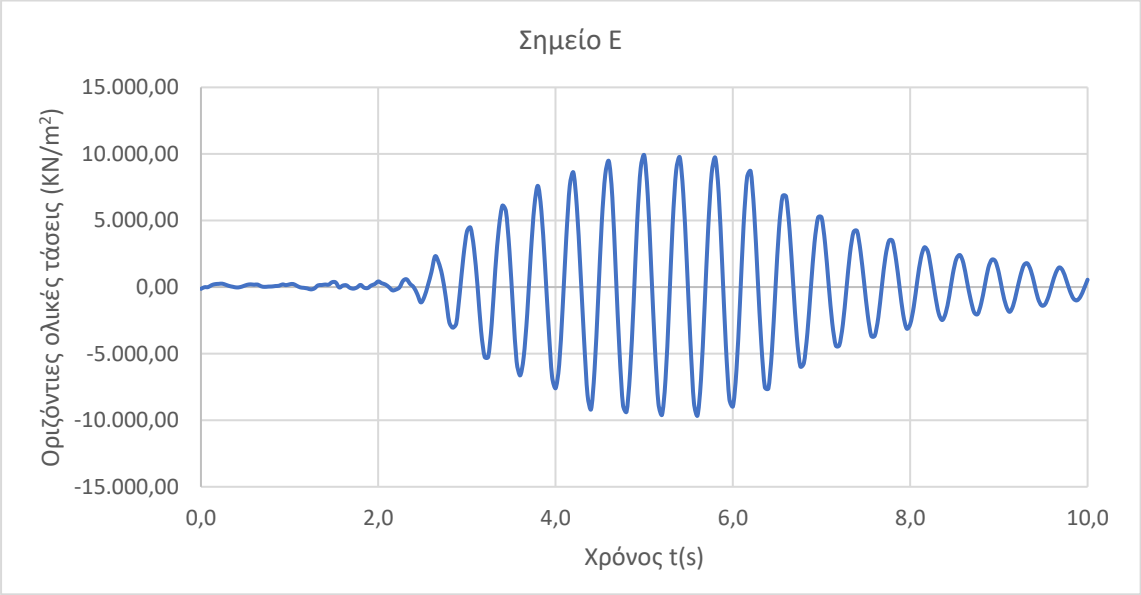
Διάγραμμα 4.31 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι - 8160 KN/m^2.



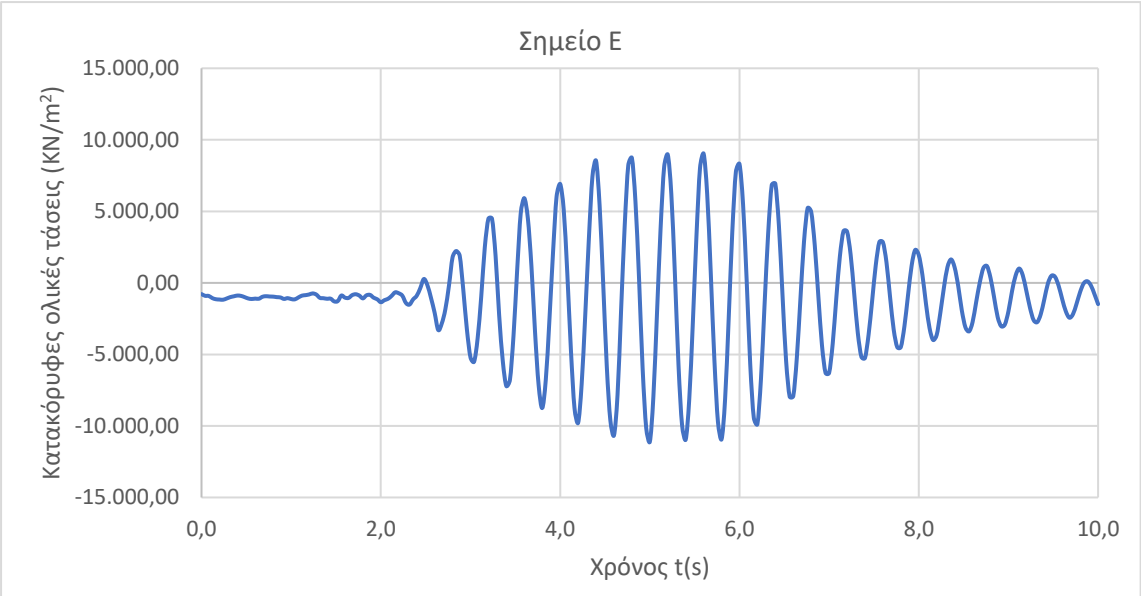
Διάγραμμα 4.32 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5,6 δευτερόλεπτα και είναι – 8390 KN/m^2.



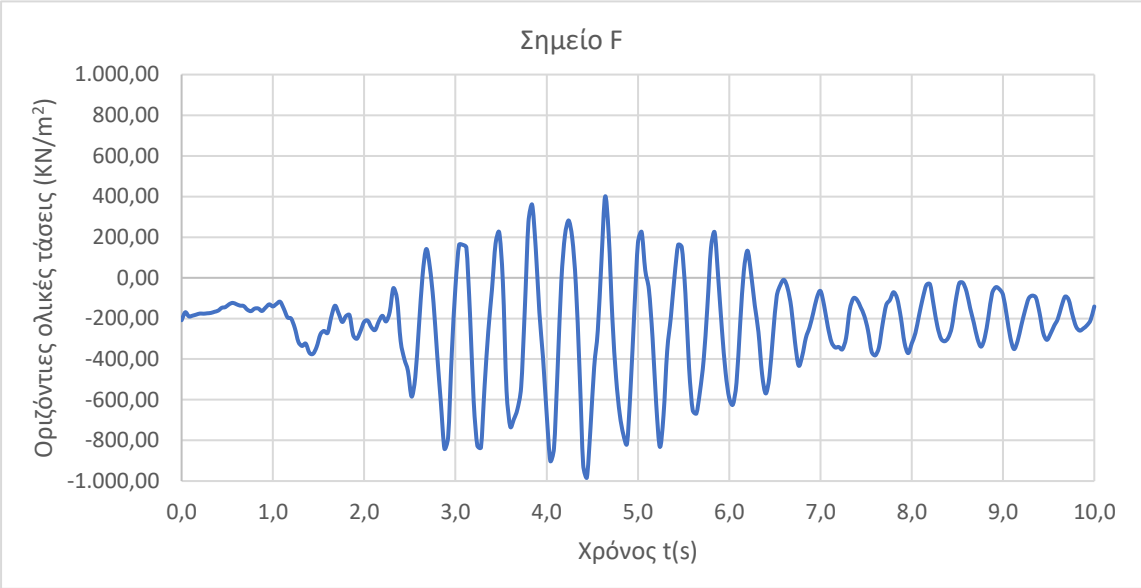
Διάγραμμα 4.33 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου E

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι + 9900 KN/m^2.



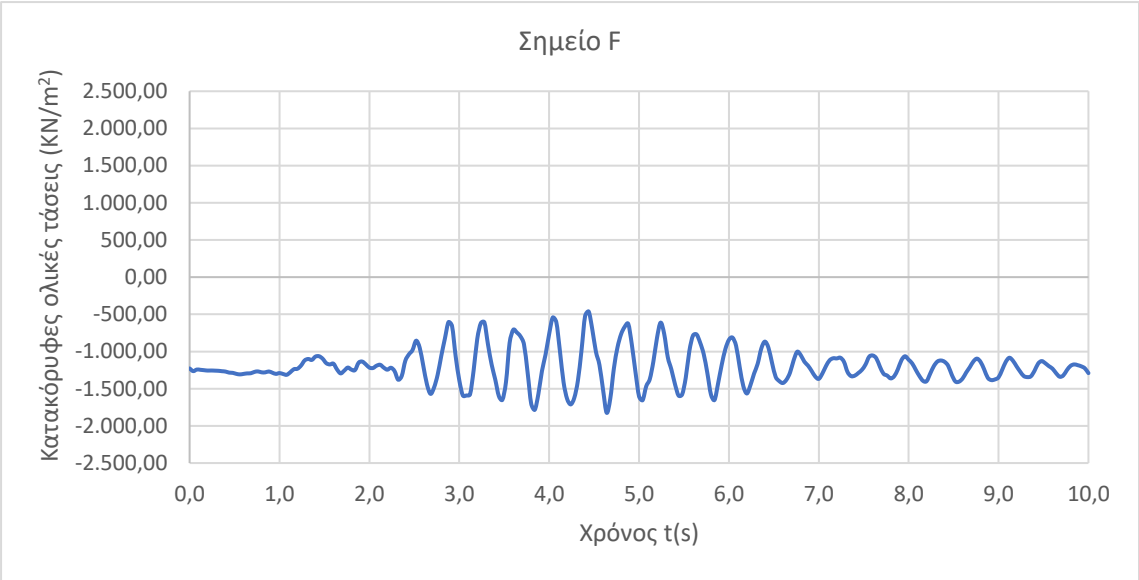
Διάγραμμα 4.34 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι – 1110 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.35 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,44 δευτερόλεπτα και είναι - 983 KN/m^2.



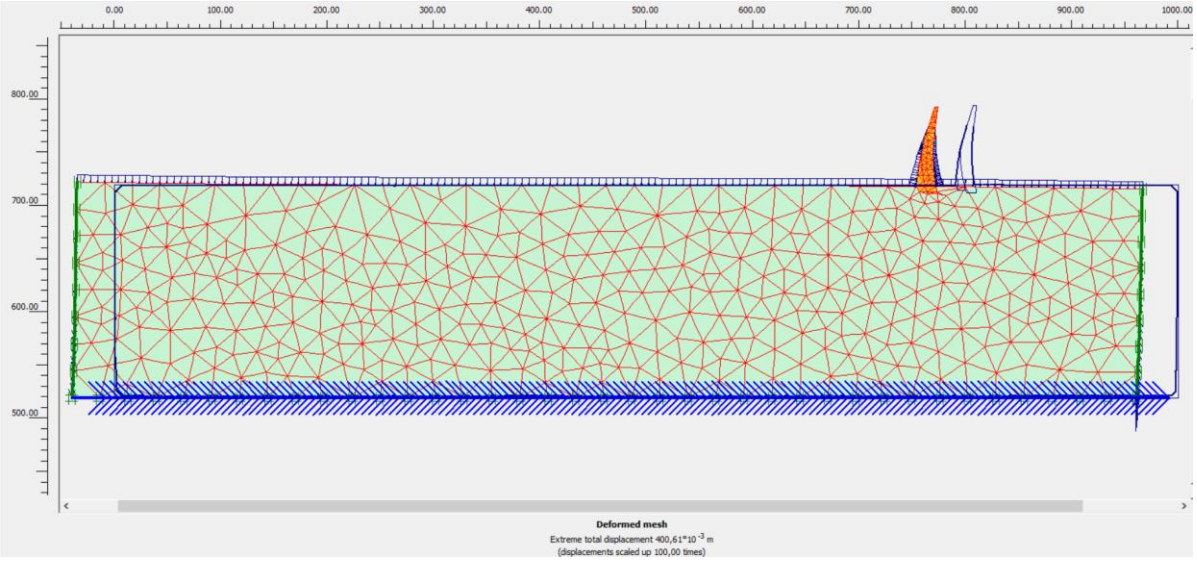
Διάγραμμα 4.36 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι – 1820 KN/m^2.

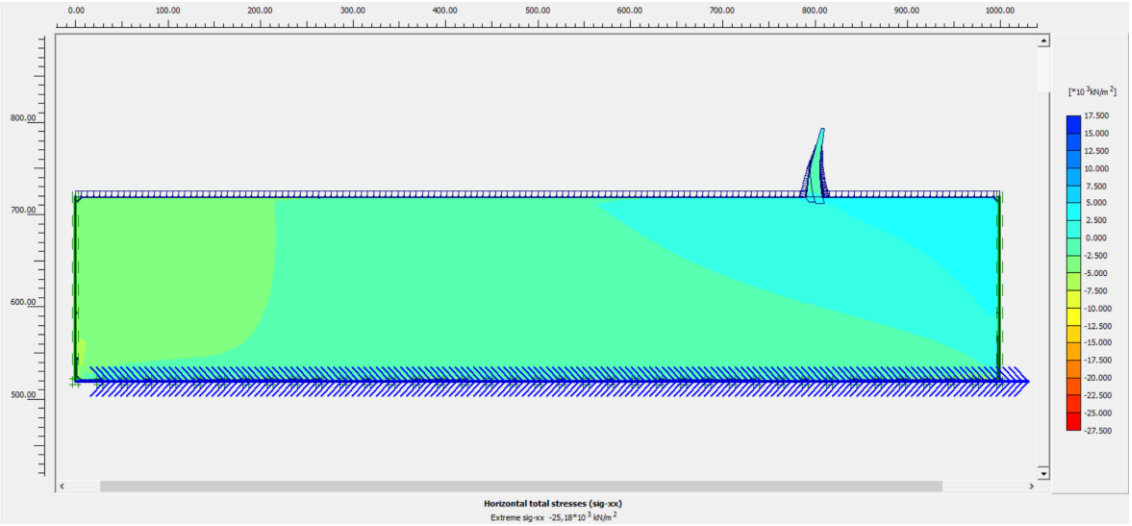
Διαπιστώνεται ότι στην σεισμική διέγερση του παλμού Ricker (f = 2Hz) οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρούνται κοντά στα 2 δευτερόλεπτα. Στην σεισμική διέγερση του πραγματικού σεισμού 225A οι μέγιστες τιμές οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών τάσεων προκύπτουν κοντά στα 5 δευτερόλεπτα. Αυτό σημαίνει πως ο παλμός Ricker δίνει τις μέγιστες επιταχύνσεις του κοντά στα 2 δευτερόλεπτα ενώ ο πραγματικός σεισμός 225A κοντά στα 5.

4.4.2.2 Δυναμική ανάλυση με την παρουσία νερού (+ 776 m)

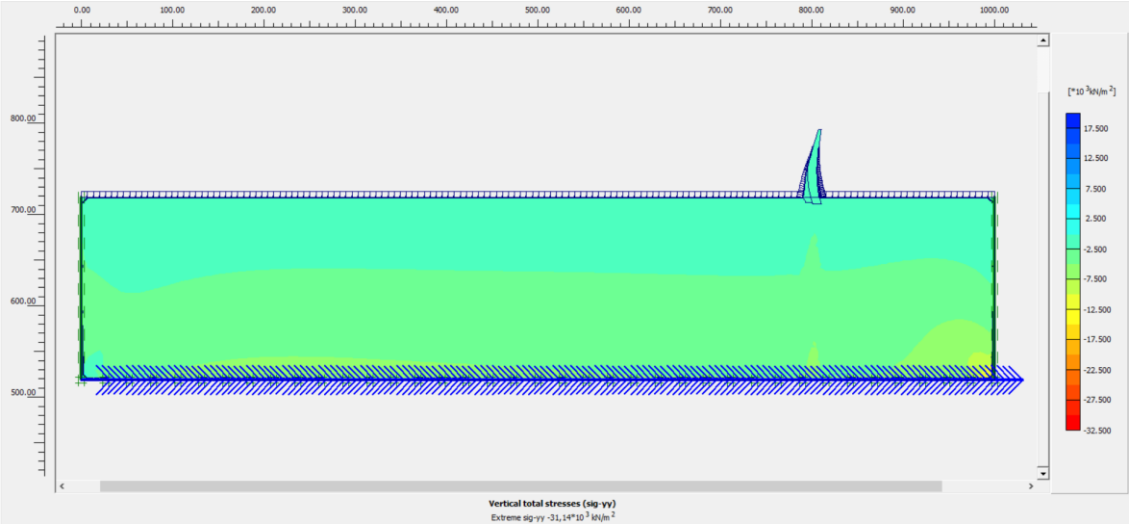
<u>Σεισμική δόνηση Ricker (f = 2Hz) και Μέθοδος Ground water calculation</u>



Εικόνα 4.174 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου

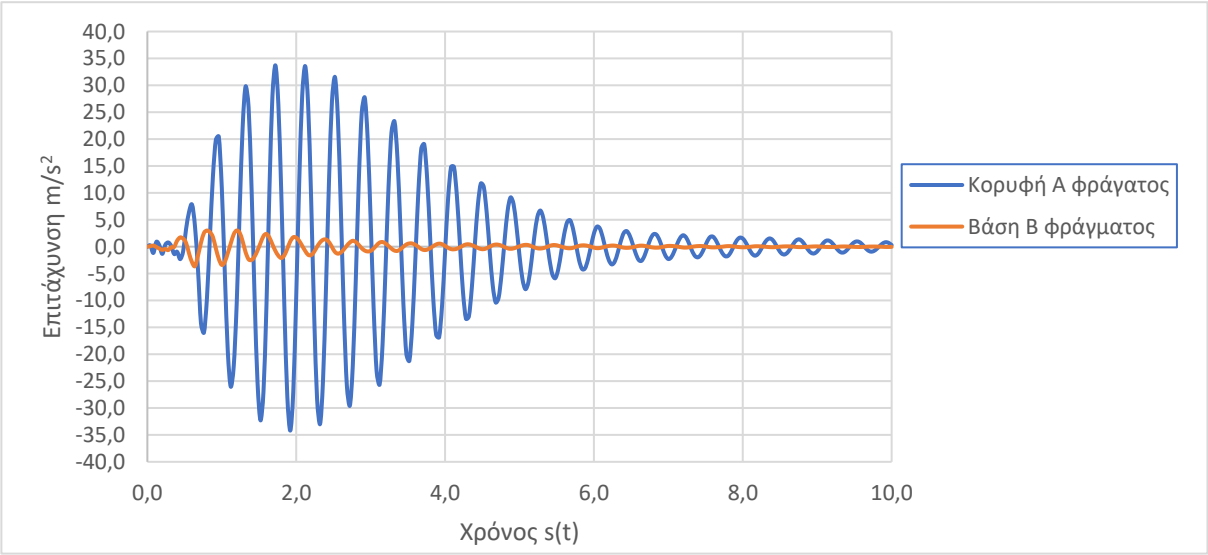


Εικόνα 4.175 Οριζόντιες ολικές τάσεις

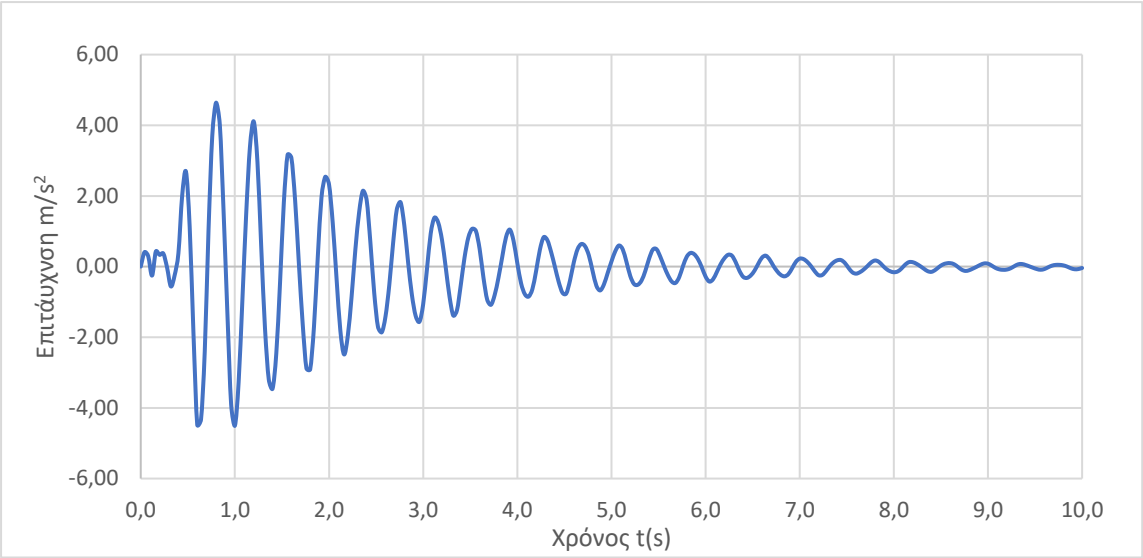


Εικόνα 4.176 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

<u>Επιταχύνσεις</u>

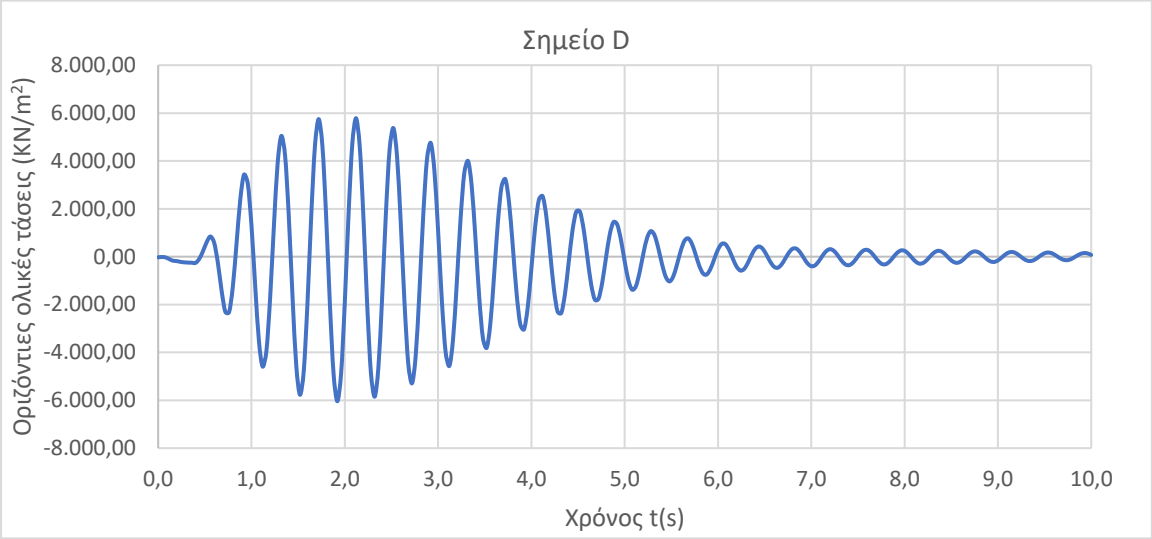


Διάγραμμα 4.37 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για παλμό Ricker (f = 2Hz)



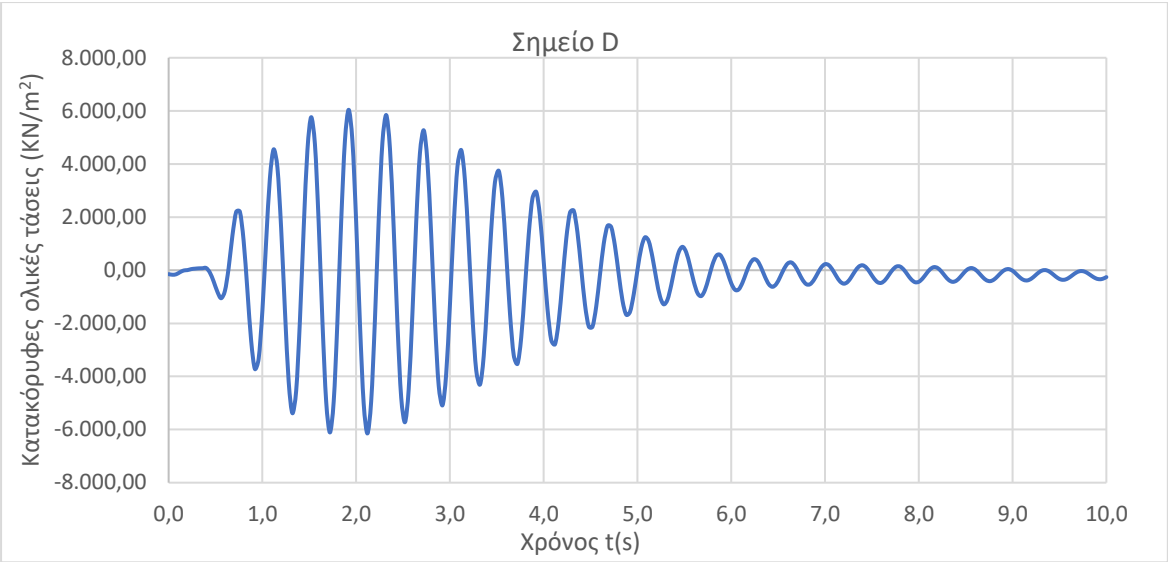
Διάγραμμα 4.38 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείο C, για παλμό Ricker (f = 2Hz)

<u>Τάσεις</u>



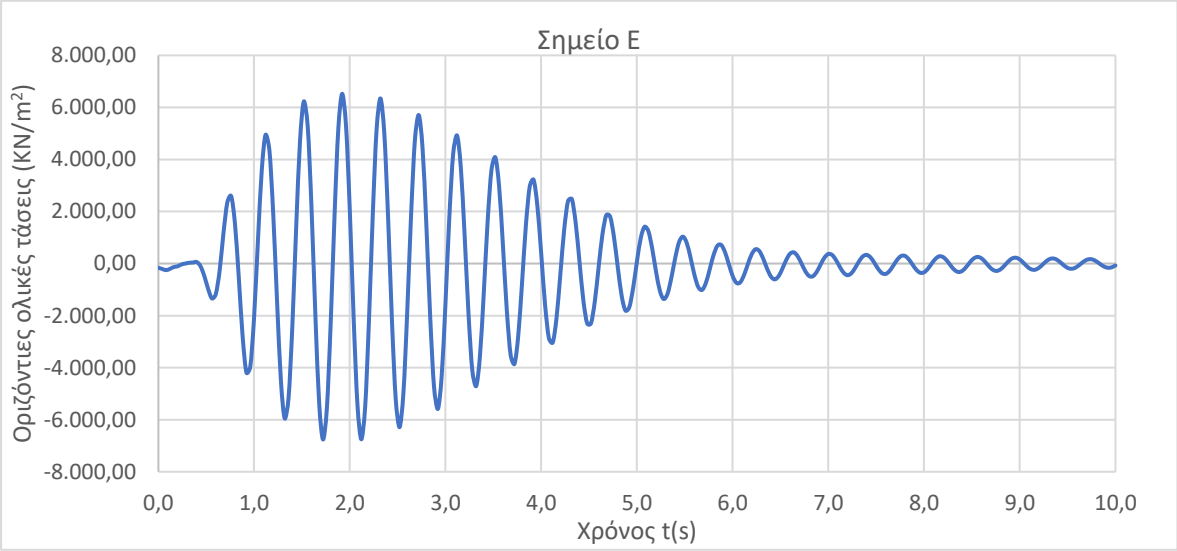
Διάγραμμα 4.39 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι - 6040 KN/m^2.



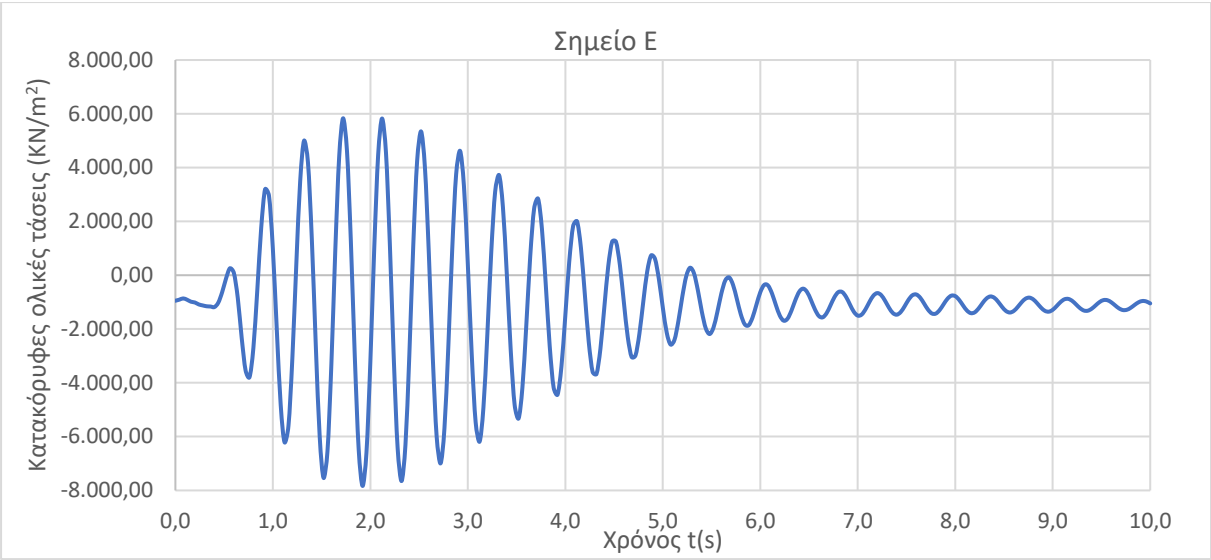
Διάγραμμα 4.40 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 2,12 δευτερόλεπτα και είναι – 6150 KN/m^2.



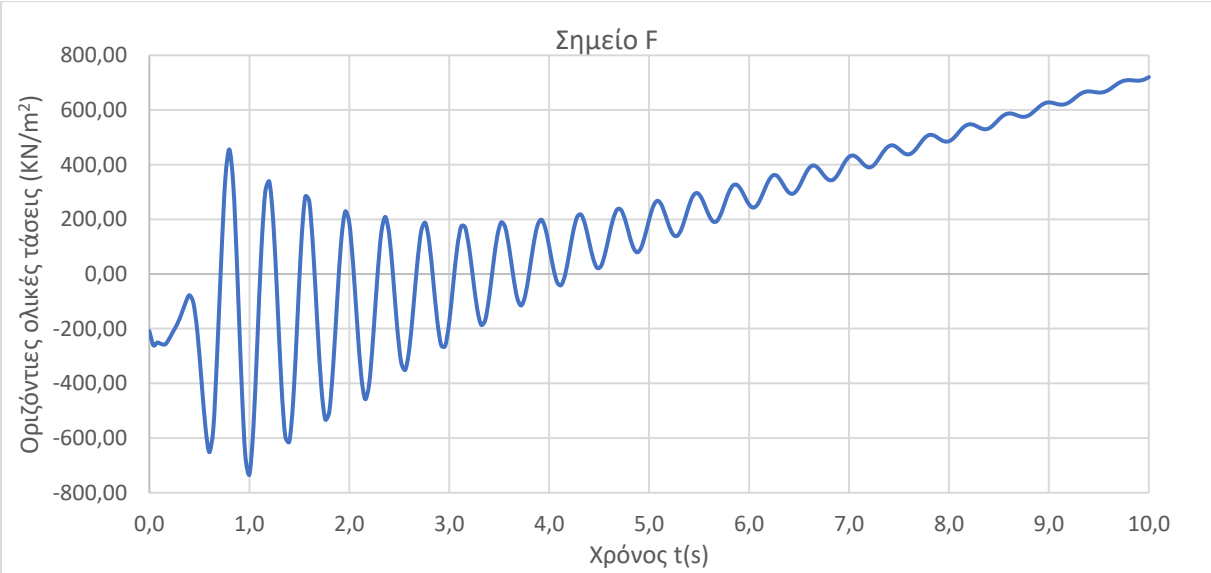
Διάγραμμα 4.41 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου E

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,72 δευτερόλεπτα και είναι -6760 KN/m^2.



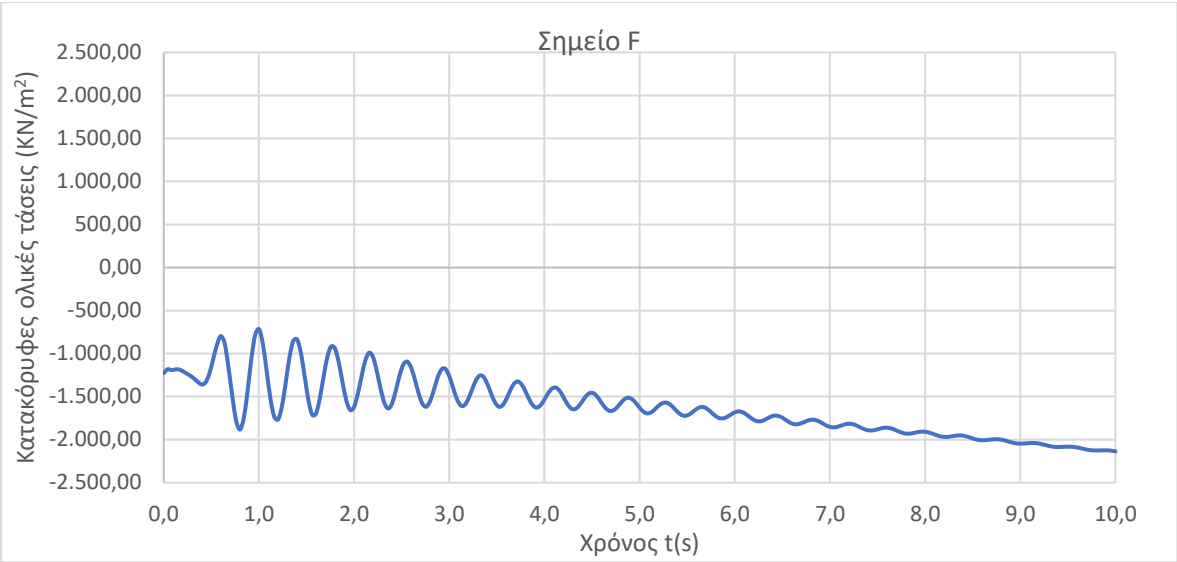
Διάγραμμα 4.42 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι – 7183 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.43 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

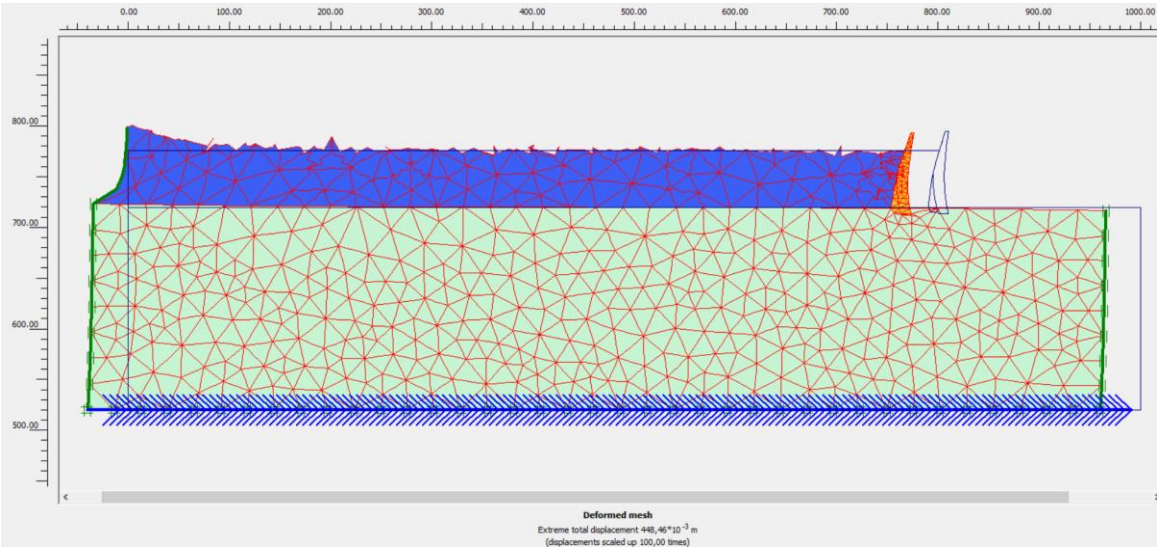
Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στο 1 δευτερόλεπτο και είναι – 734 KN/m^2.



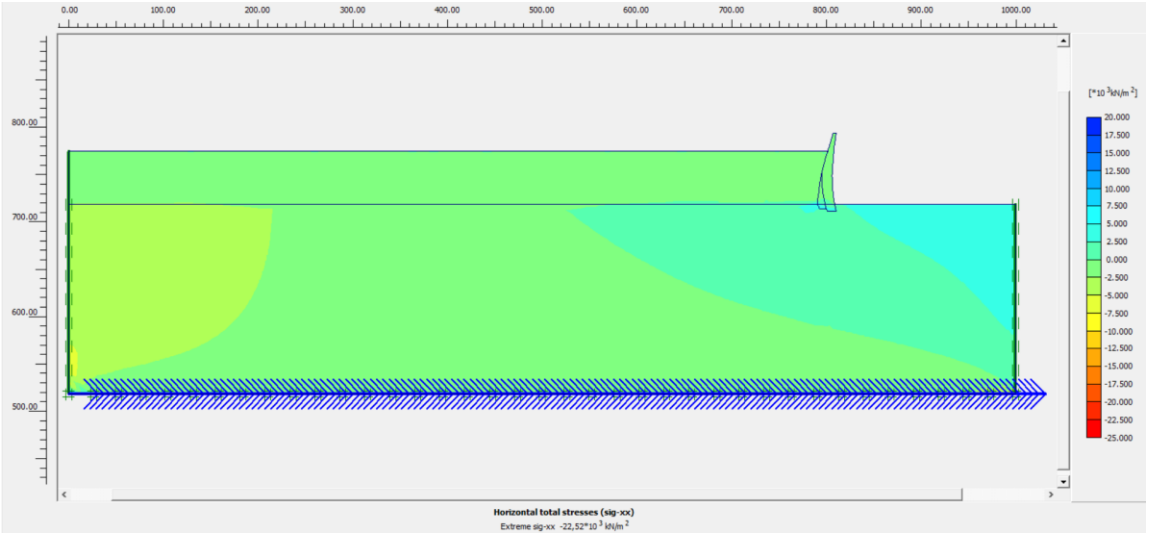
Διάγραμμα 4.44 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 10 δευτερόλεπτα και είναι – 2140 KN/m^2.

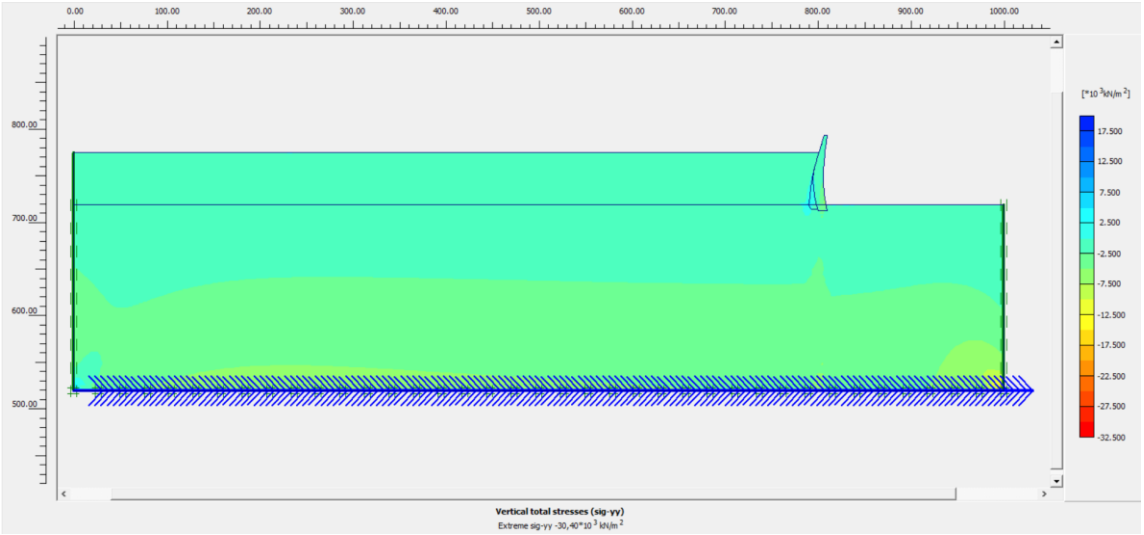
<u>Σεισμική δόνηση Ricker (f = 2Hz) και Μέθοδος χρήσης νερού με την μορφή υλικού</u>



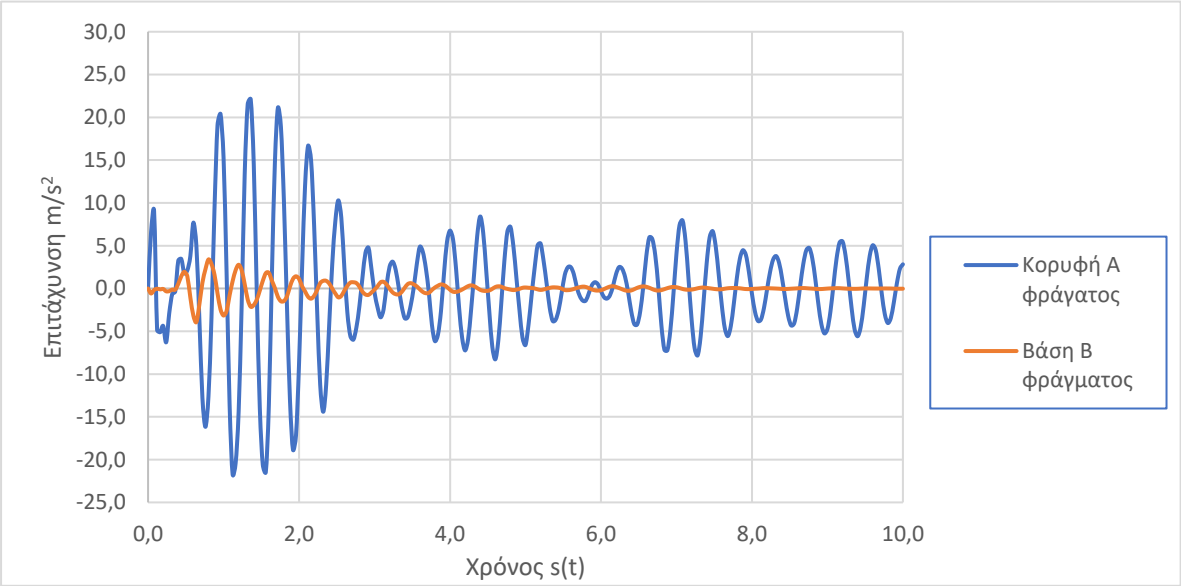
Εικόνα 4.177 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος



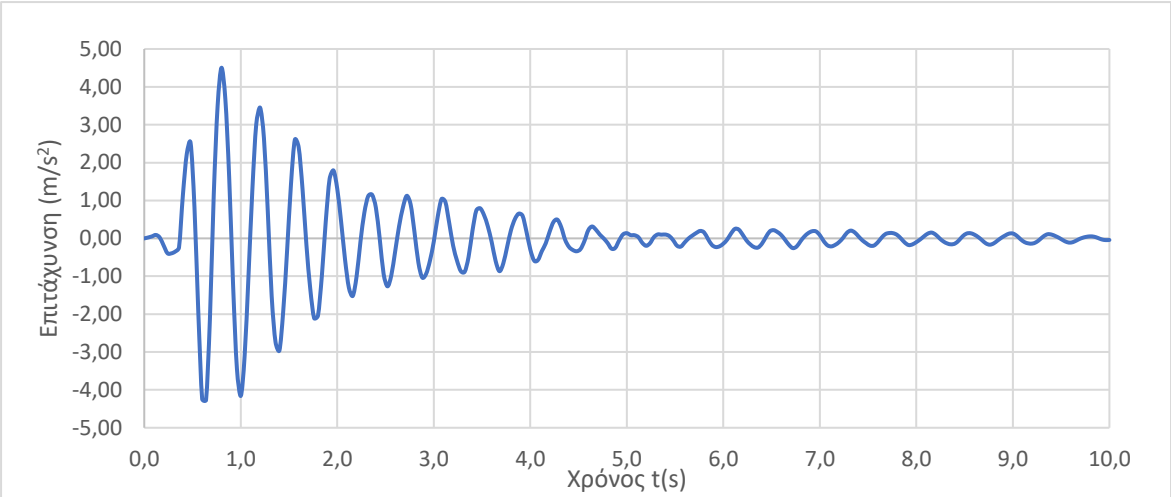
Εικόνα 4.178 Οριζόντιες ολικές τάσεις



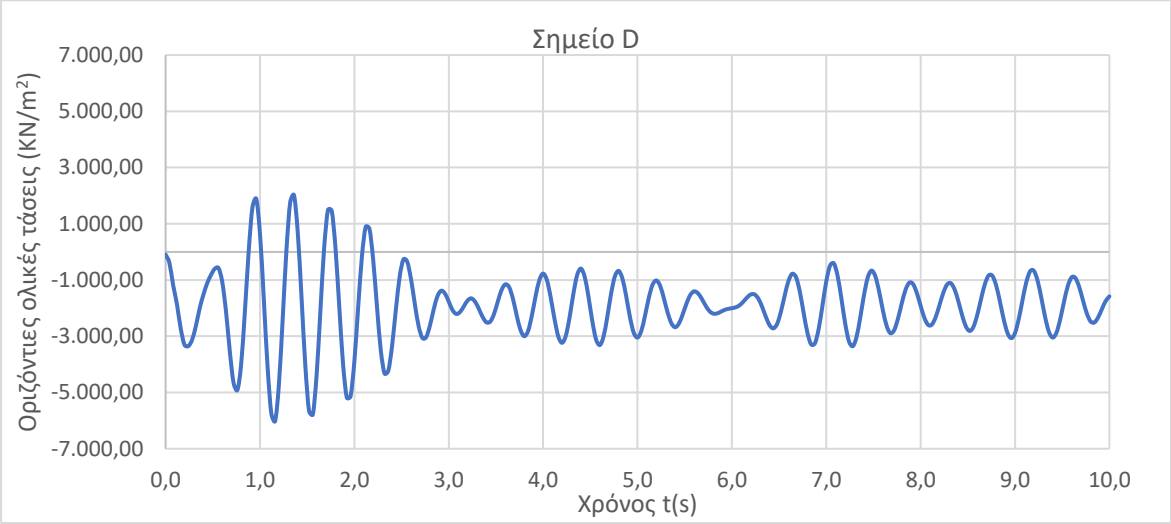
Εικόνα 4.179 Κατακόρυφες ολικές τάσεις



Διάγραμμα 4.45 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για παλμό Ricker (f = 2Hz)

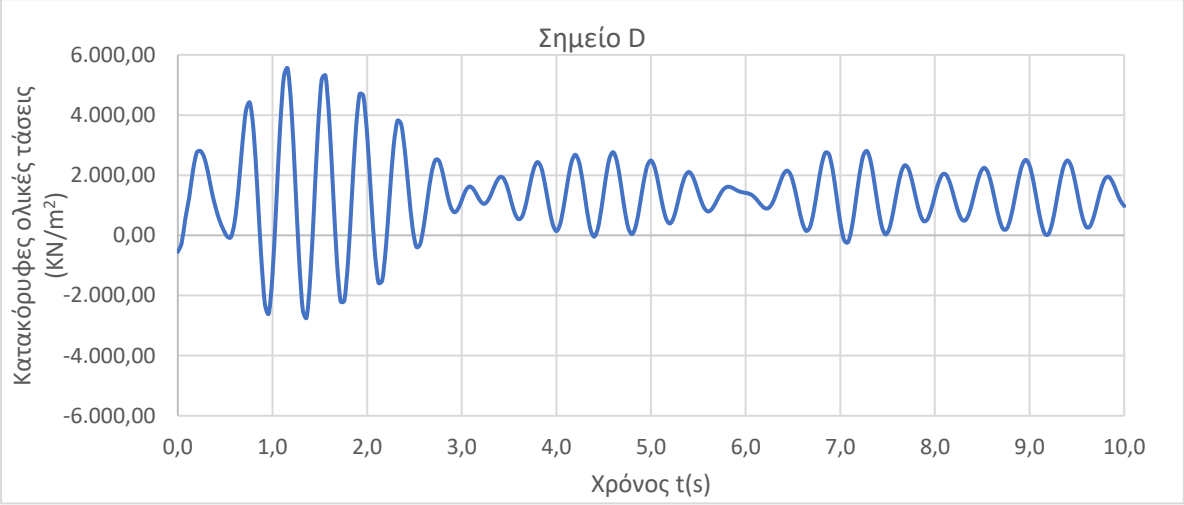


Διάγραμμα 4.46 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείο C, για παλμό Ricker (f = 2Hz)



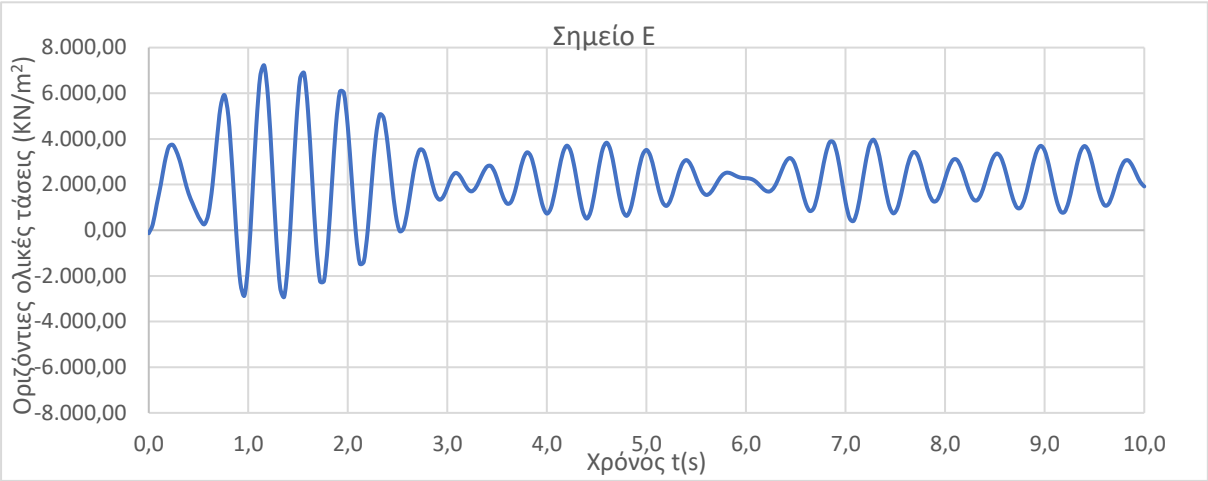
Διάγραμμα 4.47 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,16 δευτερόλεπτα και είναι – 6020 KN/m^2.



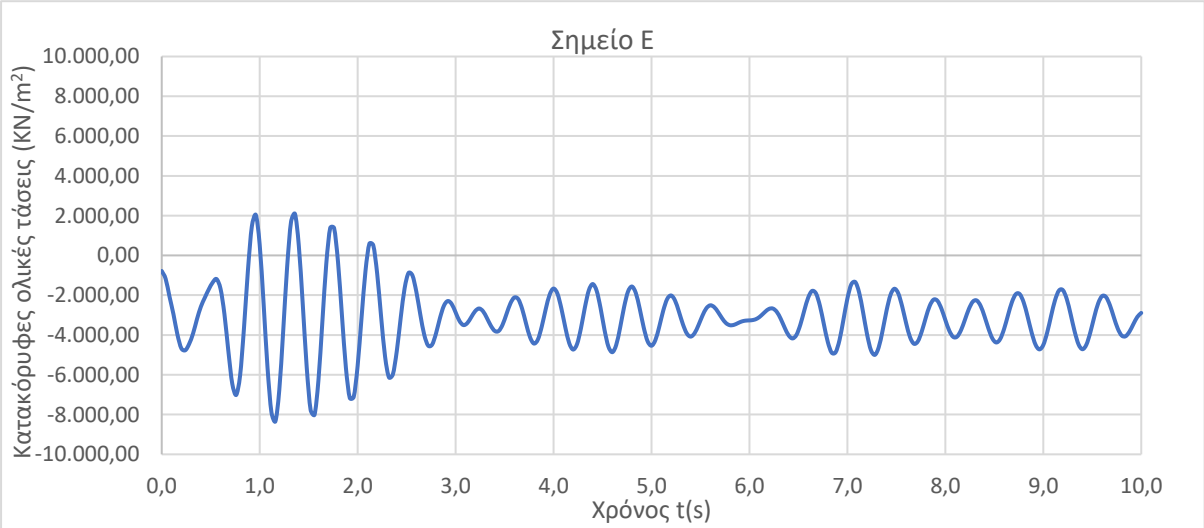
Διάγραμμα 4.48 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,16 δευτερόλεπτα και είναι + 5550 KN/m^2.



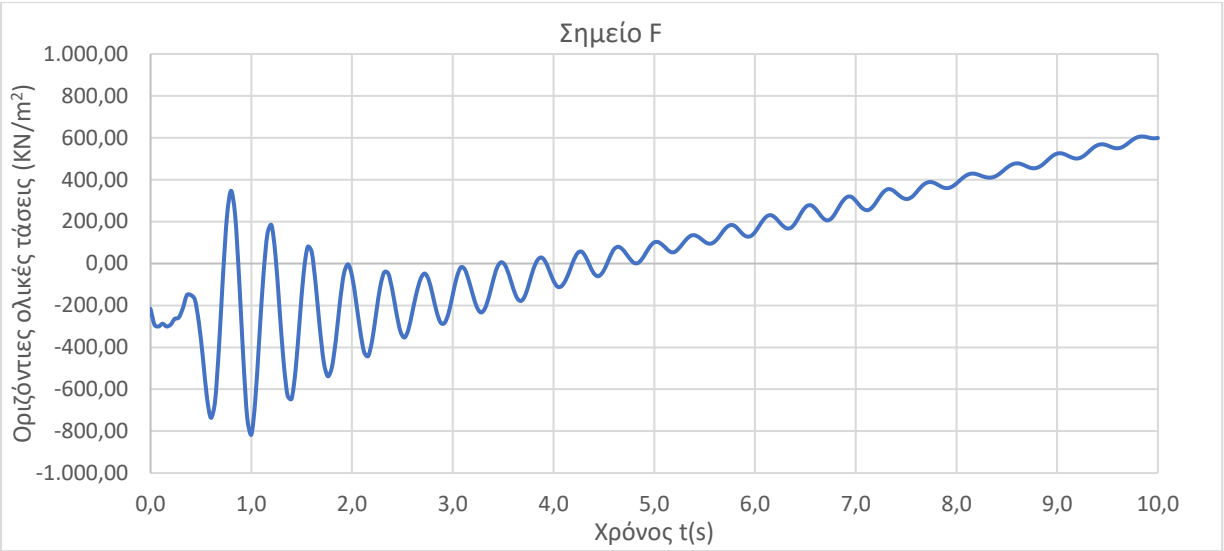
Διάγραμμα 4.49 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,16 δευτερόλεπτα και είναι + 6760 KN/m^2.



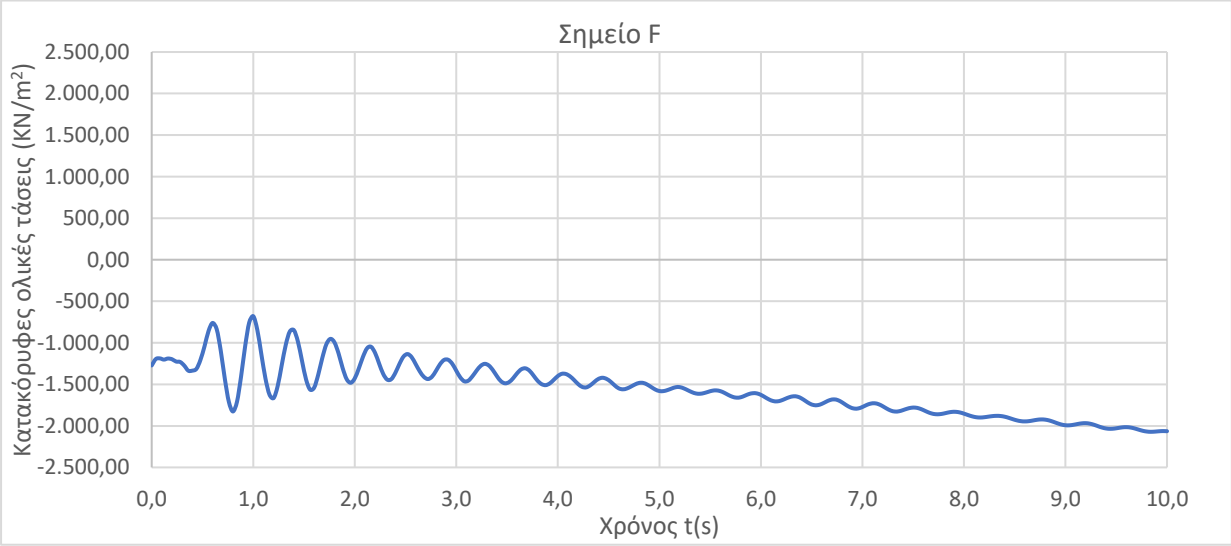
Διάγραμμα 4.50 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,16 δευτερόλεπτα και είναι - 8350 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.51 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στο 1 δευτερόλεπτο και είναι - 817 KN/m^2.

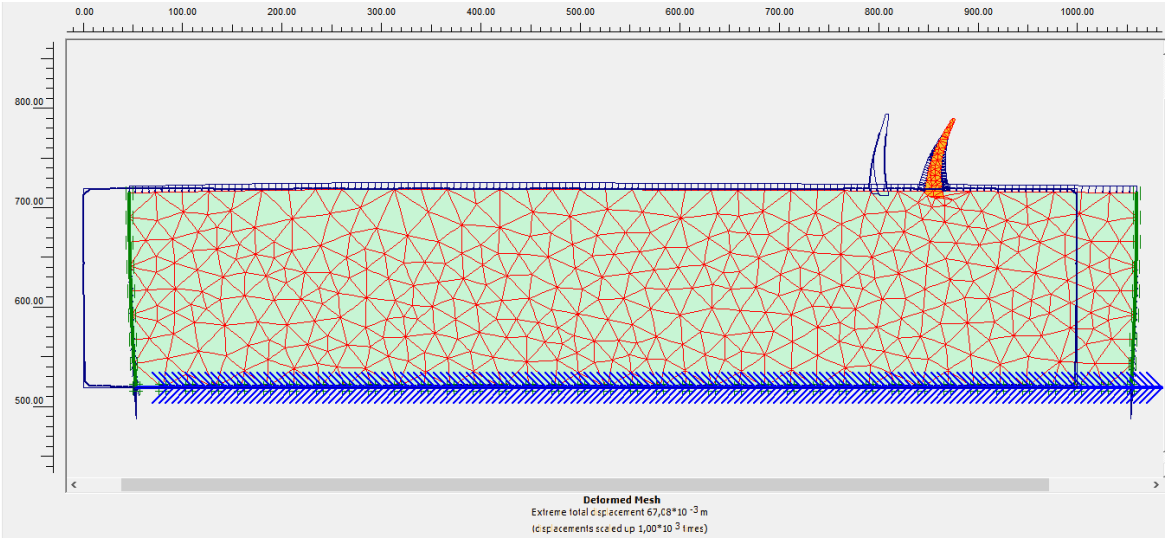


Διάγραμμα 4.52 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

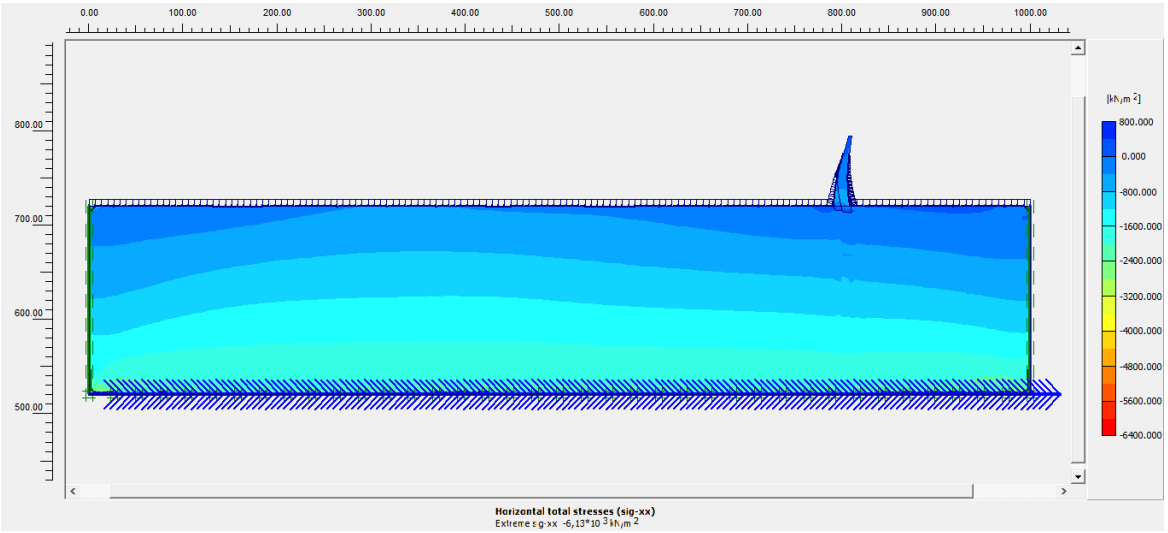
Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 9,84 δευτερόλεπτα και είναι - 2070 KN/m^2.

Παρατηρείται πως τα διαγράμματα που προκύπτουν από την μέθοδο χρησιμοποίησης του νερού με την μορφή υλικού είναι πιο πεπλατυσμένα, δηλαδή δεν συγκεντρώνονται οι μέγιστες τιμές προς τα αριστερά και από τα 5 δευτερόλεπτα και μετά οι τάσεις να τείνουν προς το 0, της γίνεται δηλαδή με την μέθοδο των υπογείων υδάτων (Ground water calculation). Επίσης διαπιστώνεται πως οι τάσεις στο σημείο Ε (κατάντη πρανές) είναι μερικώς αυξημένες, ενώ οι τάσεις στο σημείο D (ανάντη πρανές) έχουν μειωθεί λίγο.

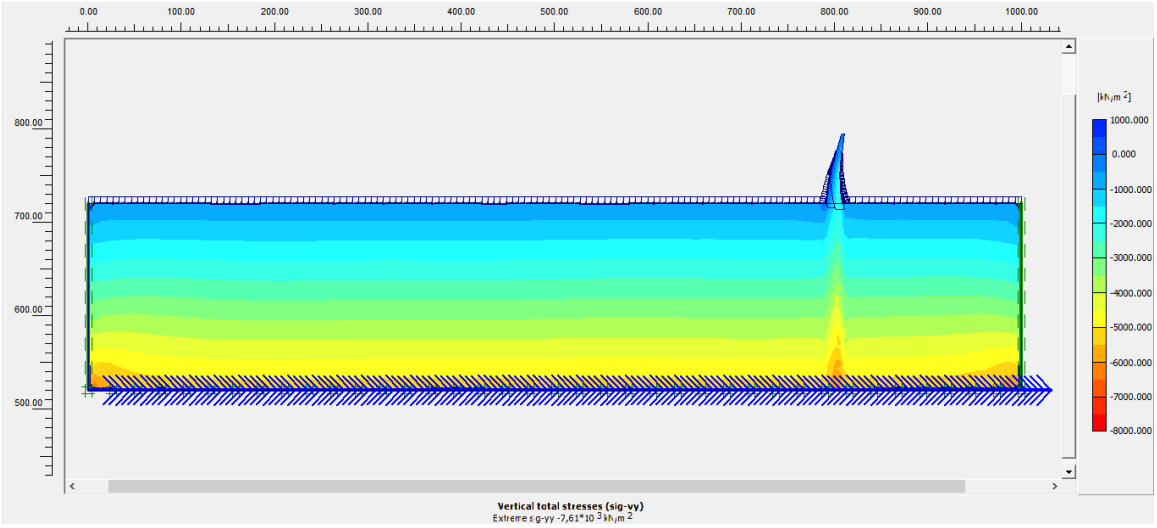
Σεισμική δόνηση πραγματικού σεισμού 225A και Μέθοδος Ground water calculation



Εικόνα 4.180 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου

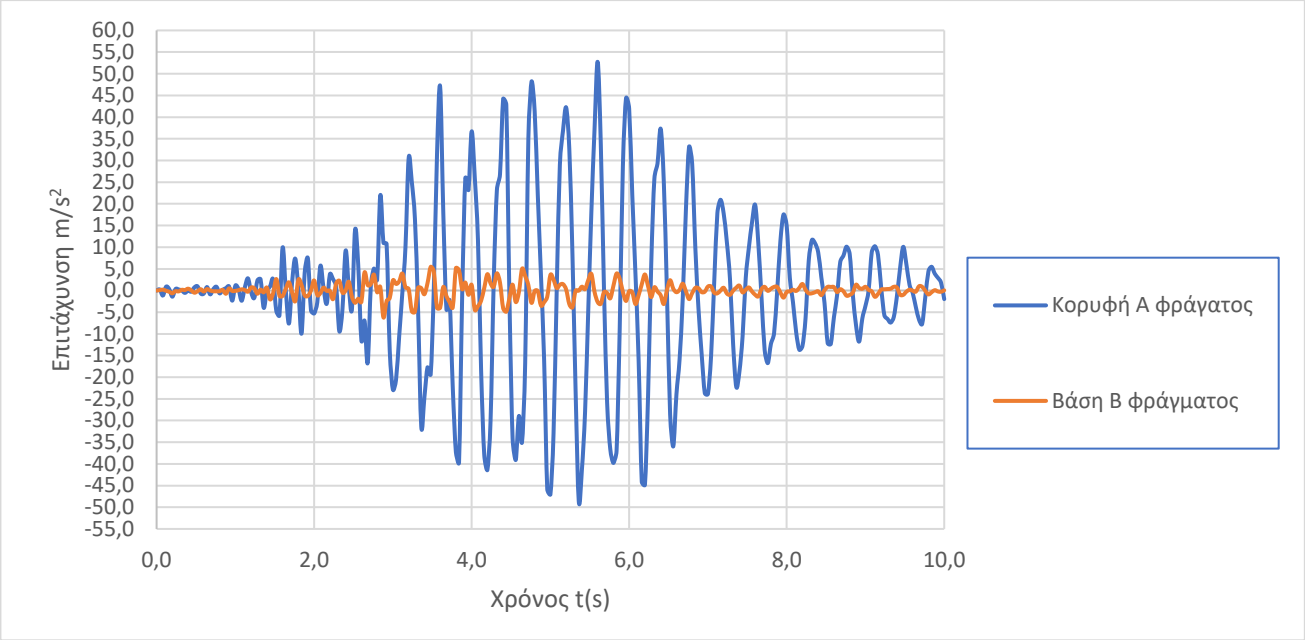


Εικόνα 4.181 Οριζόντιες ολικές τάσεις

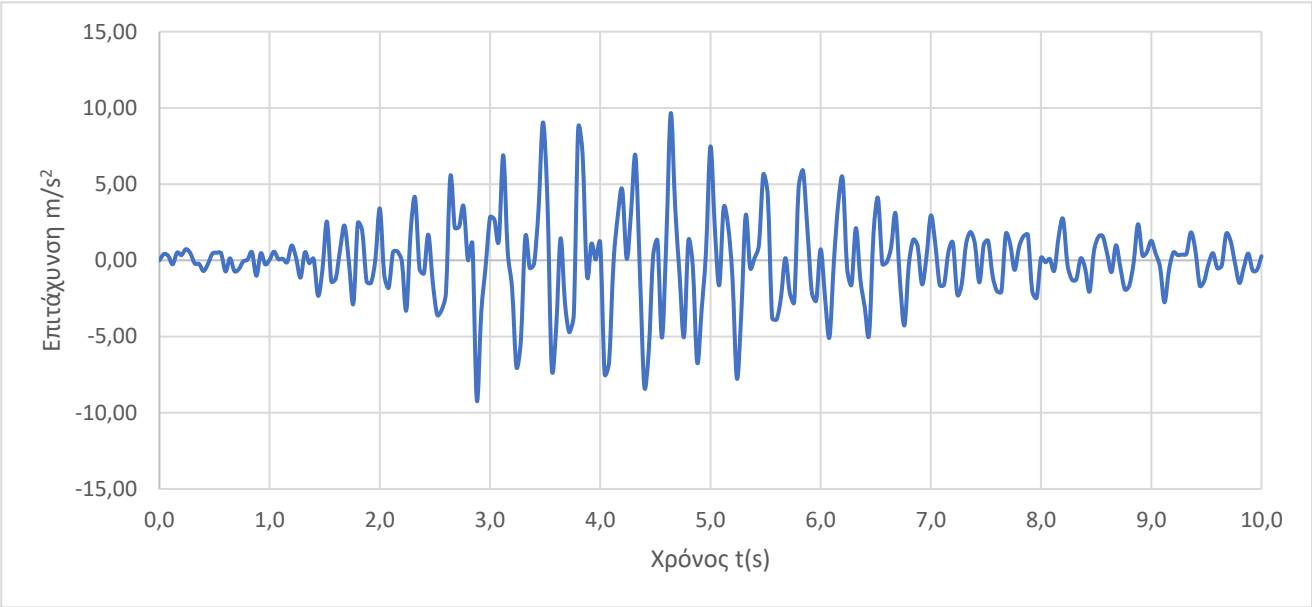


Εικόνα 4.182 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Επιταχύνσεις

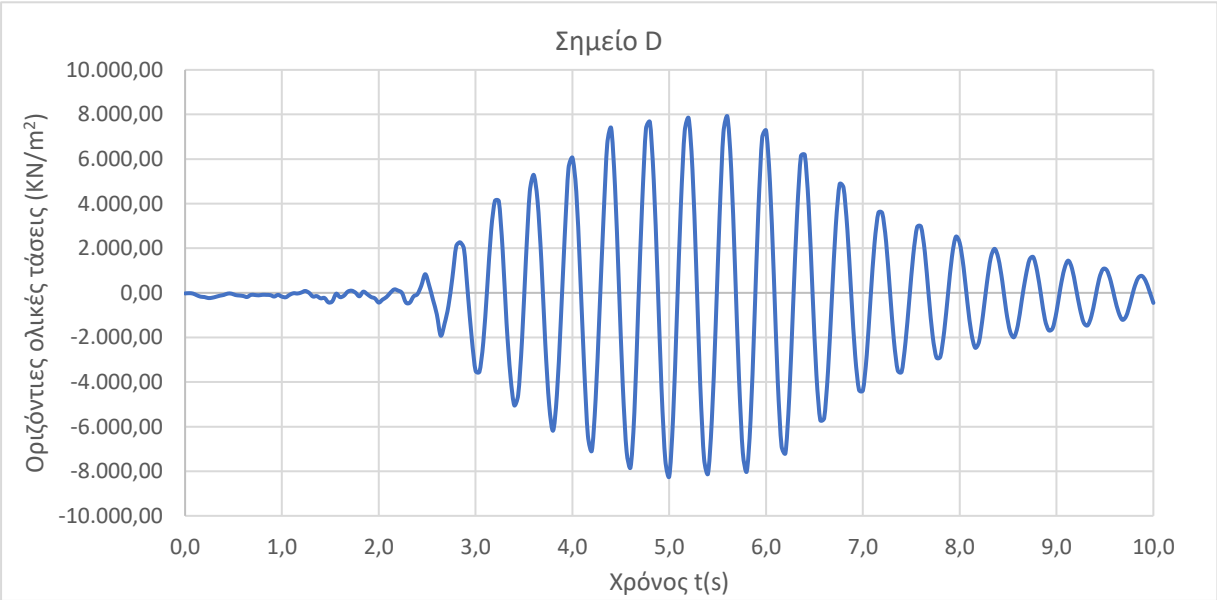


Διάγραμμα 4.53 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για τον πραγματικό σεισμό 225Α



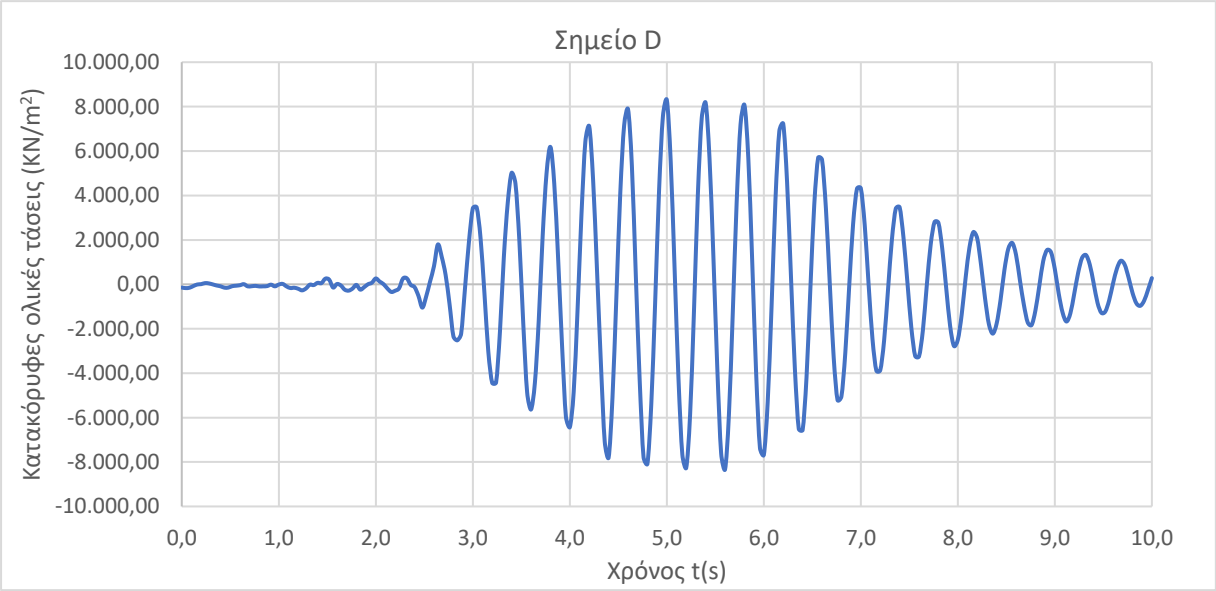
Διάγραμμα 4.54 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείου C για πραγματικό σεισμό 225Α

Τάσεις



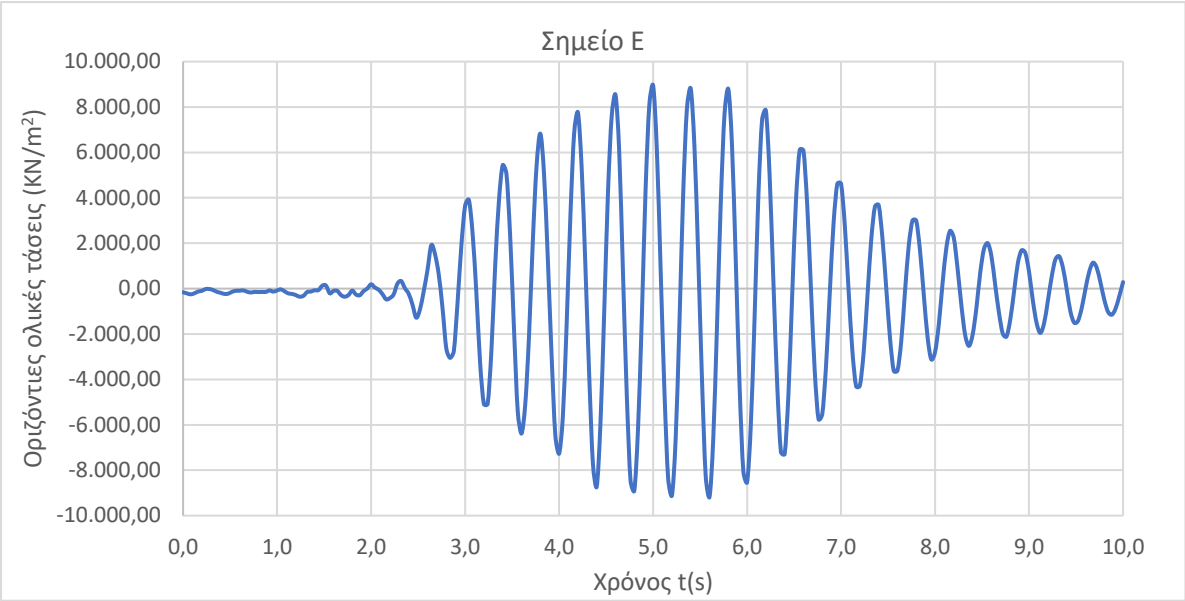
Διάγραμμα 4.55 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι - 8230 KN/m^2.



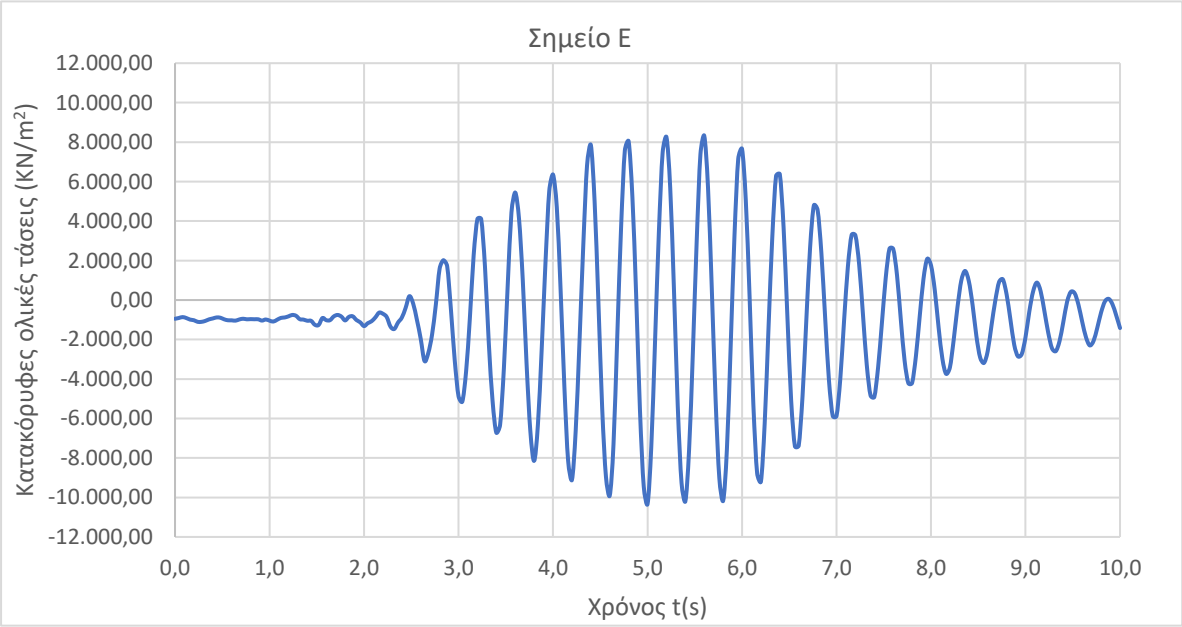
Διάγραμμα 4.56 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5,6 δευτερόλεπτα και είναι - 8340 KN/m^2.



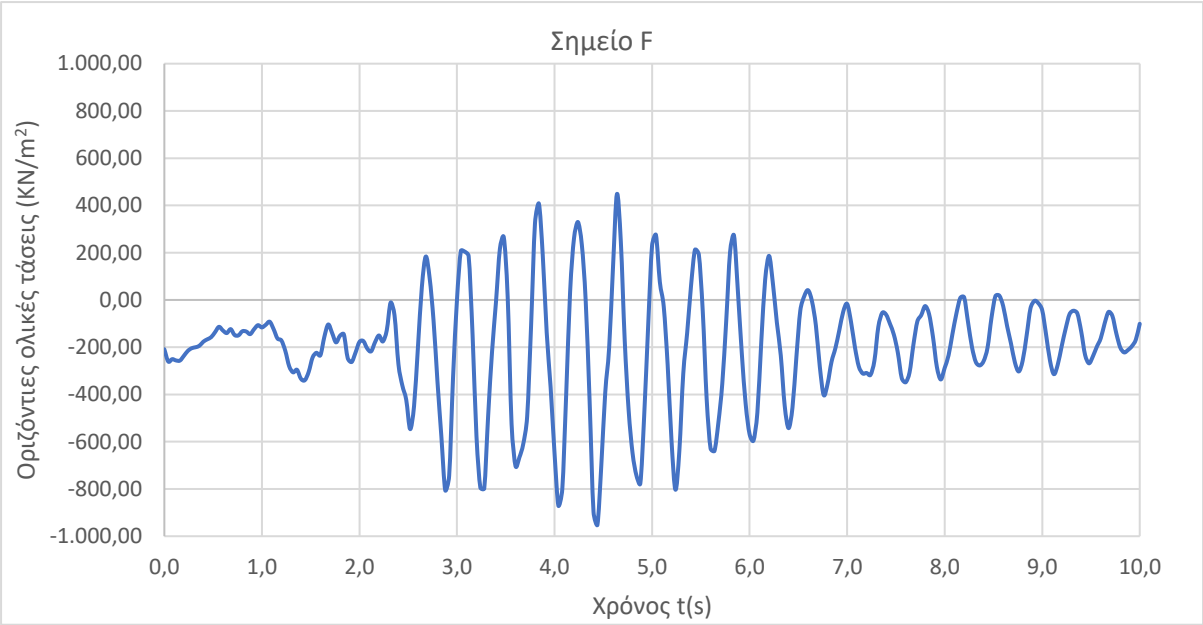
Διάγραμμα 4.57 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5,6 δευτερόλεπτα και είναι - 9180 KN/m^2.



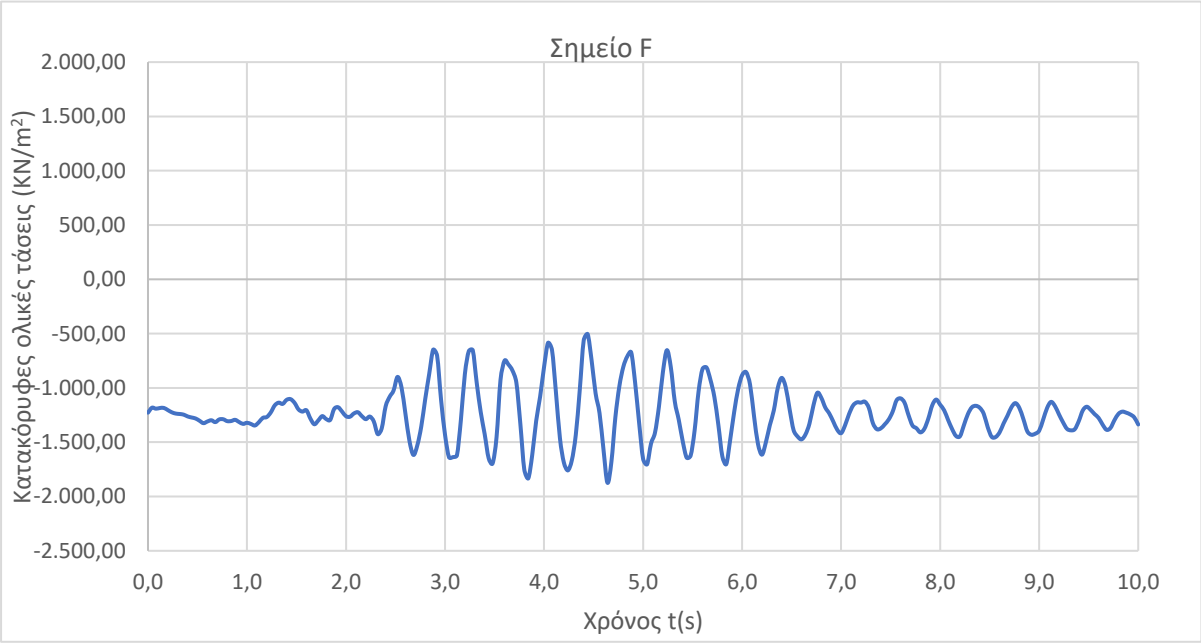
Διάγραμμα 4.58 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι - 10300 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.59 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

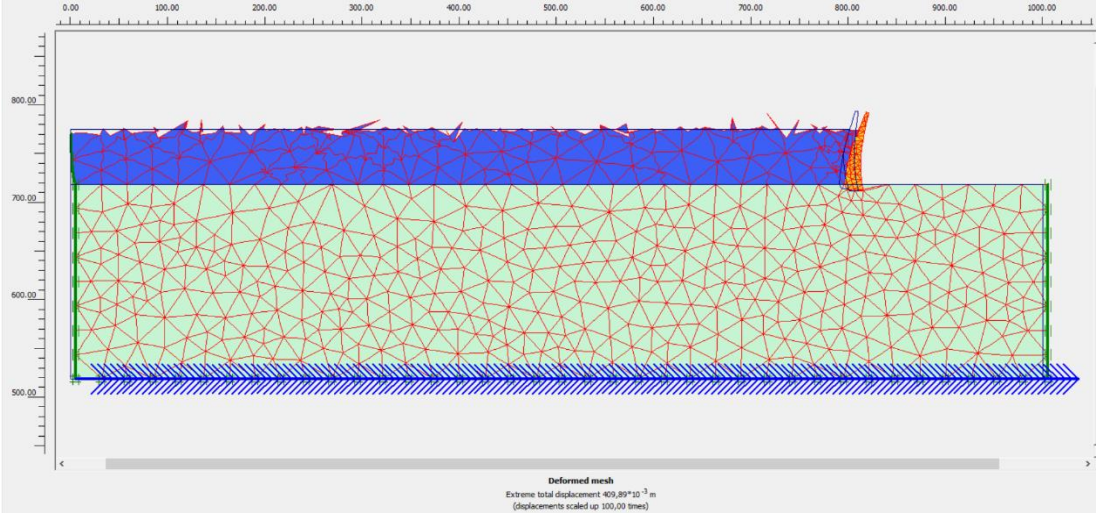
Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,44 δευτερόλεπτα και είναι - 952 KN/m^2.



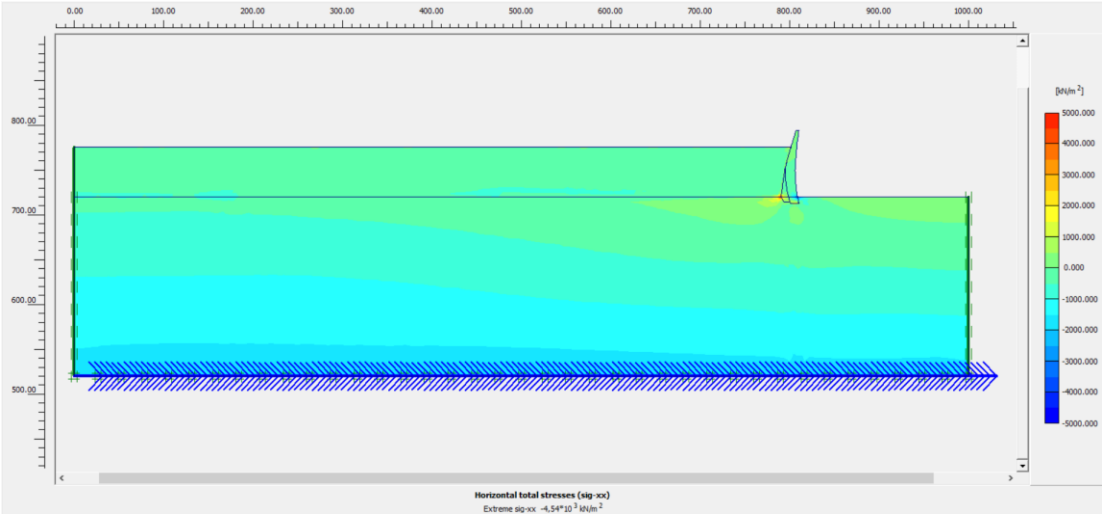
Διάγραμμα 4.60 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι - 1870 KN/m^2.

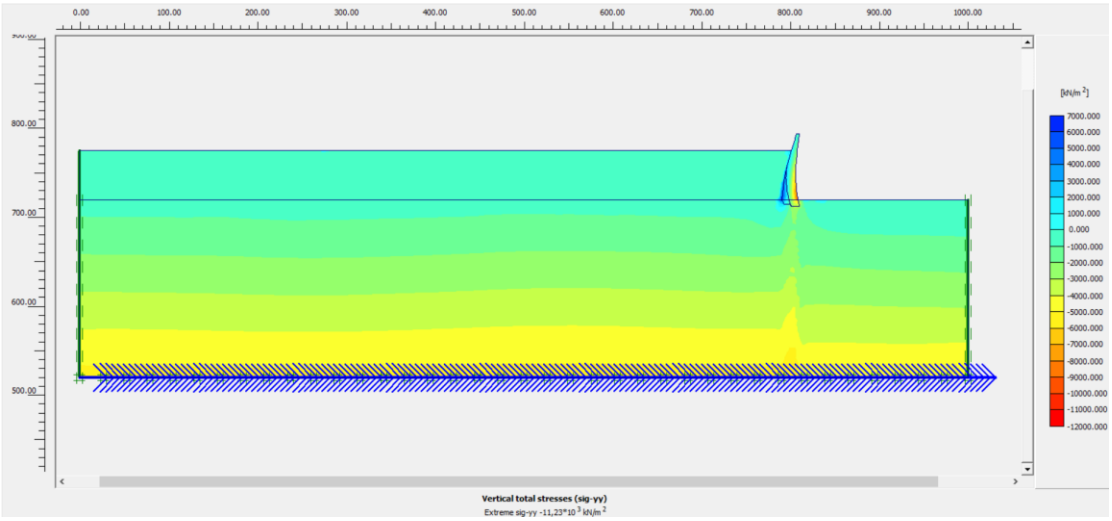
Σεισμική δόνηση πραγματικού σεισμού 225Α και Μέθοδος χρήσης νερού με την μορφή υλικού



Εικόνα 4.183 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος

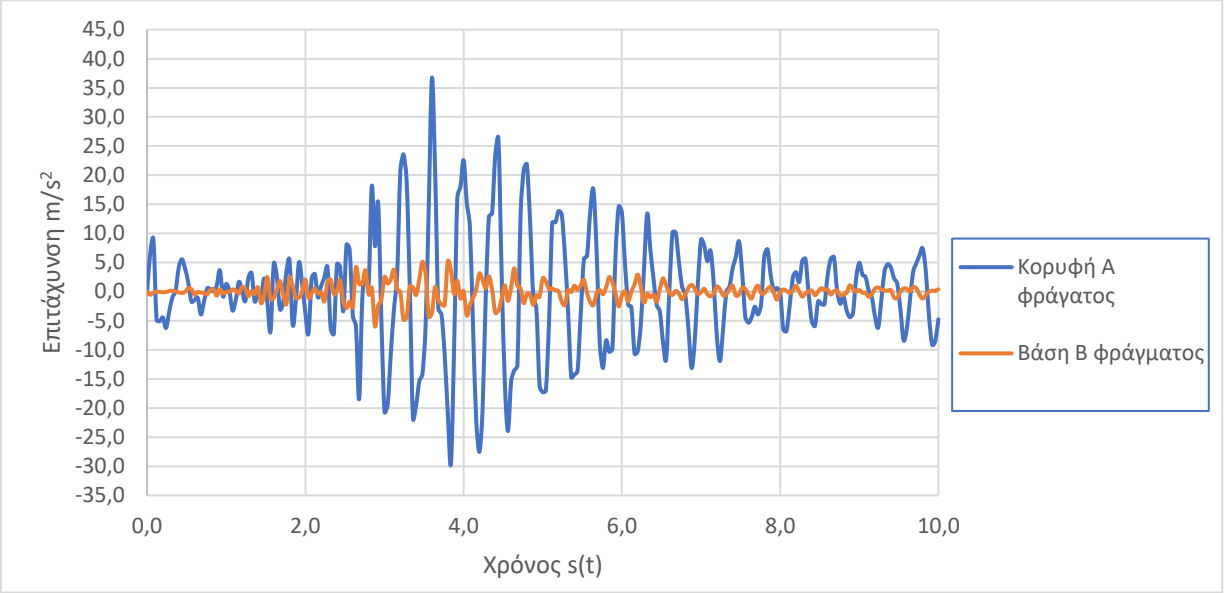


Εικόνα 4.184 Οριζόντιες ολικές τάσεις

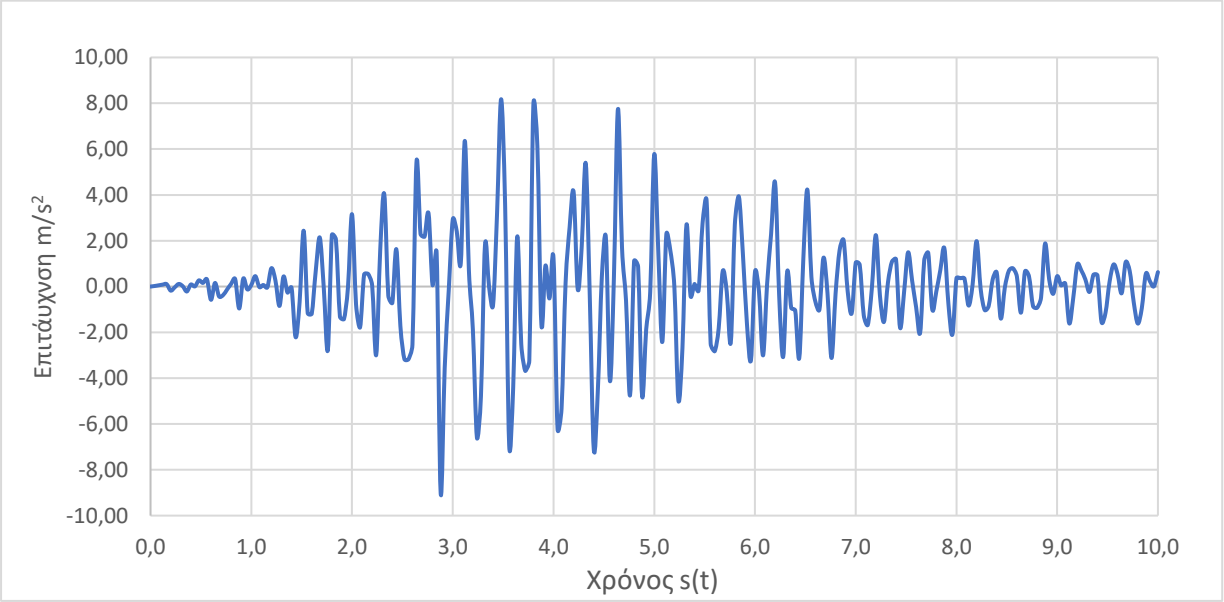


Εικόνα 4.185 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Επιταχύνσεις

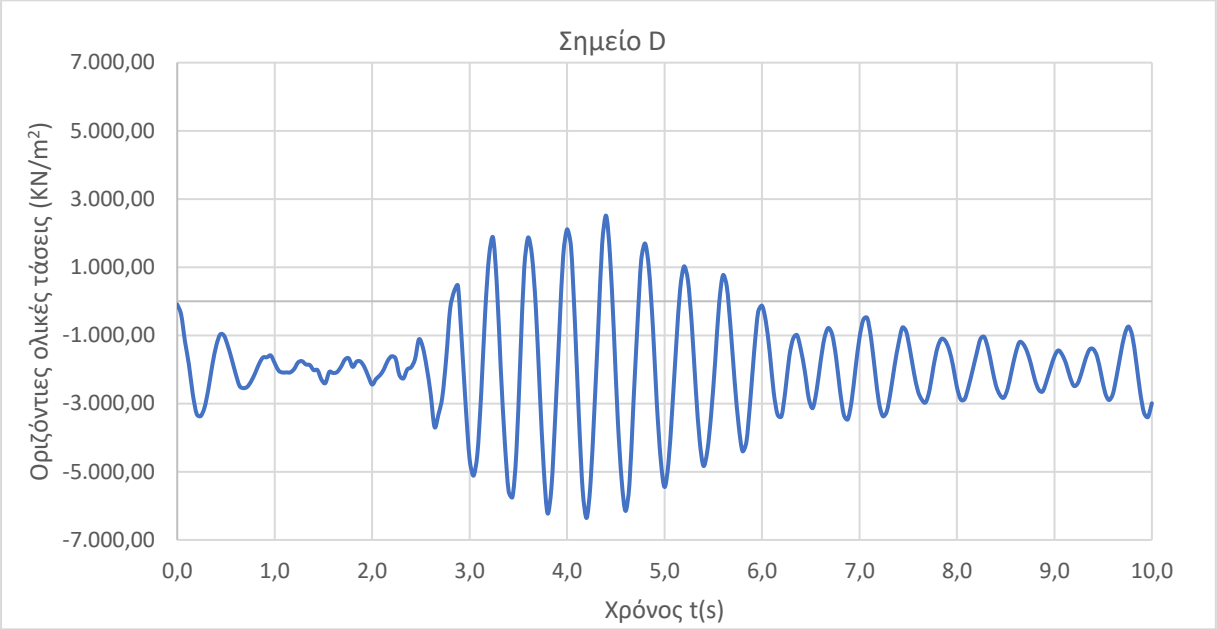


Διάγραμμα 4.61 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για τον πραγματικό σεισμό 225Α



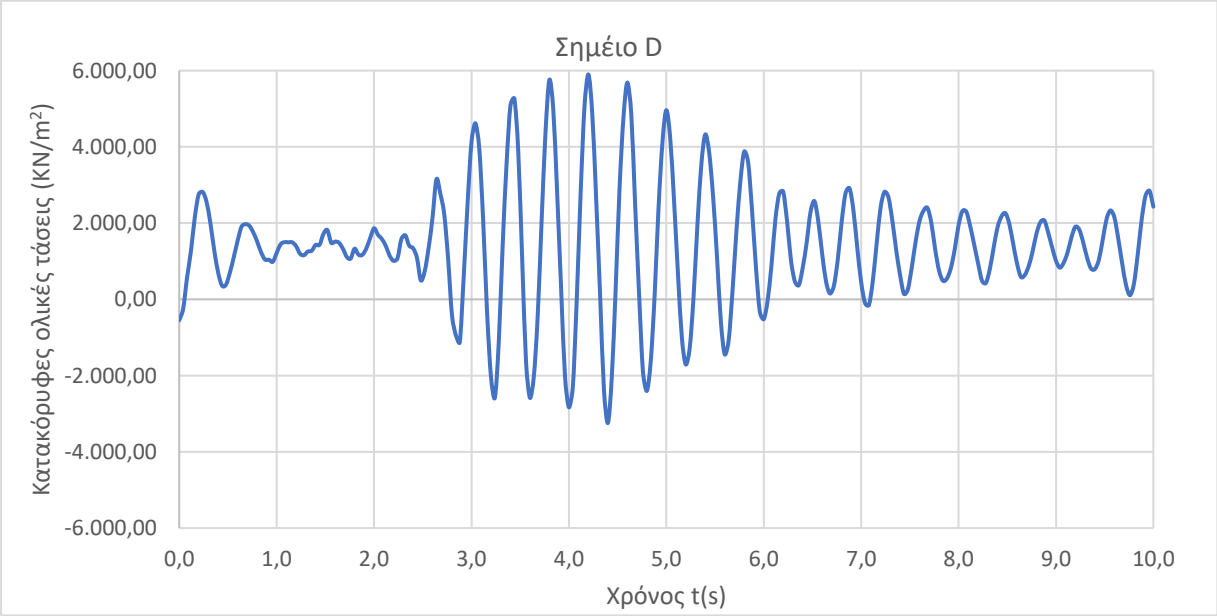
Διάγραμμα 4.62 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείου C για τον πραγματικό σεισμό 225Α

Τάσεις



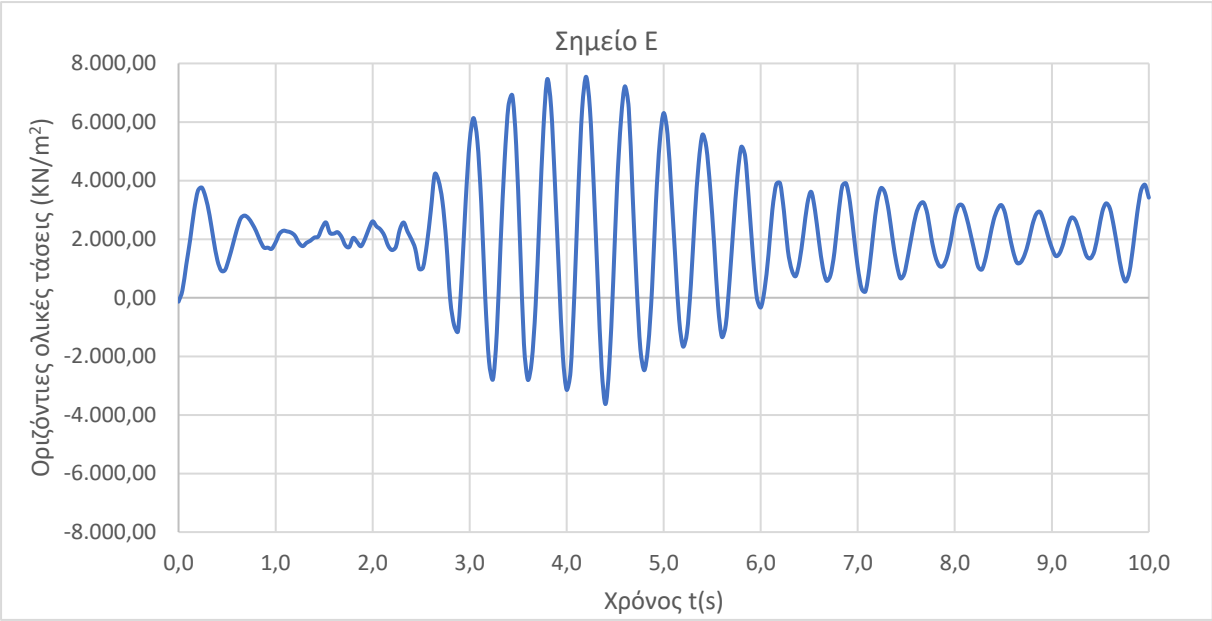
Διάγραμμα 4.63 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,2 δευτερόλεπτα και είναι - 6360 KN/m^2.



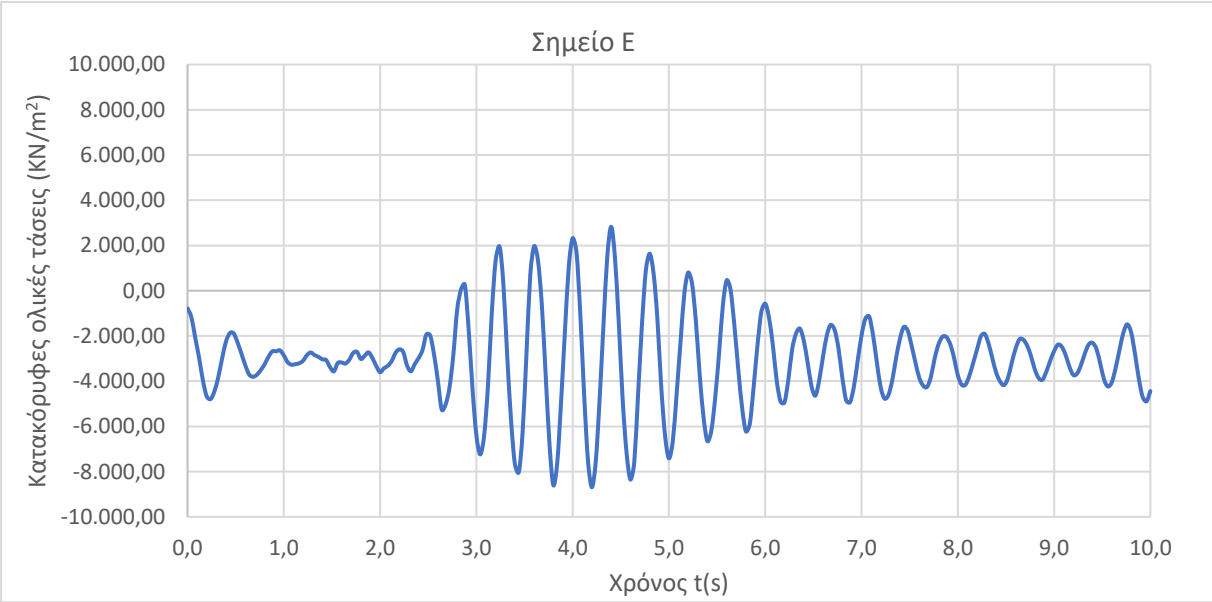
Διάγραμμα 4.64 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,2 δευτερόλεπτα και είναι + 5900 KN/m^2.



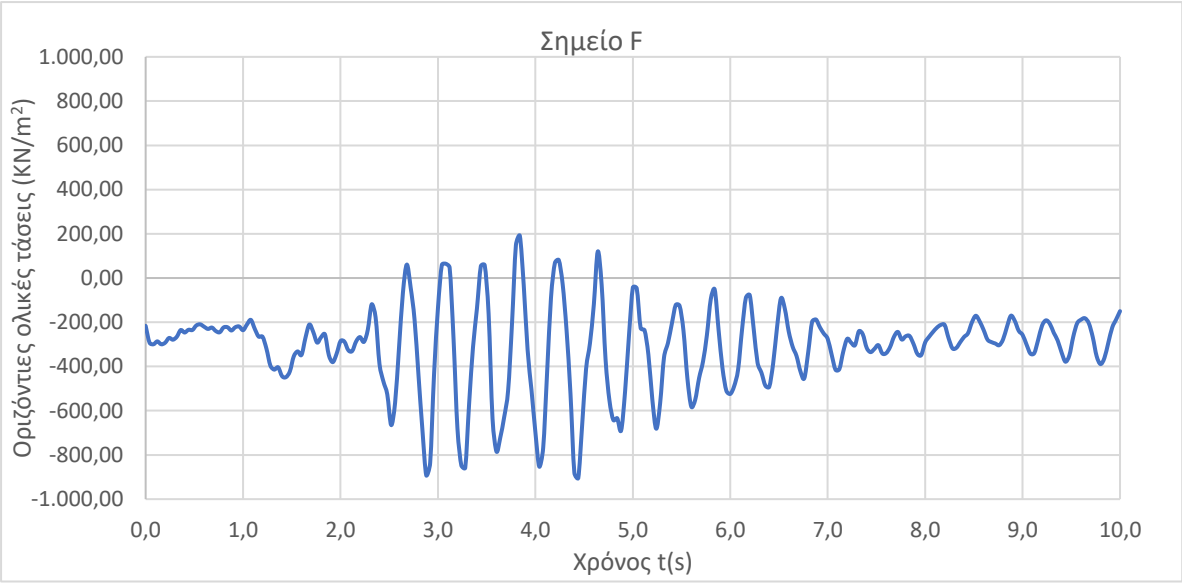
Διάγραμμα 4.65 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,2 δευτερόλεπτα και είναι + 7550 KN/m^2.



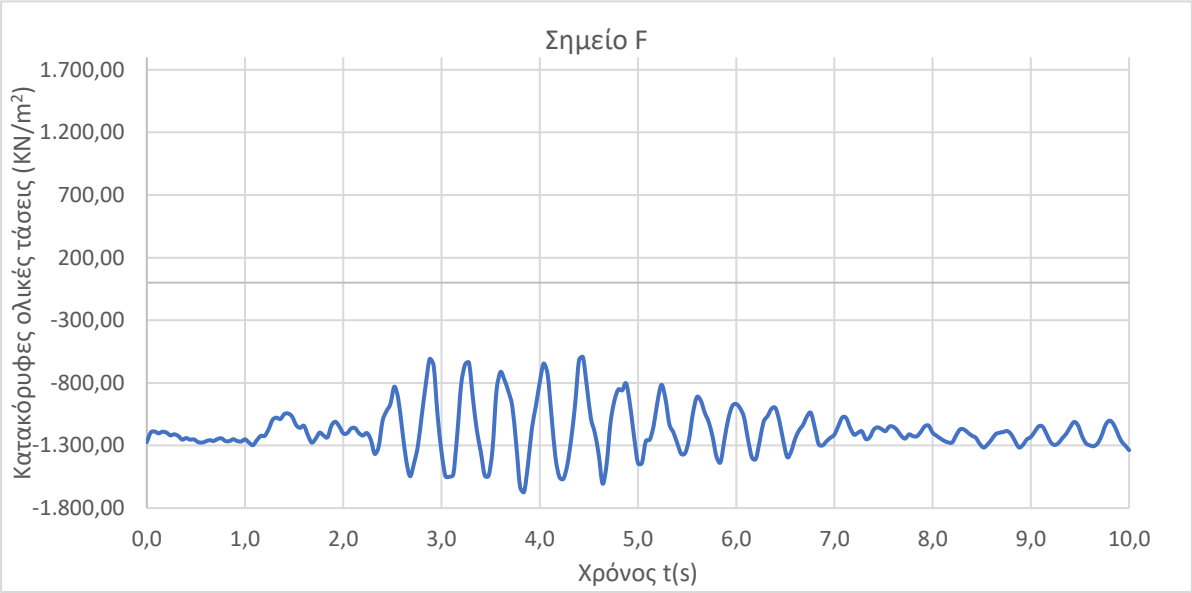
Διάγραμμα 4.66 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,2 δευτερόλεπτα και είναι - 8690 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.67 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,44 δευτερόλεπτα και είναι – 905 KN/m^2.

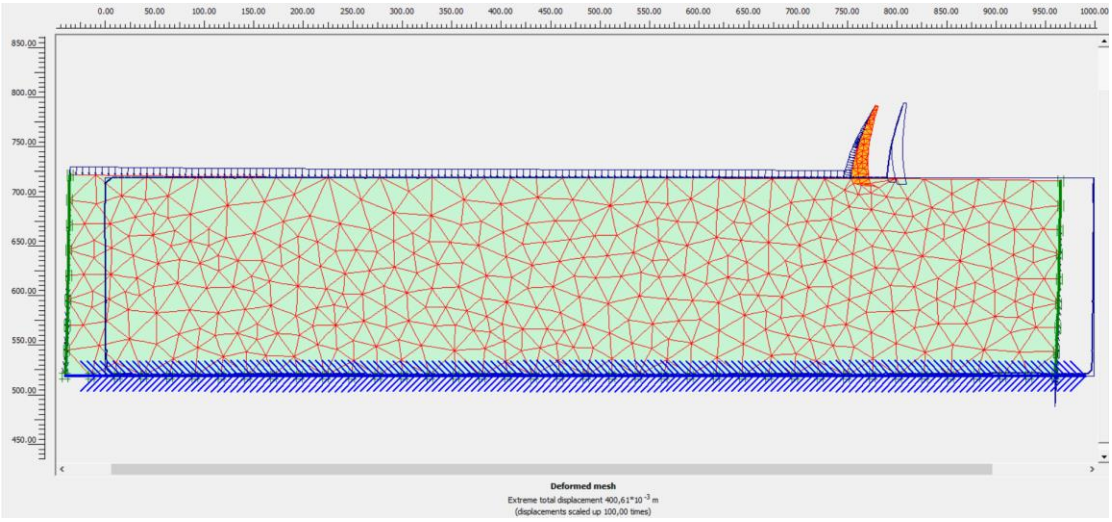


Διάγραμμα 4.68 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

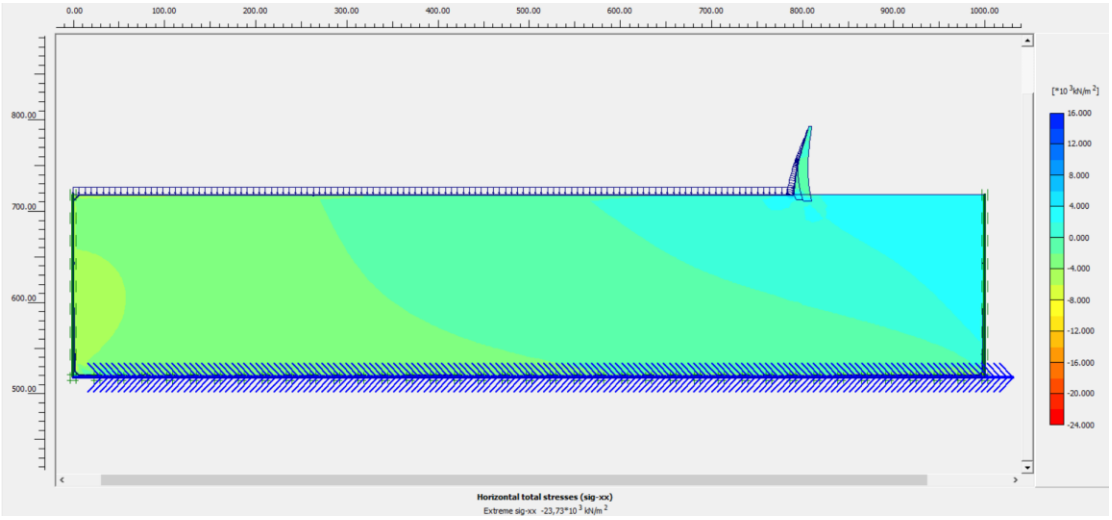
Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 3,84 δευτερόλεπτα και είναι - 1670 KN/m^2.

4.4.2.3 Δυναμική ανάλυση με την παρουσία νερού (+ 792 m)

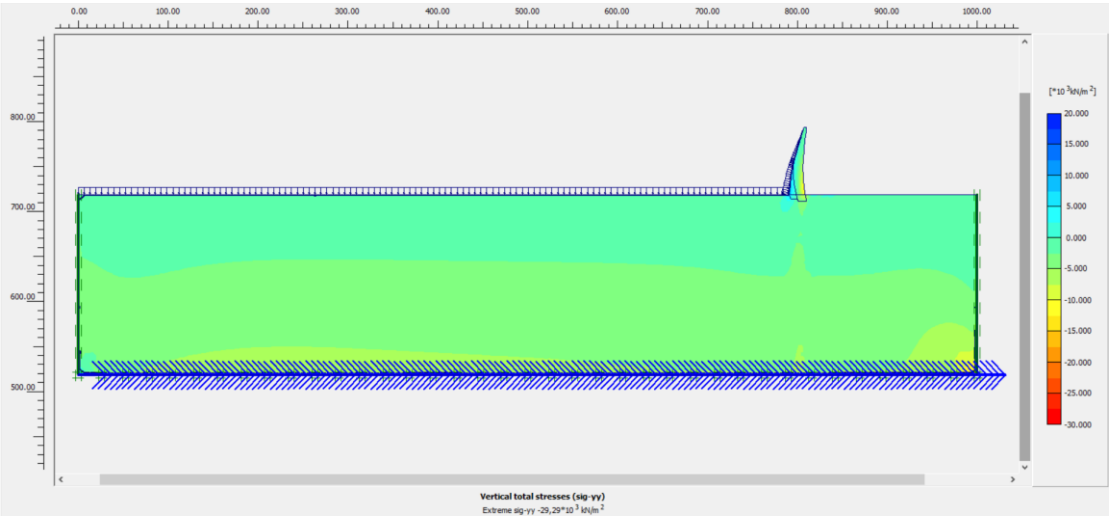
Σεισμική δόνηση παλμού Ricker (f = 2Hz) και Μέθοδος Ground water calculation



Εικόνα 4.186 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος

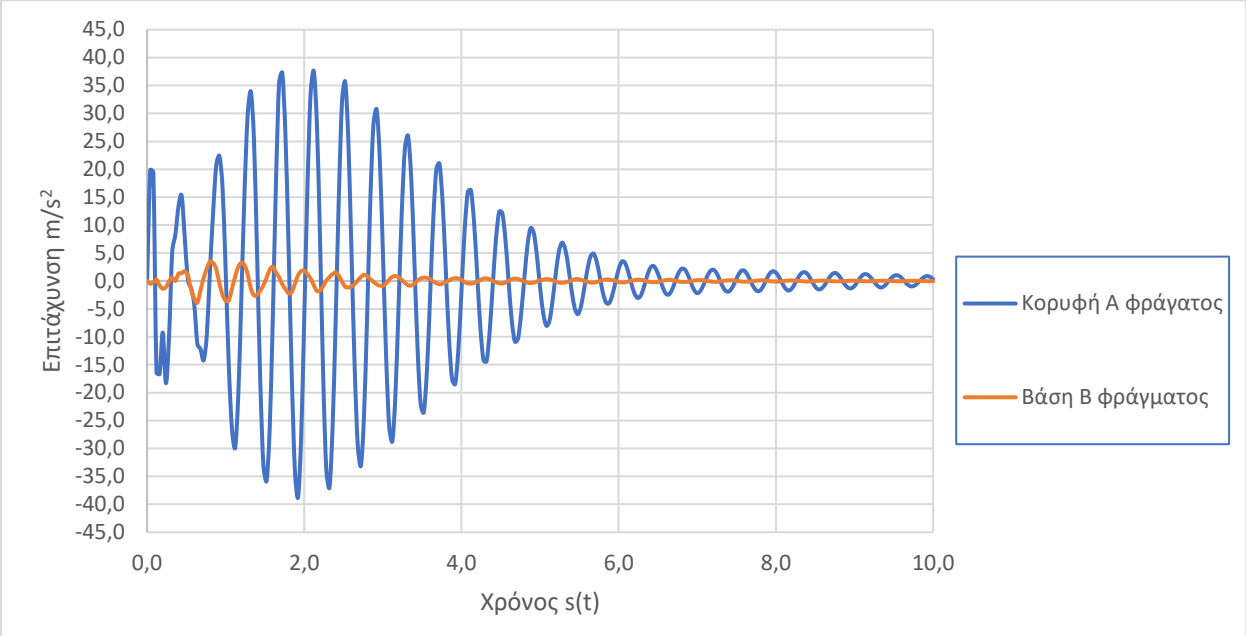


Εικόνα 4.187 Οριζόντιες ολικές τάσεις

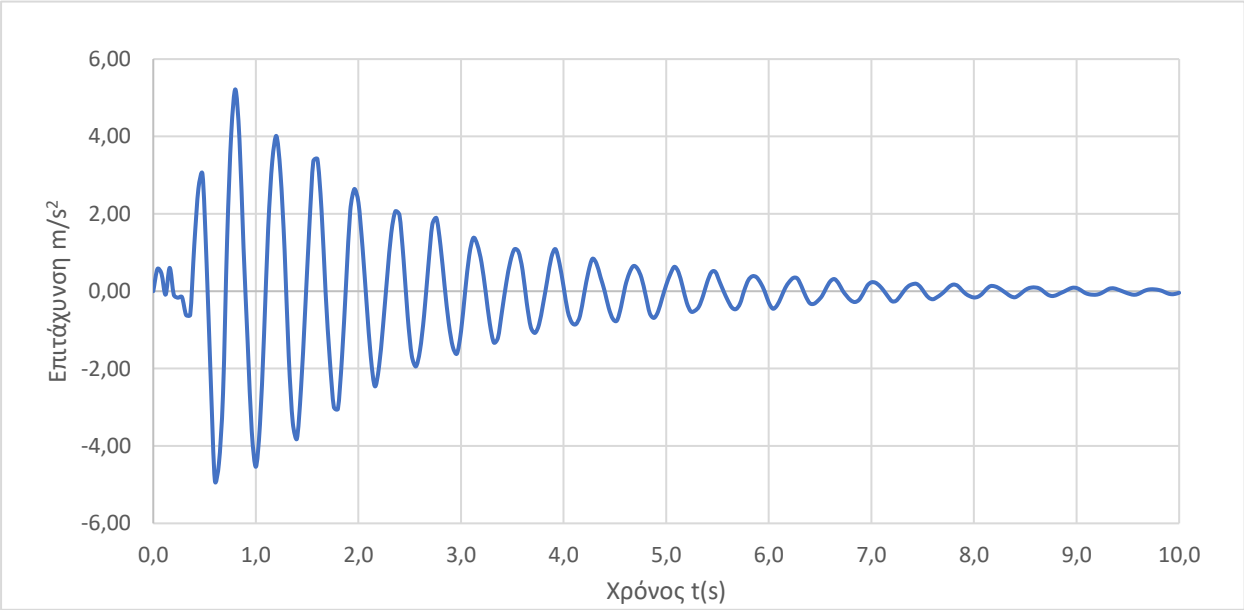


Εικόνα 4.188 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Επιταχύνσεις

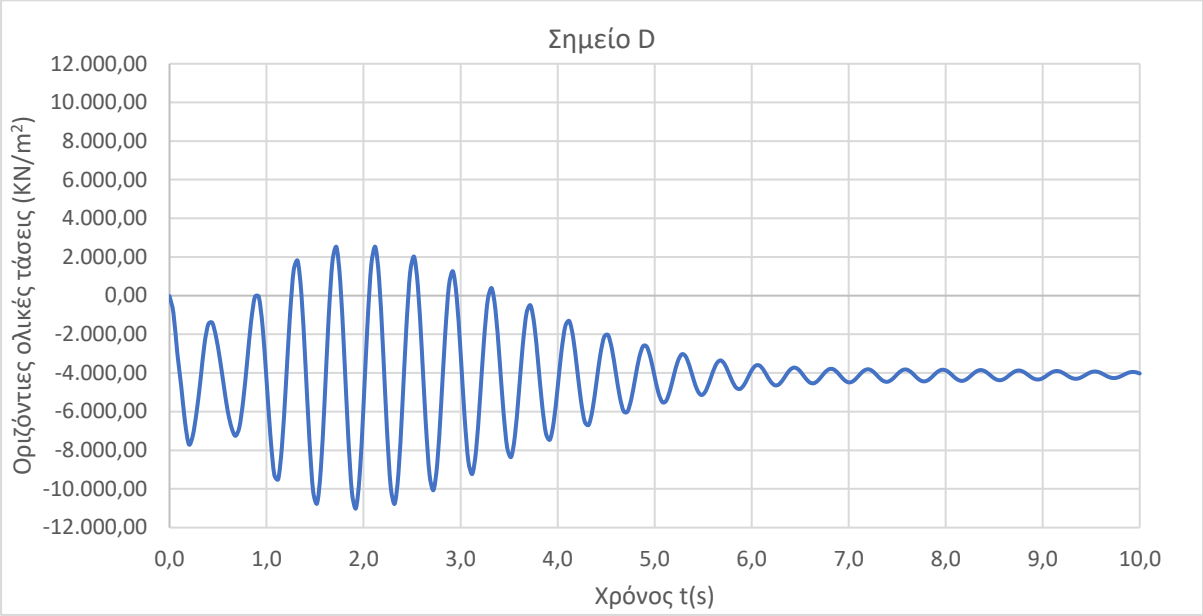


Διάγραμμα 4.69 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για τον παλμό Ricker (f = 2Hz)



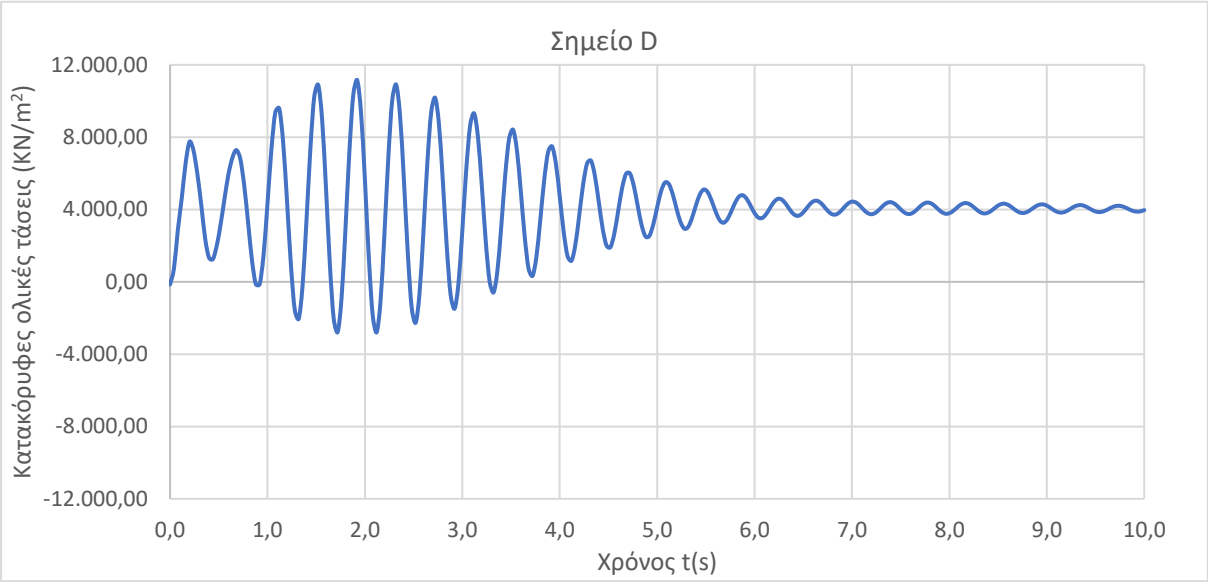
Διάγραμμα 4.70 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείου C για τον παλμό Ricker (f = 2Hz)

Τάσεις



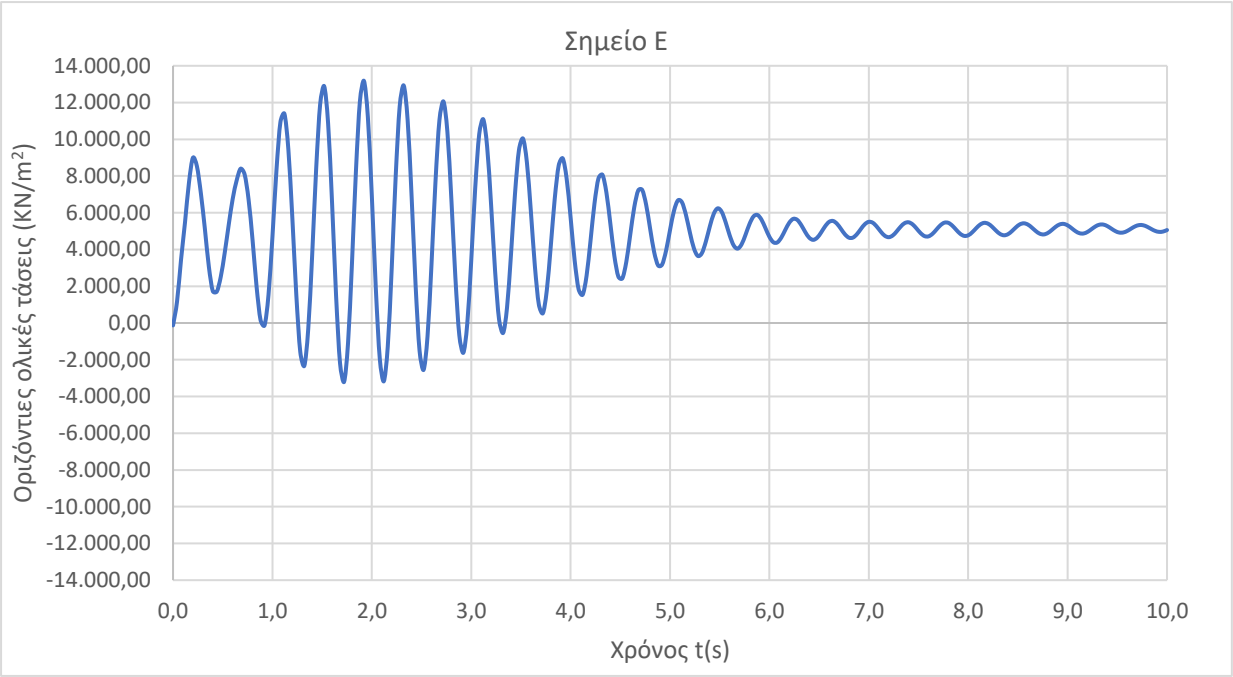
Διάγραμμα 4.71 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι – 11000 KN/m^2.



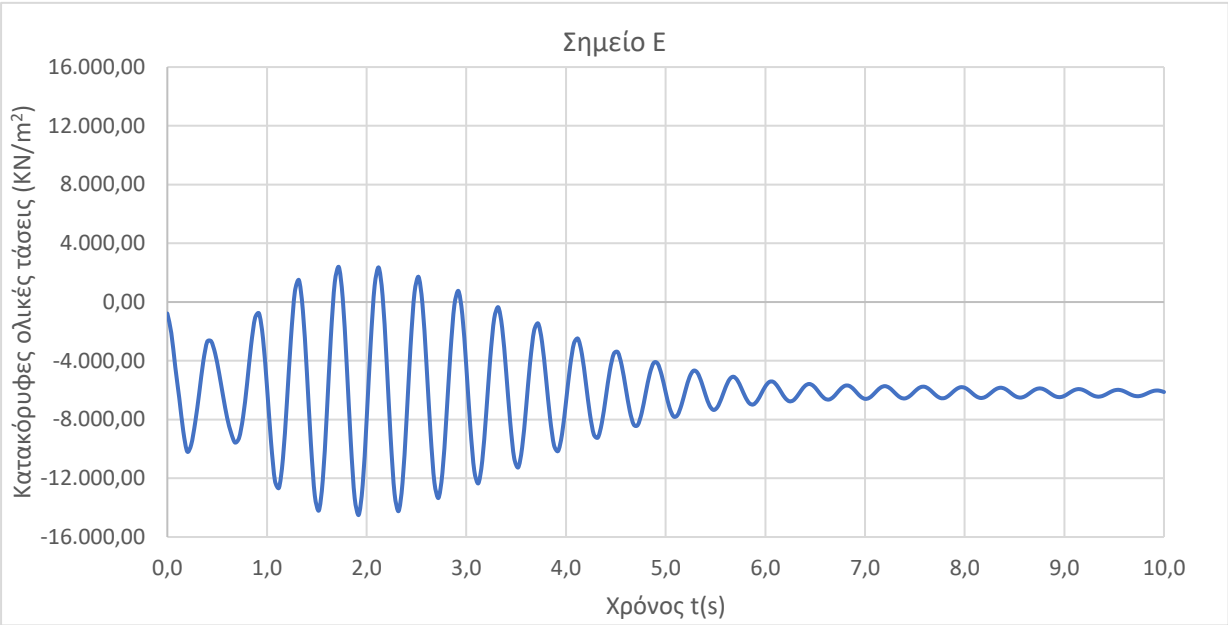
Διάγραμμα 4.72 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι + 11200 KN/m^2.



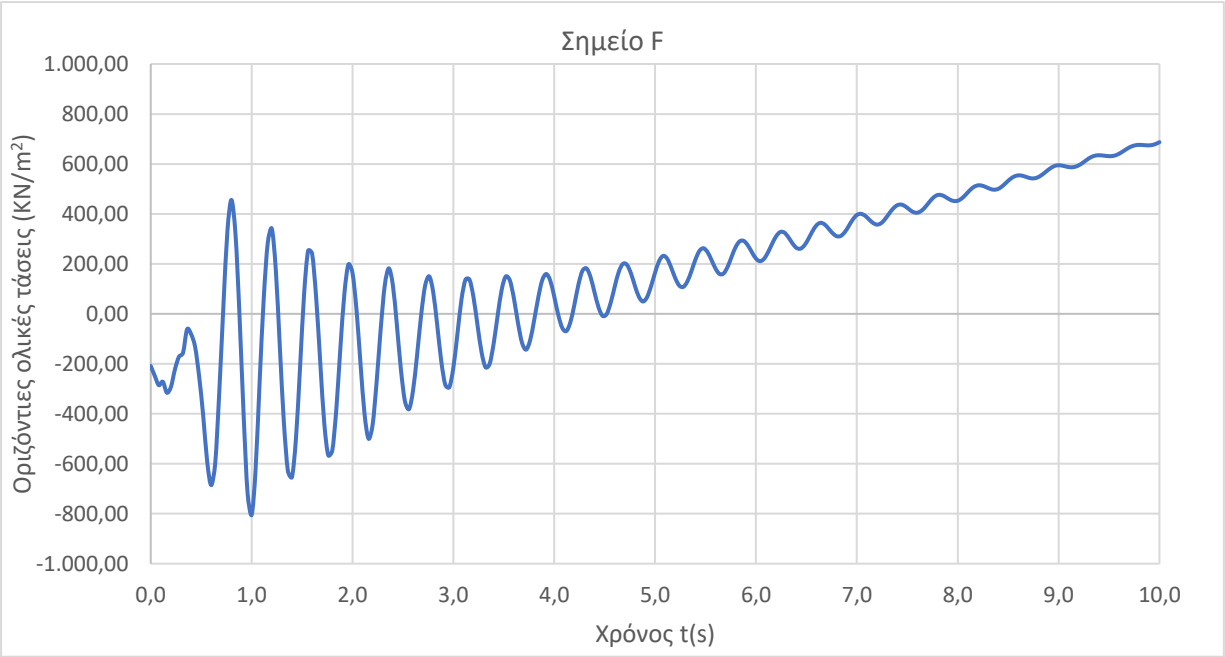
Διάγραμμα 4.73 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι + 13200 KN/m^2.



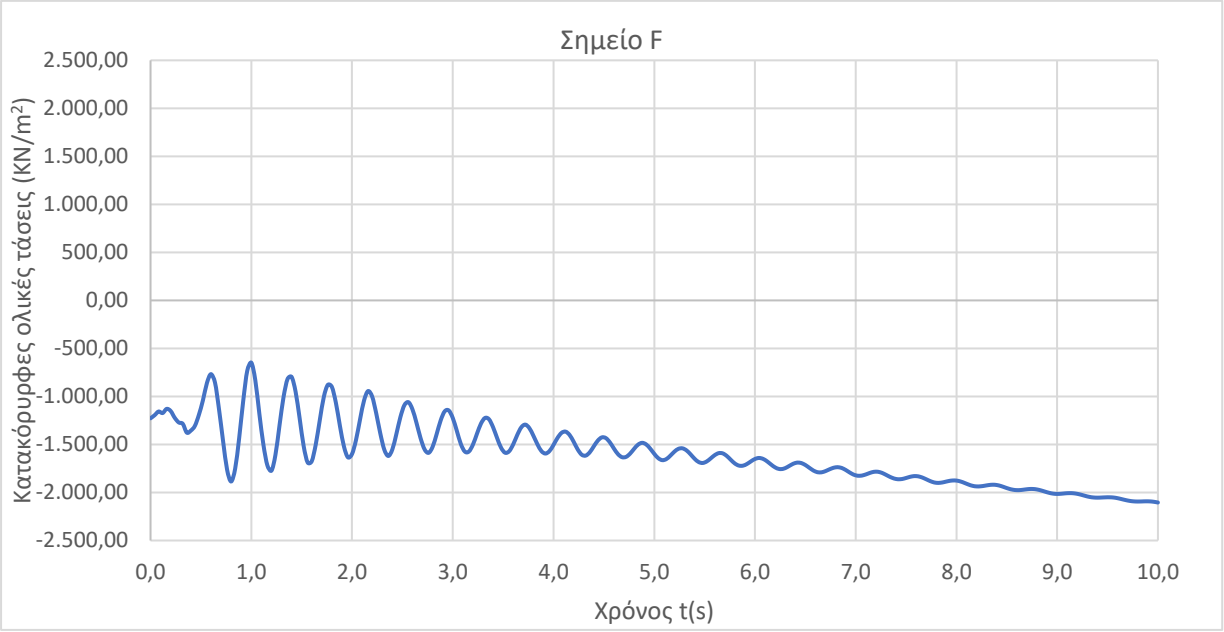
Διάγραμμα 4.74 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 1,92 δευτερόλεπτα και είναι - 14500 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.75 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

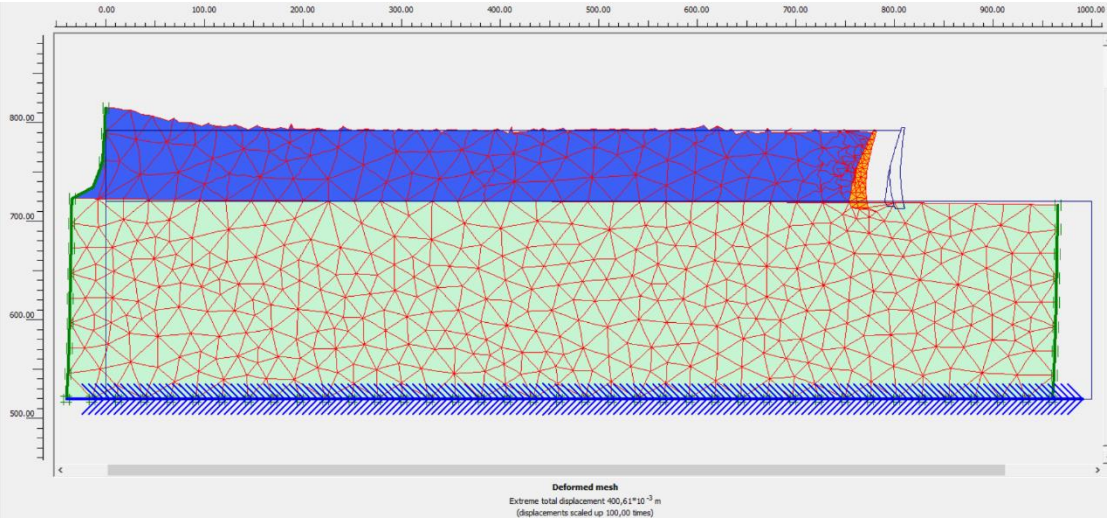
Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στο 1 δευτερόλεπτο και είναι - 805 KN/m^2.



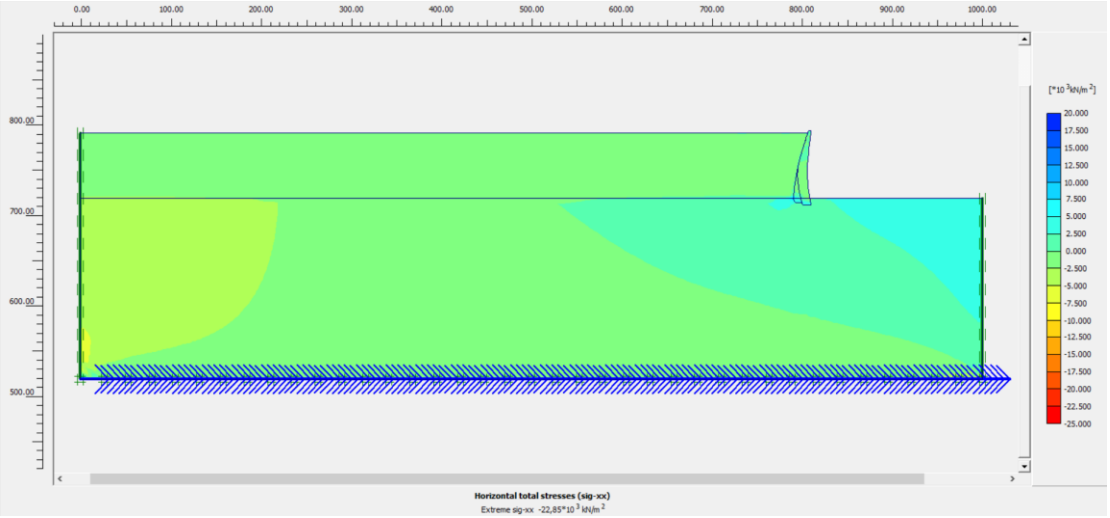
Διάγραμμα 4.76 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 10 δευτερόλεπτα και είναι - 2100 KN/m^2.

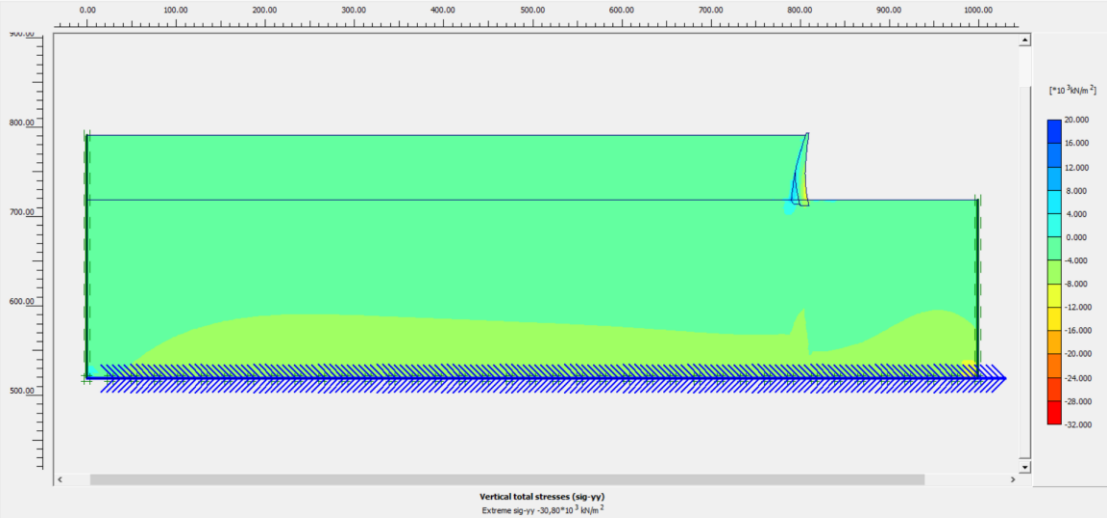
Σεισμική δόνηση παλμού Ricker (f = 2Hz) και Μέθοδος χρήσης νερού με την μορφή υλικού



Εικόνα 4.189 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοίωσης

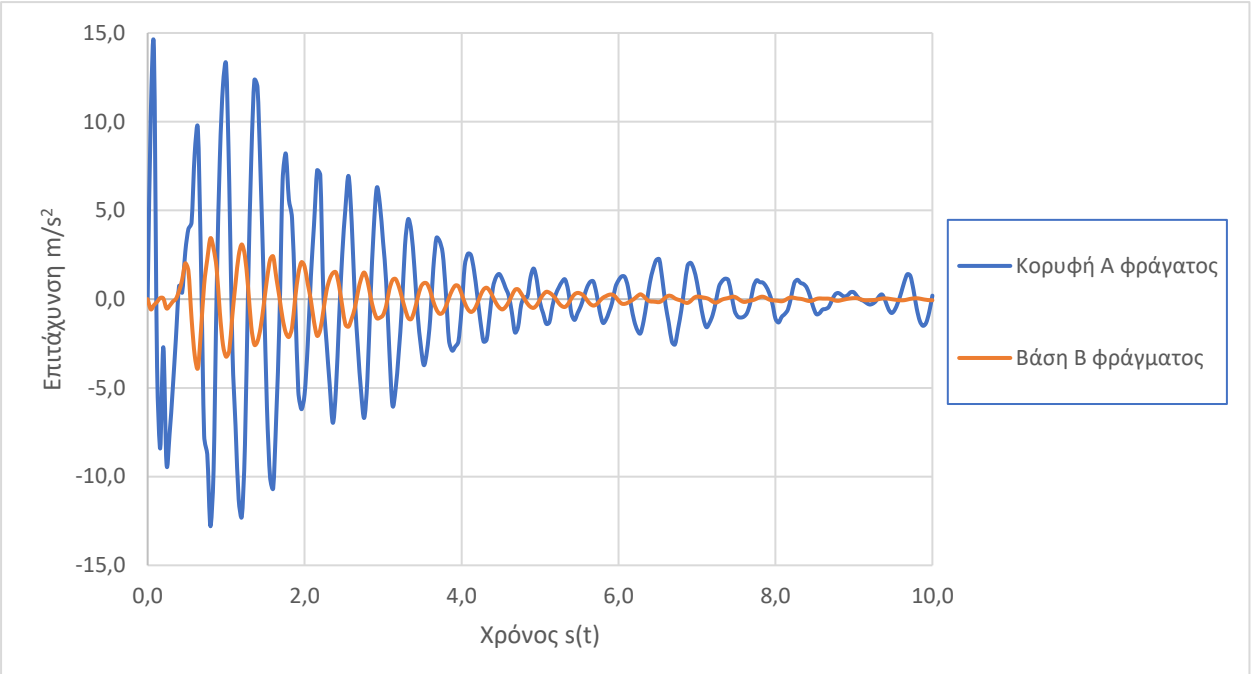


Εικόνα 4.190 Οριζόντιες ολικές τάσεις

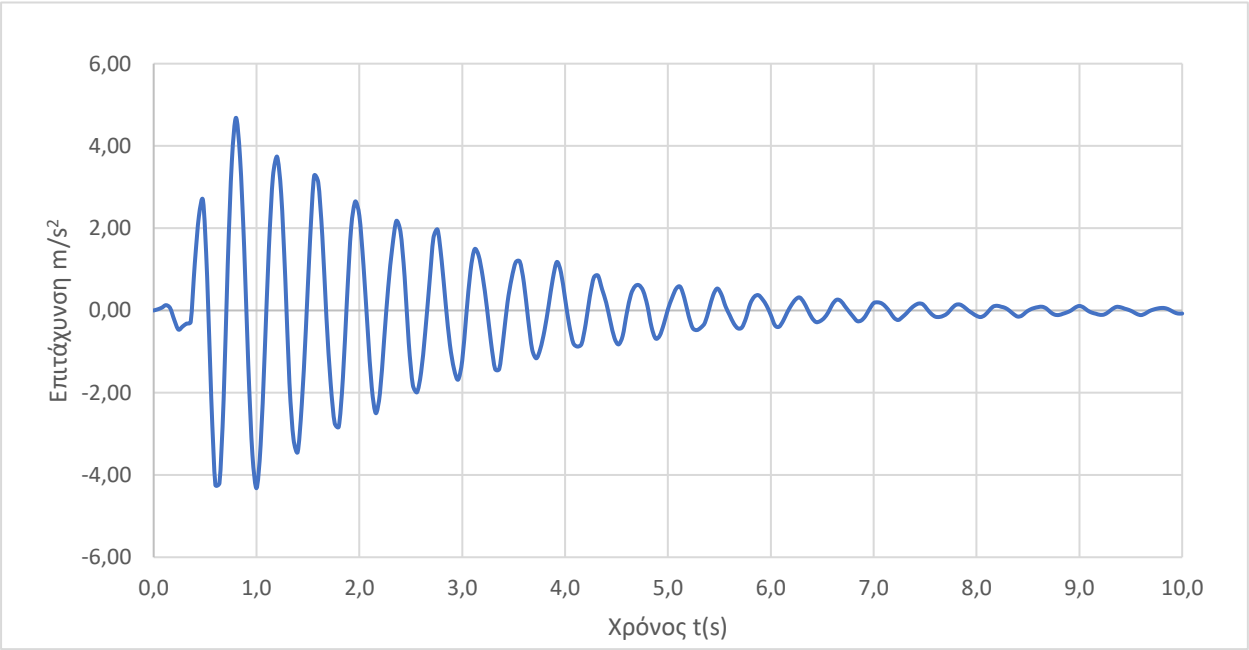


Εικόνα 4.191Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Επιταχύνσεις

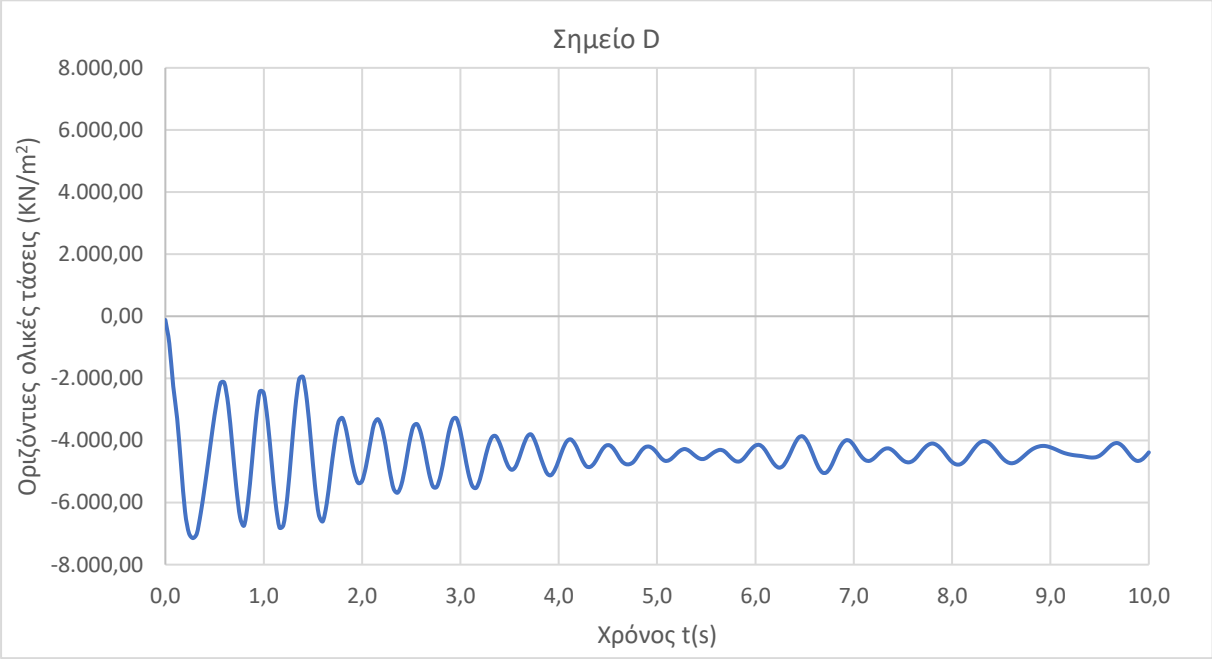


Διάγραμμα 4.77 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για τον παλμό Ricker (f = 2Hz)



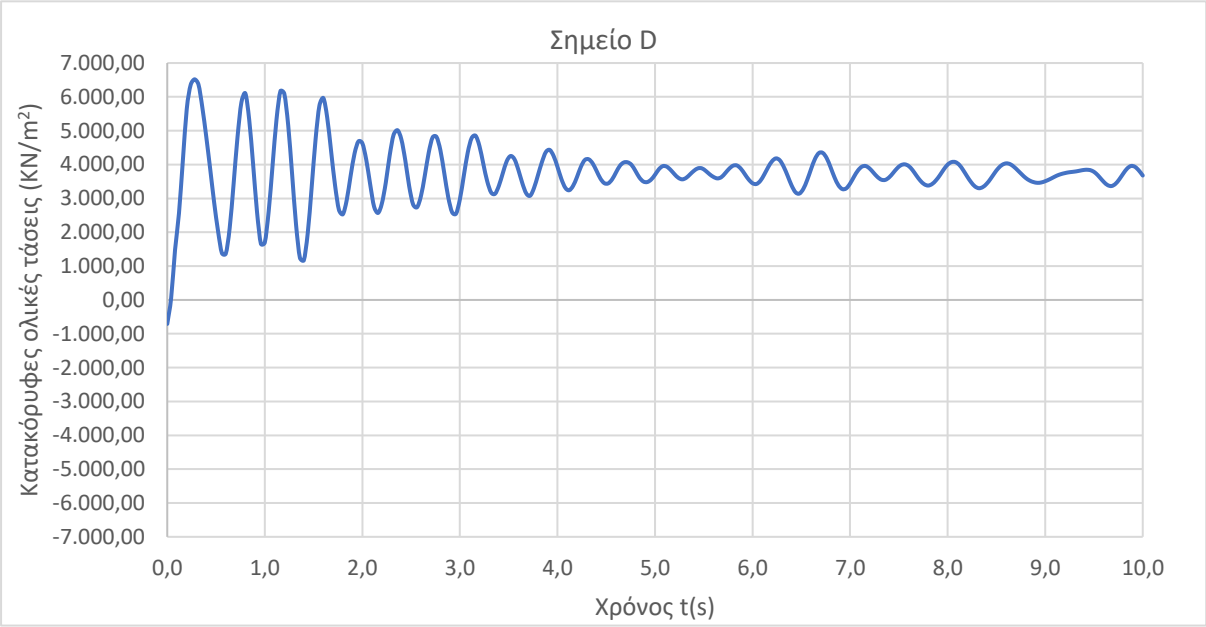
Διάγραμμα 4.78 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείου C, για τον παλμό Ricker (f = 2Hz)

Τάσεις



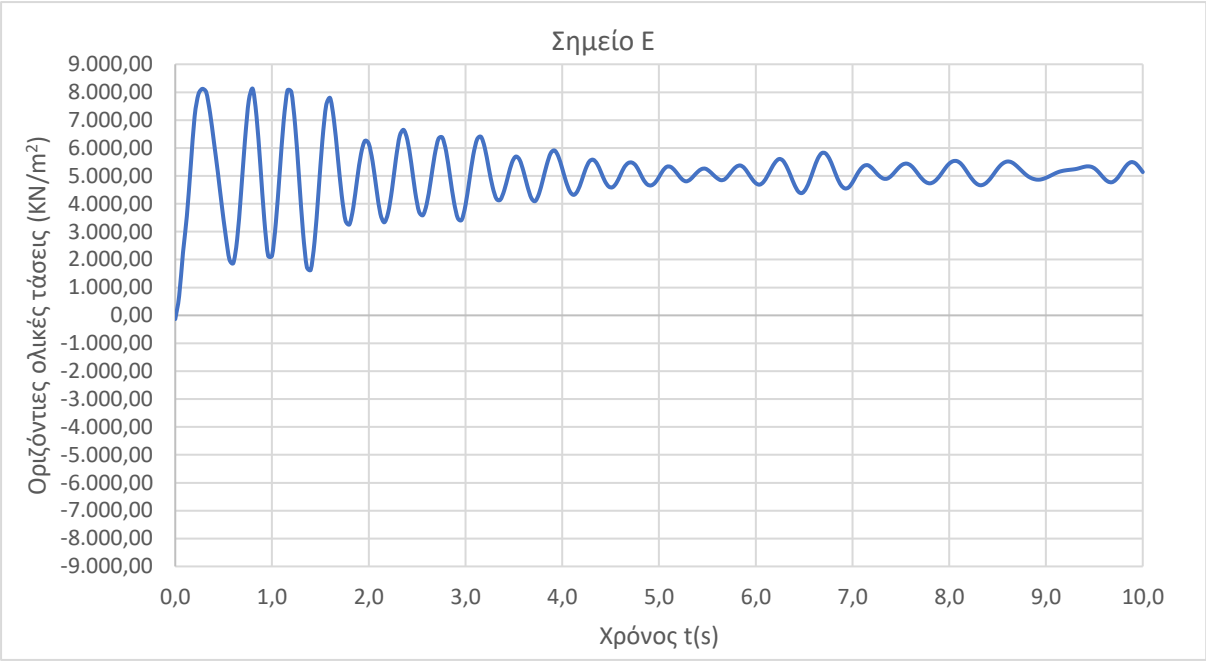
Διάγραμμα 4.79 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στο 0,28 δευτερόλεπτο και είναι - 7150 KN/m^2.



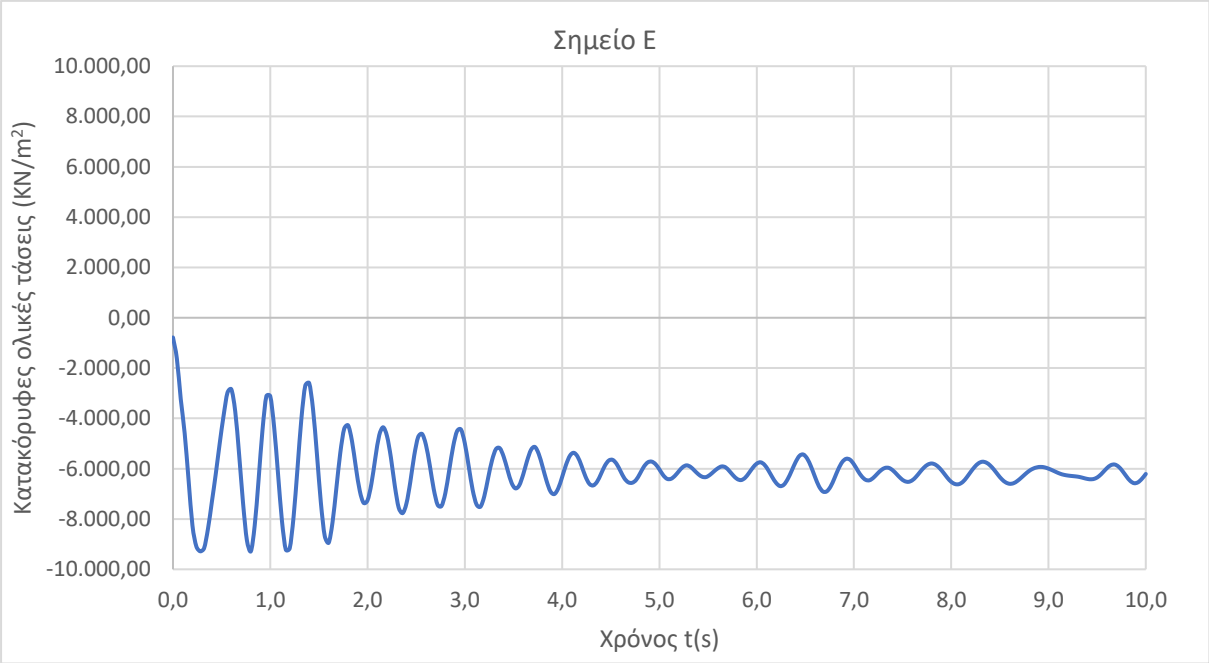
Διάγραμμα 4.80 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 0,28 δευτερόλεπτα και είναι + 6520 KN/m^2.



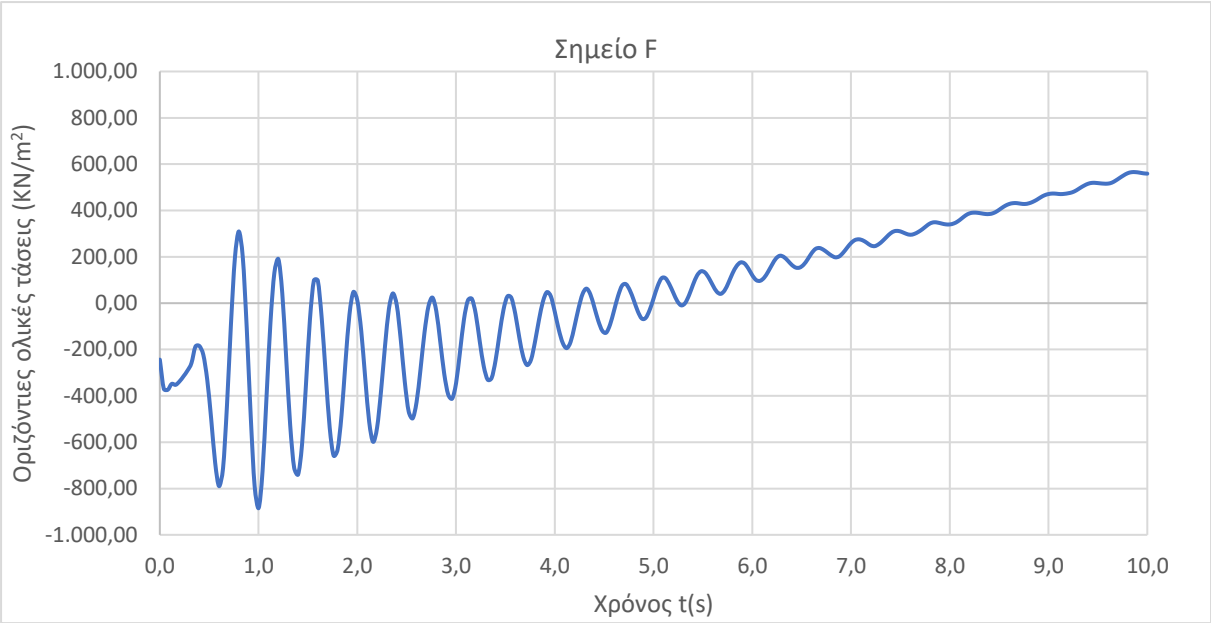
Διάγραμμα 4.81 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 0,28 και στα 0,8 δευτερόλεπτα και είναι + 8120 KN/m^2.



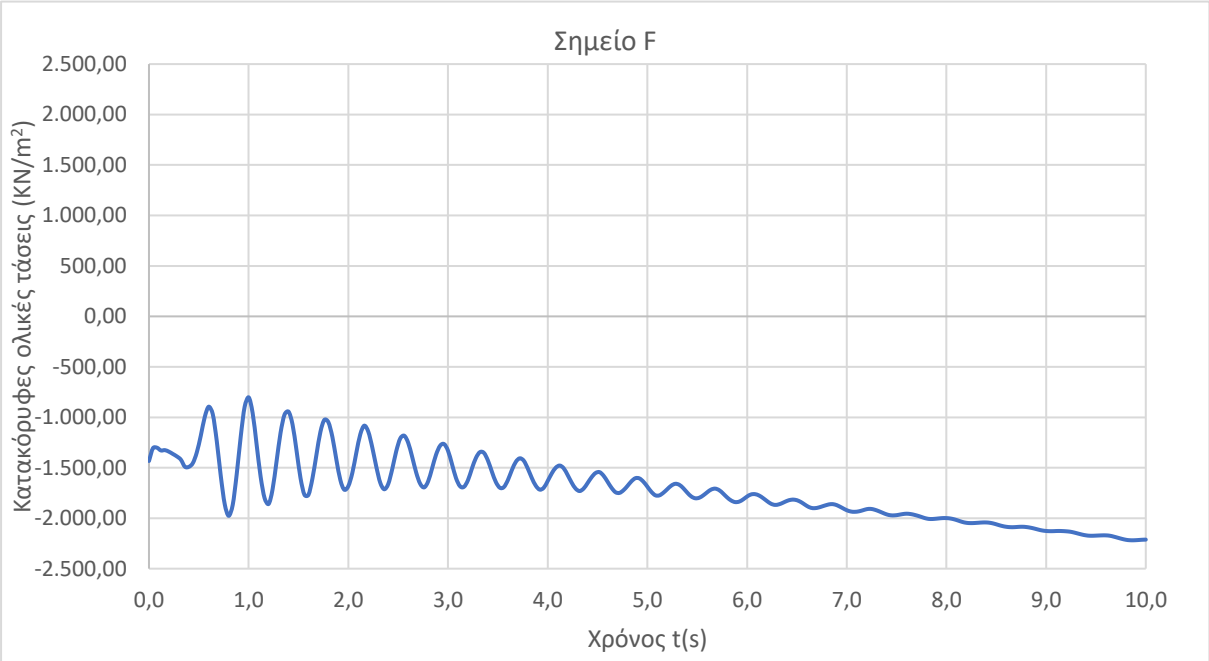
Διάγραμμα 4.82 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 0,8 δευτερόλεπτα και είναι – 9290 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.83 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

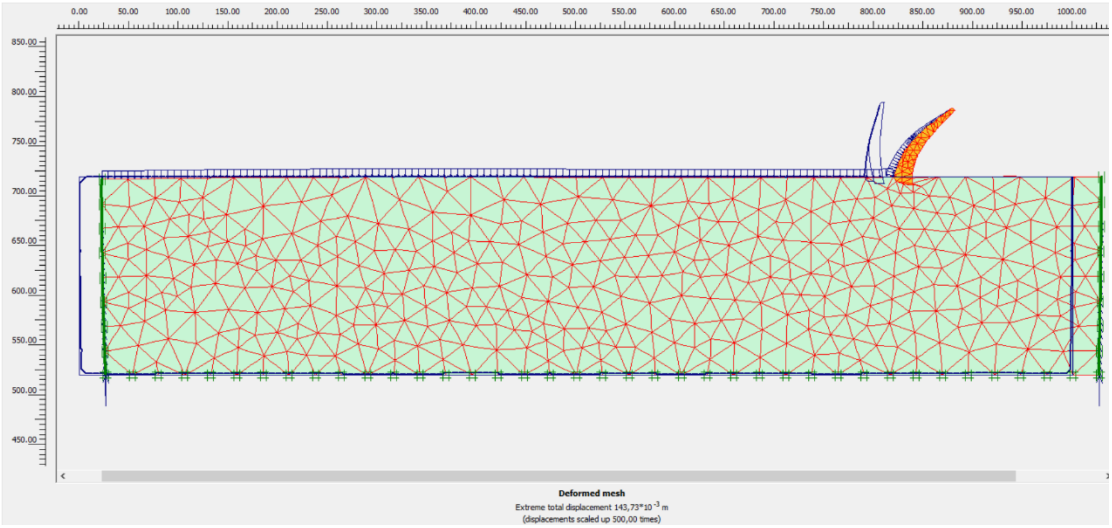
Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στο 1 δευτερόλεπτο και είναι - 885 KN/m^2.



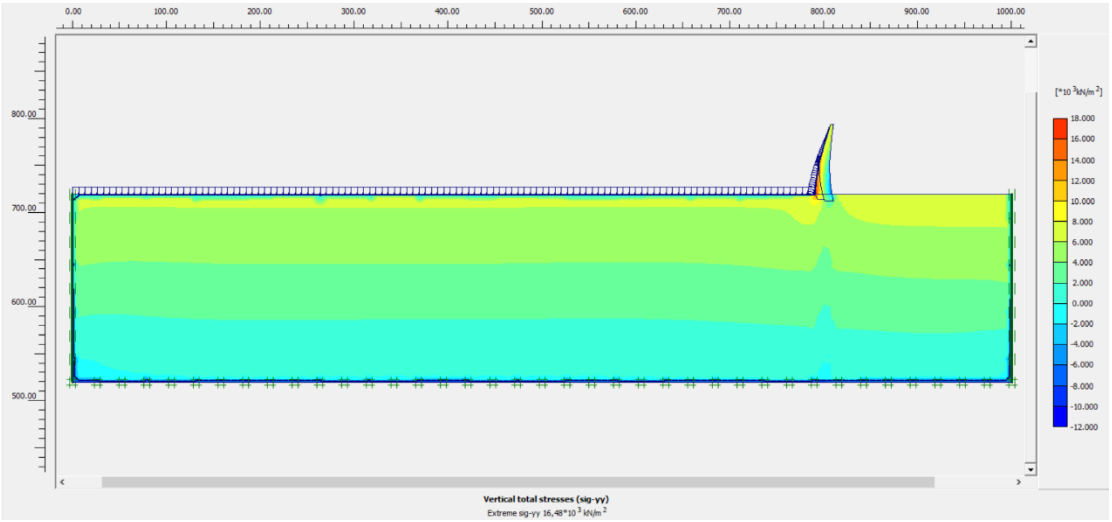
Διάγραμμα 4.84 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 9,88 δευτερόλεπτα και είναι – 2220 KN/m^2.

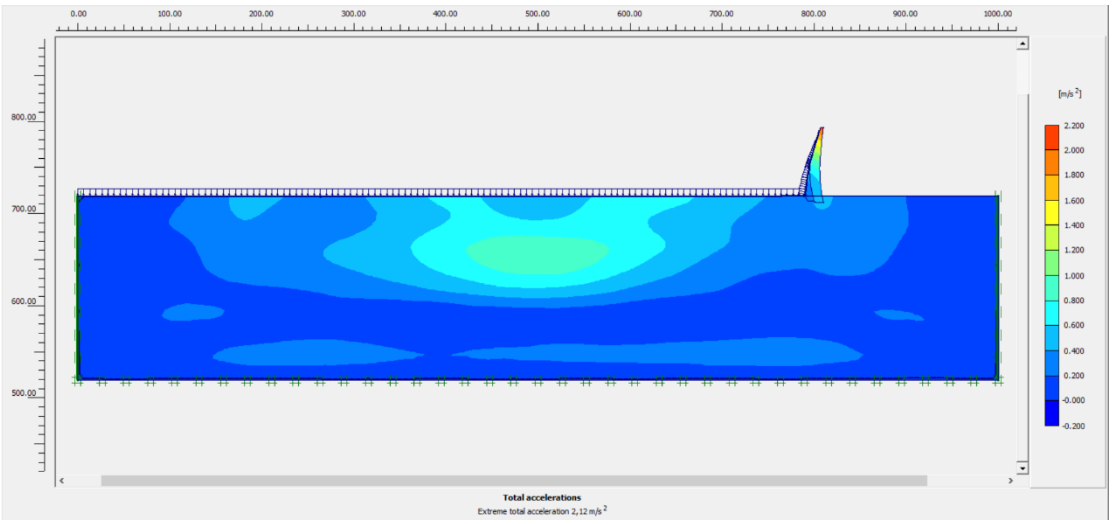
Σεισμική δόνηση πραγματικού σεισμού 225Α και Μέθοδος Ground water calculation



Εικόνα 4.192 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προσομοιώματος

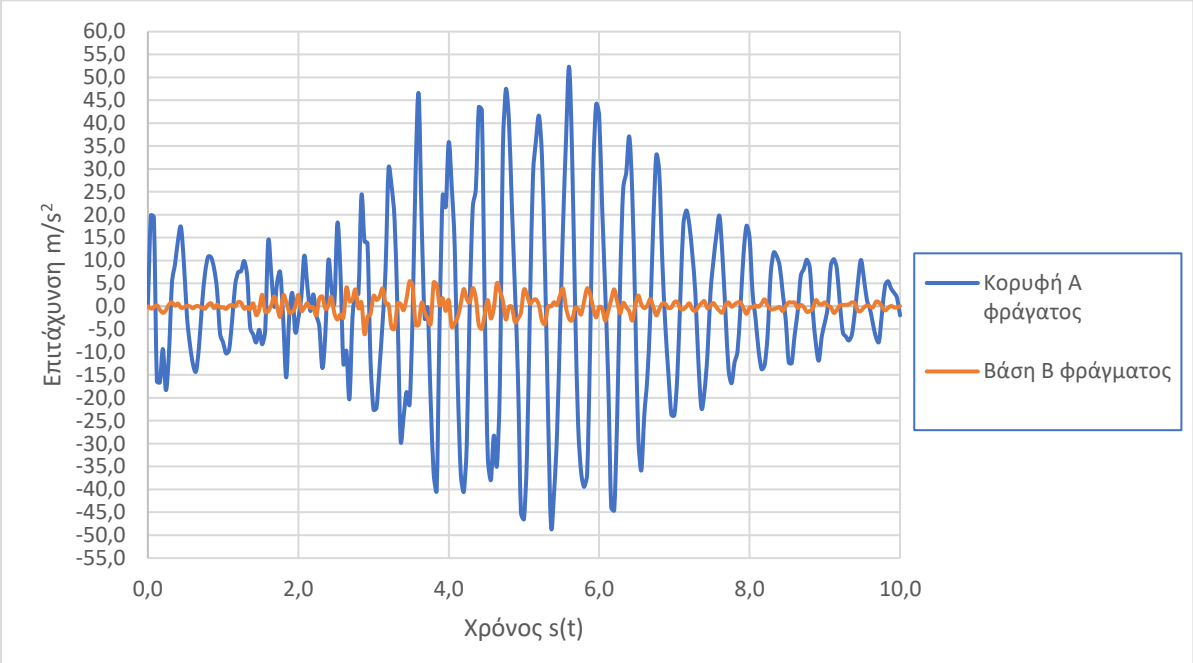


Εικόνα 4.193 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

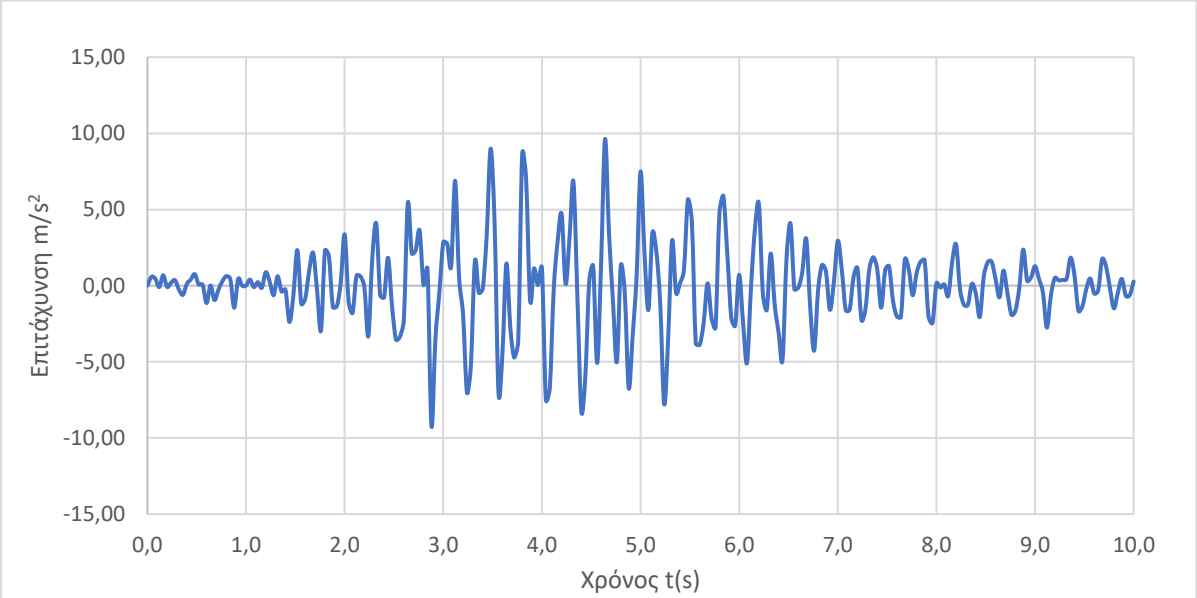


Εικόνα 4.194 Ολικές επιταχύνσεις στο προσομοίωμα

Επιταχύνσεις

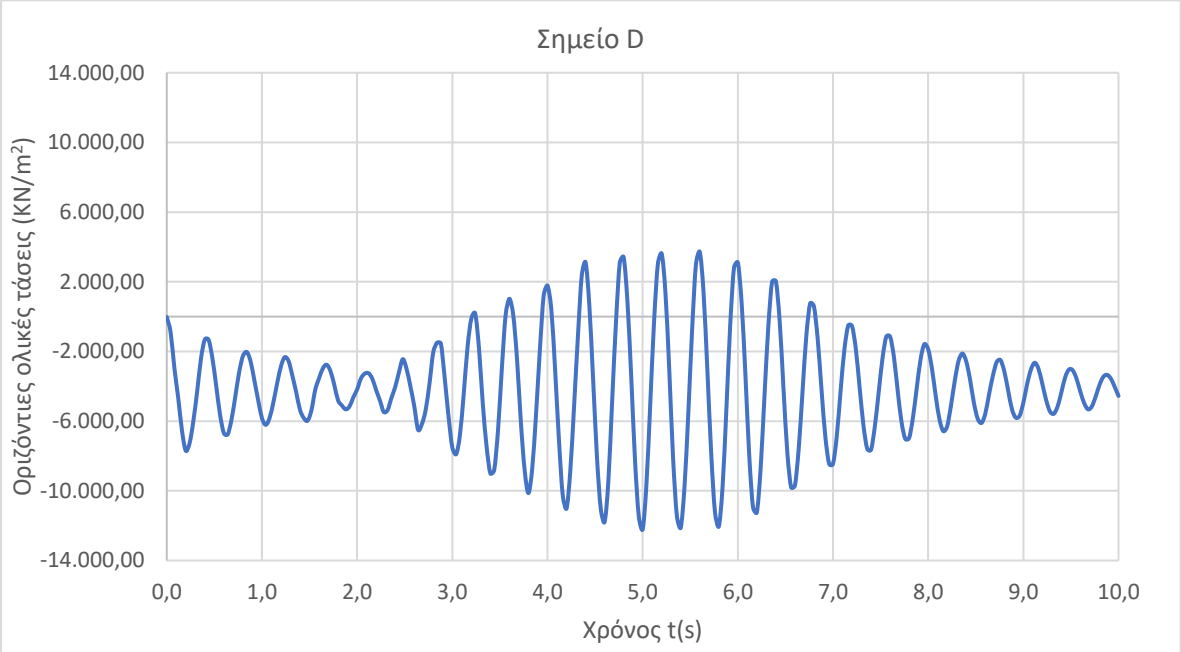


Διάγραμμα 4.85 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για τον πραγματικό σεισμό 225Α



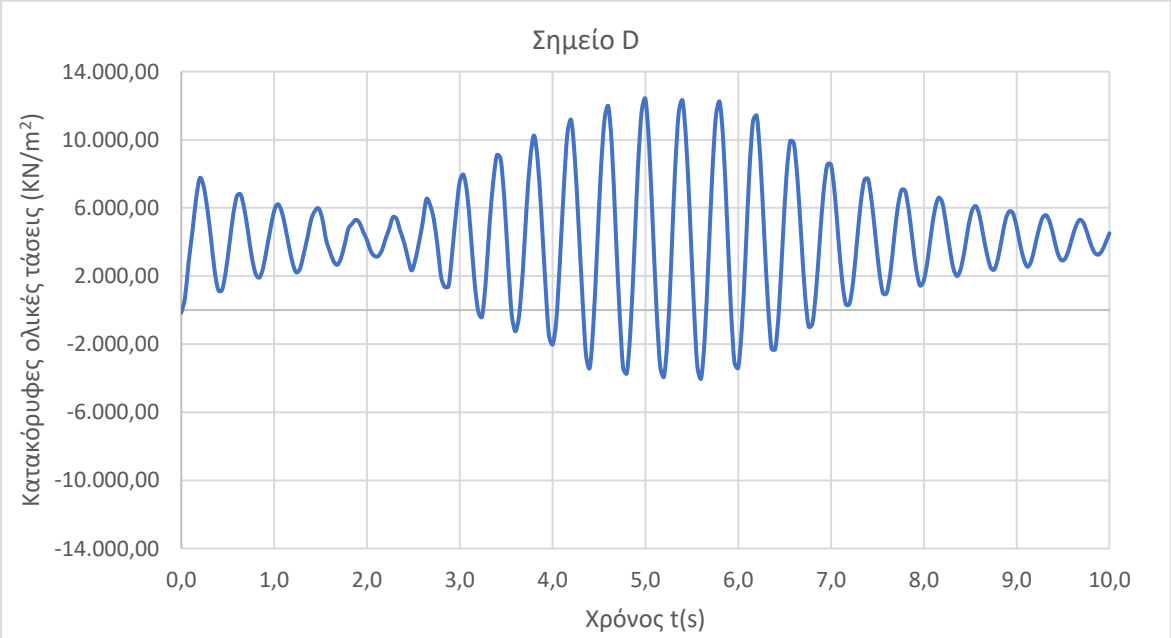
Διάγραμμα 4.86 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείου C για τον πραγματικό σεισμό 225Α

Τάσεις



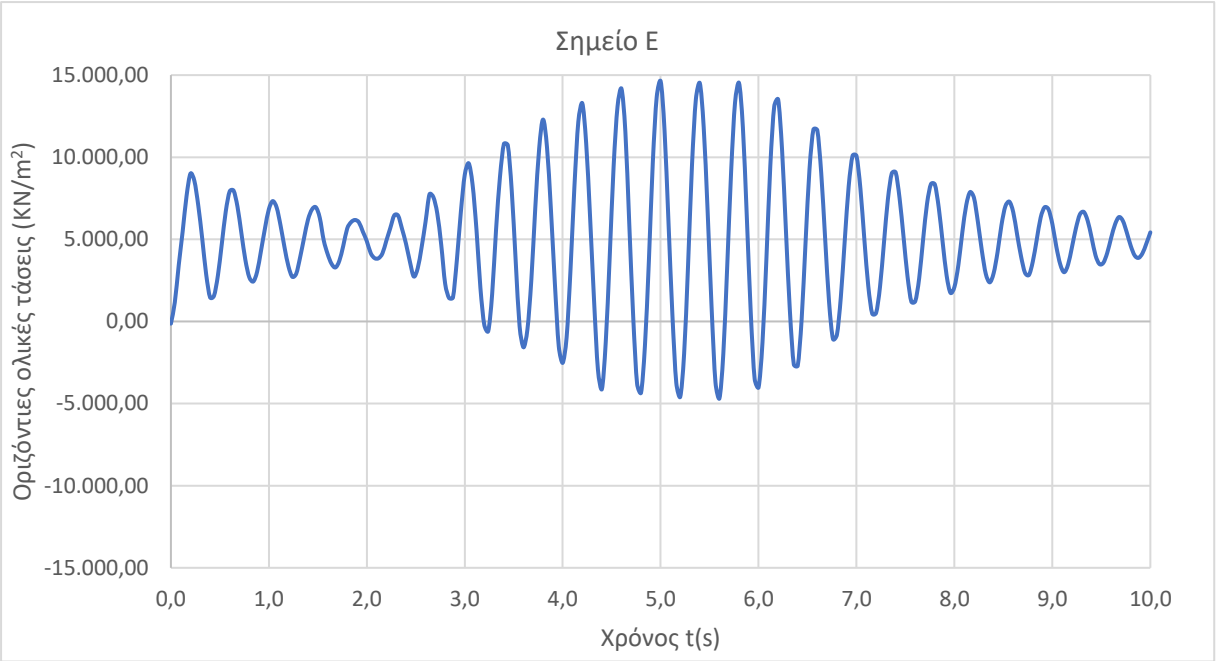
Διάγραμμα 4.87 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι – 12200 KN/m^2.



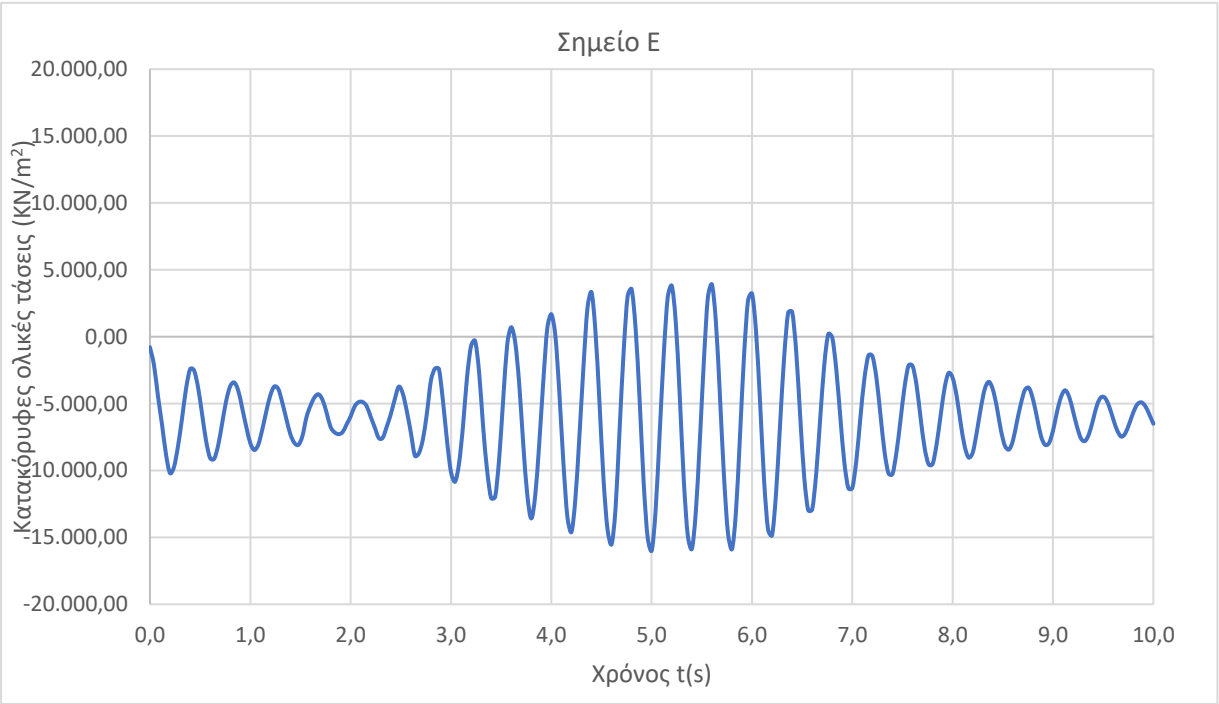
Διάγραμμα 4.88 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι + 12400 KN/m^2.



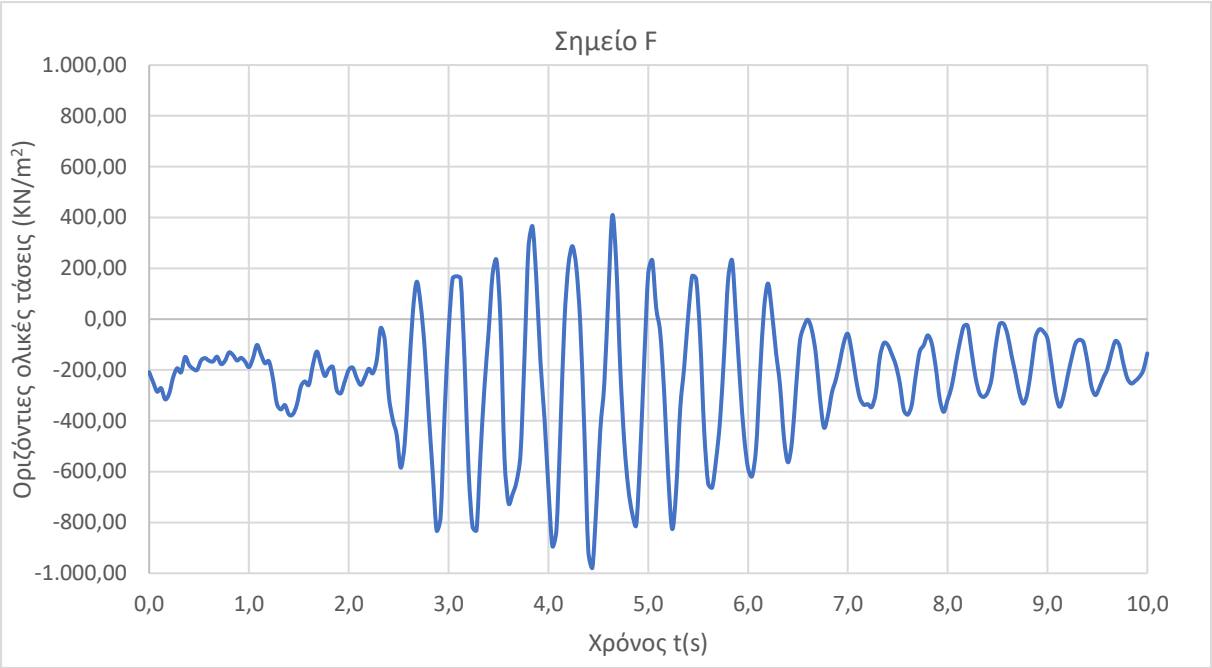
Διάγραμμα 4.89 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι + 14600 KN/m^2.



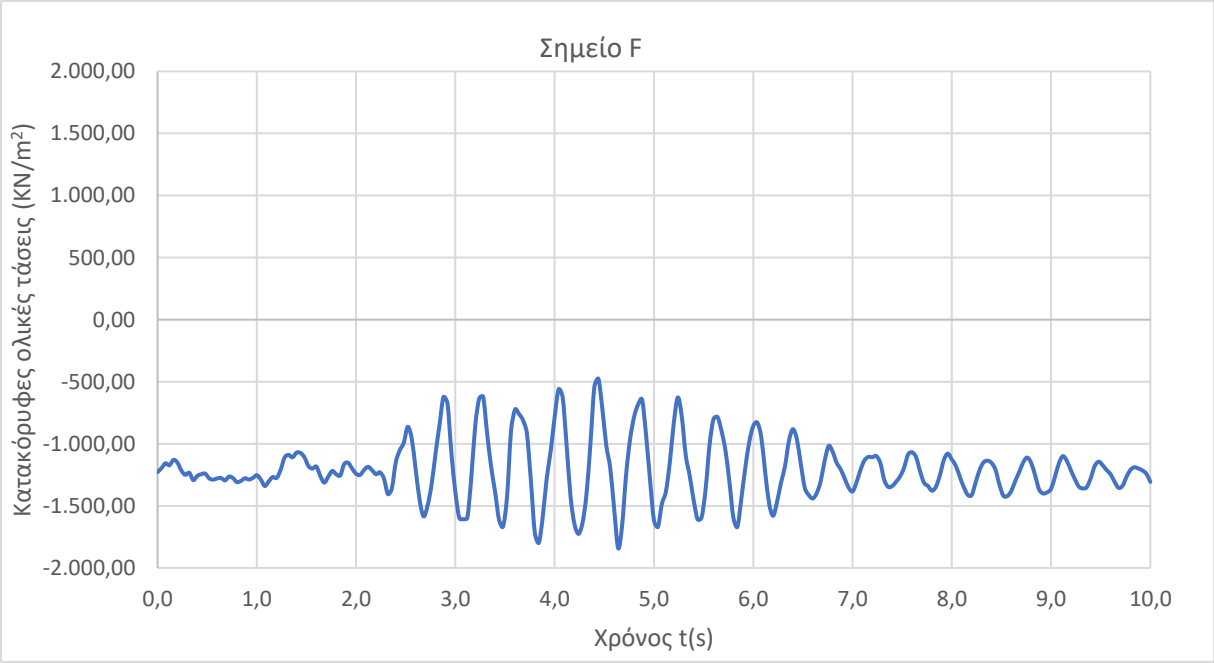
Διάγραμμα 4.90 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 5 δευτερόλεπτα και είναι - 16000 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.91 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

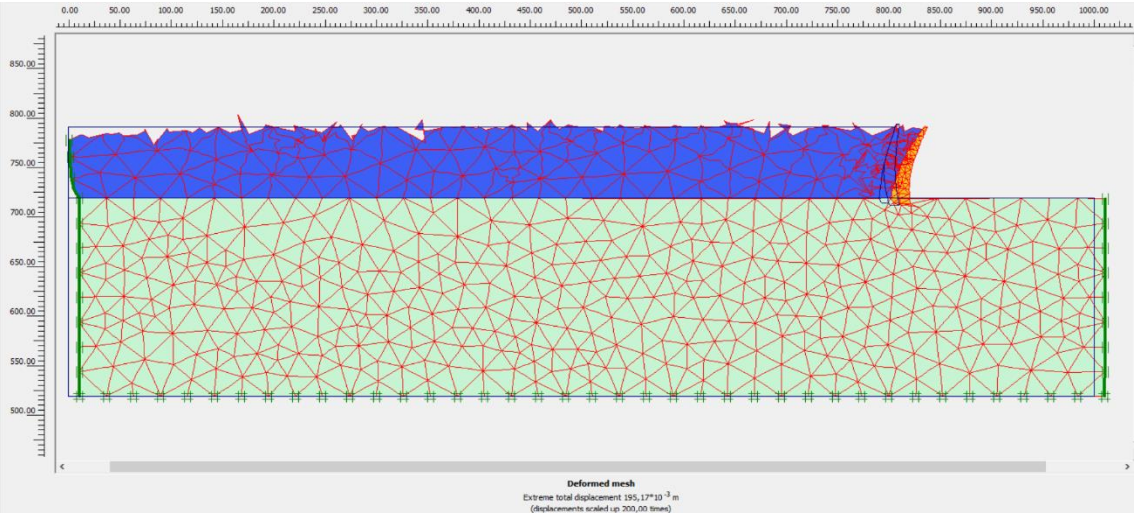
Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,44 δευτερόλεπτα και είναι - 978 KN/m^2.



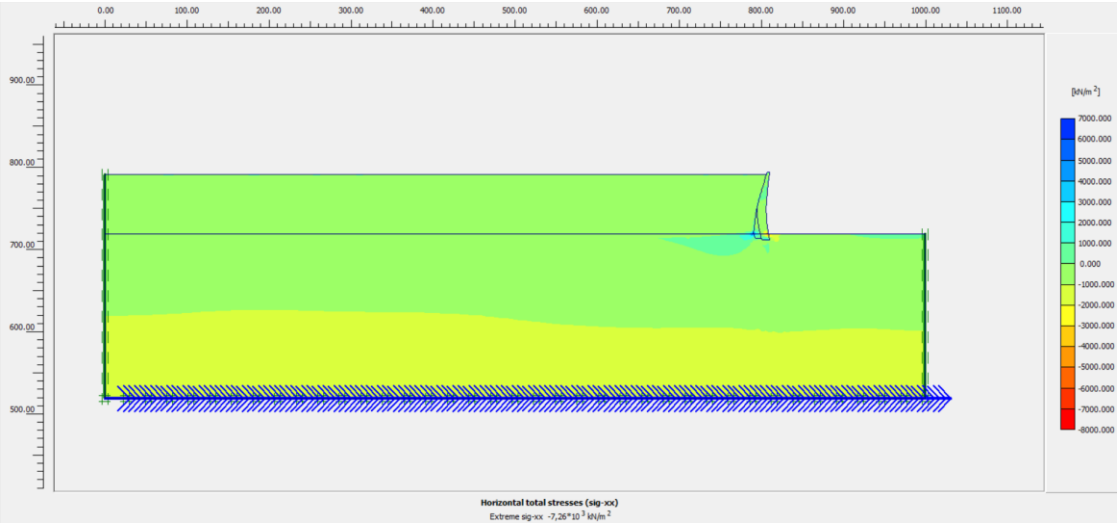
Διάγραμμα 4.92 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι - 1840 KN/m^2.

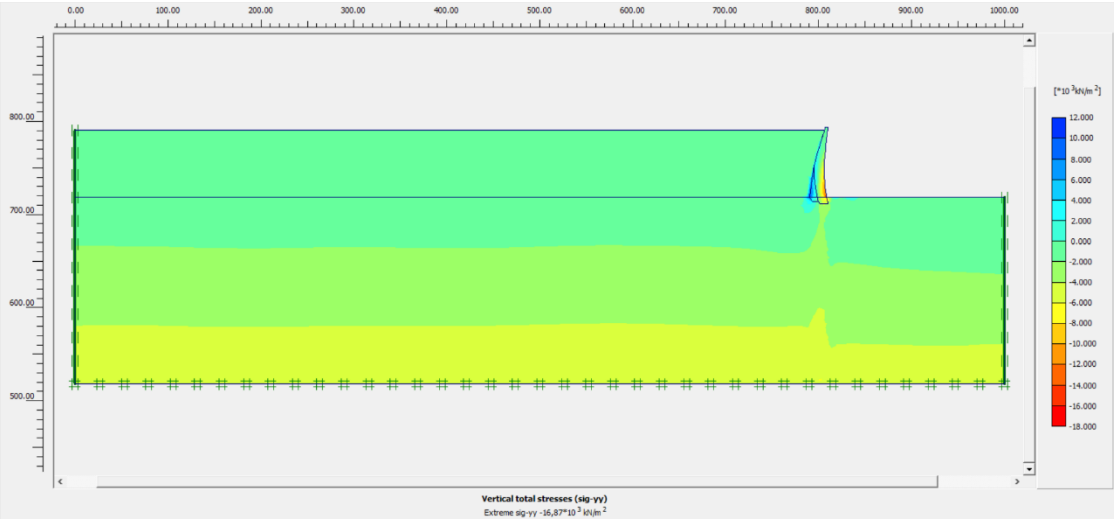
Σεισμική δόνηση πραγματικού σεισμού 225Α και Μέθοδος χρήσης νερού με την μορφή υλικού



Εικόνα 4.195 Αποτέλεσμα παραμορφώσεων δικτύου προτύπου

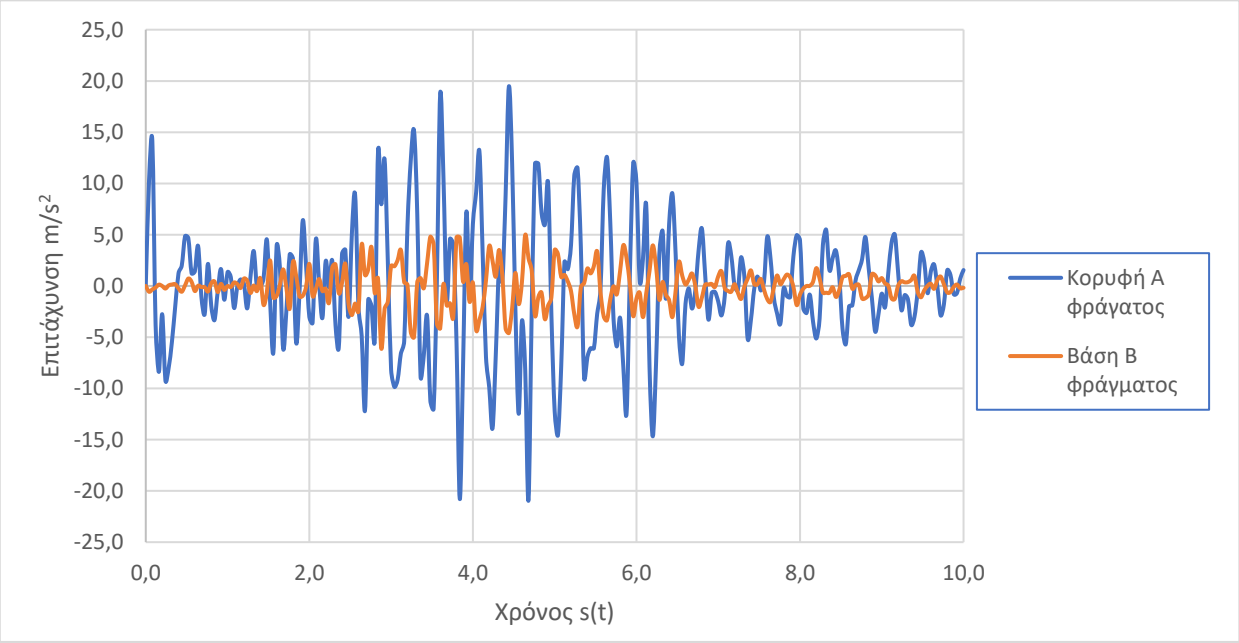


Εικόνα 4.196 Οριζόντιες ολικές τάσεις

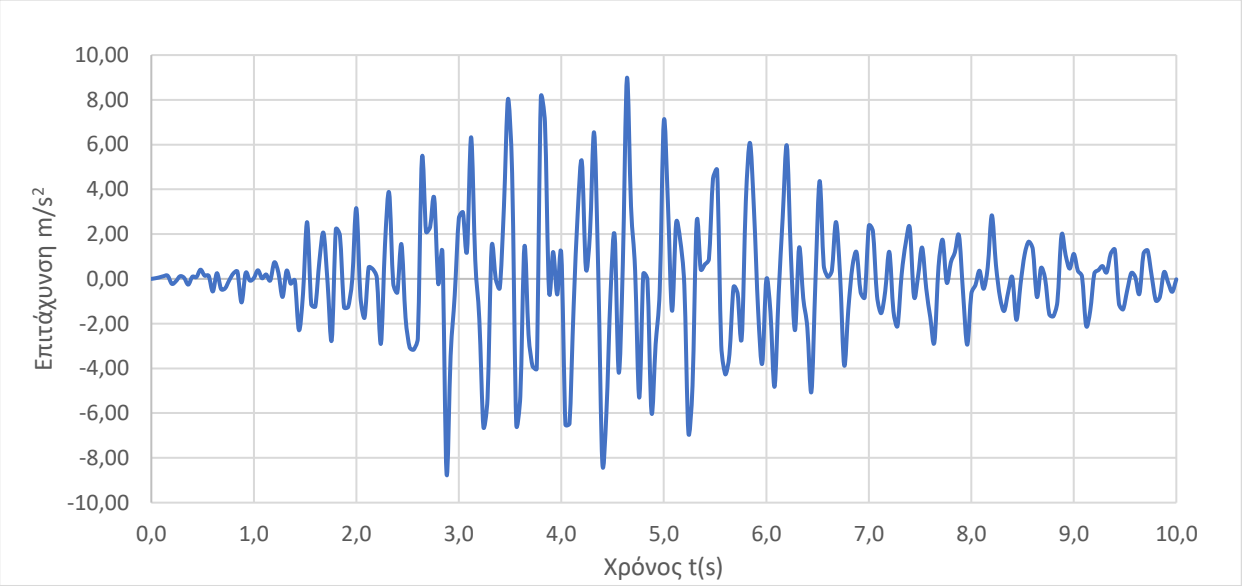


Εικόνα 4.197 Κατακόρυφες ολικές τάσεις

Επιταχύνσεις

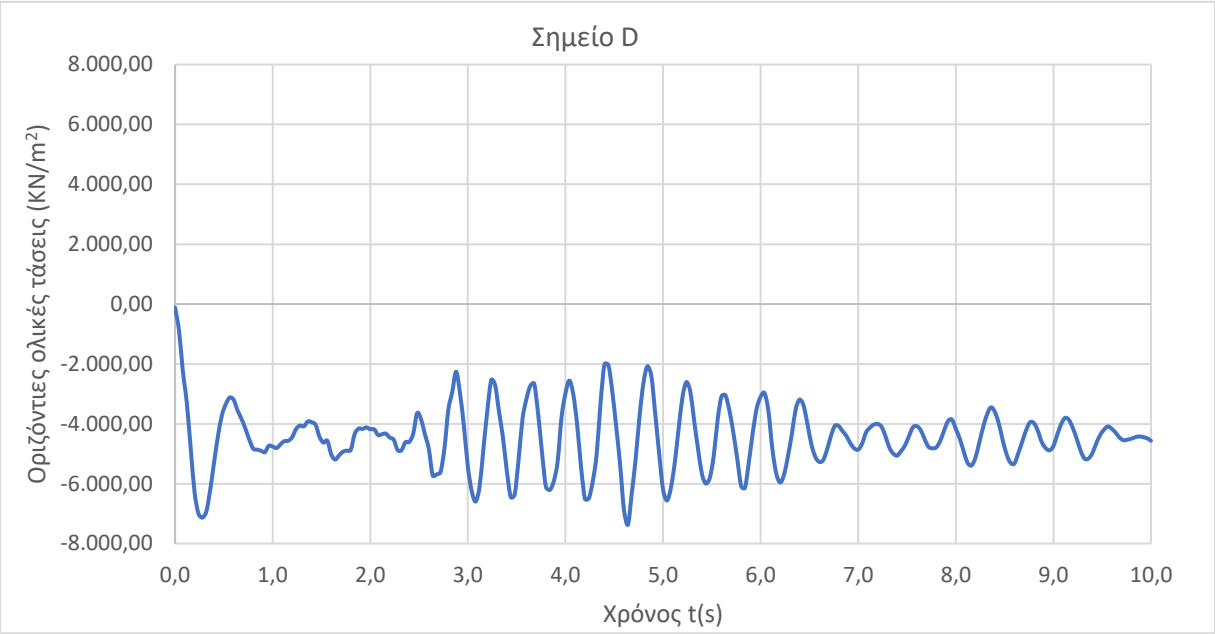


Διάγραμμα 4.93 Αποτέλεσμα χρονοϊστοριών σημείων Α και Β για τον πραγματικό σεισμό 225Α



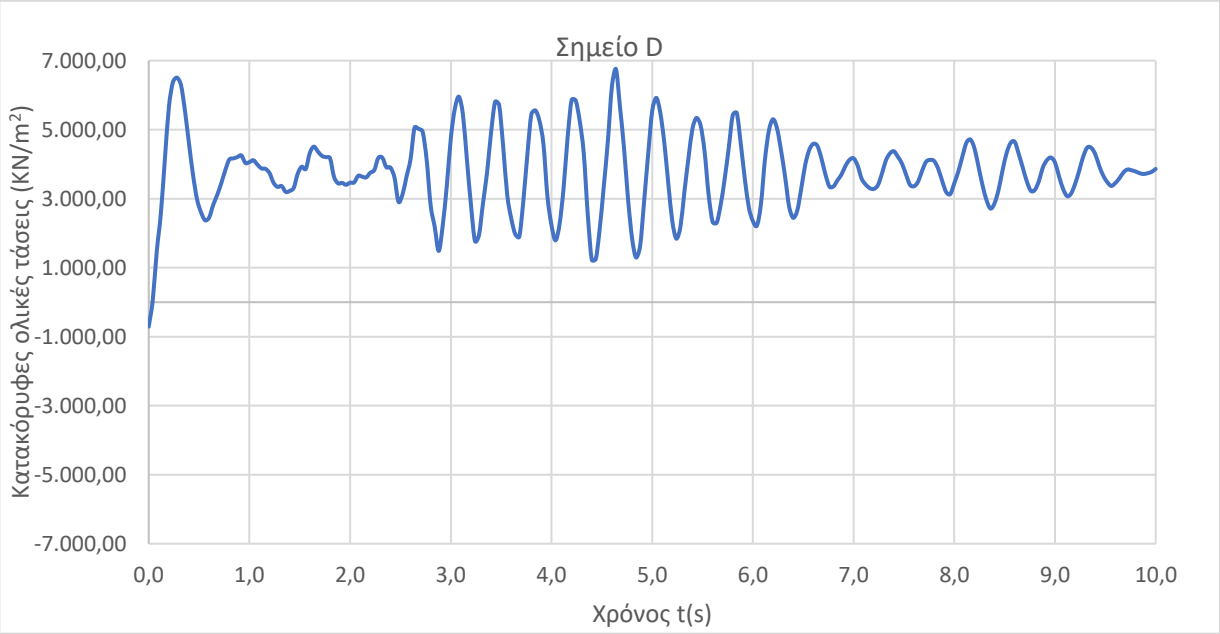
Διάγραμμα 4.94 Αποτέλεσμα χρονοϊστορίας εδαφικής στρώσης, σημείου C για τον πραγματικό σεισμό 225Α

Τάσεις



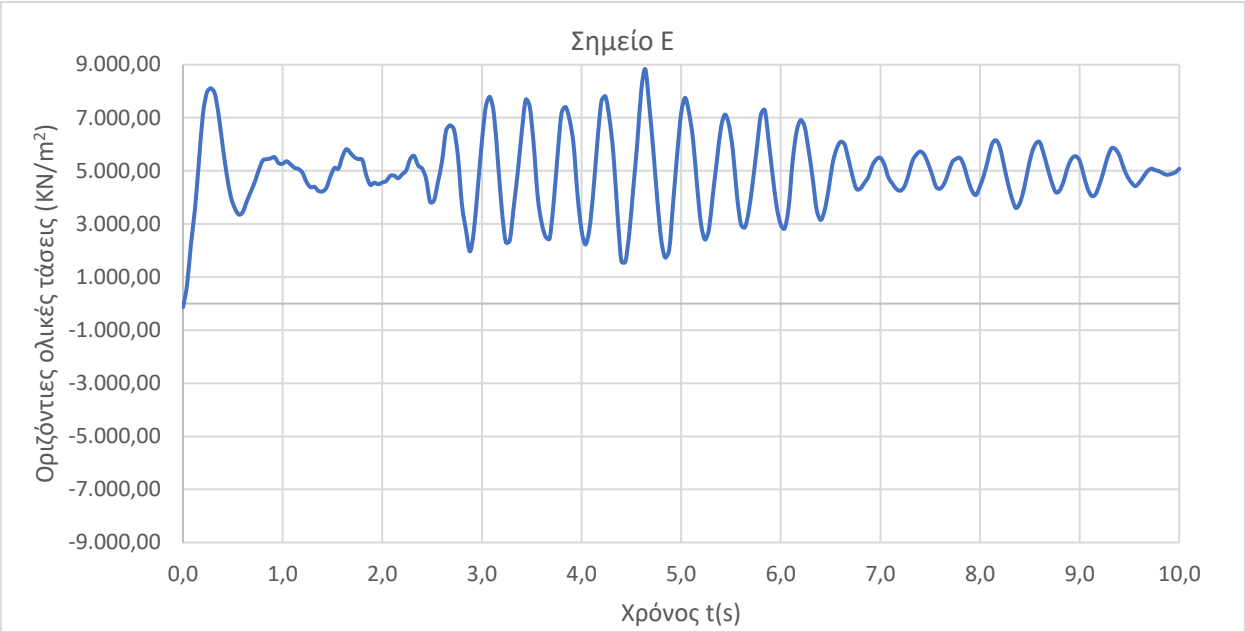
Διάγραμμα 4.95 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι - 7370 KN/m^2.



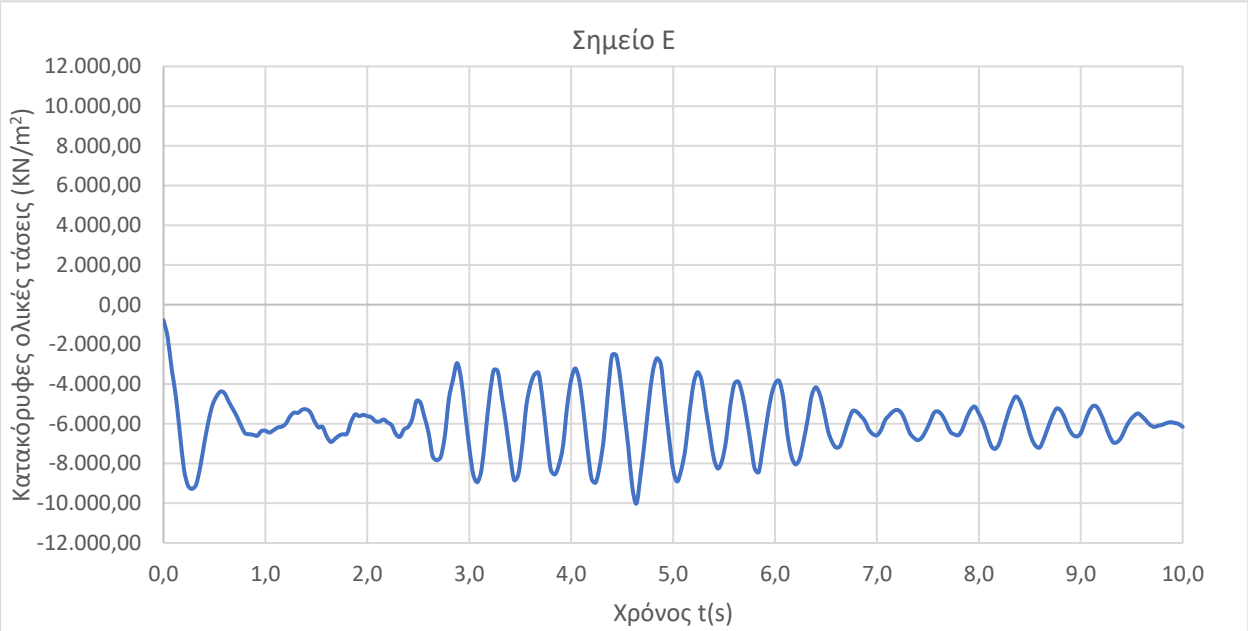
Διάγραμμα 4.96 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου D

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι + 6750 KN/m^2.



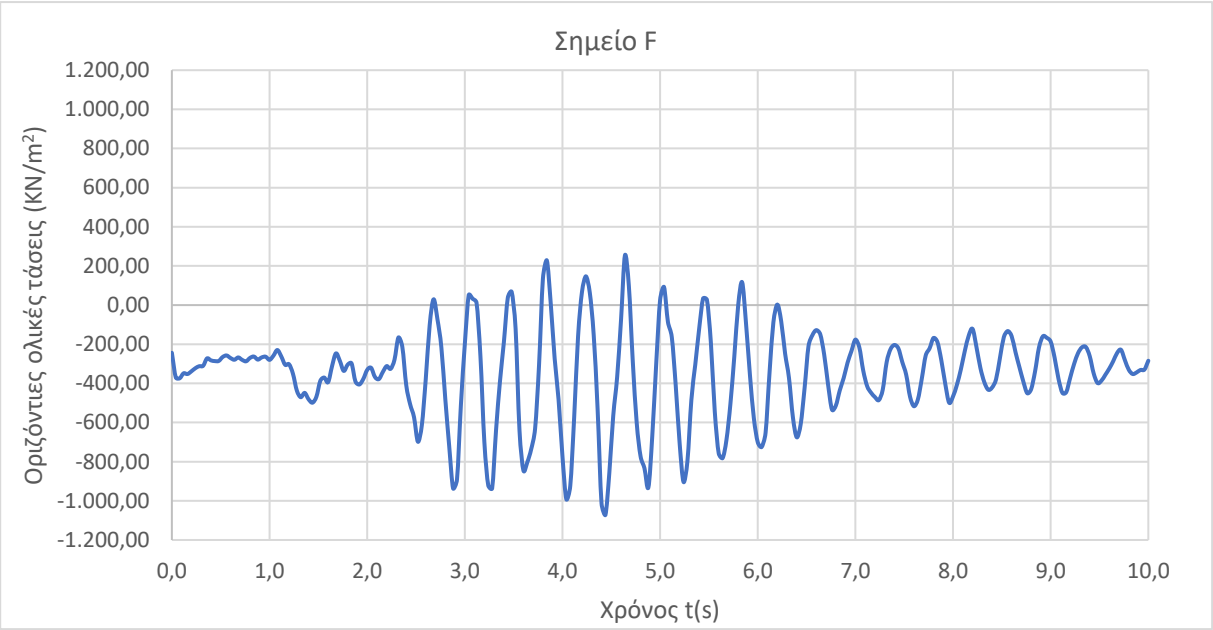
Διάγραμμα 4.97 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι + 8830 KN/m^2.



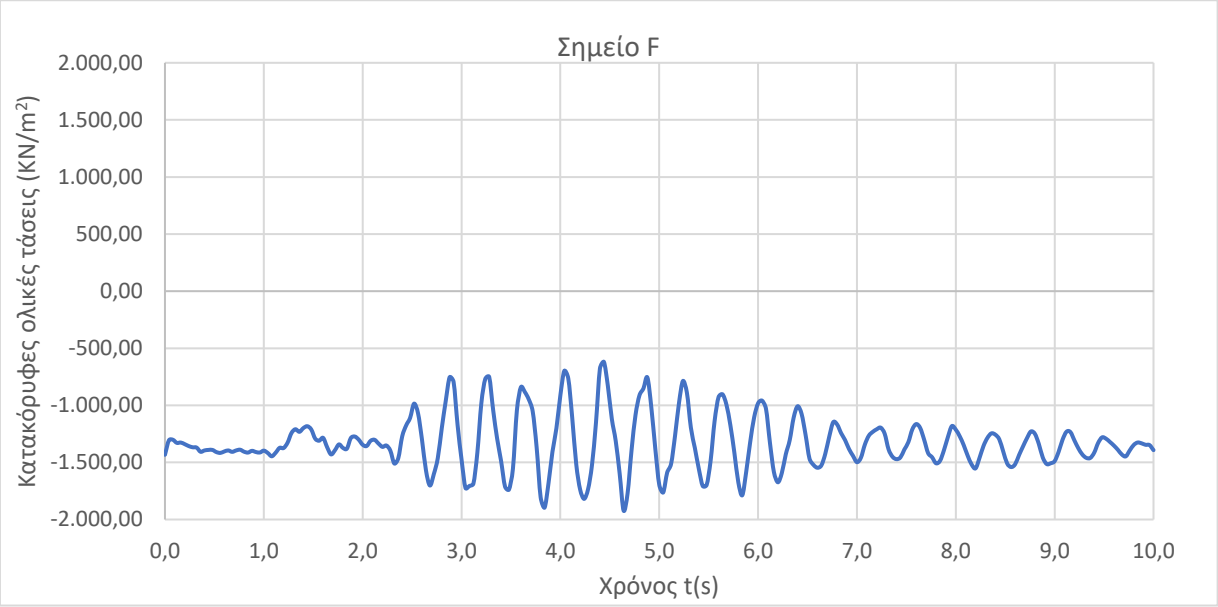
Διάγραμμα 4.98 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου Ε

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι - 10000 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.99 Οριζόντιες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των οριζόντιων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,44 δευτερόλεπτα και είναι–- 1070 KN/m^2.



Διάγραμμα 4.100 Κατακόρυφες ολικές τάσεις σημείου F

Η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων ολικών τάσεων παρατηρείται στα 4,64 δευτερόλεπτα και είναι - 1920 KN/m^2.

4.4.2.4 Συγκεντρωτικός πίνακας επιταχύνσεων και τάσεων – Σεισμική διέγερση παλμού Ricker (f = 2Hz)

Τάσεις - Παραμορφώσεις χωρίς νερό			
	D	E	F
αx (m/s²) / g	34,1 / 3,5	3,3 / 0,34	4,5 / 0,46
σ_h' (KN/m²)	-5960	+7260	-757
σv' (KN/m²)	-6190	-8400	-2090
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό (+776 m)			
αx (m/s²) / g	34,2 / 3,5	3,6 / 0,37	4,6 / 0,47
σ_h' (KN/m²)	-6040	-6760	-734
σv' (KN/m²)	-6150	-7183	-2140
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό υλικό (+776 m)			
αx (m/s²) / g	22,1 / 2,3	3,9 / 0,4	4,5 / 0,46
σ_h' (KN/m²)	-6020	+6760	-817
σv' (KN/m²)	+5550	-8350	-2070
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό (+792 m)			
αx (m/s²) / g	38,8 / 3,96	3,5 / 0,36	5,2 / 0,53
σ_h' (KN/m²)	-11000	+13200	-805
σv' (KN/m²)	+11200	-14500	-2100
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό υλικό (+792 m)			
αx (m/s²) / g	14,1 / 1,4	3,9 / 0,4	4,7 / 0,48
σ_h' (KN/m²)	-7150	+8120	-885
σv' (KN/m²)	+6520	-9290	-2220

Πίνακας 4.34 Πίνακας δυναμικών αναλύσεων με σεισμική δόνηση παλμού Ricker (f = 2Hz)

4.4.2.5 Συγκεντρωτικός πίνακας επιταχύνσεων και τάσεων – Σεισμική διέγερση 225Α

Τάσεις - Παραμορφώσεις χωρίς νερό			
	D	E	F
αx (m/s²) / g	52,7 / 5,4	6,2 / 0,63	9,7 / 0,98
σ_h' (KN/m²)	-8160	+9900	-983
σv' (KN/m²)	-8389,1	-11112,9	-1824,3
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό (+776 m)			
αx (m/s²) / g	52,7 / 5,4	6,2 / 0,63	9,7 / 0,98
σ_h' (KN/m²)	-8230	-9180	-952
σv' (KN/m²)	-8340	-10300	-1870
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό υλικό (+776 m)			
αx (m/s²) / g	36,7 / 3,7	6 / 0,61	9 / 0,92
σ_h' (KN/m²)	-6360	+7550	-905
σv' (KN/m²)	5899,8	-8691,8	-1672
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό (+792 m)			
αx (m/s²) / g	52,3 / 5,3	6,1 / 0,62	9,6 / 0,98
σ_h' (KN/m²)	-12200	+14600	-978
σv' (KN/m²)	12405,5	-15992,6	-1841,8
Τάσεις - Παραμορφώσεις με νερό υλικό (+792 m)			
αx (m/s²) / g	20,9 / 2,1	6,1 / 0,62	9 / 0,92
σ_h' (KN/m²)	-7370	+8830	-1070
σv' (KN/m²)	6754,7	-10016,2	-1922,6

Πίνακας 4.35 Πίνακας δυναμικών αναλύσεων με σεισμική δόνηση 225Α του Plaxis – 2D

4.4.2.6 Συμπεράσματα δυναμικών αναλύσεων

Αρχικά το πρώτο πράγμα που μπορεί να δει κανείς είναι πως η σεισμική διέγερση του παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα τα 2 Hz δίνει μικρότερες επιταχύνσεις στο προσομοίωμα σε σχέση με την δόνηση του πραγματικού σεισμού 225A του λογισμικού Plaxis – 2D. Επίσης οι επιταχύνσεις που σημειώνονται στη κορυφή του φράγματος είναι σχεδόν δεκαπλάσιες από τις επιταχύνσεις που σημειώνονται στην βάση και στην εδαφική στρώση, γεγονός που δείχνει ότι η κορυφή επηρεάζεται πολύ περισσότερο.

Εν συνεχεία, διαπιστώνεται πως με την μέθοδο χρησιμοποίησης του νερού με την μορφή υλικού, που έχει τις μηχανικές ιδιότητες του νερού προφανώς, σημειώνονται μικρότερες επιταχύνσεις, είτε με τον ένα σεισμό είτε με τον άλλο.

Επόμενο συμπέρασμα είναι το γεγονός πως με την αύξηση της στάθμης του ταμιευτήρα, οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στο προσομοίωμα μειώνονται. Με την μέθοδο των υπογείων υδάτων, Ground water calculation που προσφέρει το λογισμικό, μειώνονται ελάχιστα, ενώ με την μέθοδο του νερού σαν υλικό οι επιταχύνσεις μειώνονται σε σημαντικό βαθμό. Επίσης οι διαφορές ανάμεσα στις επιταχύνσεις που δίνονται από ανάλυση του φράγματος χωρίς την παρουσία νερού αλλά και με την παρουσία του, για την μέθοδο ground water calculation, παρατηρείται πως είναι ελάχιστες ή και ανύπαρκτες.

Επίσης στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ξανά, πως το γεγονός ότι έχουμε τόσο μεγάλες επιταχύνσεις οφείλεται στο ότι με βάση το λογισμικό Plaxis – 2D το τοξωτό αυτό φράγμα αντιμετωπίζεται δυσδιάστατα και όχι τρισδιάστατα. Δηλαδή απουσιάζει η τρίτη διάσταση και ενώ στην πραγματικότητα το φράγμα είναι πακτωμένο στον βράχο, στο λογισμικό αυτό δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη.

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο φράγμα, αυτές σημειώνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους όταν η στάθμη του ταμιευτήρα αυξάνεται και φτάνει τα 792 μέτρα. Επίσης παρατηρείται ότι με την μέθοδο χρησιμοποίησης του νερού με την μορφή υλικού σημειώνονται μικρότερες τάσεις στα 3 χαρακτηριστικά σημεία του προσομοιώματος (φράγματος και εδαφικής στρώσης), σε σχέση με αυτές που δίνει η μέθοδος των υπογείων υδάτων. Φαίνεται πως οι τάσεις οι οποίες ασκούνται στο φράγμα σε καμία περίπτωση δεν είναι ανάλογες των επιταχύνσεων των οποίων σημειώνονται, γεγονός που αποδεικνύει πως υπάρχει το πιο κρίσιμο σημείο, που της είχε αναφερθεί και στην μέθοδο των ψευδοστατικών αναλύσεων είναι το σημείο E, αντίστοιχο B, το οποίο βρίσκεται στο κατάντη πρανές του φράγματος. Οι τάσεις που δέχεται το σημείο D, αντίστοιχο A, είναι και αυτές μεγάλες λόγω και των μεγάλων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται, ενώ στο σημείο F που αφορά την εδαφική στρώση παρατηρείται πως δέχεται πολύ μικρότερες οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις, καθώς φαίνεται πως επηρεάζεται ελάχιστα ή σχεδόν καθόλου από την παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα.

4.4.3 Σύγκριση δυναμικών αναλύσεων με τις ψευδοστατικές

-	Σημείο A ή D Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο A ή D Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B ή E Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο B ή E Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C ή F Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m²)	Σημείο C ή F Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m²)
Ψευδοστατική μέθοδος χωρίς νερό (-0,24g)	-984,5	843	1034	-2173,3	-443,8	-977,6
Δυναμική ανάλυση χωρίς νερό – Ricker 2Hz	-5960 (3,5g)	-6190 (3,5g)	7260 (0,34g)	-8400 (0,34g)	-757 (0,46g)	-2090 (0,46g)
Δυναμική ανάλυση χωρίς νερό – 225A	-8160 (5,4g)	-8389,1 (5,4g)	9900 (0,63g)	-11112,9 (0,63g)	-983 (0,98g)	-1824,3 (0,98g)

Πίνακας 4.36 Πίνακας σύγκρισης ψευδοστατικής και δυναμικών αναλύσεων χωρίς νερό

Διαπιστώνεται πως μόνο στο σημείο της βάσης του φράγματος μπορεί να πει κανείς πως τα μεγέθη είναι συγκρίσιμα, αφού μιας και η επιτάχυνση σχεδόν διπλασιάζεται από την ψευδοστατική στην δυναμική ανάλυση με τον παλμό Ricker και οι τάσεις είναι κοντά στον διπλασιασμό. Τα υπόλοιπα μεγέθη των τάσεων για τα σημεία στο ανάντη και κατάντη πρανές φαίνεται πως δεν είναι ανάλογα, καθώς για παράδειγμα η επιτάχυνση 15πλασιάζεται από την ψευδοστατική στην δυναμική ανάλυση με τον παλμό Ricker για το σημείο A ή D, ωστόσο οι τάσεις είτε 7πλασιάζονται για τις κατακόρυφες ολικές τάσεις, είτε 6πλασιάζονται για τις οριζόντιες ολικές τάσεις.

Πάντως αυτό που διακρίνεται με την πρώτη ματιά είναι πως για τα χαρακτηριστικά σημεία που βρίσκονται στο ανάντη και κατάντη πρανές του φράγματος, οι τάσεις μέσω των δυναμικών αναλύσεων αυξάνονται σημαντικά και πιθανώς δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα μιας και η τρίτη διάσταση απουσιάζει.

H = +776 m / +792 m	Σημείο A ή D Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο A ή D Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο B ή E Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο B ή E Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο C ή F Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο C ή F Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό (Ground Water Calculation) (-0,24g)	-2792,9 / -5294,2	2695 / 5269	2883 / 6107	-4075,8 / -7207,6	-535,6 / - 551,2	-890 / 901,1
Δυναμική ανάλυση με νερό – Ricker 2Hz	-6040 / -11000 (3,5g / 3,96g)	-6150 / +11200 (3,5g / 3,96 g)	-6760 / +13200 (0,37g / 0,36g)	-7183 / -14500 (0,37g / 0,36g)	-734 / -805 (0,47g / 0,53g)	-2140 / -2100 (0,47g / 0,53g)
Δυναμική ανάλυση με νερό – 225A	-8230 / -12200 (5,4g / 5,3g)	-8340 / 12405,5 (5,4g / 5,3g)	-9180 / 14600 (0,63g / 0,62g)	-10300 / -15992,6 (0,63g / 0,62g)	-952 / -978 (0,98g / 0,98g)	-1870 / -1841,8 (0,98 g)

Πίνακας 4.37 Πίνακας σύγκρισης ψευδοστατικής με δυναμική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα για την μέθοδο Ground water calculation

Αρχικά οι τιμές των μέγιστων ολικών οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων στο σημείο C ή F του προσομοιώματος, είναι φανερό πως έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές που προέκυψαν από τον πίνακα σύγκρισης ψευδοστατικών με δυναμικές αναλύσεις χωρίς νερό. Υπάρχει μία μικρή αύξηση λόγω της παρουσίας του νερού, η οποία ωστόσο δεν είναι σημαντική.

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στα σημεία του ανάντη πρανές του φράγματος (σημείο A ή D) παρατηρείται κάτι παραπάνω από διπλασιασμός των μέγιστων τιμών των οριζόντιων και κατακόρυφων ολικών τάσεων, για την δυναμική ανάλυση με τον παλμό Ricker, ωστόσο η επιτάχυνση έχει 16πλασιαστεί, γεγονός που δείχνει ότι παρόλο που η επιτάχυνση στην κορυφή, έχει ξεφύγει σε απίθανες τιμές, οι τάσεις παραμένουν σε κάποια πιο λογικά πλαίσια. Για τις δυναμικές αναλύσεις με τον πραγματικό σεισμό 225A, ενώ επιτυγχάνεται 22πλασιασμός της επιτάχυνσης, οι τάσεις είναι κατά περίπου 2000 / 1200 KN/m^2 αυξημένες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από την προηγούμενη δυναμική ανάλυση (όπου επήλθε 16πλασιασμός της επιτάχυνσης).

Για τις τάσεις που αναπτύσσονται στο κατάντη πρανές του φράγματος, σημείο B ή E, παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του σεισμικού παλμού Ricker, η επιτάχυνση αυξάνεται κατά 0,12 g, οπότε θα πρέπει να επέλθει διπλασιασμός κατά το ήμισυ στις τάσεις. Κάτι το οποίο δεν συμβαίνει ωστόσο αφού οι τάσεις διπλασιάζονται. Επίσης οι κατακόρυφες τάσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή του πραγματικού σεισμού του Plaxis – 2D, 225A, κατά τον οποίο οι επιταχύνσεις είναι 2,6 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την ψευδοστατική ανάλυση, παρατηρείται πως δεν 2,6 φορές μεγαλύτερες συγκριτικά με τις τάσεις την ψευδοστατικής ανάλυσης. Παρόλα αυτά είναι κοντά στον διπλασιασμό, ξεπερνώντας τον δηλαδή.

H = +776 m / +792 m	Σημείο A ή D Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο A ή D Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο B ή E Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο B ή E Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο C ή F Οριζόντιες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)	Σημείο C ή F Κατακόρυφες Ολικές Τάσεις (KN/m^2)
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,16g)	-4186 / -8589,3	3658 / 8005	4499 / 9528	-5551,3 / -10735	-539,4 / -603,9	-956,9 / -1081,6
Ψευδοστατική Ανάλυση με νερό σαν υλικό (-0,24g)	-5290,5 / -10642	4795 / 10120	5705 / 11820	-6793,7 / -13098	-660,8 / -729,3	-838,9 / -959,9
Δυναμική ανάλυση με νερό – Ricker 2Hz	-6020 / -7150 (2,3g / 1,4g)	5550 / 6520 (2,3g / 1,4g)	6760 / 8120 (0,4g / 0,4g)	-8350 / 9290 (0,4g / 0,4g)	-817 / -885 (0,46g / 0,48g)	-2070 / -2220 (0,46g / 0,48g)
Δυναμική ανάλυση με νερό – 225A	-6360 / -7370 (3,7g / 2,1 g)	5899,8 / 6754,7 (3,7g / 2,1g)	7550 / 8830 (0,61g / 0,62g)	-8691,8 / -10016,2 (0,61g / 0,62g)	-905 / -1070 (0,92g / 0,92g)	-1672 / -1922,6 (0,92g / 0,92g)

Πίνακας 4.38 Πίνακας σύγκρισης ψευδοστατικής με δυναμική ανάλυση με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα για την μέθοδο χρήσης του νερού με την μορφή υλικού

Στην περίπτωση αυτή διαπιστώνεται πως τα αποτελέσματα είναι αρκετά πιο κοντά και ειδικά για το σημείο A ή D παρόλο που οι διαφορές στις επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στο σημείο είναι πολύ μεγαλύτερες, οι τάσεις εν τέλει είναι αρκετά κοντά. Παρατηρείται επίσης πως και στο σημείο A και στο B η αύξηση των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται σε συνδυασμό με την αύξηση της στάθμης του ταμιευτήρα, οδηγεί στην μείωση εν τέλει των τάσεων που ασκούνται στα σημεία αυτά. Μία μείωση η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική της τάξης έως και των 3500 περίπου KN/m^2. Αντιθέτως για το σημείο C, βάση του φράγματος, οι τάσεις αυξάνονται και μπορεί να πει κανείς πως συγκρίνοντας της ψευδοστατική ανάλυση με οριζόντια επιτάχυνση -0,24 g, με την δυναμική ανάλυση του παλμού Ricker, όπου οι επιταχύνσεις ουσιαστικά διπλασιάζονται, διπλασιάζονται περίπου και οι κατακόρυφες τάσεις. Διπλασιασμός των κατακόρυφων τάσεων διαπιστώνεται και στην δυναμική ανάλυση που προκύπτει από τον πραγματικό σεισμό 225A, ωστόσο οι επιταχύνσεις στην περίπτωση αυτή έχουν σχεδόν τετραπλασιαστεί.

5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε κατά βάση με την ανάλυση της στατικότητας και σεισμικότητας του τοξωτού φράγματος διπλής καμπυλότητας του Ταυρωπού. Σκοπός ήταν η ανάλυση όσο το δυνατόν περισσότερων περιπτώσεων που καλείται το φράγμα να αντιμετωπίσει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Αφορμή για την εργασία αυτή, ήταν η ιδιόμορφη κατασκευή του φράγματος η οποία κινεί το ενδιαφέρον και την περιέργεια για περαιτέρω αναλύσεις.

Στα πλαίσια της μελέτης του φράγματος αυτού πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση, μέσα από κατάλληλο υπολογιστικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την αναζήτηση της επίδρασης του ιδίου βάρους, της στάθμης του ταμιευτήρα και των σεισμικών επιταχύνσεων και του εδάφους, στο σώμα του φράγματος.

Τα γενικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διπλωματική αυτή εργασία ήταν αρκετά και άξια αναφοράς. Αρχικά ο σχεδιασμός ενός φράγματος απαιτεί ένα σύνολο που αποτελείται από πολλές και λεπτομερείς μελέτες και αναλύσεις, καθώς πρόκειται για έργα που αλλάζουν άρδην το τοπίο και την ζωή των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής. Ειδικότερα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γεωλογία της περιοχής και οι σεισμοτεκτονικές της συνθήκες (για τον εντοπισμό ρηγμάτων), οι καθιζήσεις που μπορεί να αναπτυχθούν στο έδαφος της θεμελίωσης λόγω του βάρους αλλά και οι καθιζήσεις στο φράγμα λόγω μη καλής συμπύκνωσης του υλικού, αν πρόκειται για χωμάτινα φράγματα.

Πιο συγκεκριμένα στις στατικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε πως το κατάντη πρανές που δεν βρεχόταν από νερό, ήταν και το πιο κρίσιμο, δηλαδή αυτό στο οποίο αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις. Χαρακτηριστικό ήταν το γεγονός ότι στην στατική ανάλυση χωρίς της παρουσία νερού, η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων τάσεων που δεχόταν το σημείο που τοποθετήθηκε στο κατάντη πρανές ήταν 80 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις τάσεις που αναπτύσσονταν στο σημείο που τοποθετήθηκε στο ανάντη πρανές. Παρόλα αυτά με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα και για στάθμη ίση με + 776 μέτρα, η μέγιστη τιμή των κατακόρυφων τάσεων στο κατάντη πρανές ήταν μόνο 2,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή στο ανάντη πρανές, γεγονός που δείχνει ότι το νερό προσθέτει ωθήσεις στο ανάντη πρανές, της είναι λογικό, αλλά δεν υπάρχει ανάλογη αύξηση των τάσεων και στο κατάντη. Επίσης στη βάση του φράγματος αποδείχθηκε πως όσο αυξανόταν η στάθμη του νερού, οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων τάσεων μειώνονταν.

Εκτός των παραπάνω, το βασικότερο που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η σεισμολογία της περιοχής. Απαιτείται η ανάλυση του φράγματος με τον σεισμό σχεδιασμού, σε συνδυασμό και με άλλους δυσμενείς παράγοντας της π.χ. η ύπαρξη ενός γεμάτου ταμιευτήρα όπου οι υδροδυναμικές ωθήσεις θα είναι μέγιστες. Με τον τρόπο αυτό θα είναι γνωστός ο βαθμός που οποιοσδήποτε άλλος σεισμός, με μικρότερη επιτάχυνση από τον σεισμό σχεδιασμού, μπορεί να καταπονήσει το φράγμα. Για την ανάλυση αυτή υπάρχουν και οι ανάλογες μεθοδολογίες, οι οποίες αναφέρθηκαν και είναι άλλες πιο γρήγορες και άλλες πιο περίπλοκες, χρονοβόρες αλλά και ακριβείς.

Ειδικότερα διαπιστώθηκε πως στις ψευδοστατικές αναλύσεις αύξηση της οριζόντιας επιτάχυνσης σε συνδυασμό με αύξηση της στάθμης του νερού το ταμιευτήρα σημαίνει αύξηση των τάσεων που αναπτύσσονται στο ανάντη και κατάντη πρανές, ενώ προκύπτει μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται στην βάση του φράγματος. Επίσης στις ψευδοστατικές αναλύσεις με την μέθοδο των υπογείων υδάτων (Ground water calculation) οι τάσεις που δέχεται το φράγμα είναι μικρότερες από τις τάσεις που προέκυψαν με την μέθοδο χρήσης του νερού με την μορφή υλικού.

Η ψευδοστατική μέθοδος μπορεί να είναι απλή και πιο συνηθισμένη, ωστόσο λόγω του ότι δίνει συντελεστή ασφαλείας, είναι λιγότερο ακριβής και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος των τάσεων – παραμορφώσεων. Στις δυναμικές αυτές αναλύσεις μπορείς να εισάγεις οποιαδήποτε χρονοϊστορία σεισμού επιθυμείς. Χρησιμοποιώντας τον σεισμικό παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα τα 2 Hz διαπιστώθηκαν μικρότερες επιταχύνσεις στα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από τον πραγματικό σεισμό 225A του λογισμικού Plaxis – 2D. Απόρροια αυτού ήταν και οι μέγιστες τιμές των τάσεων να είναι μικρότερες. Προσθέτοντας νερό ανάντη του φράγματος έγινε αντιληπτό πως είτε με τη μέθοδο του νερού με τη μορφή υλικού είτε με την μέθοδο των υπογείων υδάτων, οι οριζόντιες και κατακόρυφες ολικές τάσεις στο κατάντη πρανές μειώνονται αρκετά σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονταν στο κατάντη πρανές χωρίς της παρουσία νερού, ενώ μειώνονται ελάχιστα οι κατακόρυφες ολικές τάσεις και για το ανάντη πρανές. Οι τάσεις στη βάση του φράγματος δεν μειώνονται, αλλά αυξάνονται και λίγο. Παρόλα αυτά αυξάνοντας τη στάθμη του ταμιευτήρα στα + 792 μέτρα προκλήθηκε σχεδόν διπλασιασμός των ολικών τάσεων για το ανάντη και κατάντη πρανές. Γεγονός που ενώ θα μπορούσε να πει κανείς αρχικά πως το νερό έχει ευεργετικό ρόλο στην ευστάθεια του φράγματος, εν τέλει ο συλλογισμός αυτός καταρρίπτεται όταν ο ταμιευτήρας φτάνει στη στάθμη στέψης του υπερχειλιστή. Χρησιμοποιώντας από την άλλη τον πραγματικό σεισμό 225A οι τάσεις που δέχεται το ανάντη και κατάντη πρανές αυξάνονται κατά περίπου 1000 KN/m^2 όταν προστίθεται νερό στον ταμιευτήρα (+ 776 μέτρα), ενώ όταν η στάθμη αυξάνεται ακόμα περισσότερο στα +792 μέτρα οι τάσεις αυξάνονται και αυτές με τη σειρά τους, με τη διαφορά ωστόσο να είναι ότι η αύξηση αυτή είναι γύρων στα 4500 με 5000 KN/m^2. Επίσης οι τιμές των τάσεων που προκύπτουν από την μέθοδο του νερού με την μορφή υλικού είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τη μέθοδο των υπογείων υδάτων του λογισμικού, κάτι το οποίο ισχύει και για τις δυναμικές αναλύσεις με τον σεισμικό παλμό Ricker (f = 2Hz). Ενώ το αντίθετο ακριβώς συνέβαινε στις ψευδοστατικές αναλύσεις.

5.2 Προτάσεις

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν συμπεράσματα τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω ανάλυση και έρευνα, όσον αφορά τις δυναμικές αναλύσεις του φράγματος του Ταυρωπού, είτε αυτά σχετίζονται με τις τάσεις που δέχεται είτε με τις μετατοπίσεις που υφίστανται χαρακτηριστικά σημεία του.

Για παράδειγμα θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη και η κατακόρυφη συνιστώσα των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων, στις ψευδοστατικές αναλύσεις, μιας που οι αναλύσεις έγιναν μόνο για την οριζόντια συνιστώσα των επιταχύνσεων.

Επίσης στα πλαίσια της εργασίας αυτής, έγινε χρήση του δισδιάστατου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis – 2D για την πραγματοποίηση των διάφορων αριθμητικών αναλύσεων. Η δυσδιάστατη αυτή ανάλυση συνεπάγεται και απλοποιήσεις στο υπό εξέταση σύνθετο προσομοίωμα, στο οποίο δεν λήφθηκε υπόψη η τρίτη διάσταση του τοξωτού φράγματος, η οποία αντιμετωπίστηκε ως άπειρου μήκους. Οπότε μία μελλοντική επέκταση θα μπορούσε να είναι η επανάληψη της αντίστοιχης μελέτης με τη βοήθεια ενός τρισδιάστατου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, για την εξαγωγή αντίστοιχων αποτελεσμάτων με ωστόσο μεγαλύτερη ακρίβεια στις δυναμικές αναλύσεις, λόγω του ότι το μοντέλο του φράγματος θα αντικατοπτρίζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες. Τέτοια λογισμικά μπορεί να είναι είτε το Plaxis – 3D, λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, είτε ο γενικός κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Τέλος θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλες σεισμικές δονήσεις, με μεγαλύτερα εύρη συχνοτήτων, ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν να είναι περισσότερο ασφαλή καθώς θα υπάρχουν περισσότερα αποτελέσματα αναλύσεων με σεισμούς διαφόρων συχνοτήτων που θα επιδρούν στο φράγμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ν. Ι. Μουτάφης (2009) ‘’ Τεχνολογία Γεωφραγμάτων ’’, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Α. Παπαδημητρίου (2015) ‘’ Ειδικά γεωτεχνικά έργα ’’, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- S. L. Kramer (1996) ‘’ Geotechnical Earthquake Engineering ’’ prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey
- Robin Fell, Patrick MacGregor, David Stapledon, Graeme Bell (2005) ‘’ Geotechnical Engineering of Dams ’’ London, UK
- Ο. Α. Παπαγεωργίου ‘’ Τύποι φραγμάτων, γεωτεχνικά προβλήματα και συμπαρομαρτούντα έργα ’’, Αθήνα
- Δ. Δημόπουλος, Ι. Π. Στεφανάκος ‘’ Υπερχειλιστές και εκκενωτές πυθμένα στα τέσσερα παλαιότερα φράγματα της ΔΕΗ από σκυρόδεμα ‘’, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Κ. Σαχπαζής (2018) ‘’ Γεωτεχνική Μηχανική των φραγμάτων ’’ 1η Έκδοση 2018, Αθήνα
- G E Barnes ‘’ Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές’’, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- Διαφάνειες Β. Μαρίνος ‘’ Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων 8 -9ο μάθημα <<Φράγματα>> ’’, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

- Κ. Λουπασάκης ‘’ Σημειώσεις Διαλέξεων μαθήματος Τεχνική Γεωλογίας Ι ‘’ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Π. Ντακούλας, Γ. Θανόπουλος, Κ. Αναστασόπουλος, Χ. Δήμου ‘’ Σεισμική αξιολόγηση του φράγματος Ταυρωπού : Μη – γραμμική δυναμική ανάλυση φράγματος – κοιλάδας – ύδατος ‘’ 2^{ο} Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων και Ταμιευτήρων, Αθήνα
- Γ. Καπράλης (Ιούνιος 2020) ‘’ Αριθμητική προσομοίωση φράγματος υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες με έμφαση στην αλληλεπίδραση εδάφους, νερού και φράγματος’’, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Αθήνα
- Β. Στουρνάρας (Νοέμβρης 2012) ‘’ Μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με δορυφορικές μεθόδους ‘’, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- https://www.economia.gr/wp-content/uploads/2020/09/DEI60Aug.pdf