



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟ
ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ, ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**



ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΚΑΠΡΑΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

ΔΡ. ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΑΤΤΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΔΡ. ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.ΔΙ.Π/Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με την βοήθειά τους συνέβαλλαν στην περάτωση της εργασίας αυτής.

Πρώτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, για την καθοδήγηση, την άμεση και ουσιαστική βοήθεια, την υποστήριξη που μου παρείχε και το άριστο κλίμα συνεργασίας που δημιούργησε, συμβάλλοντας τα μέγιστα στην κατάρτιση της εργασίας αυτής

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κύριο Μαρίνο Καττή και τον κύριο Νικόλαο Λαγαρό, για την αποτελεσματική συνεργασία και την συμβολή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την διαχρονική συμπαράσταση σε κάθε βήμα της ζωής μου, τη στήριξη, την κατανόηση και την ηθική συμπαράσταση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, και ιδιαίτερα κατά την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	12
2.1 Δεδομένα και διαδικασία επιλογής τοποθεσίας του φράγματος	12
2.1.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής	13
2.1.2 Διαδικασία επιλογής της θέσης του φράγματος.....	13
2.2 Τύποι-κατηγορίες φραγμάτων	15
2.2.1 Φράγματα βαρύτητας.....	16
2.2.2 Αντηριδωτά φράγματα	18
2.2.3 Τοξωτά φράγματα.....	18
2.2.4 Φράγματα από ισχύο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.....	19
2.2.5 Χωμάτινα φράγματα.....	20
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την κατασκευή φραγμάτων.....	25
2.3.1 Πλεονεκτήματα φραγμάτων	25
2.3.2 Μειονεκτήματα φραγμάτων	27
2.4 Προβλήματα των φραγμάτων που οδηγούν σε αστοχία με ακόλουθα παραδείγματα	28
2.5 Περιπτώσεις αστοχίας φραγμάτων	32
3. ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΙΣΧΝΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ RCC.....	37
3.1 Ιστορία φραγμάτων RCC.....	37
3.2 Χαρακτηριστικά-ιδιότητες φραγμάτων RCC	40
3.2.1 Υλικά μείγματος RCC.....	40
3.2.2 Δείκτης εργασιμότητας	43
3.2.3 Θερμοκρασία.....	44
3.2.4 Πυκνότητα	44
3.2.5 Θερμικές ιδιότητες.....	44
3.2.6 Ανθεκτικότητα	44
3.2.7 Συγκόλληση των επιμέρους στρώσεων	45
3.3 Σχεδιασμός φραγμάτων RCC.....	46
3.3.1 Παραγωγή αδρανών	48
3.3.2 Μεταφορά και διανομή του υλικού	48
3.3.3 Συμπύκνωση.....	49

3.3.4 Προετοιμασία της επιφάνειας της στρώσης.....	49
3.3.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος.....	50
3.3.6 Θεμέλια των φραγμάτων RCC.....	50
3.3.7 Φορτία που ασκούνται σε φράγμα βαρύτητας RCC.....	54
3.3.8 Μεθοδολογία σχεδιασμού φραγμάτων.....	56
3.4 Περιπτώσεις κατασκευής φραγμάτων RCC.....	63
4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ.....	72
4.1 Μεθοδολογίες σχεδιασμού.....	73
4.1.1 Ψευδοστατική μέθοδος.....	74
4.1.2 Μέθοδος ολίσθησης πρανούς.....	76
4.1.3 Μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων.....	80
4.2 Κανονισμοί για το σχεδιασμό φραγμάτων.....	82
4.2.1 Ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός.....	82
4.2.2 Ευρωπαϊκός αντισεισμικός σχεδιασμός.....	84
4.2.3 Χαρακτηριστικά σεισμών.....	85
4.2.4 Ομοσπονδιακές οδηγίες ΗΠΑ.....	86
4.3 Περιπτώσεις αστοχίας φραγμάτων λόγω του σεισμού.....	89
5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ RCC.....	96
5.1 Εισαγωγή.....	96
5.1.1 Το πρόβλημα.....	96
5.1.2 Λογισμικό.....	96
5.1.3 Προσομοιώματα.....	110
5.2 Στατική φόρτιση (απουσία νερού).....	112
5.3 Στατική ανάλυση (με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα).....	123
5.3.1 Στατική ανάλυση φράγματος σε περίπτωση μέσης στάθμης του νερού.....	124
5.3.2 Στατική ανάλυση φράγματος σε περίπτωση μέγιστης στάθμης του νερού.....	138
5.4 Σεισμική φόρτιση χωρίς νερό.....	148
5.4.1 Ψευδοστατική μέθοδος.....	148
5.4.2 Μέθοδος τάσεων παραμορφώσεων.....	156
5.5 Σεισμική φόρτιση υπό την παρουσία νερού.....	179
5.5.1 Σεισμική φόρτιση για μέση στάθμη νερού στον ταμιευτήρα.....	180
5.5.2 Σεισμική φόρτιση για μέγιστη στάθμη νερού στον ταμιευτήρα.....	204
5.6 Συγκρίσεις και γενικότερα συμπεράσματα.....	227
5.6.1 Συγκρίσεις για στατική φόρτιση χωρίς νερό.....	228

5.6.2 Στατική φόρτιση υπό την παρουσία του νερού	228
5.6.3 Σεισμική φόρτιση (με χαμηλή, μέση και μέγιστη στάθμη νερού).....	228
6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	239
6.1 Γενικά συμπεράσματα	239
6.2 Προτάσεις.....	240
Βιβλιογραφία	241
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	243

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της σεισμικής απόκρισης φραγμάτων από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. Διερευνάται το πρόβλημα των μετατοπίσεων και των επιταχύνσεων σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος με σκοπό τον προσδιορισμό και την πλήρη κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την σεισμική συμπεριφορά των φραγμάτων από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.

Αρχικά πραγματοποιείται μια εκτενής αναφορά στο θεωρητικό κομμάτι για τις επιμέρους κατηγορίες φραγμάτων. Ύστερα γίνεται εκτενής αναφορά για την κατηγορία των φραγμάτων από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC). Στη συνέχεια πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψιν κάποιες βασικές παραμέτρους που είναι απαραίτητες για την μελέτη ενός φράγματος. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι το έδαφος θεμελίωσης, η γεωμετρία του φράγματος και η παρουσία ή η απουσία του νερού στο ανάντη τμήμα του φράγματος. Όσον αφορά την μελέτη της μέγιστης επιτάχυνσης που αναπτύσσεται στο φράγμα όταν καταπονείται από σεισμική δόνηση επιβάλλονται τρεις διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις από τον διεθνή χώρο. Στις αναλύσεις εξετάζονται οι υδροδυναμικές και οι υδροστατικές ωθήσεις που ασκούνται στο φράγμα υπό στατική και υπό σεισμική φόρτιση.

Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με την βοήθεια του λογισμικού PLAXIS-2D που χρησιμοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διαφόρων γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις. Οι μέθοδοι με τις οποίες εκτελέστηκαν οι παραπάνω αναλύσεις ήταν η μέθοδος των τάσεων-παραμορφώσεων και η ψευδοστατική ανάλυση.

Τέλος, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα μεταξύ τους με τη βοήθεια ποικίλων διαγραμμάτων από τα οποία προέκυψαν πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά των φραγμάτων (RCC) υπό την επιβολή σεισμικών διεγέρσεων.

ABSTRACT

The subject of this diploma thesis is the study of the seismic response of the Roller Compacted Concrete dams. The problem of displacements and accelerations in specific points of the dam is being investigated with the aim of determining and understanding of the parameters that affect the seismic behavior of the Roller Compacted Concrete dams.

Intially, an extensive analysis is made on the theoretical part of the dams. Futhermore an extensive analysis is made for the Roller Compacted Concrete dams (RCC). In contamination, numerical analyses are being held, taking into account some basics parameters which are necessary for the study of a dam. The parameters which are tested is the the foundation ground, the geometry of dam and the presence or absence of water in reservoir of dam. According to study of maximum acceleration which is developed on the dam when it is strained from seismic stress, is used three different seismic excitations coming from the international literature. In the following study is analysed the hydrodynamic impulses on the dam under static and seismic charge.

Analysis were executed with the help of software PLAXIS-2D that uses the method finite elements for the solve of different geotechnical problems in two dimensions. The method which were used were the dynamic analysis and pseudostatic analysis.

Ending, the results were compared with the use of various diagrams, from these emerged valuable conclusions about the behavior of RCC dams under the imposition of seismic stimuli.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ήδη από την αρχαιότητα η ζωή του ανθρώπου ήταν συνιφασμένη με την ύπαρξη του νερού. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα πρώτα τεχνικά έργα που δημιουργήθηκαν είχαν ως σκοπό την αξιοποίηση των υδατικών πόρων για λόγους άρδευσης και ύδρευσης ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του κάθε οικισμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι μεγάλοι πολιτισμοί που αναπτύχθηκαν κοντά σε όχθες ποταμών, όπως στην περιοχή γύρω από τον Νείλο στην αρχαία Αίγυπτο, και στην περιοχή της Μεσοποταμίας από τους ποταμούς Τίγρη και Ευφράτη. Οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν πάντοτε το νερό των ποταμών αυτών ώστε να ποτίζουν τις εκτάσεις τους. Ένα από τα μεγαλύτερα τεχνητά έργα που έχουν ως στόχο την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου σε νερό είναι τα φράγματα. Η κατασκευή των πρώτων φραγμάτων υπολογίζεται περίπου 6000 χρόνια πριν. Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 16 εκατομμύρια φράγματα στον κόσμο, από τα οποία τα 7000 είναι μεγάλα.

Το φράγμα είναι ένα τεχνητό έργο το οποίο κατασκευάζεται στην κοίτη ενός ποταμού για να αναχαιτίσει την ροή του, με στόχο την αποθήκευση νερού για μελλοντική χρήση. Η έκταση στην οποία αποθηκεύεται το νερό ονομάζεται ταμιευτήρας, ο οποίος βρίσκεται ανάντη της θέσης του φράγματος. Το αποθηκευμένο νερό που βρίσκεται στον ταμιευτήρα χρησιμοποιείται για λόγους ύδρευσης ή άρδευσης της γύρω περιοχής όπου κατασκευάζεται το φράγμα. Τέλος, το αποθηκευμένο νερό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας (υδροηλεκτρικής ενέργειας) ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες της περιοχής.

Σε ένα τέτοιο τεχνητό έργο είναι πιθανόν να δημιουργηθούν προβλήματα. Τα προβλήματα μπορεί να προκληθούν από λάθος εκτιμήσεις και χειρισμούς κατά την φάση της μελέτης και κατά την φάση της κατασκευής. Υπάρχουν και προβλήματα τα οποία προκαλούνται και από φυσικούς παράγοντες, όπως από κάποιον σεισμό. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να προκαλέσουν αστοχία στην κατασκευή η οποία οδηγεί σε αρκετές περιπτώσεις στην κατάρρευσή της. Οι επιπτώσεις από την κατάρρευση μιάς τέτοιας κατασκευής μπορεί να είναι κατατροφικές όσον αφορά τις απώλειες ακινήτων και τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Στο παρελθόν σε αρκετές περιπτώσεις αστοχιών που προήλθαν από σφάλματα που έγιναν κατά την φάση της μελέτης ή της κατασκευής, όσο και από σεισμούς είχαν ως αποτέλεσμα απώλειες σε ανθρώπινες ζωές.

Για τους παραπάνω λόγους είναι πολύ σημαντικός ο αντισεισμικός σχεδιασμός των φραγμάτων και η συχνή παρακολούθησή τους όσον αφορά τη σεισμική συμπεριφορά τους. Σε αυτό το κομμάτι η συνεισφορά του Τοπογράφου Μηχανικού είναι πολύ σημαντική καθώς με την βοήθεια άλλων ειδικοτήτων μπορεί να συμβάλει στην συνολική εικόνα της συμπεριφοράς του φράγματος με σκοπό να προβλεφθούν εγκαίρα οι παραπάνω αστοχίες. Με βάση την παρακολούθηση αυτή θα κριθεί αν η κατασκευή μας είναι ασφαλής ή όχι.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να γίνουν κατανοητά τα στάδια και τα βήματα που χρειάζονται και που απαιτούνται κατά την φάση της μελέτης ενός φράγματος. Τα στάδια που περιγράφονται παρακάτω θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε όλες τις μελέτες πριν την κατασκευή ενός φράγματος και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι αυτός. Το φράγμα πάνω στο οποίο εφαρμόζονται τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω είναι φράγμα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete - RCC). Οι περιπτώσεις τις οποίες λάβαμε υπόψιν είναι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζεται το φράγμα και η γεωμετρία του. Ελήφθησαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι το υπέδαφος αποτελείται εξ ολοκλήρου από βραχώδες υλικό, ενώ στην δεύτερη έγινε παραδοχή ότι το υπόστρωμα αποτελείται από ημιβραχώδες υλικό. Σχετικά με την γεωμετρία του φράγματος εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις αυτές είχαν σχέση με την κλίση των πρανών του στα ανάντη και στα κατόντη σημεία του. Στις παραπάνω δύο περιπτώσεις η κλίση στο ανάντη και στο κατόντη πρανές θεωρήθηκαν ίσες και το ύψος του φράγματος σταθερό. Υπενθυμίζεται ότι το υλικό του φράγματος είναι ομοιογενές σε όλα του τα σημεία. Στην περίπτωσή μας εξετάζεται το υλικό του ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC). Για όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις κατά την διαδικασία της μελέτης μας ακολουθήθηκαν τα στάδια που περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω.

Πρώτα εξετάστηκε η στατική φόρτιση της κατασκευής και του υπεδάφους πάνω στο οποίο εδράζεται, χωρίς την παρουσία του νερού. Στο δεύτερο στάδιο εξετάστηκε η στατική φόρτιση στο φράγμα λόγω των ωθήσεων που του ασκούνται εξαιτίας της ύπαρξης νερού στον ταμιευτήρα, στα ανάντη του φράγματος. Οι περιπτώσεις που πάρθηκαν σε αυτό το στάδιο ήταν όταν το νερό ήταν στη μέση στάθμη του ταμιευτήρα, και στην δεύτερη όταν το νερό βρισκόταν στη μέγιστη στάθμη του. Στο επόμενο στάδιο εξετάστηκε η σεισμική συμπεριφορά του φράγματος με την μέθοδο των τάσεων-παραμορφώσεων, όσο και με την μέθοδο της ψευδοστατικής ανάλυσης. Σε αυτό το μέρος δεν ελήφθησαν υπόψιν οι επιπρόσθετες δυνάμεις που ασκούνται εξαιτίας της ύπαρξης νερού στον ταμιευτήρα. Παρόλα αυτά, σε αυτό το στάδιο προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το πως η γεωμετρία του, σε συνδυασμό με το υλικό του υπεδάφους πάνω στο οποίο εδράζεται, επηρεάζουν την επιτάχυνση σε χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος το οποίο υπόκειται σε σεισμική δόνηση. Στην τελευταία κατηγορία έγινε η παραδοχή της ύπαρξης νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος υπό σεισμική φόρτιση. Σε αυτό το στάδιο εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι το νερό βρίσκεται στη μέση στάθμη του ταμιευτήρα και στη δεύτερη το νερό βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη του. Σε αυτό το κομμάτι της μελέτης υπολογίστηκαν οι υδροδυναμικές ωθήσεις που ασκούνται στο σώμα του φράγματος λόγω της ύπαρξης του σεισμού. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η σύγκριση του τελευταίου βήματος (με την παραδοχή της παρουσίας του νερού) με το προηγούμενο στάδιο (στο οποίο δεν ελήφθει υπόψιν η παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα). Με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν χρήσιμα στοιχεία και συμπεράσματα σχετικά κατά πόσο η ύπαρξη του νερού επηρεάζει την επιτάχυνση σε χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος υπό σεισμικές συνθήκες.

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από έξι Κεφάλαια και ένα Παράρτημα.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή σχετικά με τα φράγματα, και αναλύεται ο σκοπός των οποίων εξυπηρετούν οι παραπάνω κατασκευές. Στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρονται οι κατηγορίες των επιμέρους φραγμάτων, τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται η θέση της κατασκευής του φράγματος. Στη συνέχεια αναλύονται τα προβλήματα, οι ζημιές που μπορεί να προκληθούν στα φράγματα και οι αιτίες που είναι ικανές να οδηγήσουν ένα φράγμα στην αστοχία και στη συνέχεια στην κατάρρευση.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά για τα φράγματα βαρύτητας από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC). Γίνεται εκτενής αναφορά των ιδιοτήτων τους, όσο και στις ιδιότητες του υλικού από το οποίο πρέπει να αποτελείται το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζεται το φράγμα ώστε να αντέξει το βάρος της κατασκευής.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την μελέτη του αντισεισμικού σχεδιασμού των φραγμάτων, ενώ επισημαίνονται οι κανονισμοί που πρέπει να τηρούνται κατά την διαδικασία της μελέτης των φραγμάτων, δίνοντας έμφαση στα φράγματα RCC.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν ορισμένες παραμετρικές αναλύσεις που χρειάζονται για τη μελέτη της λειτουργίας του φράγματος. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS-2D στο οποίο έγινε η προσομοίωση του μοντέλου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με βάση την παραπάνω διαδικασία.

Στο Έκτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια γενικά συμπεράσματα και προοπτικές που προέκυψαν από την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής.

Τέλος, στο Παράρτημα περιλαμβάνονται τα διαγράμματα των χρονοιστοριών των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων για ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου για όλες τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Φράγμα είναι μια κατασκευή ή τεχνικό έργο το οποίο κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός ποταμού για να ανακόψει τη ροή του, με σκοπό την αποθήκευση, παροχέτευση ή ανάσχεση της πλημμυρικής παροχής του ρεύματος. Το νερό το οποίο αποθηκεύεται με την κατασκευή του φράγματος χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ανάγκες άρδευσης ή ύδρευσης της γύρω περιοχής. Επίσης, το νερό που αποθηκεύεται είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτοντας τις ανάγκες της περιοχής. Η μελέτη της κατασκευής ενός φράγματος σχετίζεται με το σκοπό τον οποίο πρόκειται να εξυπηρετήσει. Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετεί βρίσκεται ο καλύτερος τύπος φράγματος, όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Τα φράγματα είναι ιδιόμορφες κατασκευές οι οποίες δεν είναι δυνατόν να τυποποιηθούν. Κάθε φράγμα έχει την δική του λειτουργικότητα, τους δικούς του φυσικούς πόρους και το δικό του φυσικό περιβάλλον.

2.1 Δεδομένα και διαδικασία επιλογής τοποθεσίας του φράγματος

Τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για τη δημιουργία φράγματος είναι:

- Η γνώση της τοπογραφίας της περιοχής, όπου το φράγμα πρόκειται να κατασκευαστεί. Η γνώση της τοπογραφίας της περιοχής σχετίζεται με τις κλίσεις του εδάφους και τις οριζοντιογραφικές του ανωμαλίες
- Η γνώση της γεωλογίας της περιοχής στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί το φράγμα. Η γεωλογία της περιοχής αφορά κυρίως τους σχηματισμούς του εδάφους, τη δομή του και τον βαθμό αποσάρθρωσης και διάβρωσης του εδαφικού υλικού
- Από την ύπαρξη του νερού στην περιοχή. Όπως είναι τα χαρακτηριστικά του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα, τις αρτεσιανές πιέσεις του, την ροή του, τις πηγές του την χημική του σύνθεση και την επιφανειακή του απορροή.
- Από το κλίμα της περιοχής. Δηλαδή αν στην περιοχή επικρατεί ξηρασία και έχει ανάγκη από νερό ή αν υπάρχουν έντονες βροχοπτώσεις στην περιοχή, χιόνι και επικρατεί παγετός
- Ένα πολύ βασικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την μελέτη της κατασκευής του φράγματος είναι οι σεισμικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Αυτό σχετίζεται με την σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής. Επίσης, το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνεται στο στάδιο της μελέτης του φράγματος είναι ο έλεγχος ύπαρξης κάποιου σεισμικού ρήγματος στην περιοχή κοντά στο φράγμα. Το φράγμα απαγορεύεται να κατασκευαστεί πάνω σε ενεργό σεισμικό ρήγμα, αν στην περιοχή υπάρχουν αρκετά ρήγματα τότε μια μέση λύση είναι η κατασκευή του σε κάποιο σημείο που να απέχει κάποια απόσταση από το κοντινότερο ρήγμα.

2.1.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

Κατά την φάση της μελέτης και της κατασκευής ενός φράγματος είναι πολύ σημαντικό να ληφθούν υπόψιν και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με τις διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων στα οποία θεμελιώνονται τα φράγματα. Τα θέματα που σχετίζονται με την γεωλογία της περιοχής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Η πρώτη κατηγορία σχετίζεται με τον βράχο και την κατηγορία του εδάφους, το κλίμα και η τοπογραφία της περιοχής. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα διότι με το νερό ή με την άνοδο της στάθμης του ταμιευτήρα είναι πιθανόν να προκληθούν αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα του φράγματος. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να αφορούν αλλαγές στην διαλυτότητά τους, στην αύξηση της απορροφητικότητάς τους και στην αύξηση της αστάθειας των πρανών στα πρανή του ταμιευτήρα.
- Η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με την γεωλογική εξέλιξη της περιοχής. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του φράγματος δεν είναι αρκετό να γνωρίζουμε μόνο το είδος του πετρώματος ή του εδάφους, τις μηχανικές ιδιότητες τους και την κατανομή της γεωλογικής εξέλιξης που αναπτύσσεται στην περιοχή. Οι πιο χρήσιμες πληροφορίες της γεωλογικής ιστορίας είναι οι πρόσφατες και συνηθέστερα αυτές που σχετίζονται με την κοντινή περιοχή στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό συμβαίνει επειδή οι τεκτονικές δομές σε μικρό βάθος έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή και στην ευστάθεια των πρανών της κοιλάδας. Επιπλέον είναι πιθανόν οι δομές να είναι ενεργές ή να υπάρχει αλληλεπίδραση με τη διαδικασία κατασκευής και λειτουργίας του φράγματος.

2.1.2 Διαδικασία επιλογής της θέσης του φράγματος

Τα στάδια που πρέπει να ακολουθούνται για να αποφασιστεί η θέση στην οποία θα κατασκευαστεί το φράγμα προέρχονται από αναλύσεις των δεδομένων και των στοιχείων που λαμβάνονται, είτε από κοντά, είτε από επεξεργασία χαρτών και εικόνων για την περιοχή ενδιαφέροντος.

Χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή του καταλληλότερου σημείου είναι οι τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής ενδιαφέροντος σε διάφορες κλίμακες:

- Τοπικοί χάρτες κλίμακας 1:250000 με ισοϋψείς ανά 20-30 m μέχρι κλίμακας 1:25000 με ισοϋψείς ανά 10 m
- Χάρτης της λεκάνης απορροής κλίμακας 1:25000 με ισοϋψείς ανά 10 m μέχρι κλίμακας 1:2000 με ισοϋψείς ανά 2 m
- Χάρτης της περιοχής του ταμιευτήρα κλίμακας 1:1000 με ισοϋψείς ανά 2 m μέχρι κλίμακας 1:200 με ισοϋψείς ανά 1 m
- Μεμονωμένοι χάρτες σχεδίου της κατασκευής κλίμακας 1:500 με ισοϋψείς ανά 1 m μέχρι κλίμακας 1:200 με ισοϋψείς ανά 0,5 m

Οι τοπικοί χάρτες στην Ελλάδα παρέχονται από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού ή από την υπηρεσία του Εθνικού Κτηματολογίου. Επίσης για την πιο λεπτομερή αποτύπωση της περιοχής όσον αφορά την παραγωγή χαρτών κλίμακας από 1:1000 μέχρι κλίμακας 1:200 με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων. Αυτό το στάδιο πραγματοποιείται με την λήψη και με κατάλληλη επεξεργασία αεροφωτογραφιών της περιοχής μελέτης. Βέβαια είναι μια διαδικασία που απαιτεί χρόνο και κόστος λόγω του ότι πριν τον προγραμματισμό πτήσης για την λήψη των αεροφωτογραφιών απαιτούνται σημεία ελέγχου σε κατάλληλες θέσεις πάνω στο έδαφος. Οι αεροφωτογραφίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επίσης τοπογραφικών χαρτών. Επιπλέον είναι εφικτό αντί για χρήση τοπικών χαρτών να χρησιμοποιηθούν εικόνες από δορυφόρους κλίμακας 1:500000 μέχρι κλίμακας 1:100000 και 1:250000. Από τις δορυφορικές εικόνες μπορεί να ληφθούν πλήθος από πολύτιμα δεδομένα για την περιοχή ενδιαφέροντος σχετικά με τα γεωλογικά της στοιχεία. Τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής σχετίζονται τα γεωλογικά όρια, τα ρήγματα της περιοχής με τις συνθήκες βλάστησης, τη χρήση γης, την ύπαρξη υδατικών πόρων στην περιοχή κ.α. Στη διαδικασία κατά την επιλογή της θέσης του φράγματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και γεωμορφολογικοί χάρτες που μας παρουσιάζουν και μας δίνουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το ανάγλυφο και την τοπογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι πληροφορίες αφορούν την κλίση (κατά πόσο έντονη ή ήπια είναι σε ορισμένες περιοχές) και την ύπαρξη ποταμών ή ρεμάτων της υπό μελέτη περιοχής.

Οι χάρτες που μας παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής ενδιαφέροντος είναι οι γεωλογικοί χάρτες. Οι γεωλογικοί χάρτες μπορεί να είναι σε κλίμακα 1:5000 ή σε κλίμακα 1:2500 για γενικές πληροφορίες της τοποθεσίας, ενώ για πιο ακριβείς πληροφορίες μπορεί να είναι και σε κλίμακα 1:1000 ή 1:500. Οι πληροφορίες που μας δίνουν οι γεωλογικοί χάρτες σχετίζονται:

- Με τις ισουψείς καμπύλες στην περιοχή ενδιαφέροντος
- Με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την κλίση του εδάφους ή τις ασυνέχειες σε βραχώδη υλικά και σε άλλες κατηγορίες εδαφών
- Με χαρακτηριστικά όπως κατηγορία βραχώδων εδαφών και ασυνεχειών μεταξύ τους ή ζώνες θραύσης
- Με πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη υπογείων υδάτων ή διαρροών του εδάφους ή πληροφορίες ακόμα και τυχόν ύπαρξη της βλάστησης, πράγμα που υποδηλώνει την ύπαρξη υγρασίας στο έδαφος
- Με την τοποθεσία γραμμών ασυνεχειών μεταξύ των εδαφών

2.2 Τύποι-κατηγορίες φραγμάτων

Τα φράγματα ταξινομούνται:

- **Ανάλογα με το μεγεθός τους σε:**

Μικρά φράγματα όταν το ύψος τους δεν ξεπερνάει τα 15 μέτρα

Μεγάλα φράγματα όταν το ύψος τους είναι μεγαλύτερο από 15 μέτρα. Μεγάλα φράγματα με ύψος από 5 έως 15 μέτρα θεωρούνται και αυτά τα όποια:

1. Το μήκος του υπερχειλιστή είναι μικρότερο από 500 μέτρα
2. Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα να μην είναι μικρότερη από τρία εκατομμύρια κυβικά μέτρα
3. Η μέγιστη ροή εκκένωσης να μην είναι μικρότερη από 2000 κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο

- **Ανάλογα με τη χρήση τους σε:**

1. Υδροηλεκτρικά φράγματα από τα οποία γίνεται η παραγωγή ενέργειας για να καλυφθούν κυρίως ενεργειακές ανάγκες
2. Άρδευτικά τα οποία χρησιμοποιούνται για ανάγκες άρδευσης
3. Υδρευτικά τα οποία χρησιμοποιούνται για ανάγκες ύδρευσης
4. Πολλαπλών χρήσεων που είναι τα φράγματα που χρησιμοποιούνται για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και για λόγους άρδευσης ή ύδρευσης

- **Ανάλογα με τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής**

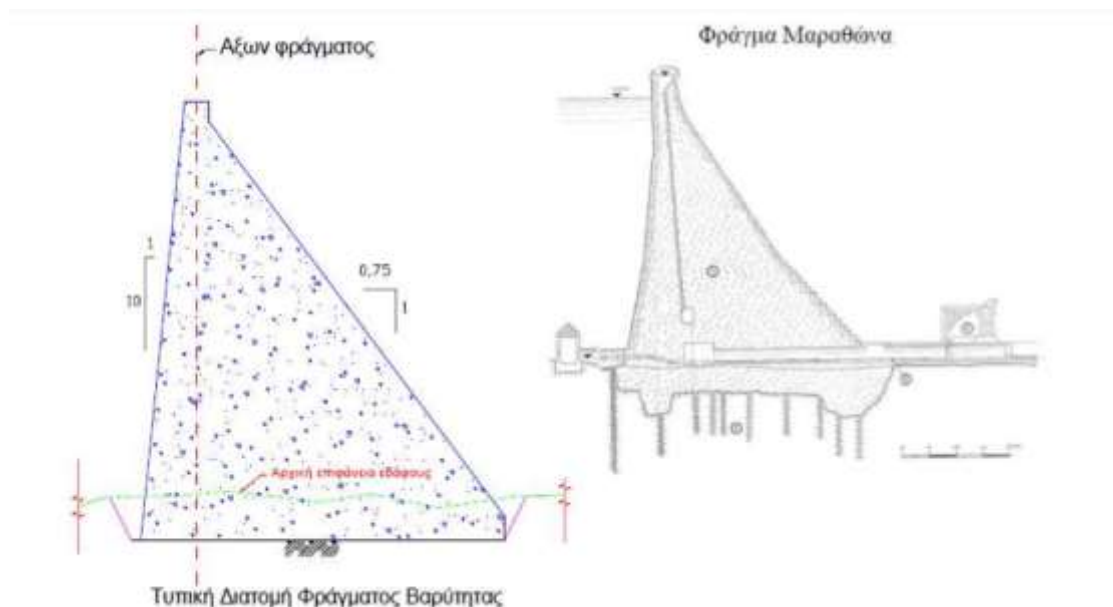
1. **Εύκαμπτα φράγματα:** στα οποία κατατάσσονται τα χωμάτινα φράγματα, τα λιθόρριπτα φράγματα με πυρήνα, τα λιθόρριπτα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, λιθόρριπτα με ασφαλτικό στοιχείο (εξωτερικό ή εσωτερικό)
2. **Φράγματα από σκυρόδεμα:** στα οποία κατατάσσονται τα φράγματα βαρύτητας, τα αντηριδωτά φράγματα, τα τοξωτά φράγματα και τα μικτά φράγματα (RCC).(Παπαδημητρίου 2015)

- **Ανάλογα με τη χρησιμότητά τους**

1. Φράγμα αποθήκευσης νερού: Το νερό συλλέγεται στον ταμιευτήρα και δημιουργείται τεχνητή λίμνη (λεκάνη κατάκλισης). Το νερό που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους λειψυδρίας.
2. Φράγμα εκτροπής: έχουν ως σκοπό την εκτροπή της ροής του νερού είτε για να παροχετευτεί μέσω αγωγών για προκαθορισμένο χρόνο, είτε για εκτέλεση εργασιών εν ξηρώ. Κατηγοριοποιούνται σε μόνιμα ή προσωρινά
3. Φράγμα ανάσχεσης: δημιουργείται με σκοπό την μείωση της ταχύτητας ροής των ποταμών, με σκοπό τον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων και την αποφυγή της διάβρωσης εξαιτίας του ποταμού.
4. Φράγμα ρύθμισης: είναι ρυθμιστικά, με σκοπό τον έλεγχο και την αποφυγή των πλημμυρών, καθώς και την ελεγχόμενη παροχέτευση νερού. (Λουμπασάκης, 2013)

2.2.1 Φράγματα βαρύτητας

Τα φράγματα βαρύτητας είναι φράγματα τα οποία αποτελούνται εξ ολοκλήρου από σκυροδέμα. Συνήθως κατασκευάζονται πάνω σε βραχώδη και ημιβραχώδη υλικά θεμελίωσης τα οποία αποτελούνται από υλικά σχετικά μεγάλης αντοχής και μεγάλου μέτρου ελαστικότητας ώστε η κατασκευή να μην υποστεί έντονες καθιζήσεις. Αυτός ο τύπος φράγματος αντιμετωπίζει τις φορτίσεις μέσω του βάρους του. Επίσης εξαιτίας του βάρους του το φράγμα δεν ολισθαίνει, δεν ανατρέπεται και δεν αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο υλικό κατασκευής του. Η επιλογή της κατασκευής των φραγμάτων βαρύτητας συνήθως πραγματοποιείται σε στενές κοιλάδες ώστε να αποφεύγεται το μεγάλο κόστος της κατασκευής τους λόγω της μεγάλης ποσότητας του σκυροδέματος. Ένα από τα πλεονεκτήματά τους συγκριτικά με τα χωμάτινα φράγματα είναι το γεγονός ότι ο υπερχειλιστής αποτελεί μέρος του φράγματος, ενώ στα χωμάτινα φράγματα αποτελεί ξεχωριστή κατασκευή ο οποίος τοποθετείται σε ένα από τα δύο αντερείσματά του. (Παπαδημητρίου 2015)



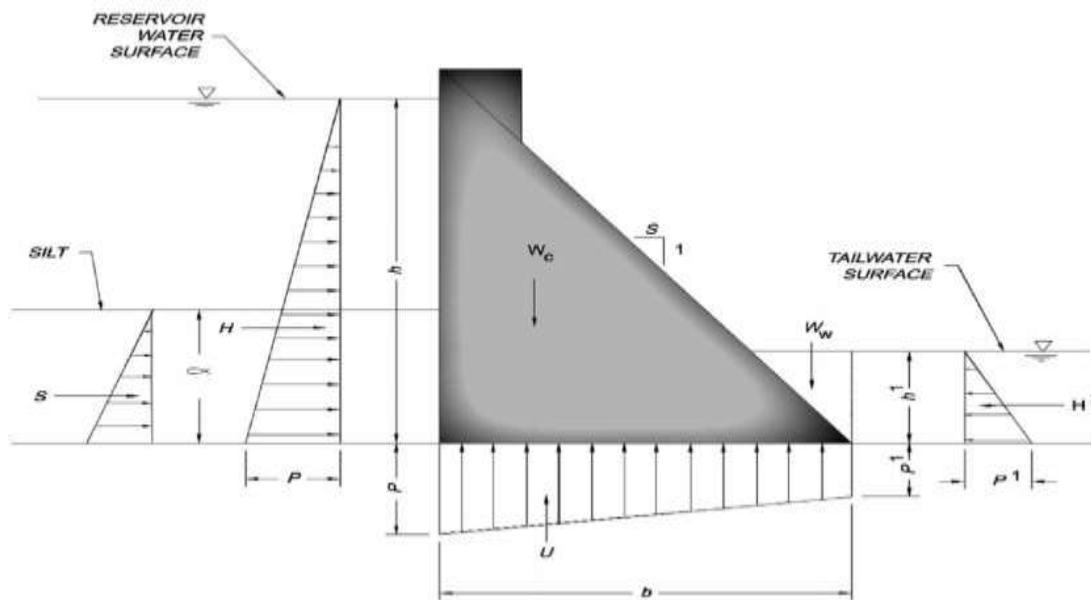
Εικόνα 2.1 Διατομή φράγματος βαρύτητας σκυροδέματος

(Πηγή: Παπαδημητρίου 2015)

Δυνάμεις που ασκούνται στο φράγμα

Σύμφωνα με τον Παπαδημητρίου (2015), τα συνήθη φορτία που συμπεριλαμβάνονται στις δυνάμεις που καταπονούν το φράγμα είναι:

- Η υδροστατική πίεση από το νερό του ταμιευτήρα (H) και από το νερό στη λεκάνη αποτόνωσης ενέργειας ή στη στάθμη φυγής
- Η δύναμη που ασκείται στην ανάντη παρειά του φράγματος (S) εξαιτίας της συγκέντρωσης φερτών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του
- Η δύναμη που ασκείται στο φράγμα εξαιτίας της πρόσκρουσης κορμών ή πάγου
- Οι κυμματισμοί που προκαλούνται στην κορυφή του ταμιευτήρα
- Η υδροδυναμική δύναμη που ασκείται από το νερό του ταμιευτήρα του φράγματος και προκαλείται από σεισμική δόνηση
- Η αδρανειακή σεισμική δύναμη που ασκείται στο σώμα του φράγματος
- Η τριβή στη βάση του φράγματος
- Η δύναμη που ασκείται από το συνολικό βάρος της κατασκευής
- Η ενεργός ορθή πίεση του εδάφους στην βάση του φράγματος
- Η πίεση του νερού που προκαλείται στη βάση του φράγματος
- Η ολική ορθή πίεση που ασκείται στη βάση του φράγματος από την αντίδραση του εδάφους.

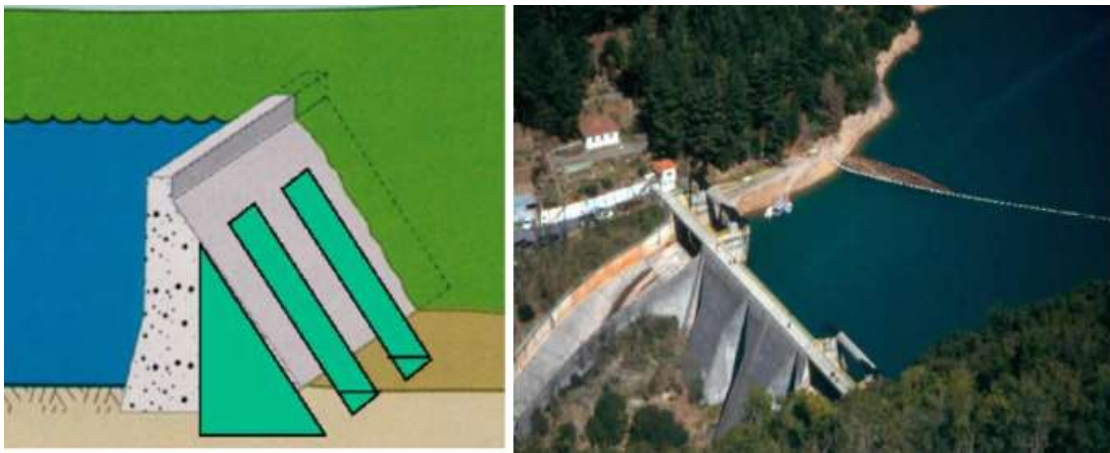


Εικόνα 2.2 Συνήθεις φορτίσεις που δέχεται ένα φράγμα βαρύτητας

(Πηγή: Design manual for small RCC Dam, PCA 2003)

2.2.2 Αντηριδωτά φράγματα

Στα αντηριδωτά φράγματα μειώνεται ο όγκος του σκυροδέματος και έχουμε αύξηση του πλάτους θεμελίωσης. Επιπλέον έχουμε γεφύρωση μεταξύ των αντηρίδων με επίπεδα ή καμπύλα στοιχεία. Το πλάτος θεμελίωσης πρέπει να είναι μεγάλο ώστε να μειώνονται οι τάσεις που ασκούνται στο έδαφος. Για αυτό απαιτείται διαπλάτυνση του κάτω άκρου, με την κατασκευή κυψελωτών αντηρίδων και με την δημιουργία πέδιλου. Η κατασκευή τους αποτελείται α) από μια επίπεδη ή καμπύλη πλάκα σκυροδέματος, κλίσεως περίπου 45° , με μικρό σχετικά βάρος που τοποθετείται στην ανάντη πλευρά κάθετα στο ρεύμα και β) τις αντηρίδες, που είναι παράλληλες στο ρεύμα, στις οποίες στηρίζεται η πλάκα σκυροδέματος και κατανέμει τα φορτία από την υδροστατική πίεση που δέχεται από το νερό. Το κόστος κατασκευής τέτοιων φραγμάτων είναι σημαντικά πιο χαμηλό σε σύγκριση με τα συμβατικά φράγματα βαρύτητας λόγω του ότι η ποσότητα του απαιτούμενου σκυροδέματος είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τα δεύτερα.



Εικόνα 2.3 Αντηριδωτό φράγμα σε σκαρίφημα (αριστερά) και άποψη του φράγματος Λάδωνα (δεξιά)

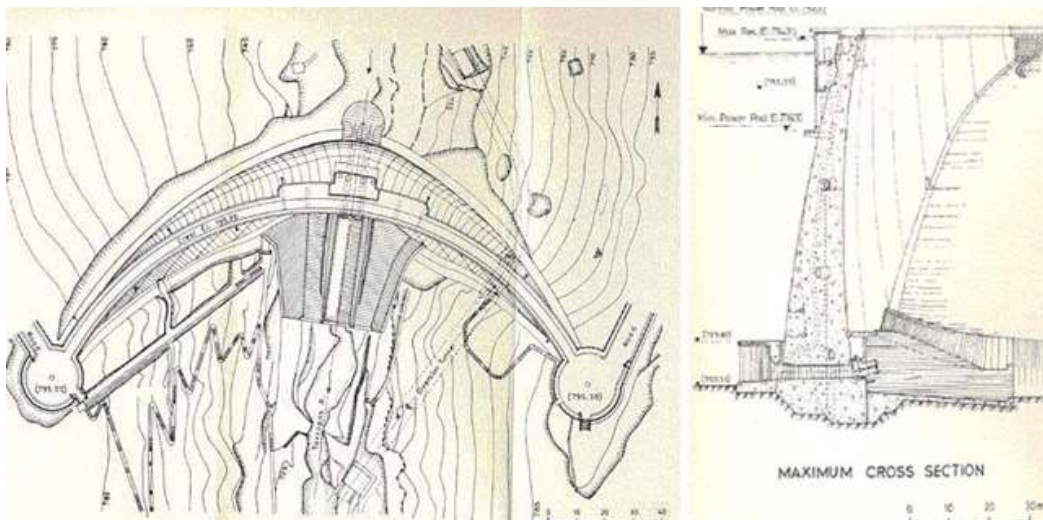
(Πηγή: Δημοπούλου 2008)

2.2.3 Τοξωτά φράγματα

Τα τοξωτά φράγματα κατασκευάζονται σε πολύ στενές και απότομες κοιλάδες (τύπου V) ή σε φαράγγια και το ύψος τους φτάνει πάνω από 150 μέτρα και πολλές φορές πάνω από 200. Έχουν τοξοειδή κάτοψη και η πίεση που ασκεί το νερό στην κυρτή επιφάνεια μεταφέρεται στις πλαγιές της κοιλάδας ως οριζόντιες δυνάμεις. Τα αντερείσματά τους πρέπει να αποτελούνται από βραχώδη υλικά με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας λόγω του ότι σε αυτά επιβάλλονται πολύ υψηλές φορτίσεις. Τα αντερείσματα πρέπει να παρουσιάζουν πολύ μικρές μετακινήσεις. Ένα τοξωτό φράγμα μπορεί να παρουσιάζει απλή ή διπλή καμπυλότητα. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα τοξωτά φράγματα είναι ότι δεν αναπτύσσονται υποπίεσεις και δεν κινδυνεύουν με ανατροπή ή ολίσθηση σε αντίθεση με τα συμβατικά φράγματα βαρύτητας στα οποία είναι απαραίτητος ο έλεγχος ευστάθειάς του.



Εικόνα 1.4 Τοξωτό φράγμα Ταυρωπού λίμνης Πλαστήρα



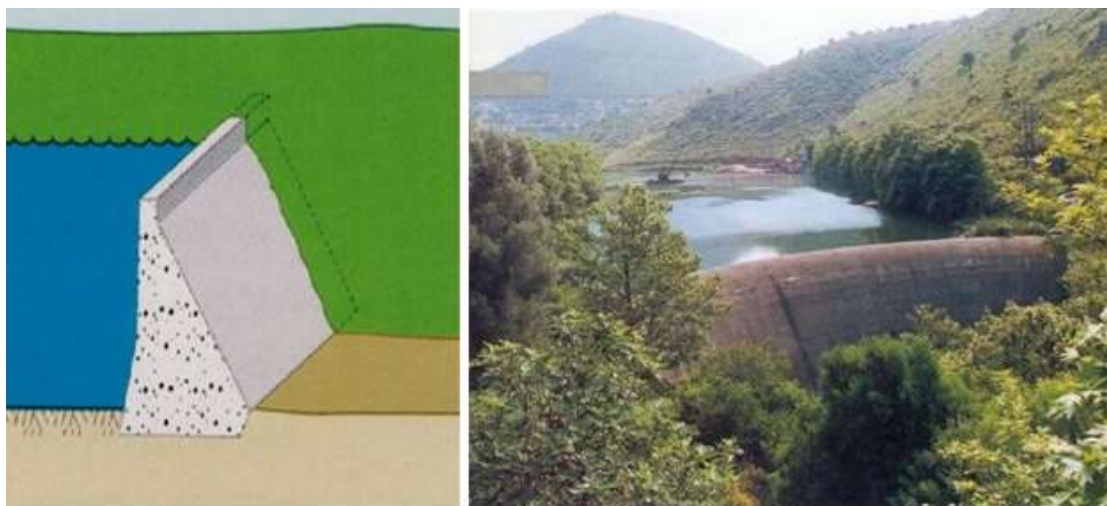
Εικόνα 2.5 Κάτοψη (αριστερά) και τομή (δεξιά) σε σκαρίφημα του τοξωτού φράγματος Ταυρωπού

(Πηγή: Δημοπούλου 2008)

2.2.4 Φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα

Τα φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία φραγμάτων βαρύτητας. Η κατηγοριοποίησή τους σχετίζεται με τις ιδιότητες του σκυροδέματος από το οποίο κατασκευάζονται. Η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φράγματα βαρύτητας τα οποία κατασκευάζονται από συμβατικό σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα των φραγμάτων RCC περιέχει μικρότερη ποσότητα τσιμέντου η οποία αναπληρώνεται με ποσότητα ιπτάμενης τέφρας. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των φραγμάτων είναι εξ ολοκλήρου ίδια με τα συμβατικά φράγματα βαρύτητας. Ένα από τα πιο βασικά πλεονεκτήματα των φραγμάτων από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα

είναι ότι η κατασκευή τους είναι πιο οικονομική σε σχέση από τα συμβατικά φράγματα βαρύτητας λόγω του ότι απαιτείται μικρότερη ποσότητα τσιμέντου για την κατασκευή τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το φράγμα το οποίο μελετήθηκε ανήκει στην παραπάνω κατηγορία, οπότε οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του σε διάφορες φορτίσεις αναλύεται σχολαστικά στα παρακάτω κεφάλαια.



Εικόνα 2.6 Τομή φράγματος βαρύτητας σε σκαρίφημα (αριστερά) και άποψη του φράγματος στον ποταμό Λούρο (δεξιά)

(Πηγή: Δημοπούλου 2008)

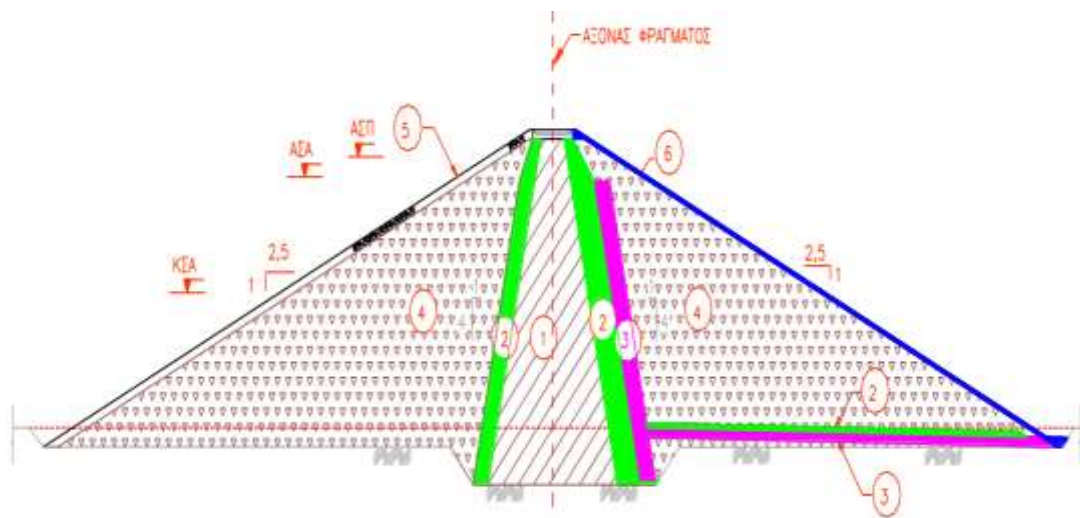
2.2.5 Χωμάτινα φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα μπορούν να κατασκευαστούν πάνω σε βραχώδη εδάφη, σε ημιβραχώδη και σε μαλακά εδάφη. Συνήθως προτιμότερη επιλογή είναι η κατασκευή τους πάνω σε βραχώδη εδάφη λόγω του ότι παρουσιάζονται μικρότερες καθιζήσεις. Όμως, είναι σπάνιο το υπόστρωμα κάτω από το φράγμα να είναι βραχώδες, άρα τις περισσότερες φορές το έδαφος θεμελίωσής τους είναι ημιβραχώδες. Καλό είναι να αποφεύγεται η θεμελίωσή τους σε μαλακά εδάφη εξαιτίας των σχετικά μεγάλων καθιζήσεων που παρουσιάζουν σε σχέση με τα προηγούμενα.

Τα χωμάτινα φράγματα αποτελούνται από δύο ζώνες κατά κύριο λόγο. Η πρώτη ζώνη βρίσκεται στα πρηνή εκατέρωθεν του πυρήνα και αποτελείται από υλικό υψηλής υδατοπερατότητας. Αυτή η ζώνη αποκαλείται κέλυφος του πυρήνα. Η δεύτερη ζώνη είναι ο πυρήνας του φράγματος που αποτελείται από αργιλικό υλικό χαμηλής υδατοπερατότητας. Όσον αφορά την κλίση των πρηνών συνήθως τα πρηνή στα ανάντη τμήμα του φράγματος είναι πιο ήπια με σκοπό να μειώνει τις υδροστατικές ωθήσεις που ασκούνται στο σώμα του φράγματος. Σε αντίθεση με το ανάντη τμήμα, η κλίση στο κατόντη είναι πιο απότομη.

Ένα από τα θετικά που έχουν τα χωμάτινα φράγματα σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας είναι ότι κατασκευάζονται από υλικά τα οποία υπάρχουν σε μεγάλη διαθεσιμότητα στην περιοχή. Για αυτό τον λόγο και η κατασκευή τους είναι πιο

οικονομική σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας. Σε αυτό έχει συμβάλει και η εξέλιξη των χωματουργικών μηχανημάτων. Το εδαφικό υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το χωμάτινο φράγμα στρώνεται σε λεπτές στρώσεις πάχους 0,30-0,50m με την χρήση αποξεστών και προωθητών. Κάθε στρώση βρέχεται και συμπυκνώνεται με οδοστρωτήρες ή με αυτοκινούμενες δονητές ώστε να αποκτήσει ικανοποιητική συμπίκνωση. Το αρνητικό που έχουν τα χωμάτινα φράγματα σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας είναι ότι στα χωμάτινα απαιτείται η κατασκευή υπερχειλιστή εξαιτίας του κινδύνου διάβρωσης κάτι το οποίο επιφέρει σημαντικό επιπλέον κόστος στην κατασκευή. Σε αντίθεση με τα φράγματα βαρύτητας που δεν κινδυνεύουν από διάβρωση ο υπερχειλιστής είναι ενσωματωμένος και δεν κατασκευάζεται ξεχωριστά.



Εικόνα 2.7 Τυπική διατομή χωμάτινου φράγματος με κεντρικό πυρήνα

(Πηγή:Μουτάφης 2016)

Η τυπική διαζώνηση γεωφράγματος με αδιαπέρατο πυρήνα είναι η εξής:

Ζώνη 1- Πυρήνας	Αδιαπέρατα υλικά
Ζώνη 2-φίλτρο	Διαβαθμισμένο αμμώδες υλικό
Ζώνη 3- Στραγγιστήριο ή μεταβατική ζώνη	Διαβαθμισμένο χαλικώδες υλικό
Ζώνη 4- Κέλυφη (σώματα στήριξης)	Αμμοχάλικα, κορήματα, κερματισμένος βράχος
Ζώνη 5- Ζώνη προστασίας ανάντη πρανούς	Ογκόλιθοι
Ζώνη 6- Ζώνη προστασίας κατόντη πρανούς	Λίθοι κροκάλες

Τα χωμάτινα φράγματα ανάλογα με τα υλικά και τον τρόπο κατασκευής τους χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Τα ομογενή χωμάτινα φράγματα, τα οποία κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου από το ίδιο υλικό το οποίο θα πρέπει να είναι αδιαπέρατο. Το υλικό κατασκευής σε τέτοιες κατηγορίες που πρέπει να χρησιμοποιείται είναι το αργιλικό υλικό ή η ιλύς. Τα πρανή κατασκευάζονται με μικρή κλίση ώστε να αναχαιτίζουν την ορμή του νερού και να μην υπάρξει κίνδυνος

διάβρωσης. Σε περίπτωση που έχουμε όμως μεγαλύτερες κλίσεις για να αποφευχθεί η διάβρωση πρέπει να τοποθετούνται σταγιστήρια.

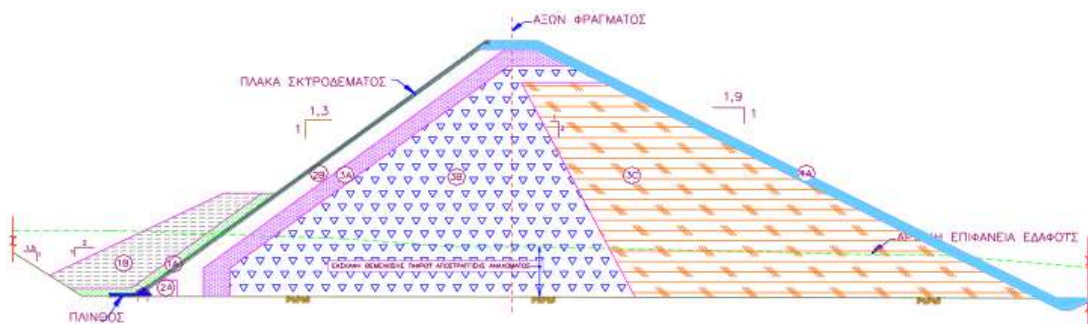
- Τα ετερογενή φράγματα που είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος χωμάτινου φράγματος. Τα φράγματα αυτά διαθέτουν αργλικό πυρήνα που είναι αδιαπέρατος. Στα ανάντη και στα κατόντη του πυρήνα του φράγματος τοποθετείται μια λεπτή στρώση ημιπερατών υλικών ενώ το υπόλοιπο σώμα του πυρήνα αποτελείται από διαπερατά υλικά.
- Με διάφραγμα αποτελείται αυτή η κατηγορία φραγμάτων που κατασκευάζονται από διαπερατά γαιώδη υλικά και μία λεπτή στρώση αδιαπέρατου υλικού το οποίο τοποθετείται στο ανάντη πρηνές του φράγματος όπως επίσης και κατακόρυφα στο κέντρο του ώστε να αποτραπεί η διέλευση του νερού μέσα από αυτό. Συνήθως αυτή η στρώση αποτελείται από σκυρόδεμα.

Λιθόρριπτα φράγματα

Αυτή η κατηγορία φραγμάτων ομοιάζει πολύ με τα χωμάτινα φράγματα. Η κατασκευή αυτής της κατηγορίας φραγμάτων πραγματοποιείται από λίθους διαφόρων μεγεθών καλά διαβαθμισμένων (κροκάλες ή βράχους), και σε περιοχές με άφθονη διαθεσιμότητα βραχώδων υλικών. Τα λιθόρριπτα φράγματα είναι δυνατόν να υπερψωθούν αν αυτό κριθεί σκόπιμο σε αντίθεση με τα χωμάτινα. Η κατασκευή των λιθόρριπτων φραγμάτων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί παντός καιρού καθώς η ανέργεσή τους δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, η θεμελίωση-στεγανοποίηση του εδάφους είναι ανεξάρτητη από την κατασκευή της λιθορριπής

Η στεγανοποίηση του λιθόρριπτου φράγματος μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους:

- Με αδιαπέρατη μεμβράνη στα ανάντη. Η μεμβράνη κατασκευάζεται από σκυρόδεμα και πραγματοποιείται ύστερα από την κατασκευή του φράγματος και υπάρχει πιθανότητα επιθεώρησης και επισκευής της. Η μεμβράνη συγκρατεί το ανάντη τμήμα της λιθορριπής με αποτέλεσμα να μην ολισθαίνει.



Εικόνα 2.8 Φράγμα λιθόρριπτο με ανάντη πλάκα σκυροδέματος ΛΑΠΣ

(Πηγή: Μουτάφης,2009)

1A	Αδιαπέρατα υλικά από δανειοθαλάμους	1B	Τυχαία υλικά .Προϊόντα εκσκαφών η υλικά από δανειοθαλάμους.
2A	Ειδικό υλικό φίλτρου διαβαθμισμένο από αμμοχάλικα ποταμού	2B	Αμμοχάλικα ποταμού διαβαθμισμένα και εμπλουτισμένα.
3A	Επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.	3B	Υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.
3C	Υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.	4	Επιλεγμένο υλικό λιθορριπής από λατομεία η απαιτούμενες εκσκαφές.

(Θανόπουλος & Αναστασόπουλος 2008)

- Με τη χρήση του κεκλιμένου πυρήνα ο οποίος είναι εφικτό να κατασκευαστεί από άργιλο ή από σκυρόδεμα. Το πλεονέκτημά του σε σύγκριση με την αδιαπέρατη μεμβράνη ανάντη είναι ότι δεν εκτίθεται στους εξωτερικούς παράγοντες και παρουσιάζει αντοχή στο χρόνο. Το μειονεκτήματά του είναι ότι δεν είναι εφικτή η δυνατότητα επιθεώρησης και επισκευής του.
- Με την κατασκευή κατακόρυφου κεντρικού πυρήνα από άργιλο ή από σκυρόδεμα παρουσιάζοντας τα ίδια χαρακτηριστικά με τον κεκλιμένο πυρήνα.(Πειραματική μελέτη υπόγειας ροής κάτω από φράγμα παρουσία διαφραγματικού τοίχου, Αναστούλης Γεώργιος 2020).

Σύγκριση κεντρικού με κεκλιμένο πυρήνα:

- Ο κεντρικός αργιλικός πυρήνας απαιτεί ταυτόχρονη κατασκευή όλων των ζωνών του φράγματος όπως και διαθεσιμότητα όλων των υλικών από τα οποία κατασκευάζεται
- Ο κεντρικός αργιλικός πυρήνας απαιτεί παύση των εργασιών για την κατασκευή της κουρτίνας τσιμεντενέσεων
- Επίσης ο κεντρικός πυρήνας, ακόμα και μετά την λειτουργία του ταμιευτήρα, δίνει την δυνατότητα συμπλήρωσης της κουρτίνας τσιμεντενέσεων αν χρειαστεί. Όταν έχουμε κεκλιμένο πυρήνα μεταγενέστερες τσιμεντενέσεις δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν
- Επιπλέον ο κεντρικός πυρήνας μπορεί να είναι πιο πλατύς σε σύγκριση με τον κεκλιμένο πυρήνα, άρα είναι κατάλληλος σε περίπτωση που αναμένονται διαφορικές καθιζήσεις (που προκαλούν ρηγμάτωση του πυρήνα).
- Ο ευρύς κεντρικός αργιλικός πυρήνας πλεονεκτεί σε περιπτώσεις φραγμάτων που παρουσιάζουν ευαισθησίες σε σεισμικές δονήσεις, επειδή οι αναπτυσσόμενες ρωγμές κλείνουν ευκολότερα
- Επίσης σε περίπτωση που χρειαστεί να γίνει εκβάθυνση της τάφρου στη βάση του πυρήνα, η οριζοντιογραφική θέση δεν μεταβάλλεται. Σε περίπτωση όμως του κεκλιμένου πυρήνα η οριζοντιογραφική θέση μετατίθεται ανεξέλεγκτα προς τα ανάντη (κυρίως σε περίπτωση που οι τσιμεντενέσεις έχουν πραγματοποιηθεί πριν την εκσκαφή της τάφρου)

Από την άλλη ο κεκλιμένος αργιλικός πυρήνας:

- Επιτρέπει την κατασκευή του μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής κατάντη μέρους του φράγματος.
- Παρέχει την δυνατότητα ταυτόχρονης κατασκευής κατάντη σώματος στήριξης και της κουρτίνας τσιμεντενέσεων πριν την έναρξη κατασκευής του πυρήνα.
- Δίνει τη δυνατότητα στην στέψη του φράγματος να απέχει οριζοντιογραφικά από την κουρτίνα τσιμεντενέσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη προσαρμογή τους στις τοπογραφικές και γεωλογικές απαιτήσεις της τοποθεσίας του έργου.
- Απαιτεί ήπια κλίση στο ανάντη πρανές δίνοντας την δυνατότητα κατασκευής του κατάντη πρανούς με πιο απότομη κλίση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κεκλιμένος πυρήνας να επιλέγεται σε κοιλάδες οι οποίες διευρύνονται προς τα κατάντη του φράγματος, εξαιτίας του μικρότερου όγκου της κατασκευής.
- Ένα άλλο χαρακτηριστικό του κεκλιμένου πυρήνα είναι ότι αφού είναι πιο στενός συγκριτικά με τον κεντρικό πυρήνα πλεονεκτεί σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν αποθέματα σε άργιλο.
- Σε ένα άλλο κομμάτι το οποίο πλεονεκτεί ο κεκλιμένος πυρήνας σε σύγκριση με τον κεντρικό είναι ότι επιτρέπει το καλύτερο χρονοδιάγραμμα κατασκευής του κατάντη σώματος και της κουρτίνας τσιμεντενέσεων λόγω της απαίτησης πολύ ταχείας κατασκευής του. Επιπλέον παρουσιάζει μικρότερες απαιτήσεις όσον αφορά την ευστάθειά του εξαιτίας των μικρότερων υπερπιέσεων των πόρων.
- Παρόλο αυτά όμως ο κεκλιμένος πυρήνας προκαλεί δυσκολίες όσον αφορά την ευστάθεια στα ανάντη του πρανούς στο φράγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπολείπεται σε περιπτώσεις ταμιευτήρων με ευρύ και ταχύ φάσμα πτώσης της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος. Αντίθετα βελτιώνει την ευστάθεια του κατάντη πρανούς.

Επιπλέον, όσον αφορά τα λιθόρριπτα φράγματα επειδή οι διαφορικές καθιζήσεις μπορεί να είναι μεγάλες, σε περιπτώσεις κοιλάδων με απότομα αντερείσματα, απαιτούνται χρήση κεντρικού αργιλικού πυρήνα με επαρκή φίλτρα ανάντη και κατάντη της κατασκευής. Επίσης ο ρυθμός ανύψωσης του πυρήνα του φράγματος επηρεάζει τις δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται εξαιτίας των υπερπιέσεων των πόρων οι οποίες με την σειρά τους επηρεάζουν την ευστάθεια του φράγματος κατά την διάρκεια της κατασκευής του. Για αυτό κατά την φάση της κατασκευής απαιτείται μέτρηση των υπερπιέσεων ώστε να ρυθμιστεί η ταχύτητα κατασκευής. Σε περιπτώσεις που έχουμε ημι-περατά σώματα στήριξης, είναι δυνατό να κατασκευαστούν οριζόντιες στραγγιστικές στρώσεις για την βελτίωση της εκτόνωσης των υπερπιέσεων των πόρων από την κατασκευή. Στην περίπτωση των λιθόρριπτων φραγμάτων αν η προσωρινή εκτροπή του ποταμού δεν πραγματοποιηθεί με σήραγγα, αλλά με τμηματική κατασκευή του φράγματος σε μηκοτομή, ο κίνδυνος

ρηγμάτωσης του πυρήνα εξαιτίας των διαφορικών καθιζήσεων αυξάνεται. Έχουμε πολλές περιπτώσεις όπου φράγματα έχουν αστοχήσει. Άρα παιτείται η χρήση ευρέως κεντρικού αργιλικού πυρήνα με επαρκή φίλτρα ανάντη και κατόντη. (Παπαδημητρίου, 2015)

Γεωμετρία πυρήνα διαζωνισμένων (λιθόρριπτων και χωμάτινων) φραγμάτων

Όσον αφορά το πλάτος του πυρήνα η υδραυλική του κλίση θα πρέπει να είναι μικρότερη από 2, όπως και το πλάτος του σε οποιοδήποτε βάθος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μισό του αντίστοιχου υδροστατικού φορτίου. Συνεπώς προκύπτει ότι όσο αυξάνεται το βάθος από την επιφάνεια του ταμιευτήρα απαιτείται αύξηση του πλάτους του πυρήνα. Το πλάτος του πυρήνα στην στέψη του θα πρέπει να είναι ίσο με μηδέν θεωρητικά, όμως για κατασκευαστικούς λόγους το πλάτος κατασκευάζεται συνήθως στα 4m στην στέψη του φράγματος. Αυτό γίνεται και επειδή περιορίζονται οι μετακινήσεις λόγω σεισμών. Σε ειδικές περιπτώσεις το πλάτος του πυρήνα στη στέψη μπορεί να είναι μεγαλύτερο και από 4m.

Όσον αφορά την κλίση των πρανών του πυρήνα των φραγμάτων, συνήθεις κλίσεις είναι 1:5 και 1:4 (Ο:Κ). Για πιο ήπιες κλίσεις έχουμε συνήθως 1:2,5 (Ο:Κ) κυρίως σε πτωχά υλικά, σε περιπτώσεις προβληματικών θεμελιώσεων και σε περιπτώσεις με υπερεπάρκεια υλικού πυρήνα.

Για τα λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος έχουμε συνηθισμένες κλίσεις για τα ανάντη πρανή 1,3:1 μέχρι και 1,5:1 (Ο:Κ). Βέβαια αυτό εξαρτάται από την αντοχή της λιθορριπής, την αντοχή της θεμελίωσης και ανάλογα με την σεισμικότητα της περιοχής. Όσον αφορά για την κατόντη κλίση συνηθισμένες κλίσεις είναι 1,5:1 μέχρι και 2:1 (Ο:Κ). Για την πλάκα σκυροδέματος στο ανάντη πρανές πρέπει να υπάρχει στεγανός κρίκος μεταξύ της πλάκας και της θεμελίωσης του φράγματος. Επίσης η πλάκα θα πρέπει να κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η πλάκα θα πρέπει να κατασκευαστεί σε λωρίδες πλάτους 8 έως 15 m και να έχει πάχος 30 cm, ο οπλισμός θα πρέπει να είναι συνεχής ή κατά λωρίδες με Φ20 ή Φ25.

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την κατασκευή φραγμάτων

2.3.1 Πλεονεκτήματα φραγμάτων

Ένα από τα πιο βασικά οφέλη των φραγμάτων είναι ότι είναι ικανά να αποταμιεύσουν μεγάλες ποσότητες νερού. Τα φράγματα όπως

αναφέρθηκε πιο πριν τοποθετούνται κάθετα στην ροή του ποταμού με σκοπό να αναχέισουν την ροή του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία τεχνητής λίμνης στην οποία έχει συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα νερού το οποίο μπορεί να καλύψει τις ανάγκες για ζήτηση νερού της περιοχής. Το νερό που δεσμεύεται χρησιμοποιείται για άρδευση των γύρω καλλιεργειών, κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα το έδαφος λόγω της ξηρότητάς του περιορίζει την ανάπτυξη της βλάστησης. Με τη δημιουργία των φραγμάτων λοιπόν δημιουργείται ένα σύστημα σταθερής ροής του νερού το οποίο ποτίζει με νερό τη γη. Όσον αφορά την ύδρευση σε νερό με τη βοήθεια των φραγμάτων μπορεί να παροχευτεί στους γύρω οικισμούς και να διανεμηθεί κατάλληλα σε κάθε νοικοκυριό.

Ένα άλλο από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των φραγμάτων είναι η χρήση τους για παραγωγή ενέργειας. Από την συγκέντρωση του νερού στον ταμιευτήρα είναι δυνατή η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας που είναι σχετικά φθηνή και μπορεί να διανεμηθεί ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του πληθυσμού. Η υδροηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια μέσω της περιστροφής του άξονα της περωτής στροβίλου. Στη συνέχεια στο δεύτερο στάδιο μέσω της γεννήτριας πραγματοποιείται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ελεγχόμενη αποταμίευση ποσοτήτων ύδατος οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδατικών πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει μία από τις σημαντικότερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των φραγμάτων είναι η αντιπλημμυρική προστασία που παρέχουν. Μετά από έντονες βροχοπτώσεις η στάθμη του νερού στα ποτάμια είναι πολύ πιθανόν να αυξηθεί δραματικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες εκτάσεις γής που βρίσκονται κοντά στις όχθες του ποταμού να πλημμυρίζουν και να προκληθούν μεγάλες καταστροφές στις ιδιοκτησίες των ανθρώπων. Με τη δημιουργία μίας τεχνητής λίμνης είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ποσότητας της ροής που ρέει σε ένα ποτάμι ώστε να αποφευχθεί πιθανή πλημμύρα ύστερα από έντονη βροχόπτωση και που μπορεί να οδηγήσει σε ανθρώπινες απώλειες. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται όταν μέρος του νερού επιτρέπεται να περάσει κατάντη πάνω από τον υπερχειλιστή σε περίπτωση που ο ταμιευτήρας βρίσκεται στην μέγιστη στάθμη του.

Η δημιουργία ενός φράγματος είναι δυνατόν να συμβάλλει στην ανάπτυξη του οικοτουρισμού. Οι υγροβιότοποι μπορεί να αποκτήσουν τεράστια περιβαλλοντική σημασία καθώς φιλοξενούν σπάνια είδη χλωρίδας και πανίδας, με περιβαλλοντικό ενδιαφέρον. Τέλος, σε ένα από τα οφέλη από την κατασκευή είναι το γεγονός ότι οι συνθήκες που υπάρχουν στον ταμιευτήρα ευνοούν την ανάπτυξη του πλαγκτόν, κάτι

που θα προσελκύσει υδρόβιους οργανισμούς, ευνοώντας έτσι την ανάπτυξη ιχθυοκαλλιεργειών, όπως και της αλιείας στην περιοχή.

2.3.2 Μειονεκτήματα φραγμάτων

Παρόλα τα παραπάνω οφέλη που δημιουργούνται από τα φράγματα τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω υπάρχουν και αρνητικά. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά μειονεκτήματα είναι και η αλλοίωση του φυσικού τοπίου. Αυτό γιατί η υπάρξη ενός τέτοιου ογκώδους και πολλές φορές από τσιμέντο οικοδόμημα είναι αντιαισθητικό και δεν συμβαδίζει με τη φυσική ομορφιά του περιβάλλοντος.

Μια άλλη πολύ σοβαρή συνέπεια από μια τέτοια κατασκευή είναι η μεταβολή και πολλές φορές η καταστροφή της πανίδας στην περιοχή. Για τη χλωρίδα μεγάλο μέρος της χερσαίας βλάστησης κοντά στις όχθες του ποταμού και της γύρω περιοχής καταστρέφεται, διότι για την κατασκευή του φράγματος συχνά απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης. Προβλήματα από μια τέτοια κατασκευή προκαλούνται στην υδρόβια βλάστηση, η οποία αναπτύσσεται σε ένα δεδομένο σύστημα ποταμών, λόγω των αλλαγών στη θερμοκρασία, τη χημική σύνθεση και των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στη δεξαμενή. Τα ψάρια επηρεάζονται από την μεταβολή της χλωρίδας όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ η μεταβολή της κοίτης του ποταμού μειώνει τον οικότοπο για τα ψάρια που εκτρέφονται από τον πυθμένα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξαφανίζονται ή να φεύγουν λόγω των αλλαγών.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η συσσώρευση φερτών υλικών στον πυθμένα, που περιλαμβάνει νερό, φορτίο σε αιώρηση και φορτίο κοίτης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ωφέλιμου όγκου και λειτουργικότητα της εξόδου του πυθμένα.

Αρκετές φορές με την κατασκευή του φράγματος γίνεται επιτακτική η ανάγκη της μετεγκατάστασης ανθρώπων και οικισμών αν η θέση τους κριθεί κατάλληλη για την δημιουργία τεχνητής λίμνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χαθούν οι περιουσίες των ανθρώπων και η αποζημίωσή τους σε γη.

Επίσης, με την κατασκευή φράγματος επιφέρονται αλλαγές στο μικροκλίμα της περιοχής, στην ταχύτητα και στην διεύθυνση των ανέμων επειδή επηρεάζεται το ετήσιο βροχομετρικό ύψος. Τοπικές κλιματολογικές αλλαγές έχουν σημειωθεί με χαρακτηριστικά παραδείγματα την αύξηση της υγρασίας της περιοχής, λόγω της αυξημένης εξάτμισης στην επιφάνεια της λίμνης και την έκλυση αερίων διοξειδίου του άνθρακα.

Επιπλέον υπάρχει και ο κίνδυνος τοπικών σεισμών λόγω της κατασκευής ενός φράγματος. Αυτό γίνεται επειδή συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες νερού και υλικών οι οποίες αυξάνουν το φορτίο με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται ο πυθμένας του ποταμού σε μεγάλο βαθμό ώστε να αυξάνεται η μετασεισμική δραστηριότητα.

Τέλος από μία τέτοια κατασκευή μπορεί να προκληθούν απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και ανεπανόρθωτα προβλήματα στο περιβάλλον, εξαιτίας μίας πιθανής αστοχίας.

2.4 Προβλήματα των φραγμάτων που οδηγούν σε αστοχία με ακόλουθα παραδείγματα

Κατηγορίες ατυχημάτων φραγμάτων

- Κατηγορία 1: ατυχήματα σε ένα φράγμα το οποίο λειτουργεί για κάποιο διάστημα αλλά έχει τεθεί υπό έλεγχο και έχει προβλεφθεί εγκαίρως πριν αστοχήσει
- Κατηγορία 2: ατυχήματα στο φράγμα που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια του πρώτου γεμίσματος του ταμιευτήρα τα οποία έχουν προβλεφθεί εγκαίρως πριν οδηγήσουν σε αστοχίες λόγω της λήψης άμεσων μέτρων
- Κατηγορία 3: ατυχήματα τα οποία παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Τέτοιες περιπτώσεις αφορούν καθιζήσεις των θεμελίων, τα οποία έχουν παρατηρηθεί πριν το νερό τεθεί υπό έλεγχο. Ο τρόπος για να αντιμετωπιστούν είναι λαμβάνοντας εγκαίρως μέτρα προστασίας για να γεμίσει ο ταμιευτήρας με ασφάλεια

Αστοχία είναι η κατάρρευση ή η μετακίνηση μέρους του φράγματος ή των θεμελίων του με αποτέλεσμα να μην μπορεί να συγκρατήσει το νερό. Αποτέλεσμα των αστοχιών είναι η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές με κίνδυνο καταστροφής μεγάλων εκτάσεων που βρίσκονται στα κατάντη του φράγματος.

Διαρροή

Τα περατά εδάφη είναι ο κύριος παράγοντας διαρροής των χωμάτινων φραγμάτων κυρίως για μικρά φράγματα που κατασκευάζονται χωρίς φίλτρα στράγγισης (Sherard et al. 1976a,b,1985). Οι αστοχίες που συμβαίνουν σε αυτήν την κατηγορία φραγμάτων είναι λογικά προβλεπόμενες. Οι κύριοι παράγοντες που συντελούν σε τέτοιου είδους αστοχίες είναι:

- Η παρουσία των περατών εδαφών στα πρηνή του φράγματος (σε περίπτωση χωμάτινων φραγμάτων) ή στα θεμέλιά του
- Η κακή συμπίκνωση του εδάφους, χαμηλή του πυκνότητα και η μέγιστη στράγγισή του σε περιεκτικότητα του νερού
- Κακή συμπίκνωση του εδάφους γύρω από τους σωλήνες που διέρχονται μέσα από το πρηνές του φράγματος
- Η ύπαρξη κενών στο έδαφος από τις ρίζες των φυτών, ρωγμών στο πρηνές του φράγματος ή στα θεμέλιά του χωρίς επαρκή έλεγχο για τον περιορισμό της διάβρωσής του

- Η μη επαρκής αφαίρεση εδαφικού υλικού όπου επρόκειται να θεμελιωθεί το φράγμα
- Η δημιουργία ρωγμών εξαιτίας των διαφορετικών καθιζήσεων σε διάφορα σημεία του φράγματος
- Η γρήγορη πλήρωση του ταμιευτήρα με νερό δίνοντας μη επαρκή χρόνο για τις ρωγμές στα πρανή του φράγματος και στο έδαφος πάνω στο οποίο εδράζεται για να επουλωθεί από το διογκούμενο έδαφος.

Οι αστοχίες που πολλές φορές οδηγούν σε διαρροή οφείλονται στην ορυκτολογική σύσταση του υλικού του εδάφους από το οποίο κατασκευάζεται το φράγμα. Τα περατά εδάφη είναι αυτά που από την φύση της ορυκτολογίας τους και τις χημικές ουσίες τις οποίες περιέχει το νερό στο έδαφος τα καθιστά επιρρεπή στο διαχωρισμό των σωματιδίων της αργίλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διάβρωση των συγκεκριμένων εδαφών κάτω από την επιφανειακή ροή. Αυτά είναι τα χαρακτηριστικά των διαβρωμένων εδαφών όπως είναι η ιλύς και η άμμος τα οποία διαβρώνονται κάτω υπό φυσικές διεργασίες που επιφέρει το νερό όταν διέρχεται μέσα στο έδαφος. Η παρουσία των διαλυτών εδαφών στο υλικό που χρησιμοποιείται στο σώμα του φράγματος (σε περίπτωση που μιλάμε για χωμάτινα φράγματα) είτε στο υπόστρωμα (πάνω στο οποίο κατασκευάζεται) επιφέρει μεγάλους κινδύνους όσον αφορά την πρόκληση διαρροής. Η ορυκτολογική σύσταση της αργίλου που είναι το υλικό από το οποίο αποτελείται ο πυρήνας του χωμάτινου φράγματος αποτελείται από διατάξεις μορίων αλουμινίου ή μαγγανίου.

Η διαλυτότητα του εδάφους εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση του και από τη χημική περιεκτικότητα του νερού που βρίσκεται ανάμεσα στους εδαφικούς πόρους.

Οι μηχανικές ιδιότητες των εδαφών από άργιλο εξαρτώνται από σύνθετους παράγοντες (Mitchel 1976,1993), όπως:

- Από τα μεταλλικά στοιχεία που βρίσκονται στην άργιλο
- Από την ποσότητα του κάθε μεταλλικού στοιχείου
- Από την κατηγορία των απορροφημένων κατιόντων
- Από την περιεκτικότητά τους σε οργανικές ουσίες
- Από το σχήμα και το μέγεθος διανομής των μορίων της αργίλου
- Από την διάταξη του νερού που βρίσκεται μέσα στους πόρους

Όπως και από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως:

- Από την περιεκτικότητα του νερού
- Από την πυκνότητά τους
- Από την πίεση συγκράτησης των εδαφών
- Από την δομή του εδάφους

- Από την διαθεσιμότητα σε νερό
- Από την θερμοκρασία

Υπερχείλιση του ταμιευτήρα

Υπερχείλιση του νερού στον ταμιευτήρα συντελείται όταν ο όγκος του νερού στα ανάντη του φράγματος ξεπεράσει την χωρητικότητα του ταμιευτήρα ή το ύψος του φράγματος. Η υπερχειλίση οφείλεται σε ανεπαρκή σχεδιασμό του υπερχειλιστή, ο οποίος ξεχειλίζει κατά κύριο λόγο σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης με αποτέλεσμα η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα να αυξάνεται γρήγορα και χωρίς προειδοποίηση ειδικά μάλιστα όταν ο υπερχειλιστής είναι μικρός. Υπερχείλιση του ταμιευτήρα προκαλείται όταν συμβεί κατολίσθηση στην δεξαμενή ή στην περίπτωση που καταρρεύσει το φράγμα ανάντη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να τεθεί σε κίνδυνο η δομική ακαριαιότητα του φράγματος με διάβρωση έκτασης γης που βρίσκεται κατάντη. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε περιπτώσεις χωμάτων φραγμάτων.

Κατασκευαστικά λάθη

Μια άλλη περίπτωση προβλημάτων στα φράγματα που οδηγούν σε αστοχία είναι τα κατασκευαστικά λάθη. Αυτά παρουσιάζονται όταν δεν ενσωματώνονται βασικοί παράγοντες στον σχεδιασμό και στην κατασκευή τους. Για παράδειγμα οι αυξημένες καθιζήσεις, οι εσωτερικές διαβρώσεις και οι μεγάλες διαρροές, είναι αποτέλεσμα της ανεπαρκούς συμπύκνωσης των υλικών ή της χρήσης λανθασμένου τύπου υλικών κατά την κατασκευή του φράγματος.

Ανεπαρκής συντήρηση

Μια άλλη αιτία προβλημάτων στα φράγματα είναι η ελλιπής συντήρησή τους. Τα φράγματα χρειάζονται συντήρηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να υπάρξει εγγύηση για την ασφάλεια των ανθρώπων που ζούνε στην γύρω περιοχή και για το περιβάλλον τριγύρω. Για αυτό τον σκοπό απαιτούνται εξειδικευμένοι επαγγελματίες ώστε να πραγματοποιούνται τακτικές επιθεωρήσεις. Η απουσία τακτικών ελέγχων σε τέτοιου είδους κατασκευές είναι πιθανόν να οδηγήσει με την πάροδο του χρόνου σε εξασθένηση των φραγμάτων και σε επακόλουθη αστοχία της κατασκευής.

Προβλήματα στη θεμελίωση

Τα προβλήματα στη θεμελίωση προκύπτουν όταν το βάρος του φράγματος το οποίο ασκεί δύναμη πάνω στο υπόστρωμα όπου εδράζεται κατανέμεται άνισα ώστε να υπονομευτεί το θεμέλιο. Το αποτέλεσμα αυτού του προβλήματος είναι οι διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ των ζωνών του φράγματος (όταν μιλάμε για χωμάτινο φράγμα). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί σε φράγματα βαρύτητας εξαιτίας της διαφορετικής σύστασης του εδαφικού υλικού σε διάφορα σημεία του εδαφικού υποστρώματος όπου εδράζεται το φράγμα. Επίσης, αστάθειες ή κατολισθήσεις είναι πιθανόν να προκύψουν και σε περίπτωση που το φράγμα είναι κατασκευασμένο πάνω σε μια πλαγιά με κλίση και δεν είναι σωστά δομημένο. Προβλήματα στη

θεμελίωση μπορεί να προκληθούν από έναν σεισμό ο οποίος είναι ικανός να θέσει υπό κίνδυνο την κατασκευή. Η άνιση και ανεξέλεγκτη ανύψωση ή διήθηση των θεμελίων είναι πιθανόν να οδηγήσει την κατασκευή σε αστοχία.

Αστοχία πρανών

Αστοχίες των πρανών είναι πολύ πιθανόν να εμφανιστούν σε φράγματα. Προκαλείται όταν οι οριζόντιες δυνάμεις που επενεργούν στη βάση του φράγματος, ξεπεράσουν την αντίσταση τριβής που προκαλείται μεταξύ του σώματος του φράγματος και του θεμελίου του. Τέτοιου είδους αστοχίες οφείλονται στην κακή συμπύκνωση των υλικών στο φράγμα και σε πολύ λεπτόκοκκα υλικά τα οποία περιέχονται στην παραπάνω κατασκευή. Πιο σοβαρή είναι η αστοχία του κατάντη πρανούς σε σχέση με το ανάντη λόγω του ότι στα ανάντη υπάρχει το νερό του ταμιευτήρα το οποίο αντισταθμίζει την ολίσθησή του. Αστοχία πρανούς στα ανάντη προκύπτει σε περίπτωση που ο ταμιευτήρας είναι άδειος ή όταν η στάθμη του νερού είναι πολύ χαμηλή.

Εσωτερική διάβρωση

Η εσωτερική διάβρωση είναι πολύ επικίνδυνο για τα φράγματα. Η εσωτερική διάβρωση είναι ο σχηματισμός των κενών μέσα σε ένα έδαφος που προκλήθηκε από την απομάκρυνση υλικού λόγω διαρροής. Η εσωτερική διάβρωση συντελείται όταν οι υδραυλικές δυνάμεις που ασκούνται από το νερό το οποίο ρέει στους πόρους και στις ρωγμές του υλικού στο φράγμα ή στο θεμέλιο είναι ικανό να αποσπάσει και να μετακινήσει τα σωματίδια έξω από τη δομή του φράγματος. Η εσωτερική διάβρωση είναι πολύ επικίνδυνη διότι δεν εμφανίζει καθόλου ενδείξεις ότι συντελείται. Ένα φράγμα είναι ικανό να αστοχήσει λίγες ώρες μάλιστα μετά την εμφάνιση της εσωτερικής διάβρωσης, επειδή διαδίδεται πολύ γρήγορα.

Διασωλήνωση και διαρροή

Η διασωλήνωση και η διαρροή εμφανίζεται ως προοδευτική ανάπτυξη της εσωτερικής διάβρωσης με διαρροή και εμφανίζεται στα κατάντη του φράγματος ως τρύπα που εκχέει νερό. Αυτό οφείλεται στη διάβρωση που δημιουργείται στο φράγμα εξαιτίας της παρουσίας νερού. Τα πρανή του φράγματος και η θεμελίωσή του μπορεί να εξασθενίσουν, σε περίπτωση που περάσει το νερό και τα διαβρώσει προκαλώντας σοβαρά και ανεπανόρθωτα προβλήματα στο φράγμα. Η διασωλήνωση είναι πιθανόν να προέλθει και από τις τρύπες που ανοίγουν τα ζώα κατά μήκος των υδραυλικών κατασκευών και την δημιουργία διαρροών σε αγωγούς και σε ρωγμές. Τέτοιου είδους αστοχίες προκαλούνται κυρίως σε χωμάτινα φράγματα.

Από σεισμό

Προβλήματα στα φράγματα μπορεί να προκληθούν και από το σεισμό. Συγκεκριμένα ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού και τη σεισμικότητα της περιοχής όπου χωροθετείται το φράγμα είναι πιθανόν να προκληθούν σοβαρά προβλήματα στην κατασκευή. Ο σεισμός μπορεί να δημιουργήσει ρηγματώσεις, καθιζήσεις στο φράγμα

όσο και μετακινήσεις και ρευστοποιήσεις στα θεμέλια του φράγματος και οι οποίες αν δεν ληφθούν έγκαιρα υπόψιν είναι πιθανόν να υπάρξουν καταστροφικές συνέπειες. Επίσης, ο σεισμός μπορεί να προκαλέσει στο φράγμα σοβαρές ρηγματώσεις και αστοχία των πρανών του στα ανάντη και κατόντη.

2.5 Περιπτώσεις αστοχίας φραγμάτων

Φράγμα Malpasset (Γαλλία 1959)

Το φράγμα Malpasset ήταν ένα τοξωτό φράγμα από σκυρόδεμα στις Κάννες της νότιας Γαλλίας. Το 1952 ξεκίνησε να κατασκευάζεται και το 1954 ολοκληρώθηκε και ο σκόπος της κατασκευής του ήταν να εξυπηρετήσει ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής. Όσον αφορά του χαρακτηριστικά του φράγματος αυτό είχε ύψος 60 μέτρων, πλάτος 222 μέτρων και πάχος 6,78 μέτρων στην βάση του ενώ στην στέψη του έχει 1,5 μέτρα. Στις 2 Δεκεμβρίου του 1959 η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα είχε φτάσει στο μέγιστο ύψος ύστερα από αρκετές μέρες έντονων βροχοπτώσεων στην περιοχή. Ο υπεύθυνος μηχανικός για το φράγμα αποφάσισε το άνοιγμα του εκκενωτή του πυθμένα ώστε να αποφευχθεί η υπερχειλίση του ταμιευτήρα. Μετά το άνοιγμα του εκκενωτή πυθμένα το φράγμα αστόχησε ύστερα από 3 ώρες. Η αστοχία του προκλήθηκε από την εκτίναξη της βραχοσφήνας στο αριστερό αντέρεισμα, η οποία κατέστρεψε αμέσως το μισό φράγμα, ως αποτέλεσμα να απελευθερωθεί καταστροφικό πλημμυρικό κύμα με αποτέλεσμα τον θάνατο 421 ανθρώπων. Το νερό πλημμύρισε τις οδούς της πόλης και τις οδούς πρόσβασης.



Εικόνα 2.9 φράγμα Malpasset μετά την αστοχία

(Πηγή: <http://en.wikipedia.org>)



Εικόνα 2.10 Το φράγμα Malpasset πριν την αστοχία

(Πηγή: <http://damfailures.org>)

Πριν την κατασκευή του φράγματος δεν δόθηκε η απαιτούμενη σημασία όσον αφορά την μελέτη της γεωλογίας του υποστρώματος του φράγματος. Μετά την αστοχία πραγματοποιήθηκαν γεωλογικές έρευνες και έδειξαν ότι το φράγμα είχε κατασκευαστεί πάνω σε σχηματισμό γνευσίου, με σχιστότητα 30 έως 50 μοίρες. Επιπλέον, ανακαλύφθηκε στην περιοχή ότι υπάρχει ρήγμα το οποίο δεν είχε βρεθεί κατά την φάση της μελέτης στα κατόντη του άξονα, αυτό σε συνδυασμό με τις επιφάνειες σχιστότητας δημιούργησε δίεδρο (βραχοσφήνα), στη μάζα του γνευσίου στο αριστερό αντέρεισμα στον άξονα του φράγματος. Επιπλέον, η απουσία αποστραγγιστικών έργων κάτω από το φράγμα για την χαλάρωση των υπόγειων υδροστατικών πιέσεων, οδήγησε στην αύξησή τους, εξαιτίας της μικρής διαπερατότητας του γνευσίου. Επιπλέον η ζώνη του ρήματος περιείχε αργιλικό υλικό πλήρωσης. Η συμπίεση που προκλήθηκε λόγω του βάρους της κατασκευής και του ταμιευτήρα, εξαιτίας της συμπίεστικότητας του αργιλικού υλικού, προκάλεσε ρωγμές εφελκυσμού ανάντη του φράγματος. Με αυτό τον τρόπο προέκυψε άμεση υδραυλική σύνδεση του ταμιευτήρα με τον υπόγειο χώρο θεμελίωσης και αύξηση των υπόγειων υδροστατικών πιέσεων, εξαιτίας της μείωσης της υδατοπερατότητας κατόντη του έργου.

Φράγμα Teton (ΗΠΑ, 1978)

Πρόκειται για την περίπτωση χωμάτινου φράγματος το οποίο κατασκευάστηκε κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Teton, στο Idaho των ΗΠΑ. Το φράγμα εξυπηρετούσε πολλαπλές χρήσεις, όπως άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία και παροχή ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής. Η μέγιστη χωριτικότητα του ταμιευτήρα 356000000 κυβικά μέτρα. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1972 και ολοκληρώθηκε το 1976.

Το φράγμα αστόχησε στις 5 Ιουνίου του 1976. Στις 7:30 π.μ. εκείνης της ημέρας εμφανίστηκε μια λασπώδης διαρροή που δημιουργήθηκε στα κατάντη του φράγματος. Μέχρι τις 9:30 π.μ. στο κατάντη πρηνές του φράγματος είχε αναπτυχθεί ένα υγρό σημείο, που άρχισε να εκκενώνει το νερό στα 20 έως 30 κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο και το υλικό του σώματος του φράγματος άρχισε να διαβρώνεται. Έτσι, στάλθηκαν εκεί πληρώματα με μπουλντόζες για να συνδέσουν την διαρροή. Τα πληρώματα υποχρεώθηκαν να φύγουν αφήνοντας τον εξοπλισμό τους, επειδή η διαρροή είχε διευρυνθεί και δεν μπορούσε να αποκατασταθεί. Στις 11:15 π.μ., αποφασίστηκε να εκκενωθεί η γύρω περιοχή, λίγο μετά στις 11:55 π.μ. η κορυφή του φράγματος κατέρρευσε στην δεξαμενή. Δύο λεπτά αργότερα το υπόλοιπο του δεξιού αναχώματος του σώματος του φράγματος αποδιοργανώθηκε. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πάνω από 2000000 κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο ύδατος γεμάτο ίζημα να εκκενωθεί μέσω της διαρροής. Μέχρι τις 8:μ.μ., η δεξαμενή είχε αδειάσει, αν και εκτός της διαρροής που είχε ανοίξει στο σώμα του φράγματος, το υπόλοιπο φράγμα παρέμενε στάσιμο. Η αστοχία του παραπάνω φράγματος είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 11 ανθρώπων, ενώ προκλήθηκαν τεράστιες ζημιές στο περιβάλλον και στην κινητή και ακίνητη περιουσία των κατοίκων της περιοχής.

Από εκτεταμένες έρευνες που εκτελέστηκαν μετά την αστοχία του φράγματος διαπιστώθηκε ότι το βασικότερο αίτιο της αστοχίας του ήταν η προοδευτική διάβρωση του υλικού του πυρήνα και των τάφρων του φράγματος. Η προοδευτική διάβρωση ήρθε ως αποτέλεσμα γεωλογικών παραγόντων όσο και σχεδιαστικών αποφάσεων. Οι γεωλογικοί παράγοντες που οδήγησαν στην προοδευτική διάβρωση με αποτέλεσμα να αστοχήσει το φράγμα σχετίστηκαν με το είδος των σχηματισμών και οι πολλαπλές ανοιχτές ασυνέχειες στην βραχομάζα των αντερεισμάτων, και η μη διαθεσιμότητα καταλληλότερου υλικού για την κατασκευή του αδιαπέρατου πυρήνα του φράγματος. Όσον αφορά τις σχεδιαστικές αποφάσεις αυτές αφορούσαν την κακή σχεδίαση των διαφραγματικών τάφρων, καθώς και την απουσία μέτρων εκτόνωσης πιθανών διαρροών και αποτελεσματικής στεγανοποίησης των ασυνεχειών.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης η οποία οδήγησε τελικά στην αστοχία του χωμάτινου φράγματος.



Εικόνα 2.11 Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



Εικόνα 2.12 Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



Εικόνα 2.13 Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



Εικόνα 2.14 Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

3.ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΙΣΧΝΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ RCC

3.1 Ιστορία φραγμάτων RCC

Τα φράγματα βαρύτητας ονομάζονται τα φράγματα τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο το βάρος τους ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθειά τους. Το βάρος τους αντισταθμίζει τις ανατρεπτικές ροπές των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα του φράγματος οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έργου. Το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή των φραγμάτων βαρύτητας είναι το συμβατικό σκυρόδεμα. Το συμβατικό σκυρόδεμα αποτελείται από μείγμα αδρανών, νερού, ποζολάνων και τσιμέντου με το τελευταίο σε περιεκτικότητα 250kg/m^3 του σκυροδέματος. (Δημοπούλου, 2008).

Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο με την ανάπτυξη των χωματουργικών μηχανημάτων άρχισε να αναδεικνύεται ο ρόλος των χωμάτινων φραγμάτων και να υποβαθμίζεται ο ρόλος των φραγμάτων βαρύτητας. Τα χωμάτινα φράγματα μπορούσαν να κατασκευαστούν σε μεγάλες κοιλάδες και με υλικά τα οποία προέρχονταν από τη γύρω περιοχή. Το παραπάνω στοιχείο σε συνδυασμό με την εξέλιξη των χωματουργικών μηχανημάτων τα καθιστούσε πολύ πιο οικονομικά σε σύγκριση με τα φράγματα βαρύτητας αποτελώντας παράλληλα ένα συγκριτικό πλεονέκτημα. Η διεθνής κοινότητα κατασκευής φραγμάτων άρχισε να αναζητά έναν καινούργιο τύπο φραγμάτων συνδυάζοντας την αποδοτικότητα των χωμάτινων φραγμάτων με τα πλεονεκτήματα ασφαλείας των φραγμάτων βαρύτητας (Hansen and Reinhardt, 1991).

Στη συνέχεια, το 1950 οι ποσότητες τσιμέντου στο μίγμα του σκυροδέματος αντικαταστάθηκαν από την ιπτάμενη τέφρα. Η ιπτάμενη τέφρα (ή ποζολάνη) συμπεριφέρεται ως συνδετικό υλικό με την διαφορά ότι οι ίδιες αντοχές σε σύγκριση με το συμβατικό τύπο σκυροδέματος επιτυγχάνονται σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

Ένας προγενέστερος τύπος φράγματος ισχνού κυλινδρούμενο σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε ως υπόφραγμα στο χωμάτινο φράγμα Shihmen στην Ταϊβάν το 1960. Το φράγμα βαρύτητας Alpe Gera στην Ιταλία το 1964 κατασκευάστηκε σε λεπτές οριζόντιες στρώσεις σκυροδέματος χωρίς την χρήση δονητικού κυλίνδρου συμπύκνωσης. Οι δονητικοί κύλινδροι συμπύκνωσης χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για να συμπυκνώσουν το εδαφοτσιμέντο σε στρώσεις σε φράγμα στο Τέξας το 1971. Επιπλέον υψηλοί ρυθμοί παραγωγής για την τοποθέτηση ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος πραγματοποιήθηκαν για την επισκευή σηράγγων στο φράγμα Ταρμπέλα στο Πακιστάν το 1975. (Chao and Johnson, 1979)

Το Σώμα Μηχανικού του Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής ανέπτυξε έναν τύπο σφιχτού σκυροδέματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του φράγματος Willow Creek στην Όρεγκον το 1982 (USACE 1984). Ωστόσο, βρετανοί μηχανικοί ανέπτυξαν ένα τύπο συμβατικού σκυροδέματος με τροποποιημένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που προσαρμοζόντουσαν στην κατασκευή του χωμάτινου φράγματος (Dustan, 1978). Εκτεταμένες εργαστηριακές έρευνες στην

Αγγλία είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία και την παραγωγή σκυροδέματος με μικρή περιεκτικότητα τσιμέντου και υψηλή περιεκτικότητα ποζολάνης. Αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του φράγματος Upper Stillwater στη Utah το 1983. Οι Ιάπωνες μηχανικοί δημιούργησαν ένα παρόμοιο δείγμα σκυροδέματος συμπτυκνωμένο με την χρήση δονητικού κυλίνδρου ώστε να αποκτήσει τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά με αυτά του συμβατικού σκυροδέματος. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κύριου σώματος του φράγματος Shimajigawa στην Ιαπωνία το οποίο άρχισε να κατασκευάζεται από το 1978 για να ολοκληρωθεί το 1980.

Άλλα αξιοσημείωτα παραδείγματα για την ανάπτυξη του RCC είναι στο φράγμα Winchester στο Kentucky το 1984 όπου πλάκα σκυροδέματος με μεμβράνη πολυβινυλοχλωριδίου τοποθετήθηκε στο ανάντη πρανές του ώστε να προστατεύεται από την διάβρωση. Επιπλέον το φράγμα Kerrville Ponding στο Τέξας το 1985 κατασκευάστηκε με παρόμοιο τρόπο χρησιμοποιώντας υλικό ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος. (Hasen and reinhardt 1991)

Το 1974, παρά την τάση που κυριαρχεί για την κατασκευή χωμάτινων φραγμάτων, κατασκευάζεται το φράγμα Forebay (Η.Π.Α.) ως φράγμα βαρύτητας. Για την κατασκευή αυτού του φράγματος χρησιμοποιήθηκαν δύο ξεχωριστοί τύποι σκυροδέματος για το ίδιο έργο. Συγκεκριμένα το εσωτερικό του σώματος κατασκευάστηκε με ένα πιο ισχνό του συνηθισμένου συμβατικού σκυροδέματος μίγμα, ενώ για την εξωτερική επιφάνειά του χρησιμοποιήθηκε συμβατικό σκυρόδεμα,

ώστε να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της κατασκευής. Στο σκυρόδεμα συμπεριλήφθηκε και η ιπτάμενη τέφρα ώστε να αντικατασταθεί η ποσότητα του τσιμέντου ως συνδετικού υλικού στο σκυρόδεμα καθώς και αερακτικά, ενώ



Εικόνα 3.1 Φράγμα Forebay: διαμόρφωση μονολίθων

πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι θερμοκρασίας στα αδρανή του σκυροδέματος. Αξιοσημείωτη είναι και η εφαρμογή της κατασκευής κλειδών μεταξύ των μονολίθων του φράγματος, προκειμένου να διασφαλιστεί η ελεγχόμενη εκτόνωση των τάσεων μεταξύ των μονολίθων σε περίπτωση μη ομοιόμορφης καταπόνησης της κατασκευής.

Στις δεκαετίες του 1970 και του 1980 στον τομέα της κατασκευής των φραγμάτων κυριάρχησε η ιδέα του συνδυασμού της τεχνολογίας των φραγμάτων βαρύτητας και των χωμάτινων φραγμάτων με σκοπό την βελτίωσή τους. Έτσι αναπτύχθηκε με αυτόν τον τρόπο η ιδέα παραγωγής ενός διαφορετικού τύπου σκυροδέματος, συνδυάζοντας όλα τα θετικά χαρακτηριστικά του συμβατικού υλικού με τον εύκολο και γρήγορο χειρισμό τους με τις μεθόδους των χωμάτινων φραγμάτων, με αυτόν τρόπο δημιουργήθηκε το ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα RCC. Ο τρόπος εφαρμογής του RCC σε στρώσεις, ίσως να επιφέρει μείωση της διατμητικής αντοχής μεταξύ των στρώσεων (Δημοπούλου 2008). Για τεράστιες RCC κατασκευές είναι εφικτό να χρησιμοποιούν δύο διαφορετικές κατηγορίες ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος. Στην πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται περισσότερη ποσότητα τσιμέντου στις εξωτερικές επιφάνειες για περισσότερη ανθεκτικότητα και αντίσταση τριβής. Στην δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιείται λιγότερη ποσότητα τσιμέντου στο εσωτερικό της κατασκευής όπου οι δυνάμεις είναι πιο μικρές και οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας είναι εξίσου μικρότερες σε σχέση με το εξωτερικό μέρος της κατασκευής. Επιπλέον, μια ζώνη συμβατικού σκυροδέματος ίσως χρησιμοποιηθεί

στην ανώτερη στρώση του ανάντη πρανούς για αυξηθεί η ανθεκτικότητά έναντι υδροστατικών πιέσεων. Για αισθητικούς λόγους είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί πλάκα σκυροδέματος στα ανάντη και στα κατάντη της κατασκευής. Ο βαθμός κατασκευής του φράγματος RCC επηρεάζεται από τον τύπο και το μέγεθος της κατασκευής όσο και από την επιλογή του εξοπλισμού, των μηχανημάτων ανάμειξης και μεταφοράς του υλικού.

3.2 Χαρακτηριστικά-ιδιότητες φραγμάτων RCC

Τα φράγματα RCC έχουν κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες συγκριτικά με τα συνηθισμένα φράγματα βαρύτητας και με τα χωμάτινα φράγματα όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής τους, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τους και τις μηχανικές ιδιότητές τους.

3.2.1 Υλικά μείγματος RCC

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του συμβατικού σκυροδέματος και περιλαμβάνουν το νερό, τα αδρανή (λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα), το τσιμέντο και η ποζολάνη. Όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του RCC υλικού πρέπει να τηρούν κάποιες προδιαγραφές όσον αφορά την περιεκτικότητα και τις απαιτήσεις πριν ξεκινήσει η κατασκευή.

3.2.1.1 Νερό

Το νερό που χρησιμοποιείται στα συστατικά για την παραγωγή του ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος θα πρέπει να είναι καθαρό απαλλαγμένο από λάσπη, οργανικές ουσίες, άλατα και άλλες προσμίξεις. Οι προδιαγραφές περιορίζουν την διαλυτότητα θεικών ενώσεων στα 3000 κομμάτια ανά εκατομμύριο. Το νερό πλυσίματος είναι επίσης ακατάλληλο για το μίγμα. Ο πάγος ο οποίος χρησιμοποιείται στο μίγμα για να μειώσει την θερμοκρασία του RCC πρέπει να τηρεί τις προαναφερθείσες απαιτήσεις με το νερό.

3.2.1.2. Συστατικά του τσιμέντου

Τα τσιμεντοειδή υλικά περιλαμβάνουν το τσιμέντο και την ποζολάνη και πρέπει να τηρούν τις απαιτήσεις όσον αφορά την ποιότητά τους σύμφωνα με το κανονισμό ASTM (American Society for Testing Material). Τακτικά δείγματα πρέπει να λαμβάνονται τακτικά κατά την διάρκεια της κατασκευής για έλεγχο όσον αφορά τις φυσικές και χημικές απαιτήσεις όπως ορίζονται από το ASTM C 150 (τσιμέντο πόρτλαντ) και το C 618 (ποζολάνη). (ASTM, 2015)

3.2.1.2.1 Τσιμέντο

Συγκεκριμένες απαιτήσεις ίσως καθορίσουν την επιλογή του κατάλληλου τσιμέντου για το RCC. Η παραπάνω επιλογή σχετίζεται με τον τύπο του τσιμέντου, τα επιτρεπτά όρια της θερμότητας ενυδάτωσης, την περιεκτικότητα αλκαλίου και την ηλικία σχεδιασμού του σκυροδέματος. Το τσιμέντο θα πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM C 150 (ASTM, 2015). Παρακάτω αναφέρονται οι κατηγορίες τσιμέντου με βάση τις φυσικές απαιτήσεις και τις χημικές ιδιότητές τους:

- Κατηγορία 1: το τσιμέντο αποκτά θλιπτική αντοχή σε ικανοποιητικό χρόνο και χημική αντίσταση, δεν χρησιμοποιείται συχνά εξαιτίας της ανεπαρκούς αντίστασής του σε θειικό περιβάλλον
- Κατηγορία 2: το τσιμέντο αποκτά αντοχή σε θλίψη σε μέτριο χρόνο και αντίσταση σε θειικό περιβάλλον (χρησιμοποιείται πιο συχνά συγκριτικά με τους άλλους τύπους τσιμέντου)
- Κατηγορία 3: το τσιμέντο αποκτά γρήγορη αντοχή και χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές. Δεν χρησιμοποιείται συχνά σε κατασκευές από σκυρόδεμα εξαιτίας της μη επαρκούς αντίστασης σε θειικό περιβάλλον και την υψηλή εκλυόμενη θερμότητα ενυδάτωσής του.
- Κατηγορία 4: το τσιμέντο αποκτά αργή αντοχή και απελευθερώνει χαμηλή θερμότητα κατά την ενυδάτωσή του. Δεν χρησιμοποιείται συχνά εξαιτίας της έλλειψης διαθεσιμότητάς του και λόγω της αυξημένης χρήσης του τσιμέντου κατηγορίας 2 μαζί με την ποζολάνη
- Κατηγορία 5: το τσιμέντο αποκτά αντοχή σε μέτριο χρόνο και μεγάλη αντίσταση σε θειικό περιβάλλον (χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις)

Η κατηγορία 2 του τσιμέντου χρησιμοποιείται πιο συχνά εξαιτίας της ικανοποιητικής αντίστασης σε θειικό περιβάλλον και την χαμηλή έκλυση θερμότητας κατά την ενυδάτωσή του.

3.2.1.2.2 Ποζολάνη

Η ποζολάνη πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις με βάση τον κανονισμό ASTM C618 και κατηγοριοποιείται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- Τάξη N: αυτή η κατηγορία ποζολάνης σχετίζεται με την μείωση της αντοχής του RCC στο φράγμα (Dolen 2003)
- Τάξη F: ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από τον καιγόμενο ανθρακίτη και τον ασφαλώδη άνθρακα. Η ιπτάμενη τέφρα περιέχει χαμηλή περιεκτικότητα ασβεστίου ιπτάμενης τέφρας
- Τάξη C: ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από τον καιγόμενο λιγνίτη ή τον υποσφαλώδη άνθρακα. Η ιπτάμενη τέφρα αυτής της κατηγορίας περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίου ιπτάμενης τέφρας

Οι περισσότερες κατασκευές από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC) στις Ηνωμένες πολιτείες χρησιμοποιούν την κατηγορία F ιπτάμενης τέφρας επειδή

μειώνει σημαντικά το κόστος των τσιμεντοειδών υλικών αυξάνοντας την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Επιπλέον μειώνει την έκλυση θερμότητας και παρουσιάζει ικανοποιητική αντίσταση σε θειικό περιβάλλον και αλκαλό-πυριτική αντίσταση. Πολλά μείγματα RCC περιέχουν την ίδια ποσότητα σε τσιμέντο και σε ποζολάνη. Η ποζολάνη θεωρείται τσιμεντοειδές υλικό και επηρεάζει την ποιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος. Επιπλέον η αντιδραστικότητά της επηρεάζει μακροπρόθεσμα την αντοχή των μειγμάτων RCC. (Dolen 2003).

3.2.1.3 Αδρανή

Οι ιδιότητες των αδρανών στο μίγμα παίζουν σημαντικό ρόλο στην συνολική συμπεριφορά του υλικού. Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην κοκκομετρική διαβάθμιση η οποία σχετίζεται με τη μέγιστη διάσταση των κόκκων που δεν ξεπερνά τα 60mm. Η διαβάθμιση των αδρανών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς η αύξηση των χονδρόκοκκων υλικών του μίγματος δυσχεραίνει την επεξεργασία και την εφαρμογή του. Επίσης, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί διαφόρων δοκιμών καταλληλότητας του πετρώματος. Οι δοκιμές υγείας, Los Angeles, η πετρογραφική εξέταση ώστε να αποκλειστεί η αλκαλοπυριτική αντίδραση με το τσιμέντο, η ανοχή του μητρικού πετρώματος σε θραύση αποτελούν απαραίτητες διαδικασίες ώστε να προσδιοριστεί η τελική σύνθεση του μίγματος. Η ποιότητα του ισχνού κυλινδρούμενου μίγματος καθορίζεται κυρίως από την ποιότητα των αδρανών που υπάρχουν μέσα σε αυτό. Τα αδρανή συνήθως εξορύσσονται στην περιοχή θεμελίωσης του έργου σε άφθονη ποσότητα εφόσον η ποιότητά τους κριθεί ικανοποιητική με βάση τους κατάλληλους ελέγχους που πραγματοποιούνται. Σε περίπτωση που η αντοχή των αδρανών είναι στο κατώτατο όριο αντοχής χρειάζεται συμπλήρωση αυτών με ποσότητες ασβεστολιθικών αδρανών από κάποιο λατομείο. Επίσης συμπλήρωση ποσοτήτων διατιθέμενων πετρωμάτων ίσως να χρειαστούν λόγω της μεγάλης αντοχής των αδρανών πράγμα το οποίο δυσχεραίνει την κατεργασία του προκαλώντας ζημιές στον εξοπλισμό. Επίσης παρά τους γενικούς περιορισμούς, οι καμπύλες της κοκκομετρικής διαβάθμισης έχουν την δυνατότητα απόκλισης και ποσοστό λεπτόκοκκου στο μίγμα μέχρι και 30%. Έτσι αναγκαία για την σωστή διαδικασία κατασκευής είναι η εγκατάσταση μονάδας παραγωγής σκυροδέματος με βάση τους τύπους των εργοταξίων για το συμβατικό σκυρόδεμα.

3.2.1.4 Μείγματα

Τα μείγματα RCC έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τα χημικά μείγματα μείωσης νερού και τα μείγματα με προσμείξεις αέρα:

- Τα χημικά μείγματα μείωσης νερού χρησιμοποιούνται σε υψηλές δοσολογίες με μεγάλη περιεκτικότητα λάσπης, σωματιδίων αργίλου στα αδρανή. Τα χημικά μείγματα μείωσης νερού αυξάνουν την εργασιμότητα του RCC για δεδομένη περιεκτικότητα νερού και ποζολάνης. Η δοσολογία του παραπάνω μίγματος εξαρτάται από από την αναλογία τσιμέντου-ποζολάνης, την εργασιμότητα του μίγματος και την διαβάθμιση των αδρανών. Τα μείγματα αυτά με υψηλή περιεκτικότητα ποζολάνης ίσως παρουσιάσουν παρατεταμένη καθυστέρηση (έως και 36 ώρες) όσον αφορά την απόκτηση εργασιμότητας σε συνδυασμό της χαμηλής θερμοκρασίας σκυροδέματος.
- Τα μείγματα με αερακτικά πρόσθετα αυξάνουν την αντίσταση του παγώματος του RCC. Στο φράγμα Santa cruz η χρήση αερακτικών μιγμάτων εμφανίστηκε να αυξάνει την ανθεκτικότητα του παγώματος του RCC περίπου 4 φορές συγκρινόμενο με μη αερακτικό μείγμα. Τα αερακτικά μείγματα μπορεί να αυξήσουν την εργασιμότητα του RCC για δεδομένη περιεκτικότητα νερού. Το μίγμα για να είναι αποτελεσματικό ώστε να χρησιμοποιηθεί στο μίγμα θα πρέπει να έχει χρόνο συνοχής Vebe 20 δευτερόλεπτα και να περιέχει μια καλή διαβαθμισμένη άμμο σκυροδέματος. Ο συνολικός περιεχόμενος αέρας για το RCC μπορεί να μειωθεί περίπου στο 1% σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα εξαιτίας της δίχως να επηρεάσει δυσμενώς την ανθεκτικότητα του μίγματος στο πάγωμα και την εργασιμότητά του.

3.2.2 Δείκτης εργασιμότητας

Ένας δείκτης εργασιμότητας του υλικού RCC είναι η συνοχή Vebe που καθορίζεται με βάση το ASTM C 1170 (Μέθοδος καθορισμού πυκνότητας ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος) (ASTM, 2015). Σε αυτό τον έλεγχο ένα δείγμα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος υπόκειται σε δόνηση κάτω από μια υπερφόρτωση μέχρις ότου συμπυκνωθεί πλήρως. Ο χρόνος που απαιτείται για να συμπυκνωθεί το δείγμα σχετίζεται με την εργασιμότητά του RCC και ονομάζεται χρόνος Vebe. Όσο πιο μικρός είναι χρόνος Vebe τόσο πιο εύκολα συμπυκνώνεται το μίγμα. Για τα περισσότερα δείγματα RCC ο παραπάνω χρόνος είναι μικρότερος από 30 δευτερόλεπτα, ενώ τα μείγματα RCC με χρόνο Vebe από 15 έως 20 δευτερόλεπτα παρουσιάζουν ικανοποιητική εργασιμότητα για τοποθέτηση στρώσεων 0,3 μέτρων.

3.2.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία τοποθέτησης του καινούργιου μίγματος RCC θα επηρεάσει την εργασιμότητά του, την σκληρότητα της επιφάνειας κάθε στρώσης του και την συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων.

3.2.4 Πυκνότητα

Η πυκνότητα και ο όγκος των κενών του παραγόμενου RCC επηρεάζουν την απόδοση του σκληρυμένου σκυροδέματος. Η πυκνότητα του RCC καθορίζεται από την πυκνότητα των επιμέρους υλικών του. Αν μια στρώση RCC δεν έχει πλήρως εδραιωθεί το ποσοστό των κενών ανάμεσα στις στρώσεις ίσως να φθάσει 5 με 10% με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρή συγκολλησιμότητα.

3.2.5 Θερμικές ιδιότητες

Οι θερμικές ιδιότητες του μίγματος RCC σχετίζονται με την περιεκτικότητά σε τσιμέντου και τις θερμικές ιδιότητες των αδρανών. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου περιέχεται στο μείγμα τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμότητα που απελευθερώνεται εξαιτίας της ενυδάτωσής του. Ενώ αν στο μείγμα περιέχεται μεγαλύτερη ποσότητα ποζολάνης σε σύγκριση με το τσιμέντο η θερμότητα που απελευθερώνεται στο μείγμα λόγω της ενυδάτωσής του είναι σημαντικά μικρότερη. Συνήθως στα φράγματα για το υλικό από το οποίο συντίθεται το μείγμα RCC περιέχει αναλογία τσιμέντου-ποζολάνης (C:P) σε (30:70) αντίστοιχα. Η κατηγορία της ποζολάνης που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η F.

3.2.6 Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα του ισχνού κυκλινδρούμενου σκυροδέματος είναι ίδια με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Το RCC έχει μικρότερη αντίσταση σε τήξη και πήξη σε σχέση με το συμβατικό σκυροδέμα, αλλά αυτό το μειονέκτημά του αναπληρώνεται από τον περιεχόμενο αέρα. Ο περιεχόμενος αέρας στο RCC αντισταθμίζει το παραπάνω μειονέκτημα του μίγματος αυξάνοντας την αντίστασή του σε συνθήκες τήξης και πήξης. Επιπλέον σημαντικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του RCC παίζει και η επιλογή της κατηγορίας τσιμέντου που χρησιμοποιείται όσο η χρήση της κατάλληλης ποζολάνης η οποία πρέπει να είναι ανθεκτική σε χημικές αντιδράσεις όπως είναι το θεικό περιβάλλον.

3.2.7 Συγκόλληση των επιμέρους στρώσεων

Οι επιφάνειες (χωρίσματα) μεταξύ των στρώσεων σκυροδέματος αποτελούν κανονικά το πιο αδύναμο σημείο στα φράγματα βαρύτητας. Τα φράγματα βαρύτητας από συμβατικό σκυρόδεμα όσο και από RCC πρέπει να αναπτύξουν υψηλή συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων ώστε να θεωρούνται ασφαλή υπό στατικές, υδροστατικές συνθήκες και υπό σεισμικές συνθήκες φόρτισης. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη διατμητικών δυνάμεων. Όταν οι στρώσεις από τις οποίες αποτελείται το σκυρόδεμα αναπτύξουν μεγάλη συγκολλησιμότητα σημαίνει ότι στο φράγμα αναπτύσσονται διατμητικές και εφελκυστικές δυνάμεις μεταξύ των στρώσεων ώστε να αντισταθμίζονται οι υδροστατικές πιέσεις και οι κατακόρυφες δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στο φράγμα και προκαλούνται από την παρουσία του νερού και των σεισμικών φορτίσεων. Η συνοχή που αναπτύσσεται μεταξύ των χωρισμάτων των επιμέρους στρώσεων και η τριβή ανάμεσα στην κατώτερη και ανώτερη στρώση αντισταθμίζουν τις όποιες οριζόντιες δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται στα χωρίσματα. Οι απαιτήσεις για ισχυρή συγκόλληση μεταξύ των στρώσεων από RCC επηρεάζεται από την συνολική περιεκτικότητα του μείγματος σε τσιμεντοειδή υλικά. Συγκεκριμένα η αναλογία του RCC w/cm (νερό/τσιμεντοειδή υλικά) και η περιεκτικότητά του σε τσιμεντοειδή υλικά (που είναι το τσιμέντο και η ποζολάνη) επηρεάζουν τις διατμητικές και εφελκυστικές δυνάμεις μεταξύ των στρώσεων όπως και το ποσοστό συγκόλλησης της επιφάνειας. Μείγματα με τσιμεντοειδή υλικά σε περιεκτικότητα λιγότερο από 120 kg/m^3 θα έχουν χαμηλή εφελκυστική και διατμητική αντοχή επειδή δεν υπάρχει επαρκής όγκος συγκόλλησης στο μείγμα ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη συνοχή. Μείγματα με τσιμεντοειδή υλικά με περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 180 kg/m^3 θα έχουν εφελκυστική και διατμητική αντοχή παρόμοια με αυτή του συνιθισμένου σκυροδέματος. Μείγματα με περιεκτικότητα τσιμεντοειδών υλικών από 120 μέχρι 180 kg/m^3 ίσως να παρουσιάζουν ικανοποιητική συγκόλληση μεταξύ των στρώσεων, αυτό εξαρτάται από την συνοχή του μείγματος και από τις ατμοσφαιρικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν τα προηγούμενα χρόνια σε φράγματα τύπου RCC προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ικανοποιητική συγκόλληση που χρειάζεται ώστε να επιτευχθεί μεταξύ των στρώσεων σκυροδέματος εξαρτάται από:

- Τον κατάλληλο όγκο και την εργασιμότητα του μείγματος RCC
- Τον έλεγχο του διαχωρισμού των υλικών κατά την διάρκεια της τοποθέτησής του
- Την επαρκή συμπύκνωση του μείγματος με τη βοήθεια δονητικών κυλίνδρων
- Την προετοιμασία της επιφάνειας ώστε να τοποθετηθεί η επόμενη στρώση σκυροδέματος
- Την τοποθέτηση συγκολλητικού επιπέδου από κονίαμα μεταξύ των στρώσεων RCC

- Τον χρόνο τοποθέτησης του RCC ύστερα από την Παρασκευή του μείγματος

Επίσης αποδείχθηκε ότι μείγματα με περιεκτικότητα σε τσιμεντοειδή υλικά (τσιμέντο και ποζολάνη) 180 kg/m^3 είχαν 90% περισσότερη συγκόλιση σε σχέση με άλλα (με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμεντοειδή υλικά) όταν ο χρόνος τοποθέτησης κάθε στρώσης ήταν λιγότερο από 8 ώρες.

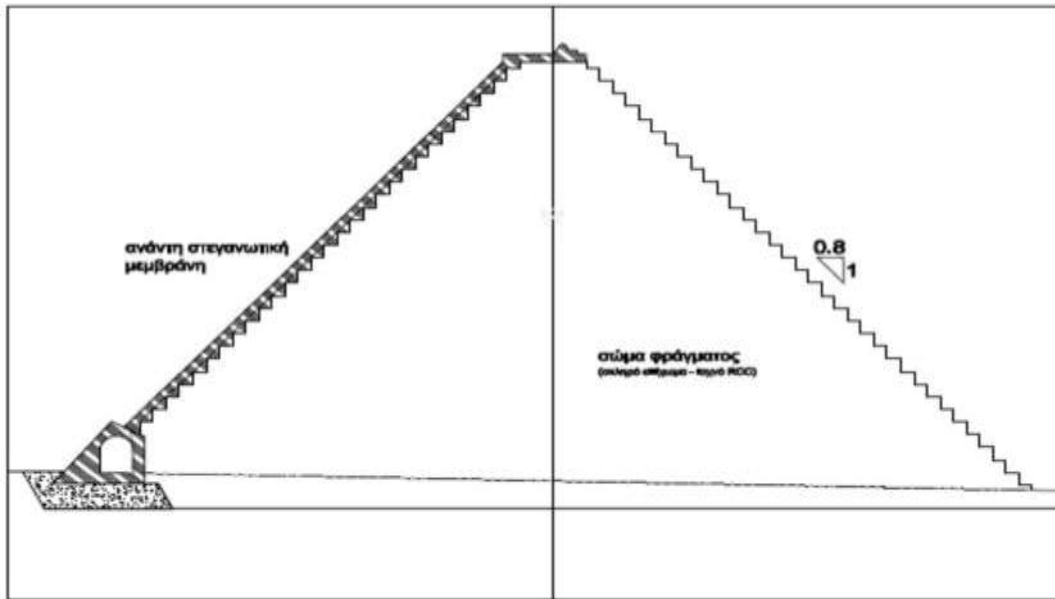
3.3 Σχεδιασμός φραγμάτων RCC

Το σώμα ενός φράγματος από σκληρό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα κατασκευάζεται από μείγμα αδρανών, νερού και τσιμέντου με κατάλληλες αναλογίες. Το παραπάνω σκυρόδεμα ανάλογα με τις αναλογίες κατηγοριοποιείται σε διάφορες κατηγορίες. Με βάση την ξένη βιβλιογραφία συναντάμε κατά κύριο λόγο τρεις τύπους σκυροδέματος οι οποίες σχετίζονται με παραλλαγές στη σύνθεση του μείγματος, το εδαφο-τσιμέντο (soil-cement), το cement soil and gravel, το ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (lean Roller Compacted Concrete) και το υπέρισχνο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (super lean RCC).

Το εδαφο-τσιμέντο (soil-cement) χρησιμοποιείται κυρίως για την προστασία των πρανών και για προσωρινές αντιστηρίξεις κι εμφράξεις της κοίτης. Η μεγαλύτερη διάσταση κόκκου δεν είναι μεγαλύτερη από 4,75mm και απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες τσιμέντου στο μείγμα και χρησιμοποιείται για την κατασκευή μικρού ύψους αναχώματα συγκράτησης νερών σε αντιπλημμυρικά έργα.

Ο τύπος του σκυροδέματος cement soil and gravel (CSG) το οποίο σχετίζεται με ανάμιξη προϊόντων εκσκαφών ύστερα από ελάχιστη επεξεργασία με περιεκτικότητα σε νερό $105-135 \text{ kg/m}^3$ και τσιμέντου γύρω στα 80 kg/m^3 . Τα αδρανή του λαμβάνονται από την περιοχή όπου κατασκευάζεται το έργο και η κοκκομετρική τους διαβάθμιση δεν εξετάζεται με πολύ προσοχή όπως σε άλλες κατηγορίες δομικών υλικών, που λαμβάνουν τον όρο σκυρόδεμα, όσον αφορά τον χαρακτηρισμό τους

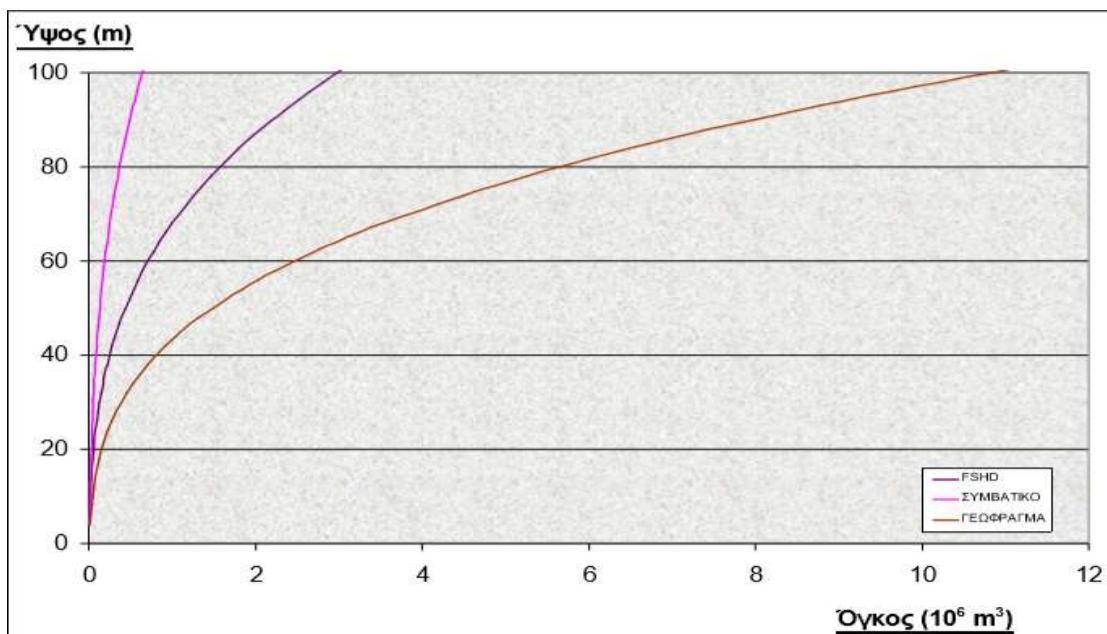
Το ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα κατασκευάζεται από υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω για το εδαφικό τσιμέντο με κάποιες συγκεκριμένες τροποποιήσεις. Το μείγμα του ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος αποτελείται από διαβαθμισμένα αδρανή με διάμετρο των κόκκων τους να κυμαίνεται από 60-75mm, από νερό με περιεκτικότητα $130-150 \text{ kg/m}^3$ και περιεκτικότητα σε τσιμέντο $50-80 \text{ kg/m}^3$, σε συνδυασμό από χρήση ιπτάμενης τέφρα με ποζολανικές ιδιότητες. Άρα συνολικά τα τσιμεντοειδή υλικά είναι περίπου 100 kg/m^3 . Οι παρειές του σώματος του φράγματος μπορούν να μορφωθούν με κλίσεις της τάξης του 0,7-0,8 (O:K).



Εικόνα 3.2 Τυπική διατομή φράγματος Α.Κ.Σ.Ε. στη θέση του υπερχειλιστή

Το μείγμα super-lean RCC, είναι παραλλαγή της εκεί διαδεδομένης τεχνολογίας του RCD-αντίστοιχης του RCC, με την διαφορά όμως της διάστρωσης παχύτερων στρώσεων ναπού μείγματος, της τάξης των 750-1000mm έναντι των 300mm του RCC.

Η επιλογή του αξονοσυμμετρικού φράγματος πραγματοποιήθηκε για λειτουργικούς και οικονομικούς λόγους, παρακάτω παρουσιάζεται μια ενδεικτική σύγκριση του όγκου των τριών συνηθέστερων τύπων φραγμάτων.



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα σύγκρισης όγκου φράγματος για κάθε τύπο συναρτήση του ύψους του

(Πηγή: Δημοπούλου 2008)

Εδώ βλέπουμε ότι για τα ύψη της τάξης των 40 m το πολύ, οι όγκοι συμβατικού φράγματος βαρύτητας και του Α.Κ.Σ.Ε. δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά. Το γεώφραγμα χρειάζεται πολύ μεγαλύτερο όγκο κατάληψης. (Αικατερίνη Α. Δημοπούλου, 2008)

Η ποιότητα της παραγωγής και τοποθέτησης του RCC σχετίζεται απευθείας με τον εξοπλισμό και την εξειδίκευση του κατασκευαστικού προσωπικού και με την ποιότητα ελέγχου, όσο και από τα μέτρα ασφάλειας.

3.3.1 Παραγωγή αδρανών

Οι προδιαγραφές που απαιτούνται για τα αδρανή πρέπει να παρέχουν μια λίστα από ελέγχους δοκιμών τοπικών πηγών όπου τα δείγματα των υλικών συναντούν τις προδιαγραφές για αμμώδη και χονδρόκοκκα αδρανή. Οι περιοχές από τις οποίες λαμβάνονται τα αδρανή που χρειαζόμαστε μπορεί να είναι ιδιωτικές ή δημόσιες εκτάσεις ακόμα και εμπορικές. Οι προδιαγραφές για την παραγωγή των αδρανών απαιτούν ελάχιστο όγκο άμμου και χονδρόκοκκων αδρανών να είναι διαθέσιμες για χρήση πριν την δημιουργία μείγματος RCC. Σε περίπτωση που ο ζεστός καιρός αναμένεται να προκαλέσει στο RCC μεγαλύτερη θερμοκρασία από την μέγιστη προαπαιτούμενη στην περιοχή τοποθέτησής του, ίσως να χρειαστεί να ψυχραθούν με εφαρμογή κάποιων τεχνικών.

3.3.2 Μεταφορά και διανομή του υλικού

Το RCC θα πρέπει να διανέμεται όσο το δυνατόν πιο σωστά ώστε το μείγμα μας να εξαπλωθεί κατάλληλα στην περιοχή όπου πρόκειται να τοποθετηθεί. Το σύστημα διανομής του υλικού θα πρέπει να μεταφέρει και να τοποθετεί το υλικό γρήγορα και προσεκτικά. Το σύστημα διανομής πρέπει να παρέχει πρόσβαση σε όλα τα σημεία της κατασκευής μας. Το RCC συνήθως διανέμεται ανά δόσεις από φορηγά και για μεγαλύτερες ποσότητες από μεταφορείς, ακόμα είναι εφικτό για την μεταφορά του να χρησιμοποιηθούν μεταφορείς σε συνδυασμό φορηγών οχημάτων. Ωστόσο πιο συνηθισμένη μέθοδος για την μεταφορά είναι μέσω της χρήσης μεταφορέων διότι έχουν την ικανότητα συνεχούς διανομής του υλικού στο σημείο τοποθέτησής του. Τα σημεία μεταφοράς του υλικού στους μεταφορείς μπορεί να δημιουργήσουν συντρίμια ή προβλήματα στην ασφάλεια σε περίπτωση που δεν καθαρίζονται ή δεν διατηρούνται σε καλή κατάσταση. Επιπλέον τα σημεία μεταφοράς και διανομής πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η σπατάλη του σκυροδέματος.

Οι μέθοδοι διανομής του RCC θα πρέπει να ελαχιστοποιούν τον θρυμματισμό των αδρανών που περιέχει. Ο εξοπλισμός ο οποίος χρησιμοποιείται για να διανέμει το RCC θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί τον θρυμματισμό, να μην μειώνει την εργασιμότητα ή να ρυπαίνει την επιφάνεια μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων και να είναι ικανό να διανέμει το μείγμα στην τοποθεσία που θέλουμε μέσα σε 15 λεπτά από την στιγμή της παραγωγής του μείγματος. Το μείγμα μας αφού μεταφερθεί στην περιοχή που θέλουμε με την βοήθεια κατάλληλων μηχανημάτων διαδίδεται σε όλη

την επιφάνεια ανά στρώσεις. Μετά την διάδοση και την διαστρωμάτωσή του ή κάθε στρώση πρέπει να αποκτήσει πάχος 0,3m ύστερα και από την συμπύκνωσή του. Είναι σημαντικό η μεταφορά, η διάδοση και η συμπύκνωση κάθε στρώσης του RCC στο σημείο που θέλουμε να πραγματοποιείται μέσα στα 45 λεπτά ύστερα από την ανάμειξη του νερού στο μείγμα με τα τσιμεντοειδή υλικά (τσιμέντο και ποζολάνη). Ο παραπάνω χρόνος μπορεί να καθοριστεί πριν από την κατασκευή με βάση τον σχεδιασμό του μείγματος και την έκθεσή του στο περιβάλλον.

3.3.3 Συμπύκνωση

Η συμπύκνωση και η παγίωση του RCC είναι πολύ σημαντικό ώστε το μείγμα μας να αποκτήσει την απαιτούμενη αντοχή και πυκνότητα. Η ικανοποιητική συμπύκνωση του σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί με δονητικό κύλινδρο 10 τόνων από πέρασμα 6 με 8 φορές. Οι στρώσεις συνήθως συμπυκνώνονται σε πάχος 0,3m. Στρώσεις παχύτερες από 0,3m ίσως να μην αποκτήσουν επαρκή συμπύκνωση και πρέπει να αποφεύγονται. Ο εξοπλισμός της συμπύκνωσης και οι διαδικασίες θα πρέπει να δοκιμάζονται και να ελέγχονται πριν την τοποθέτηση του μείγματος. Οι στρώσεις πρέπει να έχουν ικανοποιητικό πάχος ώστε να συμπυκνωθούν επαρκώς.

Το RCC πρέπει να συμπυκνώνεται όσο το δυνατόν ταχύτερα με την διάδοση του υλικού. Οι κανονισμοί γενικά απαιτούν συμπύκνωση μέσα στα 15 λεπτά της διάδοσής και μέσα στα 45 λεπτά της παρασκευής του μείγματος. Όταν η λειτουργία της συμπύκνωσης διακόπτεται και το RCC παραμένει μη-εργάσιμο για περισσότερο από 15 λεπτά ή βρεγμένο με αποτέλεσμα να μην συναντά τις προδιαγραφές, το μη-συμπυκνωμένο RCC πρέπει να απομακρύνονται.

Η παρατήρηση του RCC κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης δίνει μια ένδειξη της εργασιμότητας του μείγματος. Όταν το RCC προσεγγίζει την πλήρη συμπύκνωση το σκυροδέμα πρέπει να δείχνει μια ελαφρή πλαστικότητα. Το τσιμέντο θα πρέπει να γεμίζει τα κενά όσο παρατηρούνται στο RCC

3.3.4 Προετοιμασία της επιφάνειας της στρώσης

Η συγκολλησιμότητα (δέσιμο) μεταξύ των στρώσεων είναι απαραίτητη προϋπόθεση ώστε:

- Να αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις κατά την διάρκεια σεισμικών φορτίσεων
- Η ανάγκη να ελαχιστοποιηθεί η διείσδυση του νερού κατά μήκος των γραμμών μεταξύ των στρώσεων
- Η ανάγκη να παραληφθούν οι πιέσεις οι οποίες επηρεάζουν την σταθερότητα και τους παράγοντες ασφαλείας της κατασκευής
- Η ανάγκη στο να αναπτυχθεί η αντίσταση ολίσθησης υπό κανονικές συνθήκες φόρτισης

Κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την συγκόλιση μεταξύ των στρώσεων είναι ο χρόνος μεταξύ της τοποθέτησης κάθε στρώσης, ο σχεδιασμός του μείγματος, η προετοιμασία της επιφάνειας της κάθε στρώσης με σκοπό την τοποθέτηση της

επόμενης και οι καιρικές συνθήκες. Ο ιδανικός χρόνος είναι η τοποθέτηση τριών στρώσεων ανά μέρα και έχει αποδειχθεί ότι αυξάνεται η συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων για τον παραπάνω χρόνο.

Οι προδιαγραφές γενικά απαιτούν ότι η επιφάνεια του RCC πρέπει να είναι βρεγμένη πριν την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης.

3.3.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Δύναμη και αντοχή

Ένα φράγμα βαρύτητας θεωρείται σταθερό όταν οι δυνάμεις που προκαλούνται είναι στα επιτρεπτά όρια και το βάρος του είναι ικανό ώστε να αντισταθεί στις δυνάμεις που τείνουν να το περιστρέψουν ή να του προκαλέσουν ολίσθηση. Η απαιτούμενη δύναμη του σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιείται από τα πρώτα στάδια των κατασκευαστικών φορτίσεων στον συγκεκριμένο χρόνο και για τις καθορισμένες λειτουργικές συνθήκες φορτίσεων. Η φιλοσοφία του σχεδιασμού του φράγματος RCC είναι ίδια με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Η διαφορά των φραγμάτων RCC σε σύγκριση με του συμβατικού σκυροδέματος είναι ότι απαιτούνται να κατασκευαστούν κλείδες οι οποίες επιβάλλονται από τις γραμμές ανύψωσης και οι παράγοντες ασφαλείας που σχετίζονται με την συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων.

Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα του φράγματος RCC σχετίζεται με την αντίσταση της κατασκευής σε συνθήκες παγώματος-απόψυξης, στην διάβρωση και την αντοχή του σε επιπτώσεις προσβολής του από θειικά άλατα. Οι κατασκευές από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα θα πρέπει να παραμένουν όσο το δυνατόν πιο ανθεκτικές όσο αφορά την ποιότητα του υλικού τους και την λειτουργικότητά τους όταν εκτίθενται στο περιβάλλον.

Μη-υδατοστεγνότητα

Η υδατοστεγνότητα των φραγμάτων RCC σχετίζεται με την προστασία του έναντι διαρροής. Το φράγμα RCC προφυλάσσεται από διαρροές με τη βοήθεια ανάντη πλάκα σκυροδέματος, προστατευτικών μεμβρανών και από την κατασκευή συστήματος εσωτερικής αποστράγγισης. Η καλή ποιότητα των μειγμάτων RCC με καλή συμπύκνωση, καλή ποιότητα ελέγχου κατά την διάρκεια της κατασκευής και καλή συγκολλησιμότητα μεταξύ των ανυψωμένων κλειδώσεων μπορεί να συνεισφέρουν σημαντικά στην υδατοστεγανότητα του φράγματος RCC.

3.3.6 Θεμέλια των φραγμάτων RCC

Οι αρχές κατά τις οποίες επιλέγεται το έδαφος πάνω στο οποίο θα θεμελιωθεί το φράγμα RCC είναι παρόμοιες με αυτές που εξετάζονται για την περίπτωση των φραγμάτων βαρύτητας από συμβατικό σκυρόδεμα. Για τον σχεδιασμό της

θεμελίωσης του φράγματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν αρκετοί παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την επάρκεια και την προετοιμασία του εδάφους θεμελίωσης, τις δυνάμεις και τις φορτίσεις που ασκούνται στα θεμέλια, την επάρκεια των βραχώδων υλικών στο υπόστρωμα ώστε να αντέξει τα φορτία που προκαλούνται από το φράγμα και την ποσότητα του υλικού εκσκαφής που απαιτείται ώστε να θεμελιωθεί το φράγμα. Η εκσκαφή πραγματοποιείται σε περίπτωση που το βραχώδες υλικό έχει υποστεί διαβρώσεις και σε περίπτωση που παρουσιάζει ρηγματώσεις οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στη θεμελίωση της κατασκευής.

3.3.6.1 Αναζήτηση και έλεγχος για την θεμελίωση του φράγματος

Η θεμελίωση του φράγματος προτιμάται να πραγματοποιείται σε βραχώδη υλικά. Με αυτόν τον τρόπο θα πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος του προφίλ του βράχου. Ο παραπάνω έλεγχος σχετίζεται με τον βαθμό διάβρωσης των χαρακτηριστικών του βράχου όπως είναι θραύσεις ή κενά ανάμεσα στις ρωγμές, τον καθορισμό της ποιότητας του βράχου και τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του. Πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες του βράχου μας δίνονται με βάση κάποιες παραμέτρους όπως είναι ο συντελεστής ελαστικότητας E και ο λόγος poisson ν . Σχετικά με τον συντελεστή του E όσο πιο μεγάλος είναι τόσο μεγαλύτερη δυσκαμψία παρουσιάζει το υλικό, το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τον λόγο Poisson ν όσο κοντά πλησιάζει την μονάδα τόσο το υλικό μας παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκαμψία. Η αναζήτηση και ο έλεγχος για την εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας για την θεμελίωση θα πρέπει να πραγματοποιείται από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού και όχι κατά την διάρκεια της κατασκευής. Το κόστος της εκσκαφής και της μεταχείρισης της θεμελίωσης που απαιτείται σε μερικές τοποθεσίες του φράγματος για παράδειγμα ίσως να μας οδηγήσει σε αλλαγή της τοποθεσίας και τον τύπο του φράγματος.

Τα καλύτερα θεμέλια είναι αυτά που αποτελούνται από βραχώδη υλικά χωρίς απότομες γεωμετρικές αλλαγές (κοφτερές). Η συγκέντρωση των δυνάμεων μπορεί να συμβαίνει λόγω των αλλαγών στην γεωμετρία των θεμελίωσης και μπορεί να προκαλέσει μη-επιθυμητές ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα. Με αυτό τον τρόπο απαιτείται διαμόρφωση του σχήματος του βράχου στα θεμέλια ώστε να μην προκληθούν ανεπιθύμητες ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα. Επιπλέον αν σε κάποιο σημείο του υποστρώματος πάνω στο οποίο επρόκειτο να θεμελιωθεί το φράγμα ανακαλυφθεί ότι τα εδαφικά υλικά είναι αδύναμα με αποτέλεσμα να μην αντέξουν το βάρος της κατασκευής, είναι απαραίτητο το σημείο αυτό να καλυφθεί με στρώση σκυροδέματος ώστε να προστατευτεί το υπόστρωμα και να μειωθούν οι δυνάμεις που ασκούνται εκεί.

Επιπλέον καθοριστικό ρόλο στην αντοχή του βράχου θεμελίωσης (σε περίπτωση που μιλάμε για βραχώδες υπόστρωμα) παίζει και ο βαθμός διάβρωσης. Ο βαθμός διάβρωσης είναι αυτός που καθορίζει το βάθος εκσκαφής του υποστρώματος. Σε γενικές γραμμές το διαβρωμένο και παραμορφωμένο βραχώδες υλικό είναι σκόπιμο να αφαιρείται από το υπόστρωμα ώστε να διευκολύνεται η θεμελίωση της κατασκευής. Αυτό γίνεται λόγω του ότι εξαιρετικά θρυμματισμένο και

παραμορφωμένο βραχώδες υλικό ίσως να προκαλέσει προβλήματα στην θεμελίωση. Κρίσιμες περιοχές είναι οι περιοχές όπου το υλικό παρουσιάζει ρηγματώσεις και απαιτείται επιπλέον διερεύνηση και πολύ πιθανόν και απομάκρυνσή του με αντικατάσταση στρώσης σκυροδέματος. Η διαρροή ανάμεσα στα θεμέλια ίσως να είναι να είναι αποτέλεσμα του μεγάλου βαθμού θρυμματισμού του βράχου και να χρειάζεται τοποθέτηση τσιμεντενέσεων στα θεμέλια ώστε να μειώθουν οι απώλειες νερού στον ταμιευτήρα λόγω της υπόγειας διαρροής.

Η συνοχή ή συγκολλησιμότητα της διεπιφάνειας βράχου-σκυροδέματος είναι απαραίτητη για την ύπαρξη της αντίστασης στη δύναμη ολίσθησης που προκαλείται εξαιτίας των ωθήσεων στο σώμα του φράγματος.

Κατά την διάρκεια της κατασκευής το νερό αναβλίζει στη εκσκαφή των θεμελίων πρέπει να ελέγχεται και να απομακρύνεται ώστε το RCC να μην διαβρέχεται σε υπερβολικό βαθμό. Η παρουσία του νερού στο σημείο όπου τοποθετείται το RCC προκαλεί μεταβολή στις αναλογίες του μείγματος με αποτέλεσμα να αποκτήσει χαμηλή ικανότητα συμπύκνωσης και αντοχής.

Ιδιότητες σκυροδέματος

Οι θερμικές και οι μηχανικές ιδιότητες του ισχνού κυλινδρούμενο σκυροδέματος μεταβάλλονται με το χρόνο. Οι ιδιότητες ενός μείγματος RCC που έχει σχηματιστεί πρόσφατα διαφέρουν σημαντικά συγκριτικά με αυτές ενός RCC μεγαλύτερης ηλικίας και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την φάση της κατασκευής του υλικού.

Μηχανικές ιδιότητες

Οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος είναι το μέτρο ελαστικότητας του young E , ο λόγος poisson ν και το ειδικό βάρος. Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος διαφοροποιούνται σημαντικά με την ηλικία του RCC. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας του young E τόσο μεγαλύτερη είναι και η σκληρότητα του σκυροδέματος, ενώ ο συντελεστής Poisson ν όσο περισσότερο πλησιάζει την τιμή μηδεν τόσο πιο σκληρό είναι το υλικό, το νερό έχει συντελεστή Poisson $\nu=0,5$. Το ειδικό βάρος του ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος φτάνει τα 24 kN/m^3 .

Θλιπτική αντοχή

Η αντοχή του υλικού υπό αξονική θλίψη καθορίζεται κυρίως από τις ιδιότητες των αδρανών του μείγματος με δεδομένο την μικρή περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Η κοκκομετρική διαβάθμιση επηρεάζει την αναγκαία ποσότητα τσιμέντου στο μείγμα, ώστε να επιτευχθούν οι προδιαγεγραμμένες απαιτήσεις συμπύκνωσης, εργασιμότητας και αντοχής. Για δοκιμές σκληρυθέντος μείγματος μετά από 28 ημέρες άνω των 4 Mpa , ενώ για μείγματα ηλικίας πάνω από 90 ημερών παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής τους έως και 60%. Η ανάπτυξη των αντοχών του

RCC δεν παρουσιάζεται με τον ίδιο ρυθμό με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής εξαρτάται από την αντοχή των αδρανών στο μείγμα, σε συνδυασμό με τη μικρή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και την αυξημένη περιεκτικότητα χονδρόκοκκου κλάσματος.

Μέτρο ελαστικότητας

Το σκληρυμένο μείγμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι η θλίψη στην οποία υπόκειται να υπερβεί κάποιο προκαθορισμένο όριο. Όταν η φόρτιση του μείγματος ξεπεράσει αυτήν την τιμή τότε το υλικό παρουσιάζει μια καθαρά ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Οι προδιαγραφές του ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος ορίζουν το όριο του μέτρο ελαστικότητάς του για την περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς στα 2000 MPa. Με βάση τις δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί το μέτρο ελαστικότητας για πυρήνες από φράγματα κυμαίνεται από 400 MPa - 1500MPa και για δοκίμια μείγματος σε 200-300MPa και σχετίζεται με την ποσότητα τσιμέντου στο μείγμα.

Διαπερατότητα

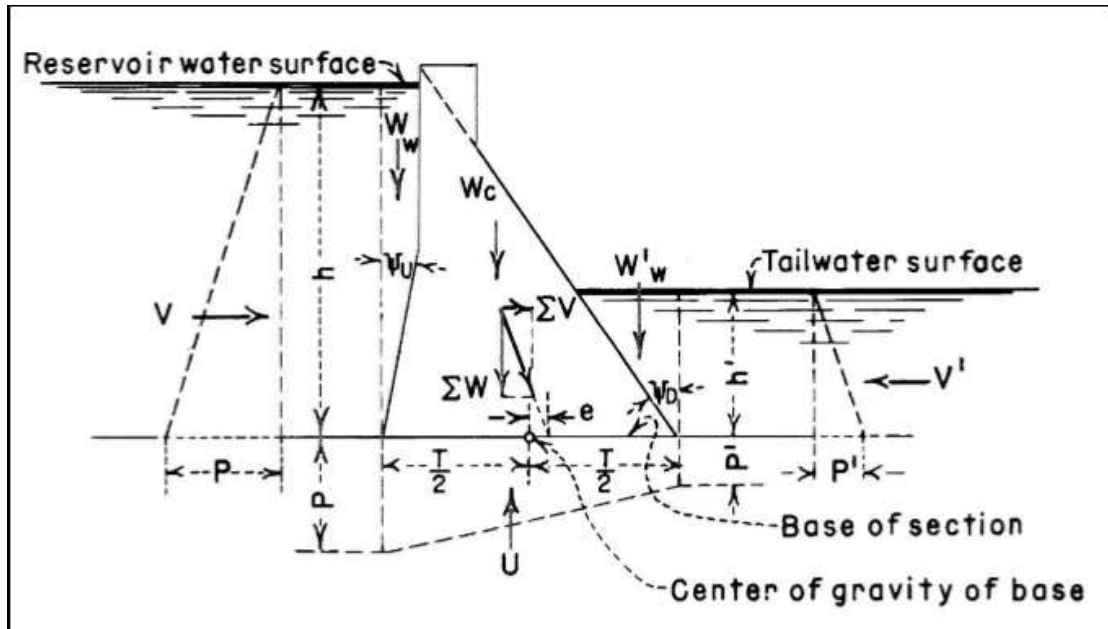
Για να διασφαλιστεί η υδατοστεγανότητα του φράγματος RCC πολλές φορές τοποθετείται στο ανάντη πρηνές μια πλάκα σκυροδέματος. Επιπλέον, υπάρχει και η τεχνική του εγκιβωτισμού του σκληρού επιχώματος μέσα σε στερεά από συμβατικό σκυρόδεμα, τα οποία τοποθετούνται εκατέρωθεν του φράγματος. Έτσι καταφέρνουμε να διατηρήσουμε την υδατοστεγανότητα του φράγματος και να προστατευτεί το κατάντη πρηνές σε συνδυασμό με την απλοποίηση των διαδικασιών κατασκευής του σκληρού επιχώματος. Για την εξάλειψη όμως τυχόν κακοτεχνιών κατά τη σκυροδέτηση της πλάκας πραγματοποιείται τοποθέτηση μεμβρανών στη θέση της, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να τοποθετηθεί οπλισμός. Τέλος, η τοποθέτηση μεμβράνης απαιτεί εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό, συνεχή ποιοτικό έλεγχο και πολύ καλή γνώση των χαρακτηριστικών της.

Θερμότητα ενυδάτωσης RCC

Το πιο σημαντικό πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζουμε κατά την χρήση του συμβατικού σκυροδέματος σε μεγάλες κατασκευές είναι η θερμοκρασιακή καταπόνηση που υφίστανται λόγω της θερμότητας η οποία εκλύεται κατά την φάση της ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ρηγματώσεων στην κατασκευή μας. Έτσι με την χρήση του ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος το οποίο περιέχει μικρότερη ποσότητα τσιμέντου η θερμότητα η οποία αναπτύσσεται είναι σημαντικά μικρότερη από ότι εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος πρόκλησης ρηγματώσεων στην κατασκευή μας. Επιπλέον λόγω του ότι η θερμότητα που εκλύεται είναι μικρή δεν απαιτείται η κατασκευή αρμών συστολο-διαστολής για να διευκολυνθεί η διαδικασία της κατασκευής.

3.3.7 Φορτία που ασκούνται σε φράγμα βαρύτητας RCC

Με βάση τον σχεδιασμό των φραγμάτων βαρύτητας τα φορτία τα οποία ασκούνται στο φράγμα είναι το νεκρό φορτίο, η εξωτερική υδροστατική πίεση, εσωτερική υδροστατική πίεση (που μεταφράζεται ως υπερπίεσεις των πόρων), το φορτίο λόγω ύπαρξης του πάγου στον ταμιευτήρα, οι δυνάμεις που ασκούνται λόγω της ύπαρξης φερτών υλικών στον πυθμένα του ταμιευτήρα και το σεισμικό φορτίο.



Εικόνα 3.4 Φορτία τα οποία ασκούνται στο φράγμα RCC

(Πηγή: Roller-Compacted Concrete 2017)

Νεκρό φορτίο: το νεκρό φορτίο είναι το βάρος του φράγματος RCC σε συνδυασμό με το βάρος συνοδευτικών κατασκευών που τοποθετούνται στο φράγμα όπως είναι (γέφυρες, πύλες, κ.α). Το νεκρό φορτίο έχει άμεση σχέση με την πυκνότητα του υλικού το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή.

Εξωτερική υδροστατική πίεση: η εξωτερική υδροστατική πίεση ασκείται από το νερό του ταμιευτήρα και όσο η στάθμη του νερού μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερη είναι και η δύναμη που ασκείται στο φράγμα. Έτσι η υδροστατική δύναμη υπολογίζεται από το ύψος της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα και το ειδικό του βάρος το οποίο είναι 10 kN/m^3 .

Εσωτερική υδροστατική πίεση: η εσωτερική υδροστατική πίεση προκαλείται από το νερό του ταμιευτήρα που εισχωρεί ανάμεσα στις ρηγματώσεις που εμφανίζονται τόσο στο κύριο σώμα του φράγματος όσο και στα θεμέλιά του προκαλώντας υπερπίεσεις μεταξύ των κενών. Η διανομή των πιέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ των οριζόντιων στρώσεων του φράγματος υποτίθεται ότι μεταβάλλεται γραμμικά από το πρόσωπο της επιφάνειας του ανάντη πρανούς έως την επιφάνεια του

κατάντη πρανούς στο φράγμα. Η διανομή των εσωτερικών πιέσεων ρυθμίζεται με την κατασκευή στραγγιστικού συστήματος που κατασκευάζεται στο φράγμα.

Φορτίο φερτών υλικών: Είναι η δύναμη που ασκείται από τον πυθμένα του ταμιευτήρα στο ανάντη πρανές στο σώμα του φράγματος εξαιτίας της συγκέντωσης φερτών υλικών. Το φορτίο των φερτών υλικών αυξάνεται με το χρόνο προκαλώντας ολοένα και περισσότερες φορτίσεις στο φράγμα.

Φορτίο εξαιτίας της ύπαρξης του πάγου: ο πάγος μπορεί να προκαλέσει σημαντικές φορτίσεις σε φράγματα τα οποία βρίσκονται σε ψυχρά κλίματα. Το φορτίο εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας του πάγου, το πάχος της στρώσης του πάγου. Δεν υπόκεινται όλα τα φράγματα σε φόρτιση εξαιτίας του πάγου. Πριν κατασκευαστεί το φράγμα θα πρέπει να ξέρουμε τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και τότε και ποιους μήνες του έτους επικρατεί παγετός.

Θερμοκρασιακά φορτία: τα θερμοκρασιακά φορτία καταπονούν το φράγμα όταν η θερμοκρασία του σκυροδέματος από το οποίο κατασκευάζεται μεταβάλλεται με αποτέλεσμα την συστολή και διαστολή του όγκου του. Τα δύο πιο σημαντικά αίτια θερμοκρασιακής φόρτισης του σκυροδέματος είναι λόγω της ενυδάτωσής του κατά την οποία προκαλείται έκλυση θερμότητας και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος της κατασκευής. Η θερμοκρασιακή φόρτιση καθορίζει το κενό μεταξύ των κλειδώσεων που πρέπει να δημιουργηθούν στο φράγμα όσο και την θερμοκρασία τοποθέτησης όπου πρόκειται να τοποθετηθεί το σκυρόδεμα. Όταν στο μείγμα μας υπάρχει μεγάλη ποσότητα ποζολάνης αντί για τσιμέντο τότε η θερμότητα η οποία εκλύεται εξαιτίας της ενυδάτωσης του μείγματος αναμένεται να είναι η μισή σε σύγκριση με την περίπτωση που το μείγμα μας περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου.

Σεισμικά φορτία: τα φορτία τα οποία προκαλούνται εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης και καταπονούν το φράγμα εξαρτώνται από το μέγεθος της σεισμικής δόνησης, το υλικό από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζεται το φράγμα, από το υλικό του φράγματος. Στην περίπτωση που μιλάμε για φράγμα βαρύτητας από συμβατικό σκυρόδεμα ή από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα RCC οι επιδράσεις των σεισμικών φορτίσεων διαφέρουν μεταξύ τους ελάχιστα. Για τον προσδιορισμό των σεισμικών φορτίσεων χρησιμοποιείται η ψευδοστατική μέθοδος σε περίπτωση που μιλάμε για μικρά φράγματα βαρύτητας πάνω σε βραχώδες υπόστρωμα. Ενώ σε περίπτωση που εξετάζουμε μεσσαία ή μεγάλα φράγματα χρησιμοποιείται η μέθοδος της δυναμικής ανάλυσης ώστε να προσδιοριστούν οι εσωτερικές σεισμικές δυνάμεις που προκαλούνται στην κατασκευή του φράγματος.

Ψευδοστατική μέθοδος: Οι δυνάμεις στο φράγμα βαρύτητας που προκαλούνται κατά της διάρκειας της σεισμικής δόνησης οφείλονται στην αδράνεια της μάζας του και στα υδροδυναμικά φορτία τα οποία δρουν στο σώμα του φράγματος εξαιτίας της ύπαρξης νερού στον ταμιευτήρα. Για φράγματα μικρού μεγέθους η περίοδος δόνησης των θεμελίων είναι σημαντικά μικρότερη συγκριτικά με την περίοδο της οριζόντιας

σεισμικής επιτάχυνσης. Οι υδροδυναμικές δυνάμεις στο σώμα του φράγματος υπολογίζονται με βάση τον τύπο (Westergaard 1931)

$$p=0,875*\alpha*(h * y)^{0,5} *w$$

Οι συνολικές οριζόντιες δυνάμεις P_h και η στιγμιαία οριζόντια δύναμη ανά μονάδα μήκους υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_h=W*\alpha+0,583*w*H^2 * \alpha/g \qquad M_h=h_c *W*\alpha+0,233*w*H^3 * \alpha/g$$

Όπου:

- W: το βάρος του φράγματος βαρύτητας
- w: το ειδικό βάρος του νερού
- H: το βάθος του ταμιευτήρα
- α : η οριζόντια επιτάχυνση στην βάση του φράγματος
- g: η επιτάχυνση εξαιτίας της βαρύτητας
- h_c : το ύψος του κέντρου βάρους του φράγματος βαρύτητας μετρημένο από την βάση του
- y: η κάθετη απόσταση από την επιφάνεια του νερού στον ταμιευτήρα στο υψόμετρο του σημείου στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε την υδροδυναμική δύναμη (Reclamation, 1952)

3.3.8 Μεθοδολογία σχεδιασμού φραγμάτων

Σε γενικές γραμμές για την σχεδιασμό της κατασκευής ενός φράγματος θα πρέπει να διεξάγονται κάποιοι έλεγχοι και να πραγματοποιούνται απαραίτητες διεργασίες. Οι προκαταρκτικοί έλεγχοι και διεργασίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν την επιλογή του σημείου όπου επρόκειτο να κατασκευαστεί το φράγμα, την εκσκαφή του εδάφους θεμελίωσης όταν κριθεί απαραίτητο, την επιλογή του κατάλληλου τύπου (κατηγορία) φράγματος, τον προσεγγιστικό υπολογισμό του όγκου του σκυροδέματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί όσο και το κόστος της κατασκευής.

Σε πρώτη φάση η τοποθεσία του φράγματος οριστικοποιείται. Οι γεωλογικοί χάρτες συχνά ενημερώνονται με δεδομένα σχετικά το βραχώδες υλικό στα θεμέλια όπου πρόκειται να θεμελιωθεί. Στην τελική φάση σχεδιασμού λεπτομερείς έρευνες απαιτούνται να πραγματοποιηθούν για τα θεμέλια. Ύστερα καθορίζεται ο σχεδιασμός για την κατασκευή του φράγματος και του μείγματος RCC αφού υπολογιστούν οι παράγοντες ασφαλείας του φράγματος. Επιπλέον εξετάζονται και η σταθερότητα του φράγματος και οι αναλύσεις όσον αφορά την σεισμική φόρτιση και την φόρτιση που προκαλείται λόγω έκλυσης θερμότητας κατά την φάση ενυδάτωσης του RCC.

Η μέθοδος ανάλυσης των δυνάμεων και της σταθερότητας του φράγματος RCC είναι ίδια με τις κλασσικές αναλύσεις που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό του φράγματος από συμβατικό σκυρόδεμα. Οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιούνται

σύμφωνα με την μέθοδο GMSS (GRAVITY METHOD OF STRESS AND STABILITY). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλοικότητά της και η ευκολία κατά την οποία μπορεί να εξαχθούν κάποια αποτελέσματα.

Με βάση την μέθοδο GMSS οι συνδυασμοί των φορτίσεων καταπόνησης του φράγματος που εξετάζονται παρακάτω είναι:

- Φορτίσεις υπό κανονική λειτουργία του φράγματος: εδώ περιλαμβάνεται η φόρτιση από το ίδιο το βάρος της κατασκευής του φράγματος, την φόρτιση που ασκεί το νερό του ταμιετήρα υπό την κανονική λειτουργία του φράγματος, οι φορτίσεις λόγω θερμοκρασίας του περιβάλλοντος
- Ασυνίθιστος συνδυασμός φορτίσεων: εδώ εξετάζονται οι φορτίσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω συν κάποιες φορτίσεις όπως είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στο φράγμα από το νερό υπό συνθήκες υπερχειλίσης του ταμιευτήρα και όταν έχουμε φόρτιση λόγω ύπαρξης πάγου στην επιφάνεια του ταμιευτήρα.
- Ακραίες συνθήκες φορτίσεις: εδώ εξετάζονται οι φορτίσεις που αναφέρθηκαν στην πρώτη περίπτωση (φορτίσεις υπό κανονική λειτουργία του φράγματος) συν κάποιες επιπλέον φορτίσεις οι οποίες οφείλονται στις σεισμικές δονήσεις, και οι φορτίσεις που οφείλονται στην ανεπάρκεια των στραγγιστήρων που χρησιμοποιούνται για την στράγγιση του φράγματος.

3.3.8.1 Απαιτήσεις για τη σταθερότητα του φράγματος

Όταν ένα φράγμα σχεδιάζεται με βάση την μεθοδολογία σχεδιασμού GMSS είναι σκόπιμο να υπολογιστούν πριν την κατασκευή του και κάποιοι συντελεστές ασφαλείας. Οι συντελεστές ασφαλείας είναι άμεσα σχετιζόμενοι με την σταθερότητα της κατασκευής. Η σταθερότητα της κατασκευής έχει να κάνει με την αντίσταση του φράγματος στις δυνάμεις που τείνουν να το περιστρέψουν και στις δυνάμεις οι οποίες προσπαθούν να του προκαλέσουν ολίσθηση ως προς το οριζόντιο επίπεδο που βρίσκεται στην βάση του.

Έτσι για την σταθερότητα του φράγματος έναντι των διατμητικών και εφελκυστικών δυνάμεων που ασκούνται κατά μήκος των οριζόντιων στρώσεων του και του οριζοντίου επιπέδου της βάσης του, θα πρέπει να υπολογίζεται ένας συντελεστής ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας ολίσθησης είναι ο λόγος Q που έχει αριθμητή τις δυνάμεις που αντιστέκονται στην ολίσθηση και παρονομαστή τις δυνάμεις οι οποίες προκαλούν την ολίσθηση της κατασκευής. Ο τύπος είναι

$$Q = \frac{CA + (\Sigma N - \Sigma U) \tan \phi}{\Sigma V}$$

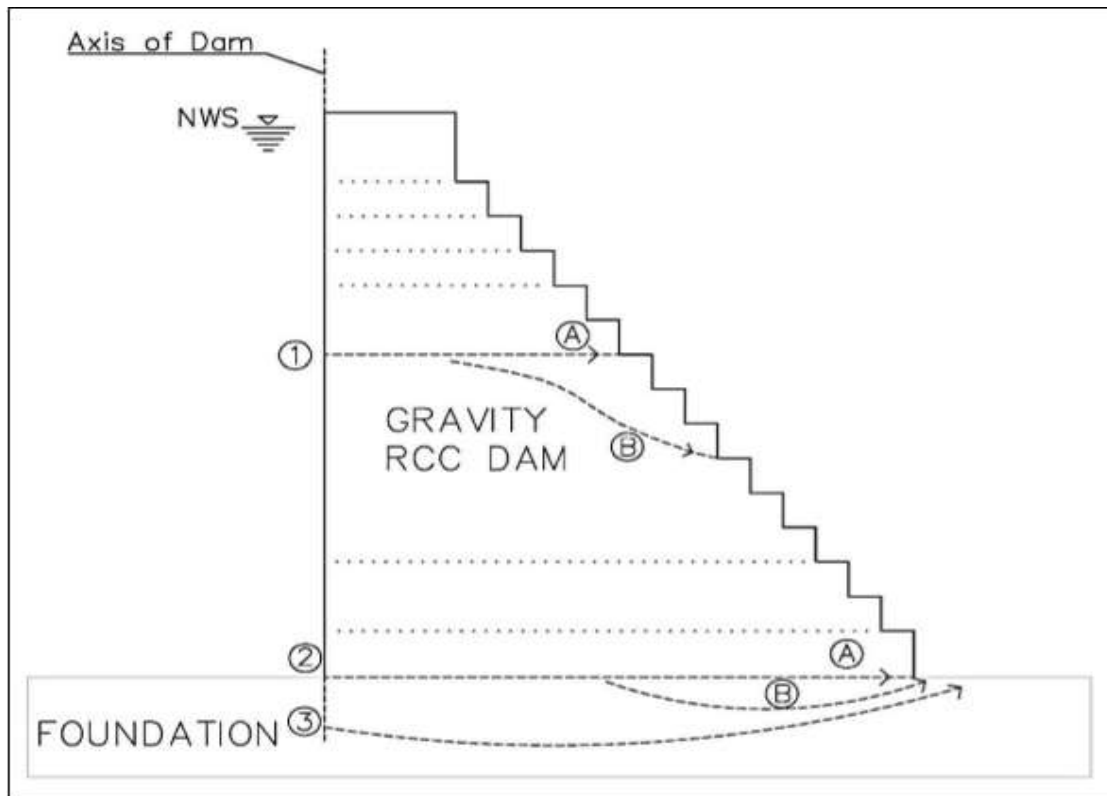
Όπου:

- C: είναι η μονάδα συνοχής
- A: είναι η περιοχή της μη ρηγματωμένης θεωρούμενης περιοχής
- ΣN: είναι το άθροισμα των κανονικών δυνάμεων
- ΣU: είναι το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται στα ανάντη
- tanφ: είναι ο συντελεστής εσωτερικής τριβής
- ΣV: είναι το άθροισμα των δυνάμεων που προκαλούν την ολίσθηση της κατασκευής

Οι δυνάμεις της συνοχής και της εσωτερικής τριβής μπορούν να προσδιοριστούν από δοκιμές ή ελέγχους στα υλικά του υποστρώματος της κατασκευής και στον τύπο του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στο φράγμα. Με αυτόν τον τρόπο η τιμή της συνοχής που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού, τους συνδυασμούς των φορτίσεων που ασκούνται στο φράγμα και τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του μείγματος του RCC. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για την θλίψη, τον εφελκυσμό και τις διατμητικές δυνάμεις μπορεί να διαφέρουν από δείγμα σε δείγμα RCC.

Η επιφάνεια αστοχίας ολίσθησης για φράγματα βαρύτητας RCC μπορεί να είναι:

- Mode 1A: η ολίσθηση κατά μήκος οριζόντιας ρωγμής στο φράγμα κατά μήκος των γραμμών ανύψωσης
- Mode 1B: η ολίσθηση κατά μήκος καμπυλόγραμμης ρωγμής στο φράγμα
- Mode 2A: η ολίσθηση κατά μήκος οριζόντιας ρωγμής στην βάση του φράγματος
- Mode 2B : η ολίσθηση κατά μήκος καμπυλόγραμμης ρωγμής στα θεμέλια της κατασκευής
- Mode 3: η ολίσθηση στα θεμέλια ή στο επίπεδο ολίσθησης



3.5 Παρουσίαση των μηχανισμών αστοχίας για φράγματα βαρύτητας RCC

(Πηγή: Roller-Compacted Concrete 2017)

Οι προτεινόμενοι συντελεστές ασφαλείας για τη μέγιστη επιτρεπόμενη διατμητική δύναμη σε κάθε επίπεδο στο φράγμα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 3 για συνηθισμένες φορτίσεις (που ασκούνται υπό κανονική λειτουργία του φράγματος), μεγαλύτερο από 2 για ασυνήθιστες φορτίσεις (σε περιπτώσεις πλημμύρας) και μεγαλύτερη από 1 για συνθήκες υπό σεισμική φόρτιση. Σε βραχώδη θεμέλια οι συντελεστές ασφαλείας πρέπει να είναι μεγαλύτεροι από 4 υπό κανονικές συνθήκες φόρτισης, μεγαλύτεροι από 2,7 για ασυνήθιστες συνθήκες φόρτισης και μεγαλύτεροι από 1,3 για συνθήκες υπό σεισμική φόρτιση. Για θεμέλια με την παρουσία ρηγματώσεων οι συντελεστές ασφαλείας είναι μεγαλύτεροι από 2 για συνηθισμένες φορτίσεις, μεγαλύτεροι από 1,5 για ασυνήθιστες φορτίσεις για μεγαλύτεροι από 1 για συνθήκες υπό σεισμική φόρτιση. (Reclamation 1976).

3.3.8.2 Διατμητικές και θλιπτικές δυνάμεις

Τα αποδεκτά κριτήρια για διατμητικές δυνάμεις φραγμάτων βαρύτητας RCC είναι ίδια με εκείνα των φραγμάτων από συμβατικό σκυρόδεμα. Εδώ όμως λαμβάνουμε υπόψιν τους παράγοντες και τους συντελεστές ασφαλείας οι οποίοι σχετίζονται με την συγκολλησιμότητα των στρώσεων μεταξύ τους. Οι οδηγίες που πρέπει να ακολουθούνται σχετικά με τις επιτρεπτές τάσεις στα φράγματα βαρύτητας είναι:

- Για συνηθισμένες φορτίσεις: να μην επιτρέπεται η διατμητική τάση στο ανάντη πρόσωπο του φράγματος και η μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική δύναμη στο σκυρόδεμα να μην ξεπερνά την καθορισμένη θλιπτική δύναμη η οποία καθορίζεται από έναν συντελεστή ασφαλείας που ισούται με 3 χωρίς να υπερβαίνει τα 10200 kN/m^2
- Για ασυνίθηστες συνθήκες φόρτισης: μικρές διατμητικές δυνάμεις επιτρέπονται και η μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική δύναμη στο σκυρόδεμα να μην ξεπερνά την καθορισμένη θλιπτική δύναμη η οποία καθορίζεται από έναν συντελεστή ασφαλείας που ισούται με 2 χωρίς να υπερβαίνει τα 15300 kN/m^2
- Για ακραίες συνθήκες φόρτισης: η μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική δύναμη στο σκυρόδεμα δεν πρέπει να ξεπερνά την θλιπτική δύναμη για συντελεστή ασφαλείας ίσον με 1.

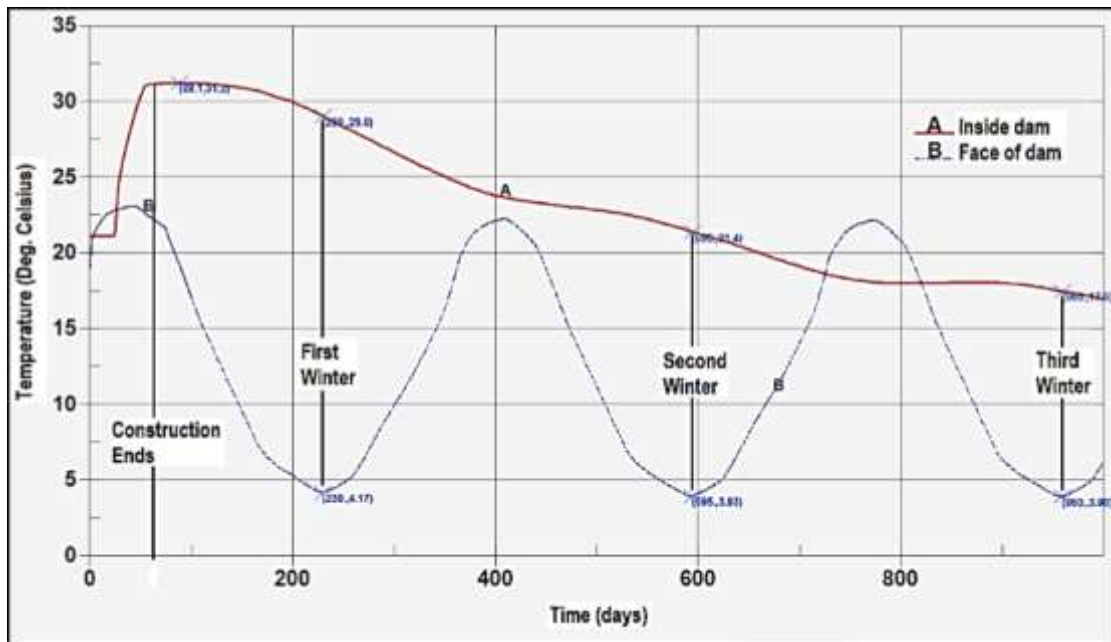
Ο σχεδιασμός του μείγματος RCC συνήθως βασίζεται στην ανάγκη συγκολλησιμότητας των επιμέρους στρώσεων και των διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ τους παρά στην θλιπτική του αντοχή.

Σχεδιασμός φράγματος με βάση τις προηγμένες αναλύσεις

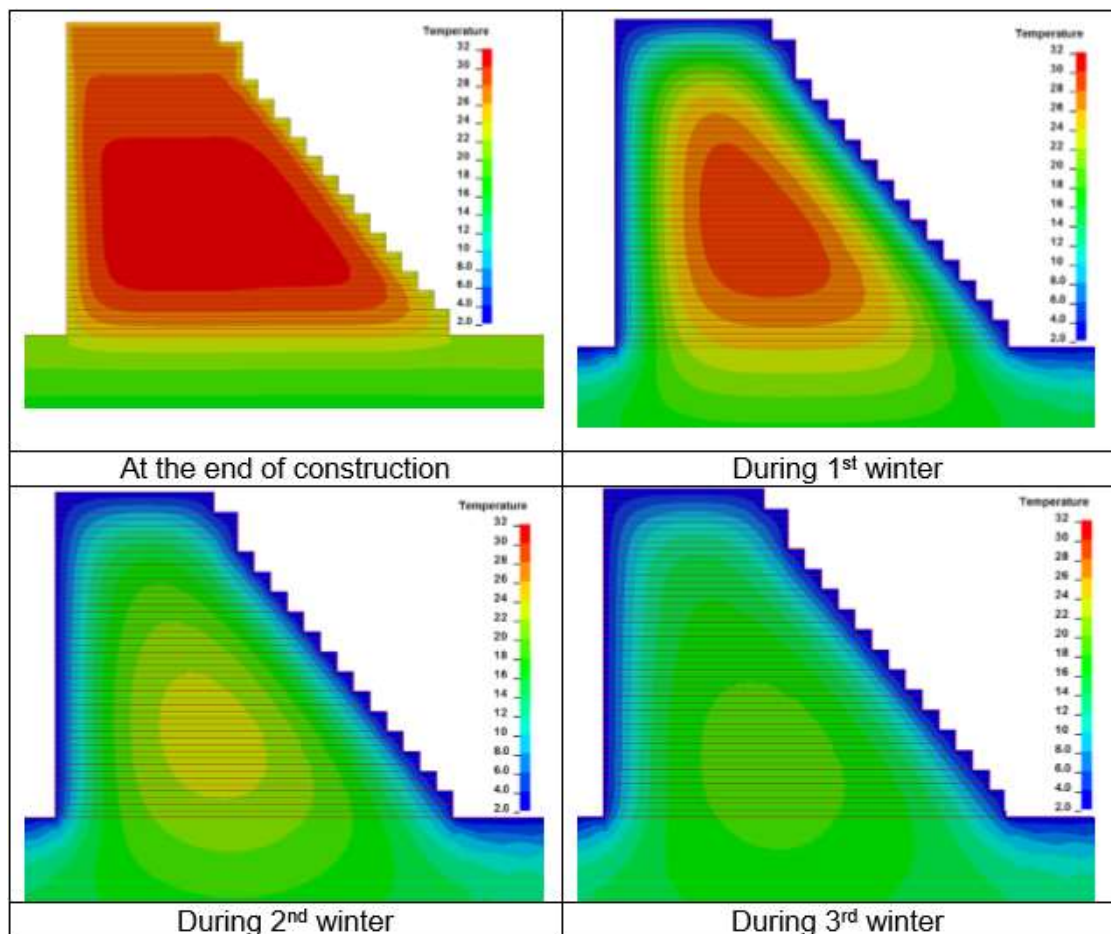
Σε αυτήν την περίπτωση η διανομή των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο φράγμα βαρύτητας αναπαρίστανται σε τρεις διαστάσεις. Η τρισδιάστατη διανομή των τάσεων διαφέρει από τις κλασσικές μεθόδους σχεδιασμού η οποία δεν λαμβάνει υπόψιν της την αλληλεπίδραση των στρώσεων του φράγματος και το υπόστρωμα στο οποίο εδράζεται. Η τρισδιάστατη ανάλυση άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως με την ραγδιαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών με αποτέλεσμα να γίνει η πρώτη προσέγγιση στις κατασκευαστικές αναλύσεις των φραγμάτων βαρύτητας. Η παραπάνω μέθοδος επιτρέπει την διςδιάστατη ανάλυση των φραγμάτων βαρύτητας RCC.

Θερμική ανάλυση φραγμάτων βαρύτητας RCC

Η θερμική ανάλυση για τα νέα κατασκευασμένα φράγματα βαρύτητας σχετίζεται με τις θερμοκρασιακές μεταβολές οι οποίες συντελούνται στο εσωτερικό του φράγματος. Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την θερμική ανάλυση των φραγμάτων βαρύτητας είναι η απλή μέθοδος και η προηγμένη ανάλυση. Οι ρωγμές που προκαλούνται στο σώμα του φράγματος RCC σχετίζονται άμεσα με την μεταβολή του όγκου του σκυροδέματος και προκαλούνται κατά την διαδικασία της ενυδάτωσής του και από διαφορές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κατά την διάρκεια της φάσης κατασκευής του RCC πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η αύξηση της θερμότητας του σκυροδέματος λόγω της ενυδάτωσής του συν την θερμότητα που επικρατεί στο σημείο της τοποθέτησής του.



Εικόνα 3.6 Παράδειγμα που δείχνει την διαφοροποίηση της θερμοκρασίας μέσα στο φράγμα στο μέσο ύψος (κόκκινη γραμμή) και στην επιφάνεια του κατόντη πρανούς (μπλε γραμμή)



Εικόνα 3.7 Προβολή της θερμοκρασιακής μεταβολής (σε βαθμούς κελσίου) στο εσωτερικό του φράγματος

Οι ρωγμές στα φράγματα RCC αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα των εφελκυστικών δυνάμεων οι οποίες αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της ψύξης του σκυροδέματος από την μέγιστη θερμοκρασία. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην μάζα του σκυροδέματος προκαλούν μεταβολές στον όγκο του και οφείλονται στην ενυδάτωσή του και στις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Έτσι μειώνοντας την θερμοκρασία στο σημείο όπου πρόκειται να τοποθετηθεί το φράγμα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας που αποκτά το φράγμα. Η τοποθέτηση του σκυροδέματος την άνοιξη επιτρέπει παραπάνω χρόνο ώστε να ψυχρανθεί το εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος πριν την έλευση του πρώτου χειμώνα. Παρόλο αυτά η μέγιστη θερμοκρασία ίσως να είναι μικρότερη αν το σκυρόδεμα τοποθετηθεί το φθινόπωρο πριν τον ερχομό του καλοκαιριού.

Οι επιφανειακές ρωγμές είναι πολύ πιθανότερο να εμφανιστούν κατά την διάρκεια του πρώτου χειμώνα λειτουργίας του φράγματος διότι στο εσωτερικό του υλικού RCC θα επικρατούν ακόμα υψηλές θερμοκρασίες.

3.3.8.4 Διαρροές και έλεγχος των ρωγμών στο φράγμα

Ο τρόπος με τον οποίο ελέγχονται οι ρωγμές που συμβαίνουν στο φράγμα εξαιτίας της μεταβολής του όγκου του λόγω της θερμικής εξάπλωσης του σκυροδέματος είναι με την δημιουργία κάθετων κλειδώσεων. Ο χώρος μεταξύ δύο διαδοχικών κλειδώσεων που σχηματίζεται διαφέρει από κατασκευή σε κατασκευή και κυμαίνεται από 10 έως 40 μέτρα και διαφέρει ανάλογα με το σχεδιασμό του μείγματος, την θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος, την θερμοκρασία τοποθέτησης του μείγματος, την θερμοκρασία περιβάλλοντος της κατασκευής το μέγεθος του φράγματος και από άλλους παράγοντες. Ένας από τους κύριους στόχους της θερμικής ανάλυσης είναι να προσδιοριστεί η καλύτερη απόσταση μεταξύ των κλειδώσεων για την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία τοποθέτησης του μείγματος ώστε να αποφευχθούν οι ρωγμές στο σκυρόδεμα. Η συχνότητα εμφάνισης των ρωγμών θα διαφέρει με βάση το μείγμα RCC, την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, την θερμοκρασία τοποθέτησης του σκυροδέματος, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από αυτό και τον όγκο του σκυροδέματος στο φράγμα.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους είναι εφικτό να ελεγχθεί η διαρροή με βάση των κάθετων αρθρώσεων ή με βάση των μη-συγκολλίσιμων στρώσεων του RCC και περιλαμβάνει:

- Αδιάβρωχη μεμβράνη στα ανάντη του φράγματος
- Με την χρήση συμβατικού σκυροδέματος στο πρόσωπο της κάθε στρώσης
- Με την χρήση ειδικού συγκολλητικού μείγματος μείγματος ή προετοιμασία ανάμεσα στις στρώσεις κοντά στο πρόσωπο του φράγματος
- Με τη χρήση εσωτερικών καθέτων στραγγιστήρων κοντά στο πρόσωπο του φράγματος (Reclamation 1987a)

3.3.8.5 Σύστημα στράγγισης και συγκολλησιμότητα των στρώσεων

Ένα εσωτερικό στραγγιστικό σύστημα αποτελείται από κάθετους διαδρόμους ή από ένα οριζόντιο σύστημα σωλήνων το οποίο μπορεί να είναι ενσωματωμένο στο σώμα του φράγματος ώστε να ελεγχθούν οι διαρροές.

Η συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση των παρακάτω μεθόδων:

- Οι τοποθετήσεις φτιάχνονται ενώ οι προηγούμενες τοποθετήσεις ακόμα θεωρούνται μια φρέσκια άρθρωση. Η αντικατάσταση κάποιας ποσότητας τσιμέντου με ποζολάνη μπορεί να μεγαλώσει τον χρόνο εφαρμογής του RCC
- Η προετοιμασία καλής επιφάνειας και η χρήση αρμού διάδοσης για κάθε επιφανειακή στρώση πριν την τοποθέτηση της επόμενης
- Το μείγμα RCC μπορεί να κατασκευαστεί ώστε να παρέχει μεγαλύτερο όγκο αρμού από ότι απαιτείται για να καλύψει τα κενά των αδρανών.

3.3.8.6 Υπερχειλιστές

Οι υπερχειλιστές στα φράγματα βαρύτητας RCC είναι ενσωματωμένοι στην κατασκευή μας όπως και στα φράγματα από συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτό αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα έναντι των χωμάτινων φραγμάτων στα οποία ο υπερχειλιστής κατασκευάζεται ως ξεχωριστή κατασκευή και έχει σημαντική οικονομική επιβάρυνση.

3.4 Περιπτώσεις κατασκευής φραγμάτων RCC

Παρακάτω παρουσιάζονται περιπτώσεις κατασκευής φραγμάτων από RCC. Τα δύο παραδείγματα που παρουσιάζονται παρακάτω αποτελούν δύο τέτοιες περιπτώσεις που αντιμετωπίστηκαν με διαφορετικό τρόποόσον αφορά την διαδικασία και τον τρόπο κατασκευής τους

Φράγμα Upper Stillwater

Γενικά χαρακτηριστικά

Το φράγμα Upper Stillwater ολοκληρώθηκε το 1987 και ήταν το μεγαλύτερο φράγμα της εποχής του. Η τοποθεσία του βρίσκεται στο Rock Creek στην ανατολική Utah περίπου 120 μίλια ανατολικά της πόλης Salt Lake City. Ο όγκος του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του είναι $1458000 m^3$. Το ανάντη πρόσωπο του φράγματος είναι κάθετο, ενώ το κατάντη πρηνές έχει κλίση 0,32:1 (οριζόντια προς κάθετη πλευρά αντίστοιχα). Ο σκοπός της κατασκευής του φράγματος ήταν να αποθηκεύει νερό για άρδευση και για βιομηχανική χρήση.

Το πρόσωπο του ανάντη και κατάντη πρηνούς του φράγματος αποτελείται από συμβατικό σκυρόδεμα ενώ το εσωτερικό μέρος του φράγματος αποτελείται από ισχνό κυλινδρούμενο συρόδεμα τοποθετημένο και συμπυκνωμένο ανά στρώση ενός ποδιού με τη χρήση δονητικού κυλίνδρου. Το φράγμα κατασκευήθηκε συνεχόμενα

από το ένα αντέρεισμα στο άλλο χωρίς αρθρώσεις ή τεχνική ψύξη το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καθέτων ρωγμών σε αρκετές τοποθεσίες στο πρόσωπο του ανάντη πρανούς.

Το φράγμα θεμελιώθηκε σε εδαφικό υλικό αποτελούμενο από ψαμμίτη και χαλαζίτη. Η έκπλιση της λασπώδους άμμου από τα κενά που υπήρχαν στα θεμέλια και στα οριζόντια επίπεδα ανάμεσα στην στράγγιση των θεμελίων καθιστούσαν απαραίτητη το σοβάδισμα των θεμελίων. Το στοκάρισμα σε σημεία στα θεμέλια του φράγματος πραγματοποιήθηκε τις περιόδους 1988-1989 και 1992-1993 ώστε να ελεγχθεί η εισροή του νερού και οι μετακινήσεις αμμώδους υλικού. Ωστόσο μικρότερες ποσότητες αμμώδους υλικού εξακολουθούσαν να διαβρέχονται ανάμεσα στα στραγγιστήρια των θεμελίων όπως και διαμέσου των ρωγμών του RCC από το επίχωμα που βρίσκεται στο ανάντη πρανές.

Ο ταμιευτήρας του φράγματος βρίσκεται στο κεντρικό κομμάτι του και αποτελείται από 99 στρώσεις (σκαλοπάτια). Ο υπερχειλιστής είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε το νερό που υπερχειλίζει να προσκρούει σε καθένα από τα 99 σκαλοπάτια, ώστε να διασκορπίζεται η υδραυλική του ενέργεια.

Σχεδιασμός

Τα τελικά σχέδια του φράγματος Upper Stillwater ολοκληρώθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 χρησιμοποιώντας αναλυτικές μεθόδους. Το φράγμα ξεκίνησε να κατασκευάζεται από το 1983 και ολοκληρώθηκε το 1987. Κατά την διάρκεια της πρώτης λειτουργίας του δεν παρουσιάστηκαν σοβαρά προβλήματα παρόλο τις ολισθαίνουσες κινήσεις που παρουσιάστηκαν στα θεμέλιά του οι οποίες σταθεροποιήθηκαν λόγω της παρουσίας μεγάλης ποσότητας βραχώδων υλικών στα κατάντη. Επιπλέον οι στραγγιστικοί διάδρομοι παρέμειναν ανοιχτοί σε τέτοια βάθη ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα των θεμελίων. Το φράγμα κατασκευάστηκε χωρίς αρθρώσεις ή σύστημα εσωτερικής ψύξης. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας της μάζας του σκυροδέματος επιτεύχθηκε με αντικατάσταση ποσότητας τσιμέντου στο μείγμα με ποζολάνη ώστε να μειωθεί η παραγωγή θερμότητας κατά την ενυδάτωση του υλικού.

Σχεδιασμός μείγματος σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα κανονικά σχεδιάζεται ώστε να αποκτήσει θλιπτική αντοχή να ισούται με 28000 kN/m^2 σε 28 μέρες από την παρασκευή του. Εδώ βέβαια χρησιμοποιήσαμε ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα με υψηλή περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα, και χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό. Το μείγμα που σχεδιάστηκε περιείχε σε τσιμεντοειδή υλικά 31% περιεκτικότητα σε τσιμέντο και 69% περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα με αναλογία νερού-τσιμεντοειδών υλικών (νερό/(τσιμέντο+ιπτάμενη τέφρα) είναι 0,43. Η ιπτάμενη τέφρα στο RCC μειώνει την περιεκτικότητα του νερού στο μείγμα μας το οποίο οδηγεί στην αύξηση της εργασιμότητας, αυξάνει την θλιπτική αντοχή του και μειώνει την θερμότητα ενυδάτωσής του. Το μείγμα RCC

σχεδιάστηκε ώστε να έχει διατμητική αντοχή 1260 kN/m^2 και θλιπτική αντοχή 2800 kN/m^2 ύστερα από ένα χρόνο.

Κατασκευή

Πριν την κατασκευή του φράγματος πραγματοποιήθηκε έλεγχος στα θεμέλια όπου επρόκειτο να κατασκευαστεί. Έτσι απομακρύθηκε ο θρυμματισμένος βράχος και αρκετές ρηγματωμένες ζώνες στα θεμέλια. Σε αυτά τα σημεία από τα οποία αφαιρέθηκε το υλικό τοποθετήθηκε στρώση σκυροδέματος και ολόκληρα τα θεμέλια σταθεροποιήθηκαν από κουρτίνες τσιμεντέσεων σε τρύπες βάθους 10 μέτρων ανά 6,2 μέτρα. Τελικά στρώση σκυροδέματος τοποθετήθηκε σε ολόκληρα τα θεμέλια πριν την τοποθέτηση της κατασκευής RCC ώστε να δημιουργηθεί μια καλή συγκόλιση με τα βραχώδη θεμέλια.



Εικόνα 3.8 Φωτογραφία του ανάντη προσώπου του φράγματος κατά την διάρκεια της κατασκευής



Εικόνα 3.9 Φωτογραφία κατάντη σώματος του φράγματος κατά την διάρκεια της κατασκευής



Εικόνα 3.10 Τοποθέτηση του RCC, σύστημα εξάπλωσης, συμπίκνωσης και διανομής

Το μείγμα RCC συμπυκνώθηκε σε στρώση πάχους ενός ποδιού με δονητικό κύλινδρο 15,6 τόνους στην εσωτερικό σώμα του φράγματος. Οι κύλινδροι λειτουργούν με συχνότητα 2400 δονήσεις ανά λεπτό και χρειάζεται περίπου 4 με 6 περάσματα ώστε να αποκτήσει το RCC επαρκή συμπίκνωση.

Η τοποθέτηση του RCC ξεκίνησε το 1985 και το φράγμα ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 1987 με την τοποθέτηση πάνω από 1620000yd³ σκυροδέματος από τα οποία το 1470000 yd³ αποτελούνται από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. Μέγιστος ρυθμός παραγωγής ήταν περίπου 800yd³ σε μία ώρα και 10000yd³ σε μια περίοδο 16 ωρών. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ο μηνιαίος βαθμός τοποθέτησης του RCC. Η μέγιστη μηνιαία παραγωγή ήταν τον Ιούνιο το 1987, με 240000yd³ RCC. Το φράγμα RCC αυξήθηκε περίπου 12 μέτρα ύψος τον Ιούνιο 1987 και περίπου 15 μέτρα τον Ιούλιο 1987.



Εικόνα 3.11 Φωτογραφίες που δείχνουν τον υπό κατασκευή υπερχειλιστή



Εικόνα 3.12 Αεροφωτογραφία του φράγματος Upper Stillwater

Συμπεράσματα

Εξαιτίας των ακραίων καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή οι θερμοκρασιακές φορτίσεις στο φράγμα είναι πολύ μεγάλες. Κατά την διάρκεια του πρώτου χειμώνα μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του ήταν ακόμα μεγάλες σε σχέση με το ψυχρές θερμοκρασίες έξω. Το εσωτερικό του φράγματος καταπονείται από θερμοκρασία του αέρα και την θερμοκρασία που επικρατεί στο εξωτερικό του μέρος. Αυτό έχει ως συνέπεια το εξωτερικό μέρος του φράγματος να ψύχεται πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με το εσωτερικό του μέρος το οποίο προκαλεί και ρηγματώσεις στην στέψη του. Μερικές ρωγμές επεκτάθηκαν με κατεύθυνση από ανάντη προς κατόντη μέσα στο σώμα του φράγματος. Αυτός ο τύπος των ρωγμών του ήταν αναμενόμενος και δεν αλλοίωσε την εικόνα του φράγματος, ωστόσο διατηρούσε μια ανησυχία εξαιτίας της προκύπτουσας διαρροής. Λόγω της εισροής του νερού του ταμιευτήρα στο φράγμα το νερό λειτουργούσε ως ψυχαντήρας για το εσωτερικό σώμα του φράγματος με αποτέλεσμα να έχουμε ακόμη περισσότερο απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές σε εκείνα τα σημεία με δυνατότητα παρουσίασης επιπλέον ρωγμών.

Οι ρωγμές που προκλήθηκαν στο εσωτερικό του φράγματος είχαν την τάση να διευρύνονται κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών λόγω των ψυχρών θερμοκρασιών που παρουσίαζε το σκυρόδεμα. Πολυάριθμοι μόνιμοι ελέγχοι της εισροής του νερού εξετάστηκαν ώστε να επουλωθούν οι ρωγμές και να μειωθεί η διαρροή. Το 2005 τοποθετήθηκε σε τρεις τοποθεσίες όπου η διαρροή ήταν μεγαλύτερη υλικό χάλυβα, επιπλέον αρκετές ρηγματώσεις αρμολογήθηκαν με υλικό πολυθεράνης.

Η υψηλή εργασιμότητα του δείγματος RCC από το οποίο κατασκευάστηκε το φράγμα είχε ως αποτέλεσμα την άριστη συμπύκνωσή του στα στρώματα και εμφάνισε πολύ ικανή συγκολλησιμότητα. Όσον αφορά τις διατμητικές αντοχές του έφτασαν τα 2100 kN/m^2 σε ένα χρόνο που ήταν παραπάνω από την αντίστοιχη απαιτούμενη (1260 kN/m^2). Οι θλιπτικές αντοχές έφτασαν τα 2800 kN/m^2 μετά από διάστημα ενός έτους. Οι παραπάνω ιδιότητες του μείγματος οφείλονταν και στην υψηλή περιεκτικότητά του σε ποζολάνη που έτασε το 70% περίπου σε τσιμεντοειδή υλικά ενώ το τσιμέντο στο 30%, βέβαια αυτό βοήθησε περισσότερο στην συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων.

Το φράγμα Upper Stillwater ήταν το μεγαλύτερο φράγμα RCC της εποχής του. Ο ρυθμός τοποθέτησης μείγματος RCC ήταν 10000 yd^3 σε διάστημα 16 ωρών και 800 yd^3 σε διάστημα μία; ώρας που ήταν ο μεγαλύτερος ρυθμός ανέγερσης φράγματος. Επίσης η περίπτωση του φράγματος Upper Stillwater έδειξε ότι το μείγμα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC) αποτελεί μια πολύ καλή οικονομική λύση για την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων σκυροδέματος με εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Φράγμα Σάντα Κρούζ

Το φράγμα Σάντα Κρούζ είναι ένα τεράστιο τοξωτό φράγμα σκυροδέματος το οποίο βρίσκεται περίπου 25 μίλια βόρεια της Santa Fe στο Νέο Μεξικό στον ποταμό Santa cruz. Το φράγμα ολοκληρώθηκε το 1929 με ύψος 45 μέτρα. Ο καμπυλωτός άξονας του φράγματος έχει 100 μοίρες και μήκος υπερχειλιστή 170 μέτρων

Προδιαγραφές σχεδιασμού

Το φράγμα παρουσίασε ζητήματα ασφαλείας τα οποία σχετίζονταν με το μέγιστο πιθανό σεισμό (MCE) και την μέγιστη πιθανή πλημμύρα (PMF). Το φράγμα Σάντα Κρούζ για να αντέξει τις φορτίσεις οι οποίες θα προέκυπταν από το MCE και την PMF τροποποιήθηκε κατασκευάστικα. Οι κατασκευαστικές τροποποιήσεις ολοκληρώθηκαν το 1990. Για να προστατευτεί από τις φορτίσεις που θα δέχονταν από τον μέγιστο πιθανό σεισμό (MCE) κατασκευάστηκε στα κατάντη του αντιστήριγμα από υλικό ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος. Για την αντιμετώπιση της μέγιστης πιθανής πλημμύρας (PMF) ολόκληρο το φράγμα κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί και ως υπερχειλιστής. Το κεντρικό κομμάτι του φράγματος κατασκευάστηκε με πλάτος 22,5 μέτρων, ενώ η στέψη του σχεδιάστηκε ώστε να εκκενώνει περίπου $86 \text{ m}^3 / \text{s}$ σε περίπτωση υπερχειλίστη του ταμιευτήρα.



Εικόνα 3.13 Κατάντη πρόσωπο φράγματος Σάντα Κρούζ κατά την διάρκεια της κατασκευής

Σχεδιασμός μείγματος σκυροδέματος

Οι απαιτήσεις για το RCC ήταν να αποκτήσει το μείγμα θλιπτική αντοχή $20700\text{kN}/\text{m}^2$ σε ένα χρόνο, συνοχή μεταξύ του παλιότερου και του νεότερου σκυροδέματος $350\text{kN}/\text{m}^2$ σε διάστημα ενός έτους και αντοχή σε συνθήκες συστολής και διαστολής. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για απόκτηση θλιπτικής αντοχής του συμβατικού κατασκευαστικού σκυροδέματος $27500\text{kN}/\text{m}^2$ σε 28 ημέρες. Οι αναλύσεις που εκτελέστηκαν καθόρισαν τις φυσικές ιδιότητες του μείγματος RCC και του συμβατικού σκυροδέματος. Με βάση τον έλεγχο του σκυροδέματος, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο και ποζολάνη αυξήθηκαν στα $255\text{ lb}/\text{yd}^3$ από την αρχική μίξη του που ήταν $224\text{ lb}/\text{yd}^3$. Για την κατασκευαστική τροποποίηση του φράγματος Σάντα Κρούζ χρησιμοποιήθηκαν αερακτικοί ανεμικτήρες ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του μείγματος υπό συνθήκες παγώματος και λιωσίματος. Οι αερακτικοί ανεμικτήρες βελτιώνουν και την εργασιμότητα του RCC επειδή οδηγούν σε μείωση της περιεκτικότητας του νερού μειώνοντας τον λόγο $w/(c+p)$ (νερό προς τσιμεντοειδών υλικών) αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την εργασιμότητα του μείγματος.

Κατασκευή

Το μείγμα RCC τοποθετήθηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση τα μείγματα RCC και συμβατικού σκυροδέματος παρήχθησαν στο εργοτάξιο, ενώ στην δεύτερη φάση το μείγμα RCC παρήχθη στο εργοτάξιο, ενώ το μείγμα του σκυροδέματος μεταφέρθηκε στο σημείο της κατασκευής αφού δεν είχε παραχθεί στο εργοτάξιο. Η διανομή του RCC από το εργοτάξιο στο σημείο τοποθέτησής του πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μεταφορέων. Στη συνέχεια το RCC συμπυκνώθηκε με τη χρήση

δονητικού κυλίνδρου σε οριζόντιες στρώσεις 0,3 μέτρων. Διαβαθμισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε περιμετρικά της τοποθέτησης του μείγματος RCC ώστε να υπάρξει ικανοποιητικό δέσιμο με την προηπάρχουσα επιφάνεια του φράγματος σκυροδέματος και την προηπάρχουσα επιφάνεια του βραχώδους υποστρώματος. Η συμπύκνωση της στρώσης RCC πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δονητικού κυλίνδρου με έξι περάσματα. Κατά την διάρκεια της κατασκευής ο ρυθμός τοποθέτησης του RCC ήταν τέσσερις στρώσεις ανά ημέρα. Τα σκαλοπάτια του υπερχειλιστή του φράγματος κατασκευάστηκαν από συμβατικό σκυρόδεμα από 0,5 έως 1,2 μέτρα ύψος. Ο συνολικός όγκος τοποθέτησης RCC ήταν 28000 κυβικά μέτρα.

Συμπεράσματα

Για την κατασκευαστική τροποποίηση του φράγματος Σάντα Κρούζ για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν αερακτικοί ανεμικτείρες ώστε να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα του φράγματος υπό συνθήκες παγώματος-λιωσίματος, Επιπλέον ήταν η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε μείγμα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος RCC σε τοξωτό φράγμα.

4 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Προβλήματα στα φράγματα μπορεί να προκληθούν και από το σεισμό. Συγκεκριμένα ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού και τη σεισμικότητα της περιοχής όπου χωροθετείται το φράγμα είναι πιθανόν να προκληθούν σοβαρά προβλήματα στην κατασκευή. Ο σεισμός μπορεί να δημιουργήσει ρηγματώσεις, καθιζήσεις στο φράγμα όσο και μετακινήσεις και ρευστοποιήσεις στα θεμέλια του φράγματος και οι οποίες αν δεν ληφθούν έγκαιρα υπόψιν είναι πιθανόν να υπάρξουν καταστροφικές συνέπειες. Πιο συγκεκριμένα ένα σεισμός είναι ικανός να προκαλέσει στο φράγμα:

- Καθιζήσεις και ρωγμές στο ανάχωμα κοντά την στέψη του φράγματος
- Μη σταθερότητα στα ανάντη και στα κατόντη πρανή του φράγματος
- Μείωση της απόστασης μεταξύ της στάθμης του νερού και του υπερχειλιστή εξαιτίας της καθίζησης ή της μη σταθεροποίησης η οποία στην χειρότερη περίπτωση μπορεί να ξεπεράσει σε ύψος το φράγμα
- Διαφορά των κινήσεων ανάμεσα στα πρανή, στα αντερείσματα και στην κατασκευή του υπερχειλιστή προκαλεί πολλές φορές ρωγμές
- Εσωτερική διάβρωση και διαρροές οι οποίες προκαλούνται από την δημιουργία ρωγμών στο φράγμα
- Ρευστοποίηση ή απώλεια της διατμητικής αντοχής εξαιτίας της αύξησης των υπερπίεσεων που προκαλούνται από το σεισμό στα αναχώματα και στα θεμέλιά τους
- Προβλήματα που προκαλούνται από διαφορετικές κινήσεις των ρηγμάτων που διέρχονται από τα θεμέλια του φράγματος
- Υπερπηδήσεις του φράγματος σε περίπτωση μεγάλων τεκτονικών κινήσεων στον ταμιευτήρα από κυμμάτισμούς που προκαλούνται στα ανάντη
- Υπερχείλιση του νερού στον ταμιευτήρα από κύματα εξαιτίας των κατολισθήσεων μεγάλων όγκων πρανών στον ταμιευτήρα γύρω από την τεχνητή λίμνη

Το μέγεθος αυτών των προβλημάτων εξαρτάται από:

- Από τη σεισμικότητα της περιοχής στην οποία τοποθετείται το φράγμα και να αποτιμηθεί το σχέδιο του σεισμού
- Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα θεμέλια και τις τοπογραφικές συνθήκες στην περιοχή που κατασκευάζεται το φράγμα
- Ο τύπος και η λεπτομερής κατασκευή του φράγματος
- Το επίπεδο του νερού στο φράγμα τη στιγμή που προκαλείται ο σεισμός

Σε περίπτωση που αστοχήσει το φράγμα μετά από πρόκληση σεισμού εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Ο προστατευτικός σχεδιασμός του φράγματος ειδικά στην διάταξη των φίλτρων ώστε να προβλεφθούν και να ελεγχθούν οι εσωτερικές διαβρώσεις του φράγματος και των θεμελίων. Επίσης ο προστατευτικός σχεδιασμός αφορά και την διάταξη των ζωνών στράγγισης
- Η σταθερότητα των πρανών κατά την διάρκεια και αμέσως μετά τον σεισμό
- Οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τον σεισμό οι οποίες σχετίζονται με τις καθιζήσεις και τις ρωγμές που προκαλούνται στο φράγμα
- Η δυνατότητα για την ρευστοποίηση των εμποτισμένων εδαφών (αποτελούμενα από άμμο, λάσπη με μερικά χαλίκια)

4.1 Μεθοδολογίες σχεδιασμού

Ένα από τα σημαντικά θέματα φραγμάτων τα οποία χρήζουν άμεση αντιμετώπιση είναι η εξασφάλιση της σεισμικής ευστάθειάς τους. Πριν την κατασκευή τους και την μελέτη τους θα πρέπει πρώτα να εξετάζονται οι σεισμικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται η τυχόν ύπαρξη ενεργού ρήγματος κοντά στην τοποθεσία στην οποία επρόκειτο να κατασκευαστεί το φράγμα. Η κατασκευή του φράγματος απαγορεύεται να θεμελιωθεί πάνω σε ενεργό ρήγμα διότι αυτό απειλεί την σταθερότητά της, σε περίπτωση που στην περιοχή ανακαλυφθεί η ύπαρξη πολλών ρηγμάτων τότε μια ενδιάμεση λύση είναι το φράγμα να κατασκευάζεται σε μια απόσταση ασφαλείας από το κοντινότερο ρήγμα. Ωστε οι επιπτώσεις που θα έχει μια πιθανή σεισμική δόνηση στην περιοχή να είναι όσο το δυνατόν μικρές.

Η ανάλυση της σεισμικής ευστάθειας του φράγματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να ελεγχθεί η λειτουργικότητα και η ασφάλεια του έργου. Σε περίπτωση εσφαλμένου υπολογισμού υπάρχει κίνδυνος αστοχίας η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση της κατασκευής. Έτσι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις το φράγμα είναι χωμάτινο είτε από σκυρόδεμα. Κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης η σεισμική ευστάθεια στα πρανή του φράγματος επηρεάζεται από τις κυκλικές τάσεις του σεισμού και την κυκλική συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών από τα οποία κατασκευάζεται το φράγμα. Οι κυκλικές τάσεις και η κυκλική συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων οφείλονται στις αδρανειακές δυνάμεις ή στην ανακυκλική απομείωση της αντοχής των υλικών της κατασκευής. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού της σεισμικής ευστάθειας του φράγματος και είναι οι εξής:

- Ψευδοστατική μέθοδος
- Μέθοδος ολίσθησης πρανούς
- Μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων

Η πιο απλή ανάλυση από τις τρεις είναι η ψευδοστατική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται ως πρώτη εκτίμηση της σεισμικής ευστάθειας του φράγματος. Σε δεύτερη φάση μπορεί να χρησιμοποιηθούν και πιο ακριβείς μέθοδοι όπως είναι η μέθοδος ολίσθησης πρανούς και η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων.

Ένα φράγμα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές αν με την εφαρμογή της ψευδοστατικής μεθόδου βρεθεί ότι είναι ασφαλείς και ίσως να μην είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πιο πολύπλοκες μέθοδοι. Αν όμως το φράγμα βρεθεί μη ασφαλές με την ψευδοστατική μέθοδο ή με την μέθοδο ολίσθησης πρανούς θεωρείται σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος τάσεων παραμορφώσεων. Επιπλέον είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε κατευθείαν την μέθοδο τάσεων παραμορφώσεων χωρίς να ελέγξουμε την σεισμική ευστάθεια με την ψευδοστατική μέθοδο, με την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμα υλικά υψηλής ποιότητας και συγκεκριμένα δεδομένα.

Παρακάτω αναλύονται και οι τρεις μέθοδοι ευστάθειας πρανών που αναφέρθηκαν παραπάνω.

4.1.1 Ψευδοστατική μέθοδος

Με την εφαρμογή της ψευδοστατικής ανάλυσης η επίδραση της σεισμικής δόνησης αναπαριστάται από οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις και το πρόβλημα της σεισμικής ευστάθειας το αντιμετωπίζουμε ως ισοδύναμο στατικό. Έτσι ο σεισμός αναπαρίσταται με ψευδοστατικές επιταχύνσεις, που παράγουν αδρανειακές δυνάμεις F_h και F_v (οριζόντια και κατακόρυφη δύναμη αντίστοιχα) και δρουν στο κέντρο βάρους της μάζας αστοχίας του πρανούς. Οι δυνάμεις υπολογίζονται από τις σχέσεις:

- $F_h = \frac{a_h * W}{g} = k_h * W$
- $F_v = \frac{a_v * W}{g} = k_v * W$

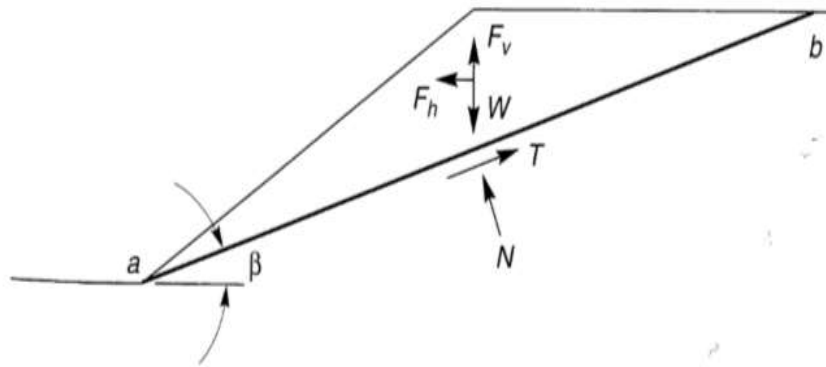
Όπου

a_h : οριζόντια ψευδοστατική ανάλυση επιτάχυνση

a_v : κατακόρυφη ψευδοστατική επιτάχυνση

k_h : αδιάστατος σεισμικός συντελεστής της οριζόντιας κίνησης

k_v : αδιάστατος σεισμικός συντελεστής της κατακόρυφης κίνησης



Εικόνα 4.1 Δυνάμεις της ψευδοστατικής μεθόδου

(Πηγή Kramer, 1996)

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται με βάση της παραπάνω δυνάμεις που δρουν στο ολισθαίνον σώμα με βάση τη σχέση $FS = \frac{\text{αντιστεκόμενη δύναμη}}{\text{κινητήρια δύναμη}}$,

$$FS = \frac{c \cdot l_{ab} + \{(W - F_v) \cdot \cos \beta - F_h \cdot \sin \beta\} \cdot \tan \varphi}{(W - F_v) \cdot \sin \beta + F_h \cdot \cos \beta}$$

Όπου:

c: είναι η δύναμη συνοχής του υλικού

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

l_{ab} : το μήκος της επιφάνειας αστοχίας του πρανούς

Ο πιο σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει τον συντελεστή ασφαλείας είναι η οριζόντια ψευδοστατική δύναμη F_h . Η οριζόντια ψευδοστατική δύναμη για $\varphi > 0$ αυξάνει την κινητήρια δύναμη και μειώνει την αντιστεκόμενη μειώνοντας έτσι τον συντελεστή ασφαλείας. Η κατακόρυφη ψευδοστατική δύναμη F_v επιδρά λιγότερο στο συντελεστή ασφαλείας με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε υπόψιν την επίδρασή της.

Η ψευδοστατική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των συντελεστών ασφαλείας για επίπεδες, κυκλικές και μη-κυκλικές επιφάνειες αστοχίας. Αν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος του 1 η κατασκευή είναι ευσταθής, για τιμές ίσες με 1 ή πολύ κοντά σε αυτήν η κατασκευή βρίσκεται σε μια οριακή κατάσταση αστοχίας, ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας έχουμε αστοχία του πρανούς.

Το αποτέλεσμα της ψευδοστατικής μεθόδου όπως είπαμε πριν εξαρτάται από την οριζόντια δύναμη F_h και συνεπώς από τον σεισμικό συντελεστή k_h . Ο συντελεστής k_h καθορίζει το μέγεθος της ψευδοστατικής οριζόντιας δύναμης που επιδρά στο ολισθαίνον πρανές. Σε περίπτωση που το υλικό του πρανούς είναι άκαμπτο η αδρανειακή δύναμη που εφαρμόζεται στο επίχωμα θα ισούται με $F_h = a_h \cdot m$, άρα η

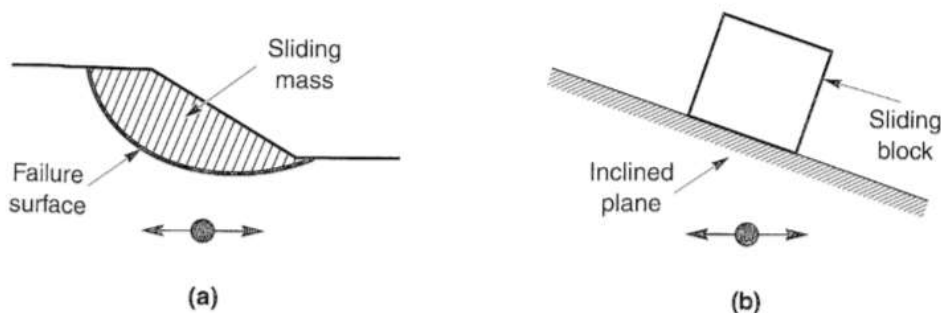
αδρανειακή δύναμη φτάνει την μέγιστη τιμή της όταν η οριζόντια επιτάχυνση φτάνει την μέγιστη τιμή.

Η ψευδοστατική ανάλυση είναι μια εύχρηστη και απλή μέθοδος και παράγει τον συντελεστή ασφαλείας. Η απλοικότητα της μεθόδου την καθιστά μια από τις εύχρηστες μεθόδους, ωστόσο υπάρχουν και αρκετοι περιορισμοί. Ακόμα και αν ο συντελεστής ασφαλείας προκύψει $FS > 1$ η ανάλυση για εδάφη με υψηλές πιέσεις πόρων ή πάνω από 15% απομείωση της αντοχής του εδάφους, λόγω σεισμικής φόρτισης είναι αναληθείς. Έτσι η χρήση της ψευδοστατικής ανάλυσης έχει περιοριστεί ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης πιο ρεαλιστικών μεθόδων ανάλυσης της σεισμικής ευστάθειας των πρανών.

4.1.2 Μέθοδος ολίσθησης πρανούς

Όπως αναφέραμε πριν η ψευδοστατική ανάλυση μας παρέχει μόνο συντελεστές ασφαλείας χωρίς να μας πληροφορεί για τις παραμορφώσεις που έχουν να κάνουν με την αστοχία του πρανούς. Αυτό δεν την καθιστά και τόσο αξιόπιστη επειδή σε περίπτωση που οι αδρανειακές δυνάμεις γίνουν πολύ μεγάλες σε μια εδαφική μάζα και το σύνολο των κινητήριων δυνάμεων ξεπεράσουν το σύνολο των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση πρανούς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από το 1 με αποτέλεσμα να αστοχίσει.

Με βάση τον Newmark το 1965 έχουμε μια προσέγγιση για την συμπεριφορά ενός πρανούς όταν ο συντελεστής ασφαλείας του είναι μικρότερος από 1 και η ολισθαίνουσα δεν ισορροπεί πλέον και επιταχύνεται από μια ανισόρροπη δύναμη. Η κατάσταση είναι παρόμοια με ένα προσομοίωμα στο οποίο η ανάπτυξη των σεισμικών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας (Εικόνα 3.2^α), είναι ανάλογη των μετακινήσεων που προκαλούνται, καθώς ένα άκαμπτο σώμα ολισθαίνει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο (Εικόνα 3.2^β), ύστερα από σεισμική διέγερση.



Εικόνα 4.2 Αναλογία ανάμεσα σε α) προσομοίωμα εδαφικής μάζας που αστοχεί και β) σώμα που ολισθαίνει σε κεκλιμένο επίπεδο

(Πηγή: Kramer, 1996)

Ο Newmark χρησιμοποίησε την μέθοδο αυτή για τον υπολογισμό της μόνιμης μετατόπισης σε ένα πρανές, υπό οποιαδήποτε εδαφική κίνηση. Οι σεισμικές μετακινήσεις αναπτύσσονται όταν οι αδρανειακές δυνάμεις του άκαμπτου σώματος υπετθούν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι μετακινήσεις αυτές υπολογίζονται με διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης, δηλαδή της διαφοράς της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης του σεισμικού κραδασμού από την κρίσιμη ψευδοστατική επιτάχυνση. Ο συντελεστής ασφαλείας με την παραπάνω διαδικασία υπολογίζεται από τον τύπο:

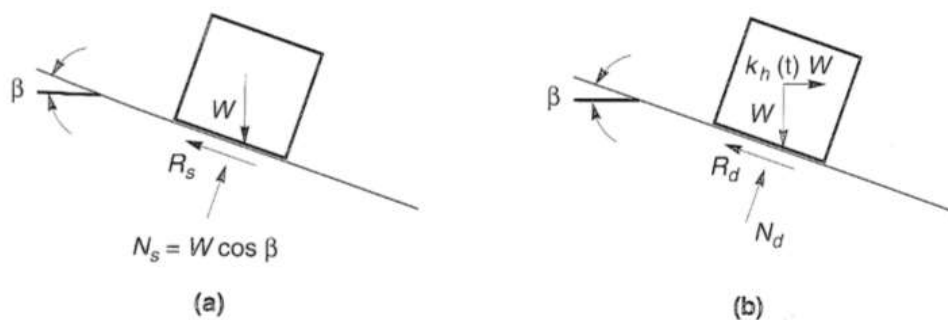
$$FS = \frac{\text{Αντιστεκόμενες δυνάμεις}}{\text{Σύνολο στατικών κινητήριων δυνάμεων}} = \frac{R_s}{D_s} = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi}{W \cdot \sin \beta} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

Όπου:

φ : είναι η γωνία τριβής σώματος και εδάφους

Θεωρώντας και την επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων που εφαρμόζονται στο σώμα, από την επίδραση της οριζόντιας δόνησης του κεκλιμένου εδάφους με επιτάχυνση $a_h(t) = k_h(t) \cdot g$, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή η οριζόντια επιτάχυνση θα προκαλέσει μια αδρανειακή δύναμη $k_h \cdot W$. Όταν η αδρανειακή δύναμη δράσει προς τα κάτω, επιλύοντας τις δυνάμεις κάθετα στο κεκλιμένο επίπεδο προκύπτει:

$$FS_d(t) = \frac{\text{διαθέσιμη δύναμη αντίστασης}}{\text{ψευδοστατική κινητήρια δύναμη}} = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{[\cos \beta - k_h(t) \cdot \sin \beta] \cdot \tan \varphi}{\sin \beta + k_h(t) \cdot \cos \beta}$$

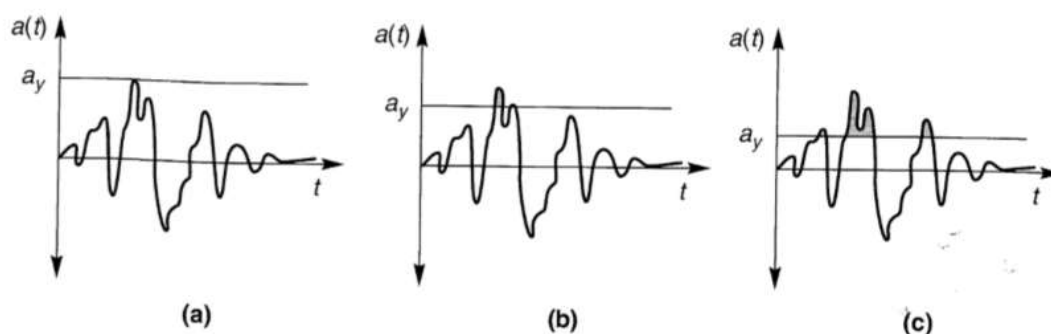


Εικόνα 4.3 Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα εδαφικό ακίνητο σώμα υπό α) στατικές συνθήκες, β) δυναμικές συνθήκες.

(Πηγή: Kramer, 1996)

Έτσι, ο δυναμικός συντελεστής ασφαλείας μειώνεται όταν αυξάνεται το k_h , ενώ για μια θετική τιμή του k_h που προκύπτει συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1. Αυτός ο συντελεστής αποτελεί τον κρίσιμο συντελεστή k_y , που αντιστοιχεί στην κρίσιμη $a_y = k_y \cdot g$. Η κρίσιμη επιτάχυνση είναι η ελάχιστη ψευδοστατική επιτάχυνση που απαιτείται ώστε να επέλθει αστάθεια στην εδαφική μάζα και η υπέρβασή της να οδηγήσει σε αστοχία και μεταβολή της θέσης της στο επίπεδο.

Στην μέθοδο ολίσθησης πρσανούς αναμένονται μόνιμες μετατοπίσεις ίσες με το μηδέν, αν οι μέγιστες επιταχύνσεις κατά την διάρκεια του σεισμού, δεν ξεπεράσουν την τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης ($a_y/a_{max} \geq 1$). Έτσι γίνεται κατανοητό ότι οι μόνιμες μετατοπίσεις για ένα πρσανές με μικρή κρίσιμη επιτάχυνση θα είναι μεγαλύτερες από αυτές ενός άλλου με μεγάλη κρίσιμη επιτάχυνση.



Εικόνα 4.4 Μόνιμες μετατοπίσεις πρσανούς εξαρτώμενες από την σχέση κρίσιμης και μέγιστης επιτάχυνσης: α) δεν υπάρχουν μετατοπίσεις γιατί η μέγιστη επιτάχυνση δεν ξεπερνά την τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης, β), γ) υπάρχουν μόνιμες μετατοπίσεις γιατί η μέγιστη επιτάχυνση ξεπερνάει σε κάποια σημεία την τιμή της κρίσιμης.

(Πηγή: Kramer, 1996)

Οι παραδοχές που σχετίζονται με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι:

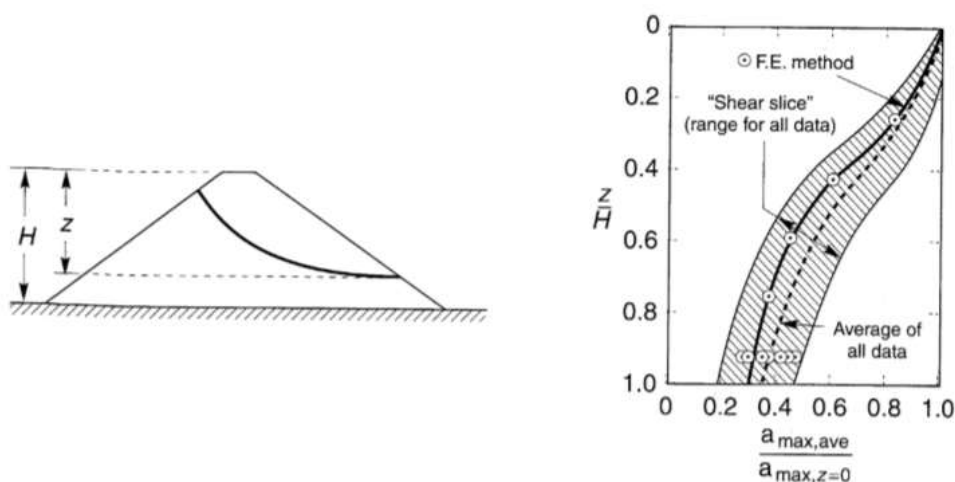
- Η επιφάνεια αστοχίας (ολίσθησης) είναι επίπεδη
- Η εδαφική μάζα που ολισθαίνει είναι απολύτως άκαμπτη
- Η σεισμική κίνηση είναι μόνο οριζόντια
- Η διατμητική αντοχή του εδάφους δεν μειώνεται λόγω της σεισμικής κίνησης
- Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι απολύτως πλαστική

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος ολίσθησης του πρσανούς είναι μια εύχρηστη μέθοδος για τον υπολογισμό των μόνιμων μετατοπίσεων μετά το σεισμό. Ωστόσο οι παραδοχές στις οποίες υπόκειται αυτή η μέθοδος επηρεάζουν την ακρίβειά της, ενώ θεωρεί ότι το ολισθαίνον κινείται σαν στερεό σώμα και ότι η επιφάνεια αστοχίας του είναι επίπεδη το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα αφού τα πρσανή υπόκεινται σε παραμόρφωση. Επίσης η μέθοδος βασίζεται στην πλαστική συμπεριφορά του εδάφους στην επιφάνεια ολίσθησης κάτι το οποίο απέχει πολύ από την πραγματικότητα και τέλος δεν λαμβάνονται υπόψιν οι κατακόρυφες μετακινήσεις.

Η χρήση της μεθόδου συναντάται μόνο σε φράγματα που δεν υποβάλλονται σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης, αν και γίνεται να ληφθούν υπόψιν συντηρητικές εκτιμήσεις παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας διατμητικές αντοχές μετά την ρευστοποίηση, για υλικά που μπορούν να ρευστοποιηθούν στο σώμα ή στο θεμέλιο του φράγματος στην ανάλυση.

Ο Makdisi και ο Seed (1978) χρησιμοποίησαν μέσες επιταχύνσεις υπολογισμένες από την προσέγγιση του Chopra (1966) και αναλύσεις κεκλιμένου σώματος ώστε να υπολογιστούν οι μόνιμες μετατοπίσεις που προκαλούνται από το σεισμό σε χωμάτινα φράγματα και αναχώματα. Αυτή η μεθοδολογία λαμβάνει σε αντίθεση με τον Newmark λαμβάνει υπόψιν της την ευκαμψία της ολισθαίνουσας μάζας. Κάνοντας απλές υποθέσεις σχετικά με τα αποτελέσματα των δυναμικών πεπερασμένων στοιχείων και τις αναλύσεις διατμητικής δοκού αυτής της κατασκευής, αναπτύχθηκε μια απλή προσέγγιση για την πρόβλεψη των μόνιμων μετατοπίσεων.

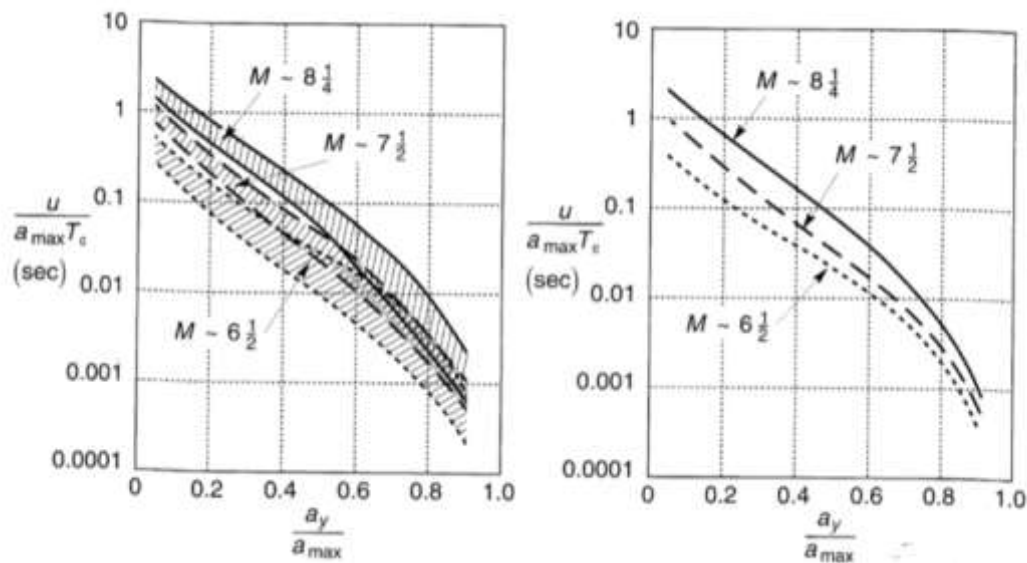
Σε αυτή την προσέγγιση, η κρίσιμη επιτάχυνση για μια επιφάνεια αστοχίας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την κρίσιμη δύναμη η οποία ισούται με 80% της αστράγγιστης αντοχής του εδάφους. Η δυναμική απόκριση του φράγματος υπολογίζεται από έναν λόγο επιτάχυνσης ο οποίος διαφέρει με το βάθος και την επιφάνεια αστοχίας κοντά στο ύψος του φράγματος.



Εικόνα 4.5 Ποικιλία των μέγιστων επιταχύνσεων, σε σχέση με το βάθος της επιφάνειας αστοχίας για φράγματα

(Πηγή: Kramer, 1996)

Εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή σε διάφορα φράγματα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο υπολογισμός των μόνιμων μετατοπίσεων ισούται με a_y/α_{max} . Η διασπορά στις προβλεπόμενες μετατοπίσεις μειώθηκε με την ομαλοποίηση των μετατοπίσεων που αναφέρονται στην μέγιστη επιτάχυνση της βάσης και στη βασική περίοδο του φράγματος.



Εικόνα 4.6 Ποικιλία των κανονικοποιημένων μόνιμων μετατοπίσεων, σε σχέση με την λρίσιμη επιτάχυνση για σεισμούς διαφορετικών μεγεθών: α) σύνοψη για αρκετούς σεισμούς και φράγματα, β) μέσες τιμές

(Πηγή: Kramer, 1996)

4.1.3 Μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων

Η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων είναι πιο ακριβής προσομοίωσης σεισμικής συμπεριφοράς ενός φράγματος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών, με τις οποίες υπολογίζονται οι αδρανειακές επιταχύνσεις οι οποίες αναπτύσσονται στο φράγμα, όπως και οι μόνιμες παραμορφώσεις σε αυτό, κατά την διάρκεια του σεισμού.

Μια πλήρης και λεπτομερής ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων απαιτεί εκτενείς βάσεις δεδομένων, καθώς και εξειδικευμένες δεξιότητες. Η μεγαλύτερη δυσκολία στη χρήση αυτής της μεθόδου είναι η κατάστρωση προσομοιωμάτων που να είναι αντιπροσωπευτικά του εδάφους που πρόκειται να εξεταστεί. Ακόμα, απαιτείται ακριβής χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών στο σώμα του φράγματος, όπως και της θεμελίωσης, καθώς και κατάλληλο ιστορικό σεισμών που να αντιπροσωπεύουν τον σεισμό σχεδιασμού της περιοχής του φράγματος. Επιπλέον, για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των φραγμάτων, χρησιμοποιείται ένα μεγάλο φάσμα προσεγγίσεων, πράγμα που κάνει την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων πολύ δαπανηρή και έτσι επιλέγεται να ακολουθηθεί μόνο για μεγάλα φράγματα που η αστοχία τους θα οδηγήσει σε ψηλά επίπεδα κινδύνου ή φράγματα τα οποία βρίσκονται πάνω σε ενεργά ρήγματα.

Ο Seed (1979) και ο Finn (1986) συνόψισαν τις διαδικασίες που ακολουθούνται για την δυναμική ανάλυση των χωμάτινων φραγμάτων ως εξής:

- Προσδιορισμός της στατικής τάσης από τον σεισμό, χρησιμοποιώντας ένα στατικό αριθμητικό προσομοίωμα του αναχώματος για αρχική αποτελεσματική ορθή και διατμητική τάση και τάση διάτμησης, κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Είναι σύνηθες η πρακτική να χρησιμοποιεί ένα δισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο του μέγιστου τμήματος του φράγματος στην ανάλυση. Τα αριθμητικά προσομοιώματα συνήθως βασίζονται σε προσεγγίσεις πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών.
- Αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του εδάφους από επιτόπιες και κυκλικές εργαστηριακές δοκιμές για τις ιδιότητες εδάφους εισόδου, που απαιτούνται στις δυναμικές αναλύσεις
- Για το αριθμητικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο πρώτο βήμα, προσδιορισμός της δυναμικής απόκρισης του φράγματος και της θεμελίωσης χρησιμοποιώντας ικανοποιητικό αριθμό σεισμικών διεγέρσεων. Οι σεισμικές διεγέρσεις πρέπει να περιλαμβάνουν κατάλληλα επιταχυνσιογραφήματα, που αντιπροσωπεύουν σεισμούς μεγέθους και μέγιστης επιτάχυνσης, παρόμοια με εκείνα του σεισμικού σχεδιασμού από τους σεισμούς που καταγράφηκαν σε παρόμοιο γεωλογικό περιβάλλον. Η απόκριση του φράγματος προσδιορίζεται από δυναμική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή προσομοιωμάτων πεπερασμένων διαφορών, χρησιμοποιώντας είτε ισοδύναμες γραμμικές, είτε μη γραμμικές διαδικασίες.
- Τα προσομοιώματα τάσεων-παραμορφώσεων που χρησιμοποιούνται στη δυναμική ανάλυση θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις ακόλουθες πτυχές της συμπεριφοράς των υλικών: α) μη γραμμικότητα υλικού, β) εξάρτηση τάσεων-παραμορφώσεων, γ) εξάρτηση από τις τάσεις, δ) εγγενή ανισοτροπία, ε) εξάρτηση από τον βαθμό των παραμορφώσεων. Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος τάσεων-παραμορφώσεων θα πρέπει ιδανικά να βασίζεται σε δοκιμές αδιατάρακτων δειγμάτων
- Αξιολόγηση των παραμορφώσεων του αναχώματος, με βάση τις πιθανές παραμορφώσεις για μεμονωμένα στοιχεία
- Υπολογισμός συνολικής παραμόρφωσης, με βάση τα φορτία βαρύτητας και τις ιδιότητες του υλικού, για να καθοριστεί αν βρίσκονται στα αποδεκτά όρια.

4.2 Κανονισμοί για το σχεδιασμό φραγμάτων

Ο σωστός σχεδιασμός των φραγμάτων αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα τόσο όσον αφορά την ευστάθειά του και την ασφάλεια ανθρώπινης ζωής και περιουσίας σε περίπτωση σεισμικής δόνησης. Η κάθε χώρα έχει τους δικούς της αντισεισμικούς σχεδιασμούς οι οποίοι θα πρέπει να τηρούνται κατά γράμμα ώστε σύμφωνα με τις απαιτήσεις να ανεγερθούν ανθεκτικές κατασκευές έναντι ισχυρών σεισμών. Σε χώρες όπως η Ελλάδα στην οποία υπάρχει έντονη σεισμική δραστηριότητα η τήρηση των αντισεισμικών κανόνων είναι μείζονος σημασίας. Παρακάτω γίνεται αναφορά των αντισεισμικών κανονισμών που ισχύουν στην Ελλάδα και παγκοσμίως.

4.2.1 Ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός

Στον ελληνικό αντισεισμικό σχεδιασμό (ΕΑΚ 2000) δίνεται έμφαση κυρίως σε κτιριακές κατασκευές και όχι σε φράγματα ξεχωριστά. Παρόλο αυτά γίνεται αναφορά σε αναχώματα και πρανή, με βάση αυτά μπορούμε να σχεδιάσουμε τα φράγματα και να ελέγξουμε την ευστάθειά τους, ενώ βασίζεται κυρίως στην ψευδοστατική μέθοδο. Σχετικά με τον σχεδιασμό των πρανών με βάση τον ελληνικό αντισεισμικό σχεδιασμό η ευστάθεια φυσικών και τεχνητών πρανών κατά τον σεισμικό κραδασμό ελέγχεται με θεώρηση των ακολούθων πρόσθετων επιταχύνσεων που δρουν στην εδαφική μάζα.

- $a_h = a_\pi$
- $a_v = \pm 0,50 * a_\pi$

Όπου

a_h : η οριζόντια επιτάχυνση

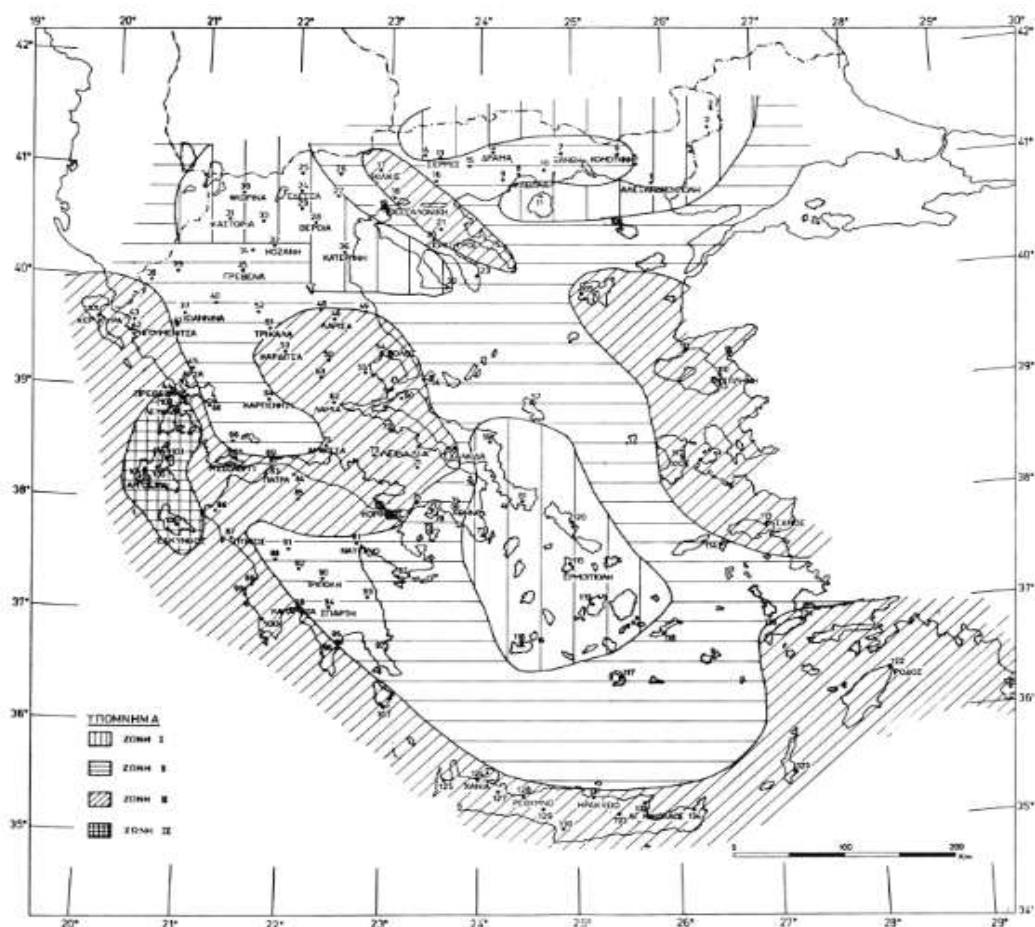
a_v : η κατακόρυφη επιτάχυνση

a_π : η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του πρανούς, που λαμβάνεται ίση με $0,5 * a$, για φυσικά πρανή

a : η ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται οι ζώνες σεισμικής επικυδυνότητας για τον ελλαδικό χώρο και οι μέγιστες επιταχύνσεις που μπορούν να υπάρξουν σε κάθε μία από αυτές τις ζώνες, σύμφωνα με τον ελληνικό αντισεισμικό κανονισμό του 2000

ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ



Εικόνα 4.7 Χάρτες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας

(Πηγή: ΕΑΚ 2000)

Πίνακας: Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας

(Πηγή: ΕΑΚ 2000)

Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III	IV
α	0,12	0,16	0,24	0,36

Η ευστάθεια των αναχωμάτων με ύψος μέχρι και 15 m θα ελέγχεται με θεώρηση προσθέτων οριζοντίων ενεργών επιταχύνσεων της μάζας τους, που μεταβάλλονται από:

$a_B = 0,50 * \alpha$ στην βάση, μέχρι

$a_k = a_B * \beta(T)$ στην κορυφή του αναχώματος,

Όπου,

a : είναι η ανηγμένη επιτάχυνση του εδάφους

$\beta(T)$: είναι η φασματική μεγέθυνση που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T του έργου

Αν δεν γίνει ακριβέστερος υπολογισμός, μπορεί να ληφθεί ότι $T=2,5*(H/V_S)$

Όπου,

V_S : η μέση τιμή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων στο ανάχωμα.

Ο ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός δεν καλύπτει αναχώματα με ύψος μεγαλύτερο από 15 μέτρα, άρα ούτε και φράγματα πάνω από αυτό το ύψος. Στις περιπτώσεις αυτές, θα πρέπει να γίνεται ειδική γεωτεχνική και σεισμική μελέτη.

4.2.2 Ευρωπαϊκός αντισεισμικός σχεδιασμός

Στον ευρωπαϊκό αντισεισμικό κανονισμό (EC8, 2004) δεν γίνεται ειδική αναφορά για τις κατασκευές φραγμάτων. Παρόλο αυτά (όπως και στον ελληνικό) γίνεται λόγος για πρηνή και αποτελεί ουσιαστικά έναν συμπληρωματικό κανονισμό του εθνικού κανονισμού. Ο κανονισμός αυτός αναφέρει ότι θα πρέπει, σε περίπτωση σεισμού, να προστατεύεται η ανθρώπινη ζωή, να περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό οι ζημιές και οι αστοχίες και να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα των σημαντικών υποδομών. Ως προς τα πρηνή, επισημαίνει ότι για αυτά ο σεισμός σχεδιασμού θα υπολογίζεται μέσω απλοποιημένων μεθόδων δυναμικής ανάλυσης, όπως μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ή μέσω μιας ψευδοστατικής μεθόδου. Έτσι, μέσω της ψευδοστατικής ανάλυσης υπολογίζονται οι πρόσθετες σεισμικές δυνάμεις αδράνειας, οι οποίες δρουν στο πρηνές:

Για την οριζόντια διεύθυνση ισχύει:

$$F_h = \frac{0,5 * a_{gR} * \gamma_I * S * W}{g}$$

Για την κατακόρυφη διεύθυνση ισχύει:

$$F_V = \pm 0,5 * F_h, \text{ για } \frac{a_{vg}}{a_{gR}} > 0,6$$

$$F_V = \pm 0,33 * F_h, \text{ για } \frac{a_{vg}}{a_{gR}} \leq 0,6$$

Όπου,

a_{gR} : είναι η μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους

a_{vg} : είναι η επιτάχυνση σχεδιασμού κατά την κατακόρυφη διεύθυνση

γ_I : είναι ένας σημαντικός συντελεστής της κατασκευής

S: είναι η παράμετρος για τον τύπο του εδάφους

W: είναι το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας

g: είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

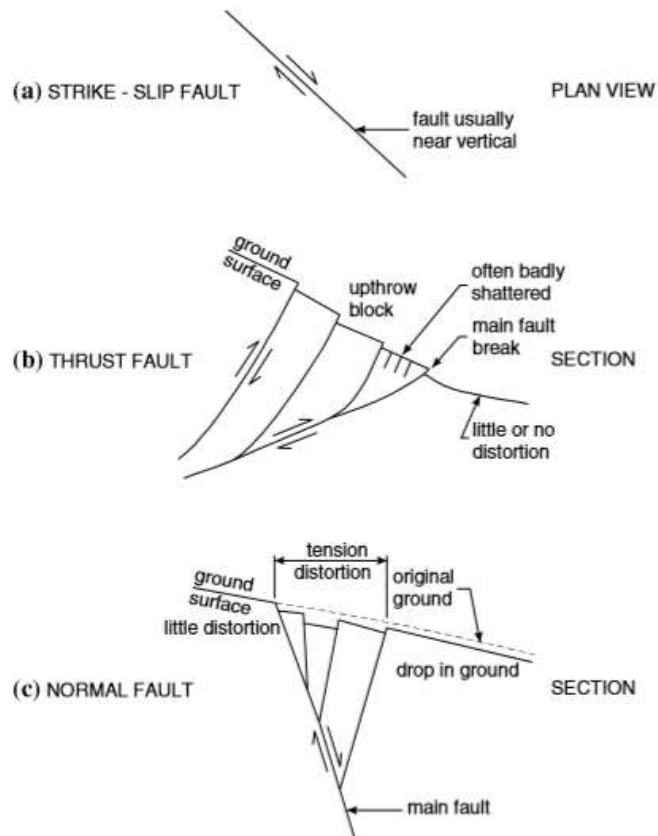
Ωστόσο, η ψευδοστατική ανάλυση δεν προβλέπεται σε εδάφη που μπορούν να αναπτύσσουν υψηλές πιέσεις στους πόρους λόγω της ύπαρξης νερού. Έτσι, η αύξηση της πίεσης των πόρων, θα πρέπει να υπολογίζεται με κατάλληλους ελέγχους ή με εμπειρικούς τύπους, στην περίπτωση χρήσης της ψευδοστατικής μεθόδου.

Επειδή ο ευρωπαϊκός αντισεισμικός κανονισμός δεν κάνει ειδική αναφορά στην κατασκευή φραγμάτων. Για αυτό τον λόγο για την αντισεισμική τους σχεδίαση χρησιμοποιούνται οι ομοσπονδιακές οδηγίες των ΗΠΑ (FEMA) και οι οδηγίες της διεθνής επιτροπής μεγάλων φραγμάτων (ICOLD) όπου περιγράφονται αναλυτικά οι κανόνες που πρέπει να τηρούνται για την καλό σχεδιασμό των φραγμάτων.

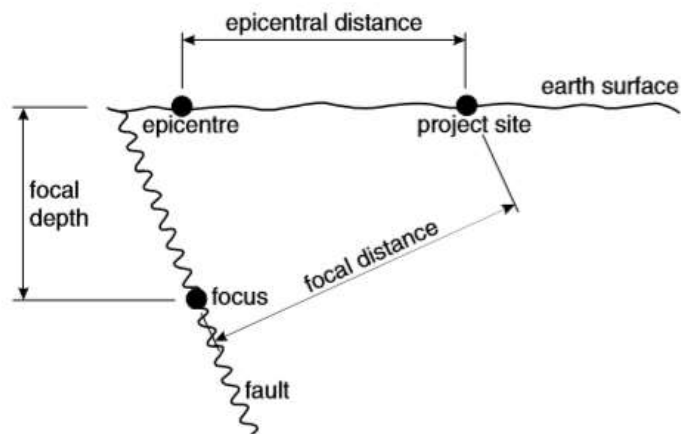
4.2.3 Χαρακτηριστικά σεισμών

Η μετατόπιση του ρήγματος σε μια σεισμική δόνηση μπορεί να διαφέρει από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα. Το ρήγμα είναι πιο πιθανό να αστοχήσει σε μελλοντικούς σεισμούς, έτσι συνολικές μεγάλες μετατοπίσεις ίσως προκύψουν από αλεπάλληλους σεισμούς οι οποίοι συμβαίνουν σε βάθος χρόνου. Παρακάτω φαίνονται οι κατηγορίες του ρήγματος και πως επιδρούν στο έδαφος κοντά σε αυτό. Το σημείο στην επιφάνεια του ρήγματος όπου ξεκινάει μια μετατόπιση ονομάζεται το κέντρο ή υπόκεντρο και το επίκεντρο του σεισμού είναι το σημείο στο έδαφος κάθετα από το κέντρο αλλά μερικές φορές αναπαράγεται σε δύο κατευθύνσεις. Η σεισμική δόνηση του εδάφους καταγράφεται από σειсмоγράφο. Οι σύγχρονοι σειсмоγράφοι καταγράφουν τρία στοιχεία της κίνησης από ανατολικά προς δυτικά, από βόρεια προς νότια και κάθετα.

Όσον αφορά τα σεισμικά κύματα υπάρχουν δύο κατηγορίες σεισμικών κυμάτων τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα κύματα (P και S αντίστοιχα) τα κύματα P διαδίδονται παράλληλα με την κατεύθυνση της σεισμικής διάδοσης, ενώ τα κύματα S είναι συνήθως μεγαλύτερα από τα κύματα S. Επίσης τα πρωτεύοντα κύματα (P) διαδίδονται πιο γρήγορα σε σχέση με τα δευτερεύοντα κύματα (S) και είναι αυτά που φτάνουν και καταγράφονται πρώτα.



Εικόνα 4.8 Παρουσίαση διαγραμμάτων των κατηγοριών των ρηγμάτων και οι επιδράσεις του εδάφους



Εικόνα 4.9 Ορισμοί των σεισμικών όρων

4.2.4 Ομοσπονδιακές οδηγίες ΗΠΑ

Οι οδηγίες των ΗΠΑ, που αναλύονται στο FEMA (Federal Guidelines for Dam Safety), παρέχουν ένα βασικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο των φραγμάτων, υπό την επίδραση του σεισμού.

Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης του σεισμικού κινδύνου σε μια τοποθεσία, εξαρτάται από την σεισμικότητα μιας περιοχής, την κατηγορία του εδάφους της και τις συνέπειες που θα υπάρξουν σε περίπτωση αστοχίας της κατασκευής. Ο

σχεδιασμός και αξιολόγηση των φραγμάτων υπό σεισμική φόρτιση θα πρέπει να βασίζεται σε συγκρίσιμο επίπεδο μελέτης και ανάλυσης για κάθε φάση της μελέτης όπως είναι σεισμοτεκτονικές, γεωλογικές, γεωτεχνικές και γεωτεχνικές έρευνες. Τα φράγματα τα οποία σχεδιάζονται σε περιοχές με χαμηλή σεισμικότητα δεν απαιτούν εκτεταμένες σεισμικές έρευνες και αναλύσεις, εκτός αν μια πιθανή αστοχία με κίνδυνο απωλειών ανθρώπινων ζωών.

Κατά την φάση σχεδιασμού του έργου για την περιγραφή της επίδρασης του σεισμού σε αυτήν έχουμε χρησιμοποιήσει διάφορους όρους όπως είναι:

- Μέγιστος πιθανός σεισμός (MCE): Είναι ο μεγαλύτερος σεισμός που μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος ενός ρήγματος ή μέσα σε μια συγκεκριμένη σεισμοτεκτονική επαρχία ή περιοχή, κάτω από το σημερινό τεκτονικό πλαίσιο. Ο μέγιστος πιθανός σεισμός συνήθως καθορίζεται από το μήκος και τον τύπο του ρήγματος. Είναι εφικτό να υπολογιστεί το εστιακό βάθος και η εστιακή απόσταση.
- Ο μέγιστος σεισμός σχεδιασμού (MDE) ή ο σεισμός αξιολόγησης (SEE): είναι ο μέγιστος σεισμός που παράγεται από την σεισμική κίνηση του εδάφους σύμφωνα με τον οποίο το φράγμα έχει σχεδιαστεί ή αξιολογηθεί. Ο σεισμός μπορεί να είναι μικρότερος ή ίσος σε σύγκριση με τον μέγιστο σεισμό σχεδιασμού. Το μέγεθος του μέγιστου σεισμού σχεδιασμού (MDE ή SEE) επηρεάζεται από την ταξινόμηση των κινδύνων του φράγματος (FEMA (1998), από την κρισιμότητα λειτουργίας του έργου (παροχή νερού, αναψυχή, έλεγχος πλημμυρών κλπ), από τον χρόνο αποκατάστασης της λειτουργικότητας του φράγματος ύστερα από τον μέγιστο σεισμό σχεδιασμού. Το επιτρεπτό επίπεδο βλάβης κατά τον MDE είναι η μη απελευθέρωση νερού στον ταμιευτήρα για να μην υπάρξει κίνδυνος ανθρώπινης ζωής και απώλειες σε περιουσίες.
- Λειτουργικός σεισμός βάσης (OBE): ο λειτουργικός σεισμός βάσης ο οποίος προκαλεί μόνο μικρές και αποδεκτές ζημιές στο φράγμα και αναμένεται να συμβεί κατά την διάρκεια ζωής του φράγματος. Το φράγμα ύστερα από το σεισμό εξακολουθεί να λειτουργεί με ελάχιστες ή καθόλου ζημιές χωρίς διακοπή της λειτουργίας του.

Σε περίπτωση που το φράγμα δεν έχει σχεδιαστεί σωστά μια μικρή σχετικά σεισμική μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά στο φράγμα. Για αυτό τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να λαμβάνονται τα απαραίτητα αμυντικά μέτρα ώστε να περιοριστούν οι ζημιές. Τέτοια αμυντικά μέτρα για χωμάτινα κυρίως φράγματα είναι:

- Αφαίρεση των υλικών θεμελίωσης τα οποία μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα
- Χρήση μεγάλων ζωνών πυρήνα από πλαστικά υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση
- Χρήση καλά διαβαθμισμένων ευρέως ζωνών φίλτρου ανάντη του πυρήνα, που βοηθάνε στην αποφυγή τυχόν ρωγμών που μπορεί να ανοίξουν, όπως

και κατάντη, ώστε να αποτραπεί η κίνηση σωματιδίων που διαβρώνονται από τον πυρήνα

- Χρησιμοποίηση λεπτομερειών στέψης και προστασία κατάντη κλίσης, που θα εμποδίσει σε μεγάλο βαθμό την διάβρωση σε περίπτωση μέτριας υπερπλήρωσης
- Ψέκαση του πυρήνα του αναχώματος στις επαφές στήριξης
- Προσδιορισμός του πυρήνα, ώστε να επιτευχθεί η χαμηλότερη φρεατική γραμμή μέσα στο ανάχωμα
- Σταθεροποίηση των πρανών που περιβάλλουν τον ταμιευτήρα ώστε να αποφευχθούν τυχόν κατολισθήσεις εντός του
- Παροχή ειδικών λεπτομερειών σχετικά με την διεπαφή βάσης-θεμελίωσης, σε περίπτωση μετακίνησης της βάσης θεμελίωσης
- Παροχή ελεύθερου περιθωρίου, ώστε να μην προκληθούν προβλήματα σε περίπτωση καθίζησης ή πτώσεων εδαφικών υλικών στον ταμιευτήρα
- Συμπαγή και συμπυκνωμένα υλικά γεμίσματος του αναχώματος επαρκώς ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δημιουργία υπερπίεσεων των πόρων
- Παροχή φίλτρων ή άλλων μέτρων για την αποφυγή της διάβρωσης κατά μήκος του εξωτερικού μέρους των αγωγών.

Για ένα φράγμα και μία θεμελίωση που δεν υπόκεινται σε ρευστοποίηση, μπορεί να σημειωθούν δευτερεύουσες παραμορφώσεις, που δεν θα οδηγήσουν σε αστοχία αν ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Τα υλικά του φράγματος και της θεμελίωσης δεν υποβάλλονται σε ρευστοποίηση και δεν περιλαμβάνουν χαλαρά εδάφη ή ευαίσθητους αργίλους
- Το φράγμα είναι καλά κατασκευασμένο και συμπυκνωμένο τουλάχιστον στο 95% του μέγιστου βαθμού ξηρότητας ή σχετική πυκνότητα μεγαλύτερη από 80%
- Τα πρανή του φράγματος είναι 3:1 (Κ:Ο) ή μικρότερη και η φρεατική γραμμή είναι κάτω από τι κατάντη πρανές του αναχώματος
- Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη βάση του φράγματος είναι περισσότερη από 0,2 g
- Οι στατικοί παράγοντες ασφαλείας για όλες τις πιθανές επιφάνειες αστοχίας να έχουν τιμή μεγαλύτερη από 1,5 υπό συνθήκες φόρτισης και πιέσεις των πόρων που αναμένονται ακριβώς πριν τον σεισμό
- Οι κυμματισμοί κατά την διάρκεια του σεισμού είναι τουλάχιστο 3-5% του ύψους του φράγματος και όχι μικρότερο από 0,9 μέτρα
- Δεν θα πρέπει να υπάρχουν κρίσιμα στοιχεία που θα παρουσιάσουν βλάβες από μικρές κινήσεις του φράγματος ή να προκαλέσουν ρωγμές επιτρέποντας την εσωτερική διάβρωση.

Εαν δεν πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις , απαιτείται μια πιο λεπτομερής μελέτη. Αυτό περιλαμβάνει την εκτίμηση του δυναμικού της ρευστοποίησης, της ανάλυσης σταθερότητας μετά τον σεισμό και της ανάλυσης των παραμορφώσεων. Αν δεν υπάρχουν υλικά που μπορούν να ρευστοποιηθούν αυτό μπορεί να γίνει συνήθως με την απλή προσέγγιση πρανούς του Newmark. Σε καταστάσεις όπου η πίεση των πόρων μπορεί να αναπτυχθεί , ίσως είναι απαραίτητο να διεξαχθούν πιο λεπτομερείς αναλύσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ο στόχος της ανάλυσης των παραμορφώσεων είναι να καθοριστεί κατά πόσο οι πιθανές κινήσεις είναι ικανές να επιτρέψουν την υπερχειλίση του ταμιευτήρα ή εάν οι ρωγμές σε κρίσιμες τοποθεσίες μπορεί να προκαλέσουν αστοχία από εσωτερική διάβρωση. Από αυτά τα αποτελέσματα και την ιστορική απόδοση των χωμάτινων φραγμάτων που υποβάλλονται σε σεισμική φόρτιση, πρέπει να γίνει μια συνολική εκτίμηση αν το φράγμα και η θεμελίωση μπορεί να είναι ασφαλή παρά την σεισμική φόρτιση. (FEDERAL GUIDELINES FOR DAM SAFETY 2005).

4.3 Περιπτώσεις αστοχίας φραγμάτων λόγω του σεισμού Φράγμα Fujinuma (Ιαπωνία, 2011)

Το φράγμα Funjinuma ήταν ένα χωμάτινο φράγμα στην πόλη Sukagawa της Ιαπωνίας. Χτίστηκε στον ποταμό Ebana, 16 χιλιόμετρα δυτικά της Sukagawa. Η κατασκευή του φράγματος ξεκίνησε το 1937 και ολοκληρώθηκε το 1949, επειδή σταμάτησε εξαιτίας του Β' Παγκοσμίου πολέμου και συνεχίστηκε μετά το πέρας αυτού. Το φράγμα σχεδιάστηκε με ύψος 18,5 μέτρα και μήκος 133 μέτρα με κατασκευαστικό όγκο 99000 κυβικά μέτρα και πλάτος στέψης 6 μέτρα. Περίπου 300 μέτρα προς τα νότια υπήρχε ένα βοηθητικό φράγμα με ύψος 6 μέτρων και μήκος περίπου 60 μέτρων. Το βοηθητικό φράγμα βοηθούσε την δεξαμενή στο να διατηρεί τα σχεδιασμένα επίπεδα δεδομένου ότι η τοπογραφία δεν θα επέτρεπε στο εννιαίο κύριο φράγμα να το κάνει. Η λεκάνη απορροής της περιοχής όπου κατασκευάστηκε το φράγμα είχε έκταση περίπου 8,8 τετραγωνικά χιλιόμετρα, ενώ η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα ήταν 1504000 κυβικά μέτρα με έκταση 49 στρέμματα.



Εικόνα 4.10 Ταμιευτήρας φράγματος Fujinuma

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

Στις 11 Μαρτίου του 2011 το φράγμα αστόχησε, 20 με 25 λεπτά μετά από τον σεισμό Tohoku, μεγέθους 9 ρίχτερ, με επίκεντρο περίπου 70 χιλιόμετρα ανατολικά της χερσονήσου Oshika της Tohoku σε υποβρύχιο βάθος 30 χιλιομέτρων. Ο ταμιευτήρας του φράγματος ήταν σχεδόν γεμάτος όταν έγινε ο σεισμός με αποτέλεσμα το νερό να ξεχειλίσει υπερβαίνοντας την στέψη του φράγματος. Οι ντόπιοι κάτοικοι ανέφεραν ότι άκουσαν μια δυνατή έκρηξη πριν δουν την πλημμύρα. Η πλημμύρα που προκλήθηκε κατέστρεψε το χωριό Naganuma, κατάντη του φράγματος, με αποτέλεσμα να χάσουν την ζωή τους 8 άνθρωποι.

Με βάση την μελέτη που πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2011 αποδείχθηκε ότι η υπερχειλίση του ταμιευτήρα προήλθε από πτώση του σημείου στέψης. Επιπλέον προσδιορίστηκαν και κάποιες πιθανές αιτίες ώστε να προσδιοριστεί το περιστατικό αυτό, όπως:

1. Αστάθεια κατάντη πρανούς, εξαιτίας χρήσης οργανικών γεωυλικών που δεν ενδείκνυνται για αντοχή σε σεισμικά γεγονότα
2. Αστάθεια στο ανάντη πρανές
3. Αστάθεια κατάντη πρανούς και κατολίσθηση αυτού, εξαιτίας κακής συμπύκνωσης των υλικών κατά την διάρκεια της πλήρωσης του ταμιευτήρα
4. Διάβρωση μέσα από την είσοδο του νερού στις ρωγμές του σώματος του φράγματος και εσωτερική διαρροή

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται ορισμένες από τις καταστροφές που προκάλεσε ο σεισμός



Εικόνα 4.11 Κενός ταμιευτήρας του φράγματος ύστερα από την κατάρρευση

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



Εικόνα 4.12 Αστοχία που προκλήθηκε στον ταμιευτήρα του φράγματος

(Πηγή: <http://www.vncold.vn>)



Εικόνα 4.13 Αστοχία στο σώμα του φράγματος (πάνω) και στο δεξιό του αντέρεισμα (κάτω)

(Πηγή: <http://www.vncold.vn>)



Εικόνα 4.14 Το χωριό Naganuma, μετά την πλημμύρα που προήλθε από την κατάρρευση του φράγματος Fujinuma

(Πηγή: <http://www.vncold.vn>)

Φράγμα San Fernando (ΗΠΑ, 1971)

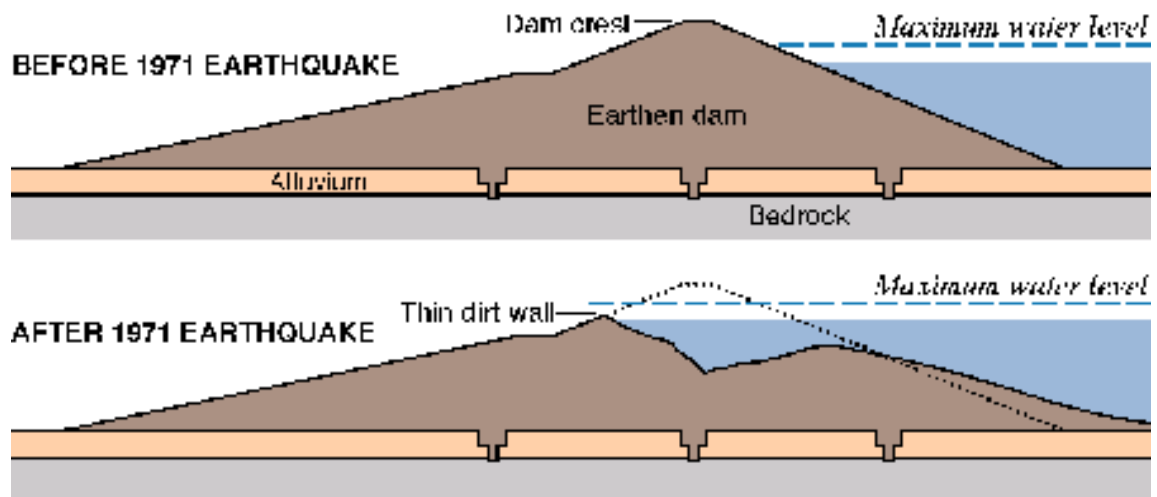
Το φράγμα San Fernando ήταν ένα χωμάτινο φράγμα στην περιοχή της Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1912 και ολοκληρώθηκε το 1916. Ο ταμιευτήρας του φράγματος διαθέτει χωρητικότητα 25000000 κυβικά μέτρα, με σκοπό να παρέχει στην πόλη του Los Angeles.



Εικόνα 4.15 Πανοραμική όψη του φράγματος San Fernando, το οποίο βρίσκεται στην αριστερή γωνία της εικόνας

(Πηγή: <https://damfailures.org>)

Στις 9 Φεβρουαρίου του 1971 ένας σεισμός μεγέθους 6,6 της κλίμακας ρίχτερ προκάλεσε το φαινόμενο της ρευστοποίησης στο φράγμα. Κατά την διάρκεια του σεισμού, η στάθμη του ταμιευτήρα ήταν περίπου 11 μέτρα κάτω από την στέψη του φράγματος. Η σεισμική φόρτιση, προκάλεσε μεγάλες ολισθήσεις στην ανάντη πλευρά του φράγματος εξαιτίας της ρευστοποίησης που υπέστησαν τα εδάφη με αποτέλεσμα την απώλεια της αντοχής τους. Η στέψη του φράγματος μειώθηκε περίπου 10 μέτρα, με αποτέλεσμα να παρασυρθεί μεγάλο μέρος της.



Εικόνα 4.16 Το φράγμα του San Fernando πριν και μετά τον σεισμό του 1971 σε θεωρητικό μοντέλο, όπου παρουσιάζεται το φαινόμενο της ρευστοποίησης

(Πηγή: <https://pubs.usgs.gov>)

Φαίνεται από τα παραπάνω στοιχεία ότι η υπερχειλίση του ταμιευτήρα δεν συνέβη για πολύ λίγο. Σε αντίθετη περίπτωση το νερό θα διάβρωνε το κατάντη πρανές του φράγματος και θα προκαλούσε μια καταστροφική πλημμύρα στην περιοχή, αφού θα απελευθερωνόντουσαν 15000000 τόνοι νερού, θέτοντας σε κίνδυνο την ζωή 80000 ανθρώπων που ζούσαν στο χωριό κατάντη του φράγματος. Το φράγμα ήταν πολύ κοντά στην ολική αστοχία και ανά πάσα στιγμή ένας μετασεισμός θα μπορούσε να προκαλέσει την ολική κατάρρευσή του. Έτσι το χωριό που βρισκόταν κατάντη του φράγματος εκκενώθηκε, μέχρις ότου η στάθμη του νερού να φτάσει σε ασφαλές ύψος πράγμα που διήρκεσε τρεις μέρες. Τελικώς δεν συνέβη ένας μετασεισμός, ωστόσο οι ζημιές που προκλήθηκαν δεν ήταν εφικτό να επισκευαστούν αποτελεσματικά, ώστε το φράγμα να αντέξει σε έναν νέο ισχυρό σεισμό.



Εικόνα 4.17 Γενική όψη του φράγματος San Fernando, στην οποία φαίνεται η ολίσθηση στο ανάντη πρανές

(Πηγή: <https://damfailures.org>)



Εικόνα 4.18 Αστοχία ανάντη πρανούς του φράγματος San Fernando, με άδειο ταμιευτήρα

(Πηγή: <https://damfailures.org>)

Έτσι προτάθηκε ένα καινούργιο φράγμα, με υψηλότερα επίπεδα ασφαλείας σε περίπτωση εμφάνισης σεισμού. Το 1994 συνέβη ένας ισχυρός σεισμός, ο Northridge, μεγέθους 6,7 ρίχτερ, οι επιπτώσεις που είχε στην ακεραιότητα του φράγματος ήταν αποδεκτές και δεν δημιούργησαν σοβαρά προβλήματα

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ RCC

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κομμάτι της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται οι παρακάτω υπολογισμοί και αναλύσεις. Πρώτα δημιουργήσαμε ένα προσομοίωμα ενός φράγματος RCC το οποίο προσομοιάζει όσον το δυνατόν πιο αναλυτικά την συμπεριφορά του υπό συνθήκες διαφόρων φορτίσεων. Για την διεξαγωγή της παραπάνω μελέτης χρησιμοποιήσαμε ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο προσομοιάσαμε το προσομοίωμα και πάνω σε αυτό διεξήχθησαν οι αναλύσεις για διάφορες συνθήκες φόρτισης. Η μέθοδος την οποία χρησιμοποιήσαμε βάση του παραπάνω λογισμικού είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

5.1.1 Το πρόβλημα

Το πρόβλημα με το οποίο ασχοληθήκαμε και το οποίο αναλύεται διεξοδικά στη συνέχεια ήταν η ανάλυση και η μελέτη φράγματος αποτελούμενο από υλικό ισχνού κυλινδρούμενο σκυροδέματος (RCC). Οι αναλύσεις είχαν σχέση με τις ωθήσεις τις οποίες δέχεται με αποτέλεσμα να καταπονούν το κύριο σώμα του φράγματος το οποίο μελετάμε, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους για κάθε περίπτωση φόρτισης.

5.1.2 Λογισμικό

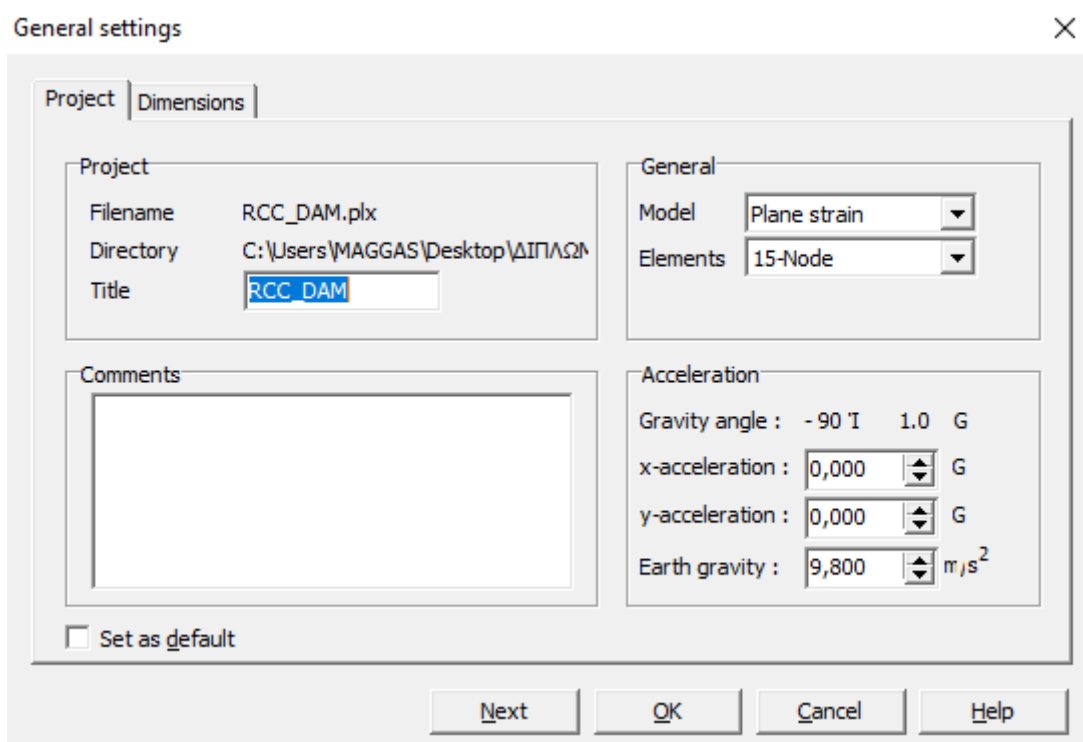
Οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού PLAXIS-2D. Το PLAXIS-2D είναι πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων το οποίο χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει την παραμόρφωση και την ανάλυση σταθερότητας ποικίλων γεωτεχνικών προβλημάτων. Το πρόγραμμα αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα τα οποία είναι:

- Υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (Input)
- Υποπρόγραμμα υπολογισμών (Calculations)
- Υποπρόγραμμα αποτελεσμάτων Output)
- Υποπρόγραμμα σχεδιασμού των καμπύλων ή διαγραμμάτων (Curves)

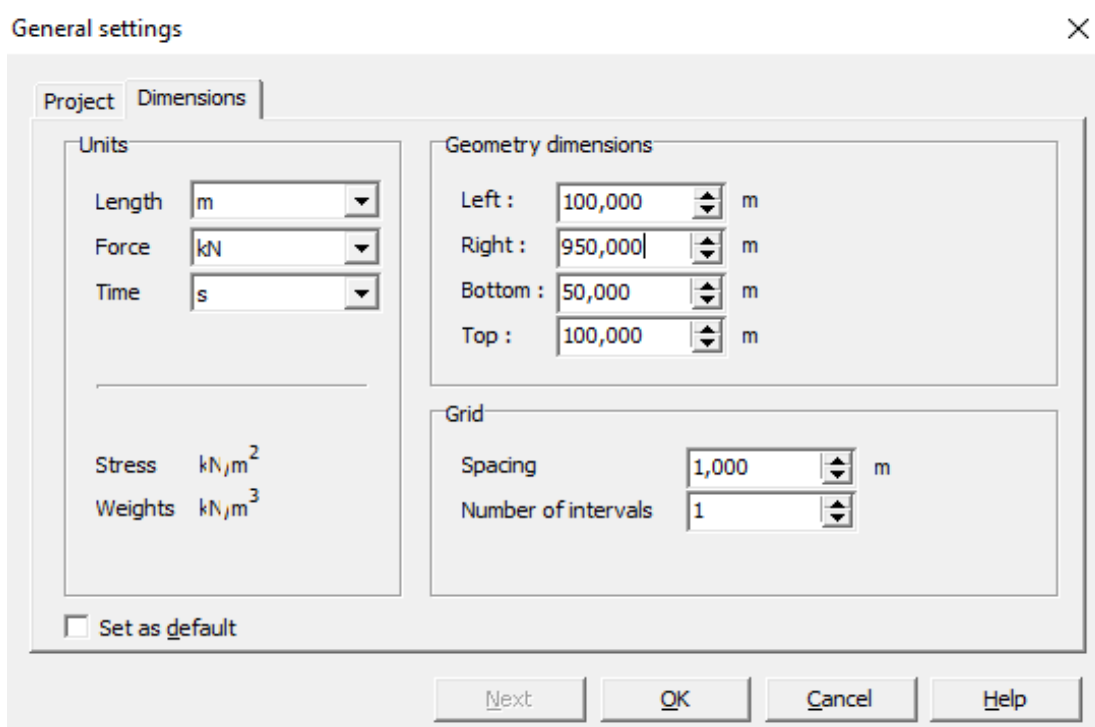
Παρακάτω αναφέρονται κάποια ενδεικτικά στοιχεία ξεχωριστά για κάθε υποπρόγραμμα, ενώ αναλύεται η διαδικασία και οι εντολές που ακολουθήθηκαν στο λογισμικό στην φάση των αναλύσεων. Μετά παρουσιάζονται τα προσομοιώματα που αναλύσαμε με τη χρήση του παραπάνω λογισμικού.

5.1.2.1 Γενικές ρυθμίσεις

Σημαντικό βήμα πριν από κάθε ανάλυση είναι η εισαγωγή των γενικών ρυθμίσεων του προγράμματος. Το πρώτο πράγμα που κάνουμε είναι να εισάγουμε το όνομα του αρχείου, τον τύπο του προτύπου καθώς τον τύπο των στοιχείων που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν. Εδώ καθορίζονται οι μονάδες μήκους, δύναμης, χρόνου και οι διαστάσεις και η πυκνότητα της περιοχής του καννάβου.



Εικόνα 5.1 Εισαγωγή ονόματος τύπου μοντέλου ή προτύπου στο PLAXIS

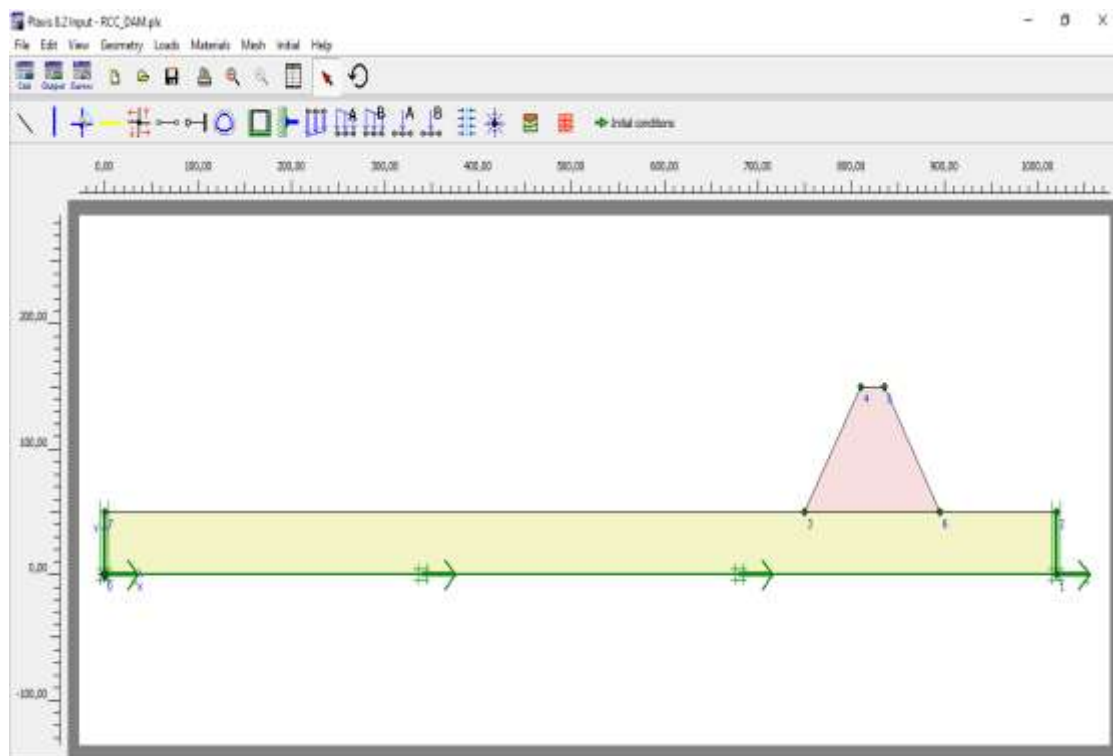


Εικόνα 5.2 Εισαγωγή μονάδων, καθορισμός διαστάσεων και πυκνότητας της περιοχής σχεδίασης του καννάβου

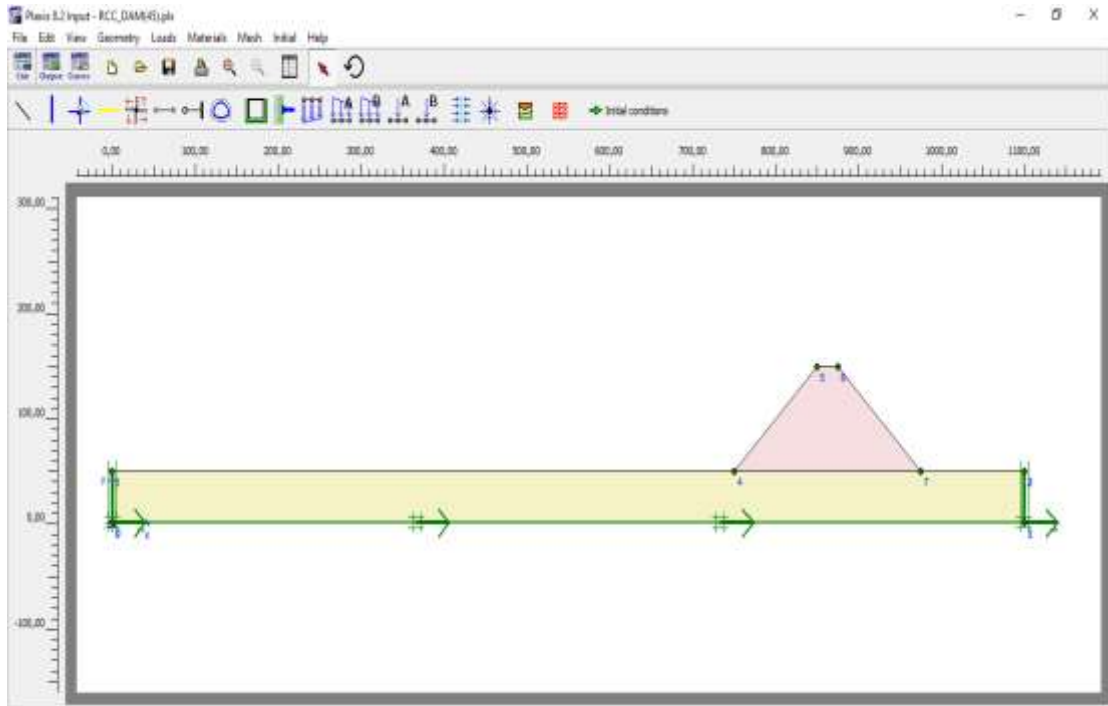
Η ανάλυση της παραμόρφωσης του μοντέλου μας έγινε σε δύο διαστάσεις και οι παραμορφώσεις που αναμένονται στον κάθετο, στην επιφάνεια του προτύπου επιπέδου είναι αμελητέες. Χρησιμοποιήθηκαν τα τριγωνικά 15-κομβικά στοιχεία για τη διακριτοποίηση του μοντέλου (προτύπου) μας.

5.1.2.2 Σχεδιασμός προσομοιώματος

Στη συνέχεια σχεδιάσαμε στο πρόγραμμα του PLAXIS το γεωμετρικό πρότυπο με το οποίο απεικονίζεται το πρόβλημα που αναλύουμε και μελετούμε. Το γεωμετρικό πρότυπο (προσομοίωμα) αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Τα σημεία εισάγονται από το χρήστη, οι γραμμές προκύπτουν από τα σημεία και επιφάνειες προκύπτουν από τις γραμμές οι οποίες δημιουργούν κλειστά σχήματα. Τα προσομοιώματα τα οποία χρησιμοποιήσαμε στις αναλύσεις μας είναι δύο. Το ένα πρότυπο αφορά συμμετρικό φράγμα με κλίση πρανών 60° στα ανάντη και κατόντη και το δεύτερο πρότυπο φράγματος σχεδιάστηκε με κλίση πρανών 45° στα ανάντη και κατόντη. Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις το φράγμα σχεδιάστηκε με ύψος 100m πάνω σε εδαφική στρώση πάχους 50m. Οι διαστάσεις των δύο προτύπων απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα.



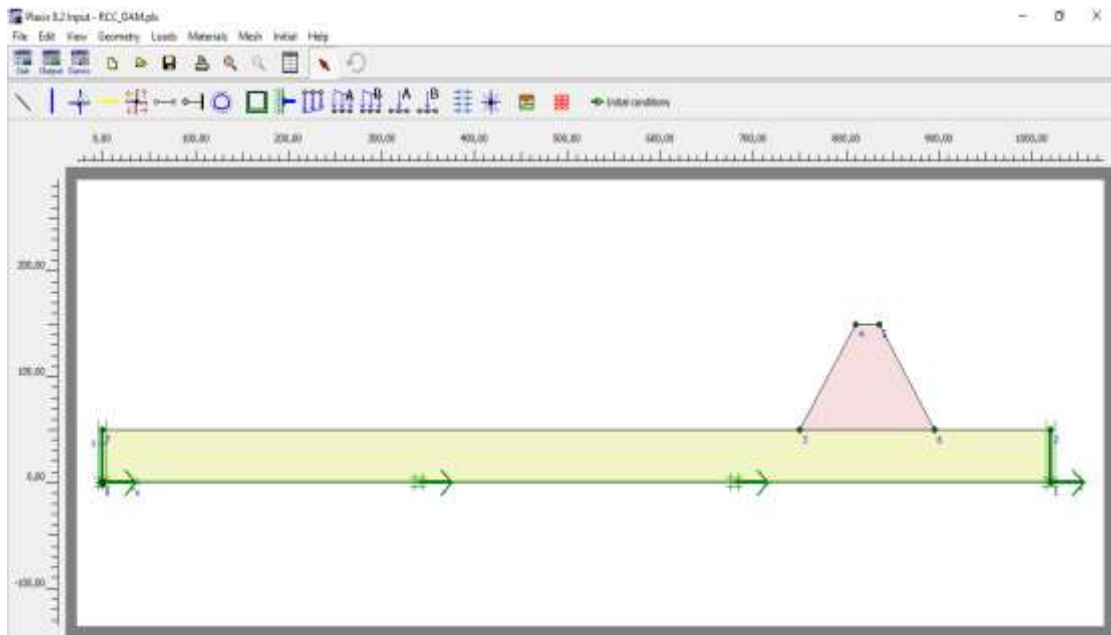
Εικόνα 5.3 Γεωμετρικό πρότυπο φράγματος (κλίση πρανών 60 μοιρών)



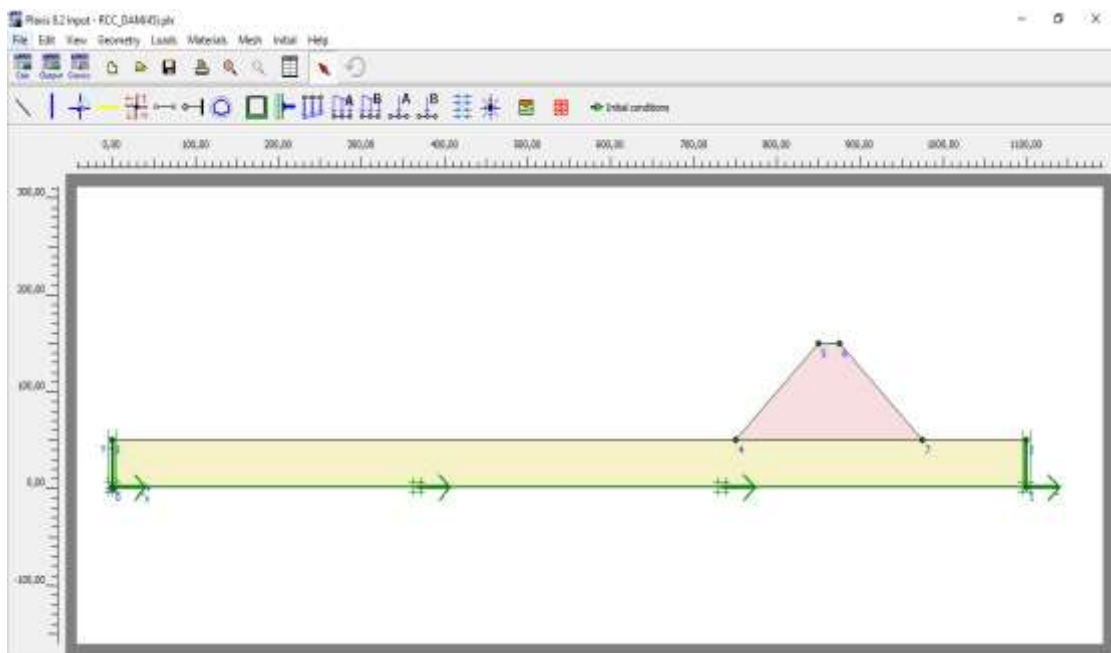
Εικόνα 5.4 Γεωμετρικό πρότυπο φράγματος (κλίση πρανών 45 μοιρών)

5.1.2.3 Συνοριακές συνθήκες

Το πρώτο πράγμα που πραγματοποιήθηκε πριν την έναρξη των υπολογισμών στα πρότυπά μας ήταν ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών τους. Οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν σε δύο επίπεδα. Ως προς τη στατική κατάσταση και των δύο μοντέλων μας εφαρμόστηκε μηδενική οριζόντια μηδενική μετατόπιση (u_x) στα κατακόρυφα όριά τους. Η μηδενική οριζόντια μετατόπιση στα κατακόρυφα όρια σημαίνει ότι επιτρέπεται μόνο η κύλιση ως προς τον άξονα x των σημείων που βρίσκονται στα κατακόρυφα όρια. Στα κάτω όρια των προτύπων μας εφαρμόστηκαν μηδενικές μετατοπίσεις ως προς τους 2 άξονες ($u_x=u_y=0$), άρα αυτό συνεπάγεται ότι η βάση των προτύπων μας είναι πακτωμένη. Η εντολή με την οποία εφαρμόστηκαν οι συνοριακές συνθήκες είναι η εντολή standart fixities από το μενού Loads. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες (σταθερά όρια) των δύο προτύπων.



Εικόνα 5.5 Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (πρότυπο φράγματος 60 μοιρών)



Εικόνα 5.6 Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (πρότυπο φράγματος 45 μοιρών)

5.1.2.4 Ιδιότητες υλικών

Ύστερα καθορίστηκαν οι ιδιότητες των υλικών τα οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν στα προσομοιώματα. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα μέσω της εντολής material sets. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές είναι το Mohr-Coulomb, επειδή δίνει ικανοποιητική προσέγγιση

της πραγματικότητας. Οι παράμετροι του υλικού που πρέπει να εισαχθούν για το παραπάνω μοντέλο είναι οι εξής:

- Μέτρο ελαστικότητας του Young (E)
- Λόγος ή συντελεστής Poisson (ν)
- Συνοχή του υλικού (C)
- Γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού (ϕ)
- Γωνία διασταλτικότητας του υλικού (ψ)

Στις παρακάτω αναλύσεις χρησιμοποιείται το μοντέλο linear elastic το οποίο χρησιμοποιεί τον νόμο του Hooke για ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Ισότροπη γραμμική ελαστικότητα σημαίνει ότι η γραμμική ελαστικότητα δεν μεταβάλλεται με τη διεύθυνση στο υλικό. Από τις παραπάνω παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο linear elastic είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) και ο λόγος Poisson (ν). Το μέτρο ελαστικότητας του Young (E) εκφράζει την σκληρότητα ή την ακαμψία του υλικού, όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας E τόσο μεγάλη είναι η σκληρότητα και η ακαμψία του υλικού. Ο λόγος ή συντελεστής Poisson (ν) είναι και αυτό ένα μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Οι τιμές του λόγου κυμαίνονται $0 \leq \nu \leq 0,5$, όσο το ν πλησιάζει το μηδέν το υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία ενώ όταν πλησιάζει την τιμή 0,5 εμφανίζει λιγότερη ακαμψία. Το νερό έχει λόγο Poisson $\nu=0,5$.

Επιπλέον παράμετροι κάθε υλικού που χρειάζονται να εισαχθούν στο πρόγραμμα αναεξαρτήτως χρήσης μοντέλου είναι το ξηρό και υγρό ειδικό του βάρος (γ_{unsat} και γ_{sat} αντίστοιχα) και η διαπερατότητα κατά διεύθυνση x και κατά y (k_x και k_y αντίστοιχα). Τέλος εισήχθησαν σε κάθε υλικό του προτύπου μας οι δύο συντελεστές α (Rayleigh alpha) και β (Rayleigh beta), οι οποίοι σχετίζονται με την απόσβεση του κάθε υλικού ως προς την σεισμική δόνηση. Οι παράμετροι Rayleigh προσδιορίστηκαν υπολογιστικά με την εκτέλεση κάποιων πράξεων στο excel.

Linear elastic - RCC

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification:

Material model:

Material type:

General properties

γ_{unsat} : kN/m³

γ_{sat} : kN/m³

Comments

Permeability

k_x : m/s

k_y : m/s

Εικόνα 5.7 Ιδιότητες του υλικού στο πρόγραμμα Plaxis

Linear elastic - RCC

General | Parameters | Interfaces

Stiffness

E_{ref} : kN/m²

ν (nu):

Alternatives

G_{ref} : kN/m²

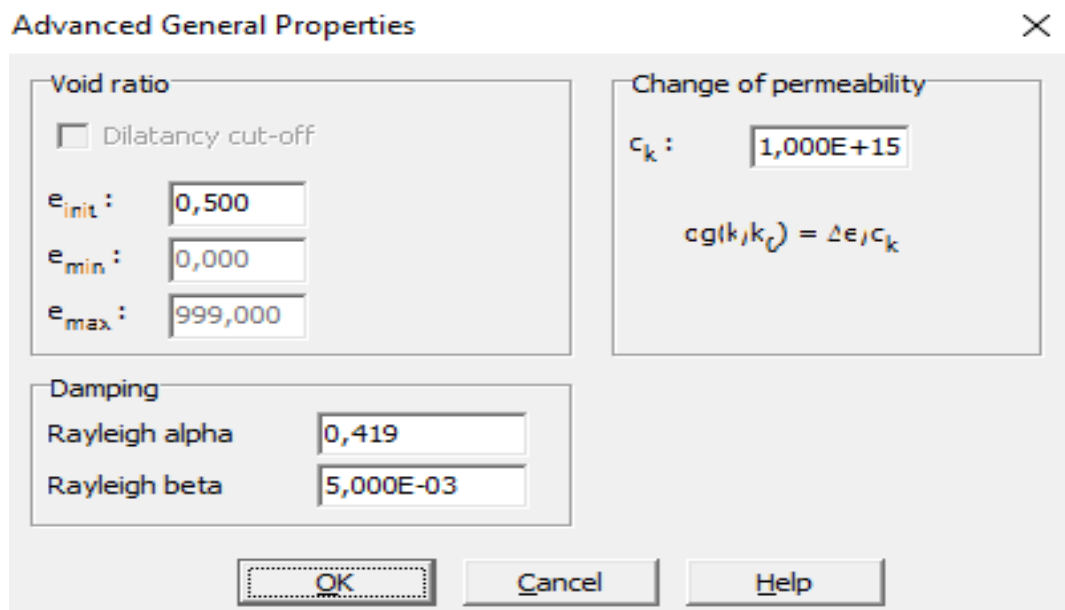
E_{oed} : kN/m²

Velocities

V_s : m/s

V_p : m/s

Εικόνα 5.8 Παράμετροι του υλικού στο πρόγραμμα Plaxis



Εικόνα 5.9 Εισαγωγή των συντελεστών απόσβεσης του υλικού

5.1.2.5 Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

Στην συνέχεια ακολούθησε η δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Το στάδιο αυτό ήταν απαραίτητο ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσουν οι παρακάτω υπολογισμοί. Έτσι στο πρόγραμμα Plaxis μέσω της εντολής (Mesh generation) διαιρέθηκαν τα γεωμετρικά προσομοιώματα σε τριγωνικά σχήματα δύο διαστάσεων. Το κάθε τριγωνικό σχήμα αποτελεί το βασικό στοιχείο του γεωμετρικού μοντέλου μας. Η διαδικασία της παραγωγής δικτύου πεπερασμένων στοιχείων είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία στο Plaxis βασιζόμενη στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του μοντέλου μας. Στο πρόγραμμα είναι δυνατή η πυκνωση του δικτύου της επιφάνειας του μοντέλου μας σε πέντε στάδια τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- Πολύ αραιό δίκτυο
- Αραιό δίκτυο
- Μέσης πυκνότητας δικτύου
- Πυκνό δίκτυο
- Πολύ πυκνό δίκτυο

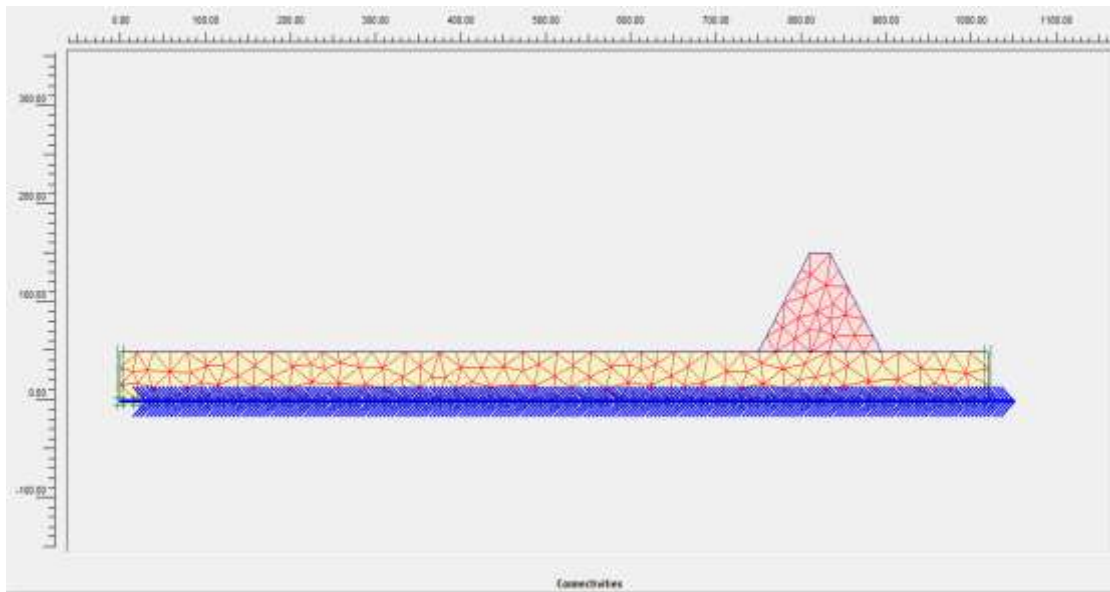
Η πυκνότητα του δικτύου καθορίζεται από τον τύπο:

$$I = \sqrt{\frac{(x_{max} - x_{min})(y_{max} - y_{min})}{n_c}}, \text{ όπου } x_{max}, x_{min}, y_{max}, y_{min} \text{ είναι οι διαστάσεις του}$$

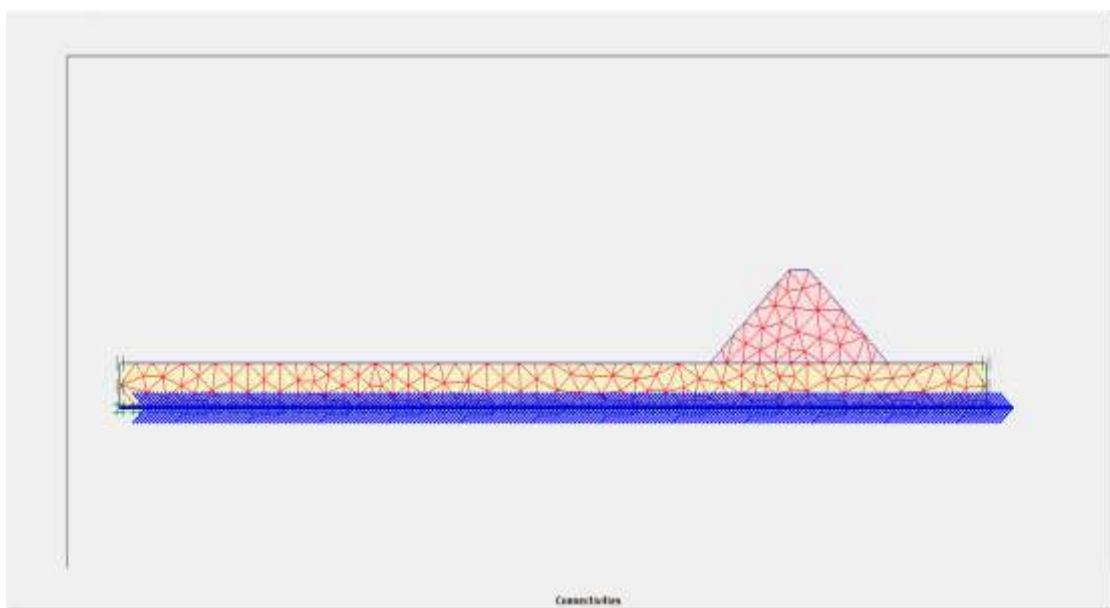
γεωμετρικού μας μοντέλου κατά x και κατά y με τις αντίστοιχες μέγιστες και ελάχιστες τιμές συντεταγμένων τους και n_c είναι ο αριθμός που καθορίζει την πυκνότητα του δικτύου μας για δεδομένες τιμές που λαμβάνονται από το πρόγραμμα με βάση τις παρακάτω επιλογές:

- Για $n_c=25$ το δίκτυο είναι πολύ αραιό
- Για $n_c=50$ το δίκτυο είναι αραιό
- Για $n_c=100$ το δίκτυο είναι μέσης πυκνότητας
- Για $n_c=200$ το δίκτυο είναι πυκνό
- Για $n_c=400$ το δίκτυο είναι πολύ πυκνό

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το πολύ πυκνό δίκτυο και για τα δύο γεωμετρικά μοντέλα όπως απεικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 5.10 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων στο PLAXIS (για το φράγμα κλίσης 60 μοιρών)



Εικόνα 5.11 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων στο PLAXIS (για το φράγμα κλίσης 45 μοιρών)

5.1.2.6 Αρχικές συνθήκες

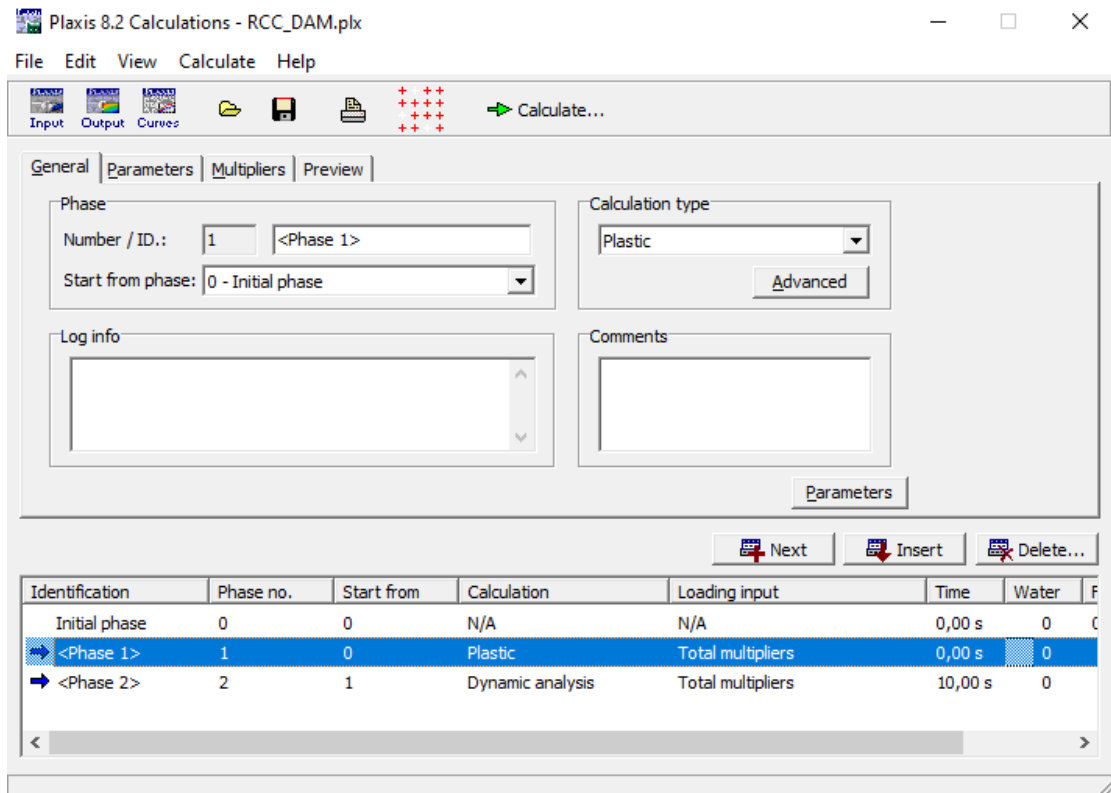
Ύστερα από τη δημιουργία των γεωμετρικών προτύπων, την εισαγωγή ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στα παραπάνω πρότυπα, την επιβολή συνοριακών συνθηκών και τη δημιουργία δικτύων πεπερασμένων στοιχείων, προχωρήσαμε στον υπολογισμό των αρχικών συνθηκών. Ο υπολογισμός των αρχικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα PLAXIS μέσω της εντολής (initial conditions). Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ο υπολογισμός δύο κατηγοριών αρχικών συνθηκών:

- Η πρώτη κατηγορία αφορούσε τον υπολογισμό των πιέσεων των πόρων του νερού και για τα δύο πρότυπα
- Η δεύτερη κατηγορία αφορούσε τον προσδιορισμό των αρχικών ενεργών και ολικών τάσεων που ασκούνταν στην γεωμετρία του μοντέλου μας

5.1.2.7 Διαδικασία υπολογισμών

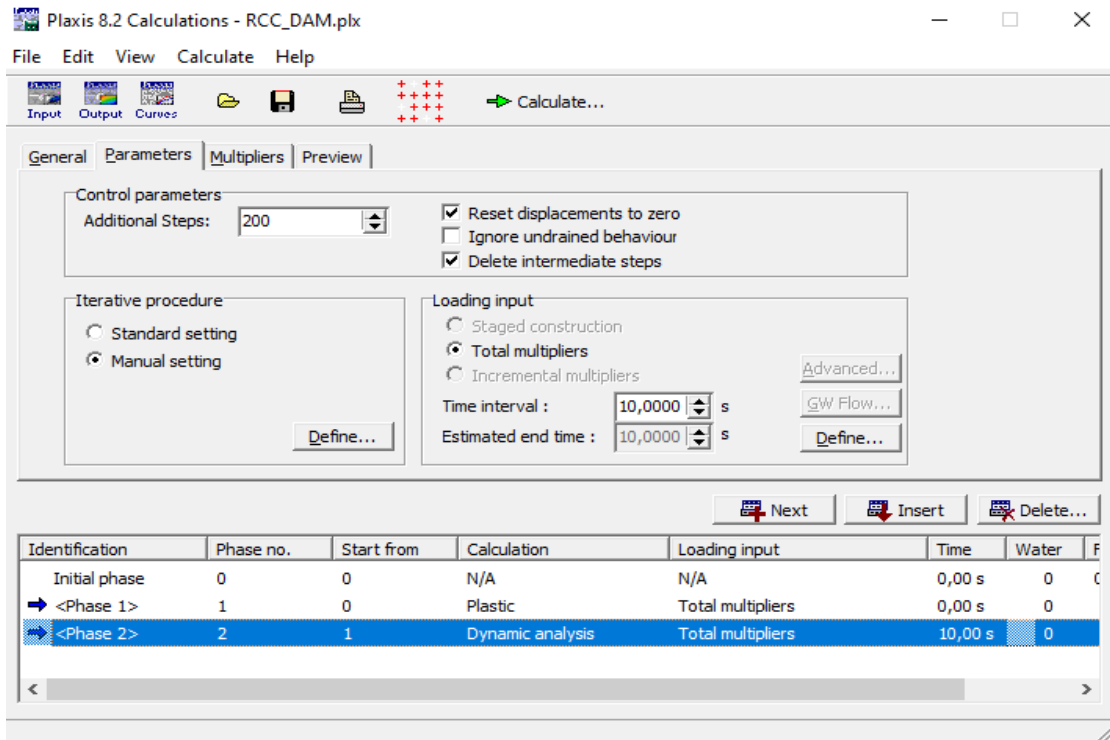
Έπειτα από την δημιουργία των προτύπων και των υπολογισμό των αρχικών συνθηκών τους μπορούμε να προχωρήσουμε στην διαδικασία της φάσης υπολογισμού. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του υποπρογράμματος (calculations) του προγράμματος PLAXIS. Το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα εκτέλεσης υπολογισμών διαφόρων τύπων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε δύο κατηγορίες υπολογισμών και για τα δύο πρότυπα. Η μία κατηγορία είναι σχετίζεται με την ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς των δύο μοντέλων μας (plastic) και η άλλη κατηγορία σχετίζεται με την δυναμική ανάλυση (Dynamic analysis) των μοντέλων η οποία χρησιμοποιείται για αναλύσεις σε περίπτωση σεισμικής δόνησης.

Έπειτα ορίζονται οι διάφορες φάσεις υπολογισμού. Έτσι έχουμε την αρχική φάση υπολογισμού (initial phase), η οποία αντιπροσωπεύει το πρόβλημα όπως αυτό προσδιορίστηκε από τις αρχικές συνθήκες στο υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (input). Αυτή η φάση αποτελεί την έναρξη για τις περαιτέρω φάσεις υπολογισμού των μοντέλων. Η εισαγωγή της πρώτης φάσης υπολογισμών στο υποπρόγραμμα (calculation) πραγματοποιείται μέσω των εντολών Next ή Insert που βρίσκονται πάνω από το παράθυρο της λίστας υπολογισμών. Η επιλογή delete χρησιμοποιείται για να διαγράψουμε την φάση υπολογισμού που επιθυμούμε.



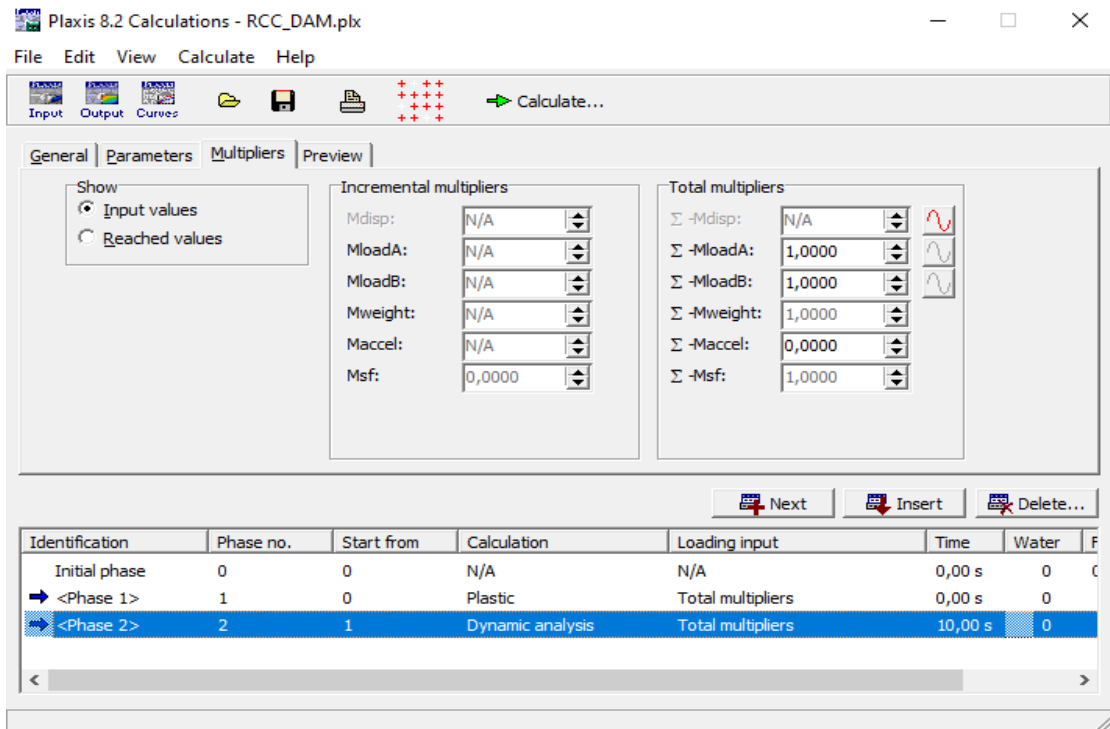
Εικόνα 5.12 Παράθυρο υποπρογράμματος υπολογισμού (calculation) του PLAXIS

Στο παράθυρο του υποπρογράμματος (calculation) εμφανίζονται οι καρτέλες General, Parameters, Multipliers και Preview. Η κατηγορία της φάσης υπολογισμού ορίζεται από την καρτέλα General, στην καρτέλα Parameters εισάγουμε τον αριθμό των βημάτων υπολογισμού της κάθε φάσης με την εντολή (Additional steps), ενώ μας δίνεται η δυνατότητα να διαγράψουμε τις παραμορφώσεις από τα προηγούμενα στάδια υπολογισμών με την εντολή (Reset displacements to Zero), όπως και την δυνατότητα να διαγραφούν τα ενδιάμεσα στάδια (Delete intermediate steps).



Εικόνα 5.13 Καρτέλα Parameters στο υποπρόγραμμα υπολογισμού

Στην καρτέλα Multipliers (πολλαπλασιαστές) ορίζονται οι μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων μέσω της ρύθμισης των συνολικών πολλαπλασιαστών (Total multipliers). Δίπλα από το ΣMdisp εμφανίζεται μια κόκκινη καμπύλη σε περίπτωση που έχουμε επιλέξει την κατηγορία υπολογισμού (Dynamic analysis) ώστε να εισαχθούν οι σεισμικές δομήσεις για το μοντέλο μας.



Εικόνα 5.14 Καρτέλα Multipliers του υποπρογράμματος υπολογισμού

Η καρτέλα preview χρησιμοποιείται για να απεικονίσει το μοντέλο μας για κάθε φάση υπολογισμού που επιλέγουμε.

Το επόμενο στάδιο που πραγματοποιείται αφότου οι φάσεις υπολογισμού έχουν οριστεί είναι να επιλέγουν κάποια σημεία στο σχήμα του προτύπου στα οποία θα υπολογιστούν ταυτόχρονα οι μετατοπίσεις και οι επιταχύνσεις τους κατά την διαδικασία υπολογισμού. Αυτό πραγματοποιείται με το σύμβολο με τους κόκκινους σταυρούς που βρίσκεται αριστερά του calculate όπως φαίνεται πιο πάνω.

Αφού εκτελέστηκαν όλα τα παραπάνω βήματα είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην διαδικασία υπολογισμού. Αυτό πραγματοποιείται αυτόματα μέσω της εντολής calculate. Για κάθε φάση υπολογισμού παρουσιάζεται το παράθυρο διαλόγου στο οποίο αναγράφονται κάποιες βασικές πληροφορίες σχετικά με την φάση επίλυσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Plaxis 8.2 Dynamic Calculation - RCC_DAM - Plane Strain

Total multipliers at the end of previous loading step			
Σ -Mdisp:	0,009	PMax	866,200
Σ -MloadA:	1,000	Σ -Marea:	1,000
Σ -MloadB:	1,000	Force-X:	52583,000
Σ -Mweight:	1,000	Force-Y:	0,000
Σ -Maccel:	0,000	Stiffness:	1,000
Σ -Msf:	1,000	Time:	0,907
Σ -Mstage:	0,000	Dyn. time:	0,907

Calculation progress

Dyn. time Node A

Iteration process of current step			
Current step:	20	Max. steps:	201
Iteration:	2	Max. iterations:	60
Global error:	7,240E-15	Tolerance:	0,010
Element	311	Decomposition:	100 %
Calc. time:	19 s		

Plastic points in current step			
Plastic stress points:	0	Inaccurate	0
Plastic interface points:	0	Inaccurate	0
Tension points:	0	Cap/Hard points:	0
		Tolerated:	3
		Tolerated:	3
		Apex points:	0

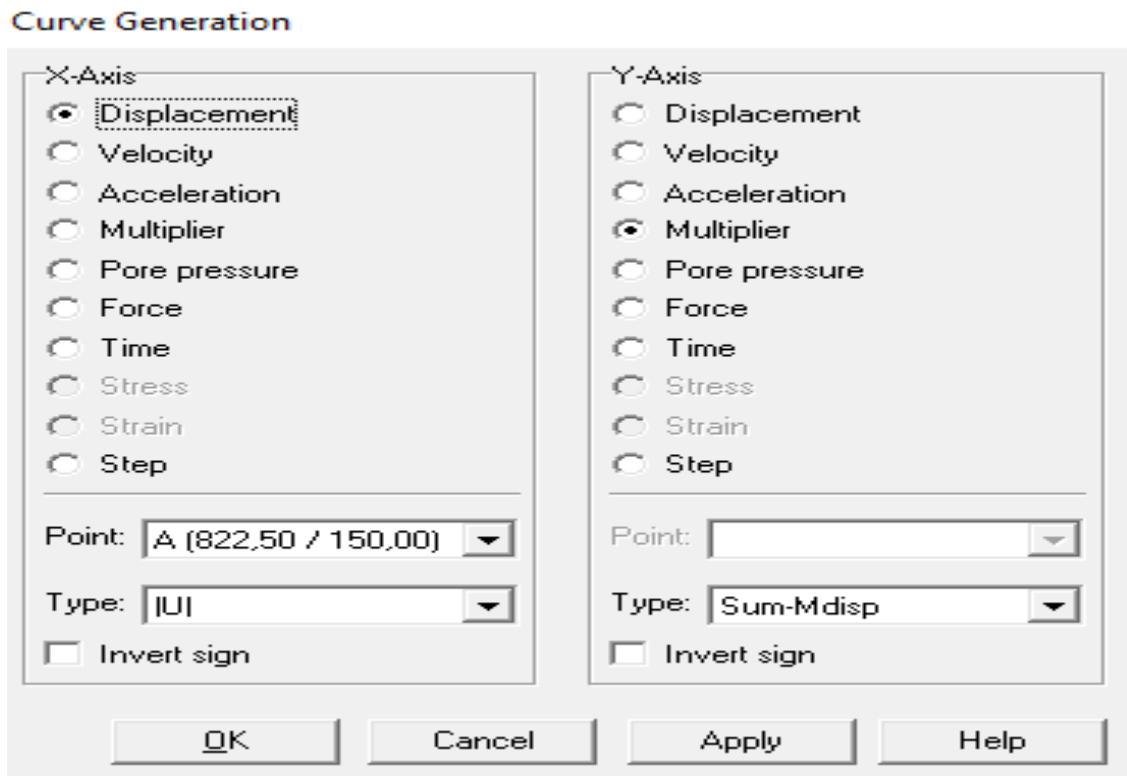
Cancel

Εικόνα 5.15 Παράθυρο διαλόγου κατά τη φάση επίλυσης υπολογισμού

Μετά το τέλος της επίλυσης πατώντας το Output πηγαίνουμε στο τρίτο υποπρόγραμμα (Output) όπου φαίνονται τα αποτελέσματα μετά την επίλυση των φάσεων υπολογισμού στο παραμορφωμένο μοντέλο μας (Deformed mesh).

5.1.2.8 Σχεδιασμός καμπυλών

Μετά πηγαίνουμε στο τέταρτο υποπρόγραμμα (curves) με το οποίο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός των καμπύλων. Αυτό πραγματοποιείται αυτόματα μέσω της εντολής curves που φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα. Πατώντας το κουμπί curves μας ανοίγει ένα παράθυρο το οποίο μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε πιο αρχείο θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ώστε να σχεδιαστεί κάποιο διάγραμμα. Αφού επιλέξουμε το project που επιθυμούμε μας εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο επιλέγουμε την γραφική παράσταση που θέλουμε να σχεδιάσουμε. Στο παράθυρο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε ποιες παραμέτρους θέλουμε να εμφανίζονται κατά τους άξονες x και y. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε τα διαγράμματα Displacement-Time ($U_x - t$) και Acceleration-Time ($a_x - t$). Επιπλέον εισάγονται και τα σημεία ένα ένα τα οποία ελήφθησαν πιο πριν στο υποπρόγραμμα υπολογισμού (calculation) παρατηρώντας και τις διαφορές τους οι οποίες προβάλλονται στα διαγράμματα.



Εικόνα 5.16 Εισαγωγή δεδομένων για τον σχεδιασμό καμπυλών

5.1.3 Προσομοιώματα

5.1.3.1 Εισαγωγή

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά του φράγματος για κάθε σεισμική δόνηση είναι:

- Το έδαφος θεμελίωσης στο οποίο εδράζεται το φράγμα
- Οι ιδιότητες των υλικών από τις οποίες αποτελείται το φράγμα (στην περίπτωση μας το φράγμα αποτελείται από υλικό RCC)
- Η ανελαστική συμπεριφορά του
- Το μέγεθος της σεισμικής δόνησης
- Η καταπόνησή του από την ύπαρξη νερού στον ταμιευτήρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η στατική ανάλυση του φράγματος χωρίς την παρουσία νερού. Στο δεύτερο στάδιο εξετάστηκε η στατική ανάλυση του φράγματος υπό την παρουσία του νερού για την περίπτωση της μέσης στάθμης και της ανώτατης στάθμης του νερού. Σε αυτό το στάδιο η παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα εισάγει υδροστατικές ωθήσεις που ασκούνται στο φράγμα. Στο τρίτο στάδιο έγινε εισαγωγή διαφόρων σεισμικών διεγέρσεων και εξετάστηκε η επίδραση της συμπεριφοράς του μοντέλου μας σε κάθε μία από αυτές. Σε αυτό το στάδιο έγινε η παραδοχή ότι το φράγμα δεν καταπονείται από την επίδραση του νερού λαμβάνοντας υπόψιν μόνο την αδρανειακή καταπόνηση του φράγματος χωρίς την παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα δίνοντας έμφαση στην δυναμική συμπεριφορά του. Στο τελευταίο στάδιο εξετάστηκε η δυναμική συμπεριφορά του φράγματος λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση του νερού στον ταμιευτήρα στις περιπτώσεις που βρίσκεται στην μέση και στην μέγιστη στάθμη του, οι σεισμικές δονήσεις που εφαρμόστηκαν σε αυτό το στάδιο είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο τρίτο στάδιο. Το νερό στον ταμιευτήρα στο τελευταίο στάδιο υπολογισμού εισάγει υδροδυναμικές ωθήσεις.

Τα τέσσερα παραπάνω στάδια υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Plaxis λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους σχετικά με την γεωμετρία του φράγματος και το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζεται.

5.1.3.2 Γεωμετρία

Στο πρόγραμμα Plaxis δημιουργήσαμε το γεωμετρικό μοντέλο του φράγματος λαμβάνοντας υπόψιν δύο περιπτώσεις. Στην μία περίπτωση οι κλίσεις των πρανών στο φράγμα μας θεωρήθηκε ίση με 60 μοίρες, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η κλίση και των δύο πρανών (ανάντη και κατόντη της κατασκευής) θεωρήθηκε ίση με 45 μοίρες. Και στις δύο περιπτώσεις το ύψος του φράγματος θεωρήθηκε ίσο με 100 μέτρα.

5.1.3.3 Εδαφικές συνθήκες

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον έλεγχο της ευστάθειας του φράγματος είναι το έδαφος πάνω στο οποίο εδράζεται. Όσον αφορά τις στατικές συνθήκες του φράγματος προτιμότερο είναι να θεμελιώνεται το φράγμα σε όσον το δυνατόν πιο σκληρό έδαφος ώστε να μην προκύψουν καθιζήσεις. Επίσης σημαντικό ρόλο στις καθιζήσεις παίζει το βάρος της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι τα φράγματα βαρύτητας τα οποία μελετάμε στην παρούσα διπλωματική θα παρουσιάσουν μεγαλύτερη καθίζηση σε μαλακά εδάφη σε σχέση με τα χωμάτινα φράγματα. Το έδαφος επίσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και στις σεισμικές διεγέρσεις που ασκούνται στην κατασκευή. Το υλικό ανάλογα από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα που εδράζεται η κατασκευή μπορεί να περιορίζει ή να επιδεινώνει την επίδραση της σεισμικής δόνησης στο φράγμα οπότε απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή. Στην παρούσα εργασία για το φράγμα βαρύτητας RCC εξετάστηκαν δύο σενάρια για την κατηγορία του εδάφους θεμελίωσης:

- Βραχώδες υπόστρωμα
- Ημιβραχώδες υπόστρωμα

Στο βραχώδες υπόστρωμα τα διατμητικά κύματα διαδίδονται με ταχύτητα $V_s=2000\text{m/s}$, ενώ στο ημιβραχώδες υπόστρωμα τα διατμητικά κύματα διαδίνονται με ταχύτητα περίπου $V_s=600\text{m/s}$.

5.1.3.4 Σενάρια που εξετάστηκαν

Για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στις παρακάτω αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο υλικό για το κύριο σώμα του φράγματος. Το φράγμα βαρύτητας θεωρείται ομοιογενές, αποτελούμενο από ένα μόνο υλικό. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο προσομοίωμα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Στοιχεία κάθε υλικού	Βραχώδες υλικό	Ημιβραχώδες υλικό	Ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα
Ειδικό ξηρό βάρος γ_{unsat}	24kN/m^3	24kN/m^3	24kN/m^3
Ειδικό βάρος βρεγμένου υλικού γ_{sat}	24kN/m^3	26kN/m^3	24kN/m^3
Υδατοπερατότητα κατά x (k_x)	0m	0,003m	0m
Υδατοπερατότητα κατά y (k_y)	0m	0,003m	0m
Λόγος Poisson	0,18	0,3	0,2
Μέτρο ελαστικότητας E_{ref}	23110000 kN/m^2	2000000 kN/m^2	2000000 kN/m^2
Διατμητικά κύματα V_s	2000m/s	560,4m/s	583m/s

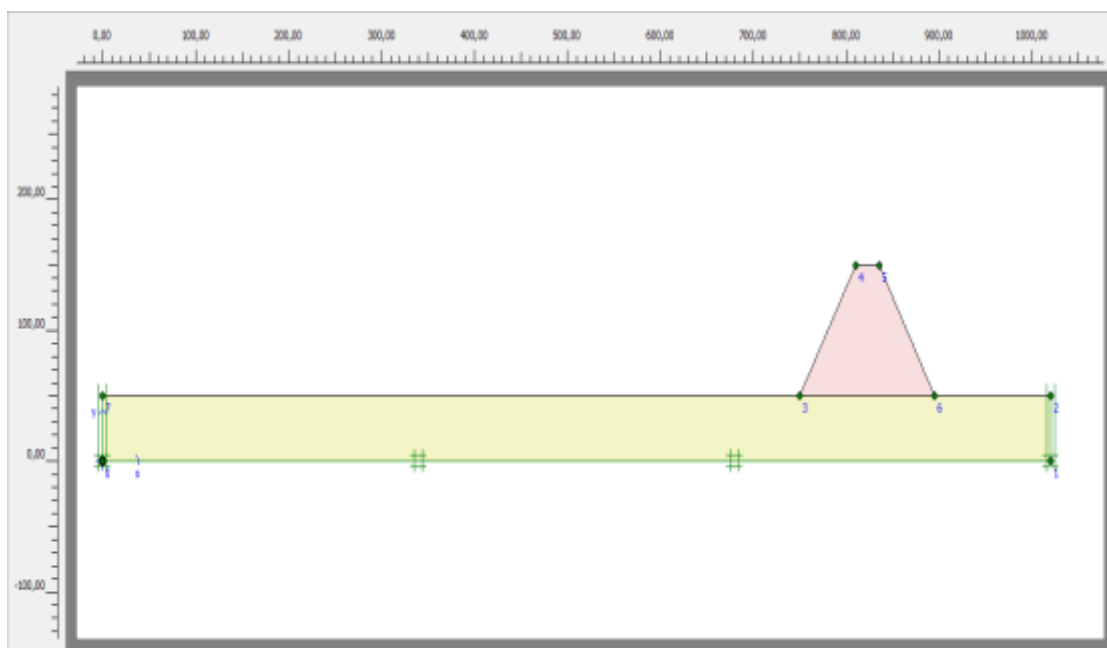
Στις αναλύσεις μας λαμβάνονται τέσσερα σενάρια:

- Πρώτο σενάριο: φράγμα κλίσης πρανών 60° , εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα
- Δεύτερο σενάριο: φράγμα κλίσης πρανών 60° , εδράζεται σε ημιβραχώδες υπόστρωμα
- Τρίτο σενάριο: φράγμα κλίσης πρανών 45° , εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα
- Τέταρτο σενάριο: φράγμα κλίσης πρανών 45° , εδράζεται σε ημιβραχώδες υπόστρωμα.

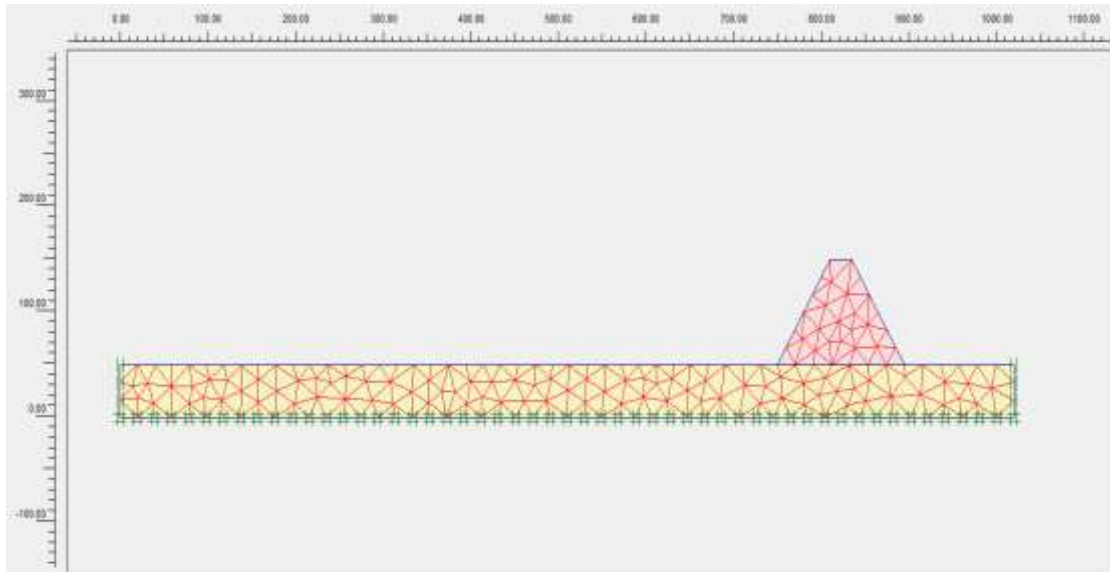
5.2 Στατική φόρτιση (απουσία νερού)

Η στατική φόρτιση αποτελεί το πρώτο στάδιο των αναλύσεων. Σε αυτό το στάδιο εξετάστηκαν και τα τέσσερα σενάρια που αναφέρθηκαν πιο πριν, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και διεξάγονται κάποια ειδικά συμπεράσματα για το κάθε σενάριο.

Για το πρώτο σενάριο που έχουμε φράγμα με κλίση πρανών (ανάτη και κατάντη) 60° και εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα έχουμε τα εξής πρώτα αποτελέσματα της ανάλυσης.

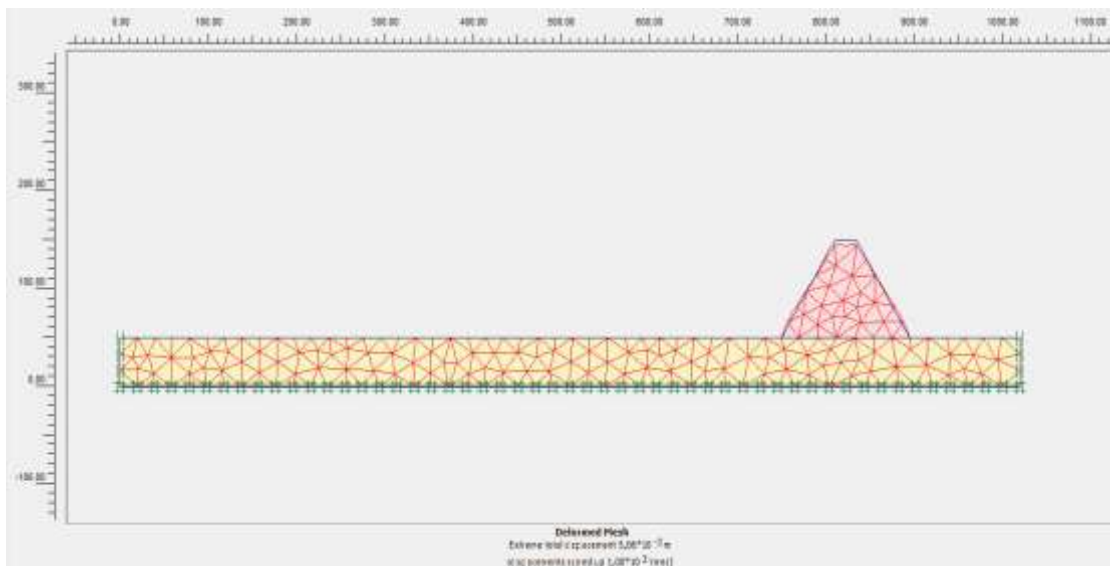


Εικόνα 5.17 Προσομοίωμα πρώτου σεναρίου



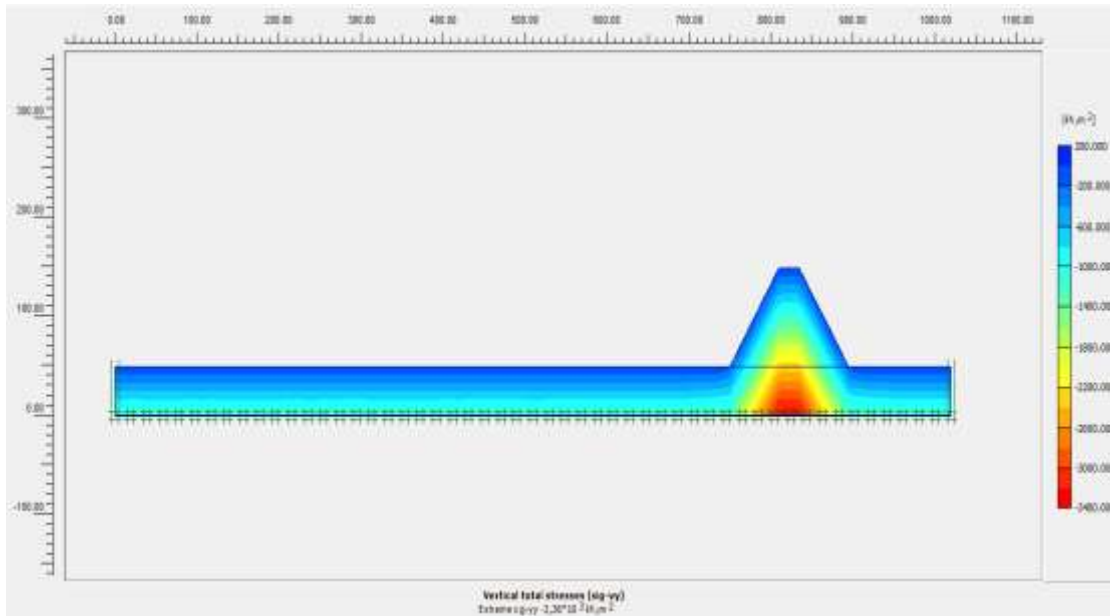
Εικόνα 5.18 Δίκτυο προσομοιώματος φράγματος 60 μοιρών πάνω σε βράχο (σενάριο 1)

Αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης του φράγματος



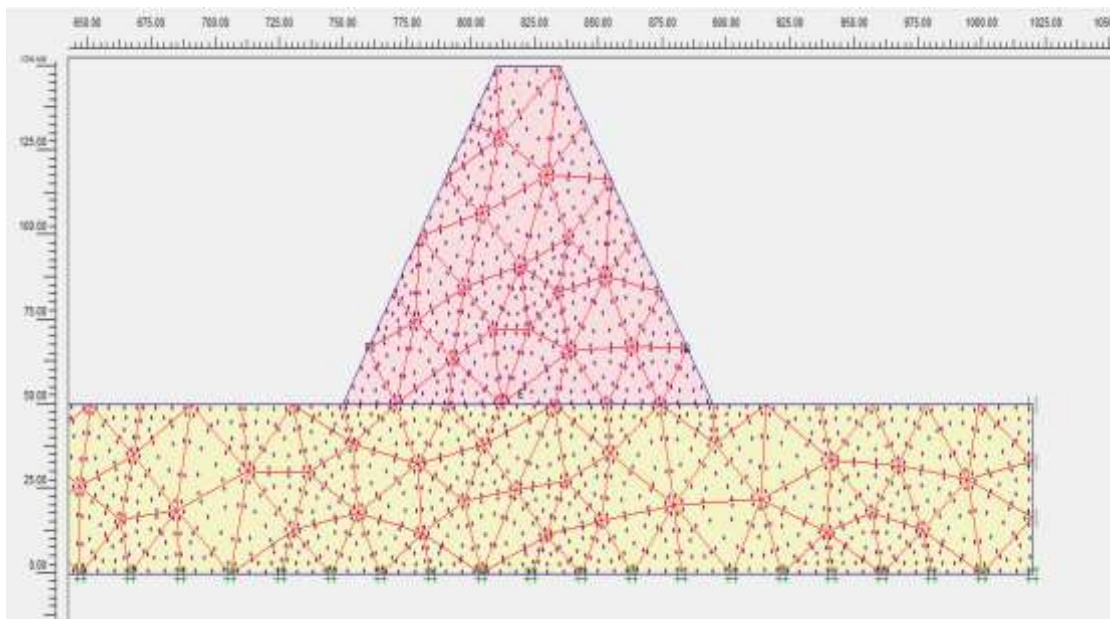
Εικόνα 5.19 Αποτελέσματα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου

Με βάση τα αποτελέσματά μας παρατηρούμε πως η παραμόρφωση του προτύπου μας είναι της τάξης των $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ γεγονός που οφείλεται στη σκληρότητα του εδαφικού υλικού. Το εδαφικό υλικό αποτελείται από βράχο το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας περίπου 10 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με το υλικό του φράγματος RCC.



Εικόνα 5.20 Αποτέλεσμα κατακόρυφων ολικών τάσεων μετά το πέρας της ανάλυσης

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο προσομοίωμα μας ενδιαφέρουν κυρίως οι κατακόρυφες τάσεις οι οποίες στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν (όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα) γύρω στο 2400 kN/m^2 ($\gamma \times h = 24 \text{ kN/m}^3 \times 100\text{m}$), όπου γ : το ειδικό βάρος του RCC και h το ύψος του φράγματος.



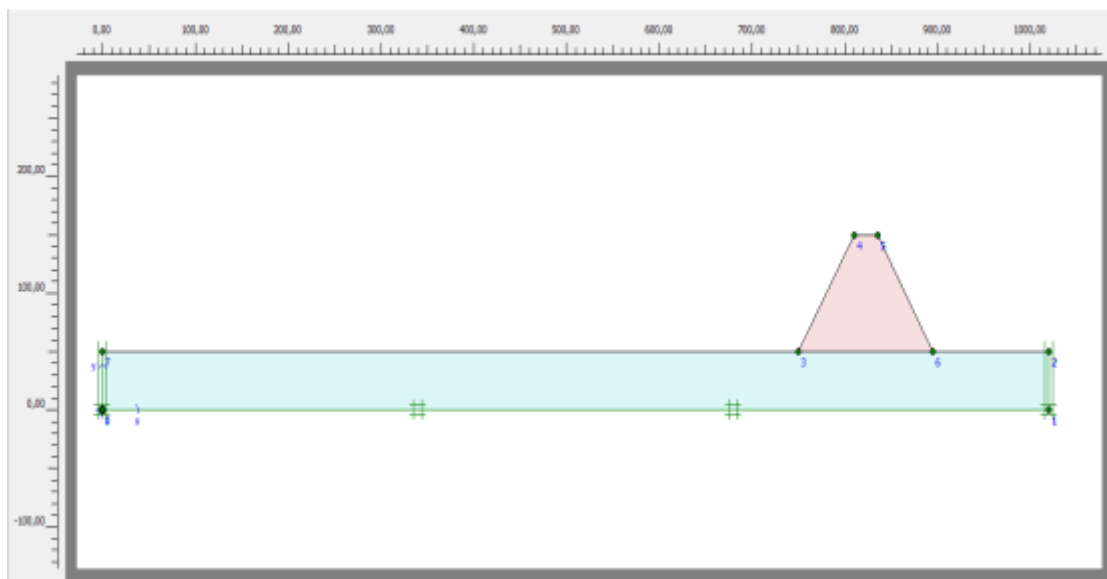
Εικόνα 5.21 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων που ασκούνται στη βάση του φράγματος

Στο σώμα του φράγματος λόγω του ότι με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις οι οριζόντιες ολικές τάσεις είναι μικρότερες από τις ολικές κατακόρυφες τάσεις ($\sigma_H < \sigma_V$) σημαίνει ότι στο σώμα του φράγματος έχουμε κατακόρυφη θλίψη. Έτσι κοντά στην βάση του φράγματος επιλέξαμε τρία σημεία όπως φαίνονται στο πιο πάνω σχήμα ώστε να υπολογίσουμε τις θλιπτικές τάσεις. Τα σημεία που επιλέχθηκαν ήταν στην βάση του φράγματος και συμμετρικά εκατέρωθεν προς τα πρηνή (ανάντη και κατάντη) μερικά μέτρα πιο πάνω από τη βάση.

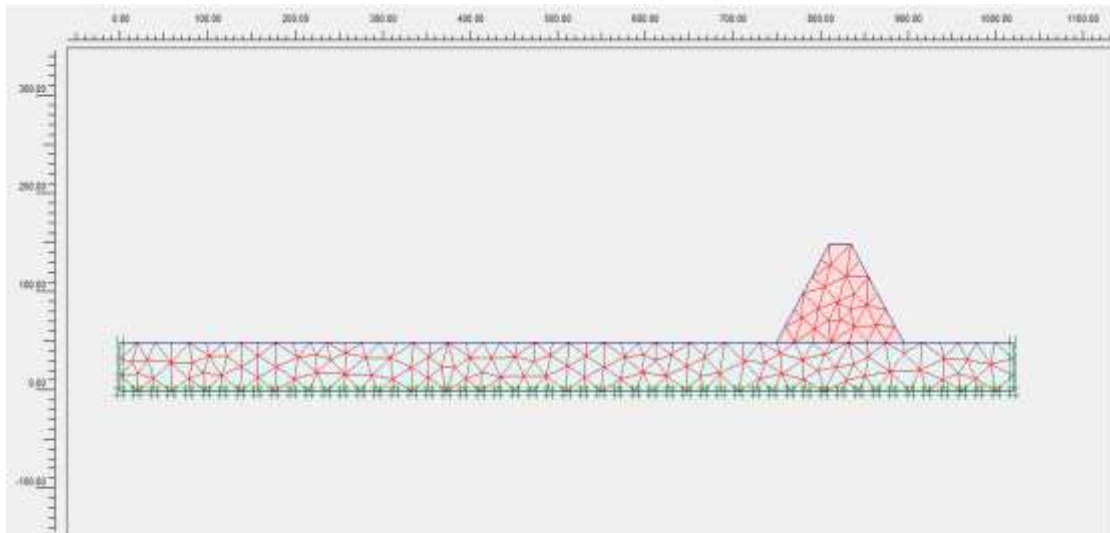
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-402,09	-2273	-33,48	-135,88	-34,08	-135,51

Στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου όπου έχουμε φράγμα με κλίση πρηνών 60° και εδράζεται σε ημιβραχώδες υπόστρωμα, έχουμε τα εξής πρώτα αποτελέσματα ανάλυσης.

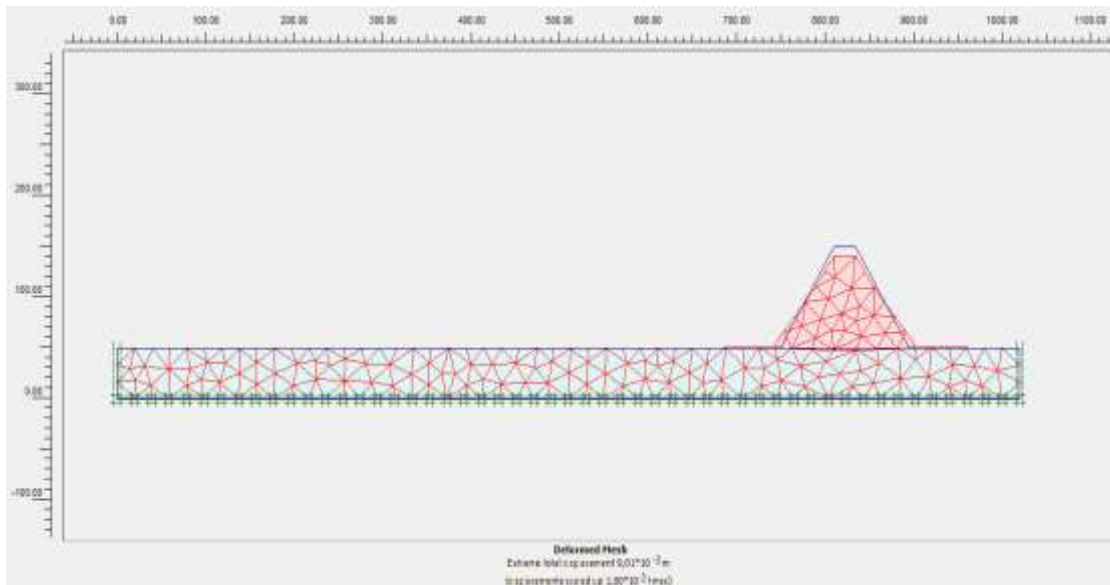


Εικόνα 5.22 Προσομοίωμα δεύτερου σεναρίου



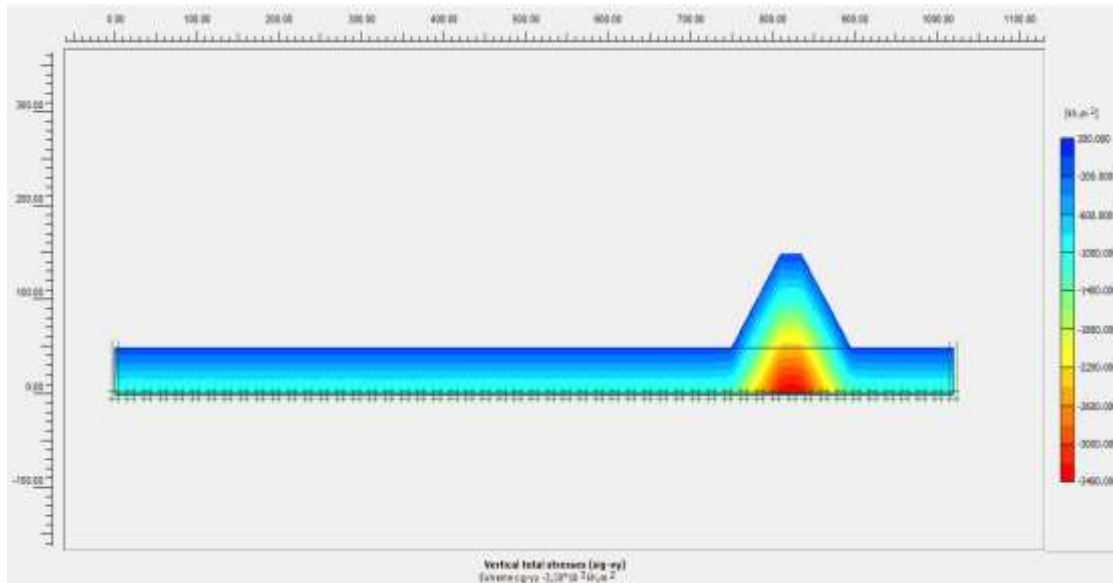
Εικόνα 5.23 Δίκτυο φράγματος 60 μοιρών σε ημίβραχο (σενάριο 2)

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης δεύτερου σεναρίου



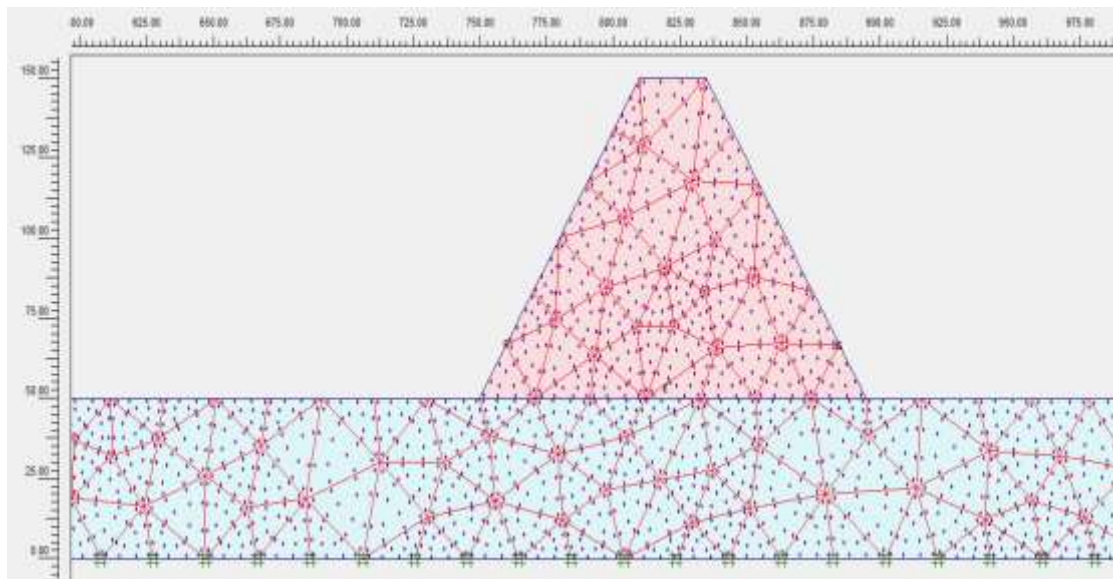
Εικόνα 5.24 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου

Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε πως οι παραμορφώσεις του προτύπου μας είναι της τάξης των $9 \times 10^{-3} \text{ m}$. Οι παραμορφώσεις οφείλονται στο ότι το ημίβραχώδες υλικό στο οποίο εδράζεται το φράγμα έχει περίπου το ίδιο μέτρο ελαστικότητας με το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα.



Εικόνα 5.25 Αποτελέσματα κατακόρυφων ολικών τάσεων (σενάριο 2)

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο μας μας ενδιαφέρουν κυρίως οι κατακόρυφες τάσεις οι οποίες στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν (όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα) γύρω στα 2400 kN/m^2 όπως και στο πρώτο σενάριο.



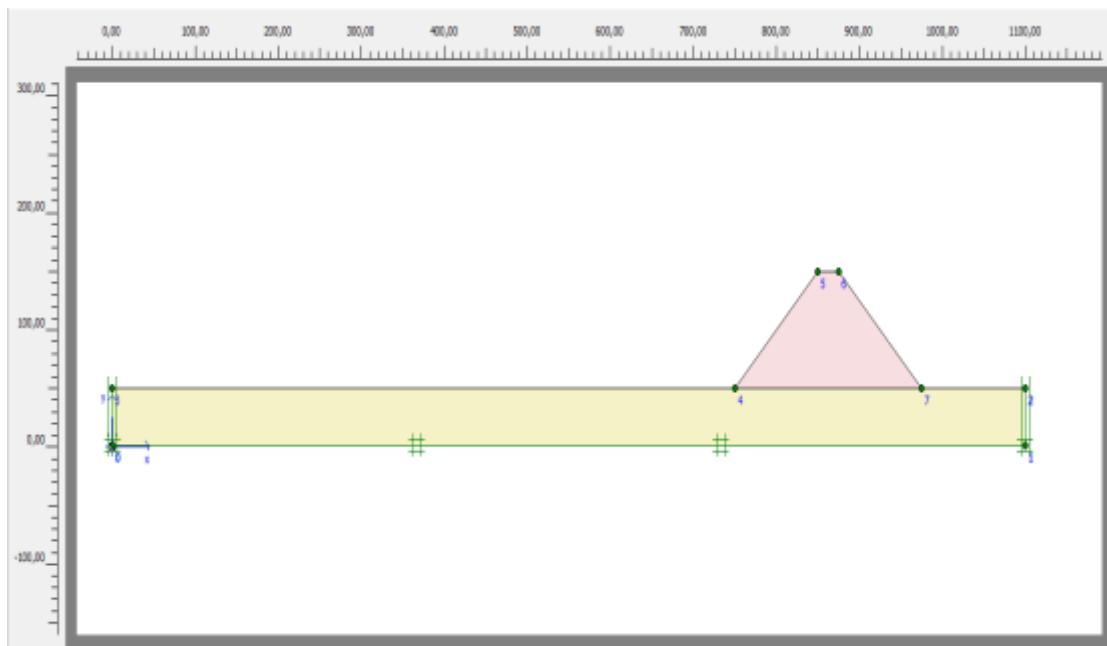
Εικόνα 5.26 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό θλιπτικών τάσεων στη βάση του φράγματος (σενάριο2)

Στο σώμα του φράγματος λόγω του ότι με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις οι οριζόντιες ολικές τάσεις είναι μικρότερες από τις ολικές κατακόρυφες τάσεις ($\sigma_H < \sigma_V$) σημαίνει ότι στο σώμα του φράγματος έχουμε κατακόρυφη θλίψη. Έτσι κοντά στην βάση του φράγματος επιλέξαμε τρία σημεία όπως φαίνονται στο πιο πάνω σχήμα ώστε να υπολογίσουμε τις θλιπτικές τάσεις. Τα σημεία που επιλέχθηκαν

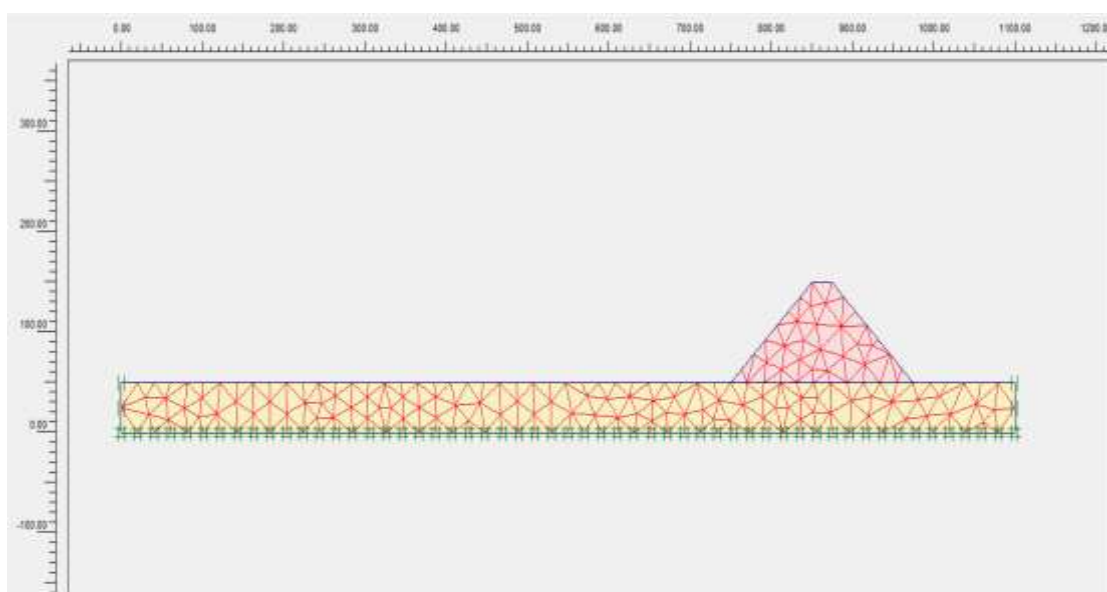
ήταν τα ίδια ακριβώς με αυτά που επιλέχθηκαν στο σενάριο 1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Φ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Φ	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Γ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Γ
119,44		-2305,44		-0,50		-89,12		-1,20		-90,86	

Στο τρίτο σενάριο έχουμε φράγμα βαρύτητας RCC με κλίση πρανών (ανάτη και κατόντη) 45° και εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα, έχουμε τα εξής πρώτα αποτελέσματα της ανάλυσης μας.

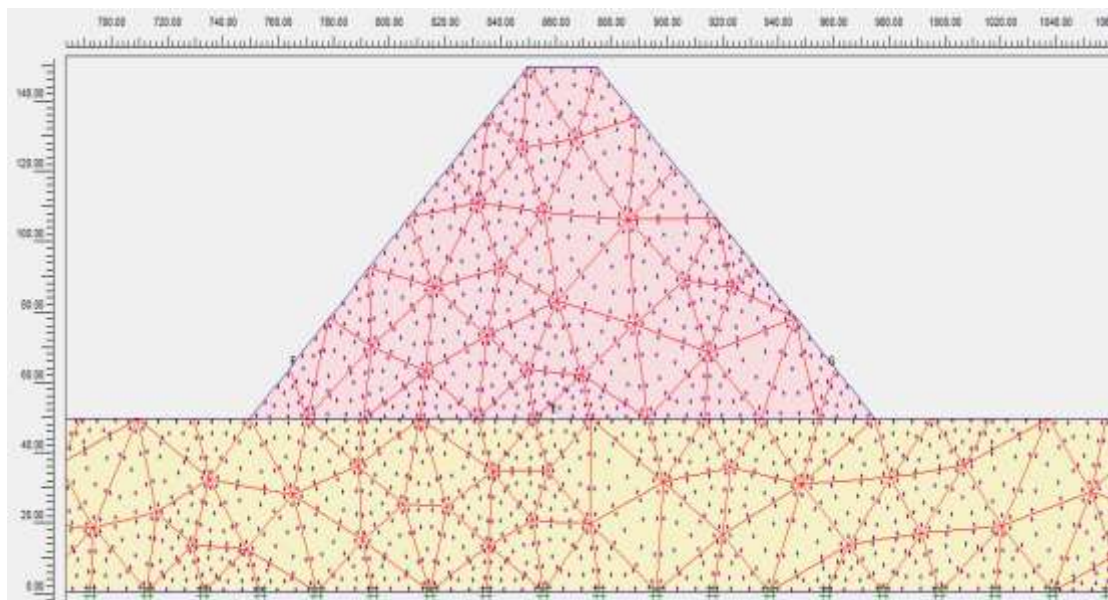


Εικόνα 5.27 Πρότυπο τρίτου σεναρίου



Εικόνα 5.28 Δίκτυο φράγματος 45 μοιρών σε βράχο (σενάριο 3)

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο μας μας ενδιαφέρουν κυρίως οι κατακόρυφες τάσεις οι οποίες στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν (όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα) γύρω στα 2400 kN/m² όπως προέκυψε και στα προηγούμενα σενάρια.

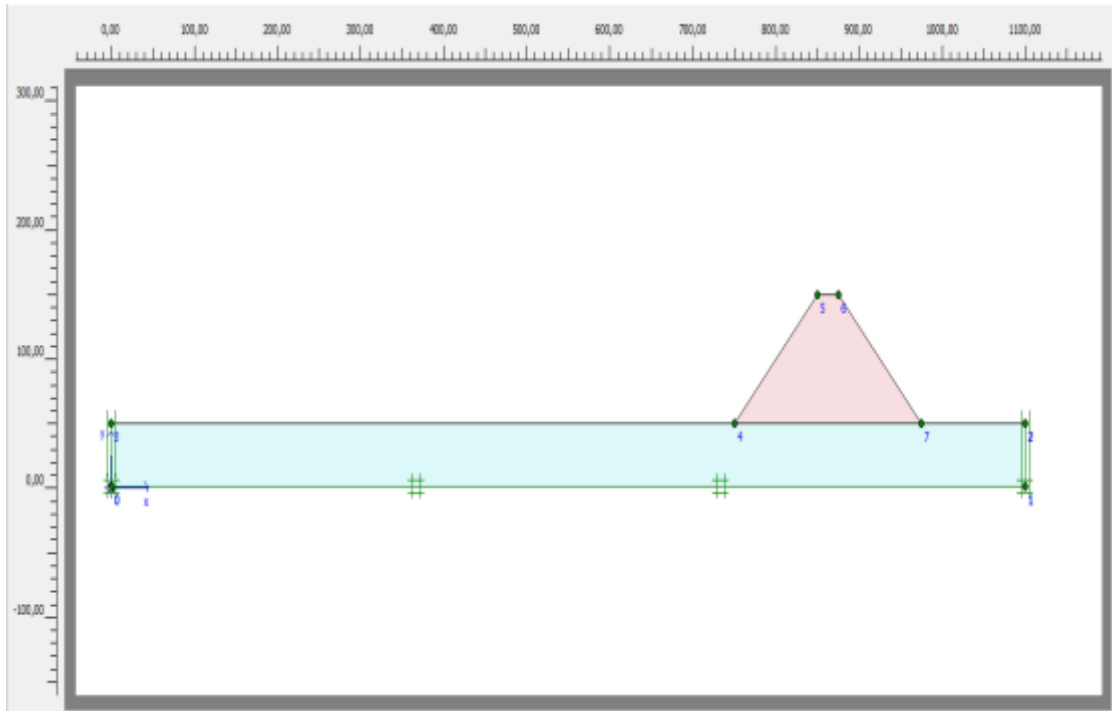


Εικόνα 5.31 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στην βάση του φράγματος (σενάριο3)

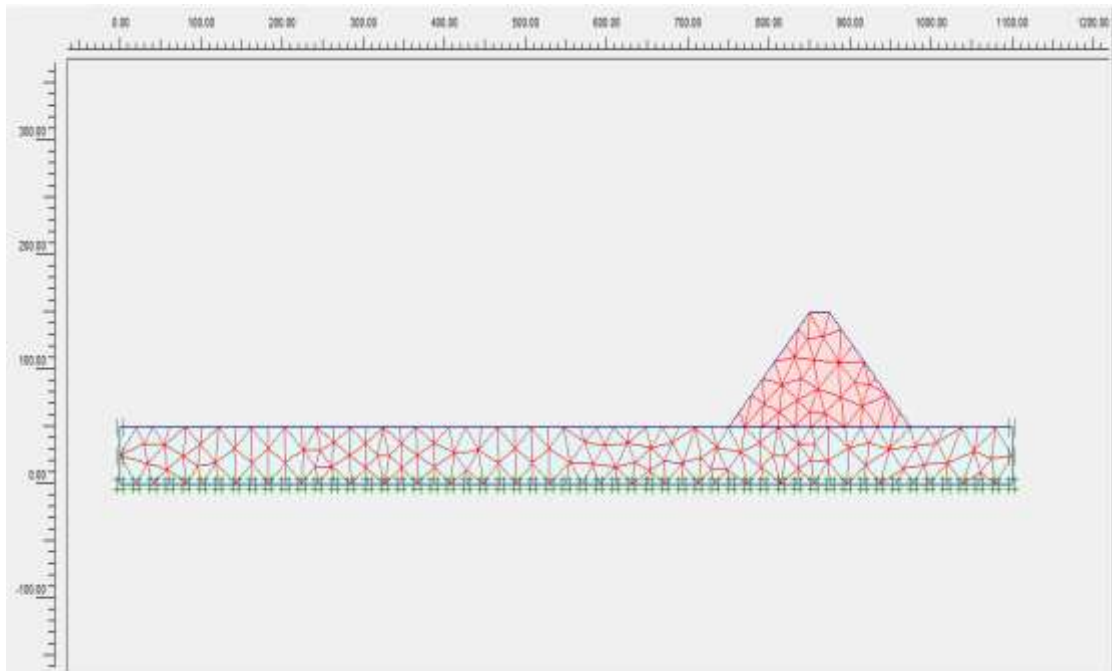
Στο σώμα του φράγματος λόγω του ότι με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις οι οριζόντιες ολικές τάσεις είναι μικρότερες από τις ολικές κατακόρυφες τάσεις ($\sigma_H < \sigma_V$) σημαίνει ότι στο σώμα του φράγματος έχουμε κατακόρυφη θλίψη. Έτσι κοντά στην βάση του φράγματος επιλέξαμε τρία σημεία όπως φαίνονται στο πιο πάνω σχήμα ώστε να υπολογίσουμε τις θλιπτικές τάσεις. Τα σημεία που επιλέχθηκαν ήταν τα ίδια ακριβώς με αυτά που επιλέχθηκαν στα προηγούμενα σενάρια. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-444,59	-2297,42	-81,72	-102,24	-81,76	-102,29

Στο τέταρτο στάδιο έχουμε στο πρότυπό μας έχουμε ένα φράγμα RCC με κλίση πρηνών (ανάντη και κατάντη) 45 μοιρών και εδράζεται στο ημιβραχώδες υπόστρωμα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα του σεναρίου.

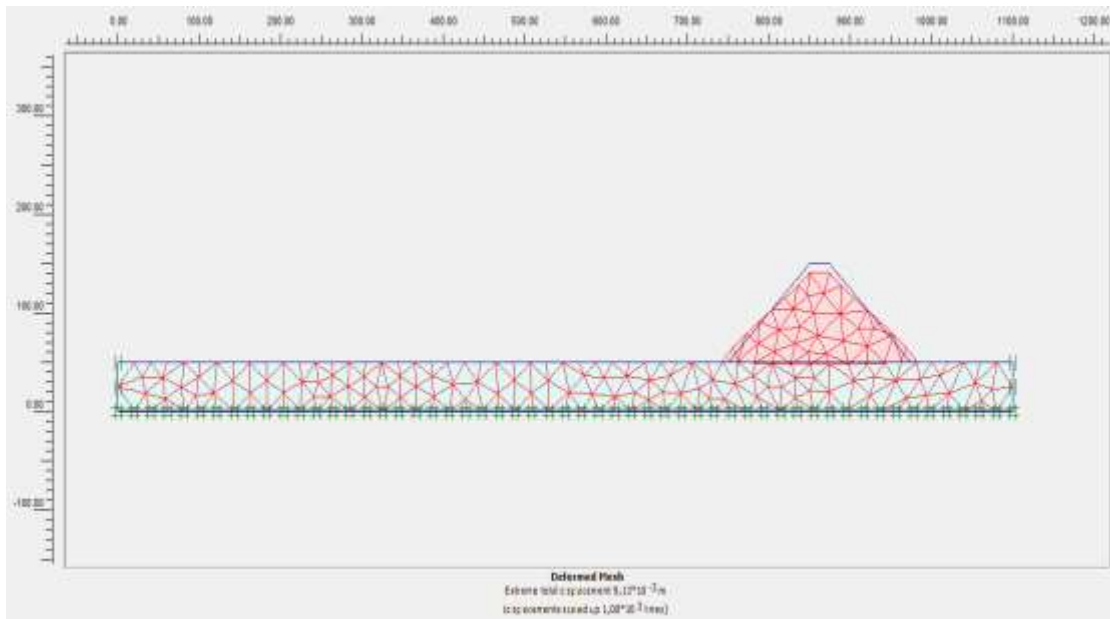


Εικόνα 5.32 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 4)



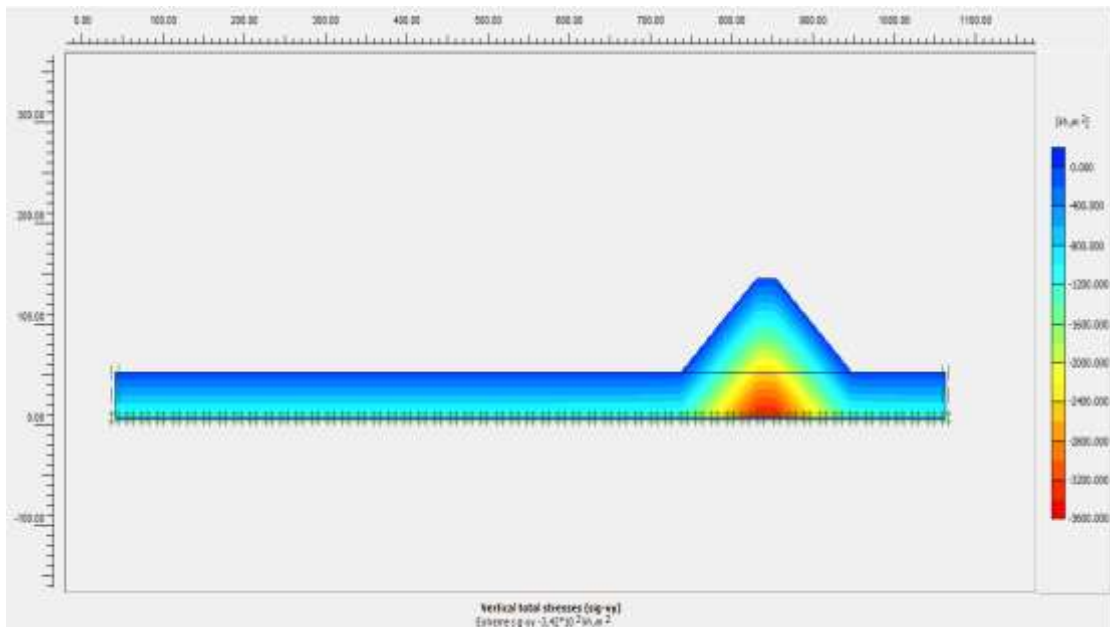
Εικόνα 5.33 Δίκτυο φράγματος 45 μοιρών σε ημίβραχο (σενάριο 4)

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης (σενάριο 4)



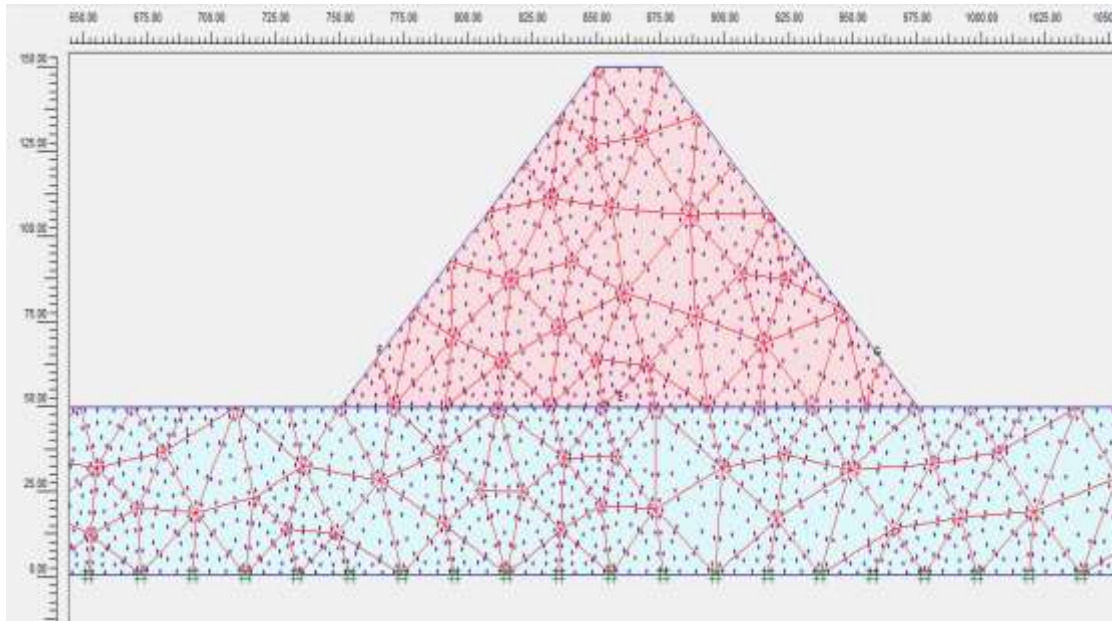
Εικόνα 5.34 Αποτελέσματα παραμόρφωσης του δικτύου του προτύπου (σενάριο 4)

Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε πως οι παραμορφώσεις του προτύπου μας είναι της τάξης των $9,13 \times 10^{-3}$ m. Οι παραμορφώσεις οφείλονται στο ότι το ημιβραχώδες υλικό στο οποίο εδράζεται το φράγμα έχει το ίδιο μέτρο ελαστικότητας με το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα.



Εικόνα 5.35 Αποτελέσματα κατακόρυφων ολικών τάσεων προτύπου (σενάριο 4)

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο μας μας ενδιαφέρουν κυρίως οι κατακόρυφες τάσεις οι οποίες στην βάση του φράγματος υπολογίστηκαν (όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα) γύρω στα 2400 kN/m^2 όπως και στα προηγούμενα σενάρια.



Εικόνα 5.36 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στη βάση του φράγματος (σενάριο 4)

Στο σώμα του φράγματος λόγω του ότι με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις οι οριζόντιες ολικές τάσεις είναι μικρότερες από τις ολικές κατακόρυφες τάσεις ($\sigma_H < \sigma_V$) σημαίνει ότι στο σώμα του φράγματος έχουμε κατακόρυφη θλίψη. Έτσι κοντά στην βάση του φράγματος επιλέξαμε τρία σημεία όπως φαίνονται στο πιο πάνω σχήμα ώστε να υπολογίσουμε τις θλιπτικές τάσεις. Τα σημεία που επιλέχθηκαν ήταν τα ίδια ακριβώς με αυτά που επιλέχθηκαν στα προηγούμενα σενάρια. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-14,14	-2342,27	10,54	-13,64	10,25	-14,00

5.3 Στατική ανάλυση (με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα)

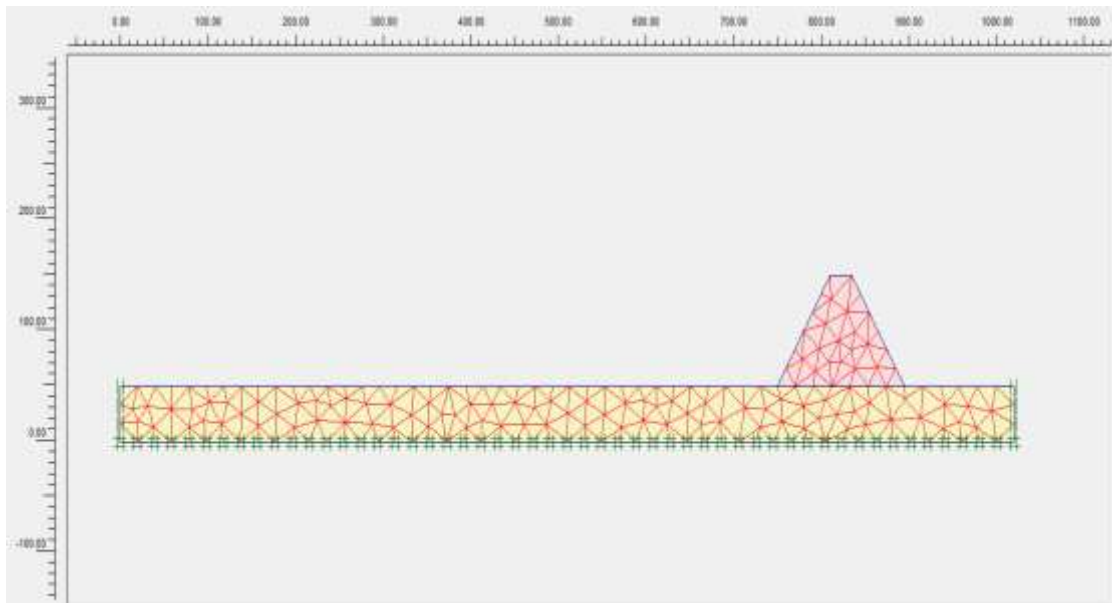
Σε αυτό το σημείο αναλύουμε τη στατική συμπεριφορά του προτύπου μας με την παρουσία νερού στον ταμιευτήρα. Είναι γεγονός ότι το νερό στον ταμιευτήρα εισάγει υδροστατικές ωθήσεις στο σώμα του φράγματος το οποίο καταπονείται περισσότερο. Σε αυτό το στάδιο των αναλύσεων που διεξήχθησαν λαμβάνοντας υπόψιν την παρουσία του νερού λάβαμε δύο περιπτώσεις για κάθε ένα από τέσσερα σενάρια που αναφέρθηκαν και εξετάστηκαν προηγουμένως (όσον αφορά την στατική φόρτιση). Έτσι στην πρώτη περίπτωση θεωρήσαμε ότι η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα βρίσκεται στην μέση, ενώ στην δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε η μέγιστη στάθμη του νερού, ο ταμιευτήρας ήταν γεμάτος. Το φράγμα έχει ύψος 100m, στην πρώτη περίπτωση στην οποία ο ταμιευτήρας μας ήταν μισογεμάτος η στάθμη του νερού πάρθηκε στα 45m από την επιφάνεια του εδάφους. Στην δεύτερη περίπτωση που

θεωρείται γεμάτος ο ταμιευτήρας η στάθμη του νερού θεωρήθηκε στα 90m από την επιφάνεια του εδάφους. Τα προσμοιώματα τα οποία ελήφθησαν και στις δύο περιπτώσεις για κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια ήταν τα ίδια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην στατική ανάλυση του προηγούμενου βήματος (όπου δεν ελήφθη υπόψιν το νερό).

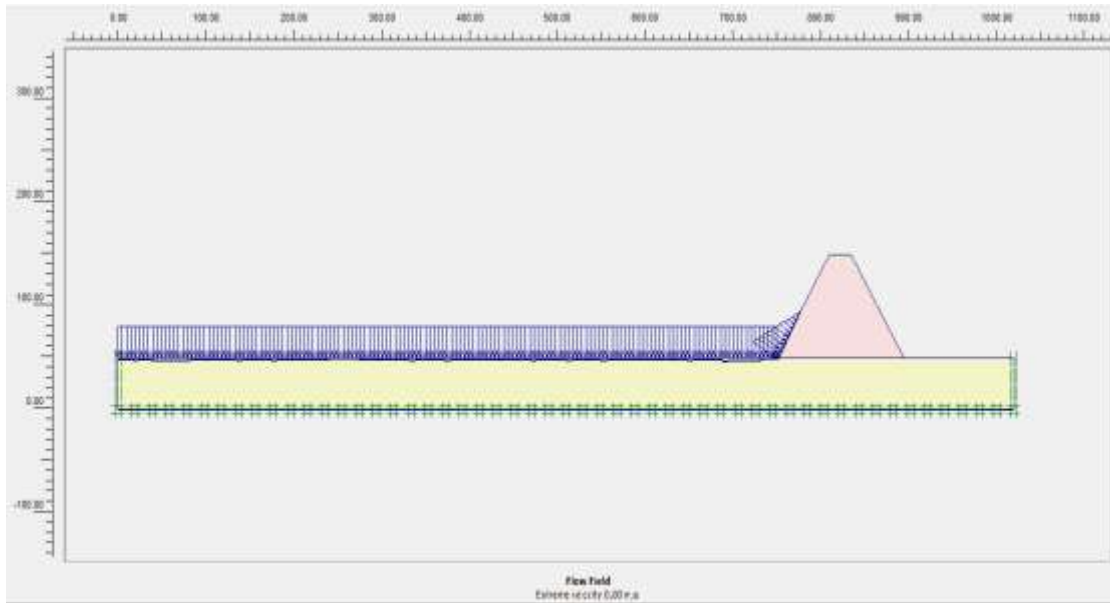
5.3.1 Στατική ανάλυση φράγματος σε περίπτωση μέσης στάθμης του νερού

5.3.1.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα

Στο πρώτο σενάριο το οποίο θεωρείται ότι το φράγμα έχει κλίση πρανών 60 μοίρες και εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα η στάθμη του νερού θεωρήθηκε 45m από το ύψος του εδάφους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω.



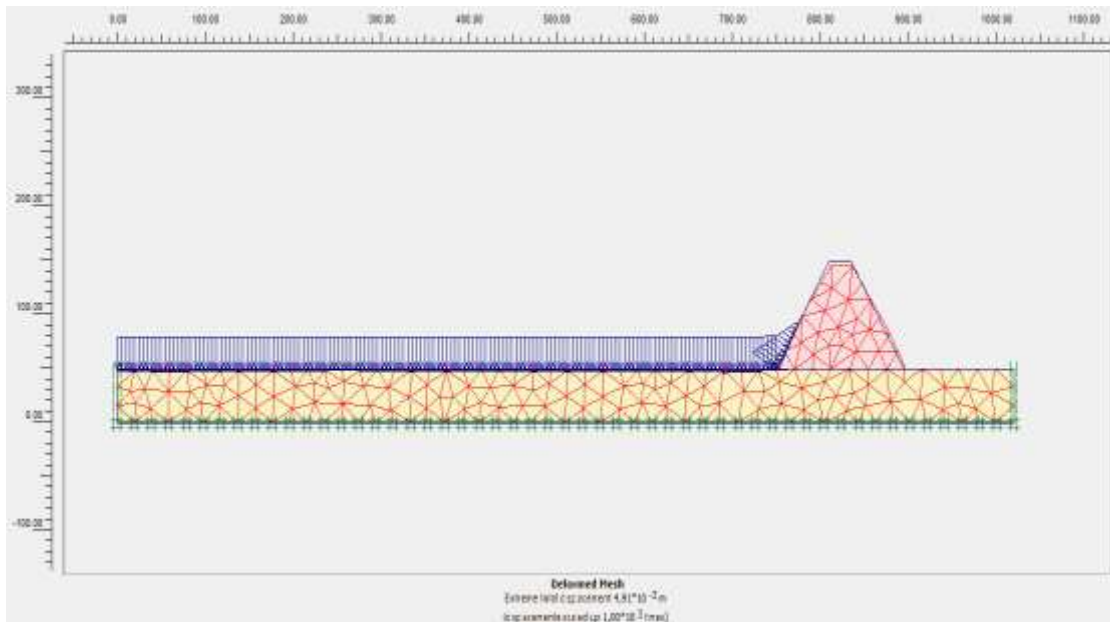
Εικόνα 5.37 Δίκτυο προσομοιώματος φράγματος 60 μοιρών πάνω σε βράχο (σενάριο 1)



Εικόνα 5.38 Ταχύτητα υπόγειας ροής μέσω στάθμη ταμειυτήρα (σενάριο 1)

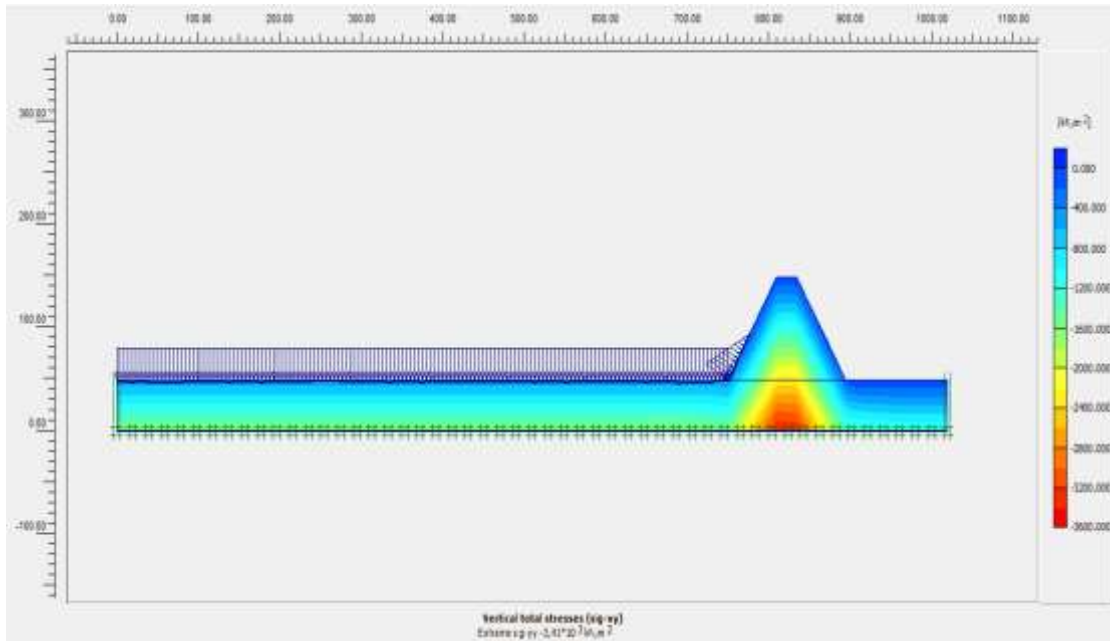
Παρατηρούμε πως η ταχύτητα ροής είναι 0m/s λόγω του ότι τόσο ο βράχος όσο και το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα θεωρούνται αδιαπέρατα.

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης μέσω στάθμη ταμειυτήρα (σενάριο 1)



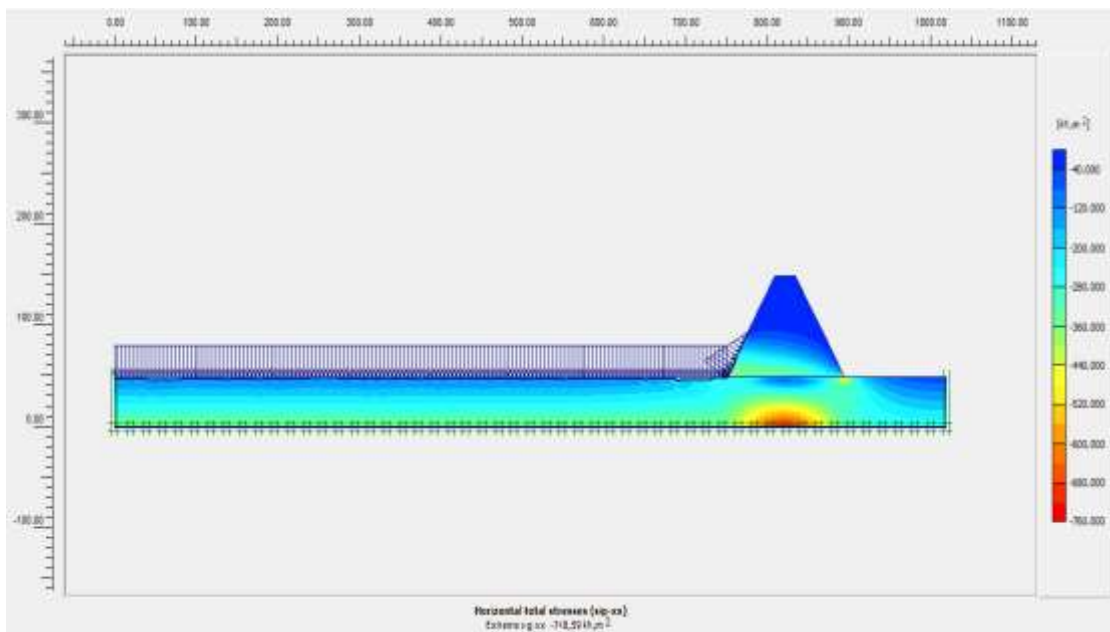
Εικόνα 5.39 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου μέσω στάθμη ταμειυτήρα (σενάριο 1)

Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε πως οι παραμορφώσεις του προτύπου μας είναι της τάξης των $4,91 \times 10^{-3} \text{ m}$. Οι παραμορφώσεις οφείλονται στο ότι το βραχώδες υλικό στο οποίο εδράζεται το φράγμα έχει το 11 φορές περισσότερο μέτρο ελαστικότητας από το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα.

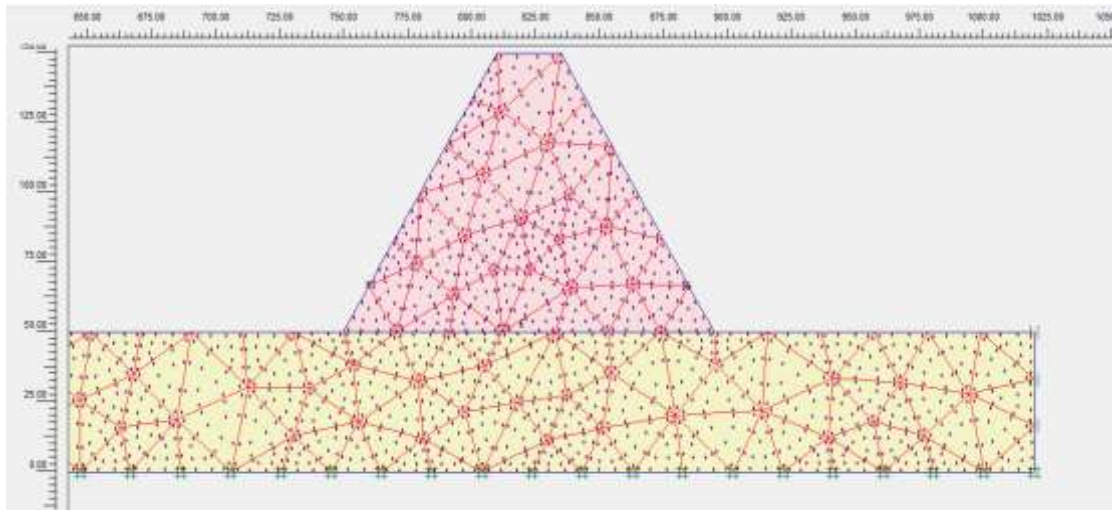


Εικόνα 5.40 Κατακόρυφες ολικές τάσεις για τη μέση στάθμη νερού (σενάριο 1)

Οι κατακόρυφες ολικές τάσεις που ασκούνται στην διεπιφάνεια του φράγματος και του εδάφους θεμελίωσης είναι γύρω στο 2400 kN/m^2 . Ο τύπος επαλήθευσης είναι $\gamma \times H$, όπου γ είναι το ειδικό βάρος του RCC και ισούται με 24 kN/m^3 και H είναι το ύψος του φράγματος για $H=100\text{m}$.



Εικόνα 5.41 Οριζόντιες ολικές τάσεις για τη μέση στάθμη νερού (σενάριο 1)



Εικόνα 5.42 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στο φράγμα (σενάριο 1)

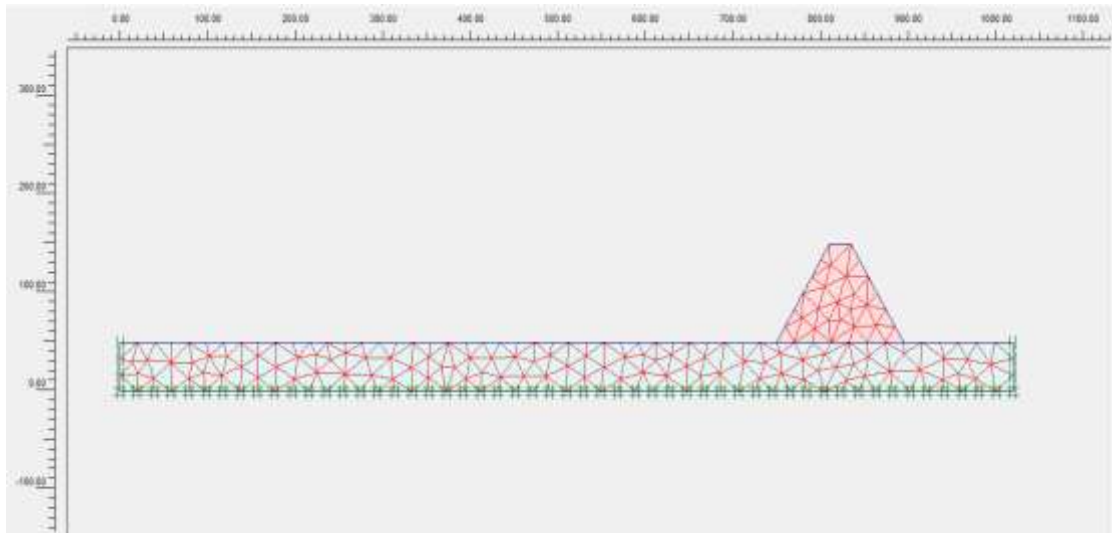
Τα τρία σημεία που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό θλιπτικών τάσεων και υπερπιέσεων των πόρων λόγω ύπαρξης νερού είναι τα ίδια σημεία τα οποία επιλέχθηκαν κατά την στατική ανάλυση με κενό ταμιευτήρα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

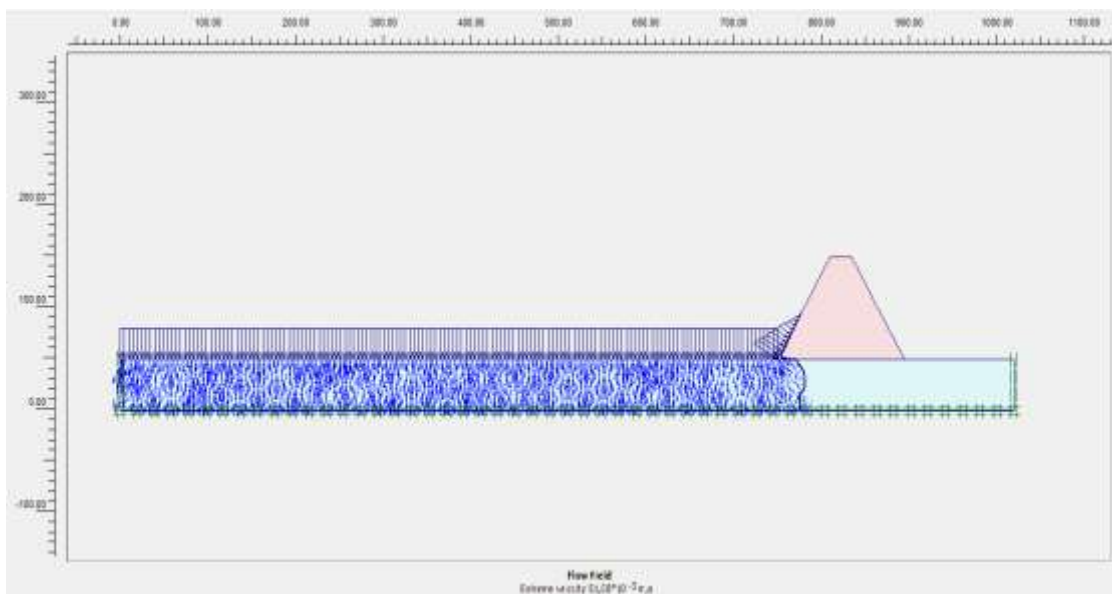
ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)
-412,59	-2272,20	-274,26	-302,26	-45,22	-167,24

Παρατηρήθηκε με βάση την παραπάνω ανάλυση ότι τα οι ολικές κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις που ασκούνται στο σημείο F στο ανάντη πρανές είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις που ασκούνται στο σημείο G στο κατόντη πρανές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ύπαρξης του νερού στον ταμιευτήρα το οποίο ασκεί υδροστατικές πιέσεις στην ανάντη πλευρά όπου βρίσκεται το σημείο F.

Στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται στο φράγμα με κλίση πρανών 60° και εδράζεται σε ημιβραχώδες υπόστρωμα. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων.



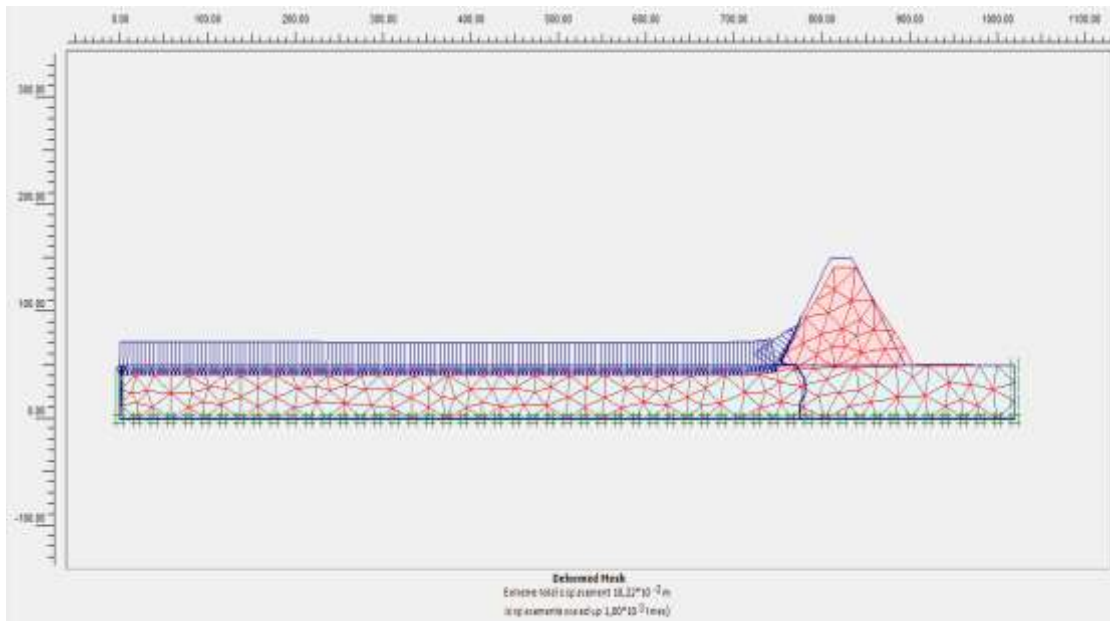
Εικόνα 5.43 Δίκτυο προσομοιώματος φράγματος 60 μοιρών σε ημίβραχο (σενάριο 2)



Εικόνα 5.44 Ταχύτητα ροής με μέση στάθμη νερού ταμειυτήρα (σενάριο 2)

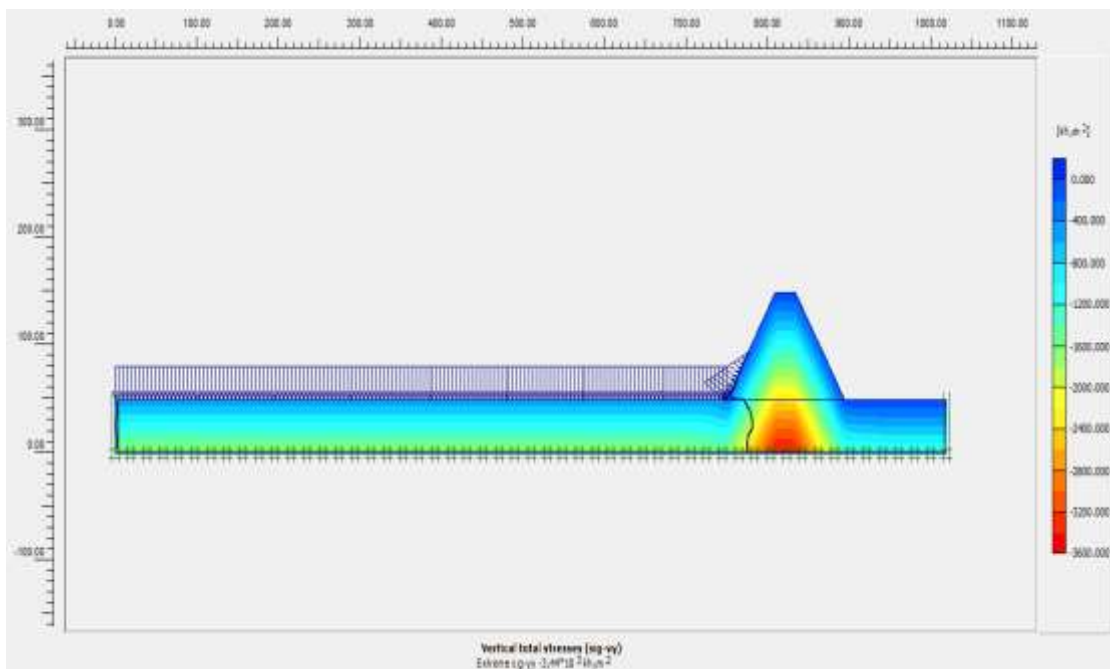
Παρατηρούμε πως η ταχύτητα ροής είναι $0,051\text{m/s}$ λόγω του ότι τόσο ο ημίβραχος είναι διαπερατός.

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέση στάθμη νερού του ταμιευτήρα

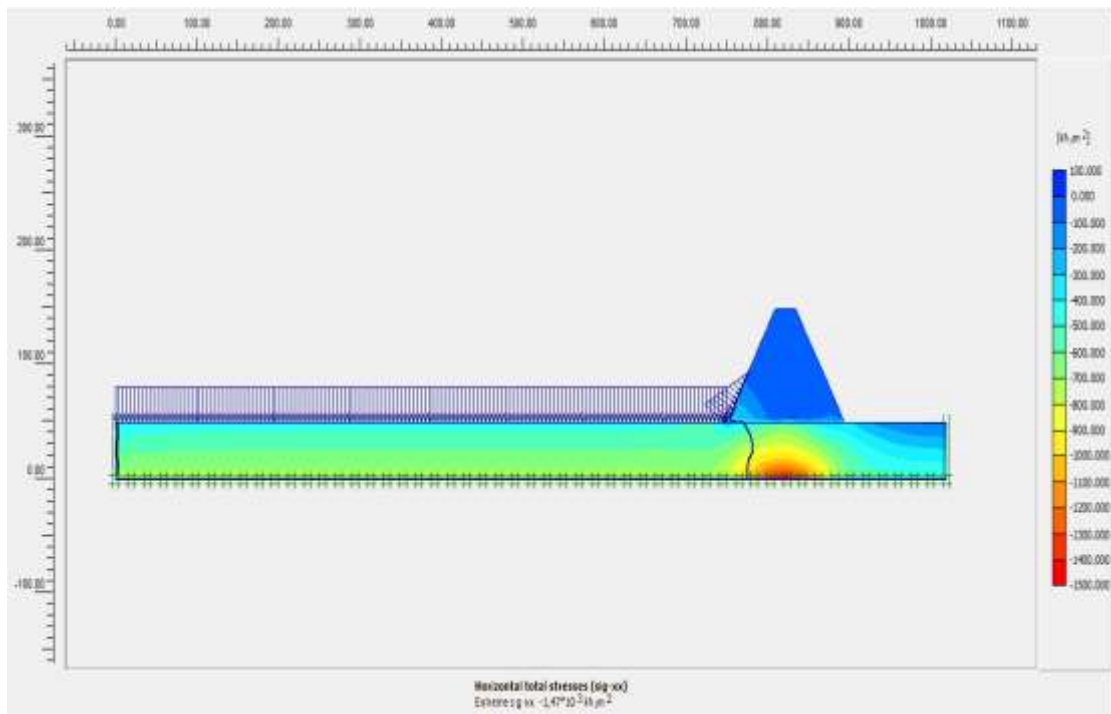


Εικόνα 5.45 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου για μέση στάθμη νερού (σενάριο 2)

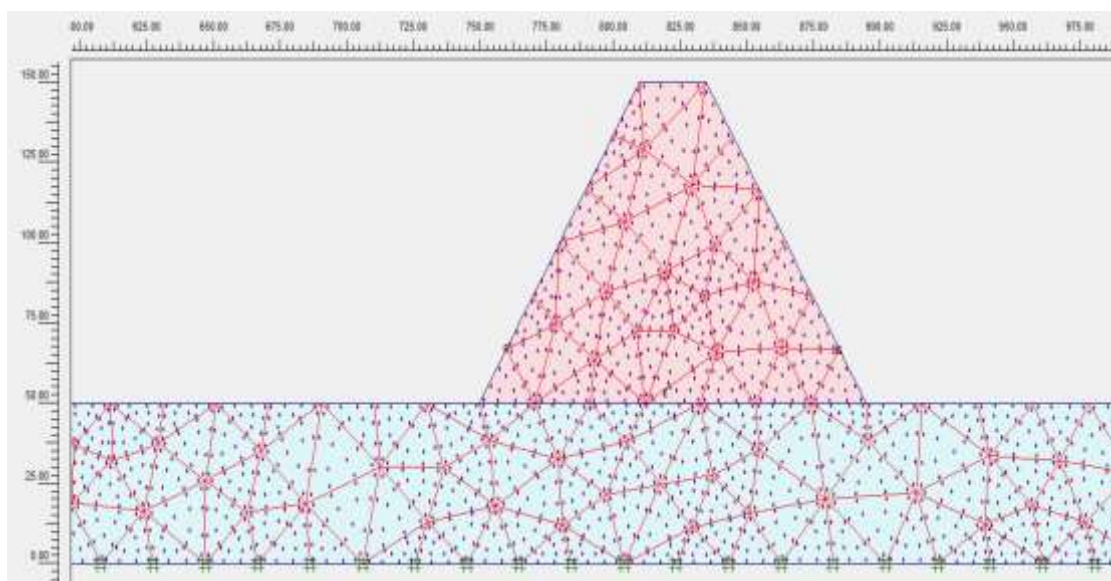
Οι παραμορφώσεις του δικτύου προτύπου είναι της τάξης των 10×10^{-3} m. Οι παραμορφώσεις οφείλονται στο ότι το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του φράγματος.



Εικόνα 5.46 Κατακόρυφες ολικές τάσεις για μισογεμάτο ταμιευτήρα (σενάριο 2)



Εικόνα 5.47 Οριζόντιες ολικές τάσεις για μέση στάθμη νερού (σενάριο 2)



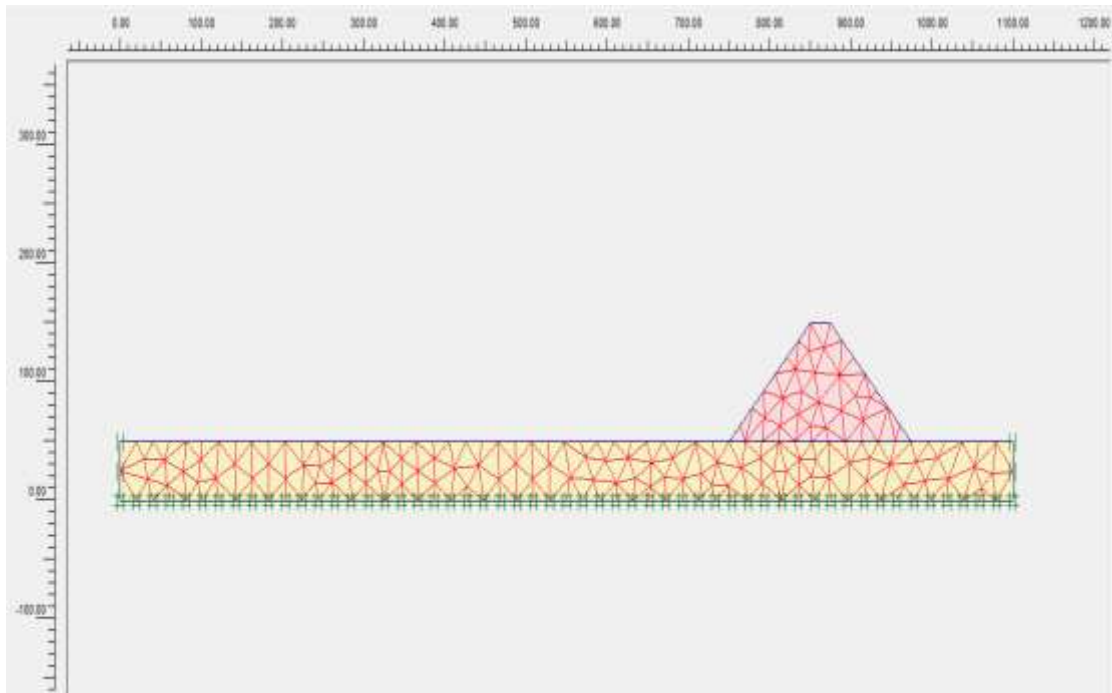
Εικόνα 5.48 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των τάσεων στο φράγμα (σενάριο 2)

Τα τρία σημεία που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό θλιπτικών τάσεων και υπερπίεσεων των πόρων λόγω ύπαρξης νερού είναι τα ίδια σημεία τα οποία επιλέχθηκαν κατά την στατική ανάλυση με άδεια ταμιευτήρα από νερό. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

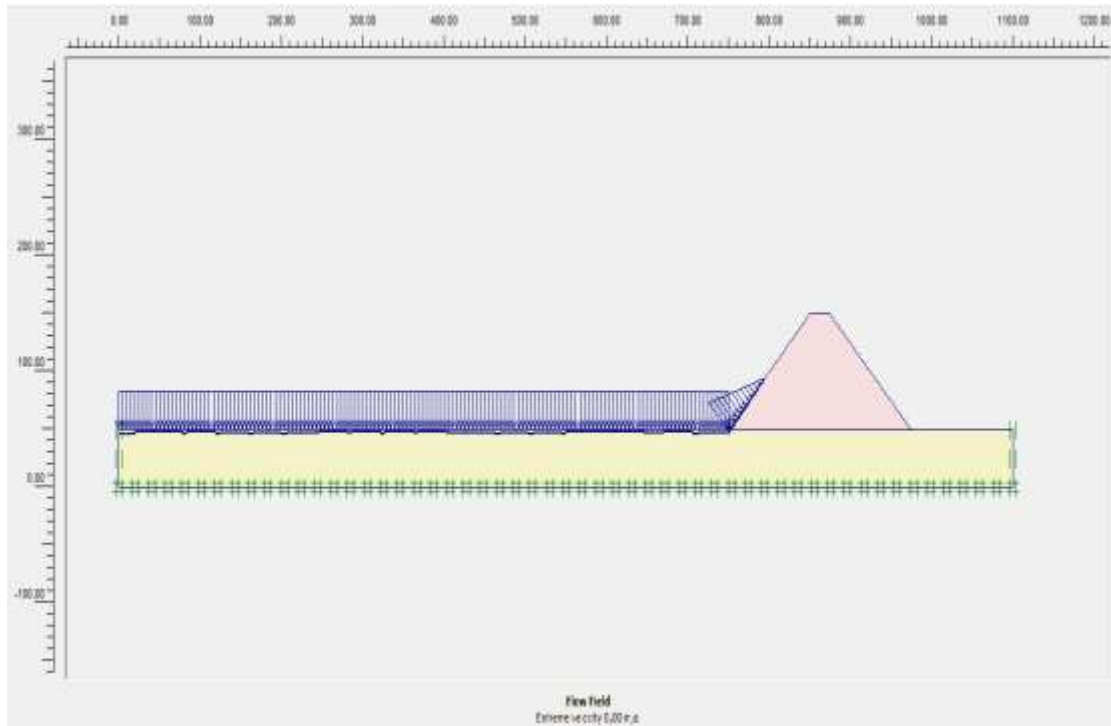
ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)
-7,33	-2320,39	-225,31	-179,05	-5,35	-103,59

Παρατηρήθηκε όπως και στο προηγούμενο σενάριο στην ανάλυση ότι οι ολικές κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις που ασκούνται στο σημείο F στο ανάντη πρανές είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις που ασκούνται στο σημείο G στο κατόντη πρανές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ύπαρξης του νερού στον ταμιευτήρα το οποίο ασκεί υδροστατικές πιέσεις στην ανάντη πλευρά όπου βρίσκεται το σημείο F.

Στο τρίτο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση του φράγματος κλίσης 45 μοιρών το οποίο εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα. Παρακάτω φαίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα των αναλύσεων.

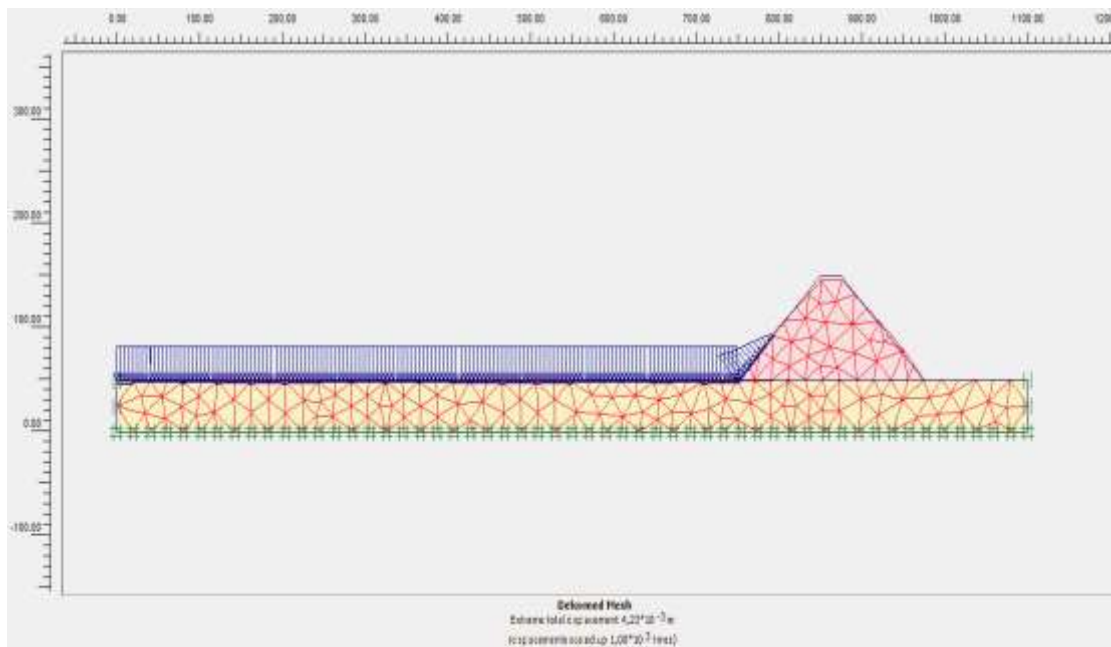


Εικόνα 5.49 Δίκτυο προσομοιώματος φράγματος 45 μοιρών πάνω σε βράχο (σενάριο 3)



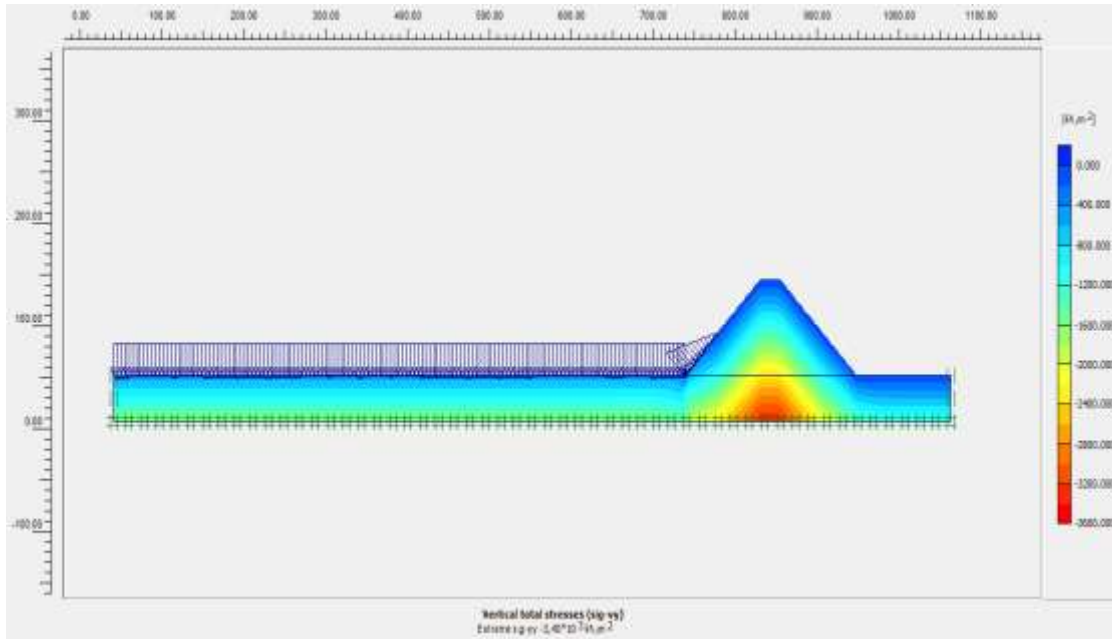
Εικόνα 5.50 Ταχύτητα ροής για μέση στάθμη νερού στο ταμιευτήρα (σενάριο 3)

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέση στάθμη νερού του ταμιευτήρα

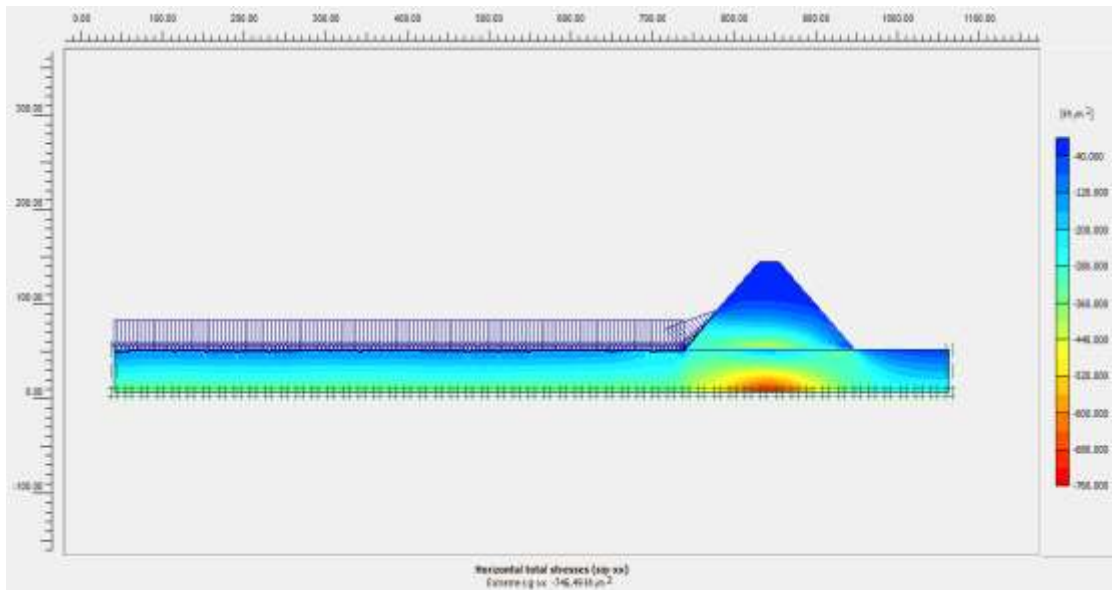


Εικόνα 5.51 Παραμόρφωση δικτύου φράγματος για μέση στάθμη νερού (σενάριο 3)

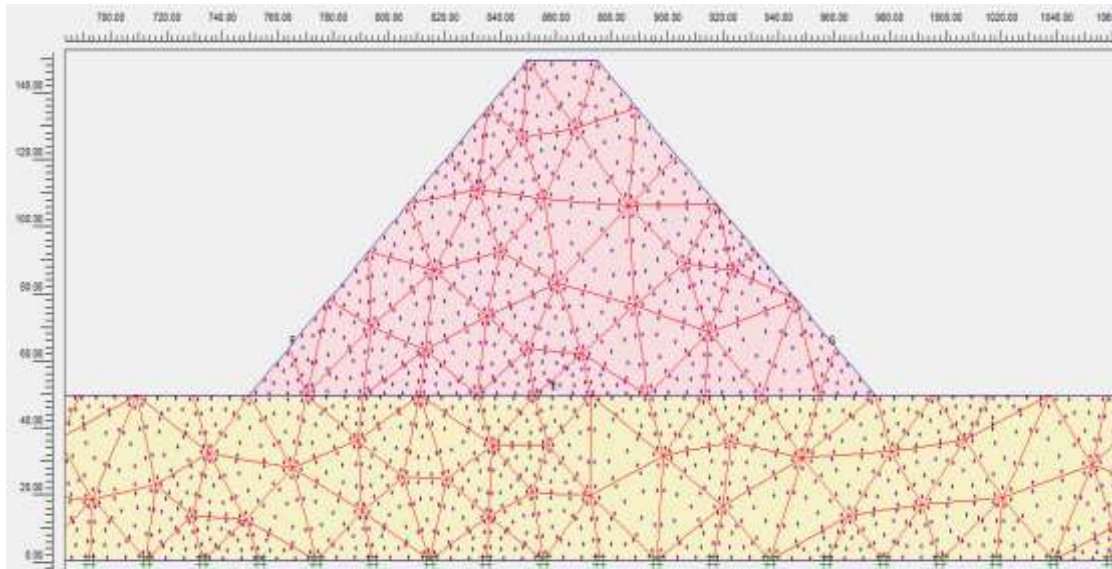
Εδώ παρατηρήθηκε πως οι παραμορφώσεις του προτύπου μας είναι της τάξης των $4,23 \times 10^{-3} \text{m}$. Οι παραμορφώσεις οφείλονται στο ότι το βραχώδες υλικό στο οποίο εδράζεται το φράγμα έχει το 11 φορές περισσότερο μέτρο ελαστικότητας από το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα.



Εικόνα 5.52 Κατακόρυφες ολικές τάσεις στο φράγμα για μέση στάθμη νερού (σενάριο 3)



Εικόνα 5.53 Οριζόντιες ολικές τάσεις στο φράγμα για τη μέση στάθμη νερού (σενάριο 3)



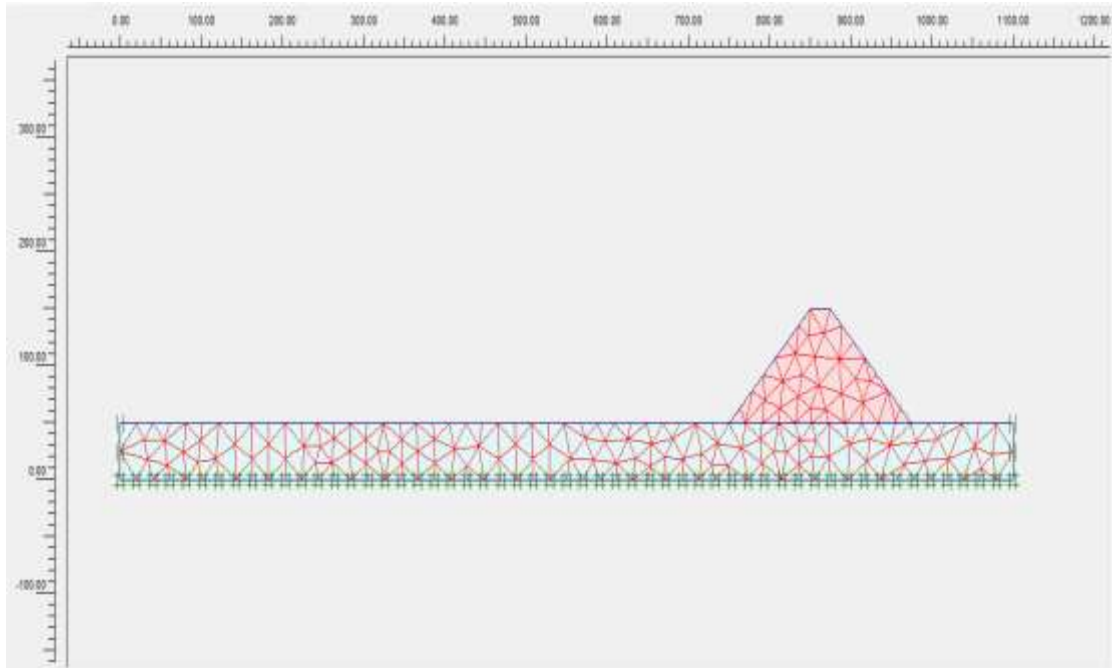
Εικόνα 5.54 Σημεία επιλογής για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στη βάση του φράγματος (σενάριο 3)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματά από την ανάλυση.

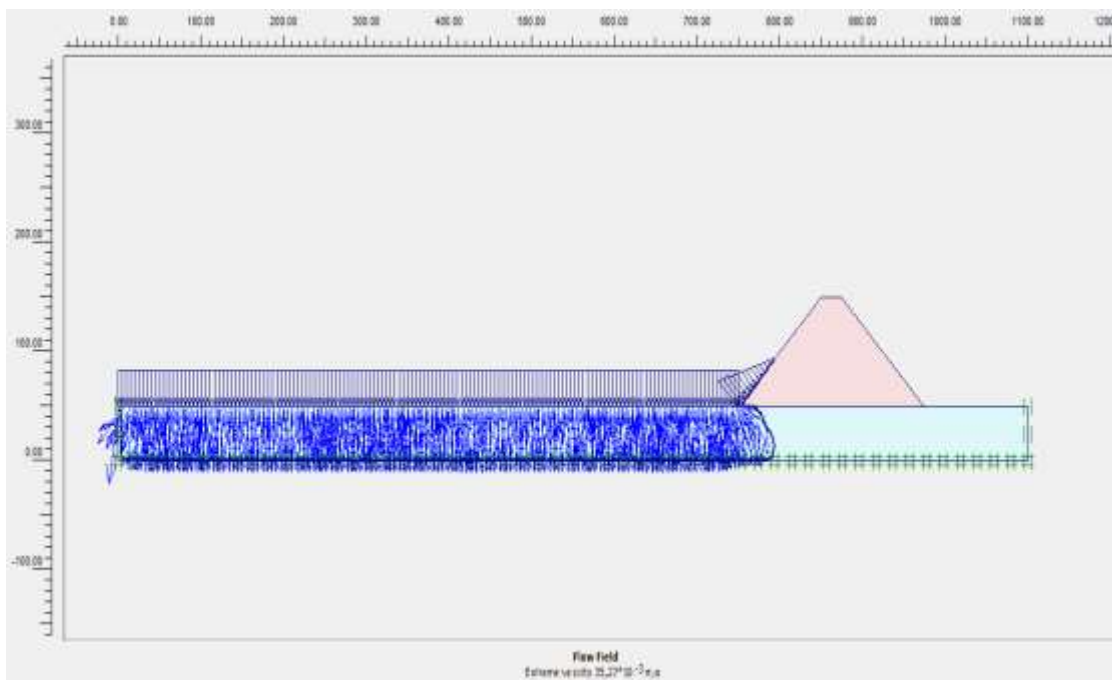
ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε
-449,31		-2293,89		-317,17		-354,53		-98,06		-127,21	

Παρατηρείται πως οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο σημείο F το οποίο βρίσκεται στο ανάντη πρανές από ότι στο σημείο G στο κατόντη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του νερού στο ανάντη τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα να ασκεί υδροστατικές ωθήσεις.

Στο τέταρτο στάδιο έχουμε φράγμα με γωνία κλίσης 45 μοιρών το οποίο εδράζεται πάνω σε ημιβραχώδες υπόστρωμα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από αυτή την ανάλυση.



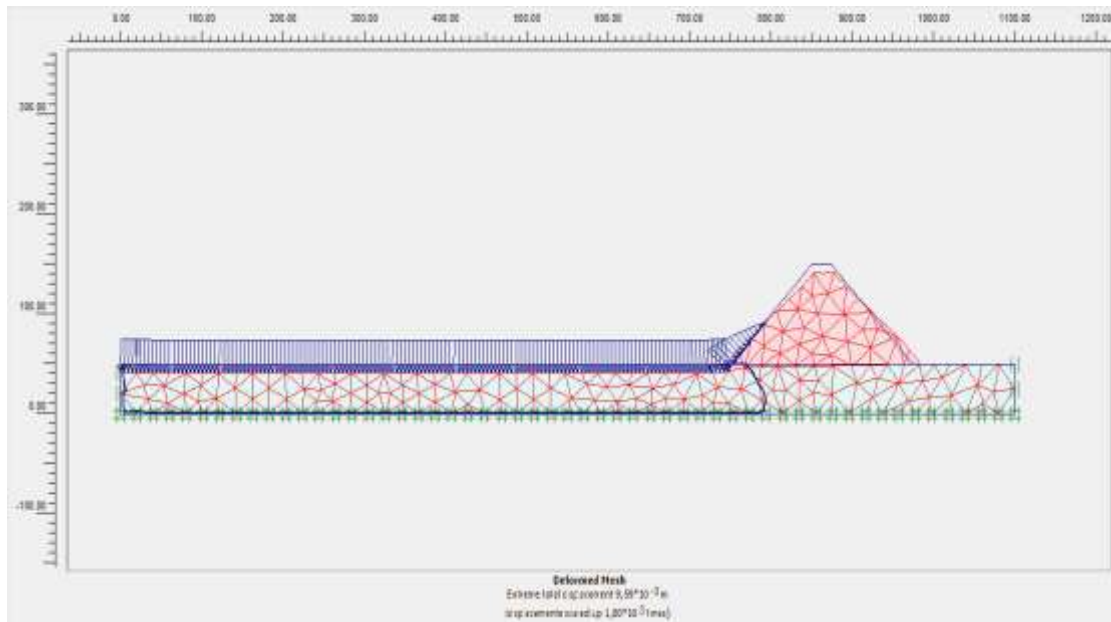
Εικόνα 5.55 Δίκτυο του φράγματος κλίσης 45 μοιρών το οποίο εδράζεται σε ημίβραχο



Εικόνα 5.56 Ταχύτητα ροής για μέση στάθμη νερού στον ταμειυτήρα (σενάριο 4)

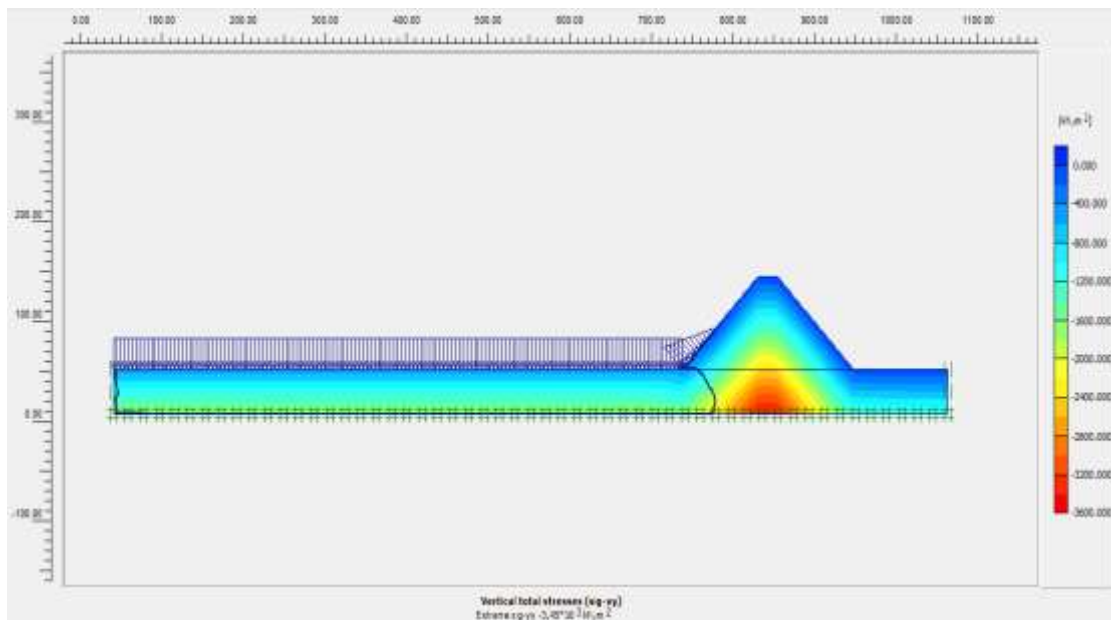
Παρατηρούμε πως η ταχύτητα ροής είναι $35,27 \cdot 10^{-3} \text{m/s}$ στον ημίβραχο ο οποίος θεωρείται διαπερατός.

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέση στάθμη νερού του ταμιευτήρα (σενάριο 4)

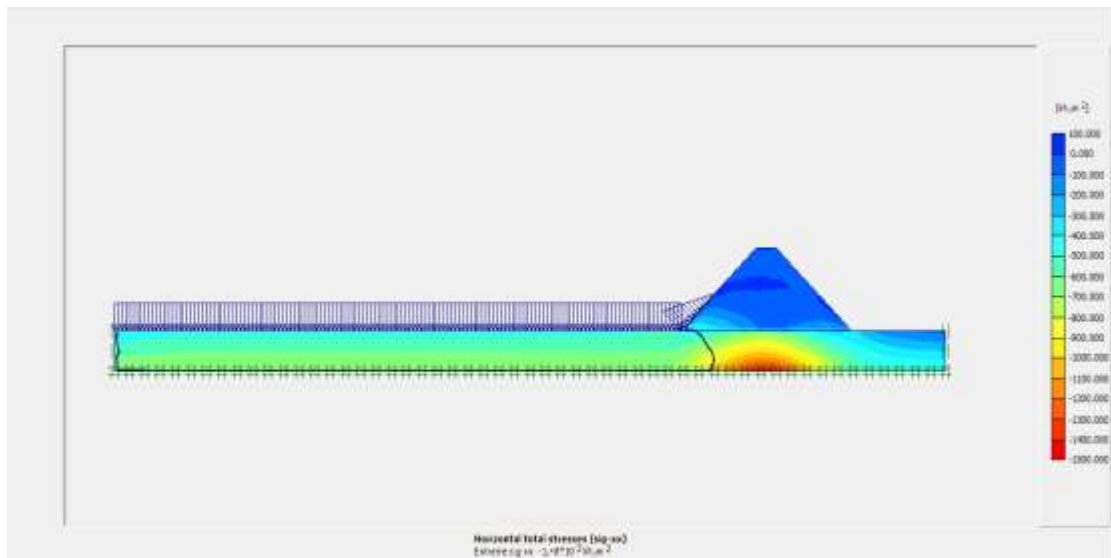


Εικόνα 5.57 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου για μέση στάθμη νερού (σενάριο 4)

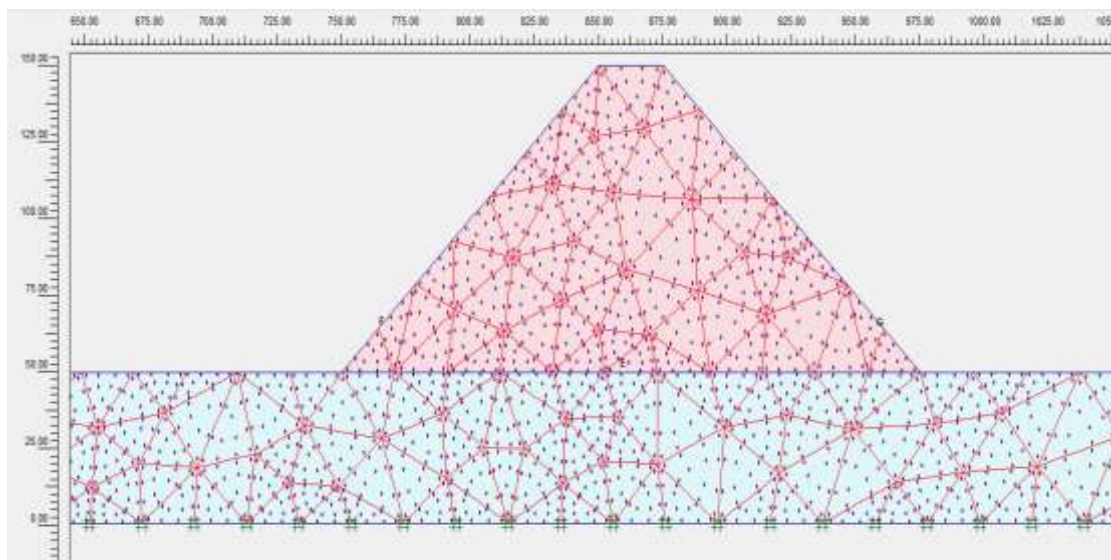
Οι παραμορφώσεις που προκύπτουν είναι της τάξης των $10 \cdot 10^{-3}$ m και προκαλούνται στο έδαφος θεμελίωσης όσο και στο σώμα του φράγματος και οφείλονται στο βάρος του φράγματος όσο και στην παρουσία του νερού στο ταμιευτήρα το οποίο προκαλεί επιπλέον φορτίσεις στο έδαφος και στο σώμα του φράγματος.



Εικόνα 5.58 Κατακόρυφες ολικές δυνάμεις για τη μέση στάθμη νερού (σενάριο 4)



Εικόνα 5.59 Οριζόντιες ολικές τάσεις στο για τη μέση στάθμη νερού (σενάριο 4)



Εικόνα 5.60 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων

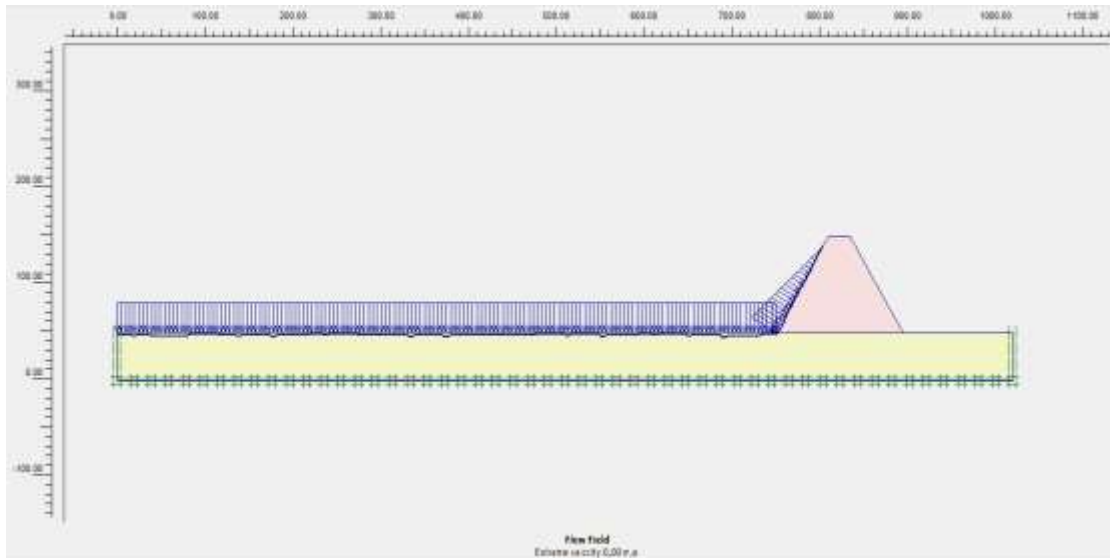
ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-93,30	-2340,53	-195,39	-222,56	-12,62	-34,60

Παρατηρείται πως οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο σημείο F το οποίο βρίσκεται στο ανάντη πρανές από ότι στο σημείο G στο κατόντη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του νερού στο ανάντη τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα να ασκεί υδροστατικές ωθίσεις.

5.3.2 Στατική ανάλυση φράγματος σε περίπτωση μέγιστης στάθμης του νερού

5.3.2.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα

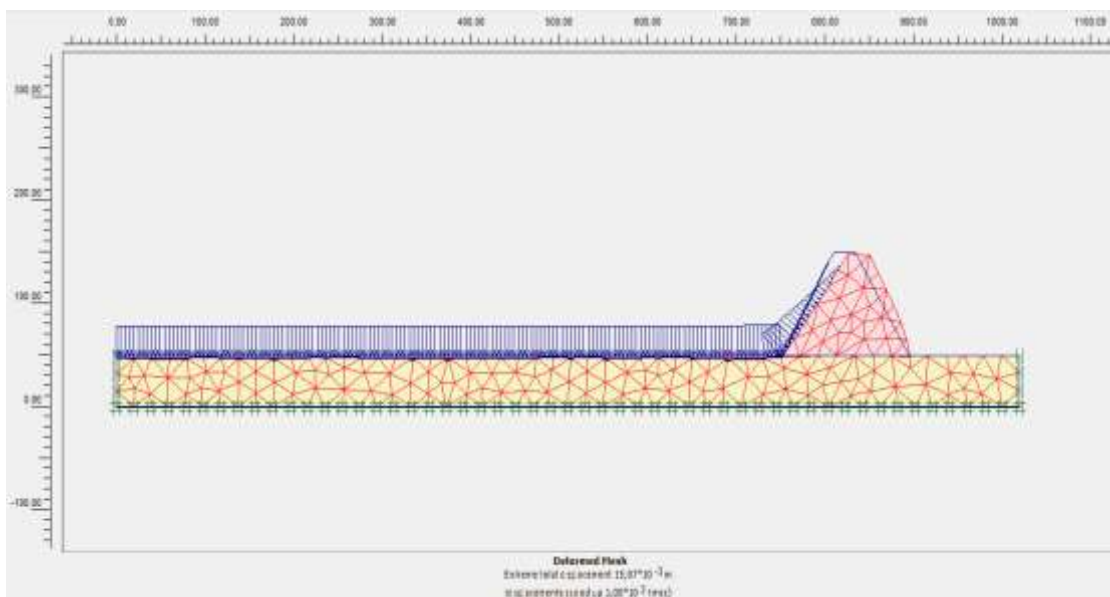
Εδώ εξετάζουμε την περίπτωση του σεναρίου 1, όπου το φράγμα μας έχει κλίση πρανάων 60 μοίρες και εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 5.61 Ταχύτητα ροής στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 1)

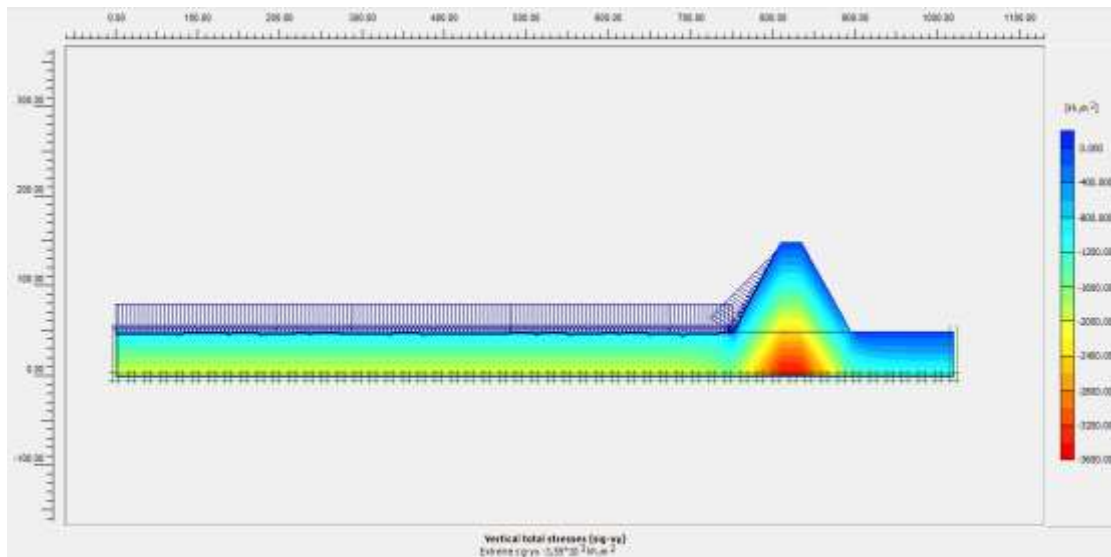
Το νερό δεν διεισδεί στο βραχώδες υπόστρωμα λόγω της μηδενικής υδατοπερατότητας (ταχύτητα ροής 0m/s).

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέγιστη στάθμη νερού του ταμιευτήρα (σενάριο 1)

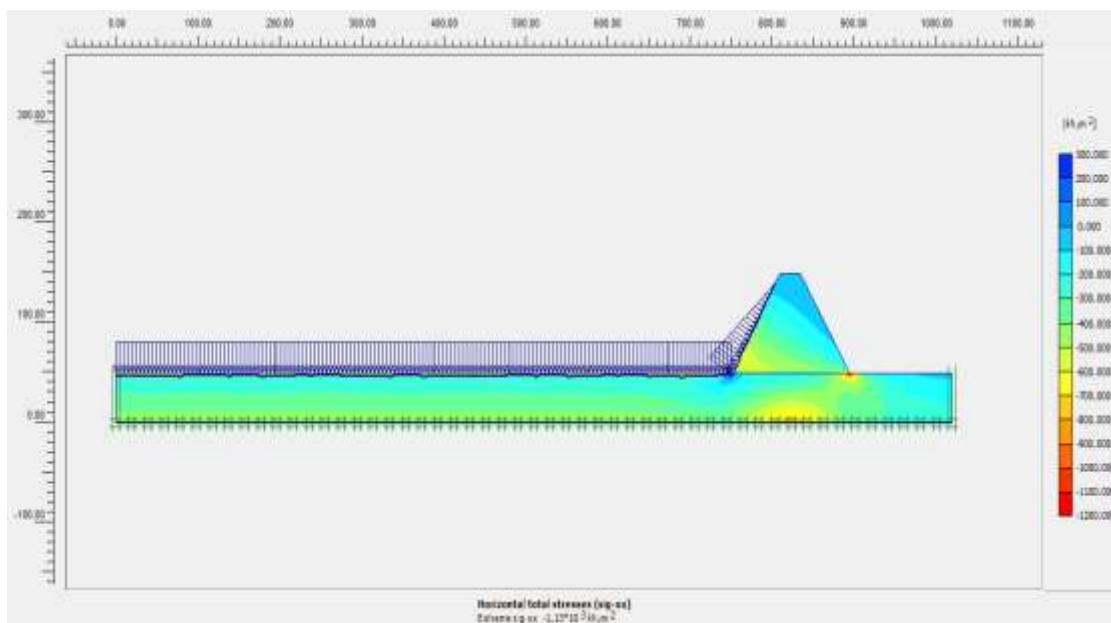


Εικόνα 5.62 Παραμόρφωση δικτύου φράγματος για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 1)

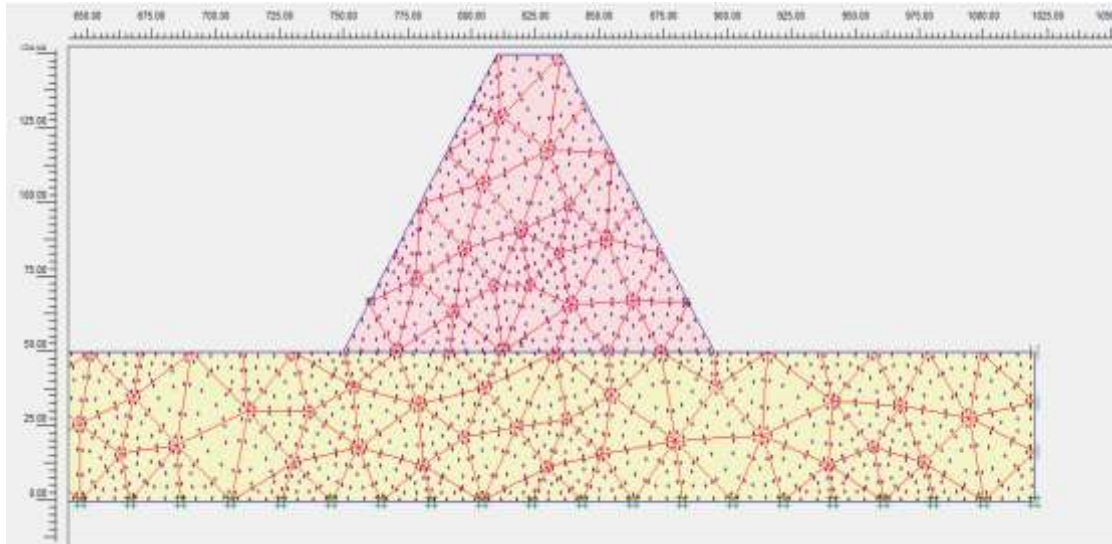
Οι παραμορφώσεις που προκύπτουν είναι της τάξης των $16 \cdot 10^{-3}$ m και προκαλούνται στο έδαφος θεμελίωσης όσο και στο σώμα του φράγματος και οφείλονται στο βάρος του φράγματος όσο και στην παρουσία του νερού στο ταμιευτήρα το οποίο προκαλεί επιπέον φορτίσεις στο έδαφος και στο σώμα του φράγματος.



Εικόνα 5.63 Κατακόρυφες ολικές τάσεις που ασκούνται στο πρότυπο (σενάριο 1)



Εικόνα 5.64 Οριζόντιες ολικές τάσεις που ασκούνται στο πρότυπο (σενάριο 1)



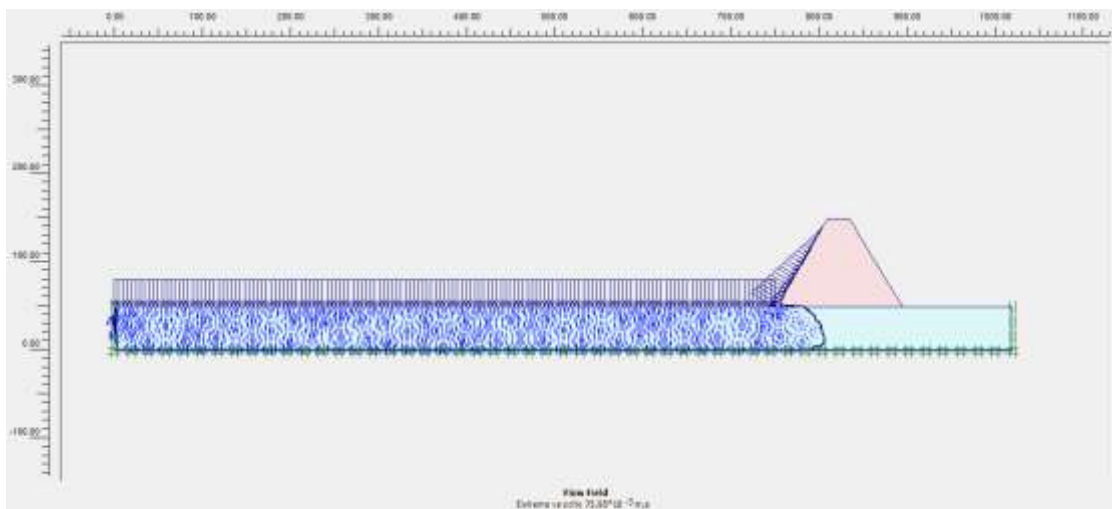
Εικόνα 5.65 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στη βάση του φράγματος (σενάριο 1)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-513,48	-2355,70	-559,92	-306,42	-125,17	-395,20

Παρατηρείται πως οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο σημείο F το οποίο βρίσκεται στο ανάντη πρηνές από ότι στο σημείο G στο κατόντη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του νερού στα ανάντη τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα να ασκεί υδροστατικές ωθήσεις.

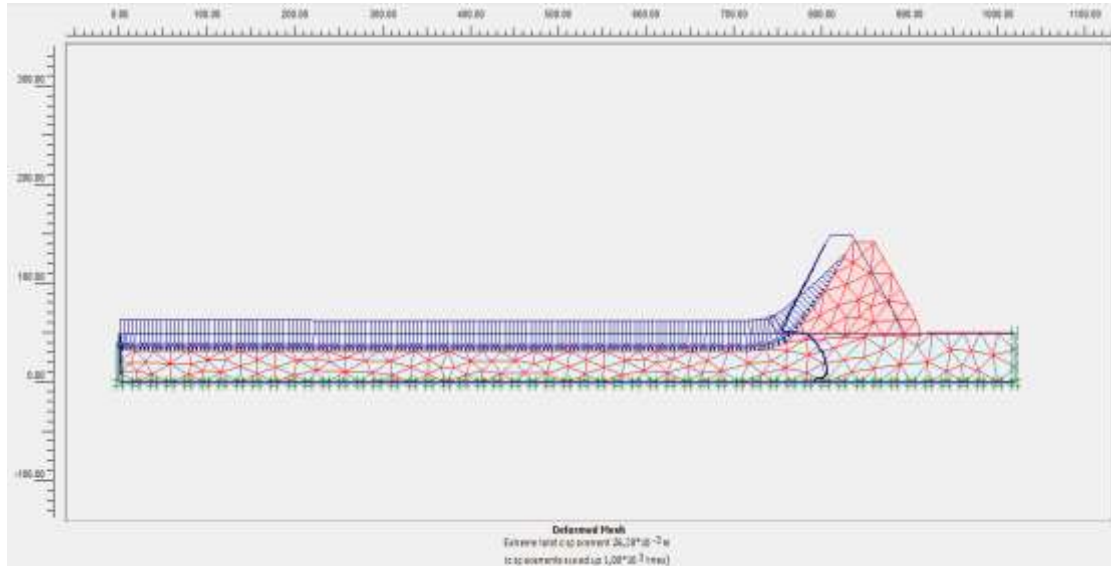
Παρακάτω λαμβάνεται το σενάριο 2 για μέγιστη στάθμη νερού στον ταμιευτήρα. Το φράγμα έχει γωνία κλίσεων πρηνών 60 μοίρες και εδράζεται σε ημιβραχώδες υπόστρωμα. Παρακάτω προβάλλονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



Εικόνα 5.66 Ταχύτητα ροής στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού στον ταμιευτήρα (σενάριο 2)

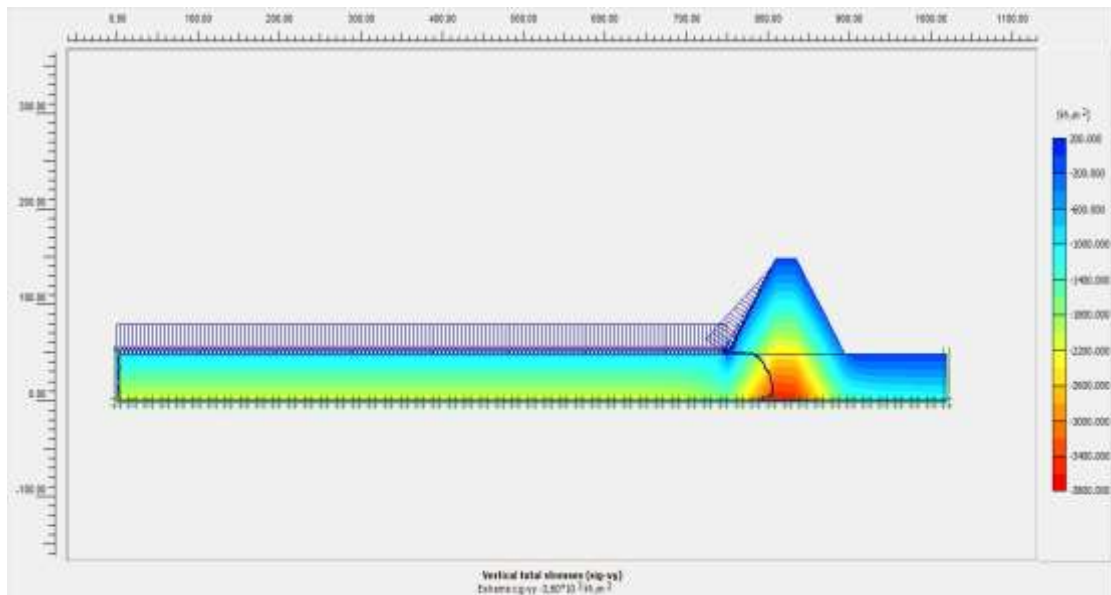
Το νερό διεισδίδει μέσα στο υδατοπερατό ημιβραχώδες υπόστρωμα και έχει ταχύτητα ροής $75,95 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέγιστη στάθμη νερού του ταμιευτήρα (σενάριο 2)

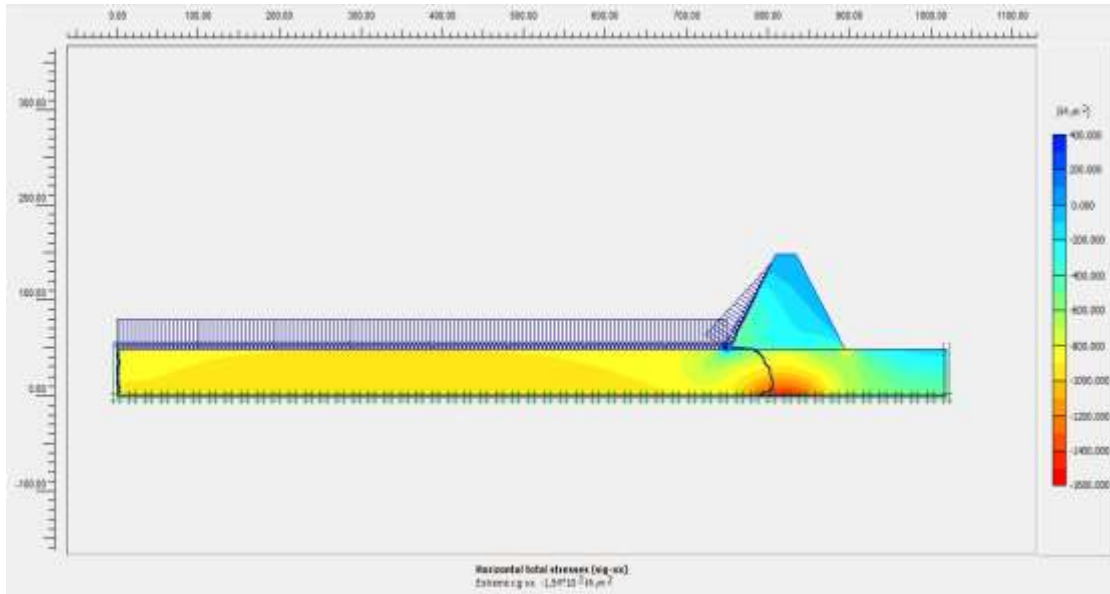


Εικόνα 5.67 Παραμόρφωση δικτύου του προτύπου για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 2)

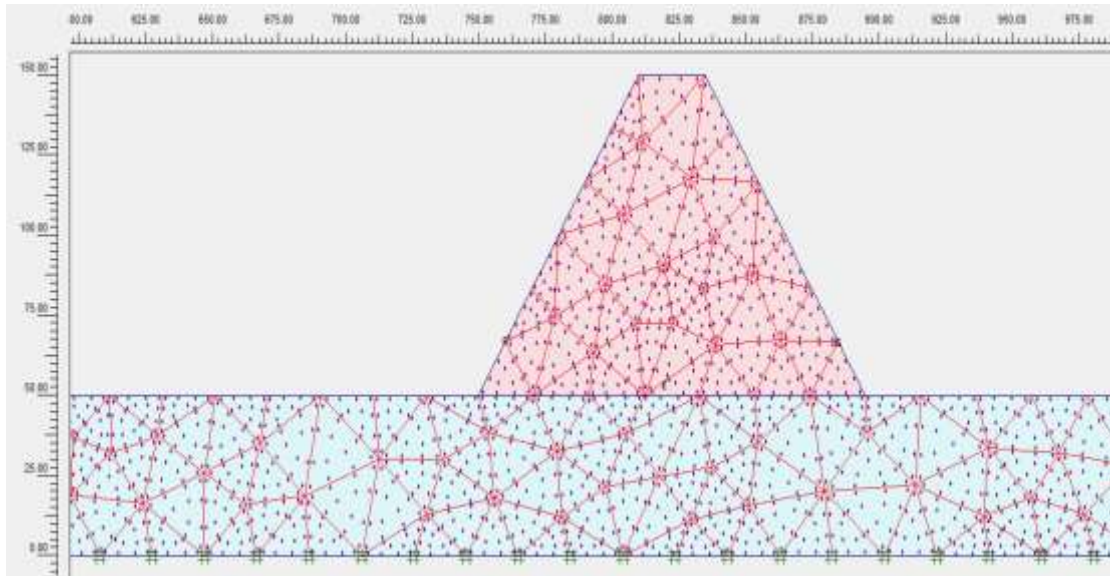
Οι παραμορφώσεις είναι της τάξης των $26,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Εδώ έχουμε ημιβραχώδες υπόστρωμα και το νερό ασκεί δυνάμεις τόσο στο υπόστρωμα όσο και στο σώμα του φράγματος.



Εικόνα 5.68 Κατακόρυφες ολικές τάσεις στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 2)



Εικόνα 5.69 Οριζόντιες ολικές τάσεις στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 2)



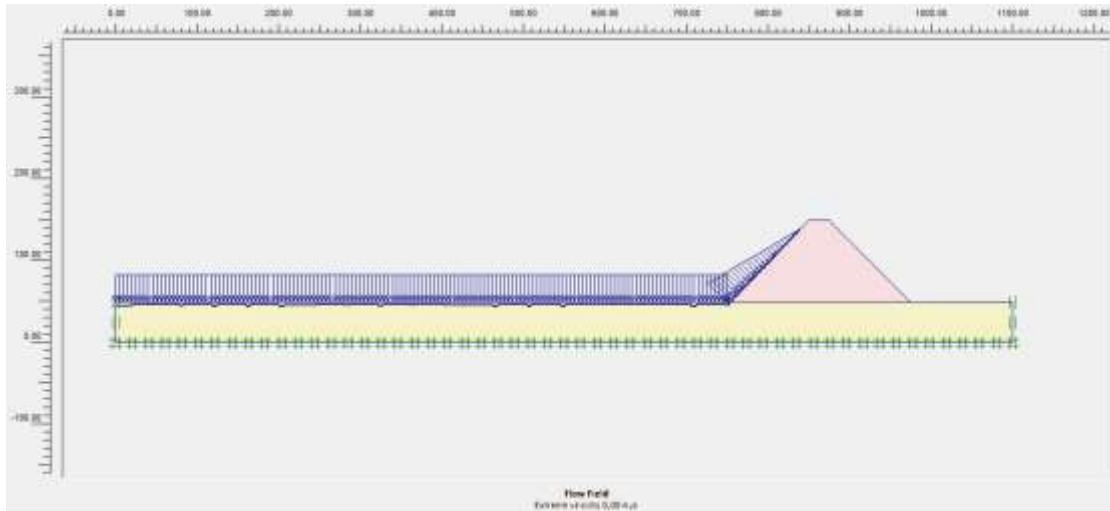
Εικόνα 5.70 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στη βάση του φράγματος (σενάριο2)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-232,96	-2418,15	-530,30	-192,22	-72,81	-314,61

Παρατηρείται πως οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο σημείο F το οποίο βρίσκεται στο ανάντη πρηνές από ότι στο σημείο G στο κατόντη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του νερού στα ανάντη τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα να ασκεί υδροστατικές ωθήσεις.

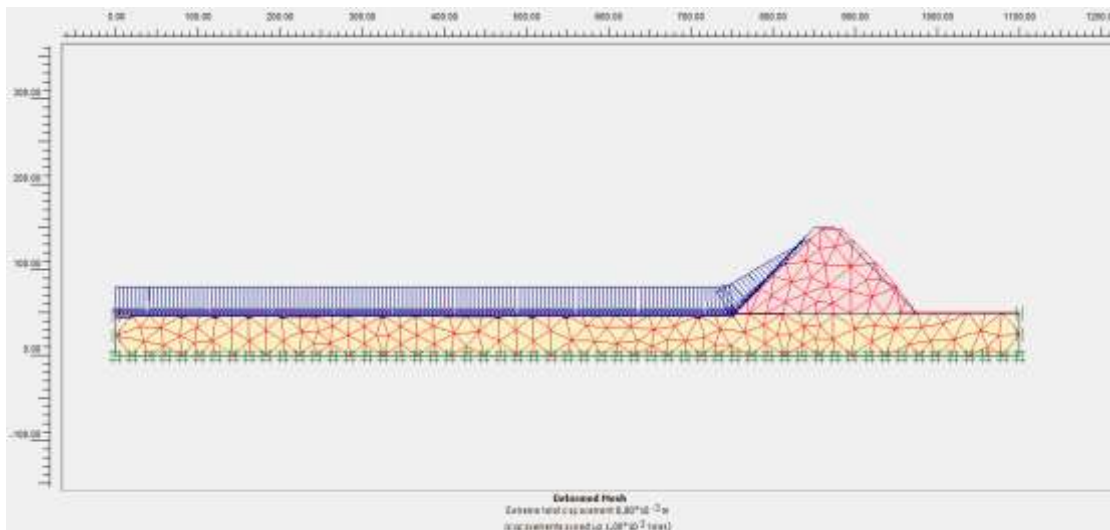
Στη συνέχεια στην περίπτωση της μέγιστης στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα εξετάζεται το σενάριο 3. Το φράγμα με γωνία κλίσης πρηνών 45 μοίρες το οποίο εδράζεται σε βραχώδες υπόστρωμα.



Εικόνα 5.71 Ταχύτητα ροής για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 3)

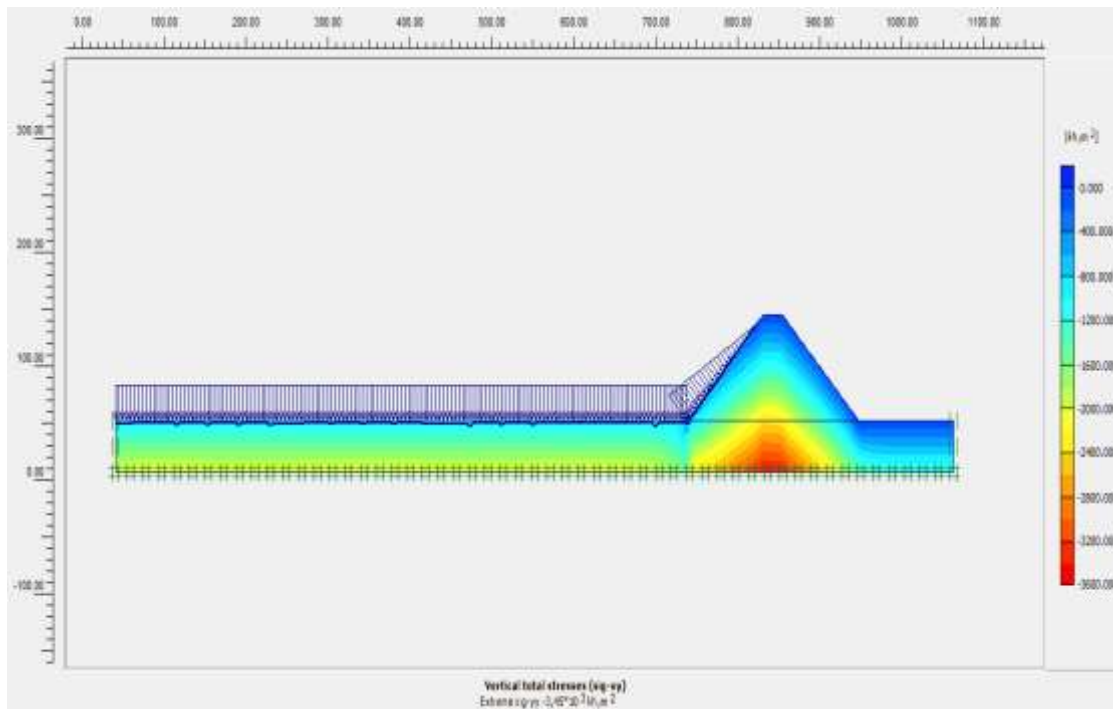
Το νερό δεν διεισδύει στο βραχώδες υπόστρωμα λόγω της μηδενικής υδατοπερατότητας (ταχύτητα ροής 0m/s).

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέγιστη στάθμη νερού του ταμιευτήρα (σενάριο 3)

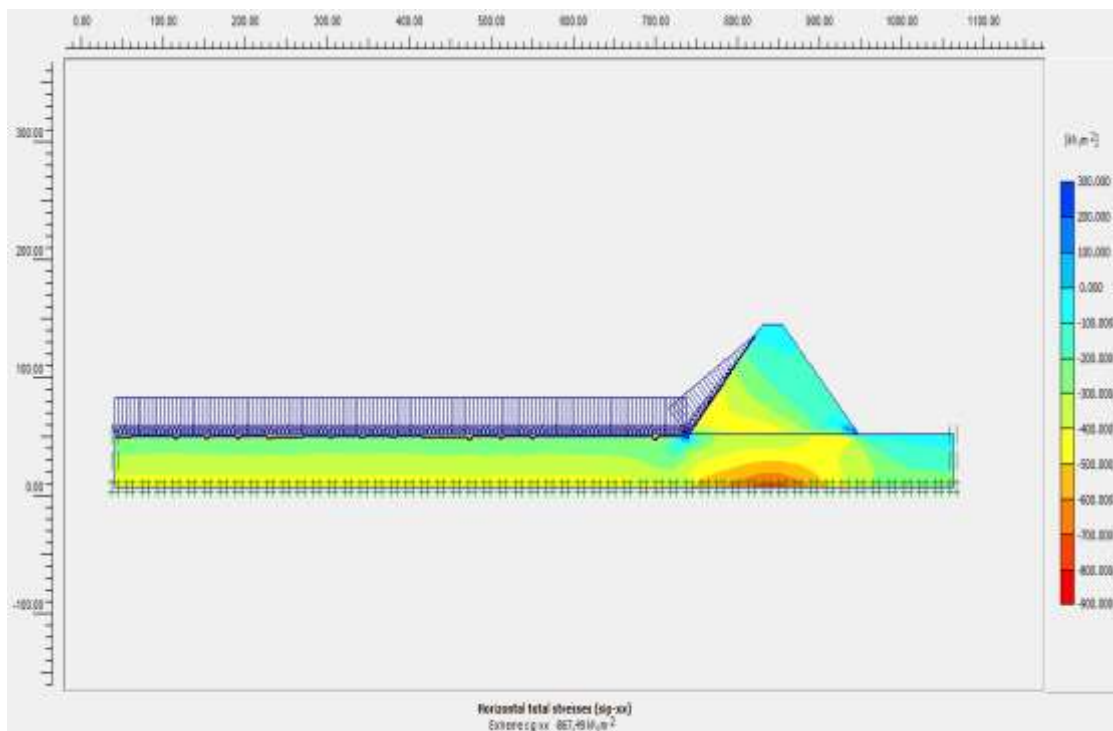


Εικόνα 5.72 Παραμόρφωση δικτύου φράγματος για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 3)

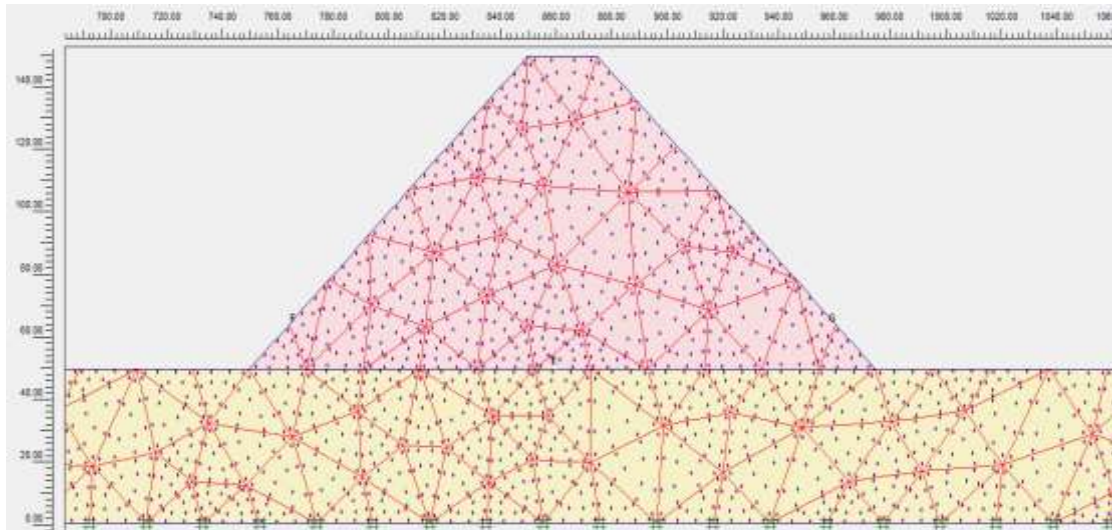
Οι παραμορφώσεις που προκύπτουν είναι της τάξης των $8,8 \cdot 10^{-3} \text{m}$ το νερό ασκεί δυνάμεις τόσο στο υπόστρωμα όσο και στο σώμα του φράγματος.



Εικόνα 5.73 Κατακόρυφες ολικές τάσεις στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη (σενάριο 3)



Εικόνα 5.74 Οριζόντιες ολικές τάσεις στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη (σενάριο 3)



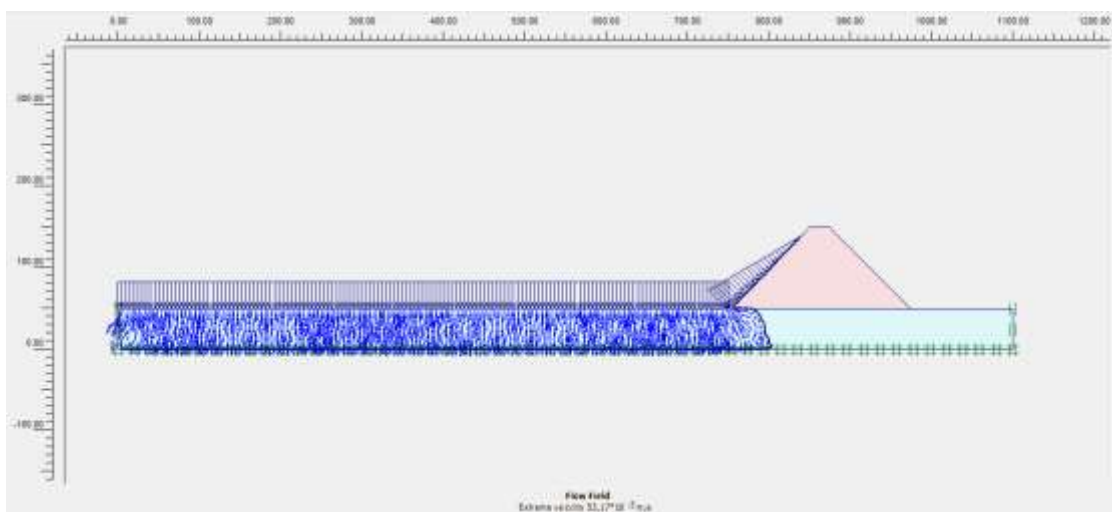
Εικόνα 5.75 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των θλιπτικών τάσεων στη βάση του φράγματος (σενάριο3)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-478,27	-2302,72	-529,58	-580,10	-90,92	-135,17

Παρατηρείται πως οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο σημείο F το οποίο βρίσκεται στο ανάντη πρανές από ότι στο σημείο G στο κατόντη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του νερού στα ανάντη τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα να ασκεί υδροστατικές ωθήσεις.

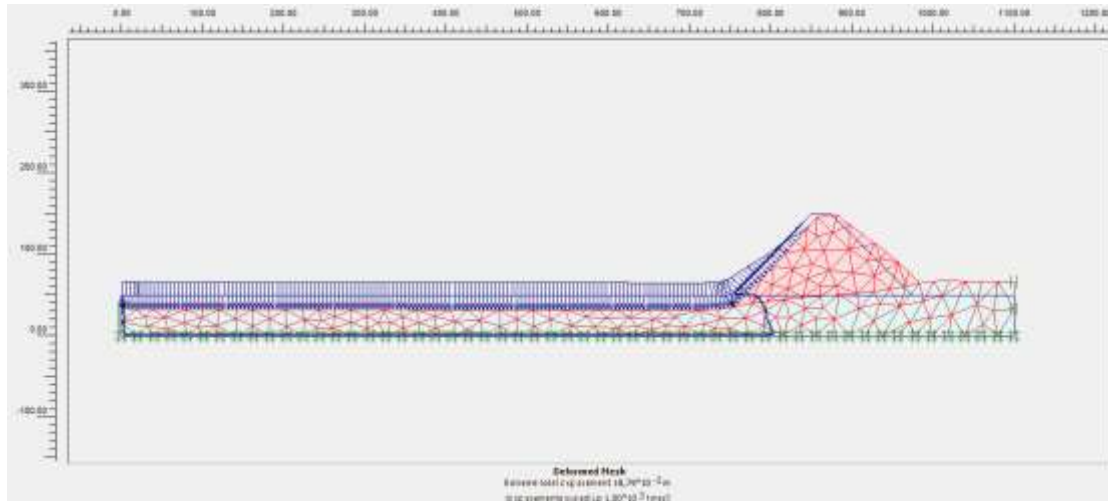
Τέλος για την μέγιστη στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα εξετάζεται το σενάριο 4. Στο οποίο το φράγμα έχει γωνία κλίσης πρνών 45 μοίρες και εδράζεται σε ημιβραχώδες υπόστρωμα.



Εικόνα 5.76 Ταχύτητα ροής στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 4)

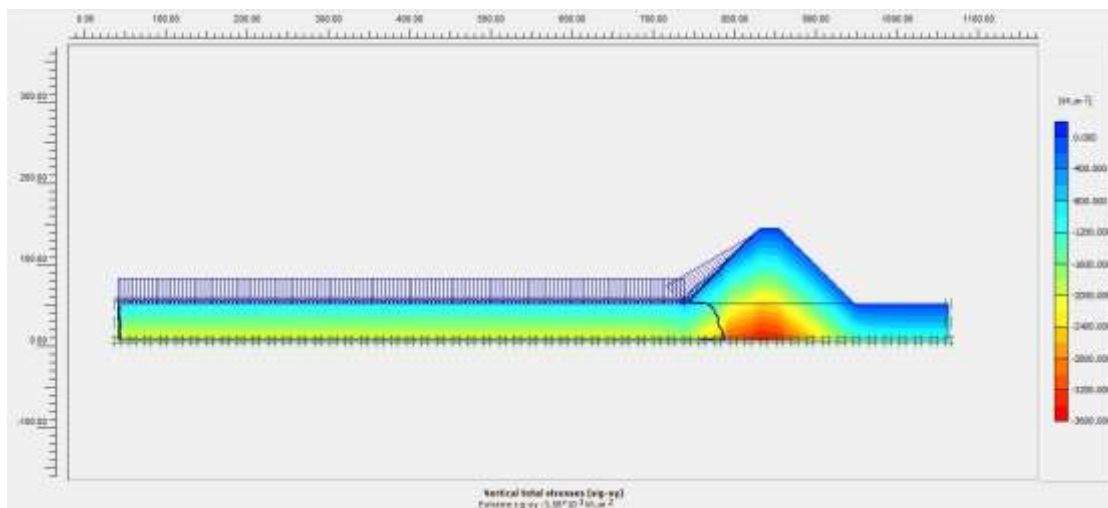
Το νερό διεισδίδει μέσα στο υδατοπερατό ημιβραχώδες υπόστρωμα και έχει ταχύτητα ροής $53,17 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για μέγιστη στάθμη νερού του ταμιευτήρα (σενάριο 4)

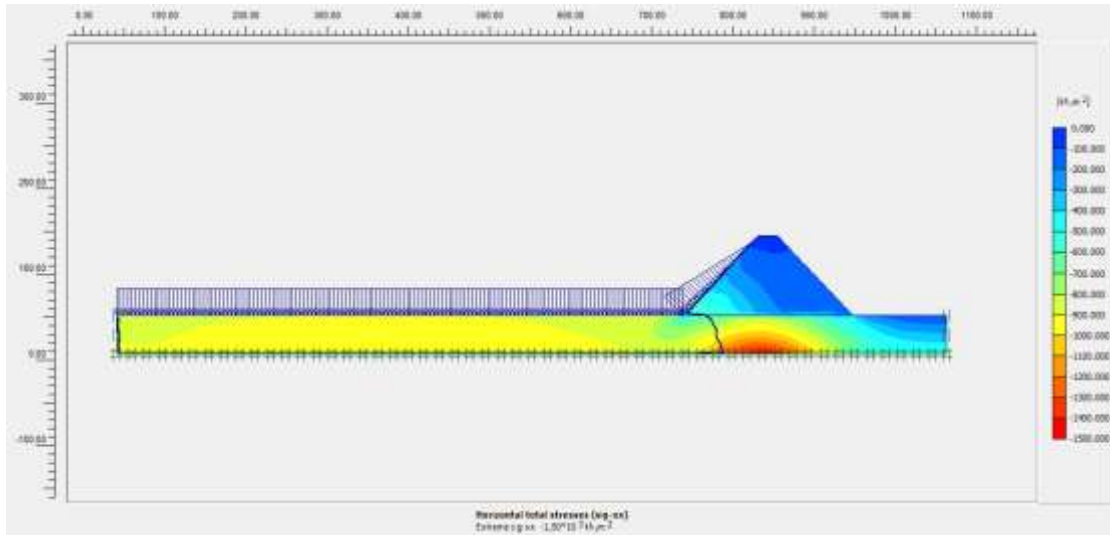


Εικόνα 5.77 Παραμόρφωση δικτύου του προτύπου για την μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 4)

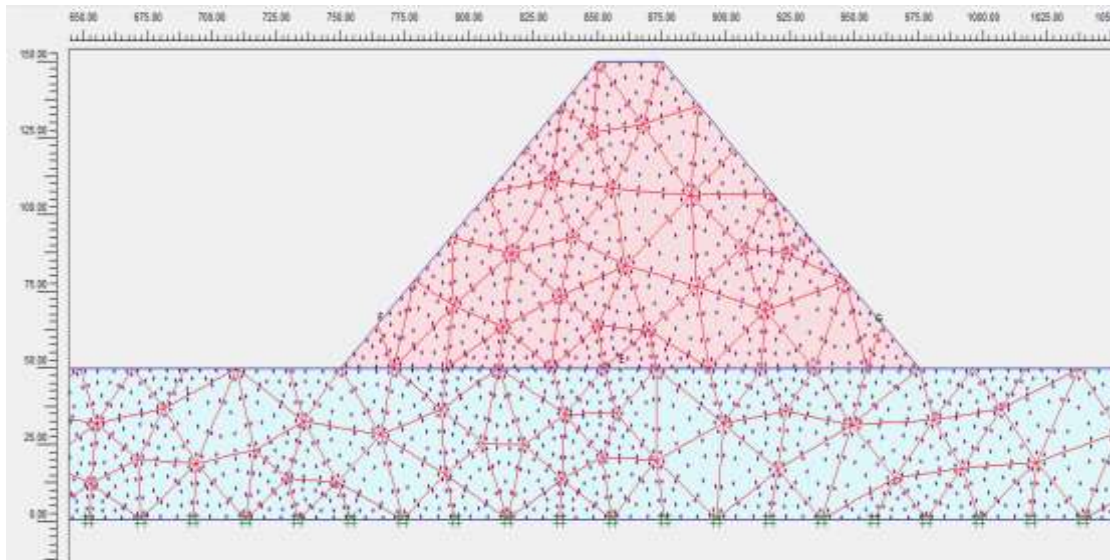
Οι παραμορφώσεις είναι της τάξης των $19 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Εδώ έχουμε ημιβραχώδες υπόστρωμα και το νερό ασκεί δυνάμεις τόσο στο υπόστρωμα όσο και στο σώμα του φράγματος.



Εικόνα 5.78 Κατακόρυφες ολικές τάσεις στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 4)



Εικόνα 5.79 Οριζόντιες ολικές τάσεις στο πρότυπο για μέγιστη στάθμη νερού (σενάριο 4)



Εικόνα 5.80 Επιλογή σημείων για τον προσδιορισμό θλιπτικών τάσεων στην βάση του φράγματος (σενάριο4)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-478,27	-2302,72	-529,58	-580,10	-90,92	-135,17

Παρατηρείται πως οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο σημείο F το οποίο βρίσκεται στο ανάντη πρηνές από ότι στο σημείο G στο κατόντη. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του νερού στα ανάντη τμήμα που έχει ως αποτέλεσμα να ασκεί υδροστατικές ωθήσεις.

5.4 Σεισμική φόρτιση χωρίς νερό

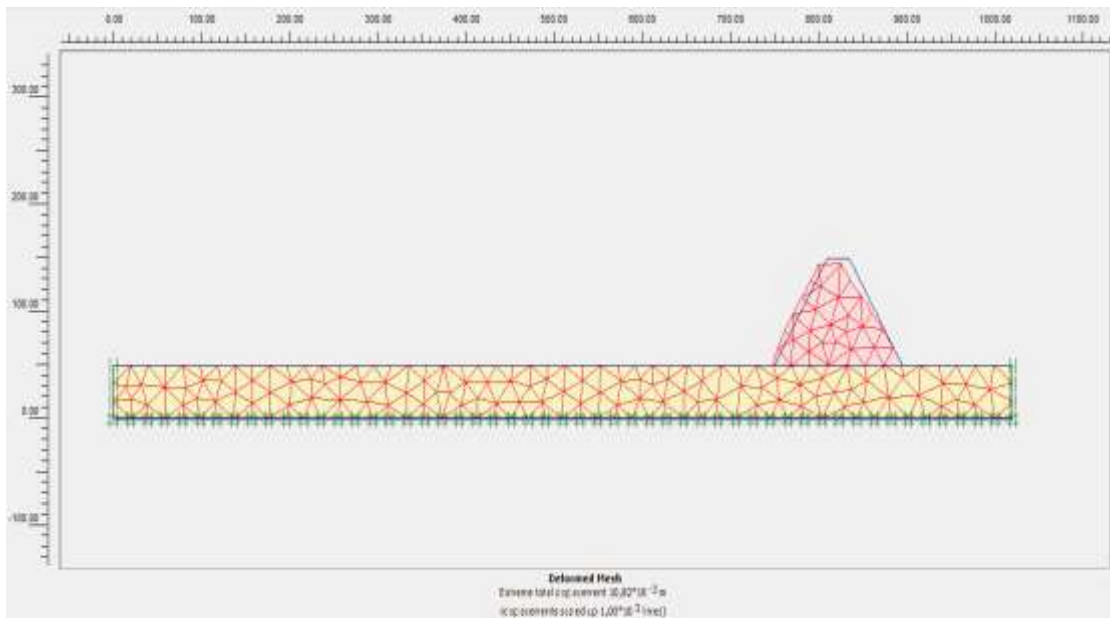
Σε αυτό το στάδιο της διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά του φράγματος λαμβάνοντας υπόψιν και τα τέσσερα σενάρια που αναφέραμε παραπάνω. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν είναι η μέθοδος της ψευδοστατικής ανάλυσης και η μέθοδος τάσεων παραμορφώσεων.

5.4.1 Ψευδοστατική μέθοδος

Σε αυτό το στάδιο δεν ελήφθησαν υπόψιν οι κατακόρυφες επιταχύνσεις. Το μέγεθος της οριζόντιας αδρανειακής δύναμης η οποία καταπονεί το φράγμα προσδιορίστηκε με βάση την οριζόντια επιτάχυνση. Έτσι για κάθε σενάριο πάρθηκαν τρεις περιπτώσεις ανάλογα με το μέγεθος της οριζόντιας επιτάχυνσης.

Σεισμική επιτάχυνση $A=0,08g$

Σενάριο 1: φράγμα κλίσης πρανάων 60 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.81 Αποτέλεσμα παραμόρφωσης δικτύου προτύπου (σενάριο 1)

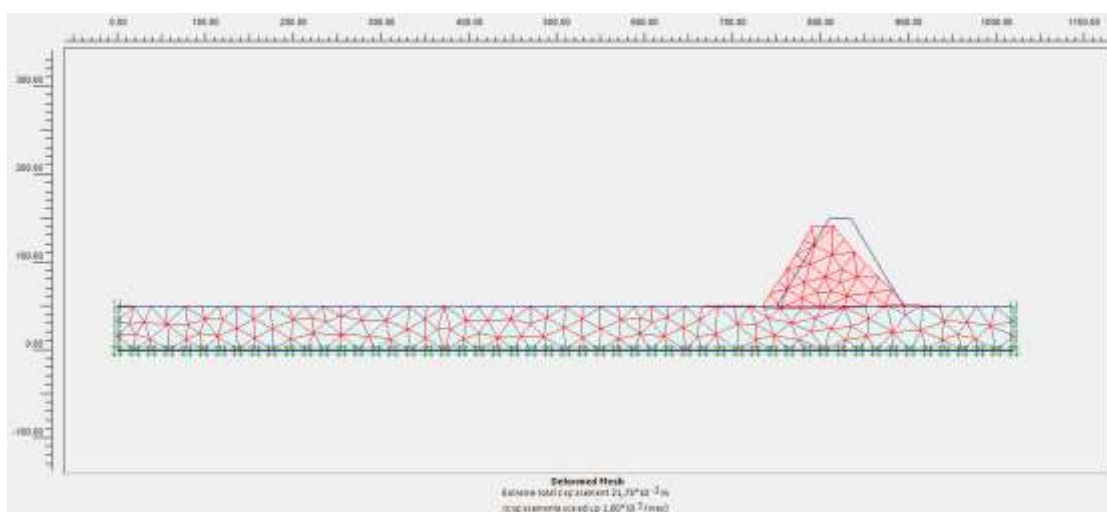
Εδώ παρατηρήθηκε πως το φράγμα μετακινείται προς τα αριστερά λόγω αδράνειας. Η οριζόντια αδρανειακή δύναμη εφαρμόζεται προς τα δεξιά στο πρότυπο. Λόγω συμμετρίας, τις ίδιες ακριβώς παραμορφώσεις θα είχαμε και στην περίπτωση που η δύναμη εφαρμοζόταν προς τα αριστερά μόνο που το φράγμα θα μετακινείτο προς δεξιά. Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $10,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Στη συνέχεια προχωρήσαμε στον υπολογισμό των ολικών τάσεων που ασκούνται στην βάση του φράγματος. Τα σημεία που επιλέξαμε ήσαν τα ίδια με εκείνα τα οποία επιλέχθηκαν στα δύο πρώτα στάδια.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παρακάτω αναλύσεων

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-406,85	-2278,100	-87,215	-295,560	20,214	24,702

Σενάριο 2: φράγμα κλίσης πρανών 60 μοίρες σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



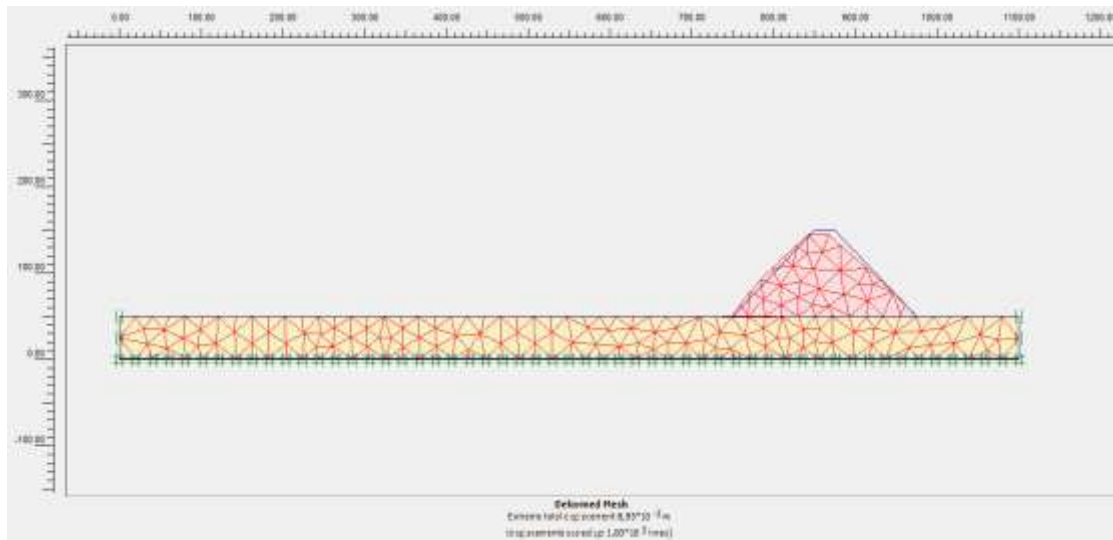
Εικόνα 5.82 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 2)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $21,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
117,06	-2310,85	-51,33	-258,67	-50,69	-80,23

Σενάριο 3: φράγμα κλίσης πρανών 45 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα



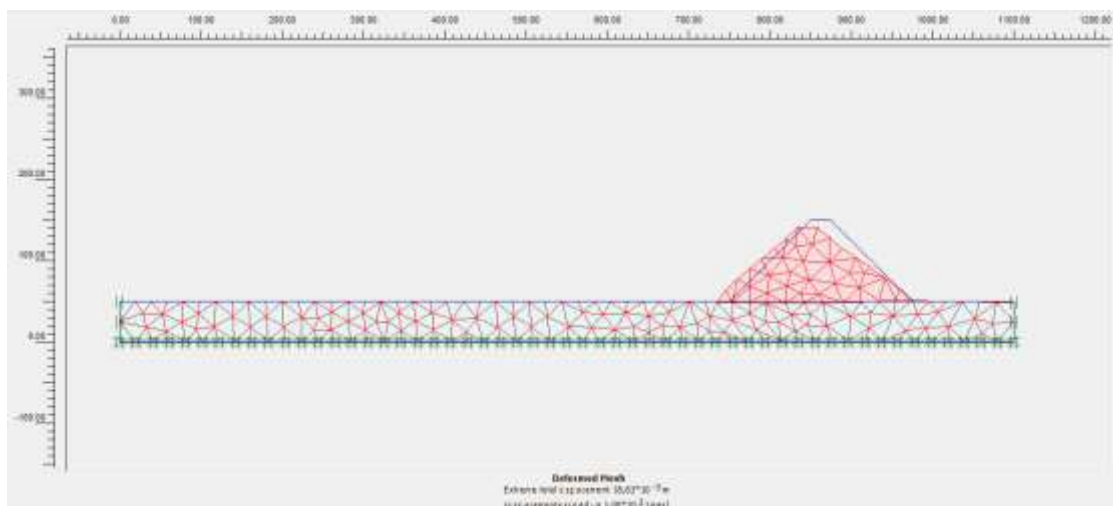
Εικόνα 5.83 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 3)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ E ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	ΣΗΜΕΙΟ E ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)
-447,17	-2300	-176,45	-196,18	13,25	-8,11

Σενάριο 4: φράγμα κλίσης πρανών 45 μοίρες σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.84 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 4)

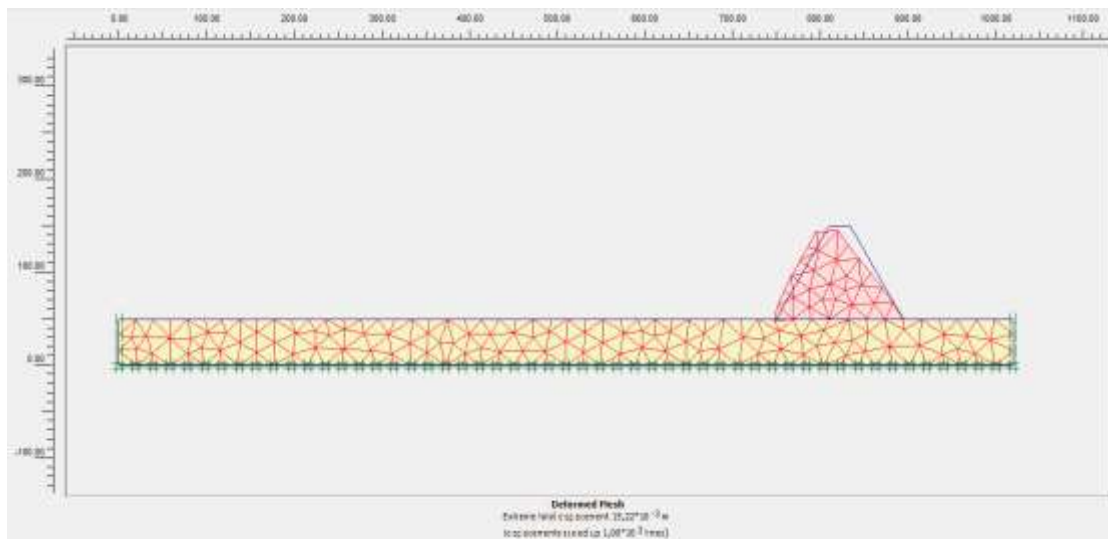
Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $18,63 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ Ε ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (KN/m ²)
-16,34	-2345,05	-102,53	-120,85	126,41	95,91

Σεισμική επιτάχυνση A=0,12g

Σενάριο 1: φράγμα κλίσης πρηνών 60 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα



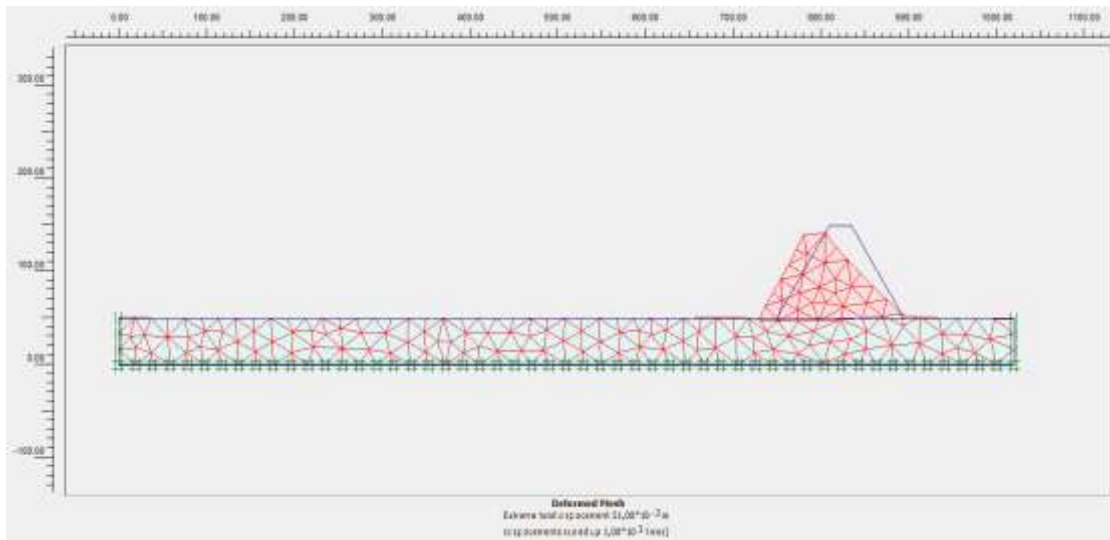
Εικόνα 5.85 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 1)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $15,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ Ε ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-409,23	-2280,59	-114,08	-375,40	47,36	104,81

Σενάριο 2: φράγμα κλίσης πρανών 60 μοίρες σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



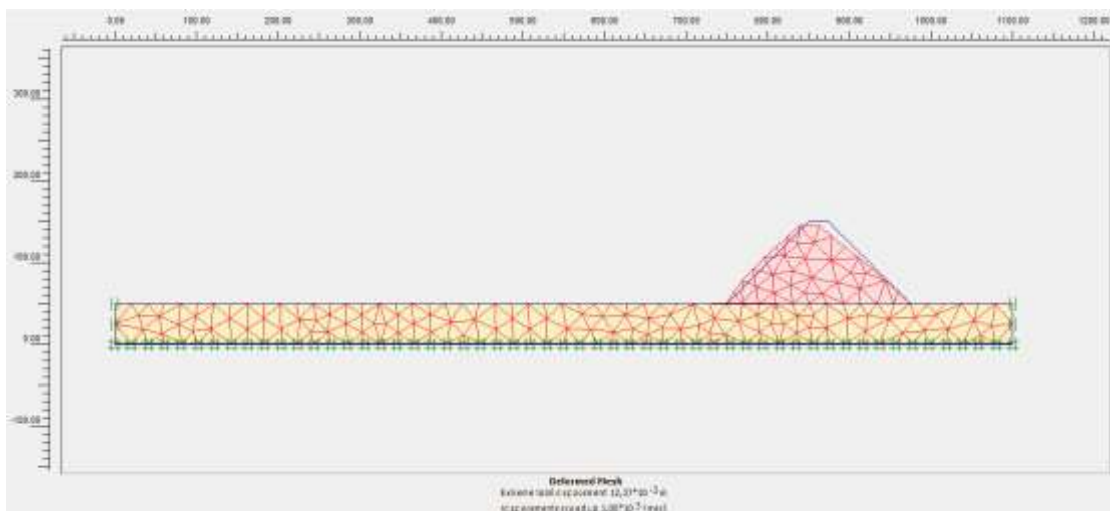
Εικόνα 5.86 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 2)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $31 \cdot 10^{-3} \text{m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Φ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Φ	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Γ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	Γ
115,87		-2313,56		-76,74		-343,44		76,64		165,78	

Σενάριο 3: φράγμα κλίσης πρανών 45 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα



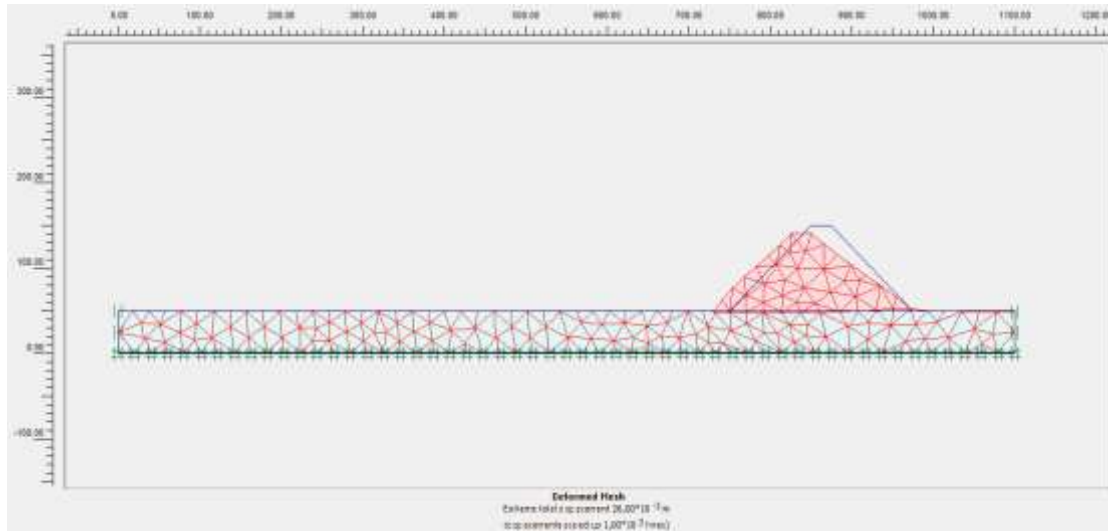
Εικόνα 5.87 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 3)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $12,37 \cdot 10^{-3} \text{m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-448,45	-2301,22	-223,82	-243,15	60,75	38,98

Σενάριο 4: φράγμα κλίσης πρανών 45 μοίρες σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.88 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 4)

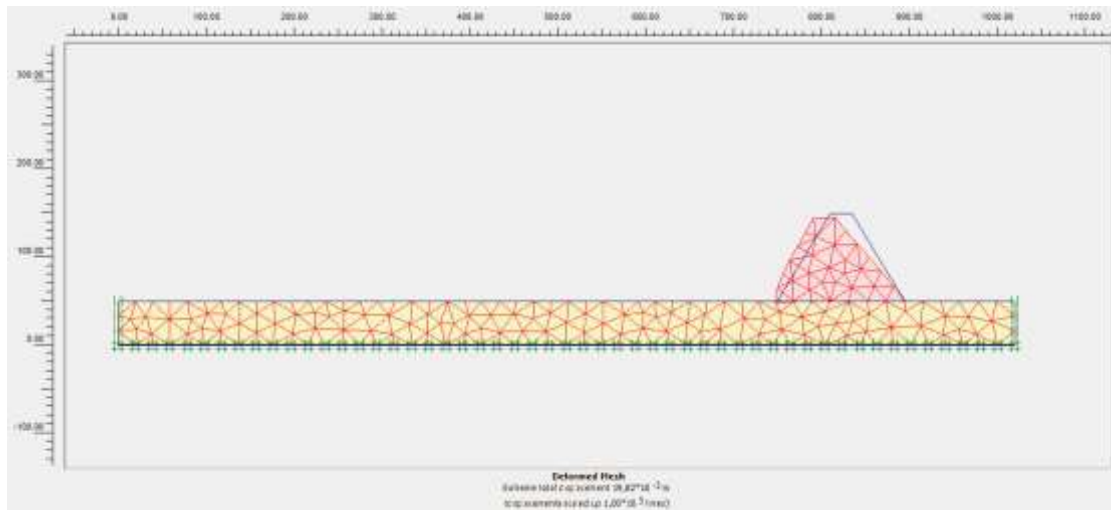
Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $26 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-17,44	-2346,44	-159,07	-174,45	184,49	150,87

Σεισμική επιτάχυνση $A=0,16g$

Σενάριο 1: φράγμα κλίσης πρανών 60 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα



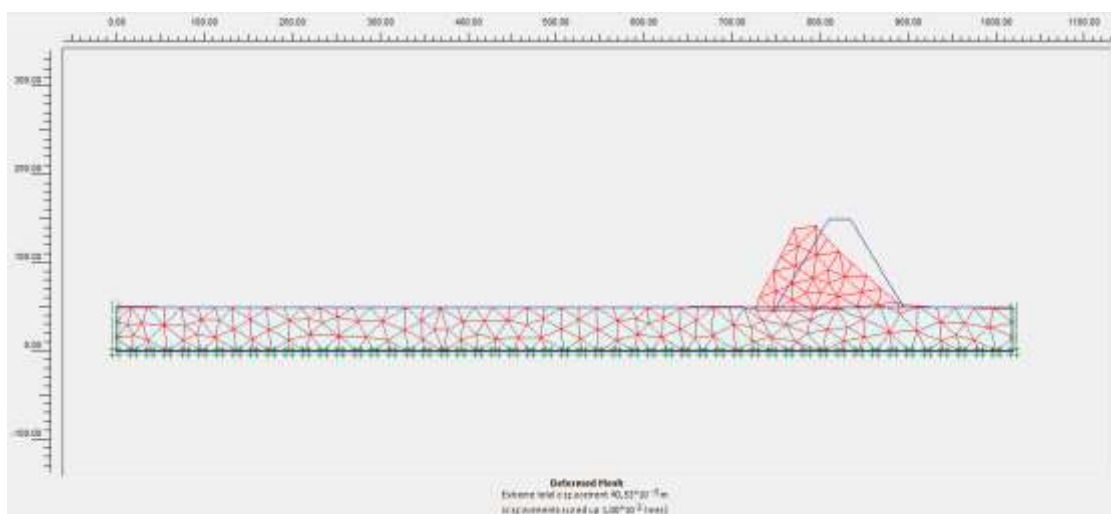
Εικόνα 5.89 Παραμόρφωση δικτύου (σενάριο 1)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	Ε	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	Φ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	Φ	ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	Γ	ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m^2)	Γ
-411,60		-2283,11		-140,95		-455,25		74,51		184,92	

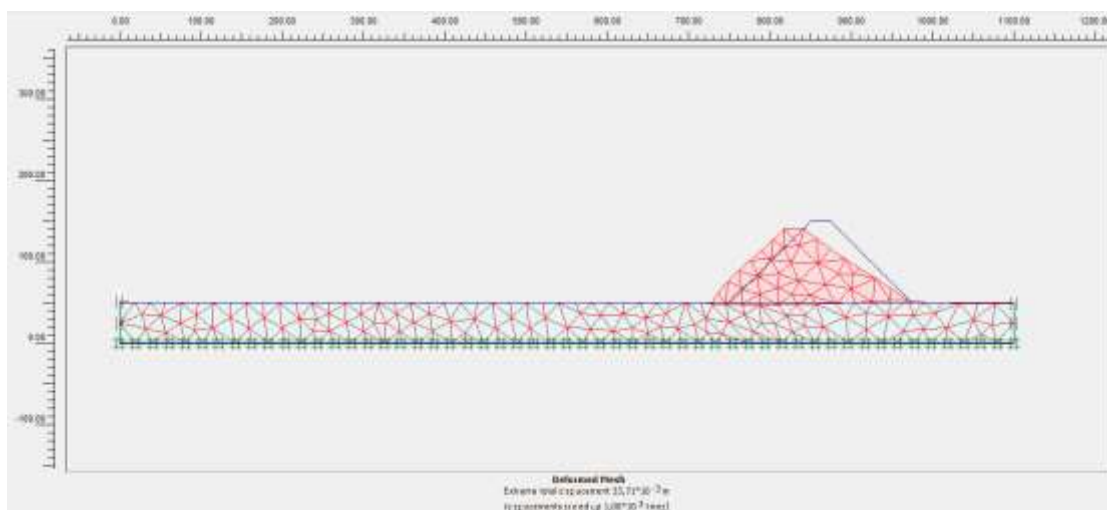
Σενάριο 2: φράγμα κλίσης πρανών 60 μοίρες σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.90 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 2)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $40 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Σενάριο 4: φράγμα κλίσης πρανών 45 μοίρες σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.92 Παραμόρφωση δικτύου προτύπου (σενάριο 4)

Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν υπολογίστηκαν γύρω στο $34 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Ύστερα με βάση τα παραπάνω σημεία που πάρθηκαν για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

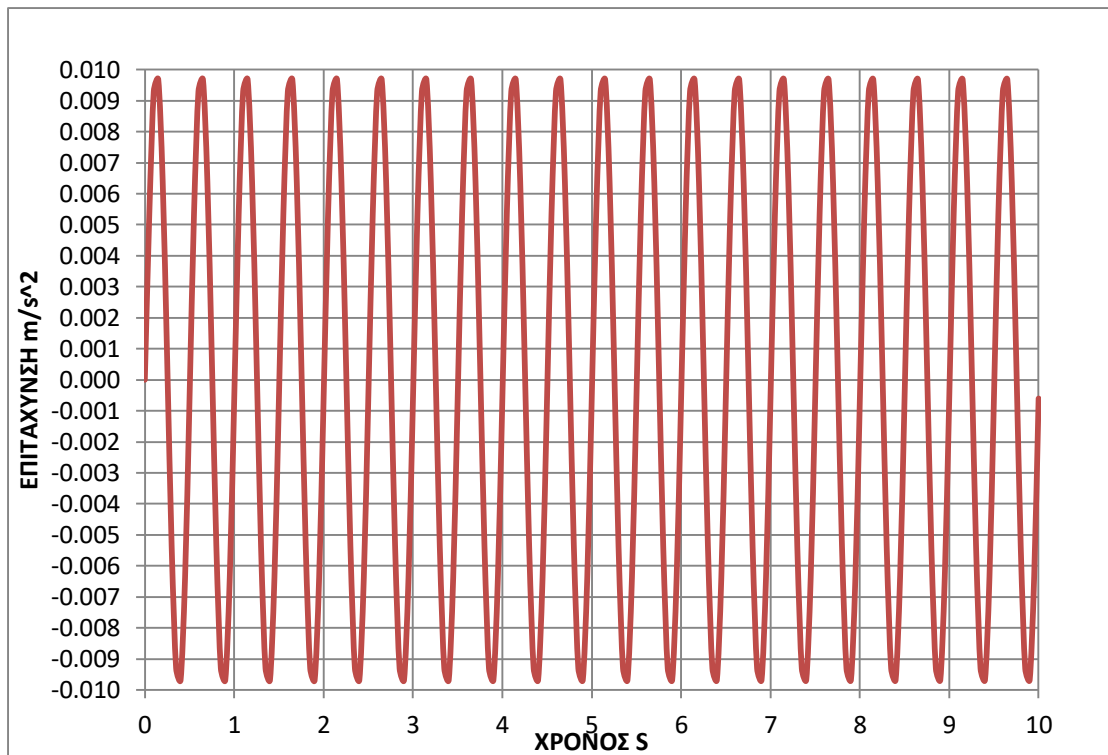
ΣΗΜΕΙΟ Ε ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ Ε ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ F ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)	ΣΗΜΕΙΟ G ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (kN/m ²)
-18,54	-2347,83	-215,60	-228,05	242,57	205,83

5.4.2 Μέθοδος τάσεων παραμορφώσεων

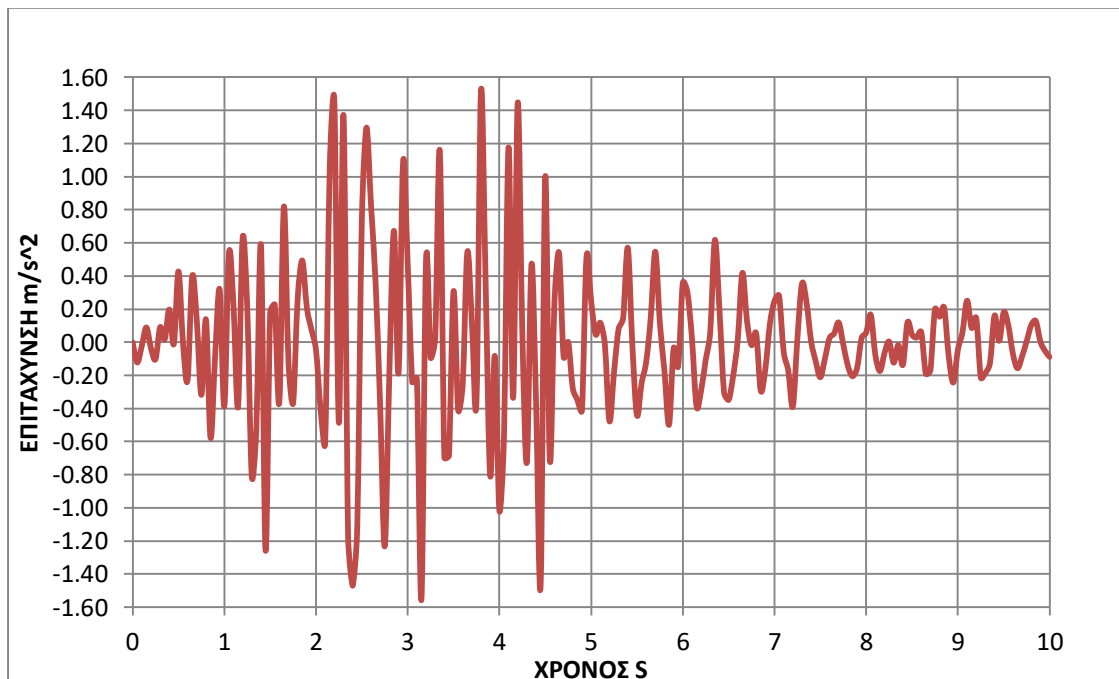
Στην παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε μελέτη της σεισμικής απόκρισης των φραγμάτων των τεσσάρων σεναρίων με την χρήση δυναμικών μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Στο πρότυπό μας σε κάθε ένα από τα 4 σενάρια τοποθετήσαμε στην βάση του μοντέλου μας οριζόντια φόρτιση και εκατέρωθεν τοποθετήθηκαν δύο απορροφητικά όρια ώστε να μην επιτρέπεται η ανάκλαση της οριζόντιας δυναμικής φόρτισης. Επίσης θεωρήσαμε πως το φράγμα παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά και δεν προκύπτουν μόνιμες παραμορφώσεις λόγω του σεισμού. Επίσης ο συντελεστής απόσβεσης του υλικού του φράγματος και του υλικού από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα ελήφθη ίσος με 5% και θεωρήθηκε αμετάβλητος καθόλη την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Σε κάθε σενάριο που μελετήσαμε εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές σεισμικές δονήσεις. Οι σεισμικές δονήσεις που εφαρμόστηκαν ήταν οι εξής:

- Ημιτονική δόνηση συχνότητας 2Hz
- Παλμός Ricker των 2Hz με μέγιστη συχνότητα 3Hz
- Πραγματική σεισμική δόνηση (225A του προγράμματος Plaxis)

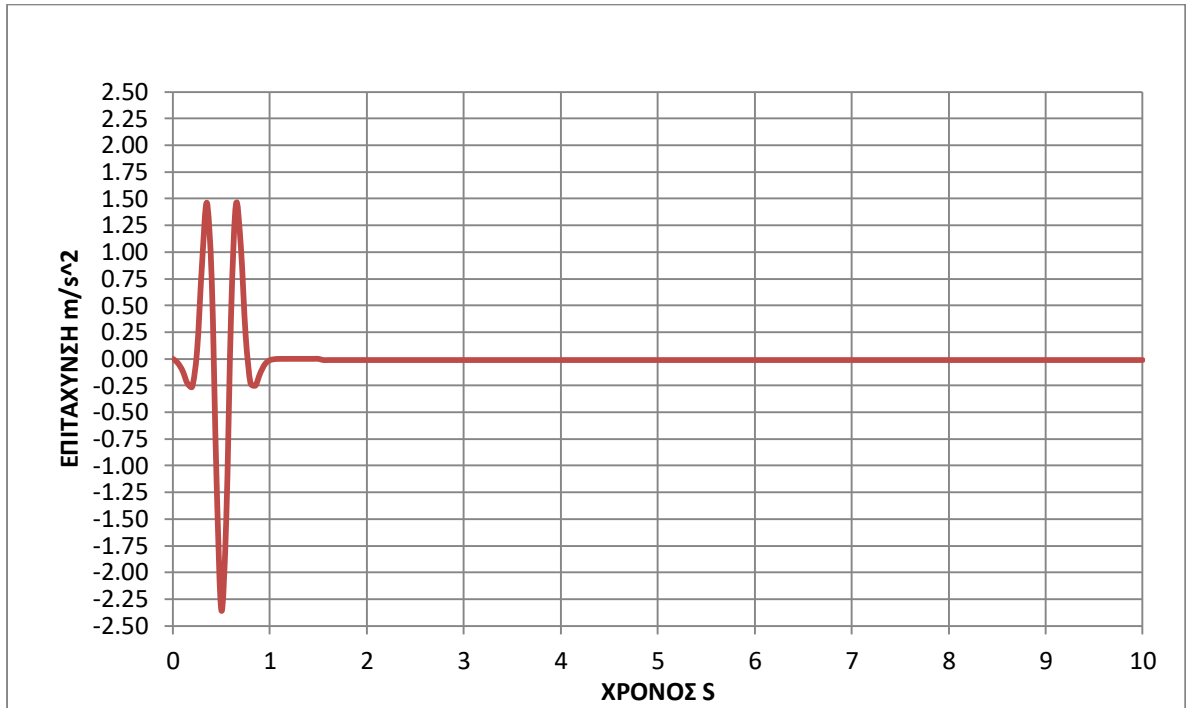
Παρακάτω φαίνονται οι διάφορες χρονοϊστορίες και των τριών σεισμικών διεγέρσεων, η κάθε σεισμική διεγέρση εφαρμόστηκε στο πρότυπό μας για διάρκεια 10 δευτερολέπτων.



Εικόνα 5.93 Χρονοιστορία της δόνησης SIN-2HZ

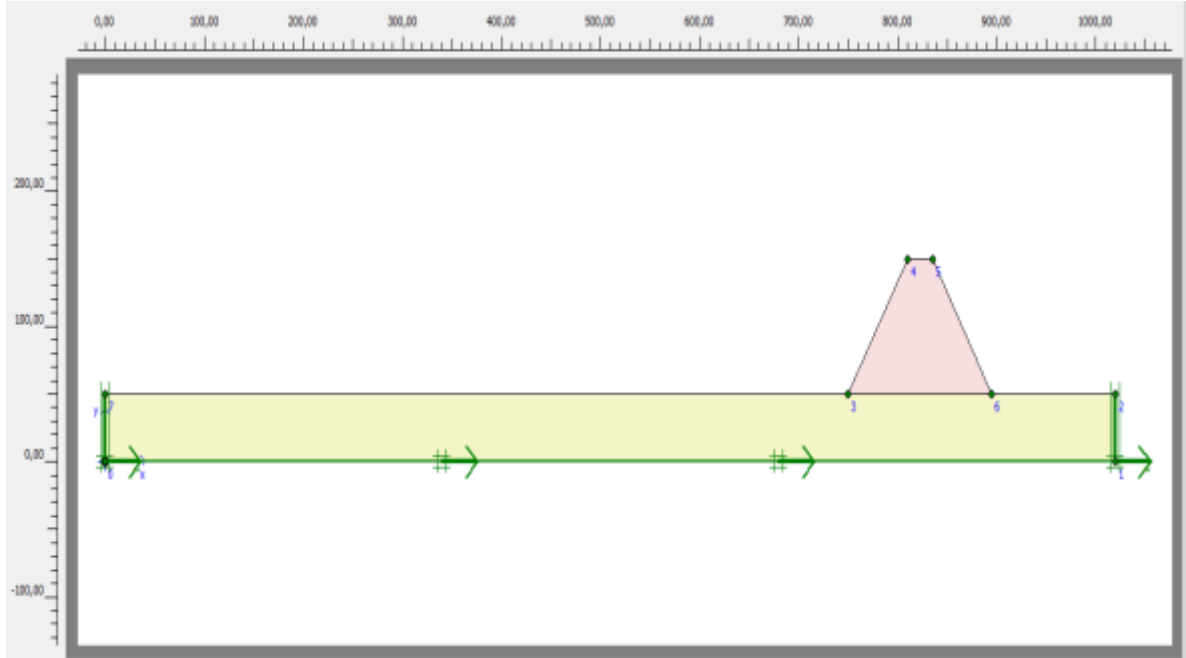


Εικόνα 5.94 Χρονοιστορία της δόνησης 225A

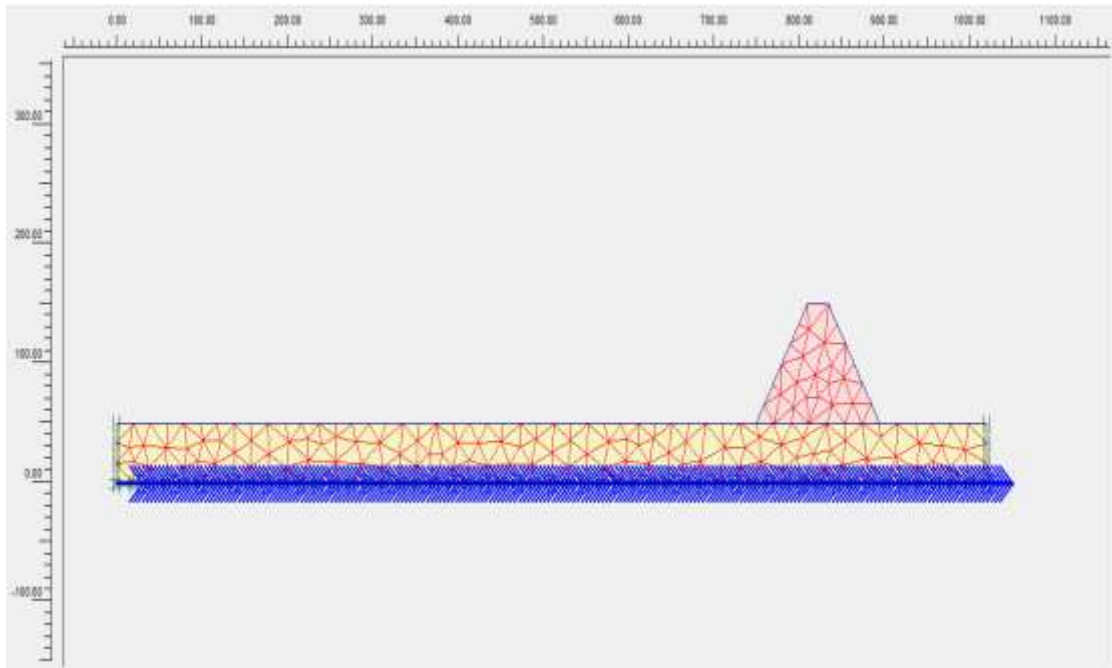


Εικόνα 5.95 Χρονοιστορία παλμού RICKER-2HZ

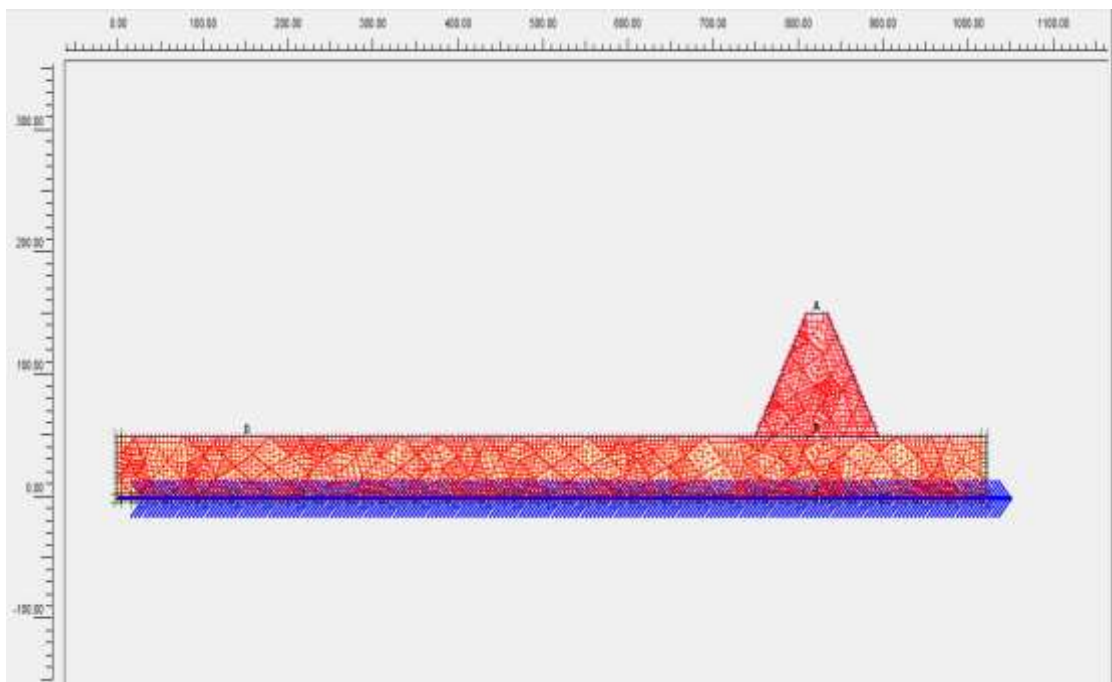
Σενάριο 1: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.96 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 1)

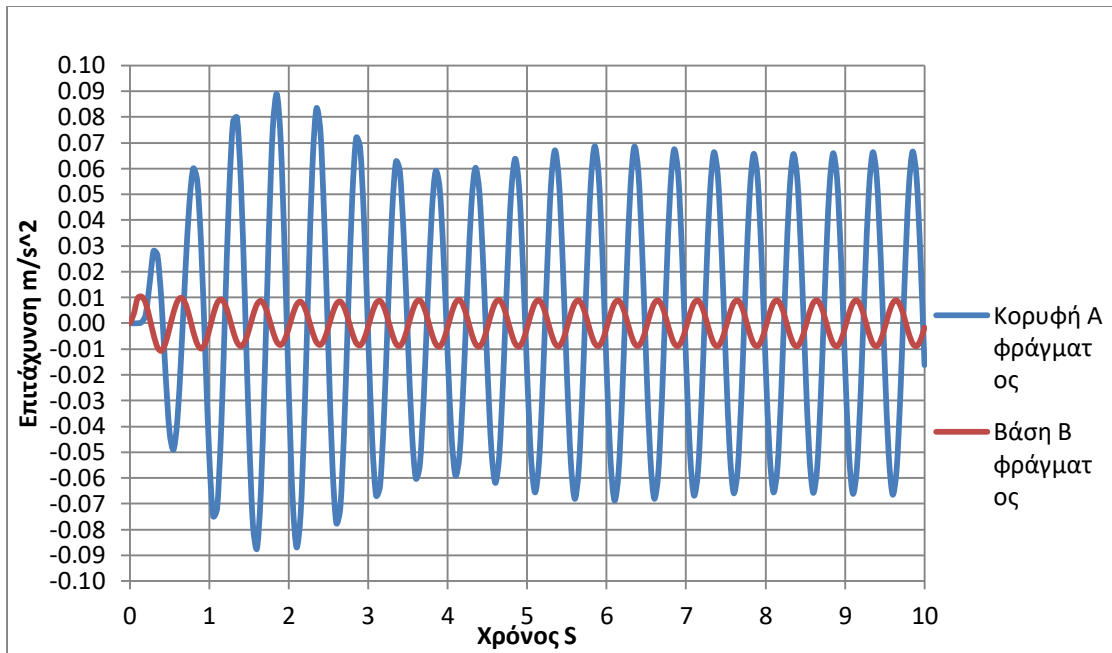


Εικόνα 5.97 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 1)

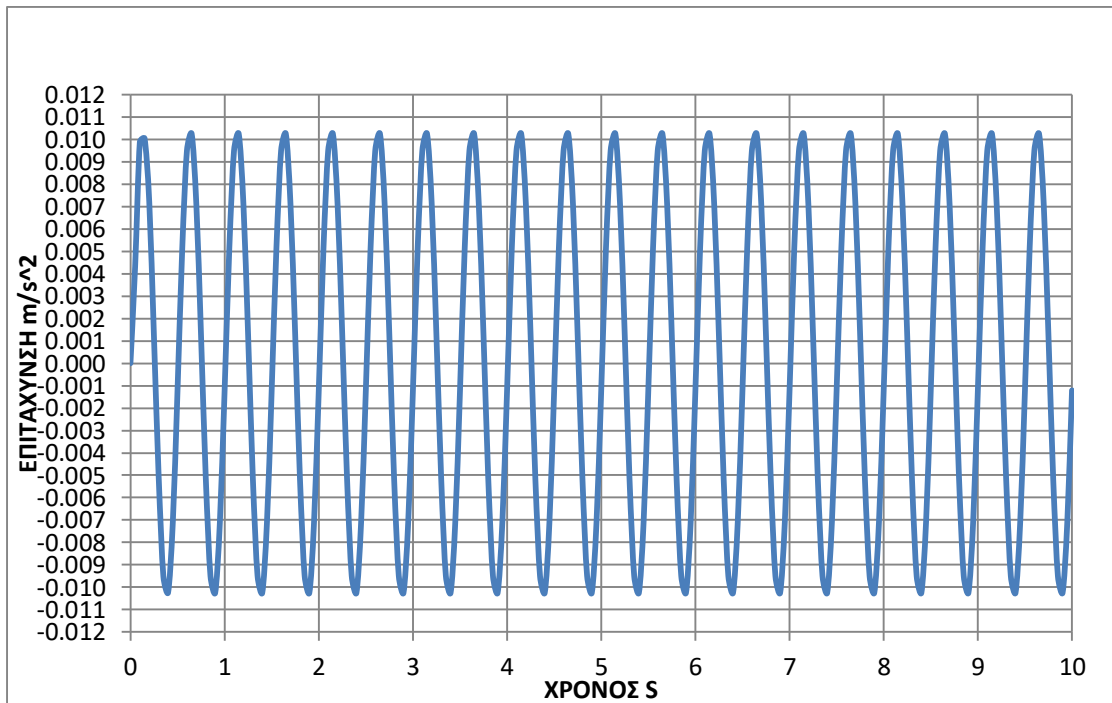


Εικόνα 5.98 Επιλογή σημείων στο πρότυπο για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων (σενάριο 1)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

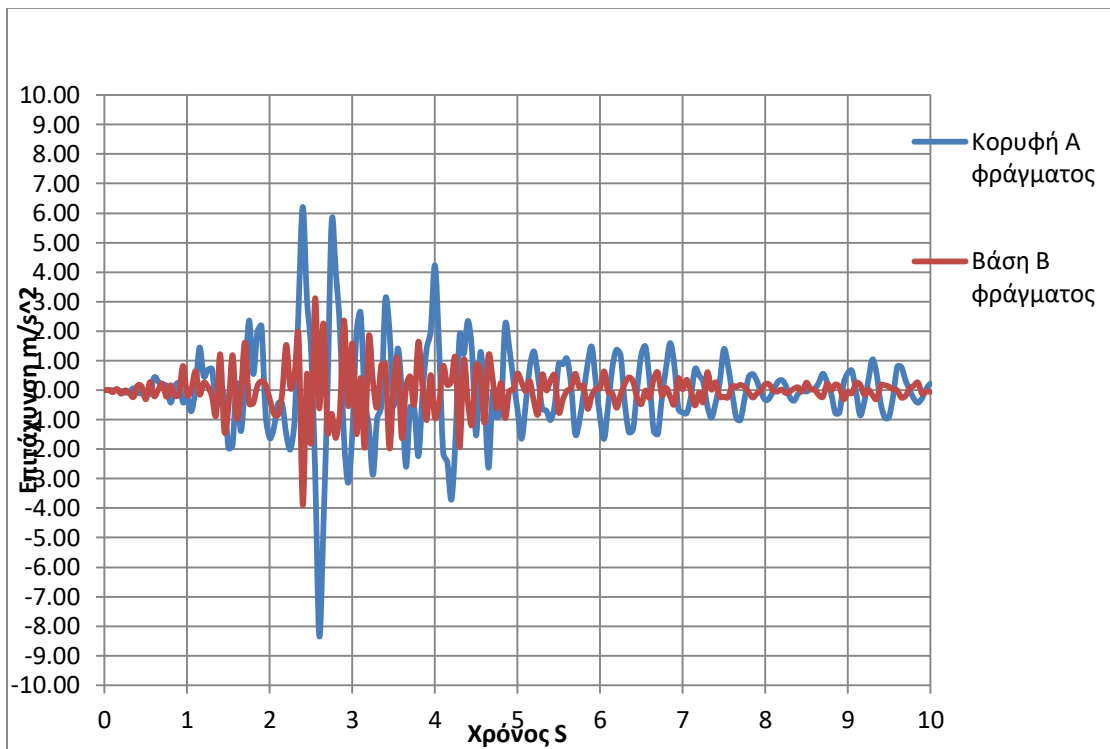


Εικόνα 5.99 Αποτελέσματα χρονοιστοριών δόνησης SIN-2HZ για φράγμα κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα

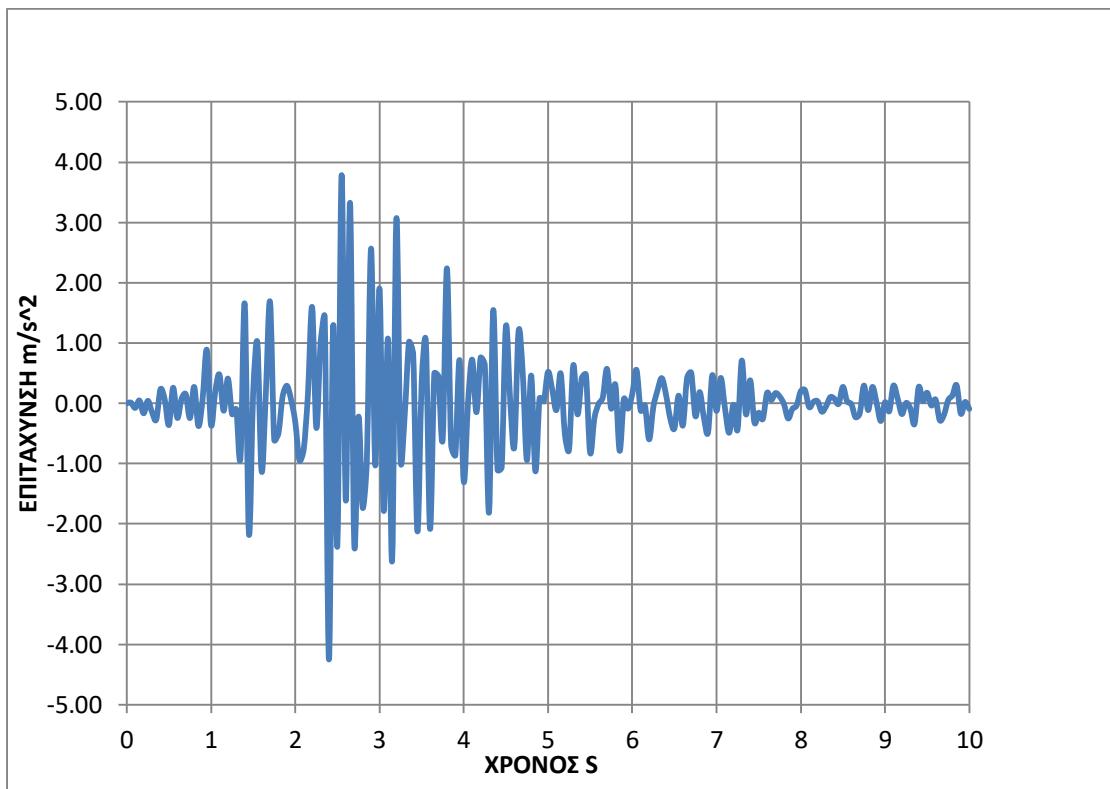


Εικόνα 5.100 Αποτελέσματα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης (σημείου Δ) για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225Α)

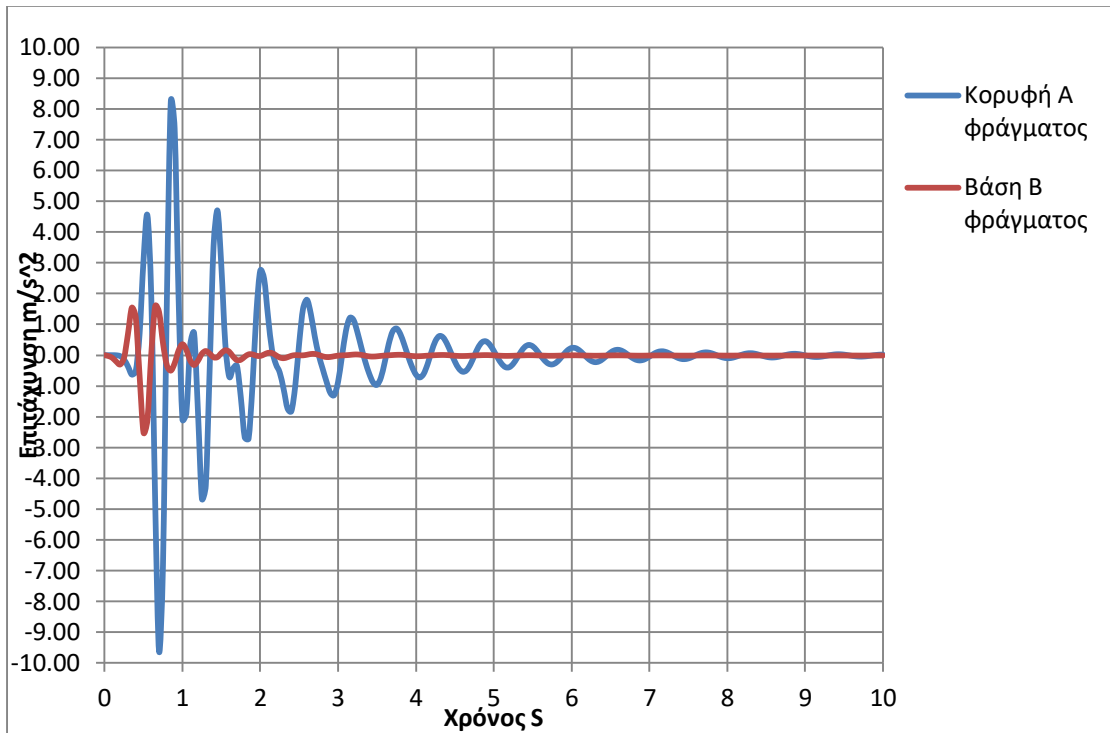


Εικόνα 5.101 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β για φράγμα κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

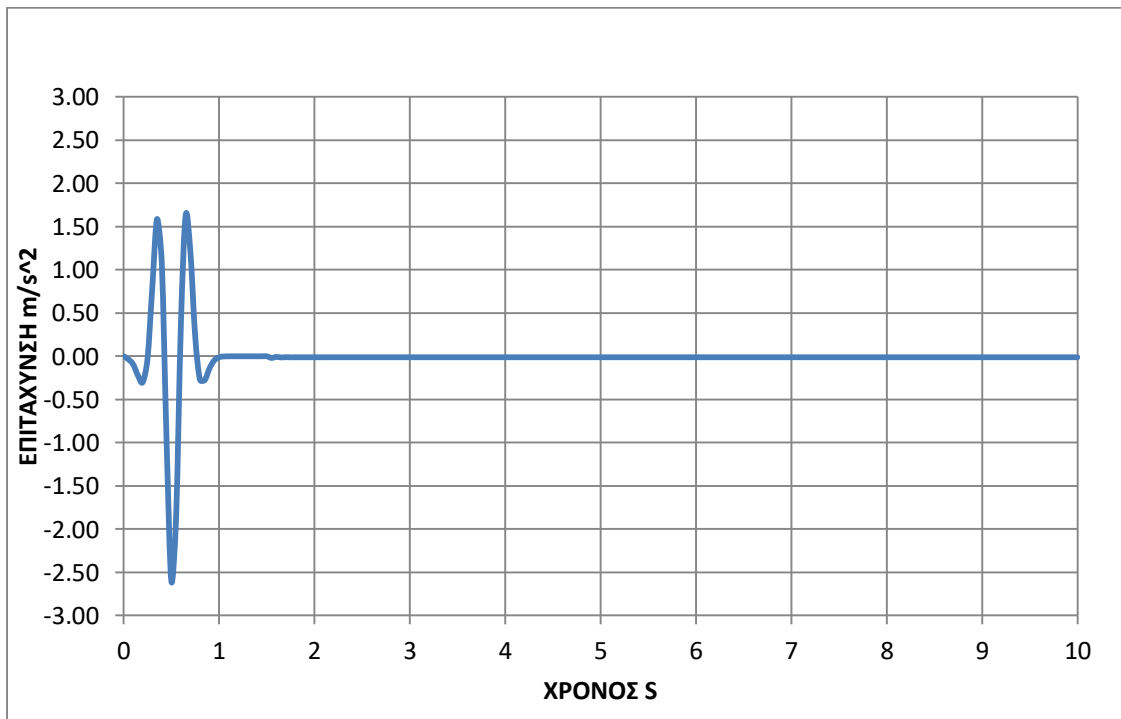


Εικόνα 5.102 Αποτελέσματα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης (σημείου Δ) για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2HZ)



Εικόνα 5.103 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β για φράγμα κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ

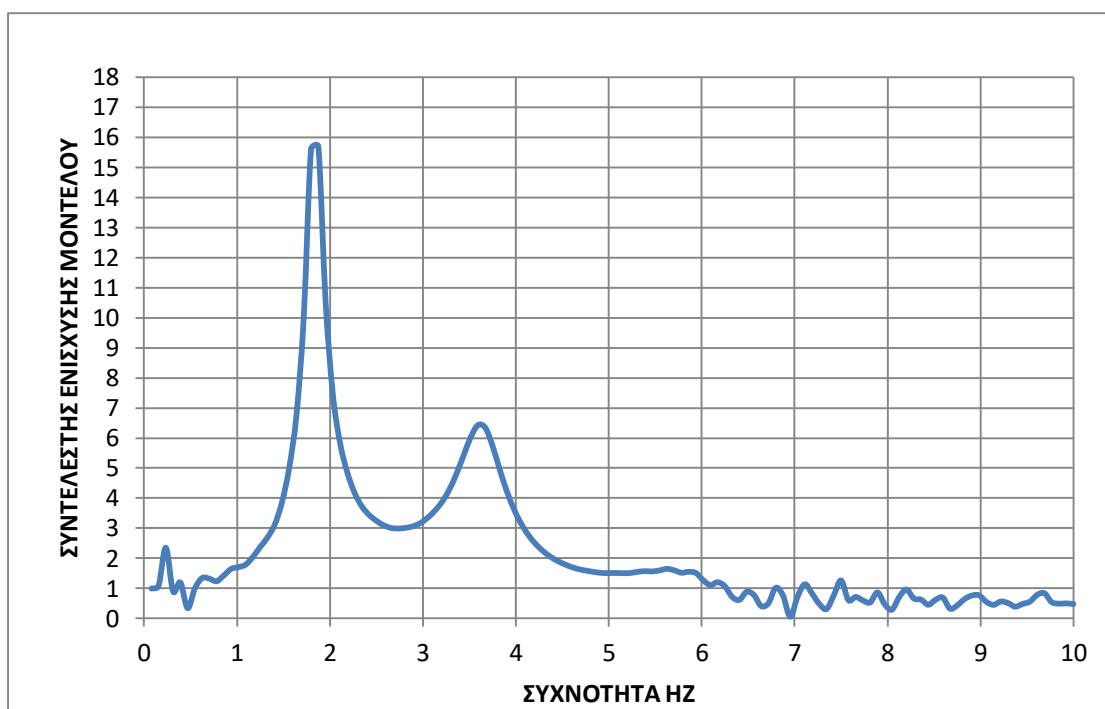


Εικόνα 5.104 Αποτελέσματα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Σε αυτό το σημείο υπολογίστηκαν οι συντελεστές ενίσχυσης των φραγμάτων των 60° και των φραγμάτων των 45°. Ο υπολογισμός έγινε με χρήση του λογισμικού Seismosft με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Για το κάθε φράγμα ελήφθησαν τα σημεία στην κορυφή και στη βάση του προσομοιώματος (εδαφική στρώση) και για το κάθε ένα από αυτά υπολογίστηκε ο πολλαπλασιαστής Fourier και στη συνέχεια διαιρέθηκε ο πολλαπλασιαστής της κορυφής του μοντέλου με τον πολλαπλασιαστή της βάσης του και υπολογίστηκε ο συντελεστής επιτάχυνσης $AF = \frac{\text{Fourrie amplitude A}}{\text{Fourrie amplitude B}}$, όπου στον αριθμητή είναι ο πολλαπλασιαστής fourie A (για την κορυφή A του προτύπου) και στον παρονομαστή ο πολλαπλασιαστής fourie B (για την βάση B του προτύπου), AF είναι ο συντελεστής επιτάχυνσης.

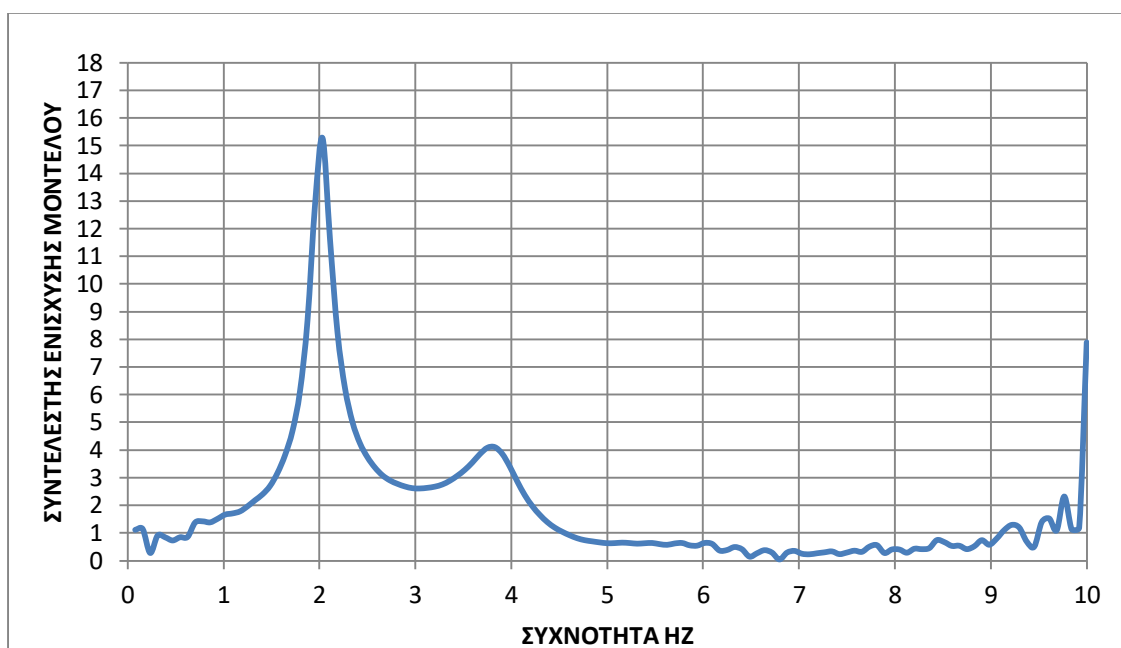
Για το φράγμα κλίσης 60 μοιρών έχουμε



Εικόνα 5.105 Διάγραμμα συντελεστή ενίσχυσης φράγματος με κλίση πρανών 60 μοίρες

Μέγιστος συντελεστής ενίσχυσης $AF=15,7$ στα 1,875Hz, όπου και έχουμε ιδιοσυχνότητα.

Για το φράγμα κλίσης 45 μοιρών έχουμε



Εικόνα 5.106 Διάγραμμα συντελεστή ενίσχυσης φράγματος με κλίση πρανών 45 μοιρών

Μέγιστος συντελεστής ενίσχυσης $AF=15,27$ περίπου στα $2,03\text{Hz}$, που είναι και η ιδιοσυχνότητα. Ιδιοσυχνότητα έχουμε και στα 10Hz με συντελεστή ενίσχυσης $AF=7,89$.

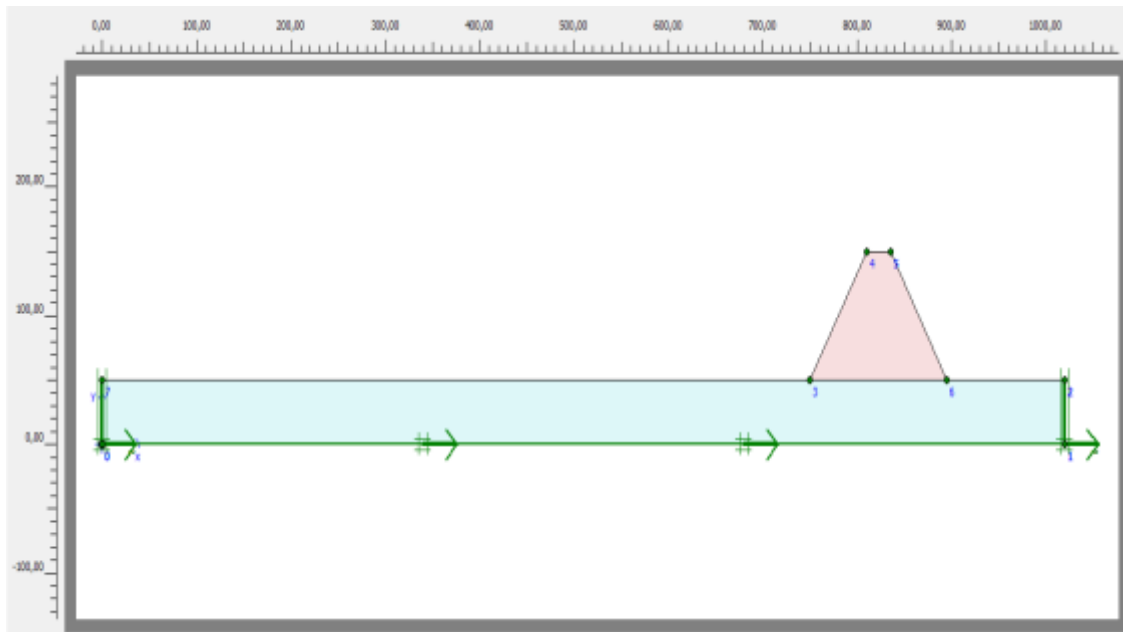
Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων με την μέθοδο Krammer

Το φράγμα έχει ύψος 100m και το υλικό RCC από το οποίο αποτελείται έχει ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων 583m/s . Με βάση αυτά τα στοιχεία οι ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν είναι:

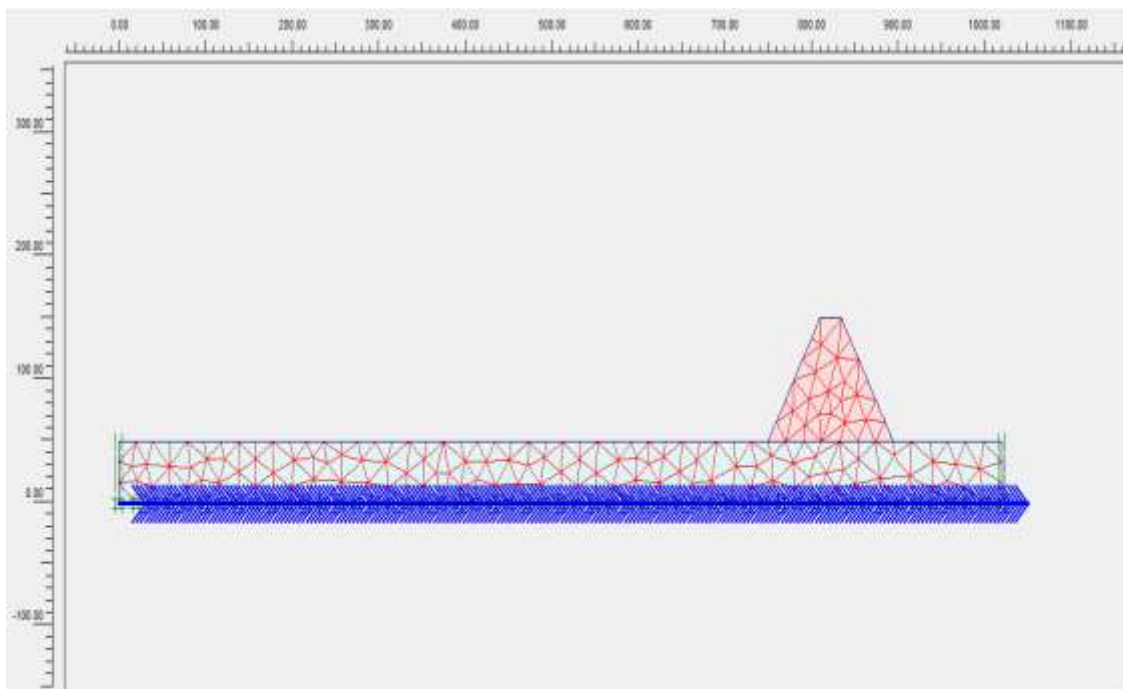
1. $\omega_1=(583/100)*(2,404/8)*4*2=14,02\text{rad/s}$ $f_1=2,23\text{HZ}$
2. $\omega_2=(583/100)*(5,520/8)*4*2=32,18\text{rad/s}$ $f_1=5,12\text{HZ}$
3. $\omega_3=(583/100)*(8,654/8)*4*2=50,45\text{rad/s}$ $f_1=8,03\text{HZ}$
4. $\omega_4=(583/100)*(11,792/8)*4*2=68,75\text{rad/s}$ $f_1=10,94\text{HZ}$
5. $\omega_5=(583/100)*(14,931/8)*4*2=87,05\text{rad/s}$ $f_1=13,85\text{HZ}$

Παρατηρήθηκε πως οι ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν με βάση την μέθοδο Krammer ήταν διαφορετικές σε σχέση με την μέθοδο χρονιστοριών Fourrie. Παρόλο αυτά η δεύτερη μέθοδος (Fourrie) θεωρείται πιο αξιόπιστη και την εμπιστευόμαστε περισσότερο.

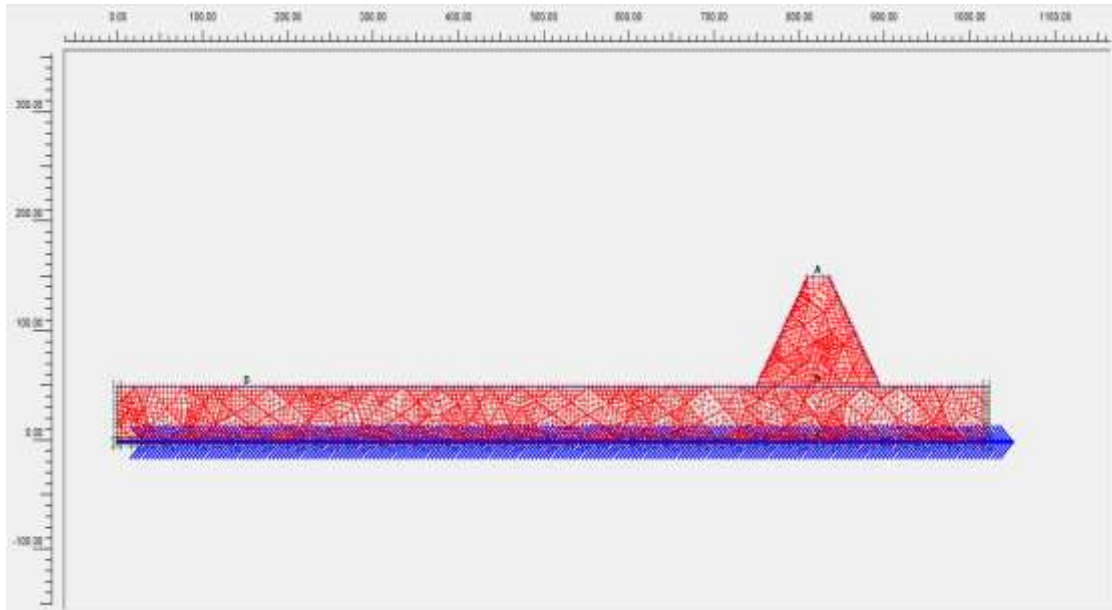
Σενάριο 2: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 60° σε ημιβραχώδες υπόστρωμα.



Εικόνα 5.107 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 2)

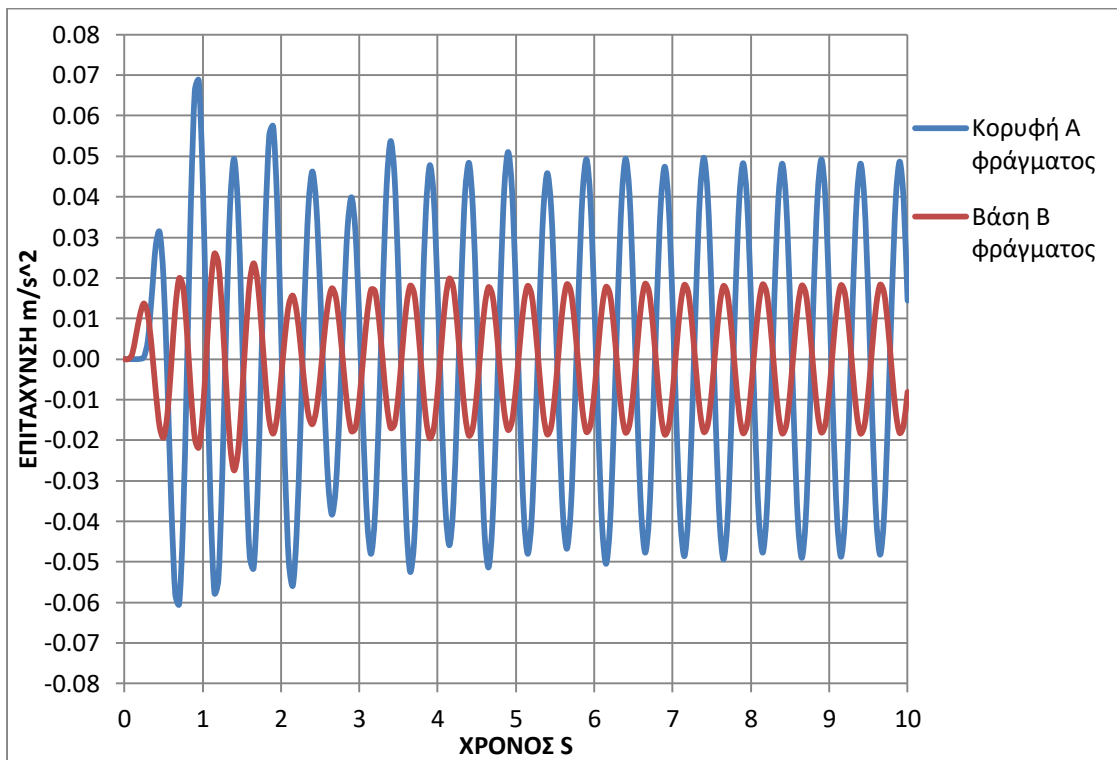


Εικόνα 5.108 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 2)

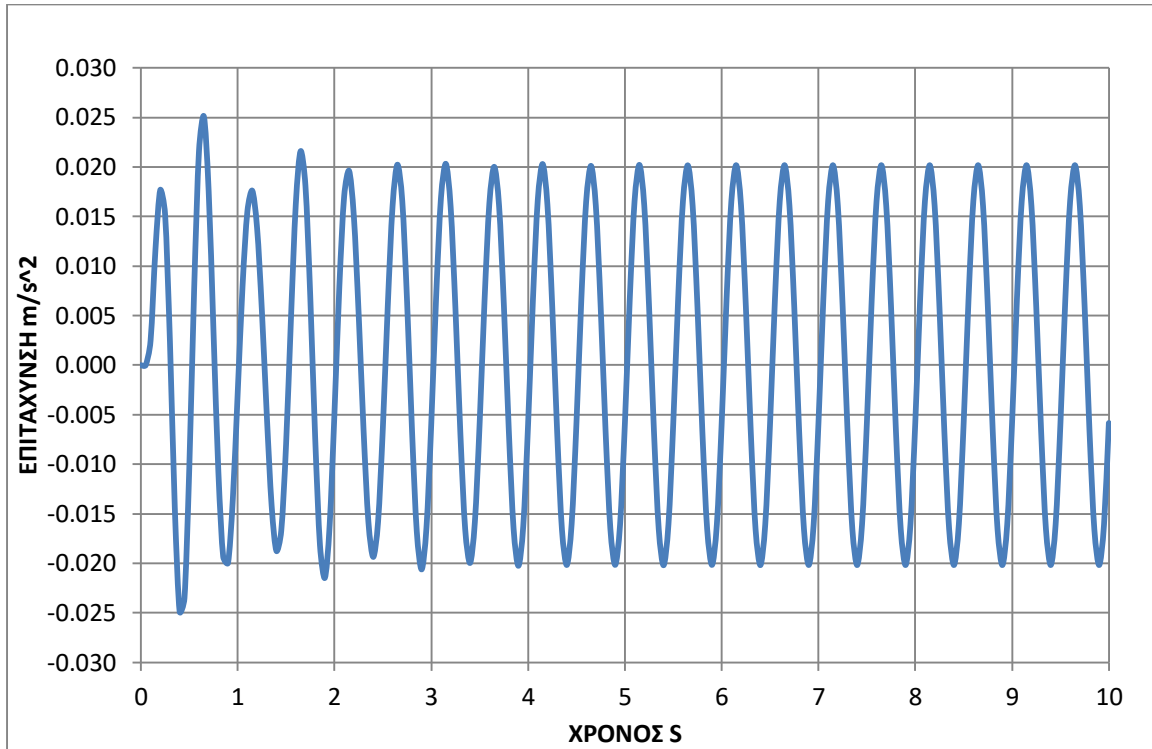


Εικόνα 5.109 Επιλογή σημείων στο πρότυπο για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων (σενάριο 2)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

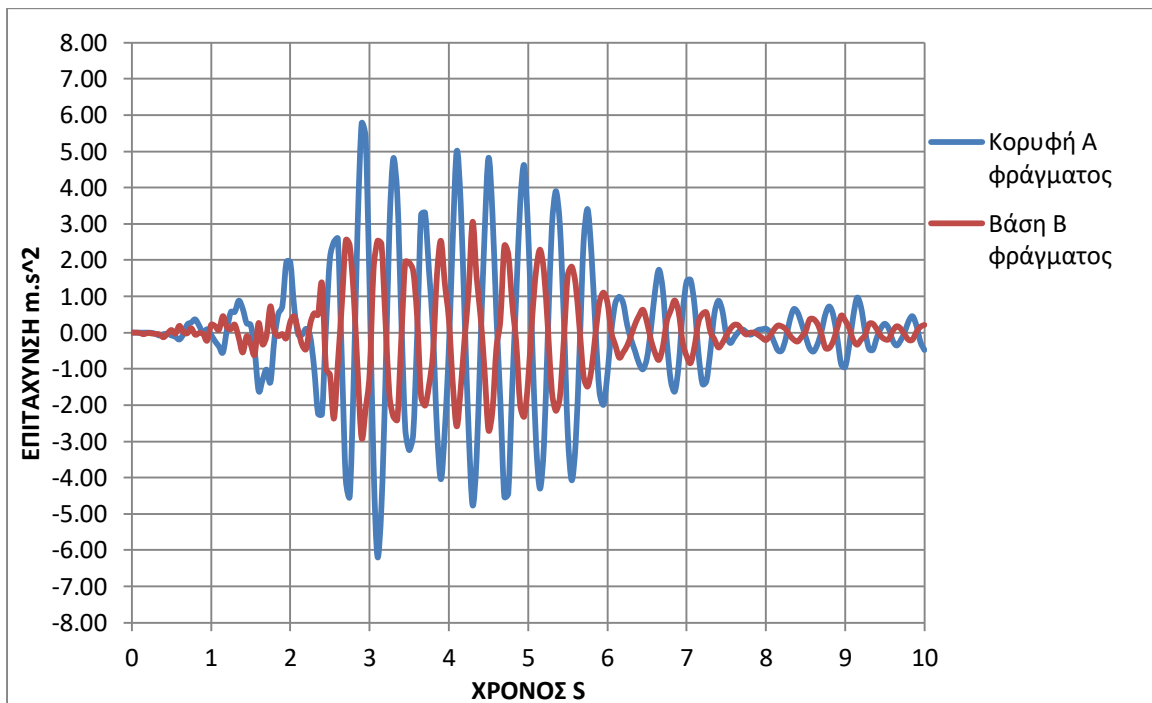


Εικόνα 5.110 Αποτελέσματα χρονιστοριών σημείων A και B για φράγμα κλίσης πρανών 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

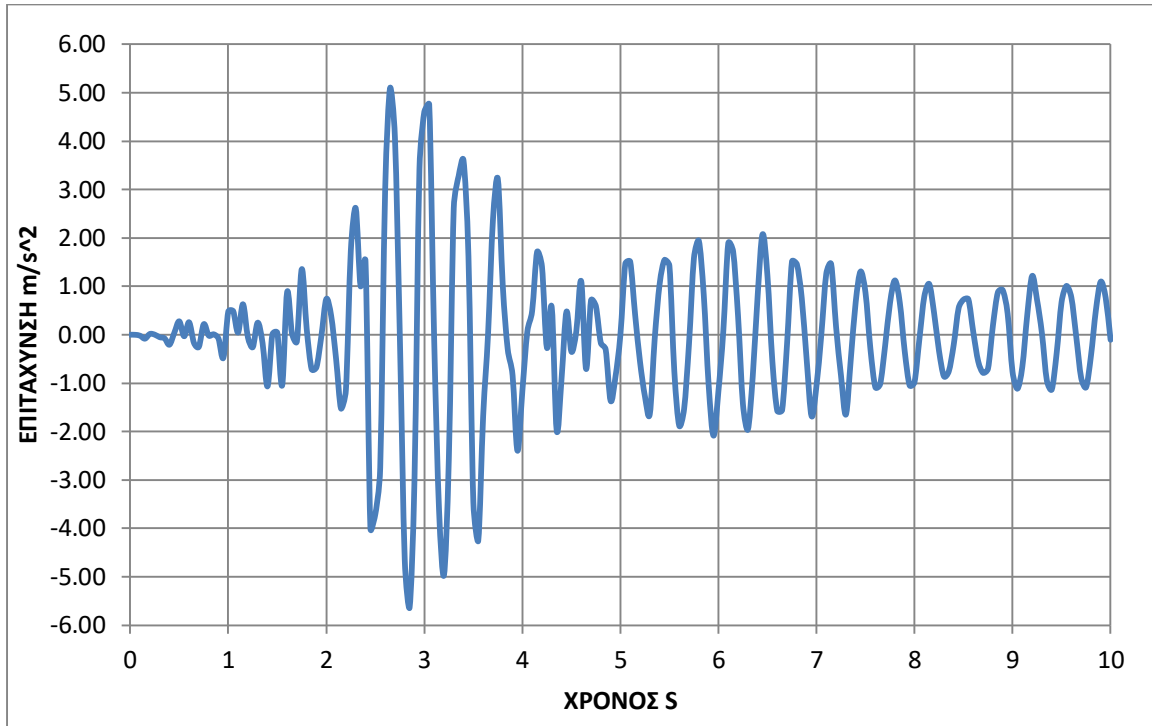


Εικόνα 5.111 Αποτελέσματα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225Α)

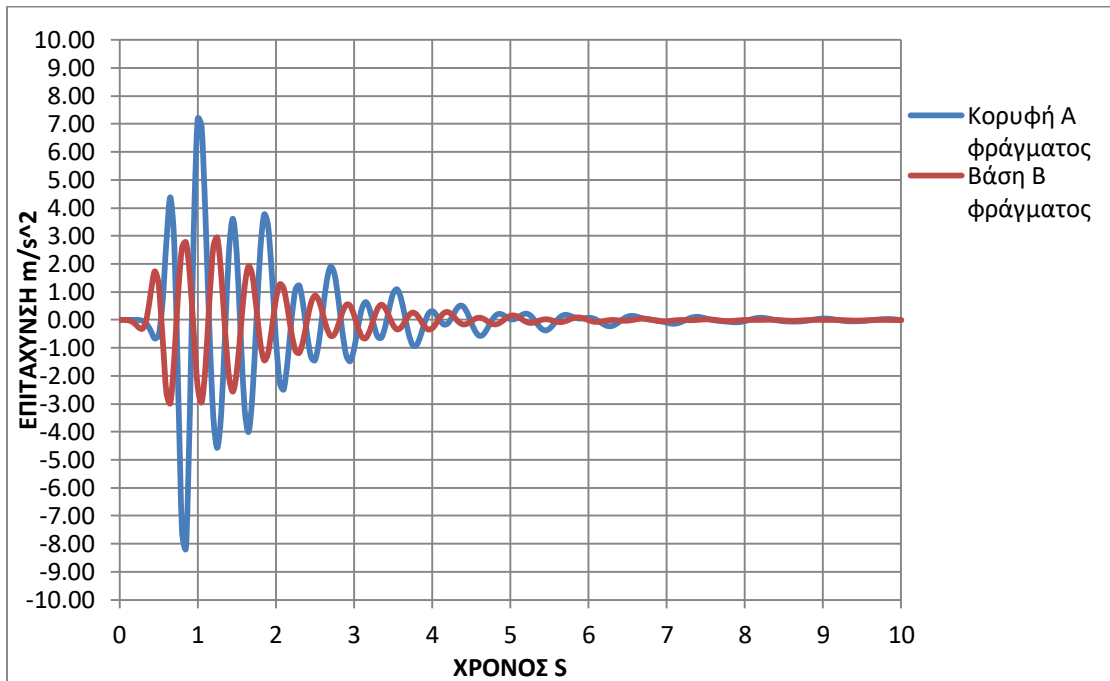


Εικόνα 5.112 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β για φράγμα κλίσης 60 μοιρών σε ημβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

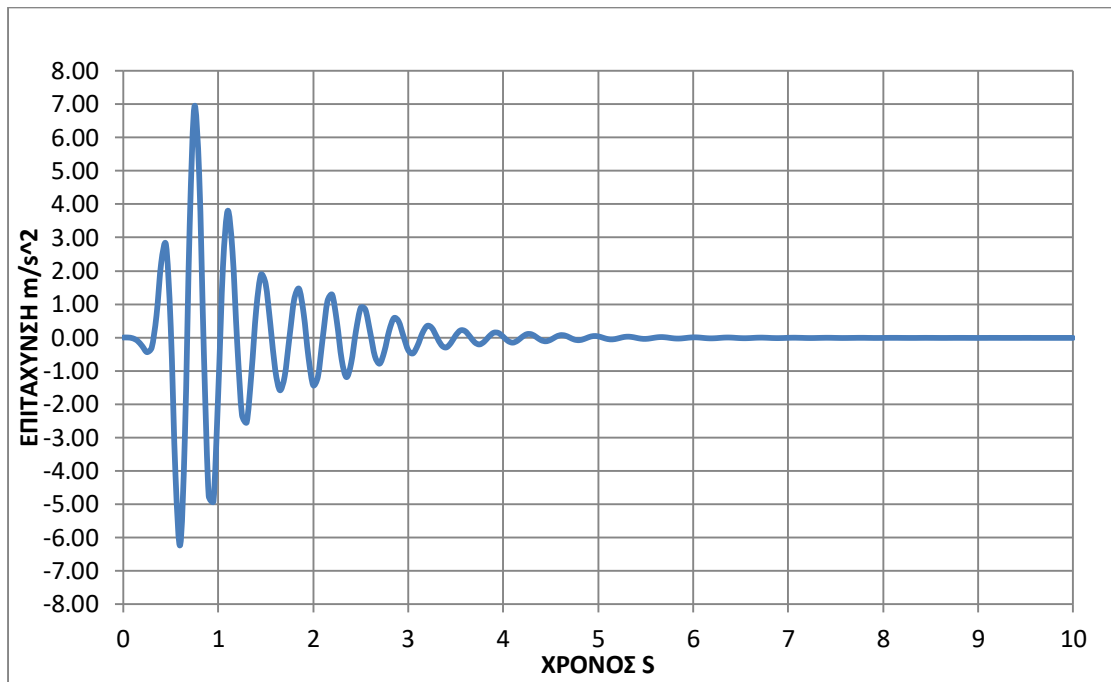


Εικόνα 5.113 Αποτελέσματα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

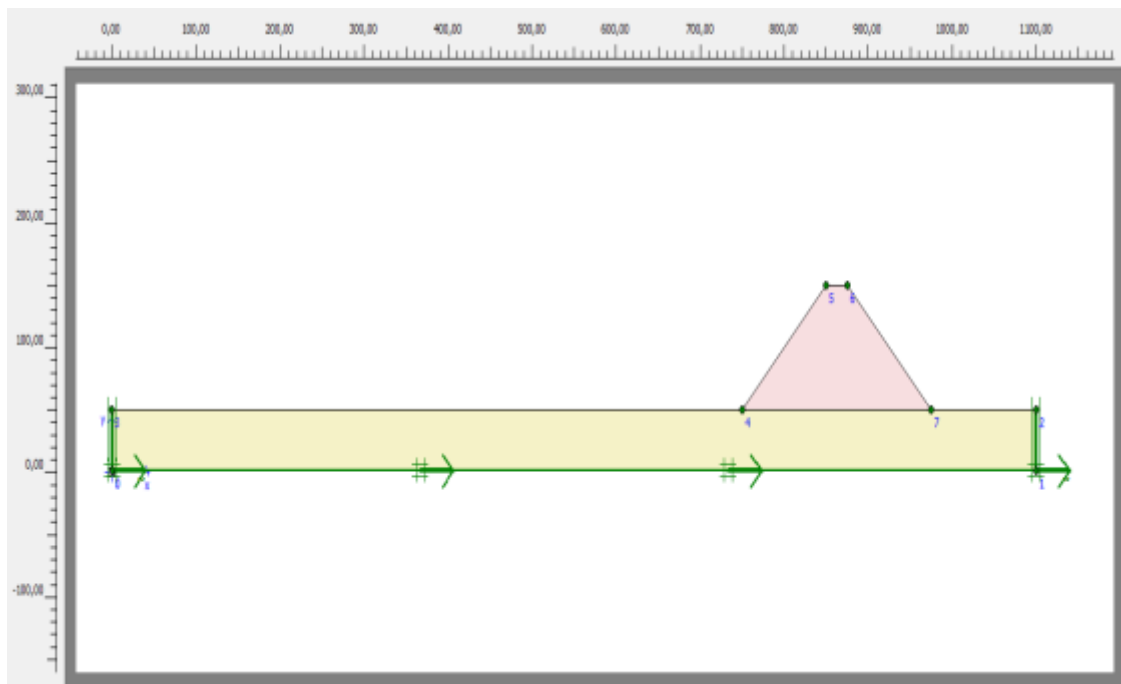


Εικόνα 5.114 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β για φράγμα κλίσης 60 μοιρών σε ημβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ

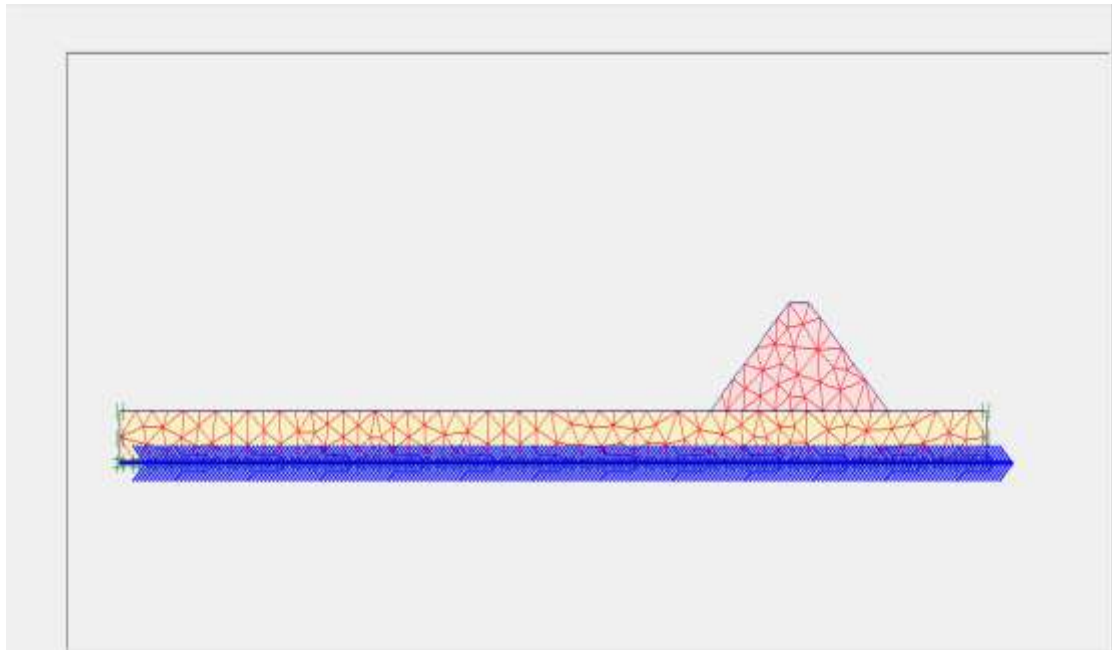


Εικόνα 5.115 Αποτελέσματα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

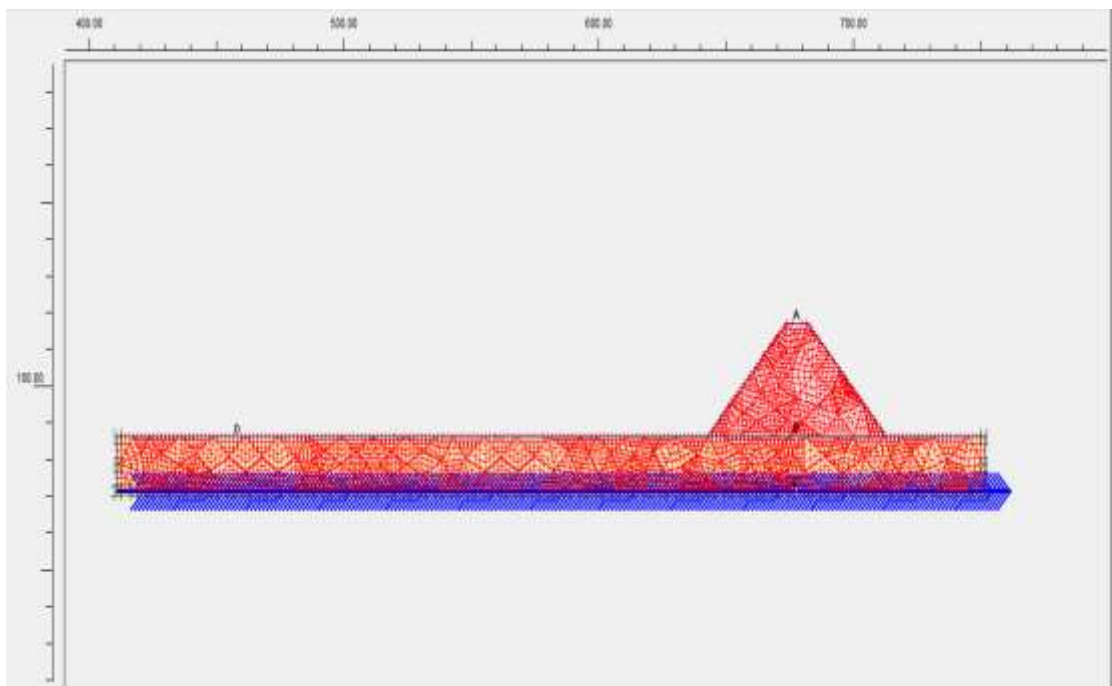
Σενάριο 3: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα.



Εικόνα 5.116 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 3)

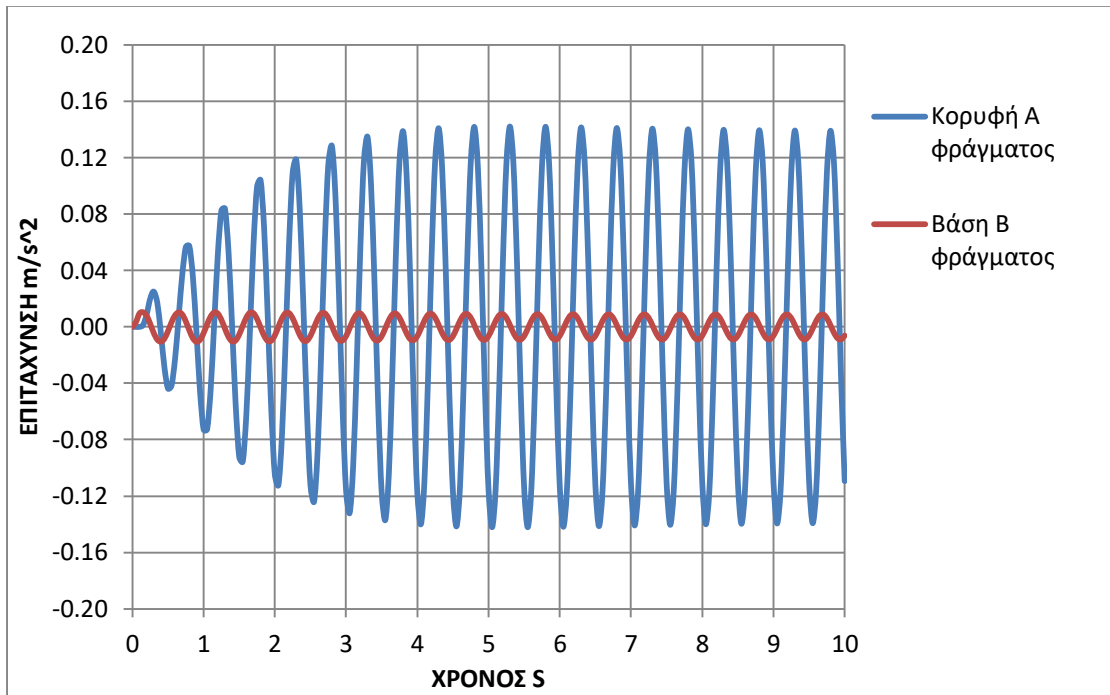


Εικόνα 5.117 Δίκτυο προσομοιώματος (σενάριο 3)



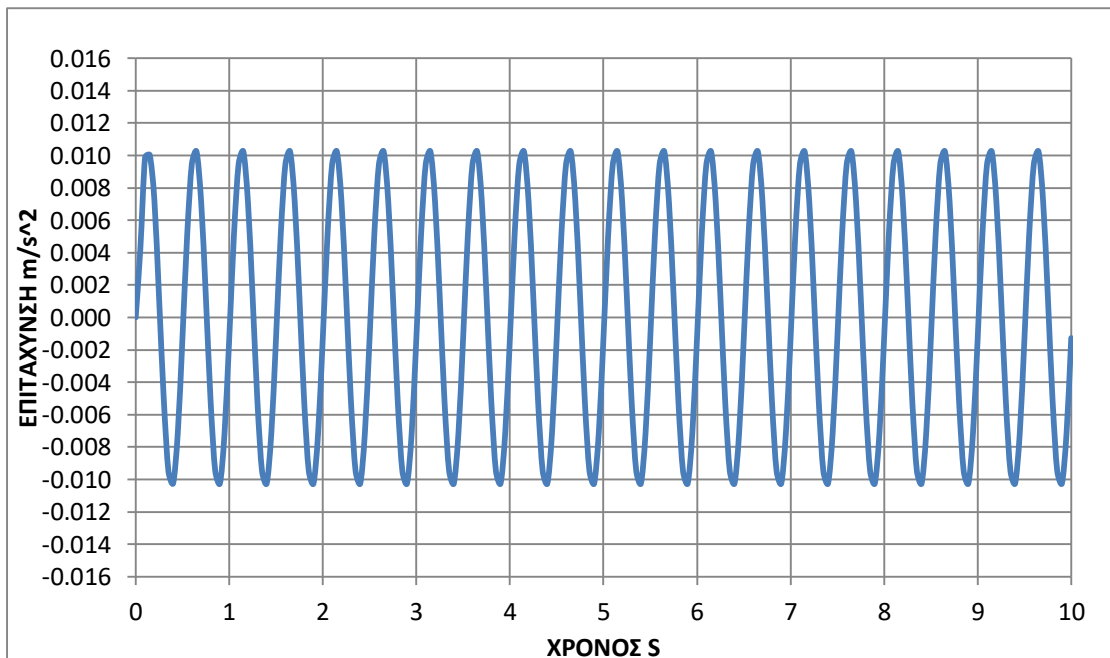
Εικόνα 5.118 Επιλογή σημείων στο πρότυπο για τον υπολογισμό των επιταχύνσεών τους (σενάριο 3)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)



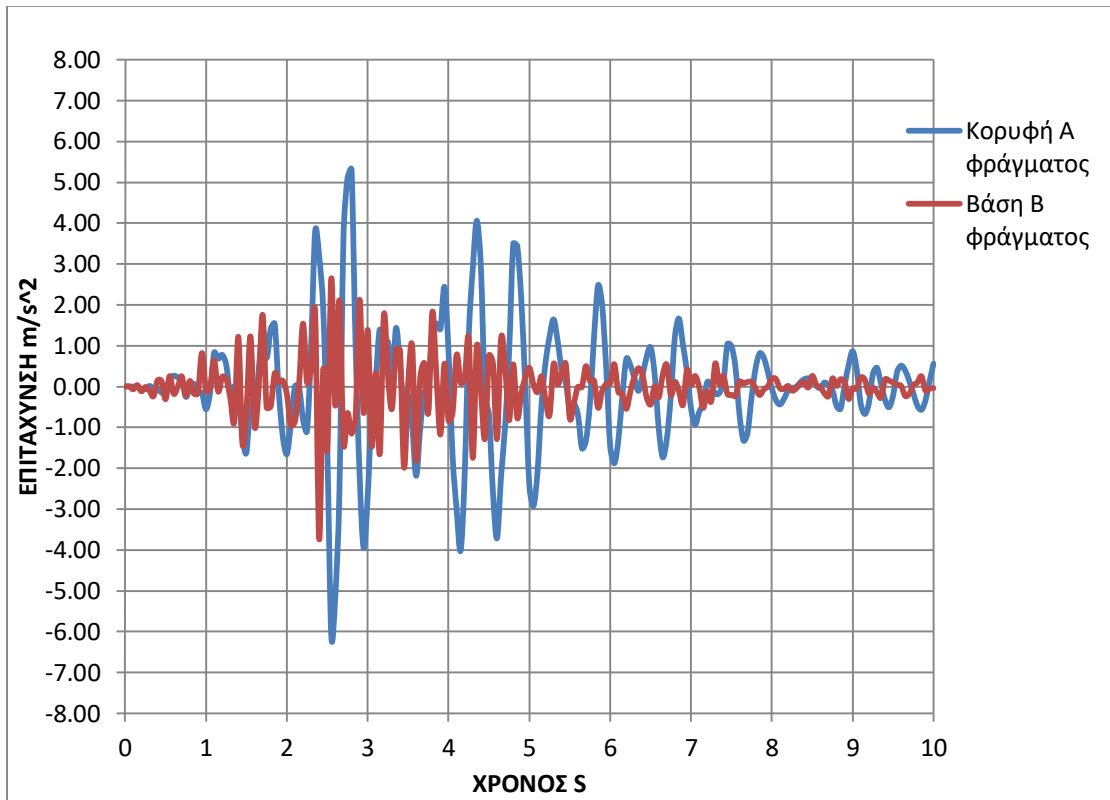
Εικόνα 5.119 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β για φράγμα 45 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

Εδώ παρατηρείται ότι για την σεισμική δόνηση των 2HZ το φράγμα συντονίζεται πίνει μέγιστο πλάτος ταλάντωσης.

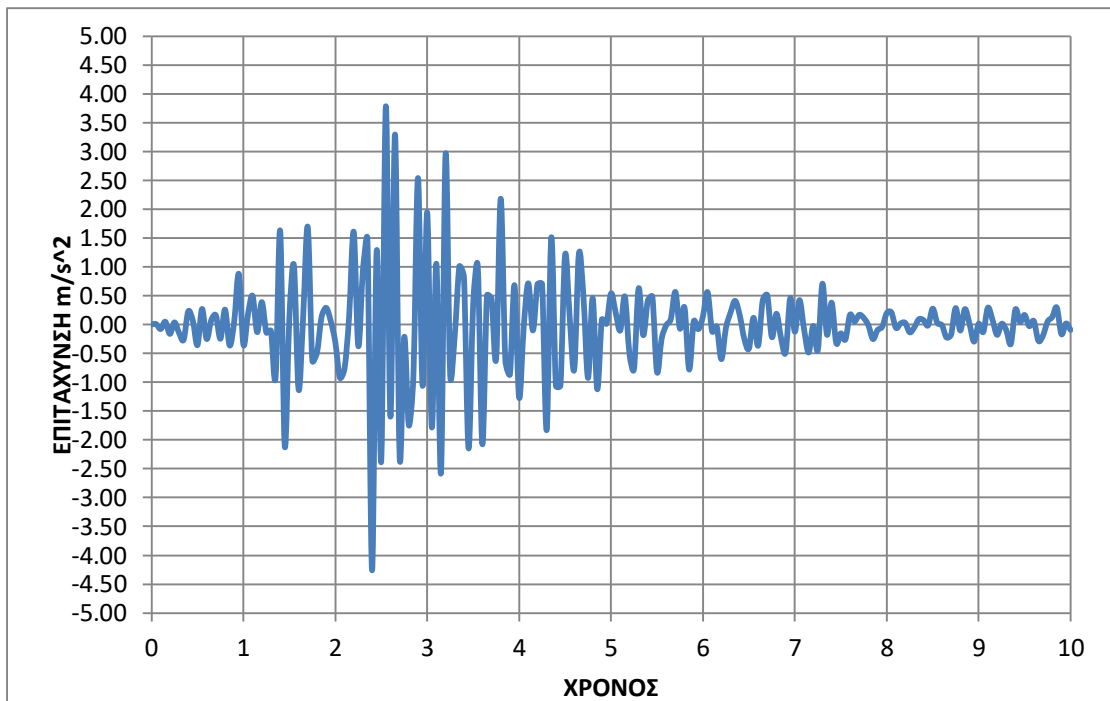


Εικόνα 5.120 Αποτελέσμα κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225Α)

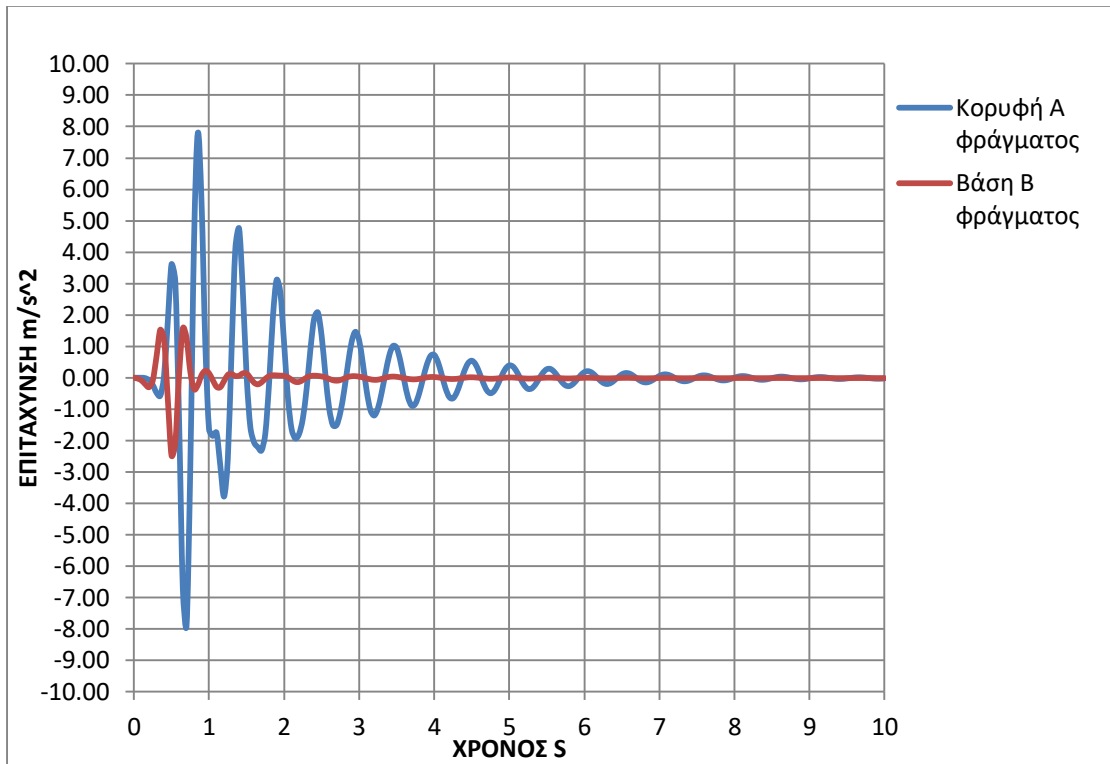


Εικόνα 5.121 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β για φράγμα κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

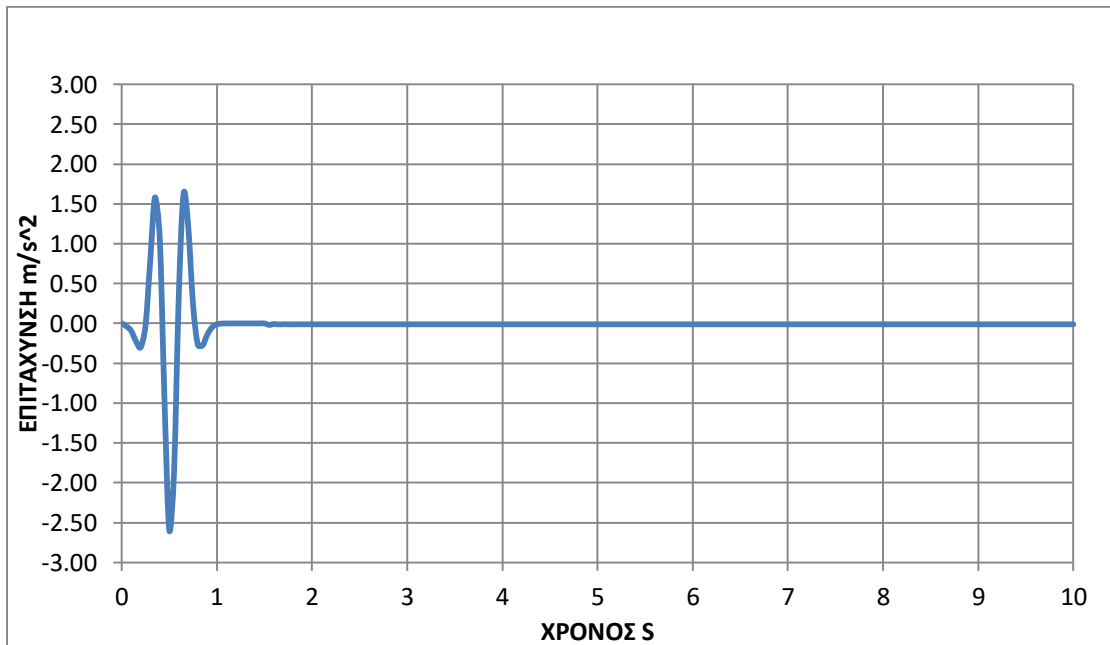


Εικόνα 5.122 Αποτελέσματα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

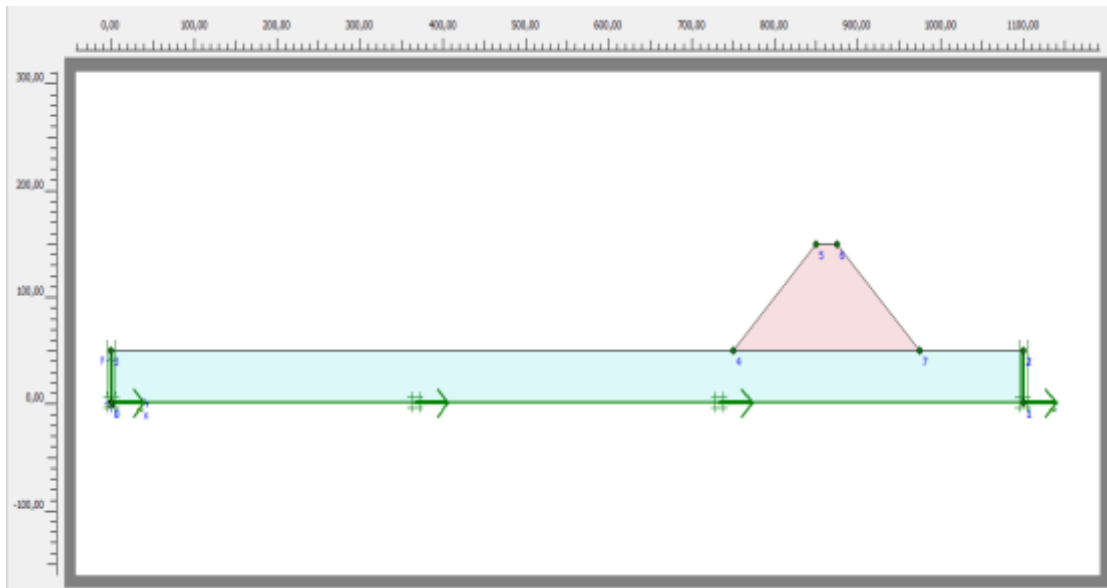


Εικόνα 5.123 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα

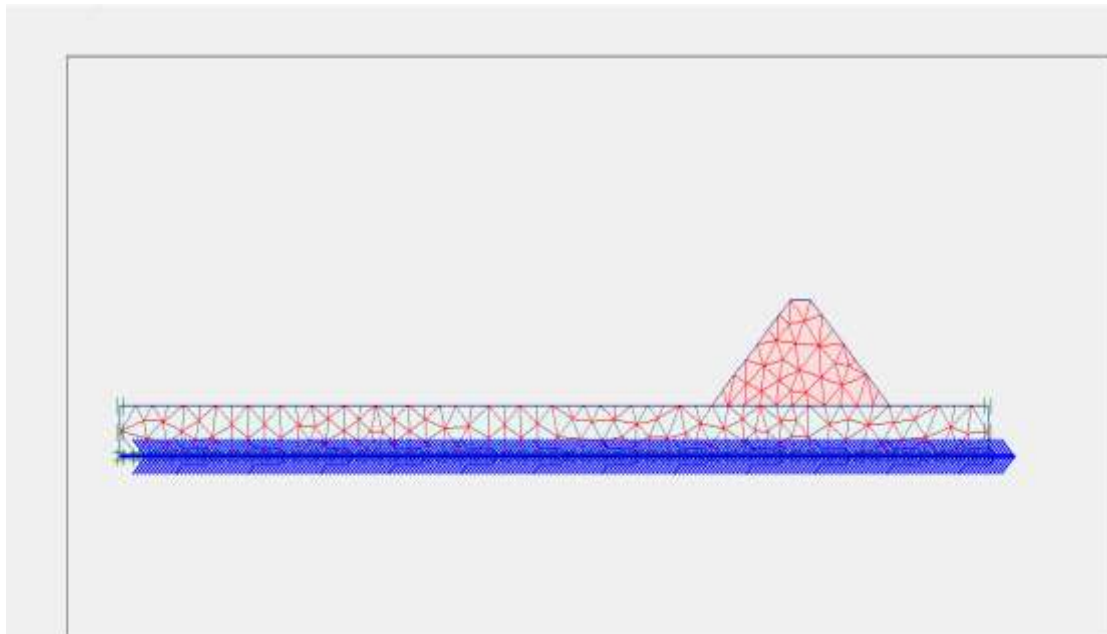


Εικόνα 5.124 Αποτελέσματα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

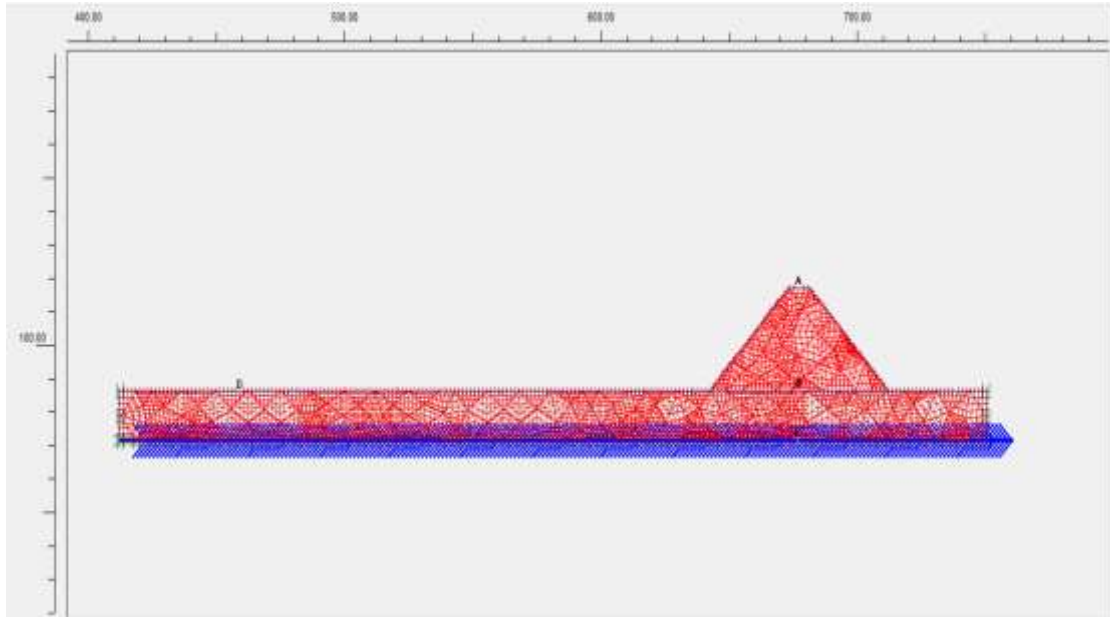
Σενάριο 4: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα.



Εικόνα 5.125 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 4)

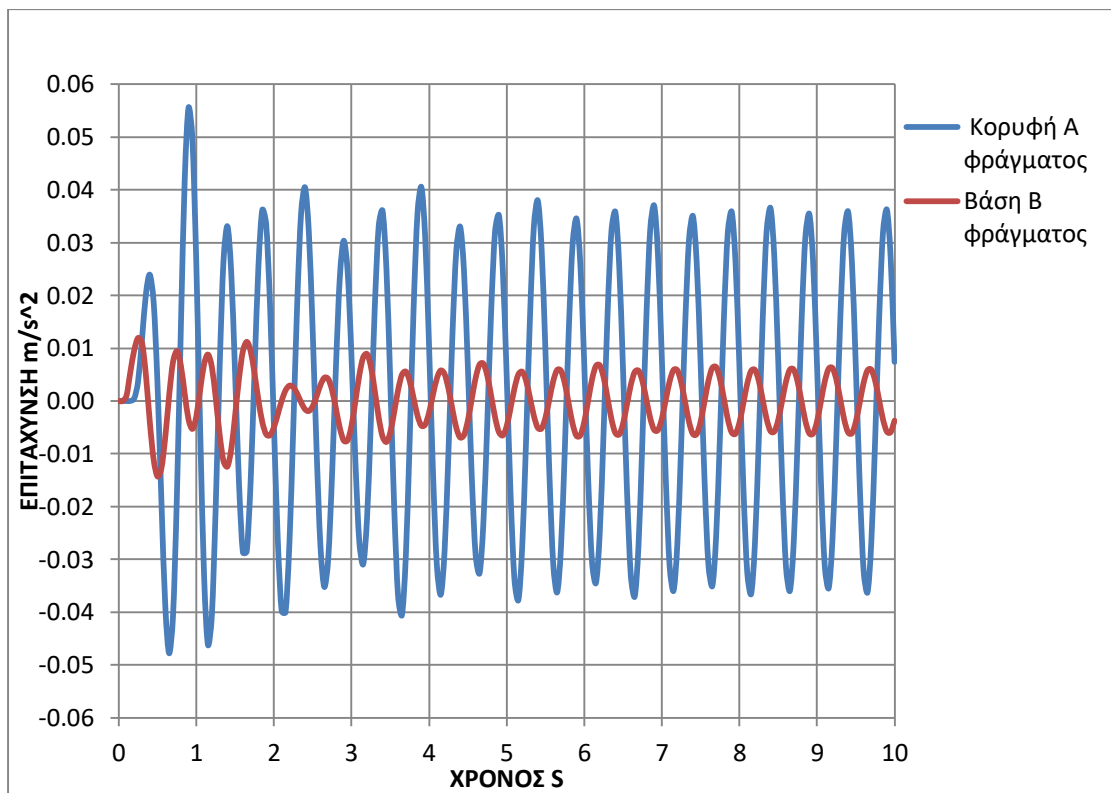


Εικόνα 5.126 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 4)



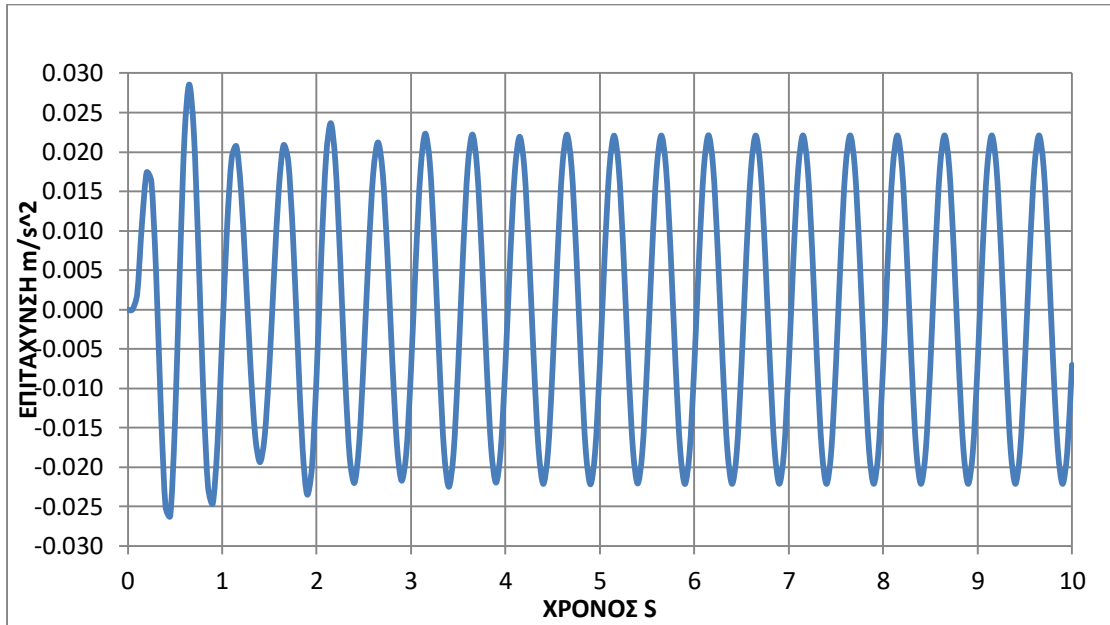
Εικόνα 5.127 Επιλογή σημείων στο πρότυπο για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων (σενάριο 4)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)



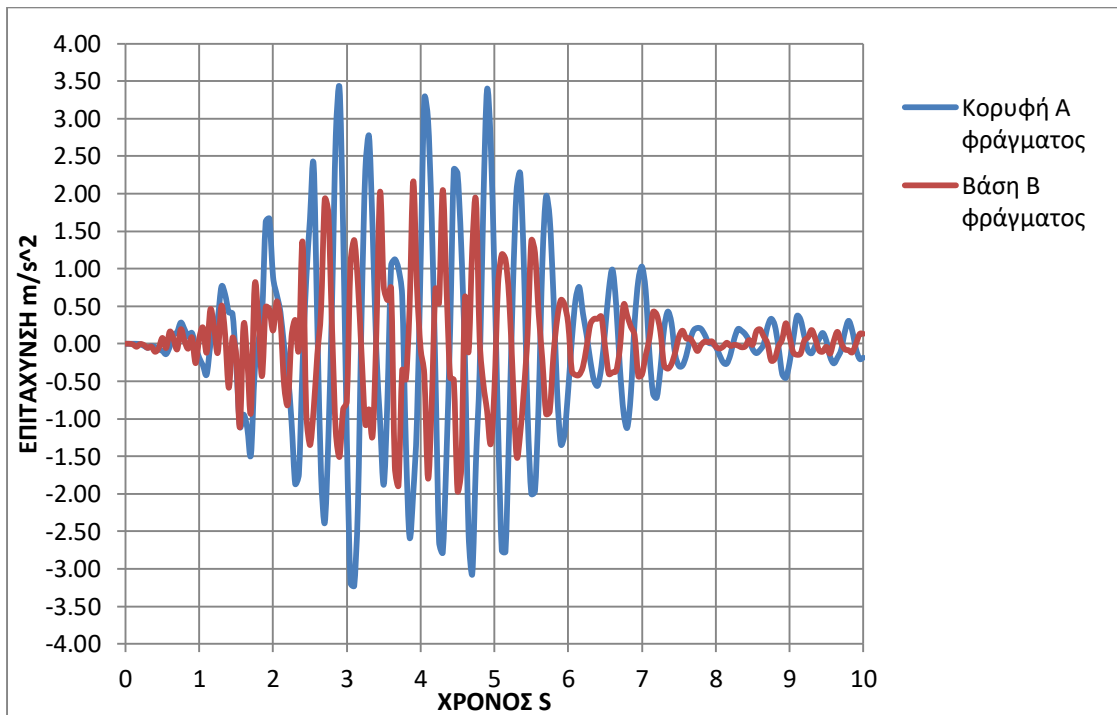
Εικόνα 2 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

Εδώ παρατηρείται πως ο ημιβραχος αποτρέπει τον συντονισμό του φράγματος (γωνία κλίσης 45 μοιρών), άρα επιδρά ευεργετικά στην κατασκευή μας. Η επιτάχυνση σε αυτήν την περίπτωση είναι μειωμένη κατά 2/3 της επιτάχυνσης που προκύπτει από τον συντονισμό.

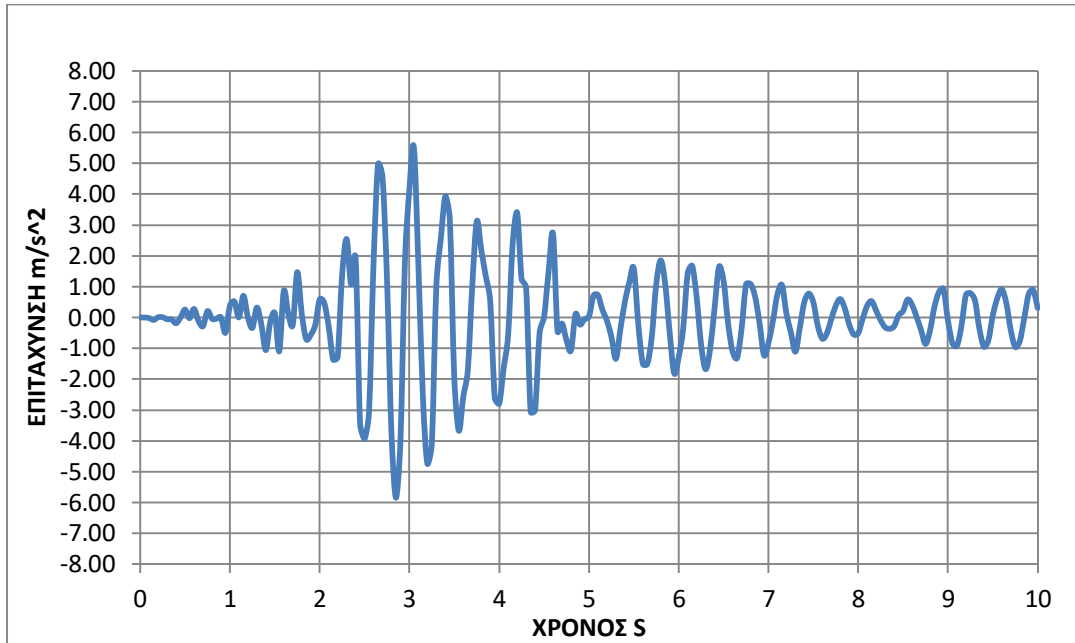


Εικόνα 5.129 Αποτελέσματα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225 a.m.s.)

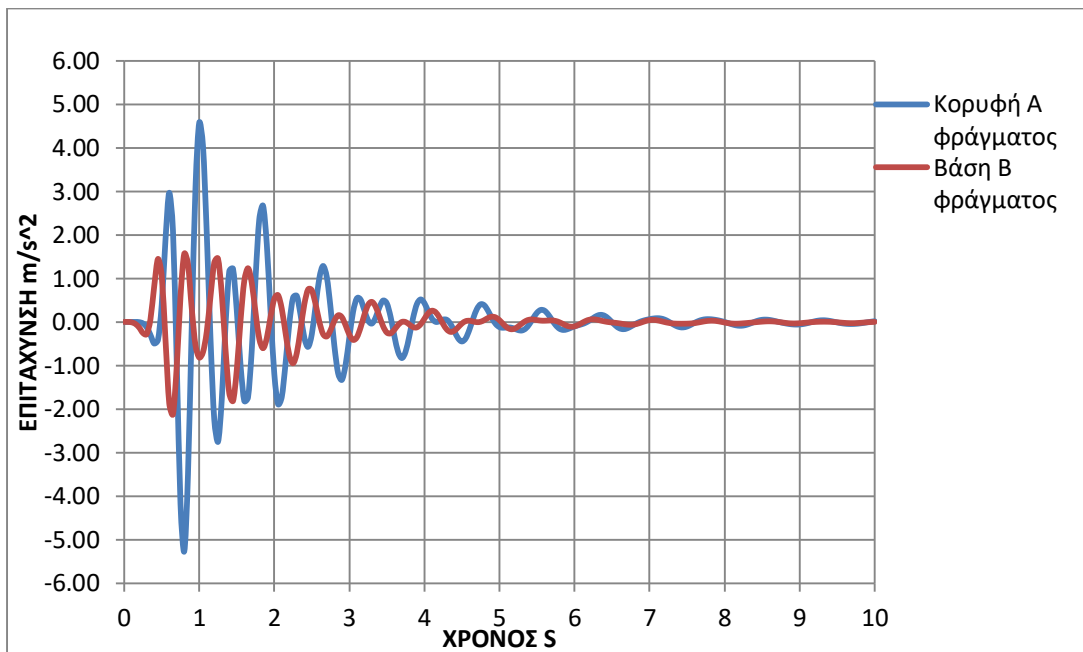


Εικόνα 5.130 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

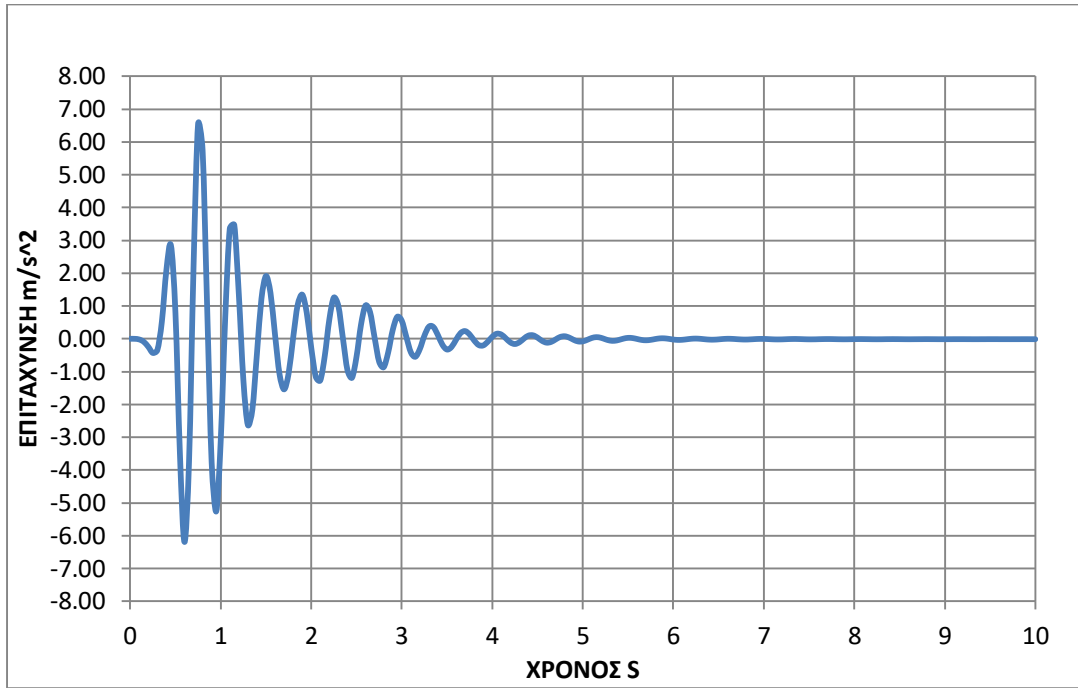


Εικόνα 5.131 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)



Εικόνα 3 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



Εικόνα 5.133 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

5.5 Σεισμική φόρτιση υπό την παρουσία νερού

Σε αυτό το στάδιο της διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε δυναμική φόρτιση στο πρότυπό μας θεωρώντας ότι ο ταμιευτήρας του φράγματος είναι γεμάτος με νερό. Το νερό στο φράγμα υπό την παρουσία της σεισμικής δόνησης ασκεί υδροδυναμικές δονήσεις οι οποίες αποτελούν ένα επιπλέον φορτίο στο σώμα του φράγματος. Εδώ εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε πως το νερό βρισκόταν στην μέση στάθμη στον ταμιευτήρα (στα 45m), ενώ στην δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε πως βρισκόταν στην μέγιστη στάθμη του (στα 90m). Επειδή το Plaxis δεν μας έδινε την δυνατότητα να αναπαραστήσουμε το υλικό του νερού πραγματοποιήσαμε μία προσομοίωσή του. Η προσομοίωση επιτεύχθηκε τοποθετώντας ένα υλικό στα ανάντη του ταμιευτήρα του φράγματος με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες (Poisson $\nu=0,499$ και $V_s=20\text{m/s}$) ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν πιο πιστή προσομοίωση του νερού. Ο συντελεστής απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκε για το υλικό θεωρήθηκε ίσος με 5% και παρέμενε αμετάβλητος καθόλη τη διάρκεια των σεισμικών δονήσεων. Οι σεισμικές δονήσεις που εφαρμόστηκαν είναι οι ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν στην σεισμική συμπεριφορά του προτύπου χωρίς νερό.

Στη συνέχεια για κάθε σεισμική δόνηση υπολογίστηκαν οι υδροδυναμικές ωθήσεις που ασκούνται στο φράγμα για συγκεκριμένο σημείο από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα. Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών ωθήσεων ήταν η μέθοδος Westergaard:

$$p=0,875*\alpha*(h * y)^{0,5} *w$$

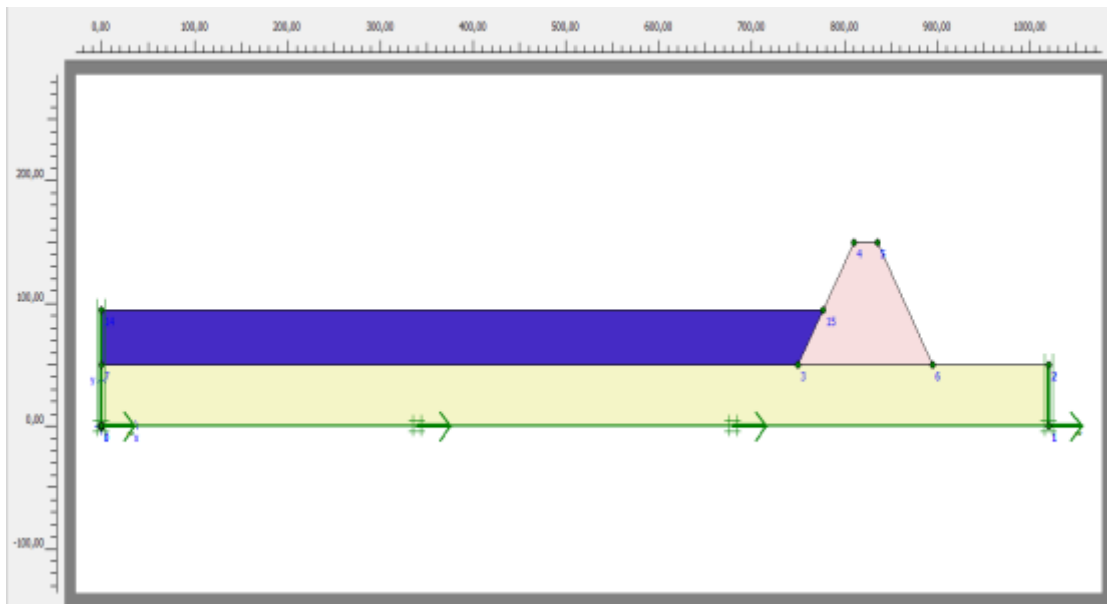
Όπου:

- w: το ειδικό βάρος του νερού
- h: το βάθος του ταμιευτήρα
- α : η οριζόντια επιτάχυνση στην βάση του φράγματος
- y: η κάθετη απόσταση από την επιφάνεια του νερού στον ταμιευτήρα στο υψόμετρο του σημείο στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε την υδροδυναμική δύναμη (Reclamation, 1952)

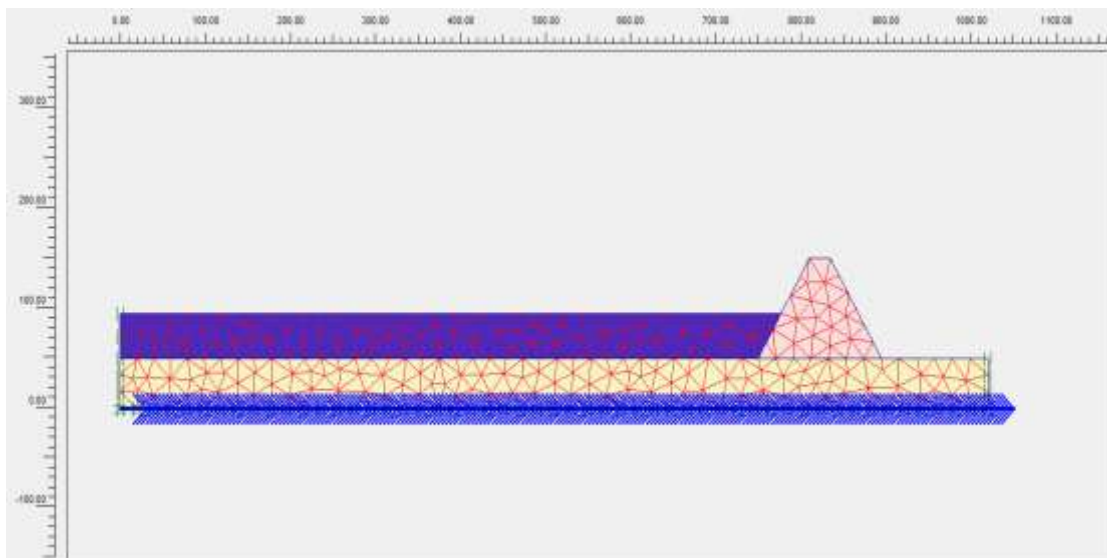
5.5.1 Σεισμική φόρτιση για μέση στάθμη νερού στον ταμειυτήρα

Εδώ λαμβάνονται τα τέσσερα σενάρια τα οποία περιγράφηκαν πιο πάνω.

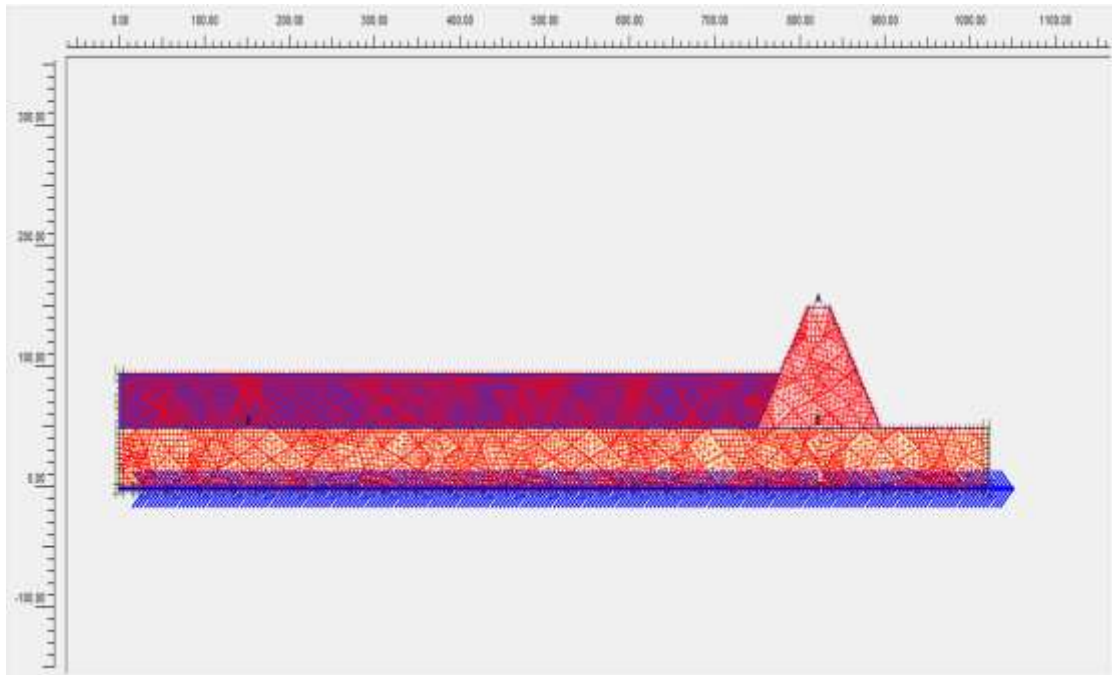
Σενάριο 1: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.134 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 1)

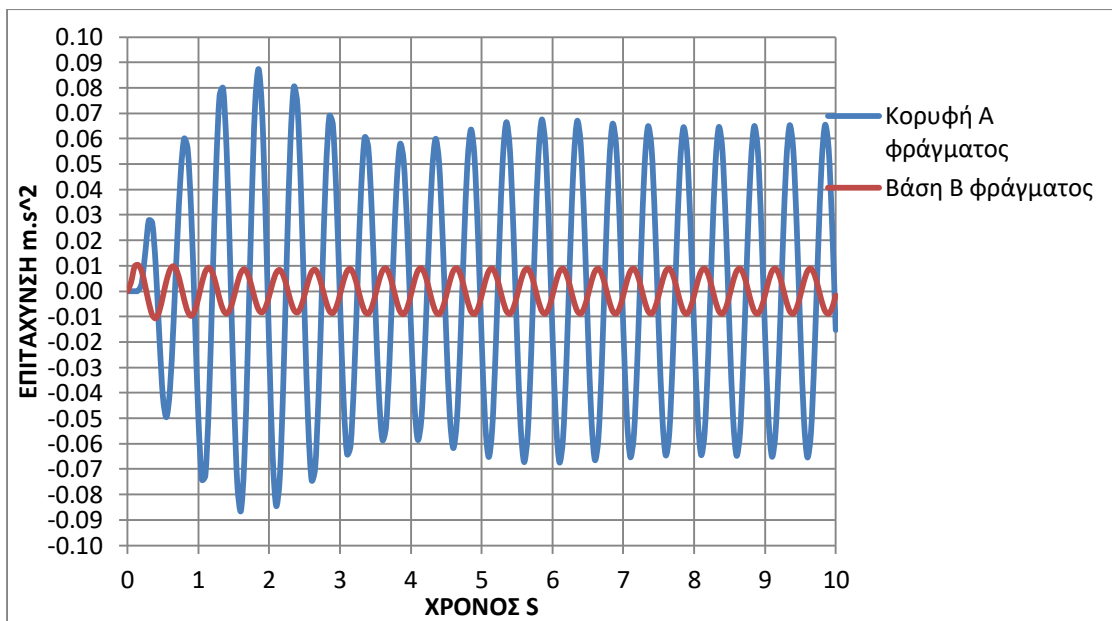


Εικόνα 5.135 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 1)

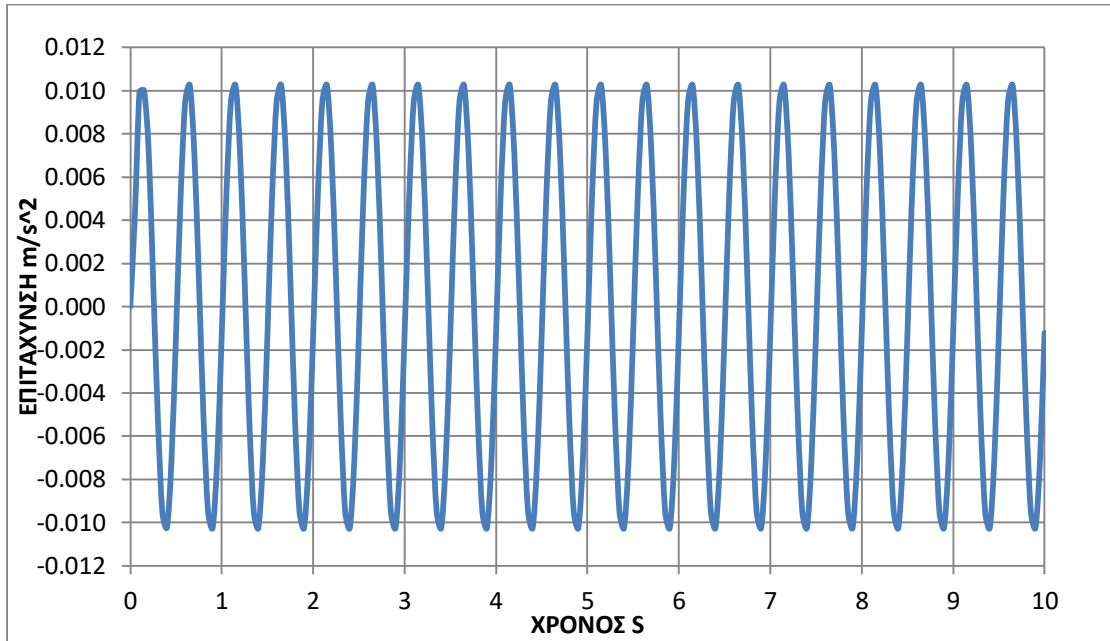


Εικόνα 5.136 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης (σενάριο 1)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

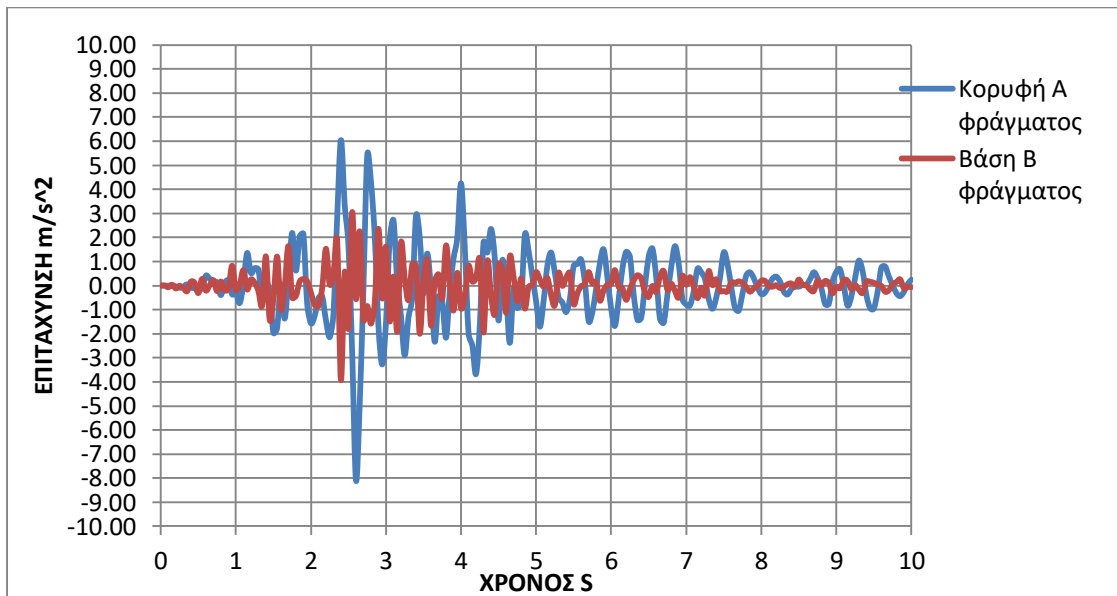


Εικόνα 5.137 Αποτελέσματα χρονιστηρίων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

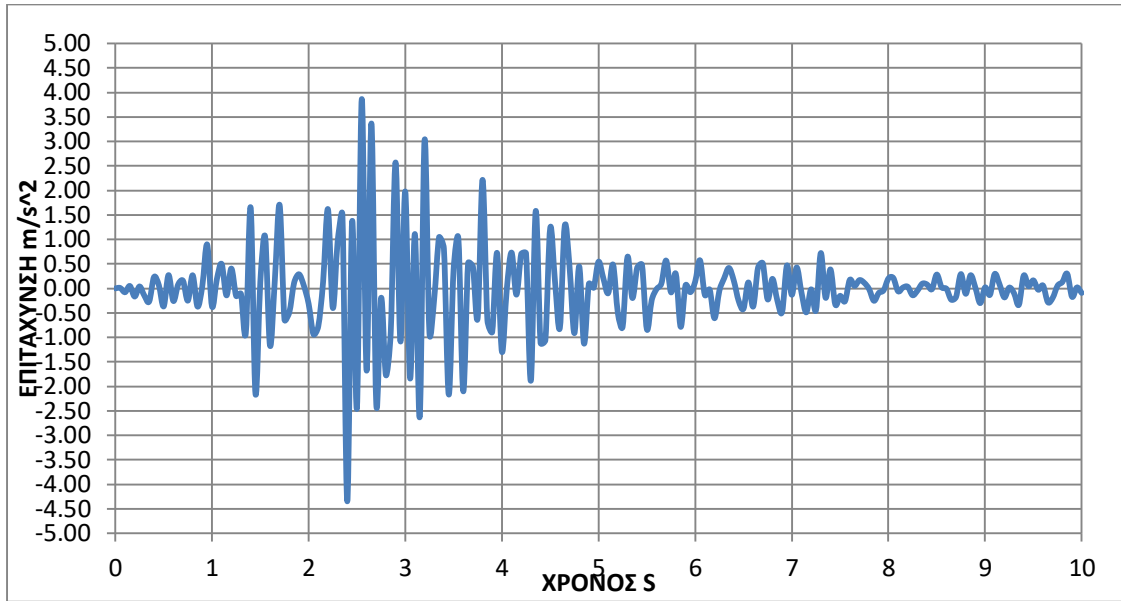


Εικόνα 5.138 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225 a.m.s.)

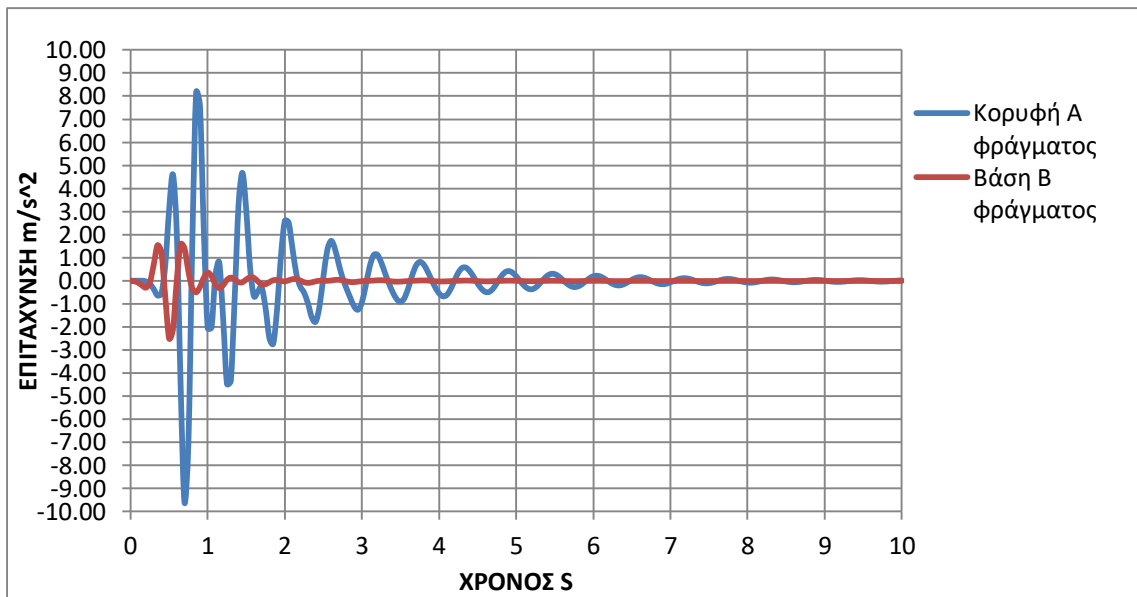


Εικόνα 5.139 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

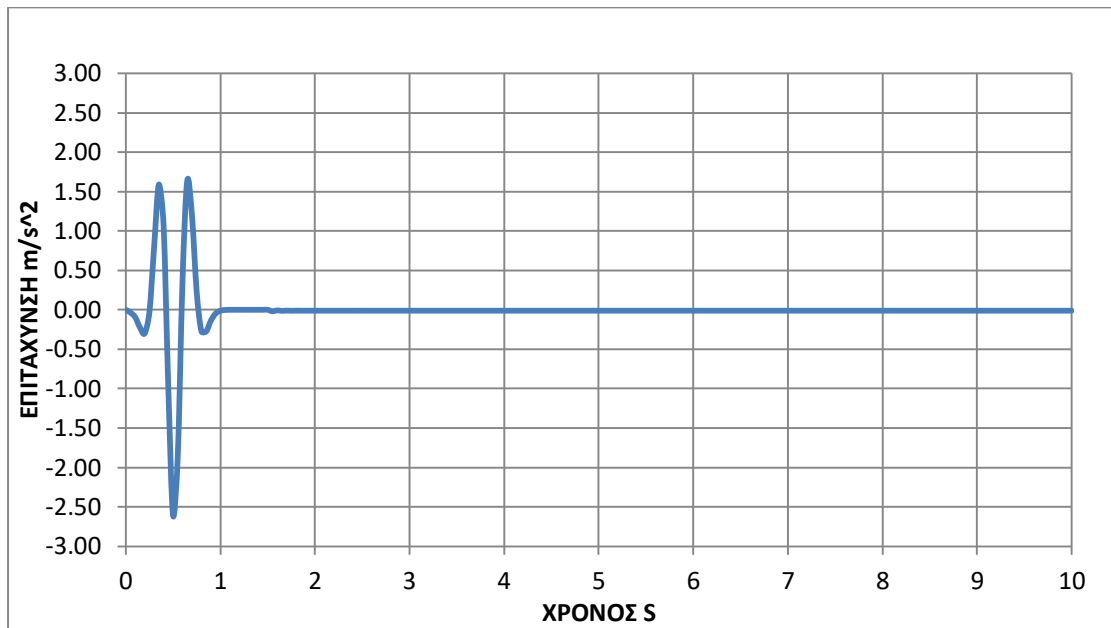


Εικόνα 5.140 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

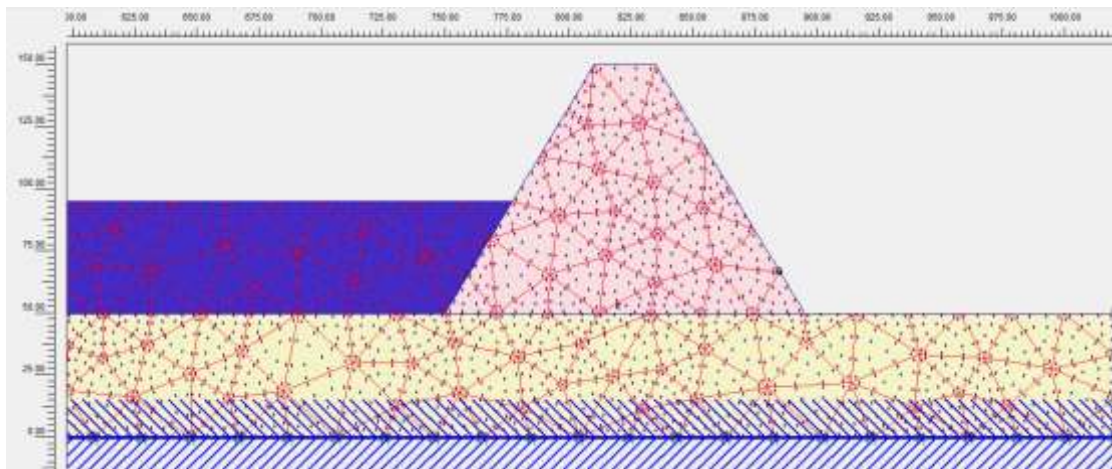


Εικόνα 5.141 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για σεισμική δόνηση RICKER-2HZ



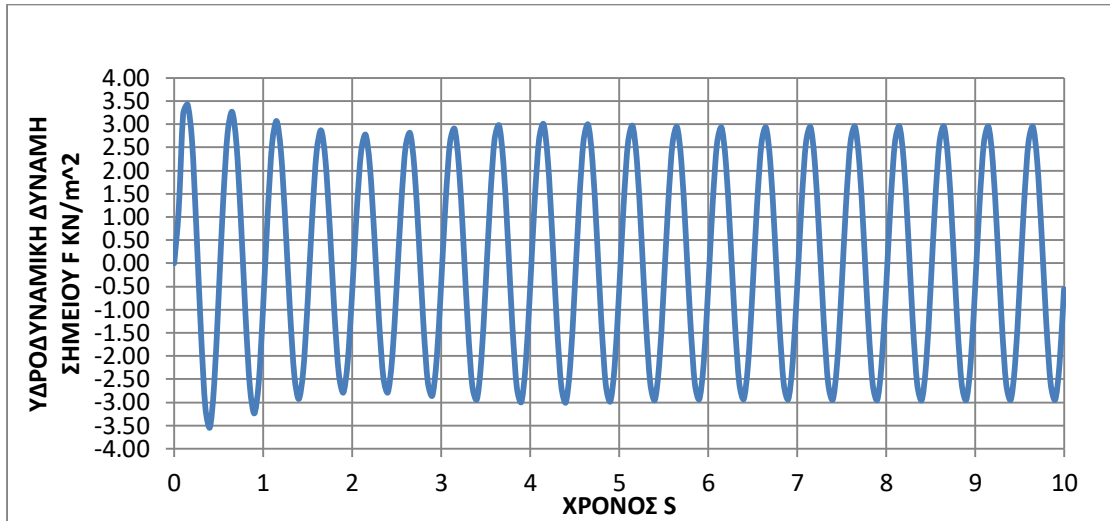
Εικόνα 5.142 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

Υδροδυναμικές ωθήσεις

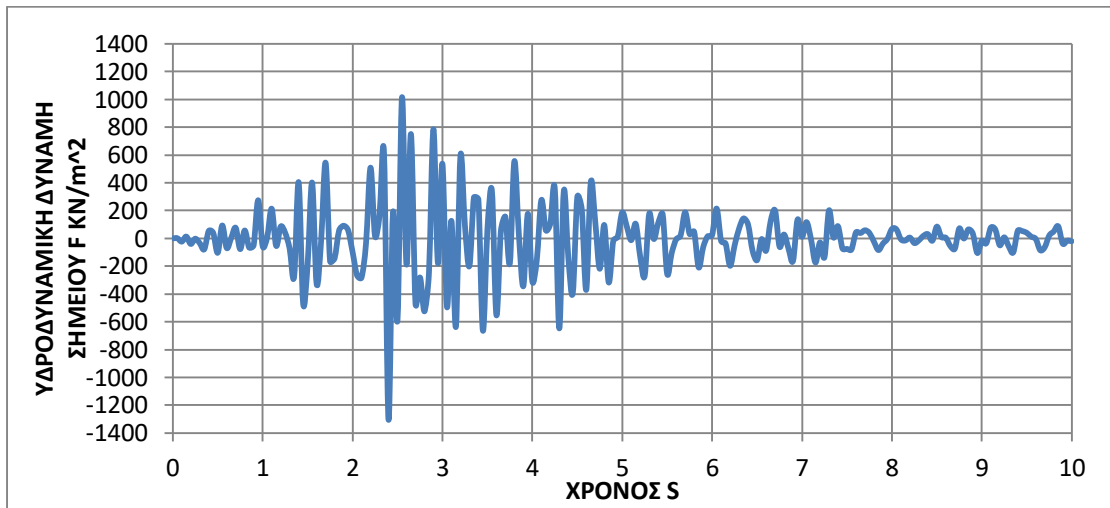


Εικόνα 5.143 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών ωθήσεων

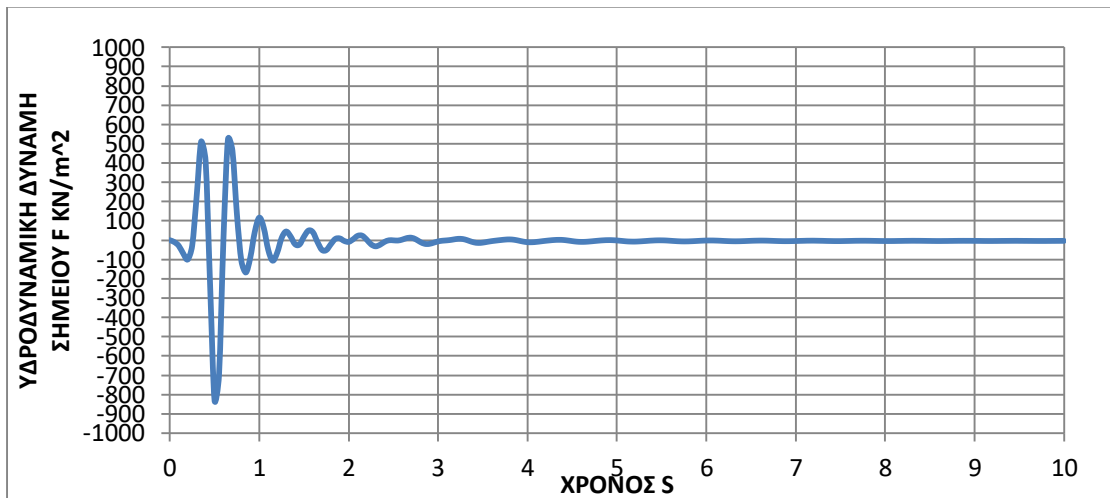
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμειυτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμειυτήρα είναι $h=45\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμειυτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=32\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h*y)^{0,5}*w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις για σεισμική δόνηση.



Εικόνα 5.144 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέση στάθμη νερού)

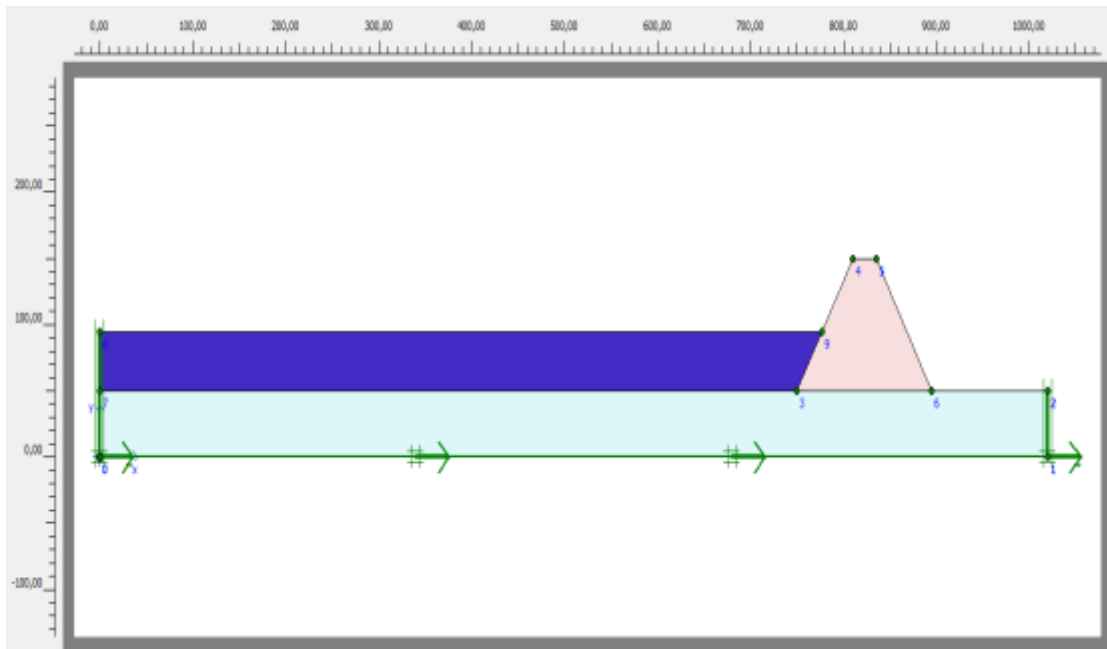


Εικόνα 5.145 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225A (μέση στάθμη νερού)

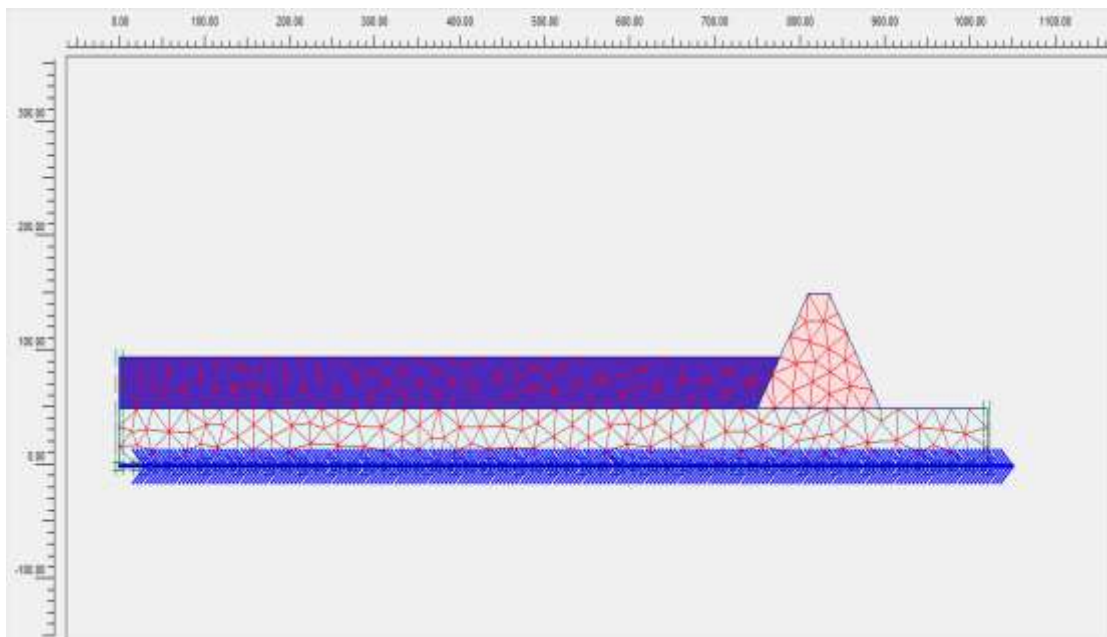


Εικόνα 5.146 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέση στάθμη νερού)

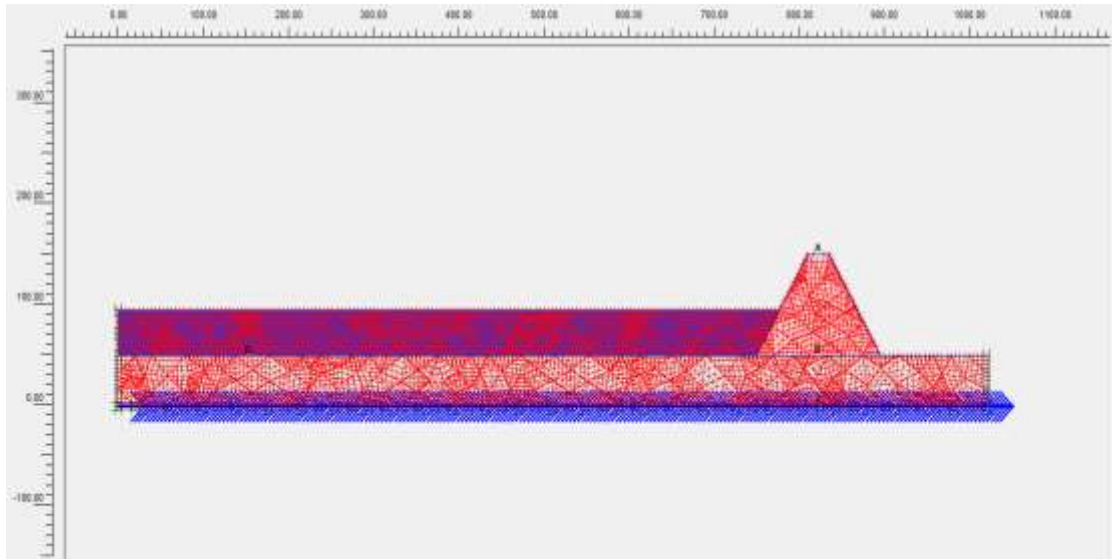
Σενάριο 2: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.147 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 2)

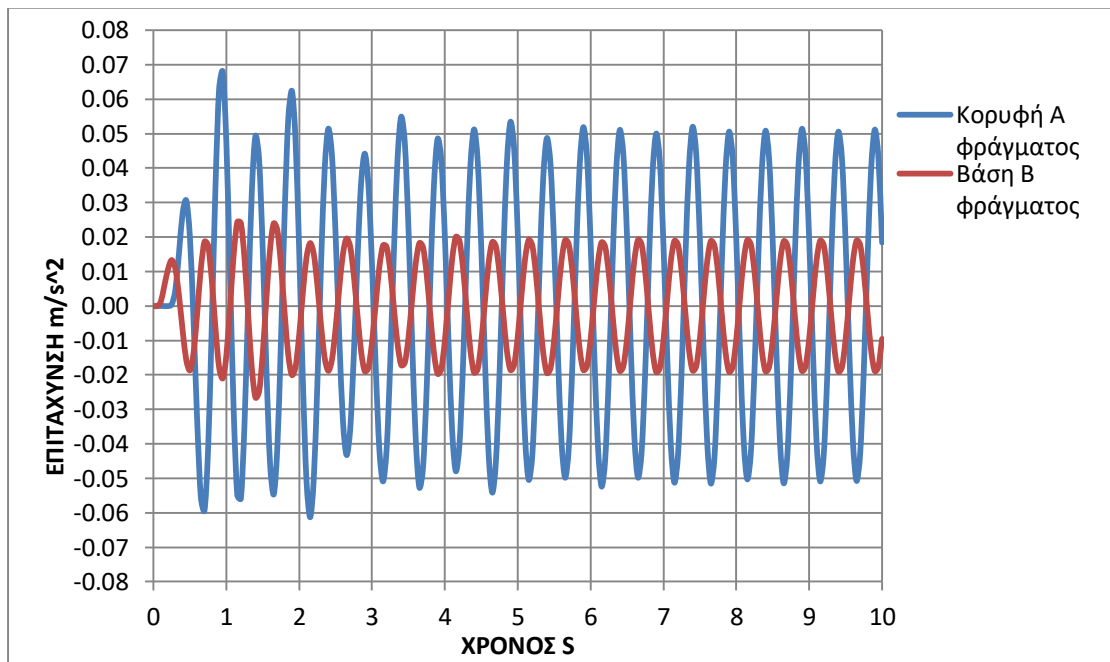


Εικόνα 5.148 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 2)

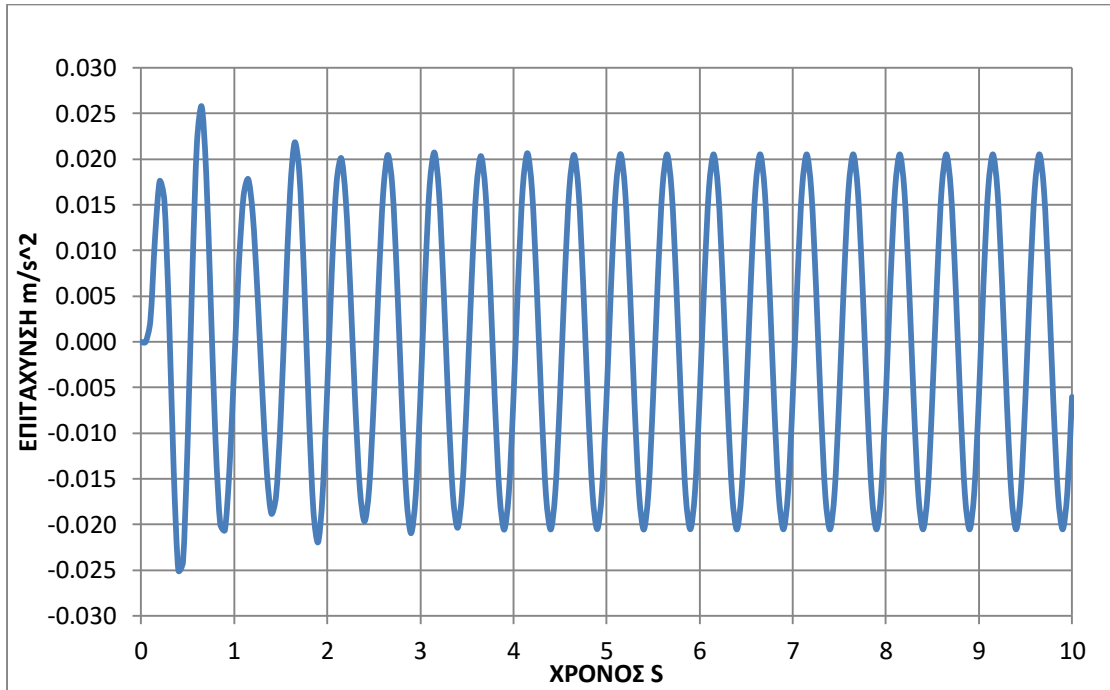


Εικόνα 5.149 Επιλογή σημείων για τον υπολογισμό των επιταχύνσεών τους (σενάριο 2)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

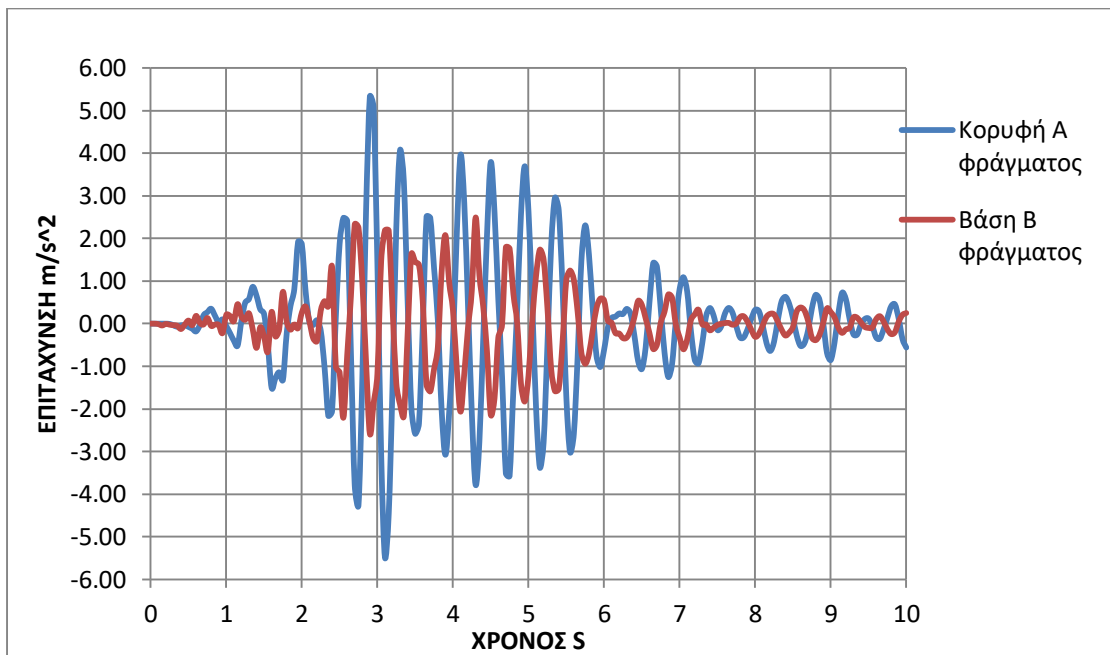


Εικόνα 4 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

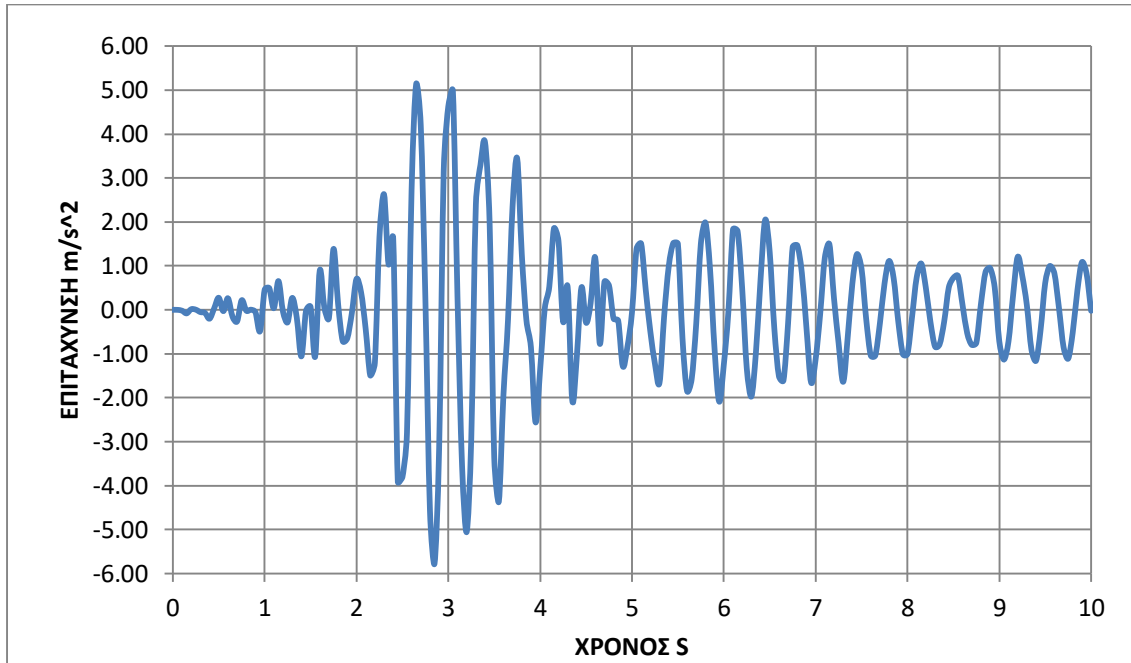


Εικόνα 5 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225 a.m.s.)

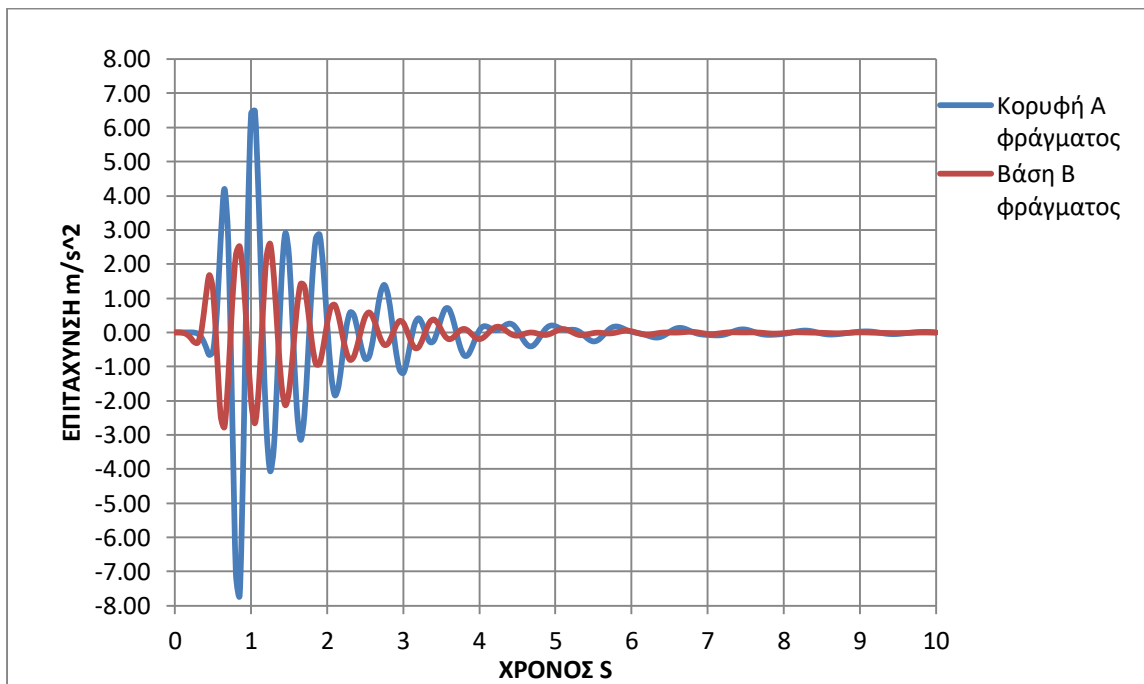


Εικόνα 6 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος σε ημβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

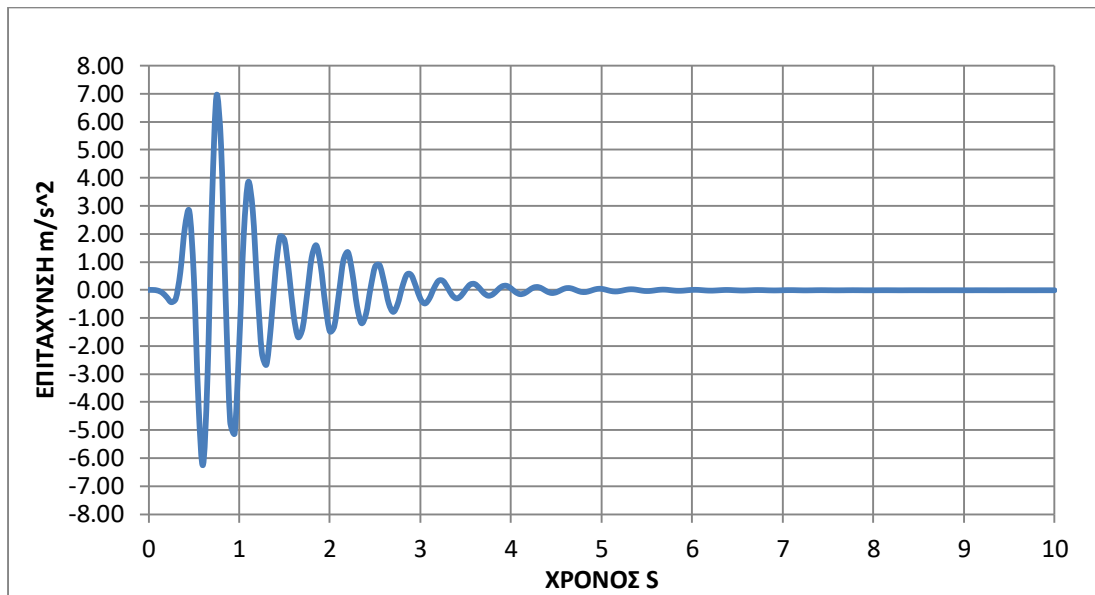


Εικόνα 7 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

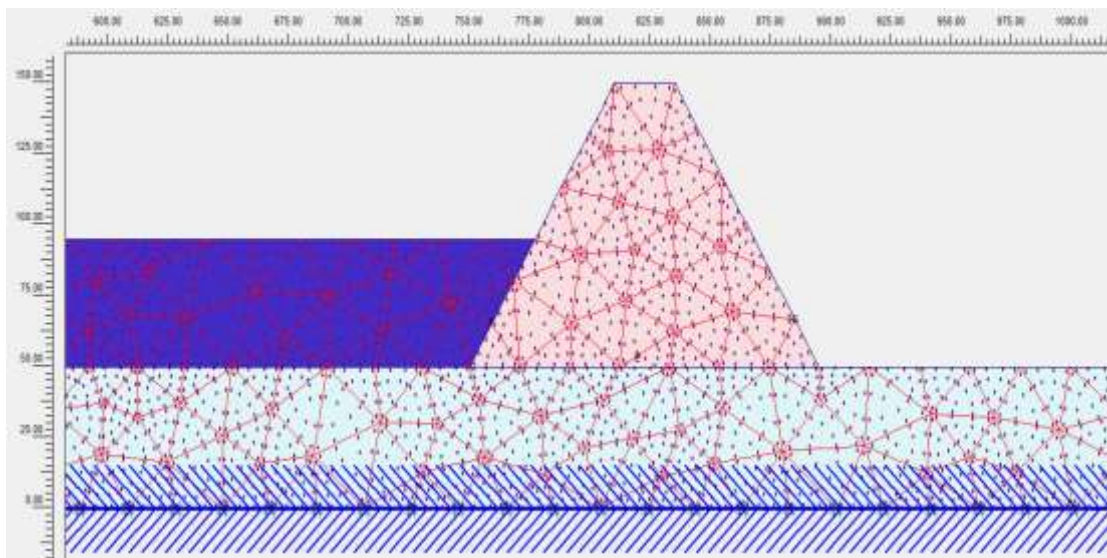


Εικόνα 8 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



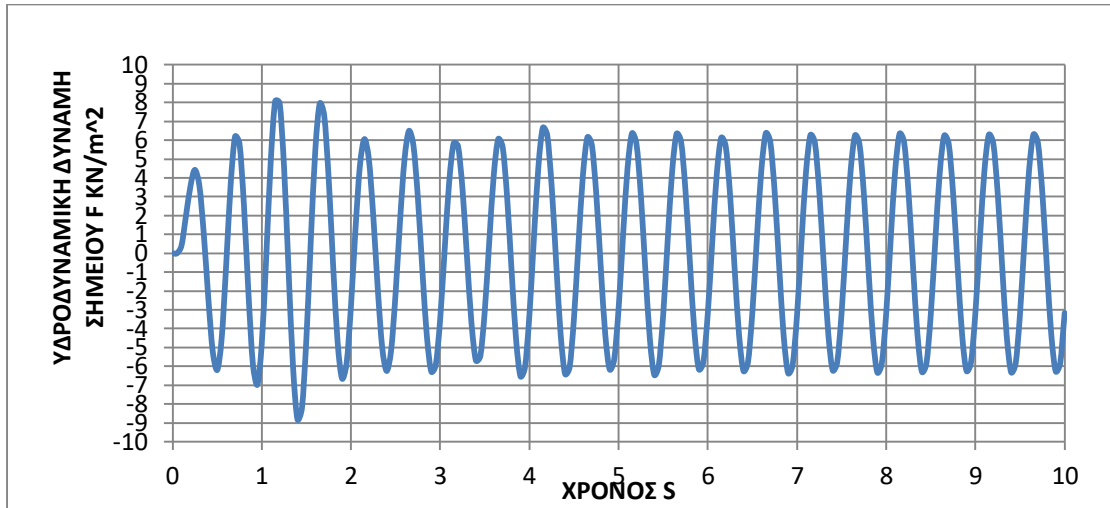
Εικόνα 9 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

Υδροδυναμικές ωθήσεις

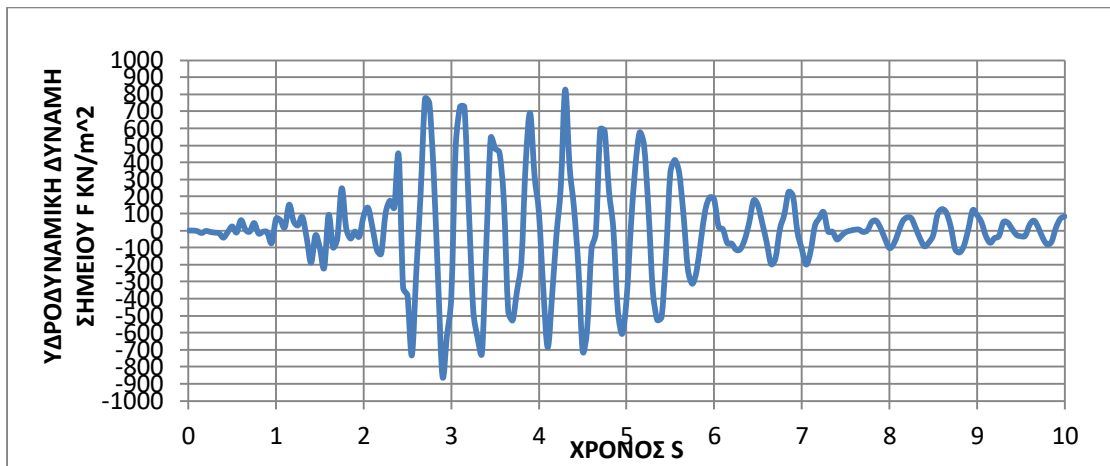


Εικόνα 10 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

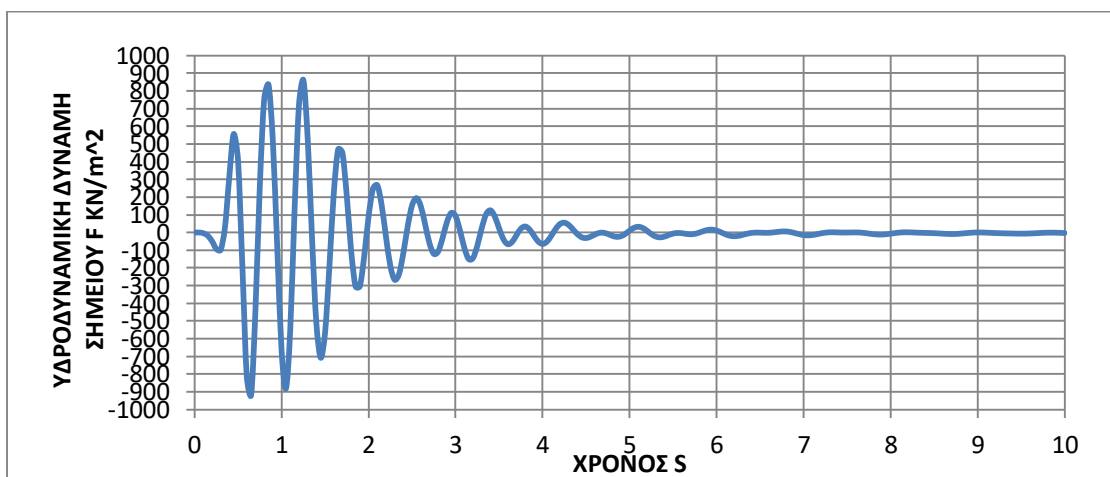
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=45\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=32\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h*y)^{0,5}*w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις για σεισμική δόνηση.



Εικόνα 11 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέση στάθμη νερού)

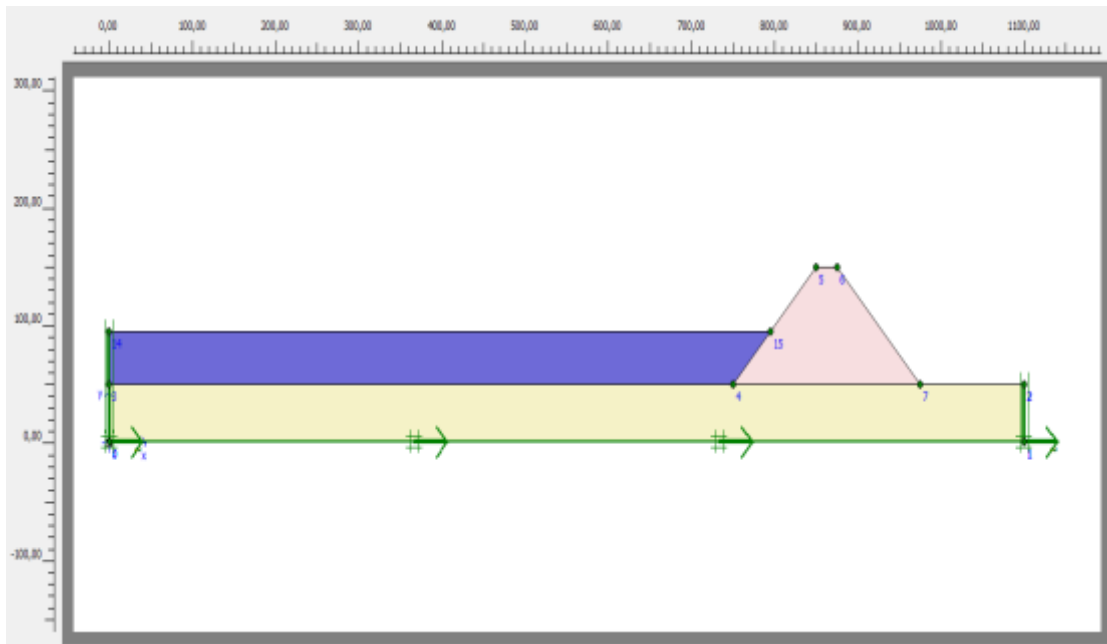


Εικόνα 12 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 22A (μέση στάθμη νερού)

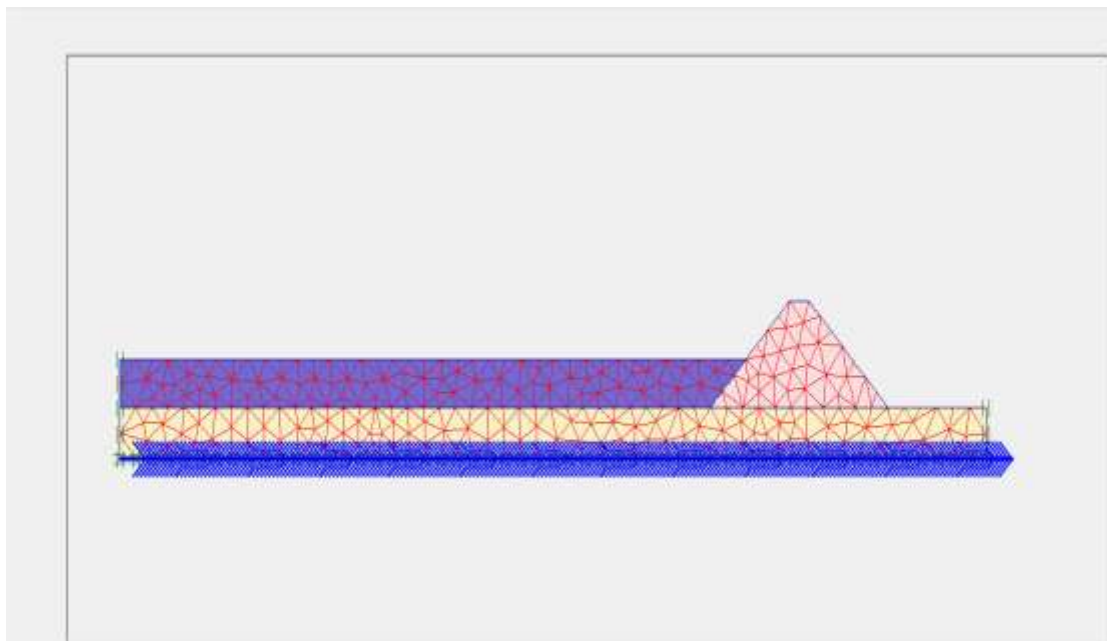


Εικόνα 13 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέση στάθμη νερού)

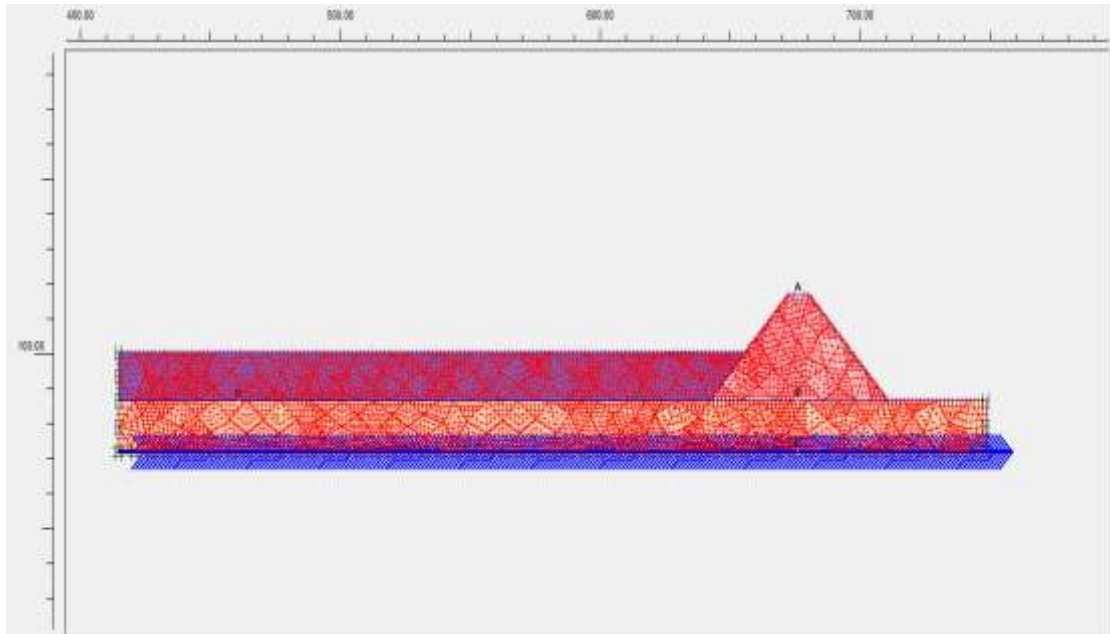
Σενάριο 3: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.160 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 3)

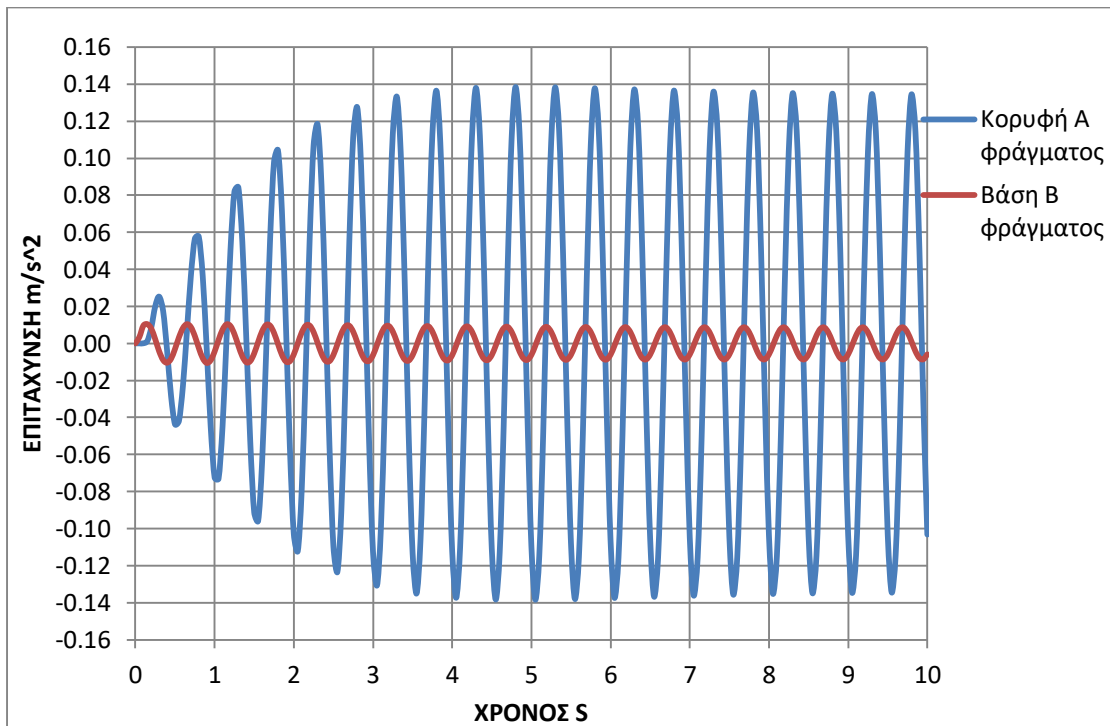


Εικόνα 5.161 Δίκτυο προσομοιώματος (σενάριο 3)

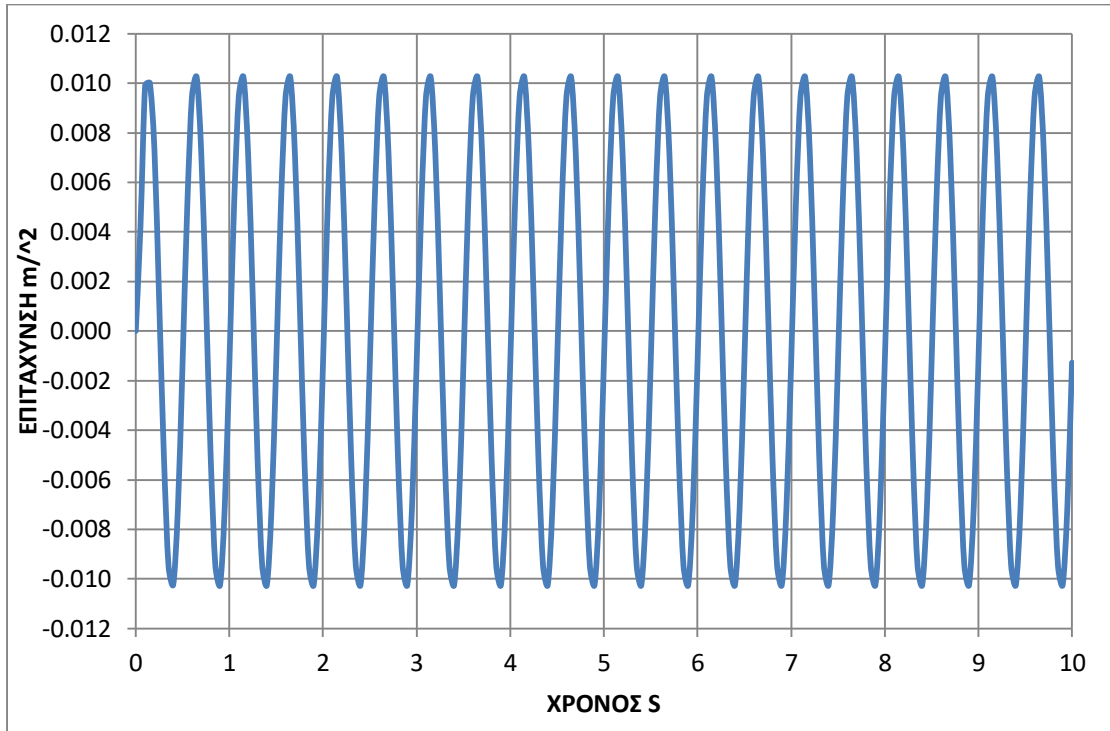


Εικόνα 5.162 Επιλογή σημείων στο πρότυπο για τον υπολογισμό των επιταχύνσεών τους (σενάριο 3)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

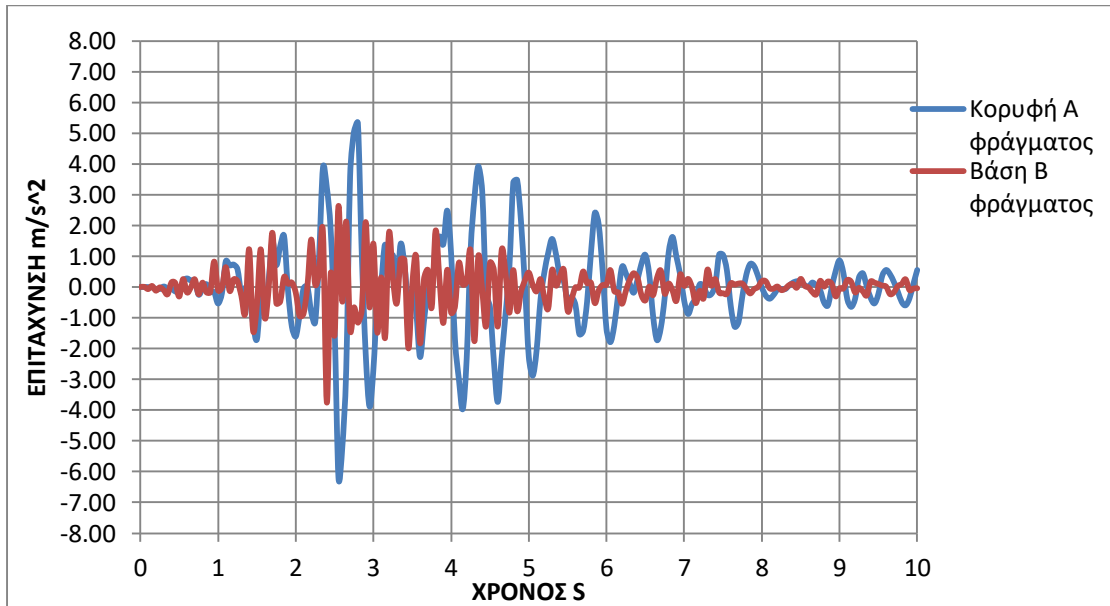


Εικόνα 5.163 Αποτελέσματα χρονιοιστηρίων σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

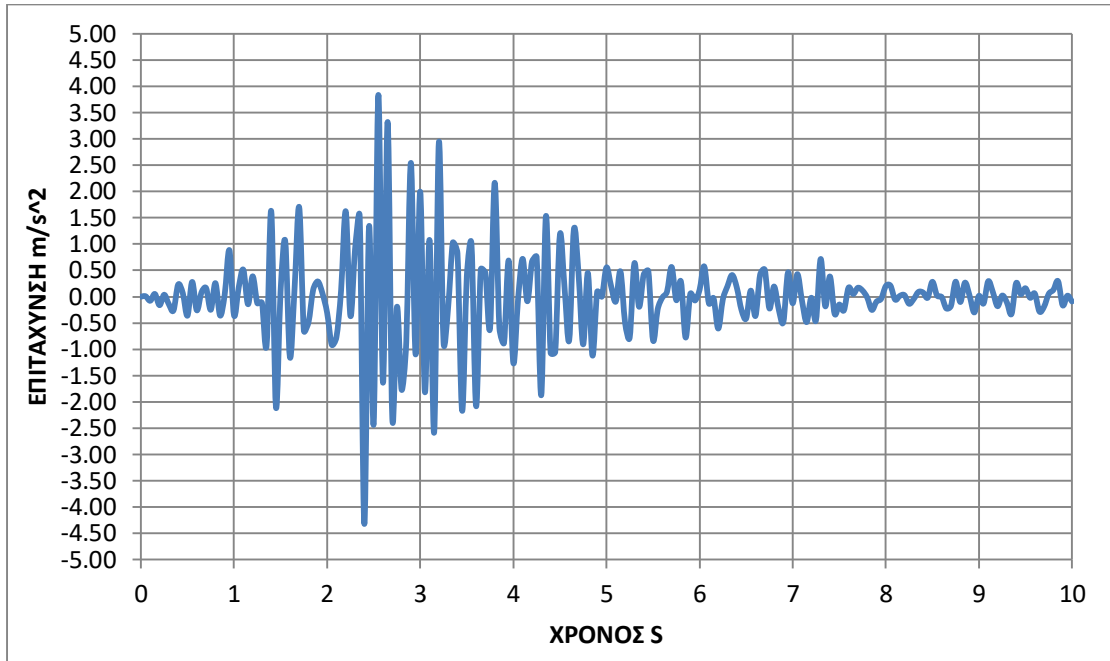


Εικόνα 5.164 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225a)

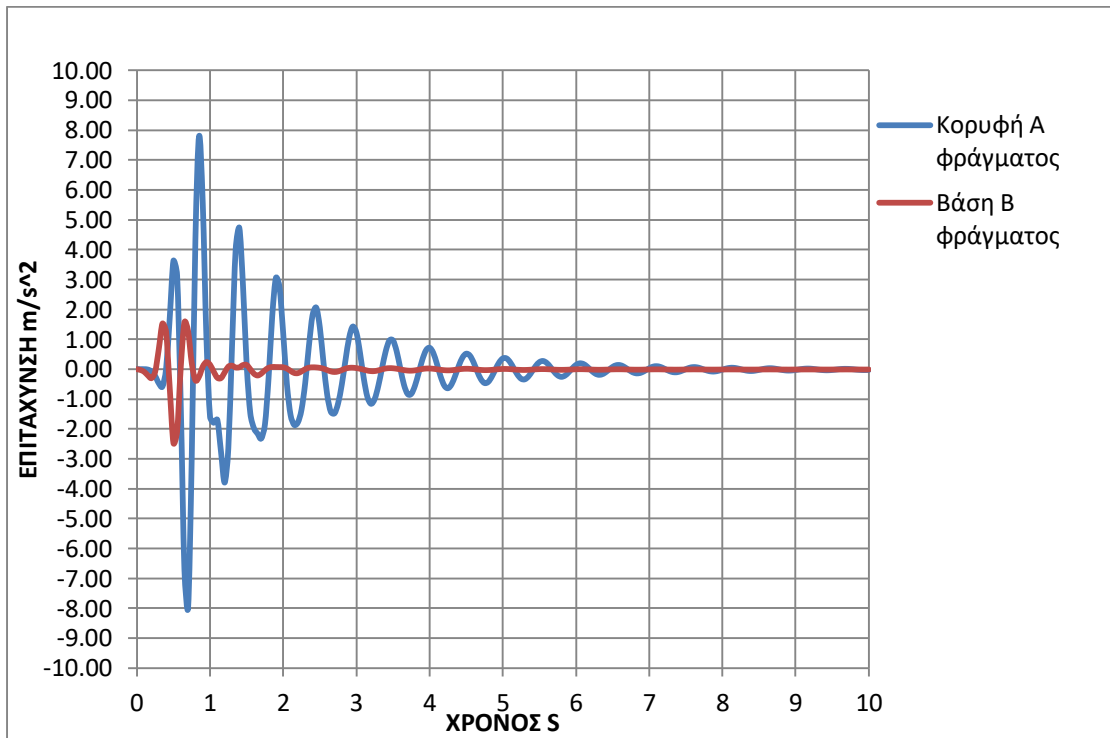


Εικόνα 5.165 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

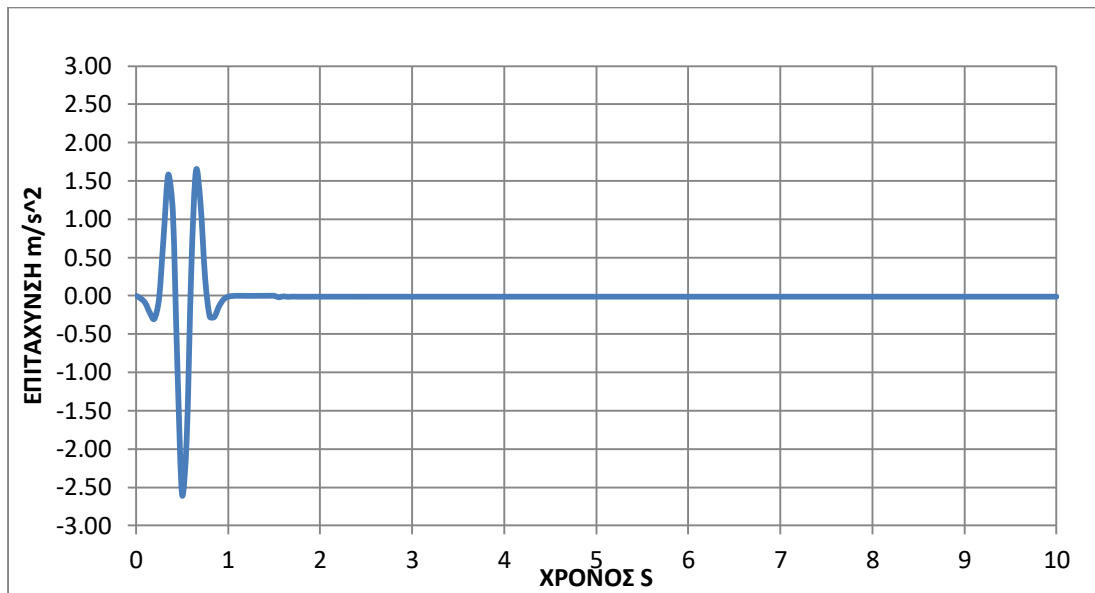


Εικόνα 5.166 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

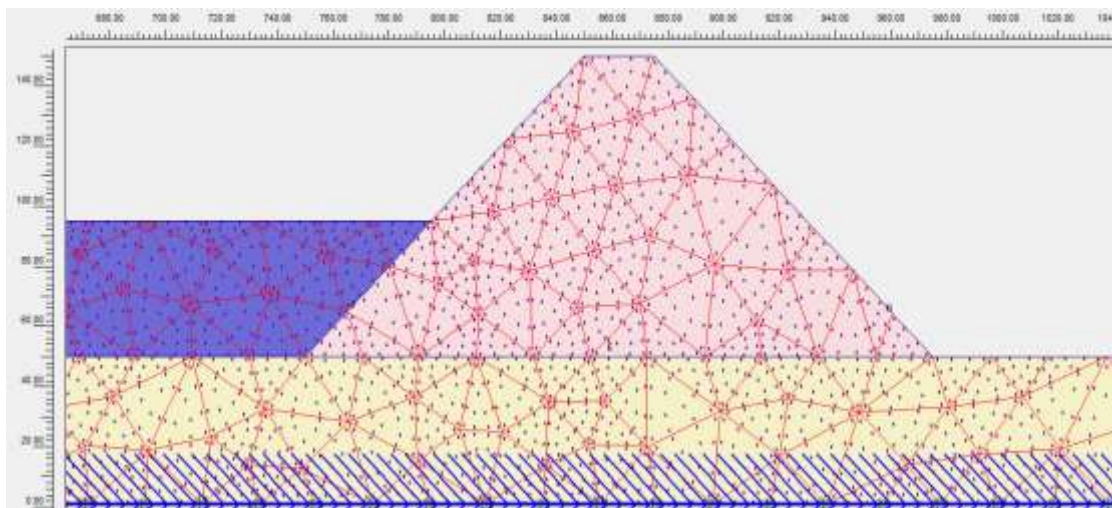


Εικόνα 5.167 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



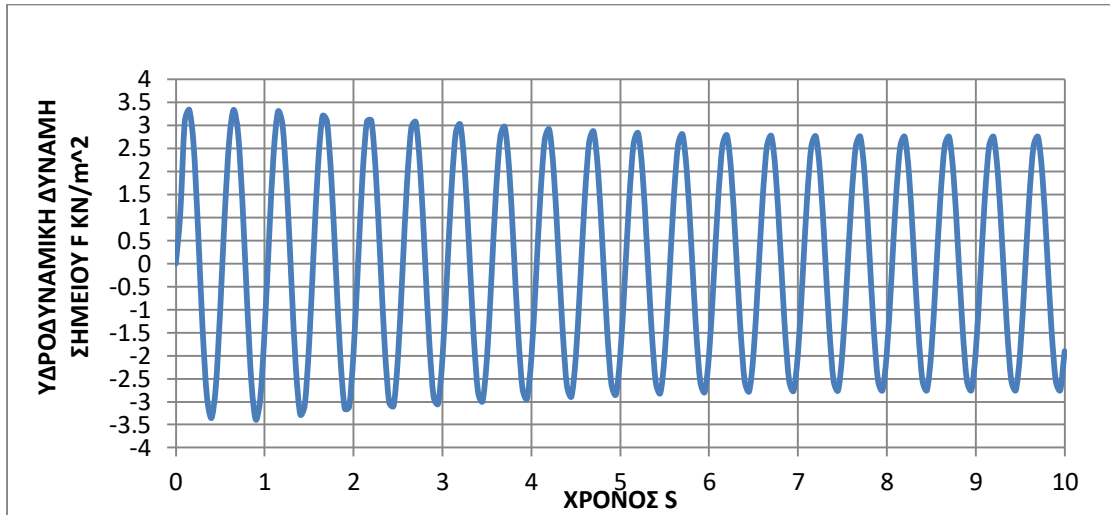
Εικόνα 5.168 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας κορυφής κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

Υδροδυναμικές ωθήσεις

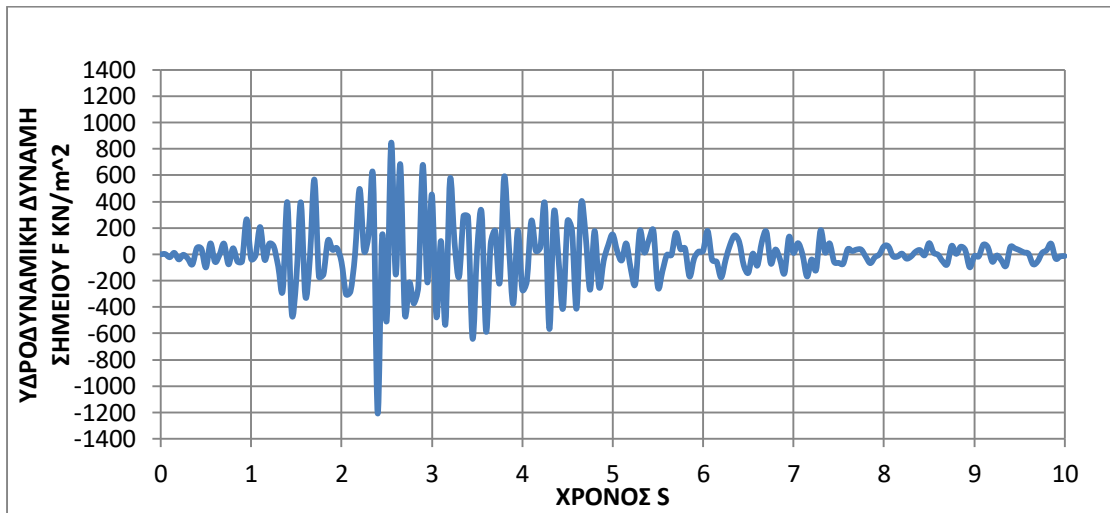


Εικόνα 5.169 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

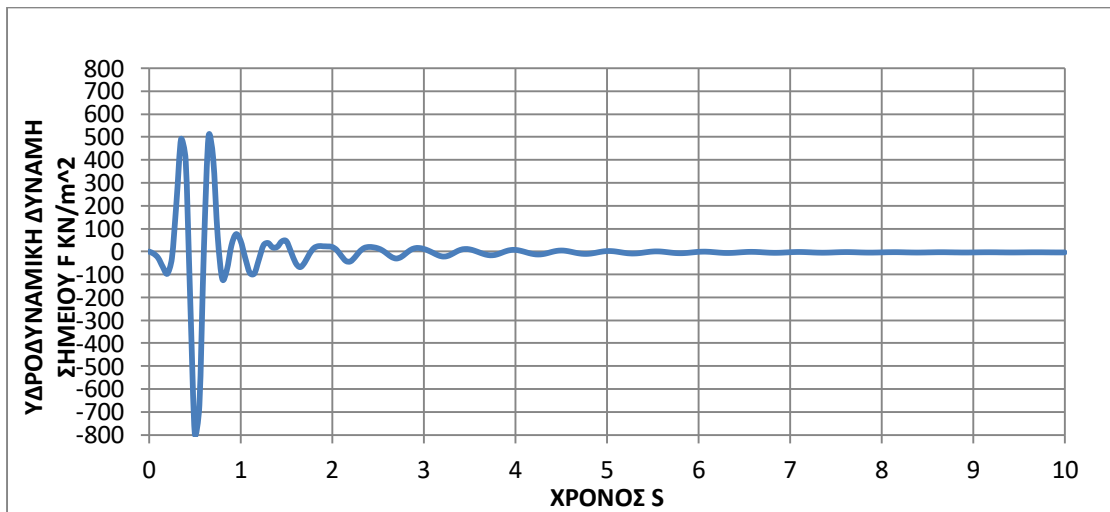
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=45\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=30\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h*y)^{0,5}*w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις.



Εικόνα 5.170 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέση στάθμη νερού)

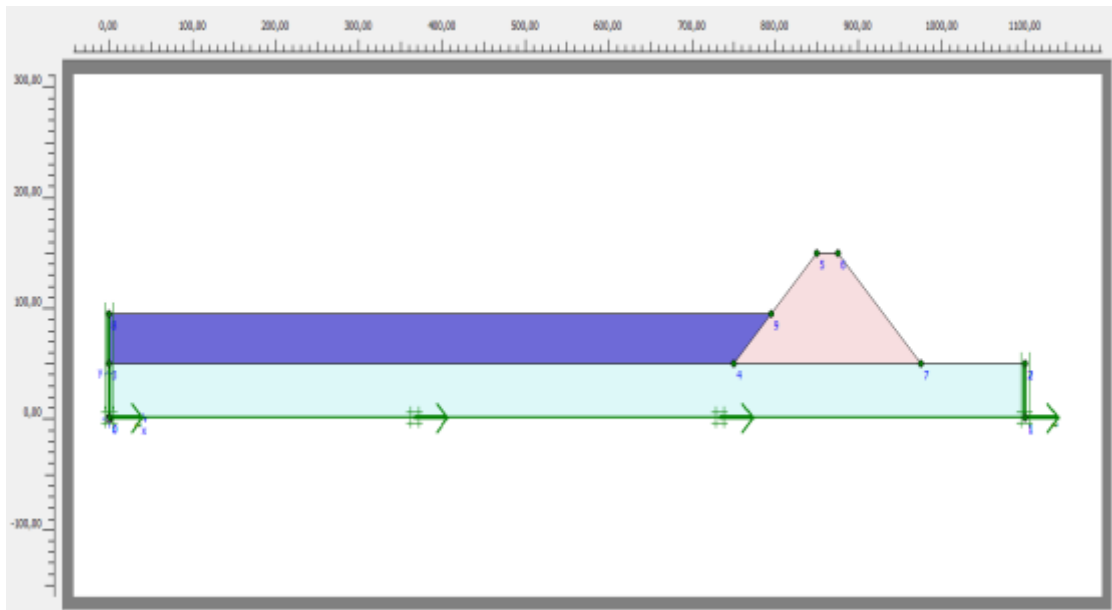


Εικόνα 5.171 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225A (μέση στάθμη νερού)

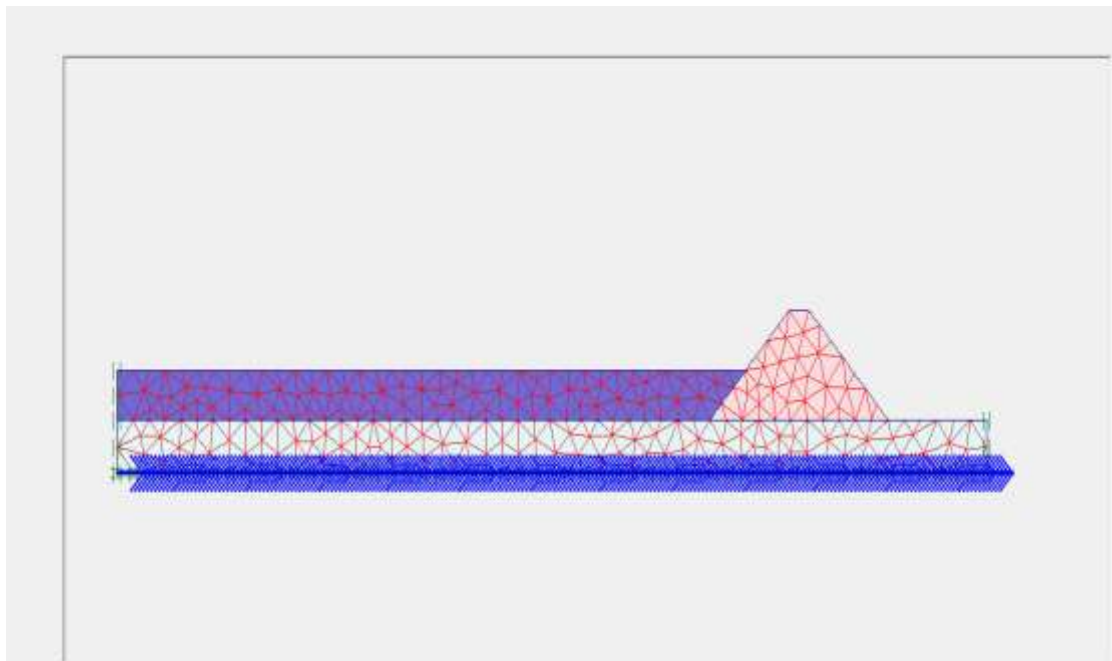


Εικόνα 5.172 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέση στάθμη νερού)

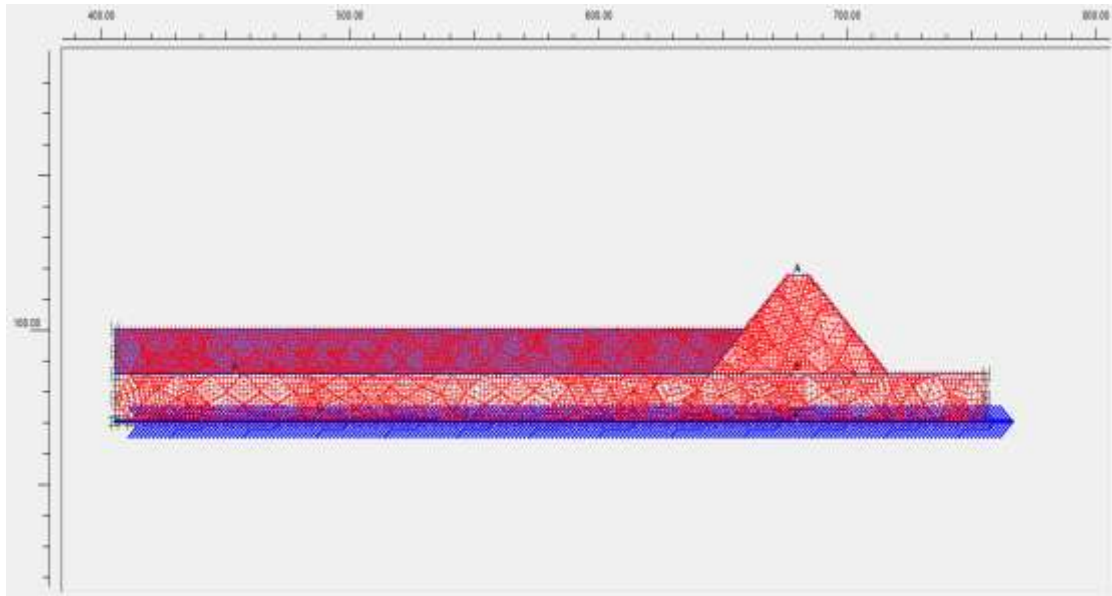
Σενάριο 4: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



Εικόνα 5.172 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 4)

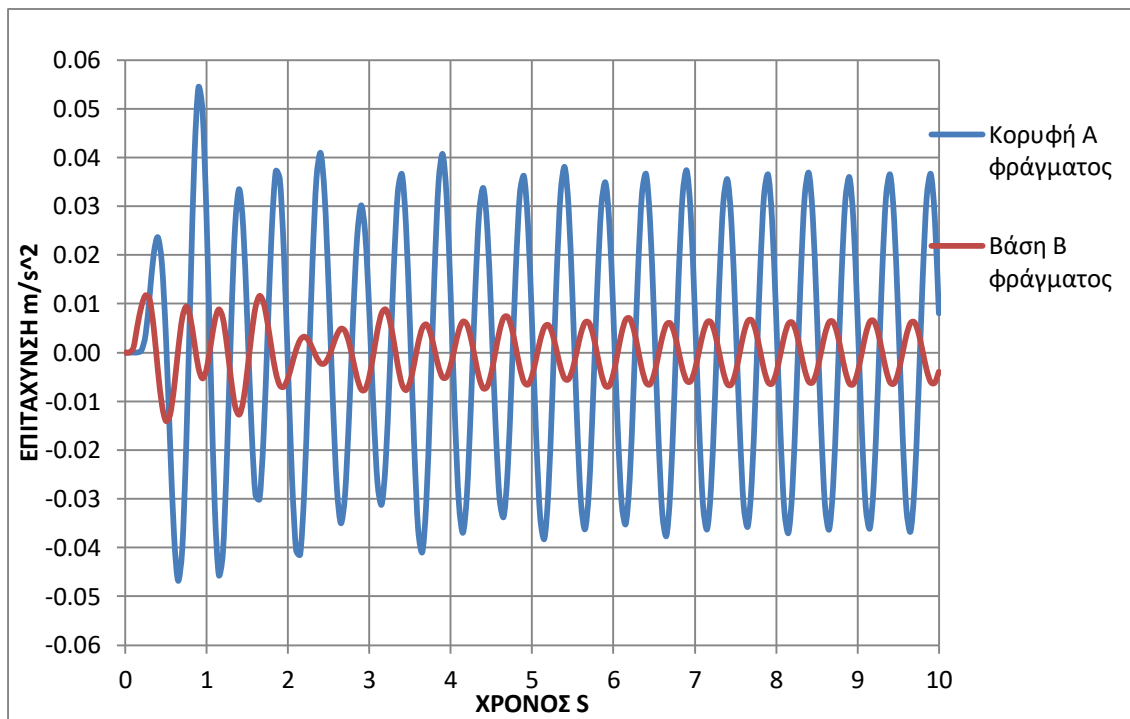


Εικόνα 5.173 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 4)

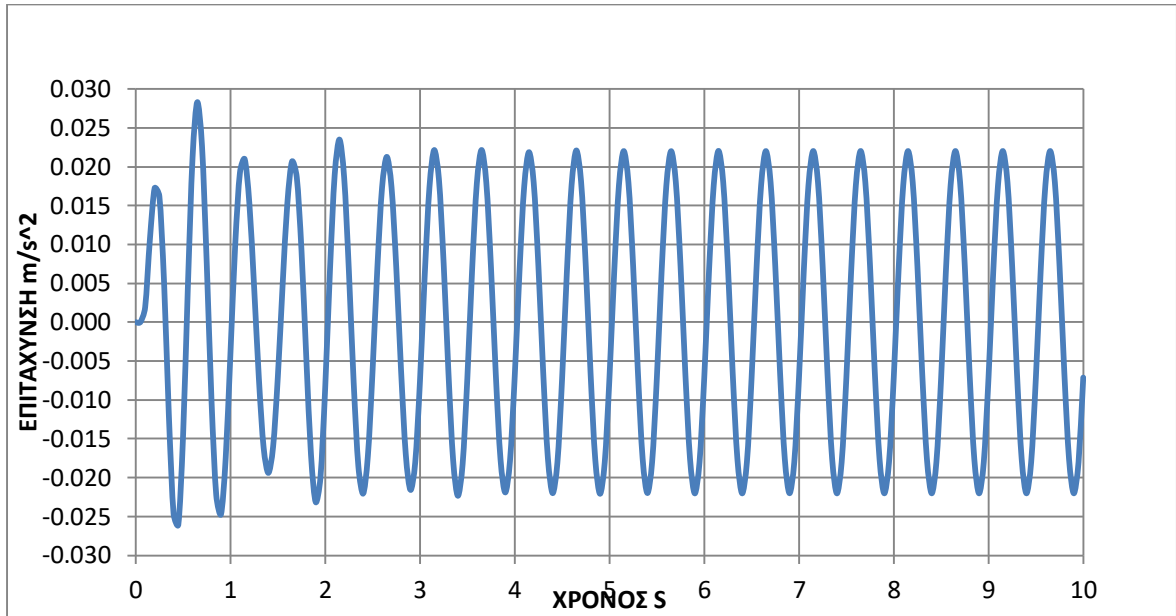


Εικόνα 5.174 Επιλογή σημείων προτύπου για τον υπολογισμό των επιταχύνσεών τους (σενάριο 4)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

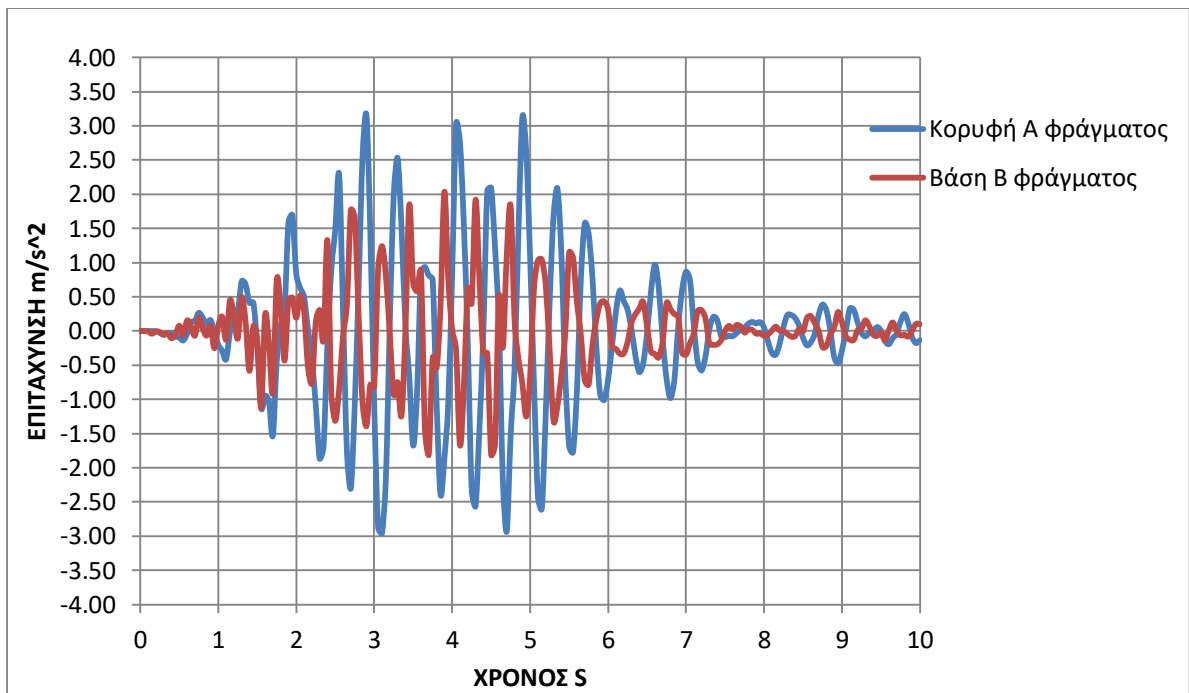


Εικόνα 5.175 Αποτελέσματα χρονιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

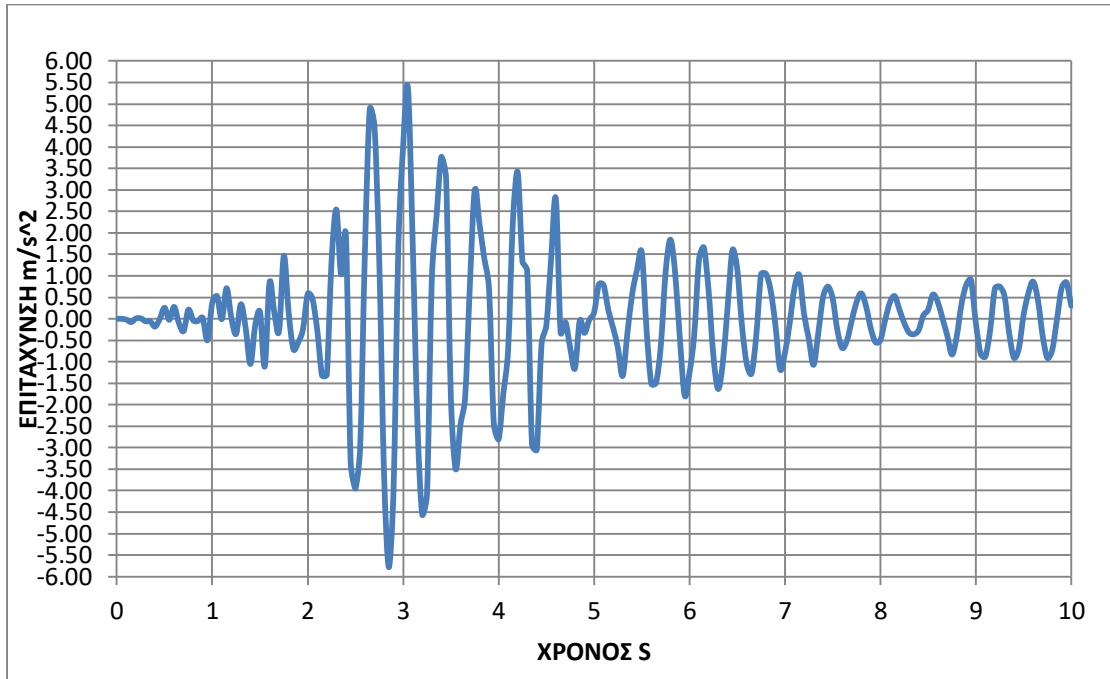


Εικόνα 5.176 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225a)

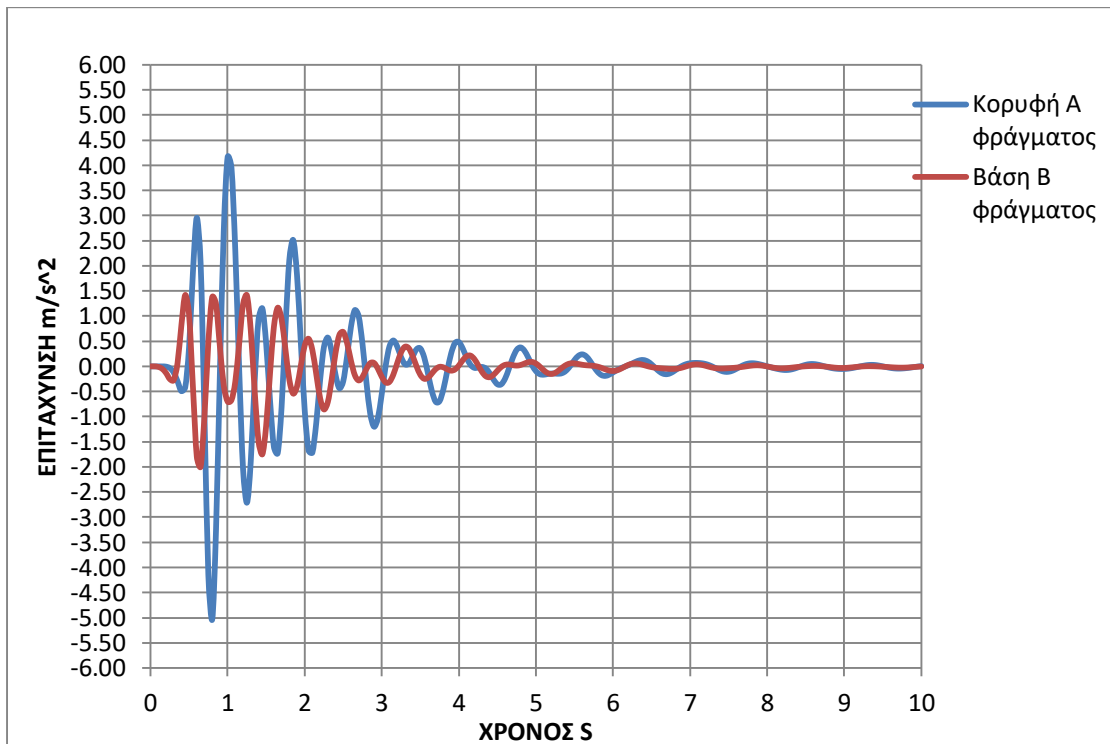


Εικόνα 5.177 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλισης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

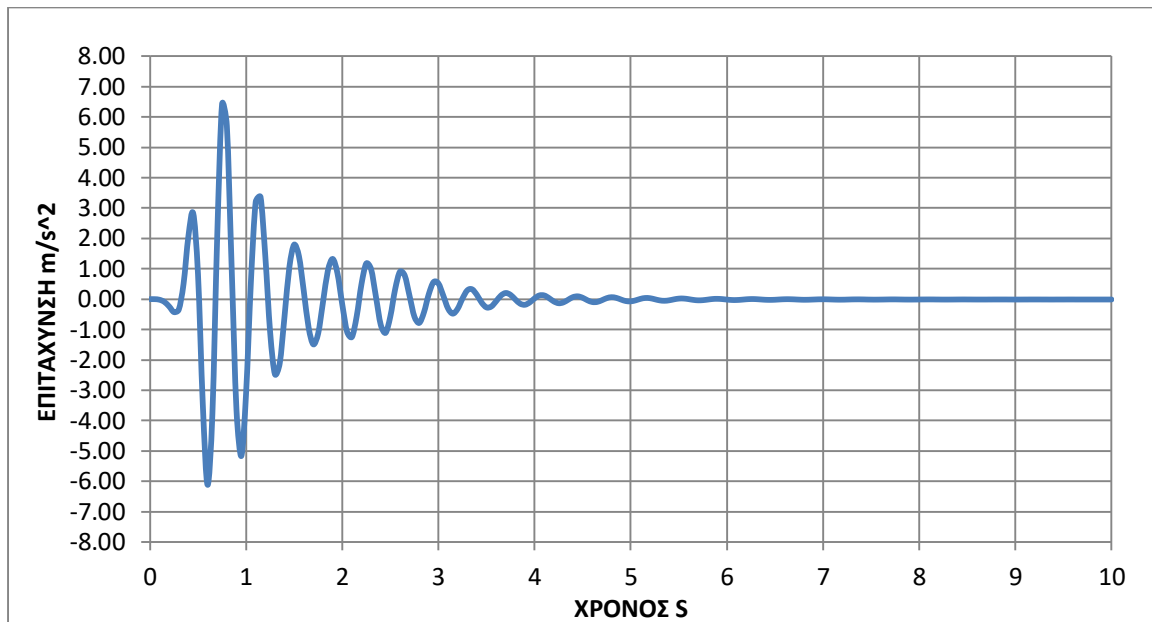


Εικόνα 5.178 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)



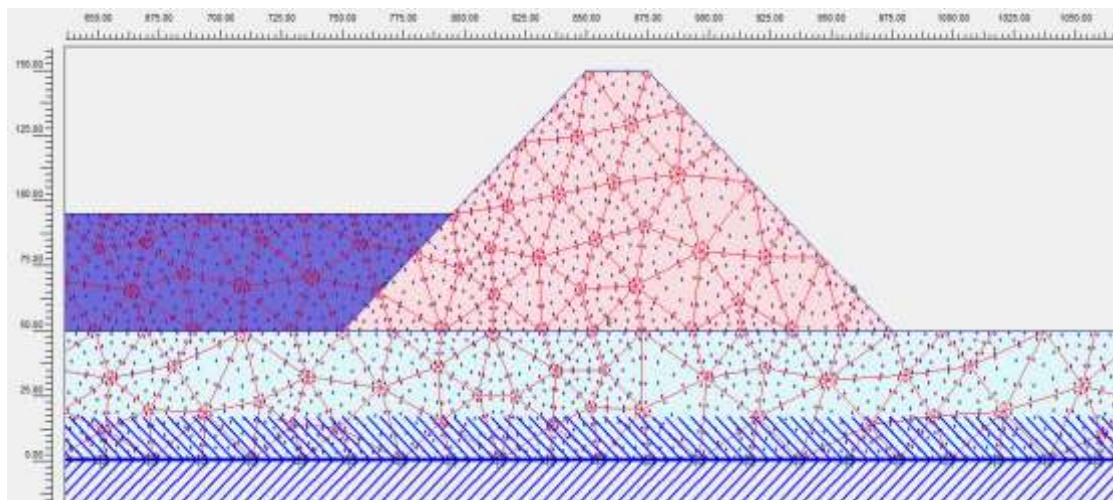
Εικόνα 5.179 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



Εικόνα 5.180 Αποτέλεσμα κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

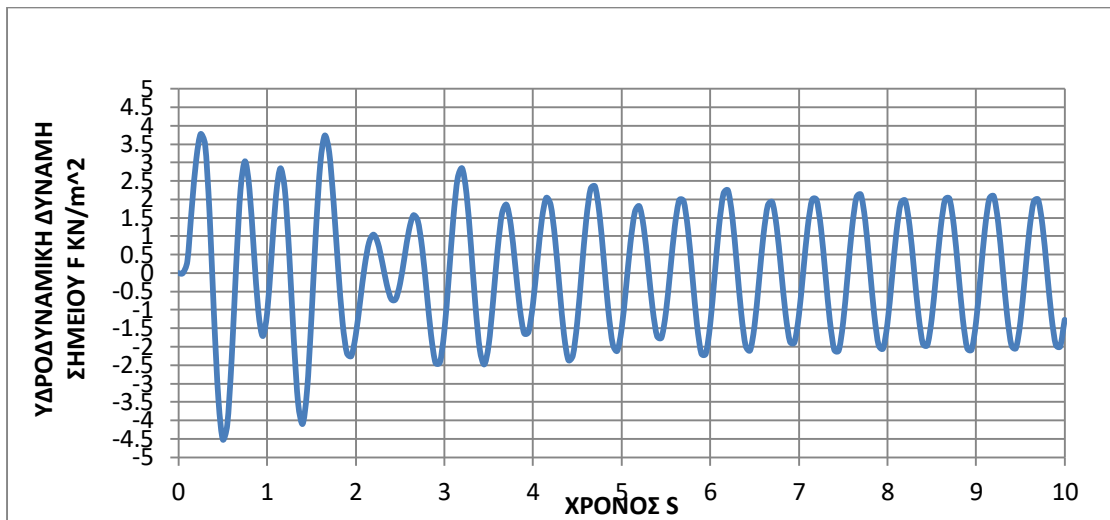
Παρατηρείται πως για την μέση στάθμη του ταμιευτήρα οι τιμές των επιταχύνσεων στα σημεία τα οποία μελετάμε δεν μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου, όπως και η συμπεριφορά του φράγματος. Άρα σε αυτήν την περίπτωση η επίδραση των υδροδυναμικών ωθήσεων δεν μεταβάλλουν την συμπεριφορά του φράγματος σε σχέση με την περίπτωση που ο ταμιευτήρας είναι κενός για τις τρεις παραπάνω σεισμικές δονήσεις.

Υδροδυναμικές ωθήσεις

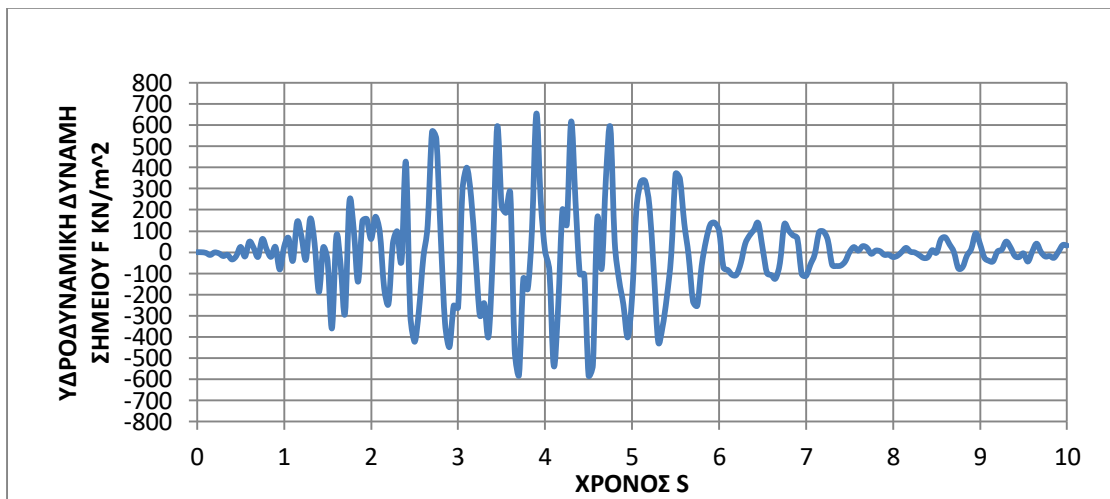


Εικόνα 5.181 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

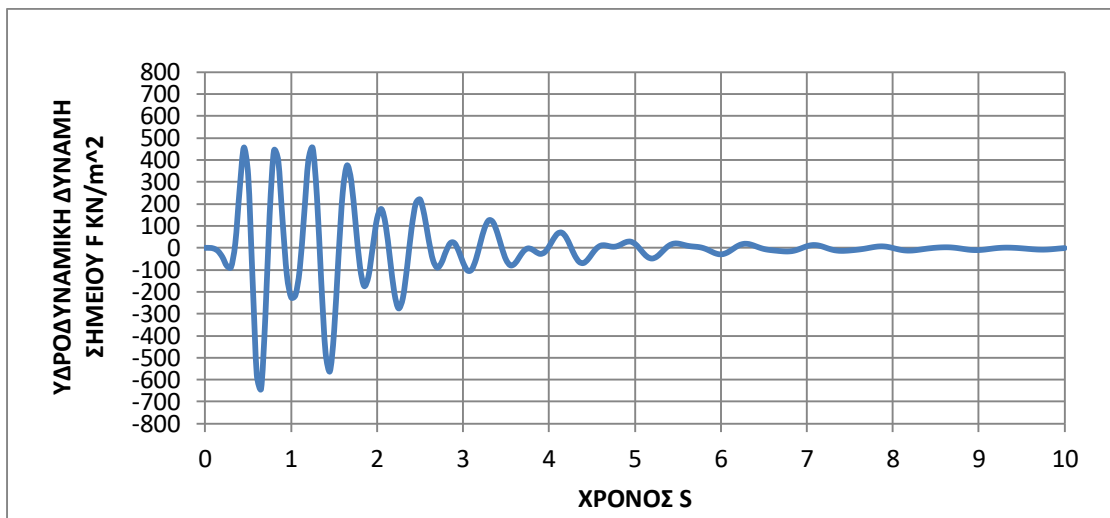
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=45\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=30\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h*y)^{0,5}*w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις.



Εικόνα 5.182 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέση στάθμη νερού)



Εικόνα 5.183 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225A (μέση στάθμη νερού)

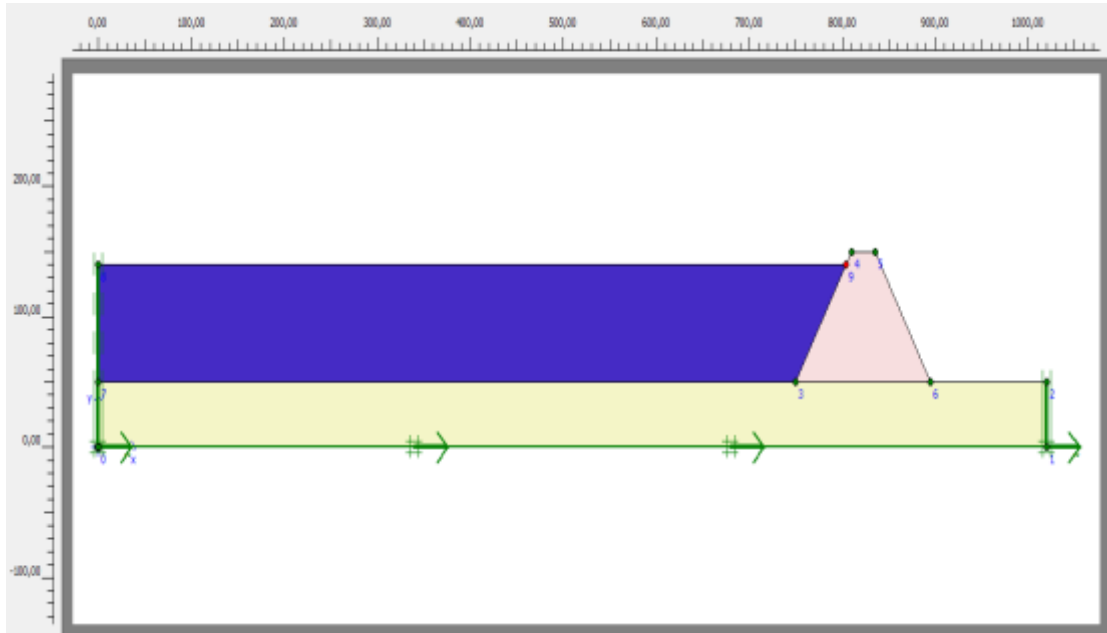


Εικόνα 5.184 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέση στάθμη νερού)

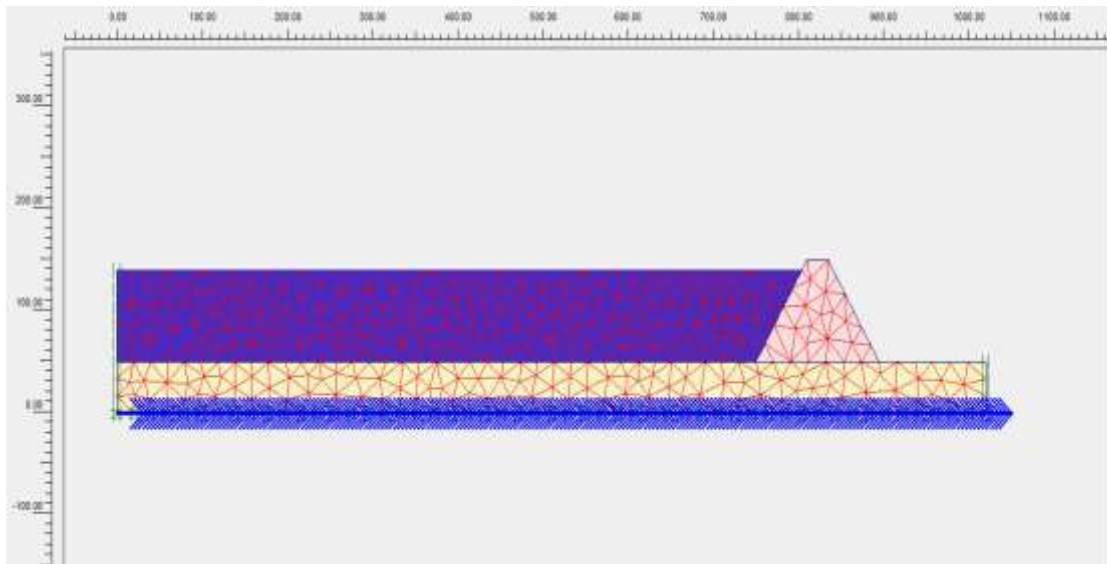
5.5.2 Σεισμική φόρτιση για μέγιστη στάθμη νερού στον ταμιευτήρα

Εδώ λαμβάνονται τα τέσσερα σενάρια τα οποία περιγράφηκαν πιο πάνω. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων είναι τα ίδια με την παραπάνω περίπτωση για μέση στάθμη ταμιευτήρα

Σενάριο 1: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα

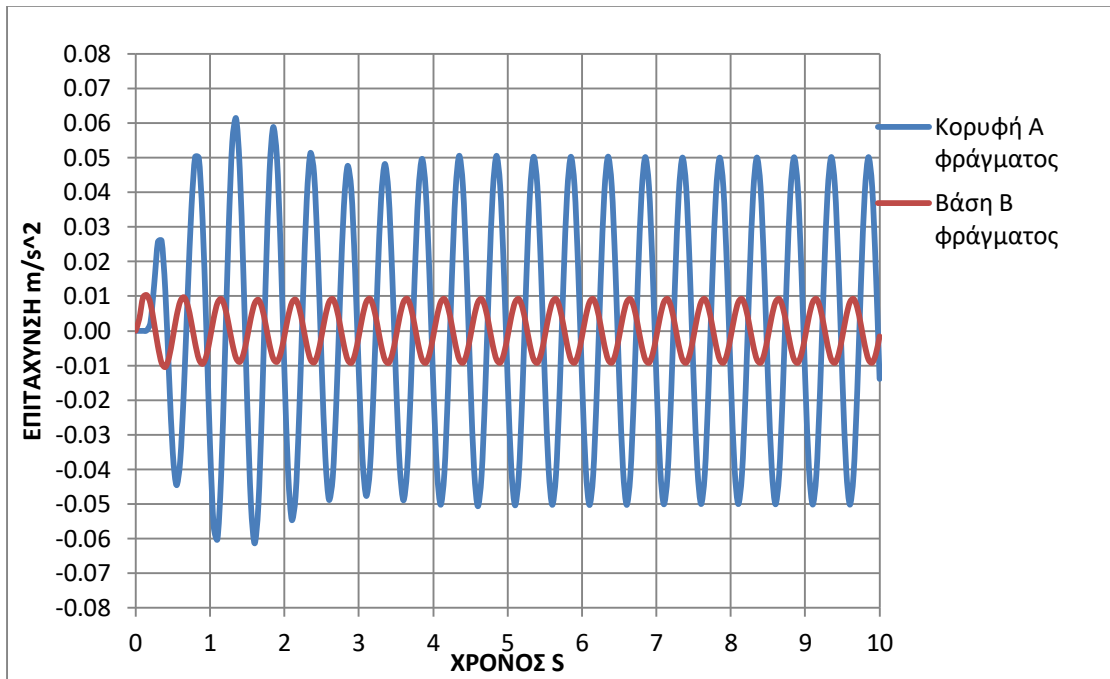


Εικόνα 5.185 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 2)

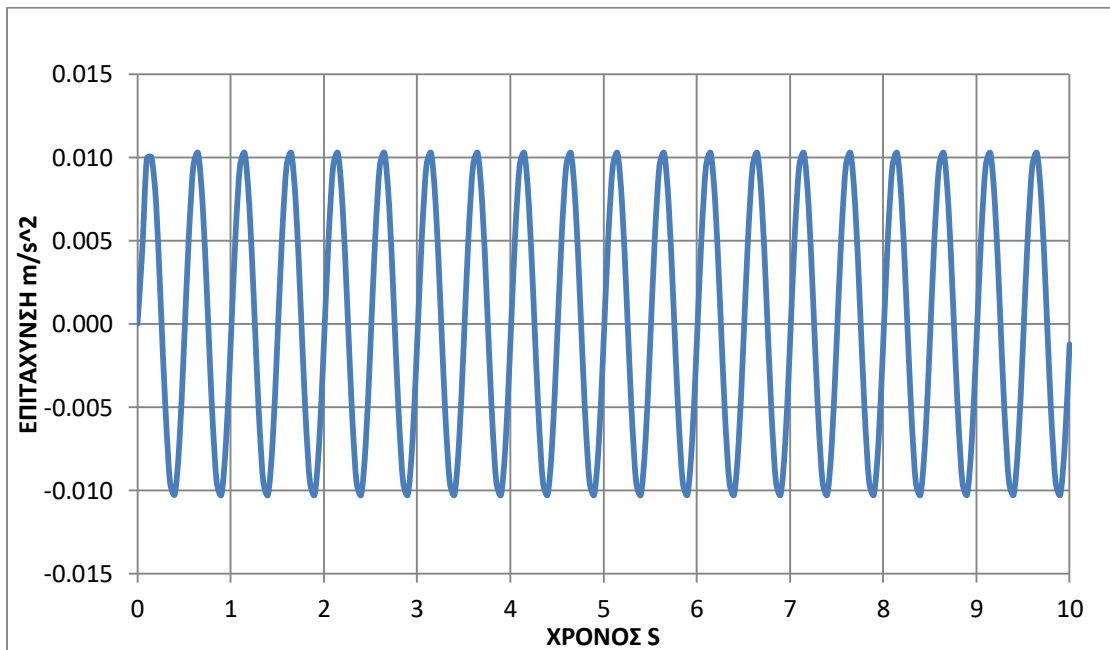


Εικόνα 5.186 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 1)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

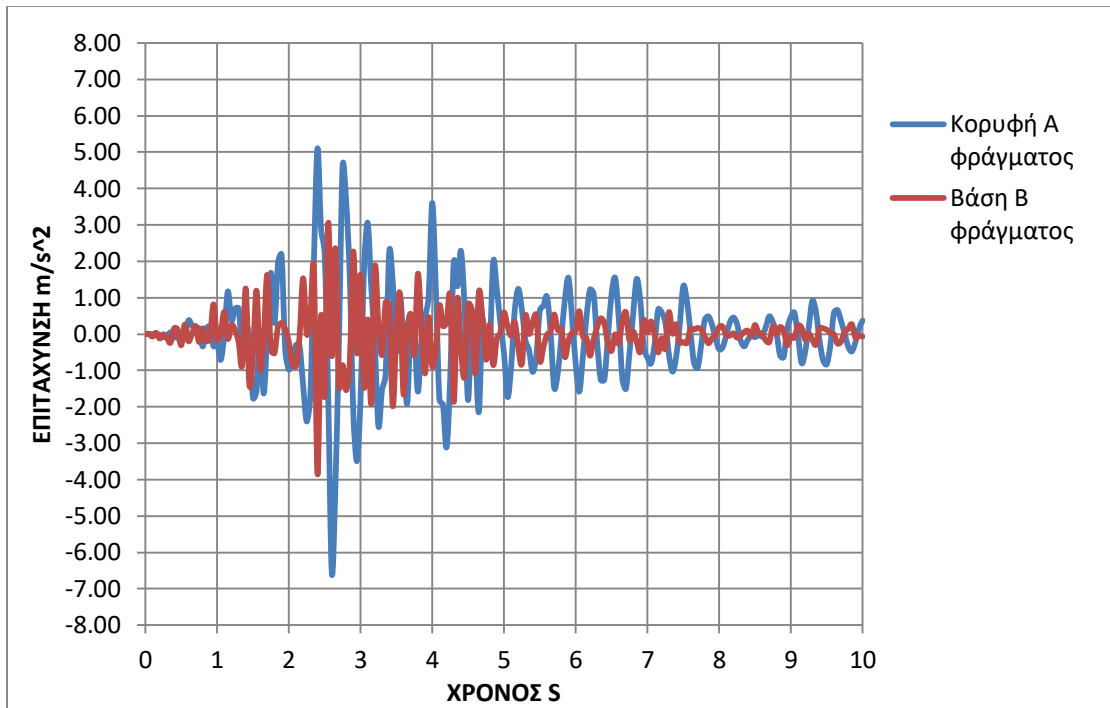


Εικόνα 5.187 Αποτελέσματα χρονιοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

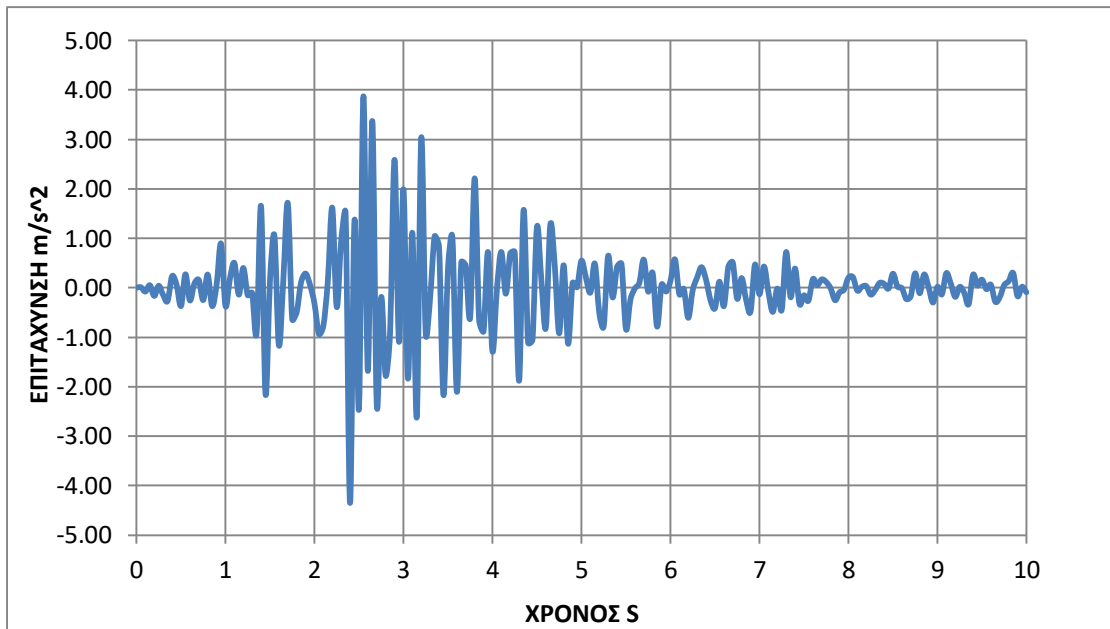


Εικόνα 5.188 Αποτέλεσμα χρονιοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225 a.m.s.)

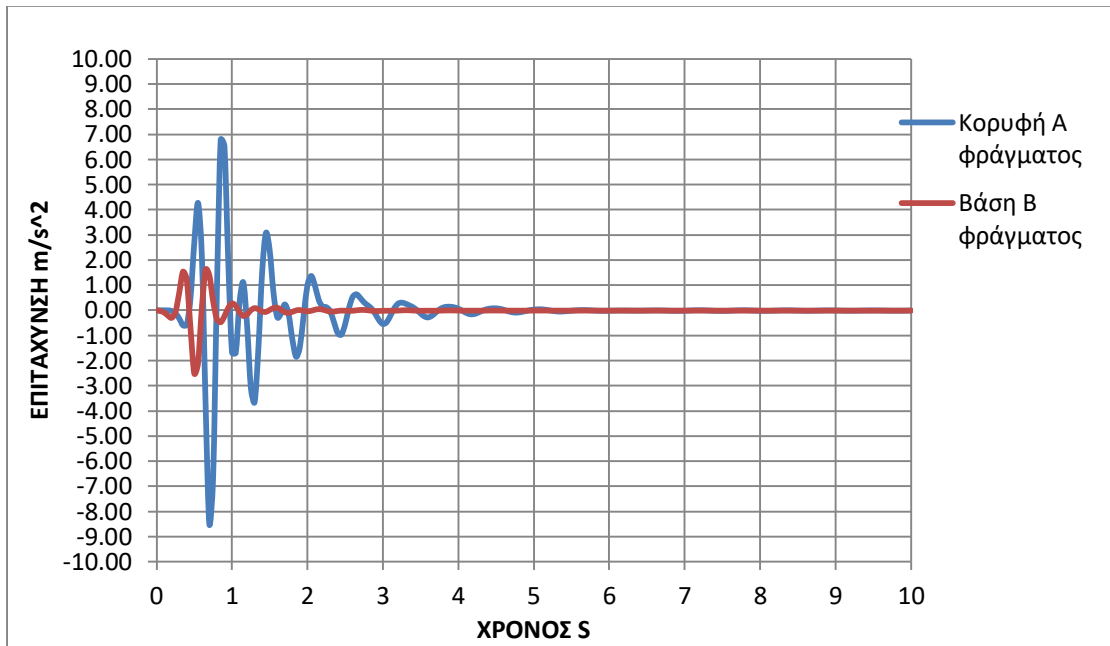


Εικόνα 5.189 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

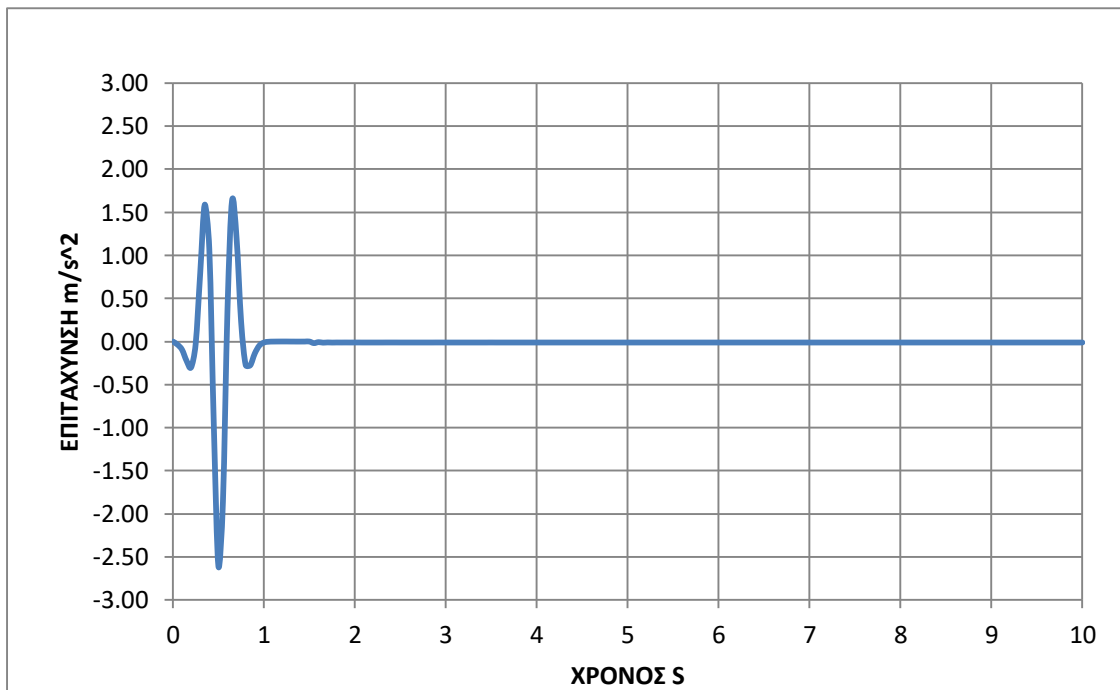


Εικόνα 5.190 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

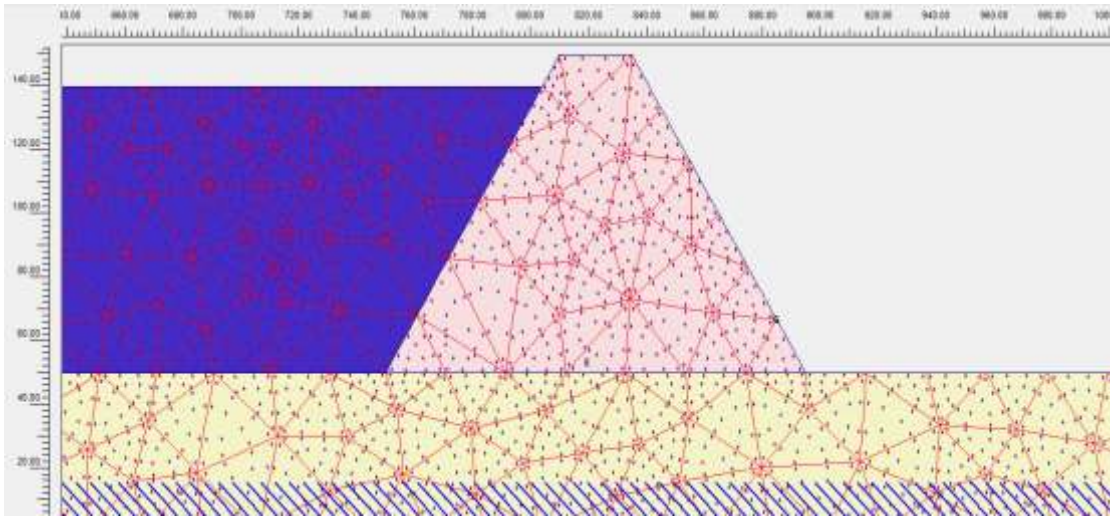


Εικόνα 5.191 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



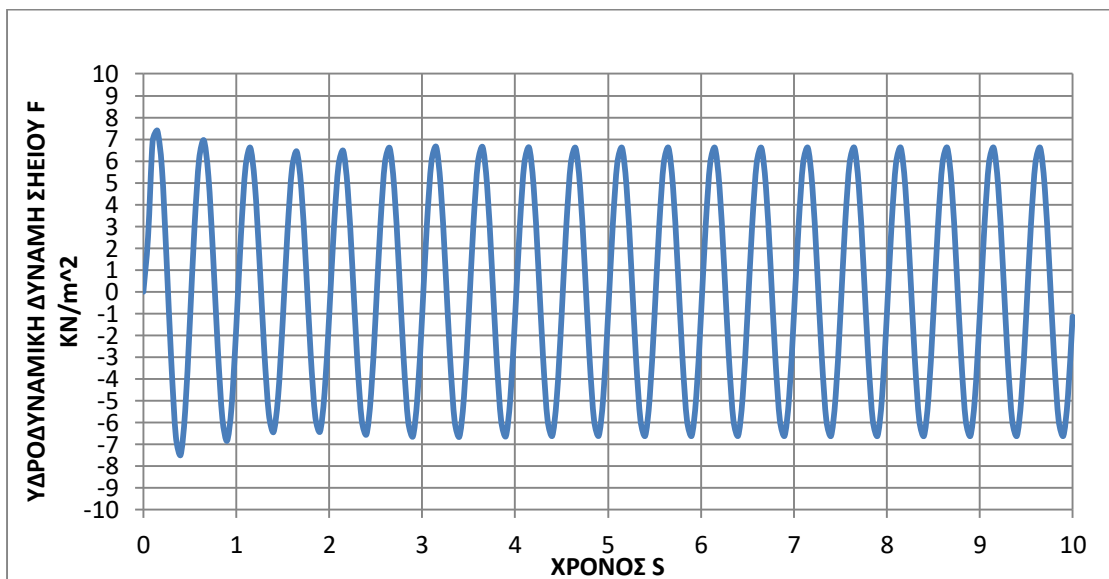
Εικόνα 5.192 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

Υδροδυναμικές ωθήσεις

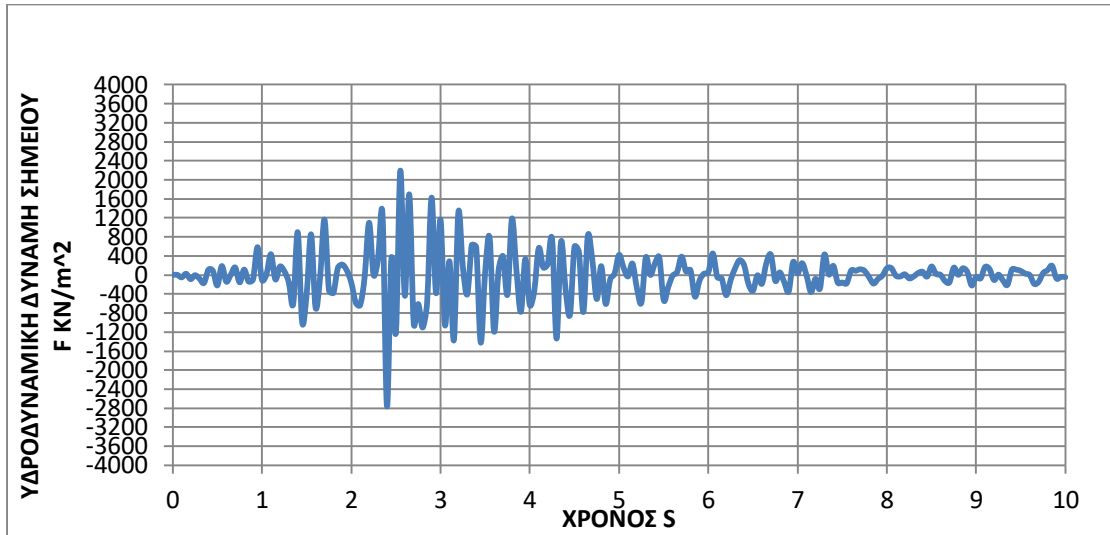


Εικόνα 5.193 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

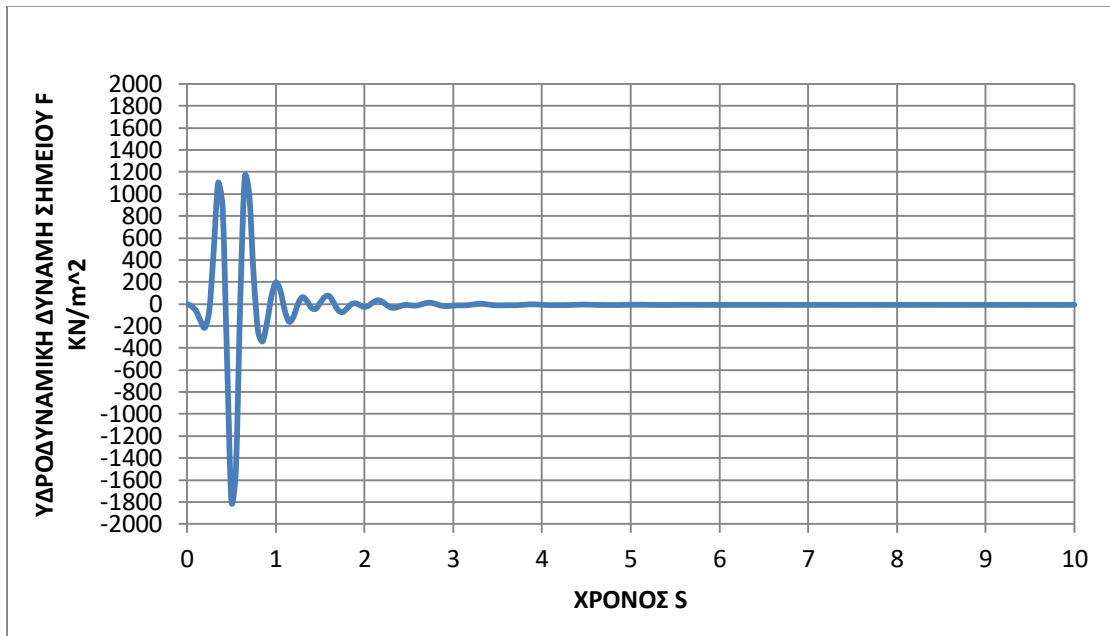
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=90\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=74,5\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h * y)^{0,5} *w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις.



Εικόνα 5.194 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμαγια δόνηση SIN-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

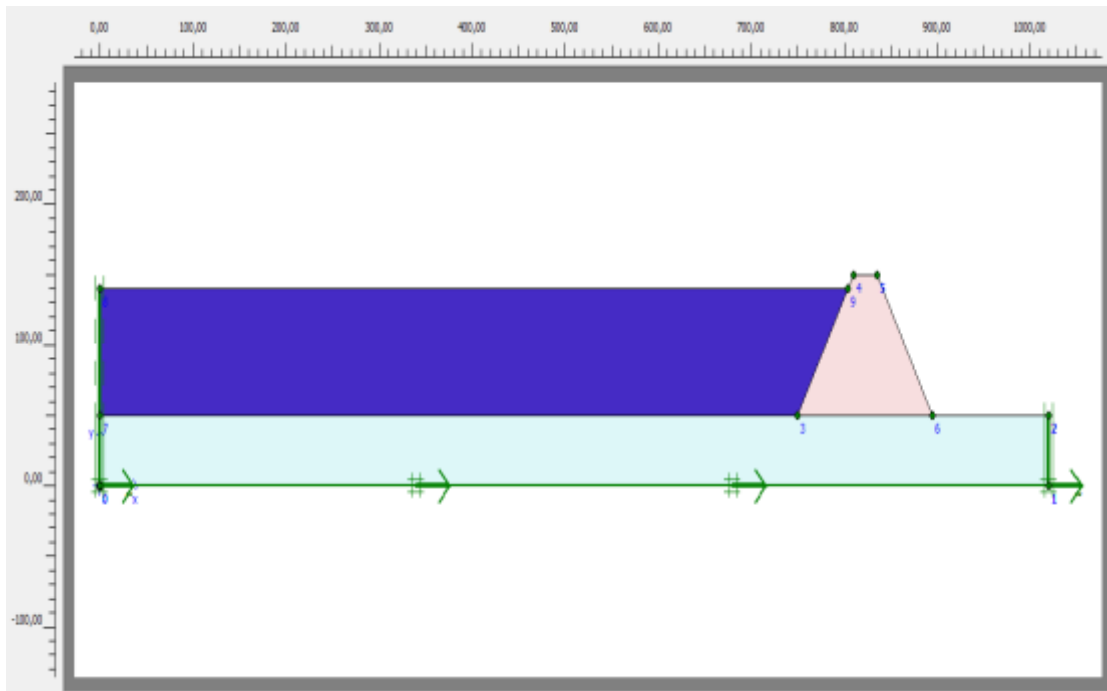


Εικόνα 5.195 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225A (μέγιστη στάθμη νερού)

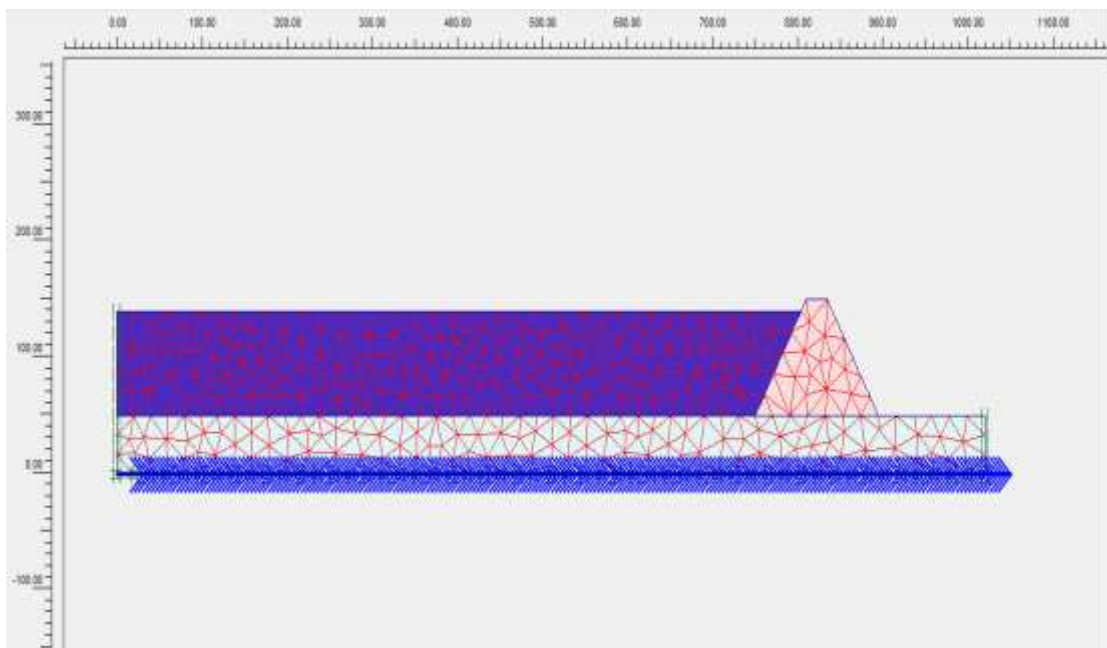


Εικόνα 5.196 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

Σενάριο 2: περίπτωση φράγματος κλίσης πρανών 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα

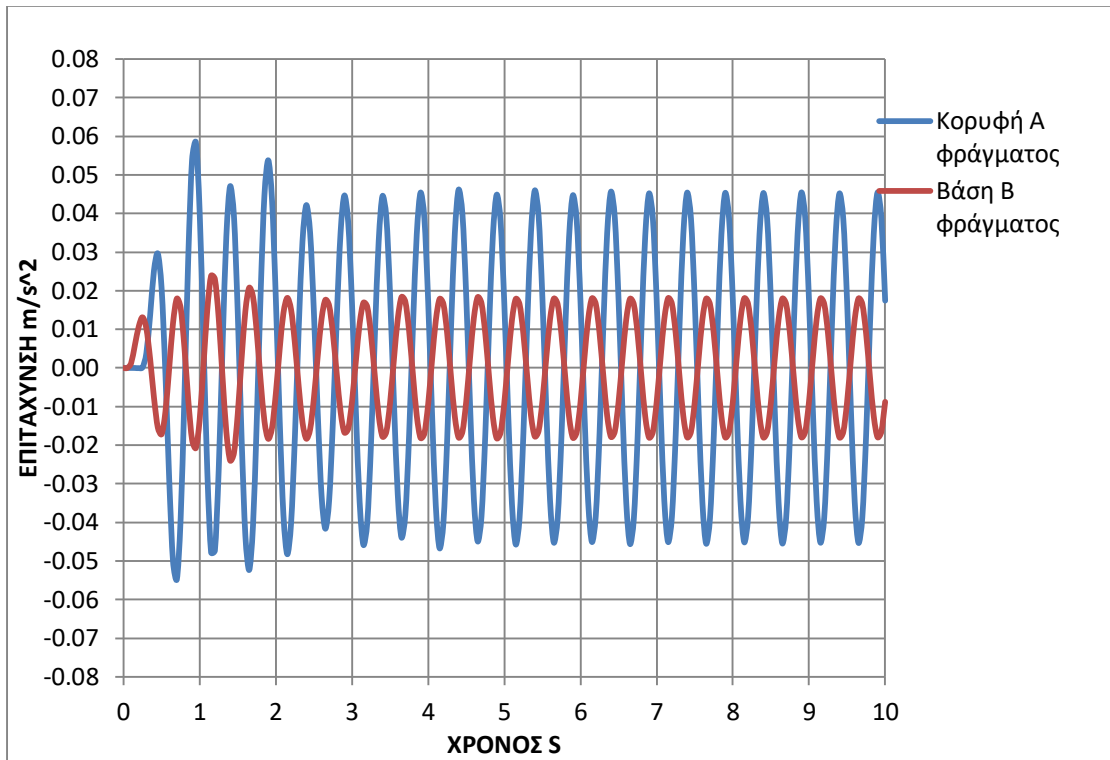


Εικόνα 5.197 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 2)

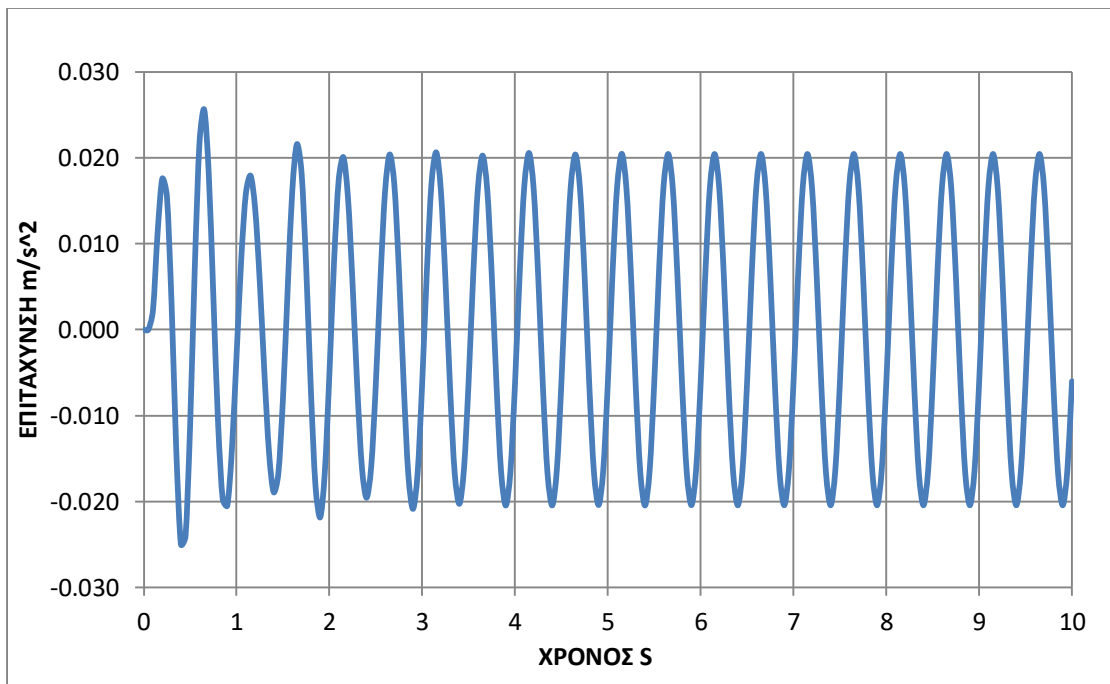


Εικόνα 5.198 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 2)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

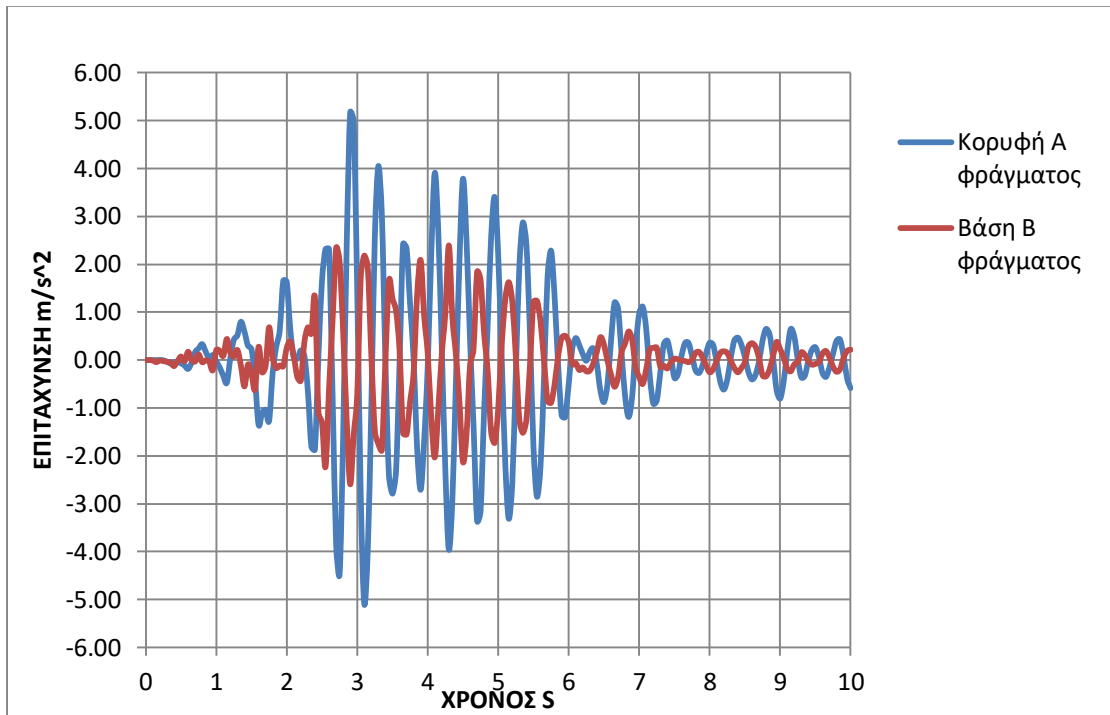


Εικόνα 5.199 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

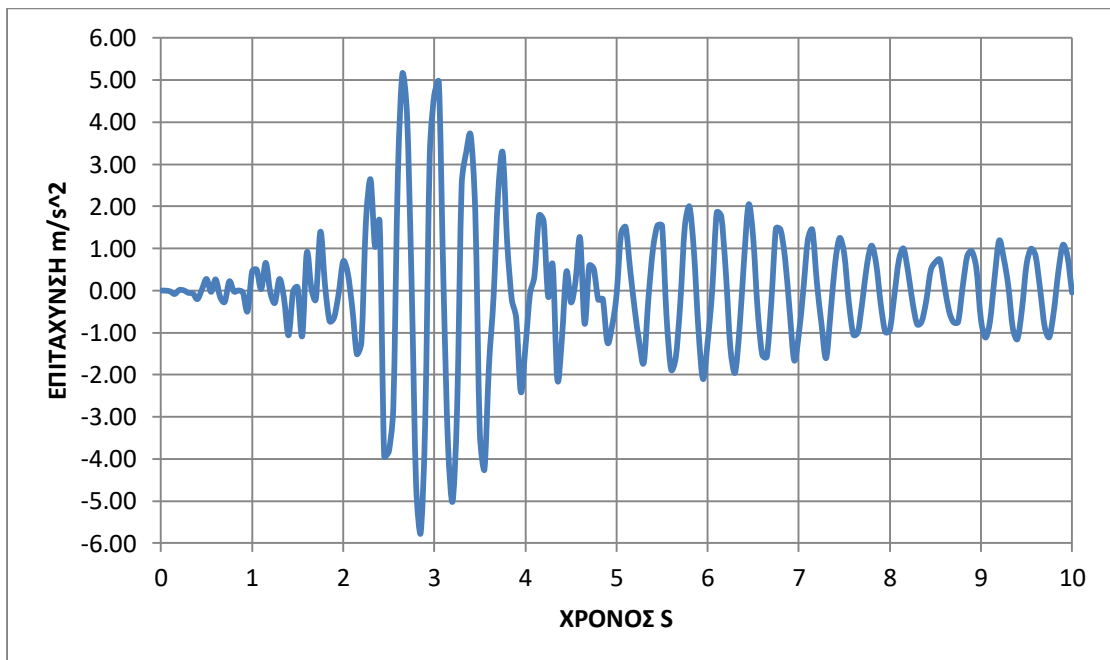


Εικόνα 5.200 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225 a.m.s.)

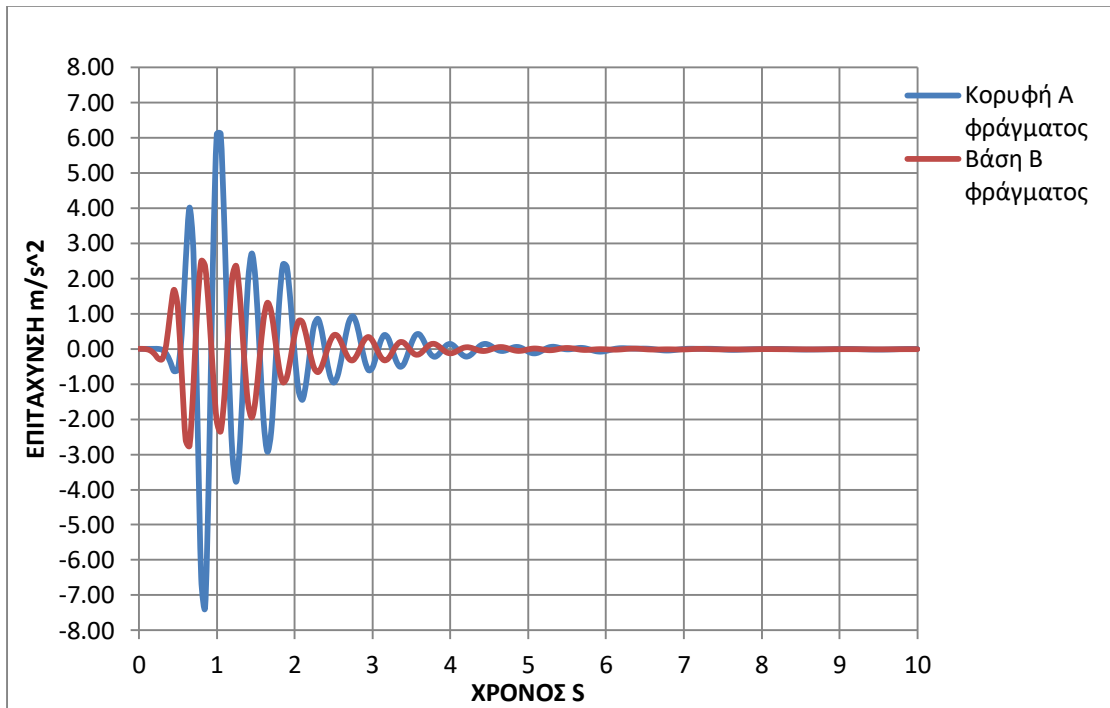


Εικόνα 5.201 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

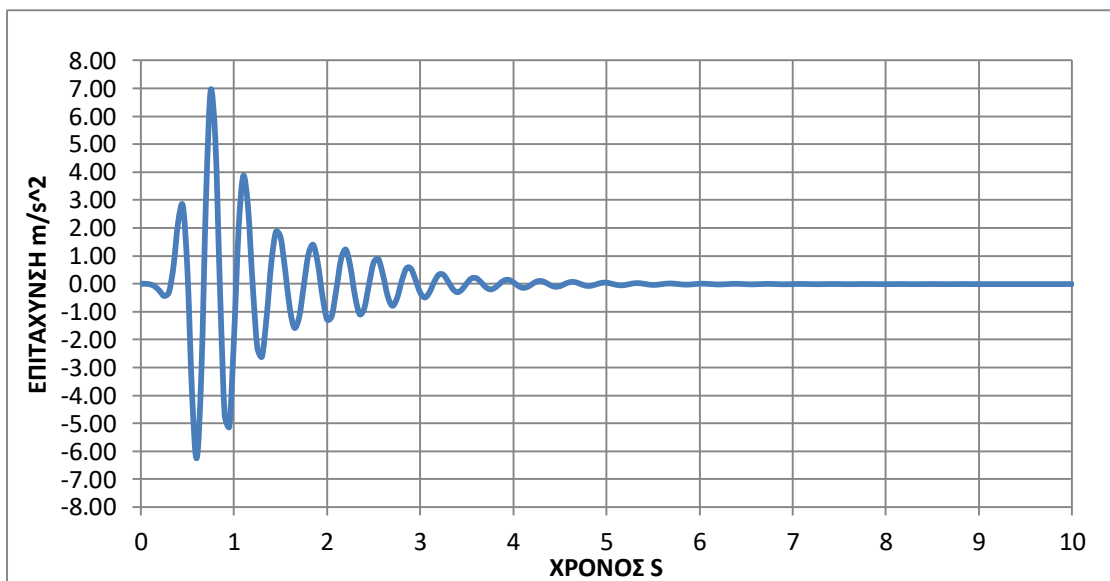


Εικόνα 5.202 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

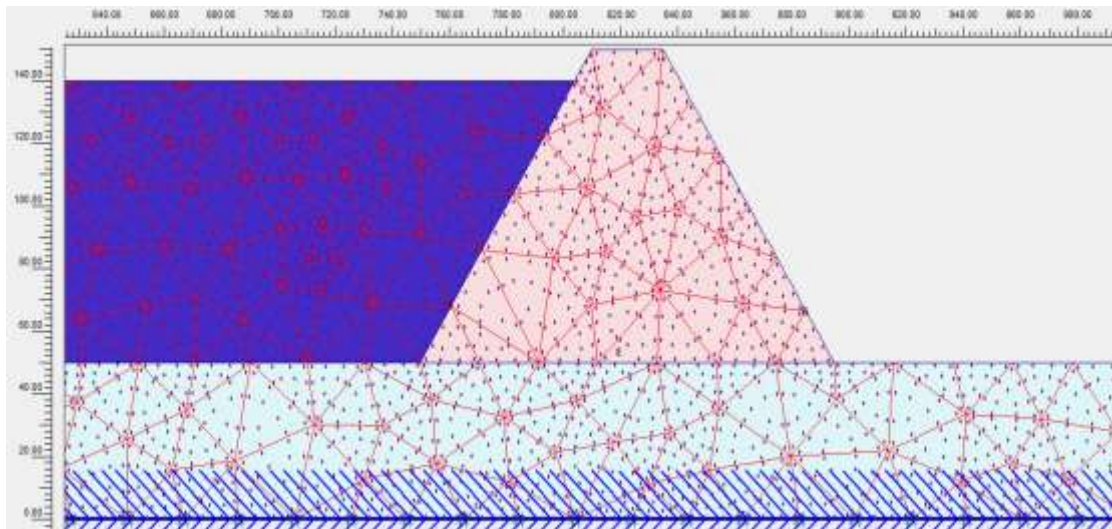


Εικόνα 5.203 Αποτελέσματα χρονιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



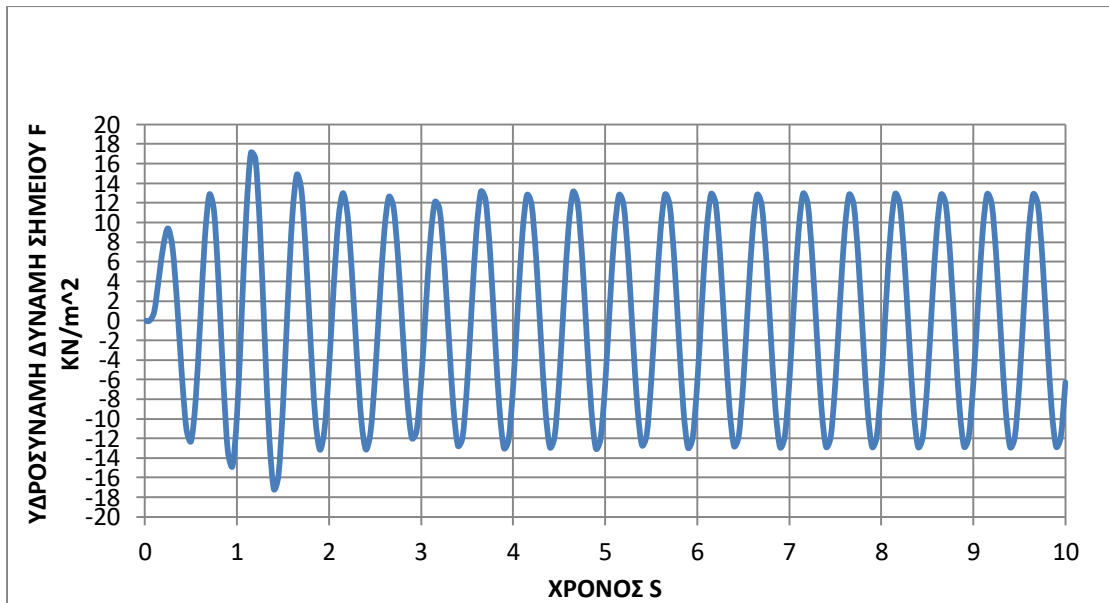
Εικόνα 5.204 Αποτέλεσμα χρονιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

Υδροδυναμικές ωθήσεις

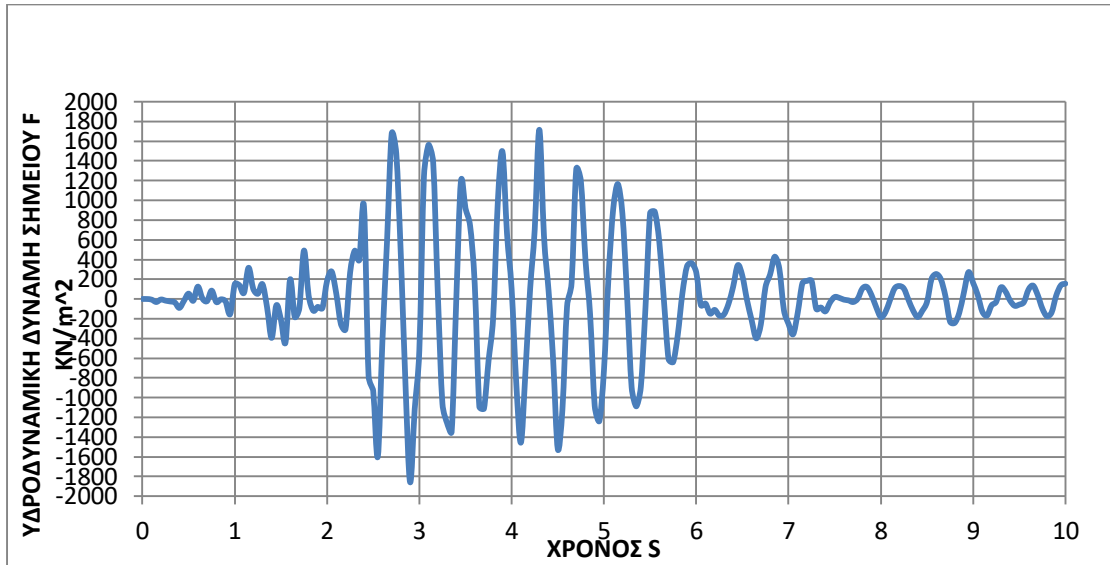


Εικόνα 5.205 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

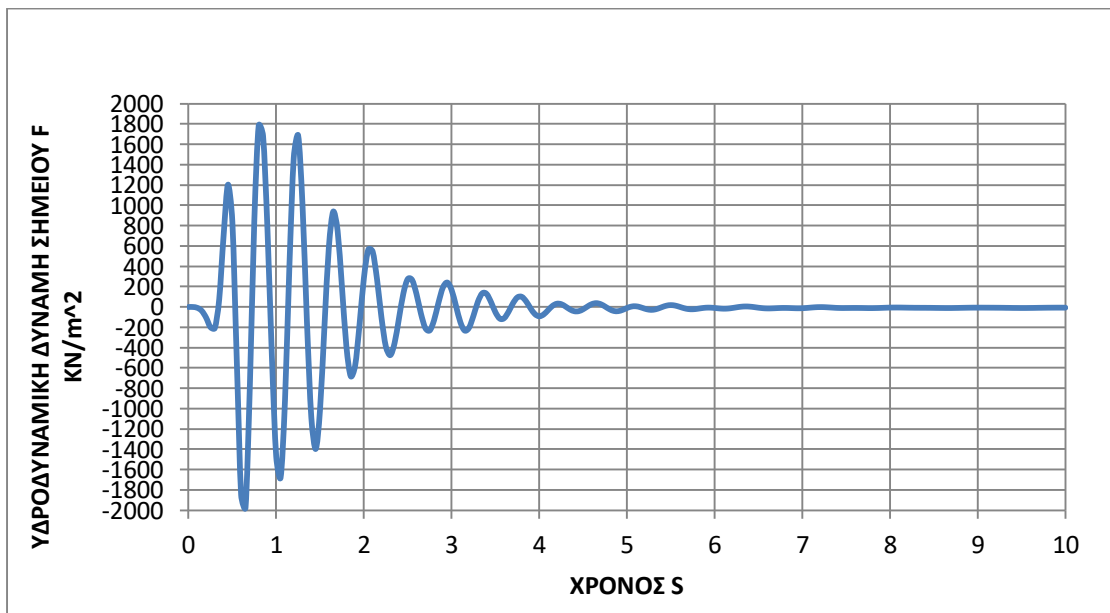
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=90\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=74,5\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h * y)^{0,5} *w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές



Εικόνα 5.206 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

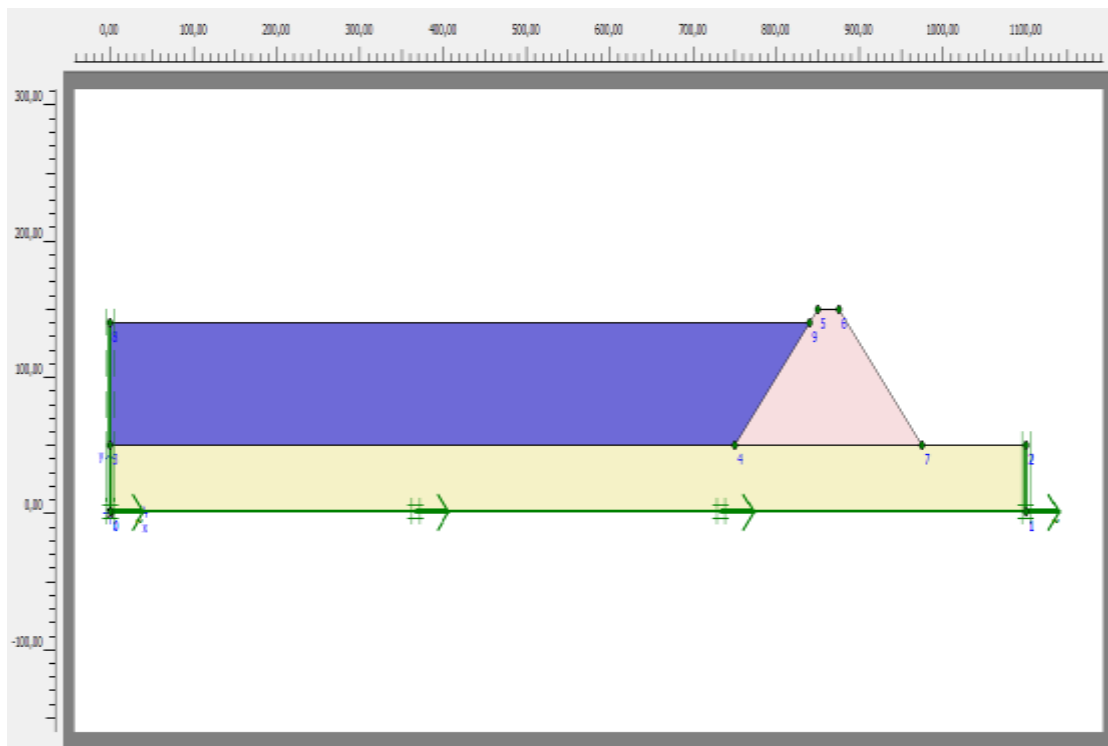


Εικόνα 5.207 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α (μέγιστη στάθμη νερού)

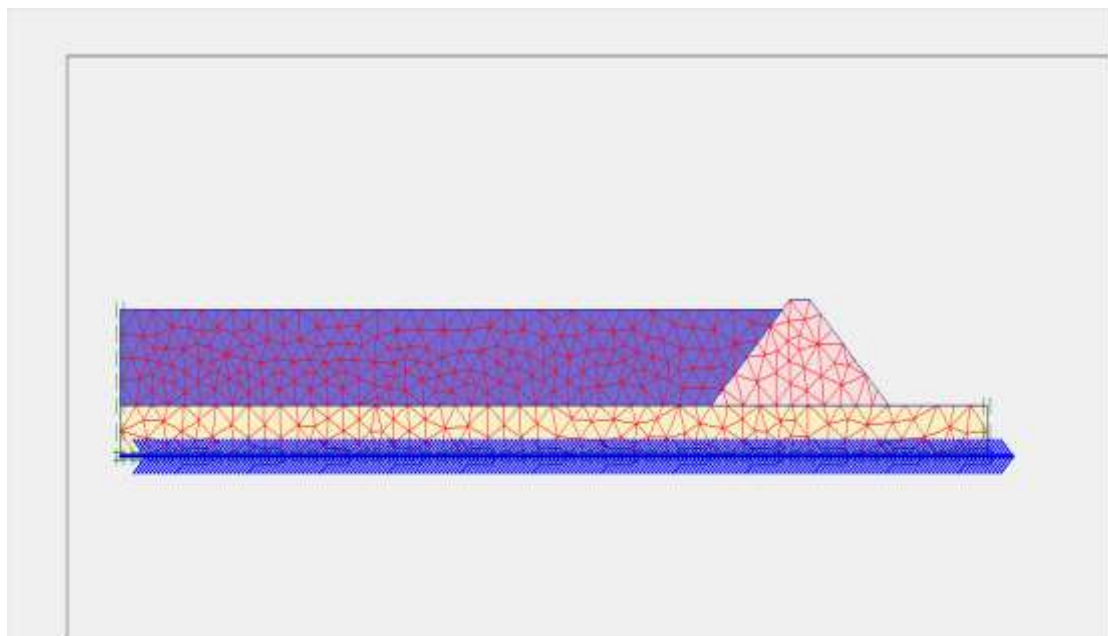


Εικόνα 5.208 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

Σενάριο 3: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα

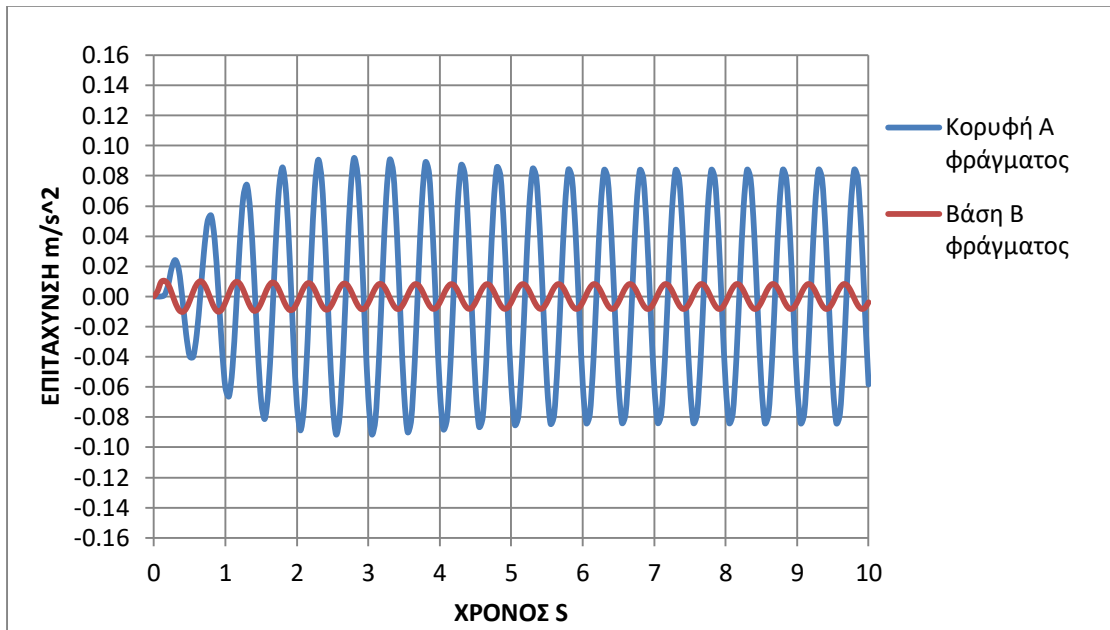


Εικόνα 5.209 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 3)



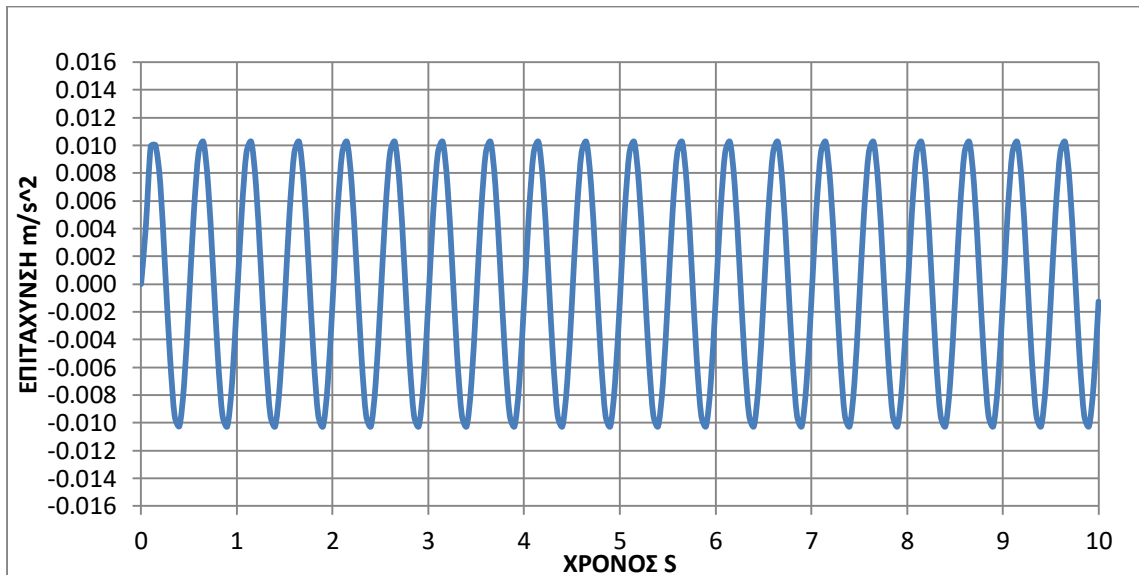
Εικόνα 5.210 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 3)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)



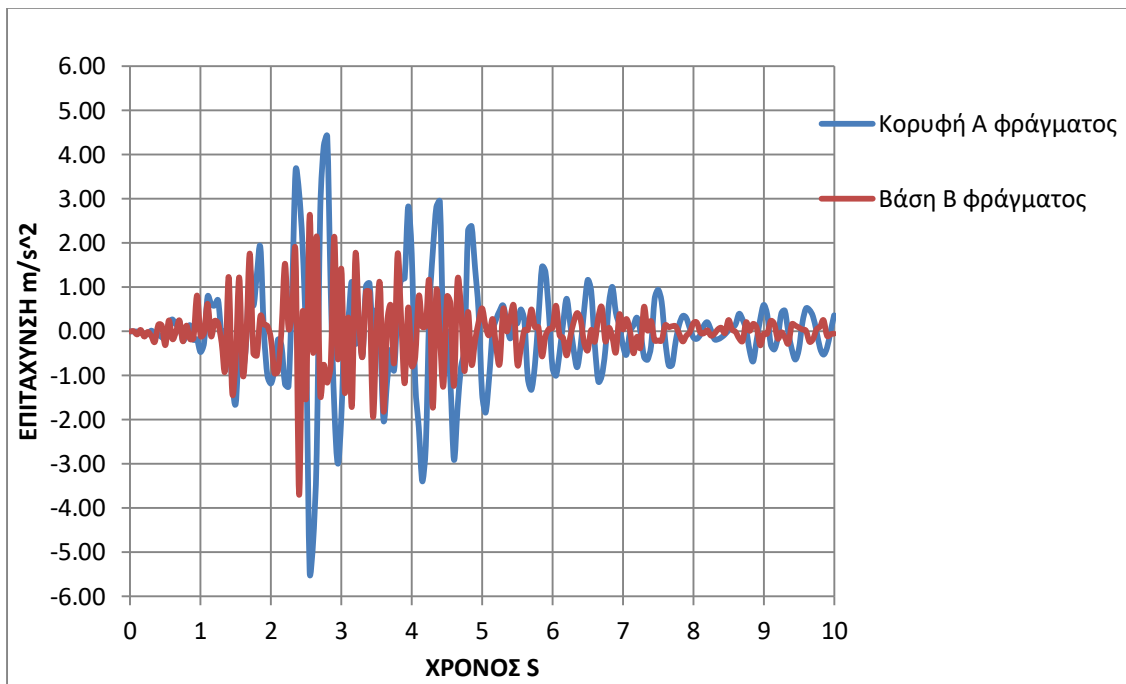
Εικόνα 5.211 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

Το νερό επιδρά ευεργετικά για την παραπάνω περίπτωση (φράγμα κλίσης 45 μοίρες) όπου έχουμε συντονισμό μειώνοντας την μέγιστη επιτάχυνση κατά το ένα τρίτο σε σχέση με την επιτάχυνση του συντονισμού.

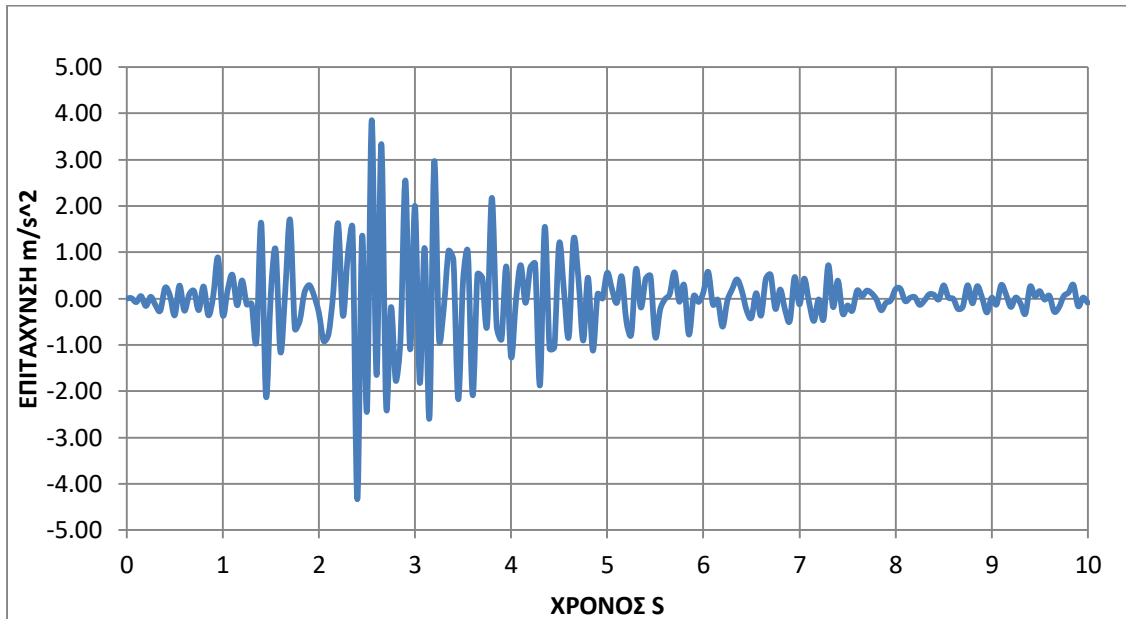


Εικόνα 5.212 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225Α)

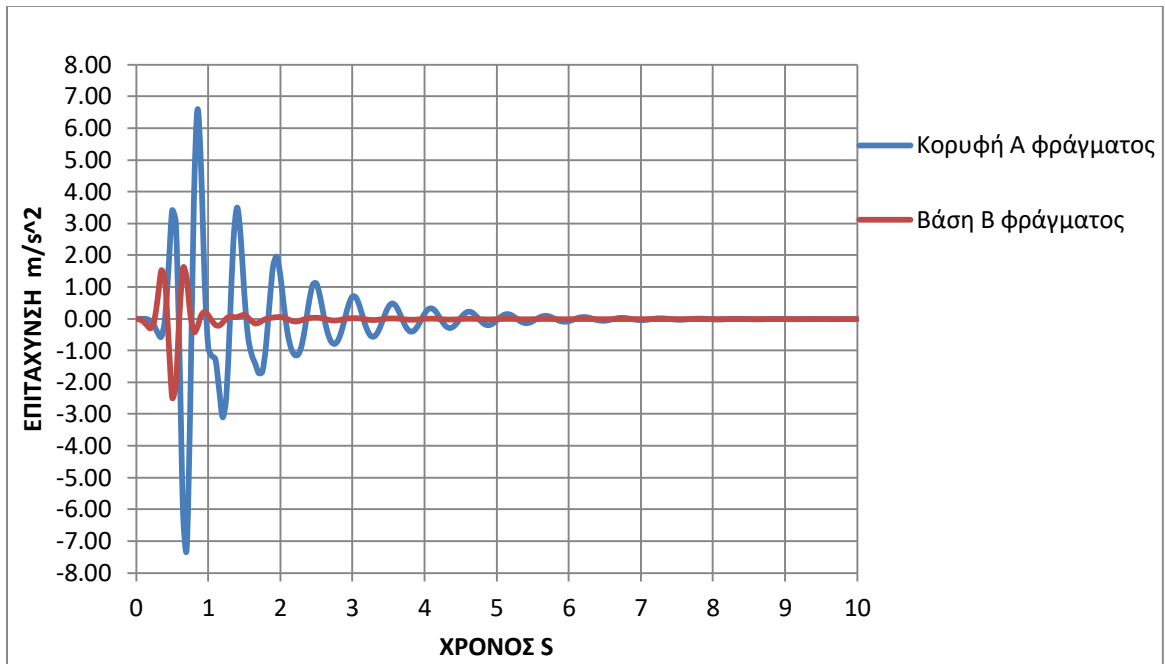


Εικόνα 5.213 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

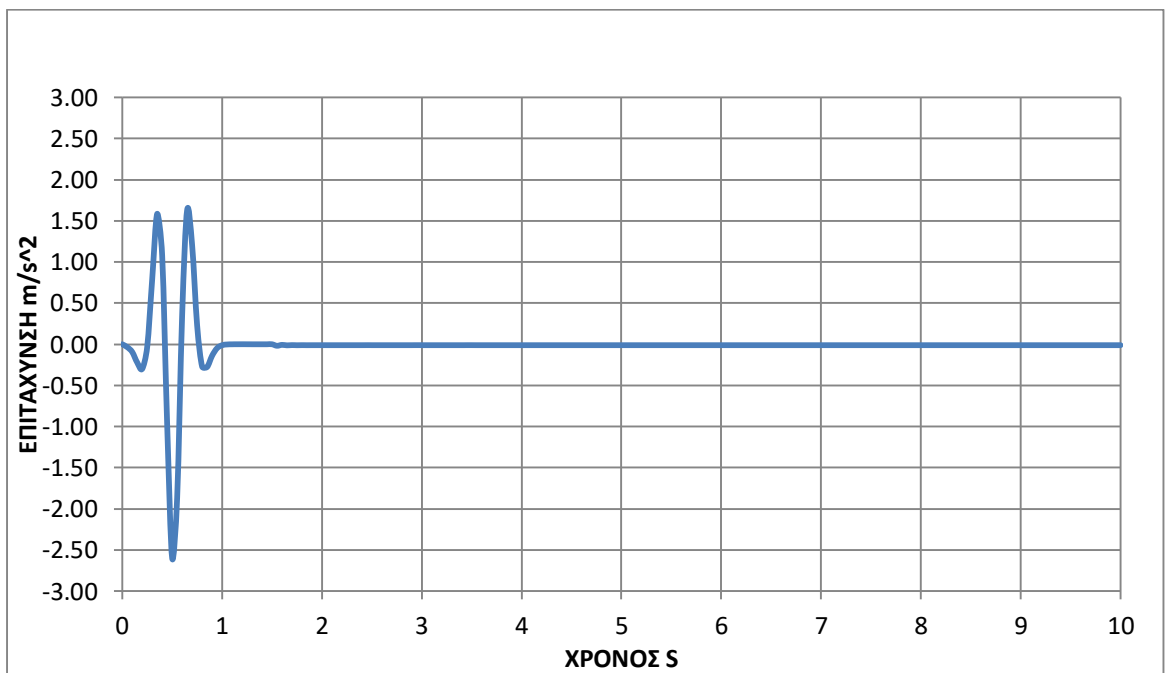


Εικόνα 5.214 Αποτέλεσμα κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)

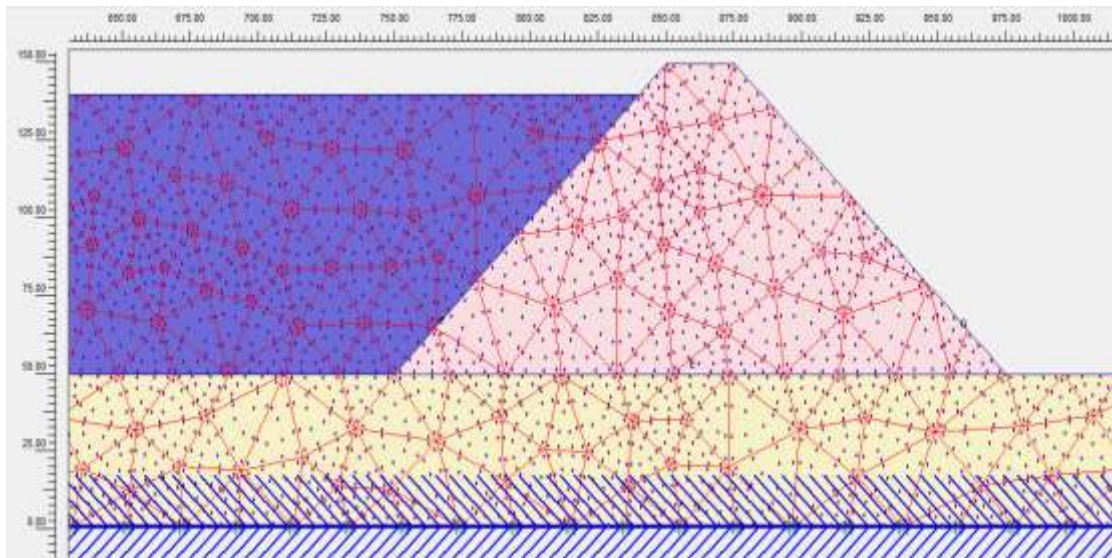


Εικόνα 5.215 Αποτελέσματα χρονιοστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



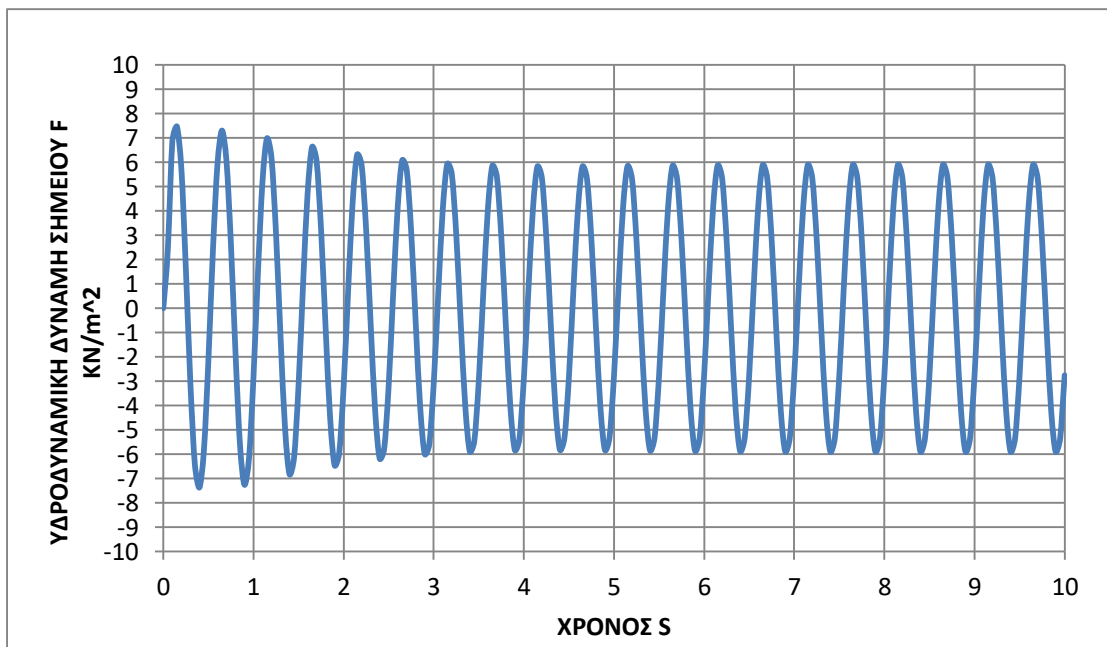
Εικόνα 5.216 Αποτέλεσμα χρονιοστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

Υδροδυναμικές ωθήσεις

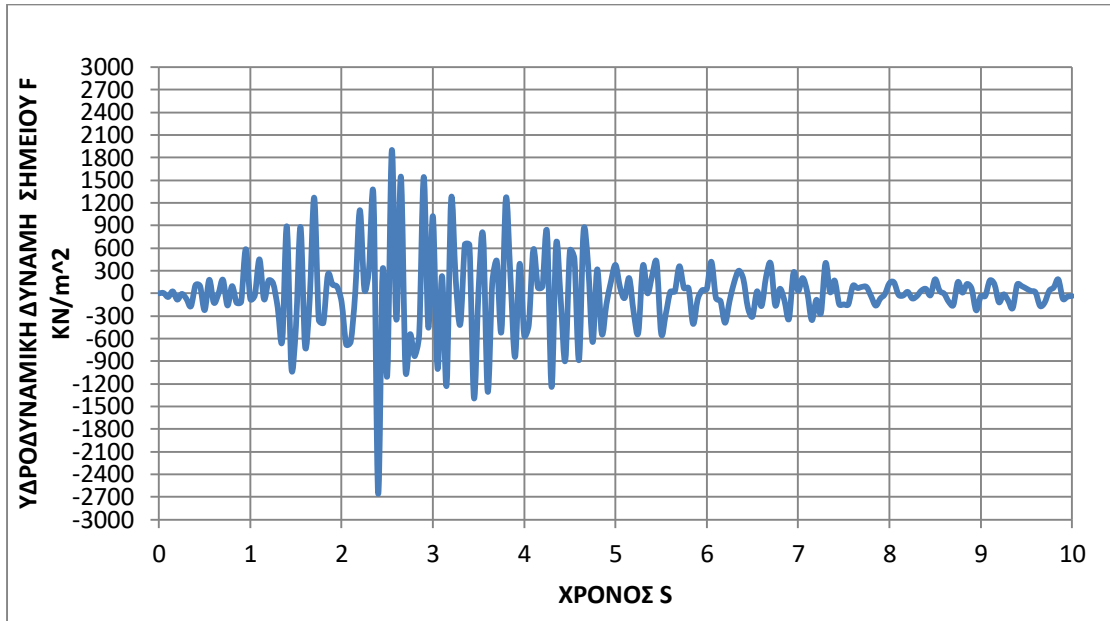


Εικόνα 5.217 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

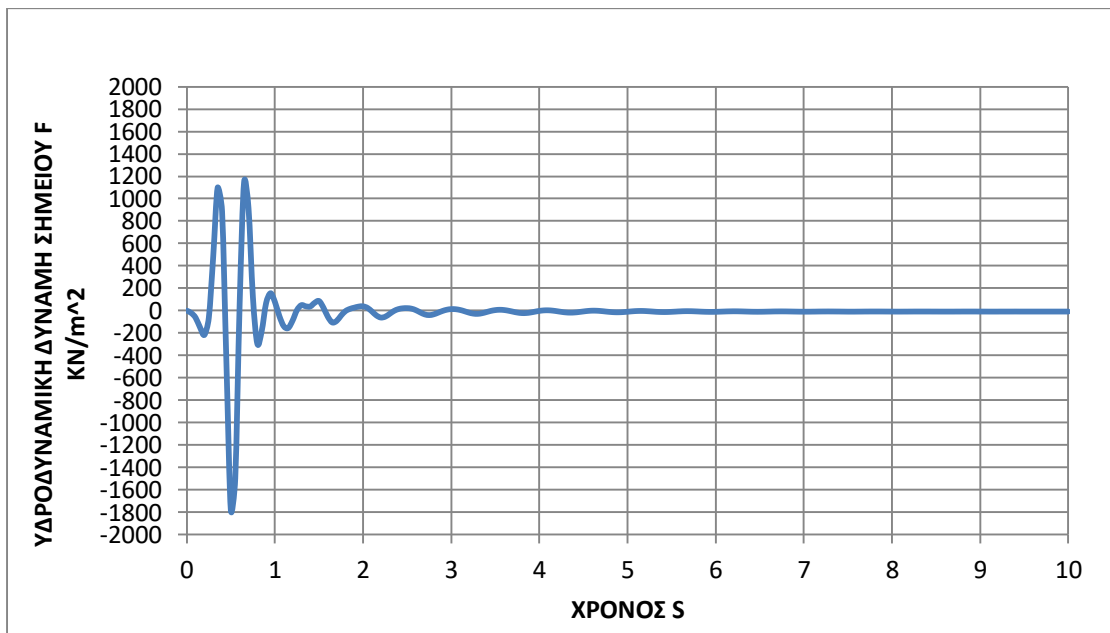
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=90\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=75\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h*y)^{0,5}*w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις.



Εικόνα 5.218 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχύδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

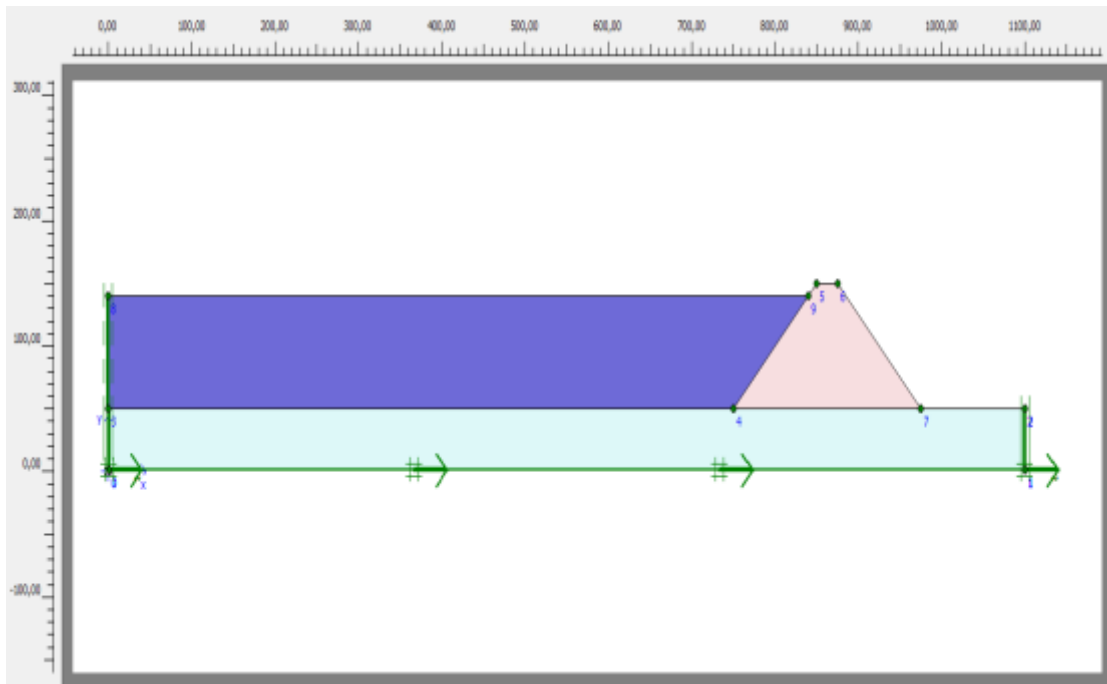


Εικόνα 5.219 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225A (μέγιστη στάθμη νερού)

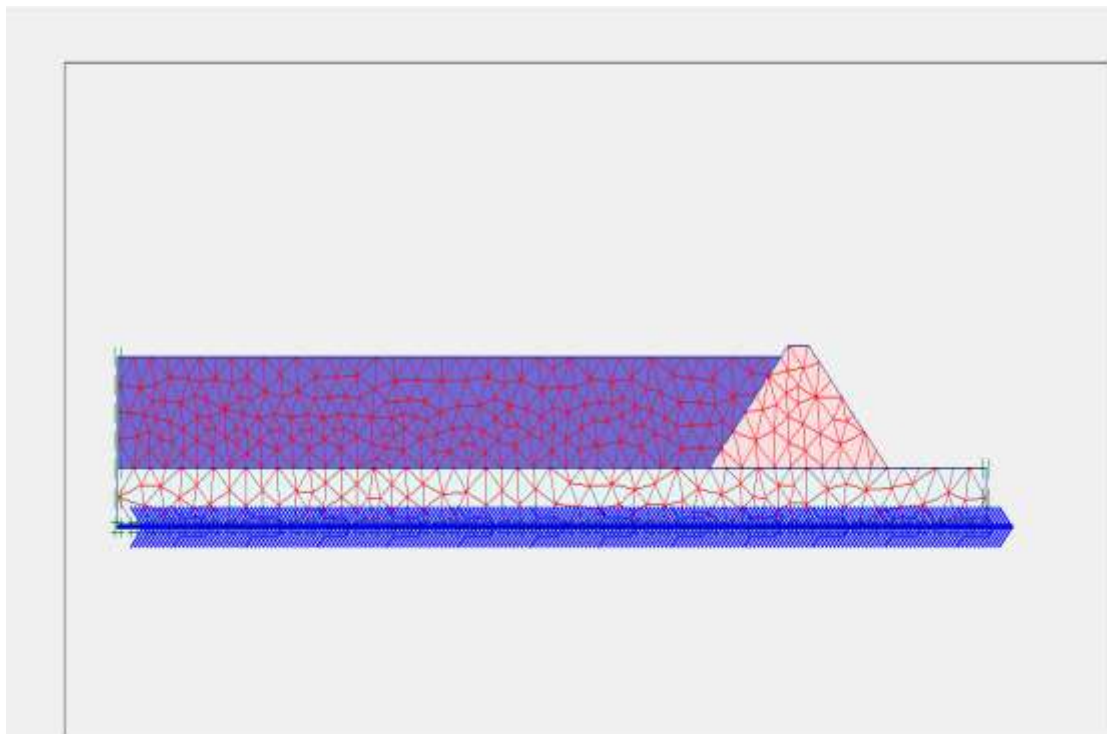


Εικόνα 5.220 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

Σενάριο 4: περίπτωση φράγματος κλίση πρανών 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα

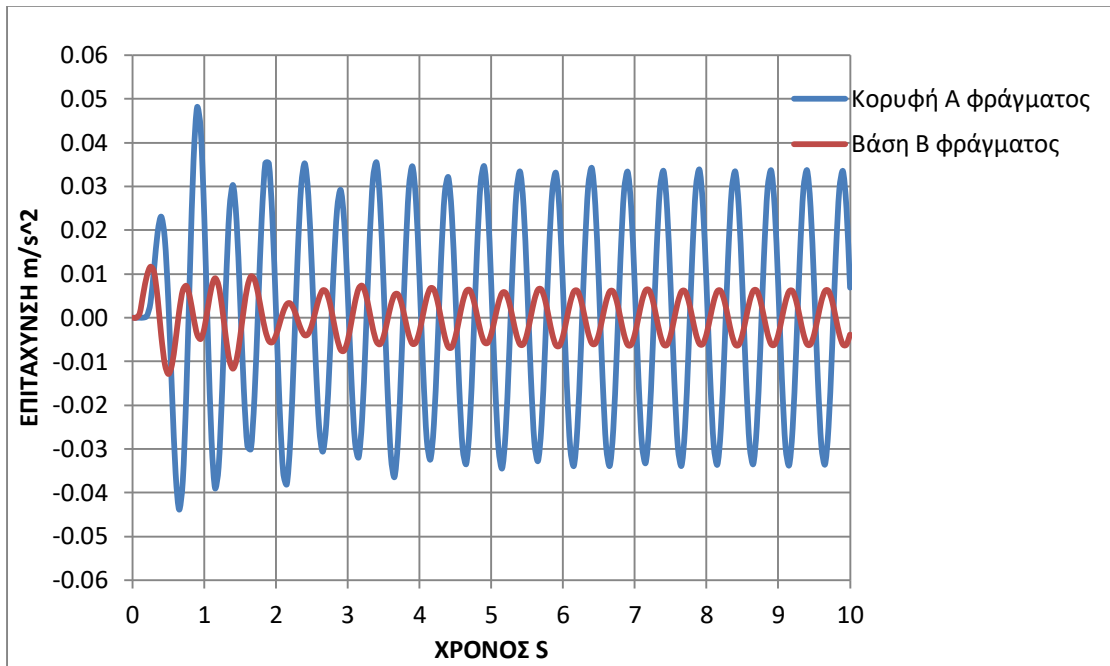


Εικόνα 5.221 Προσομοίωμα προτύπου (σενάριο 4)

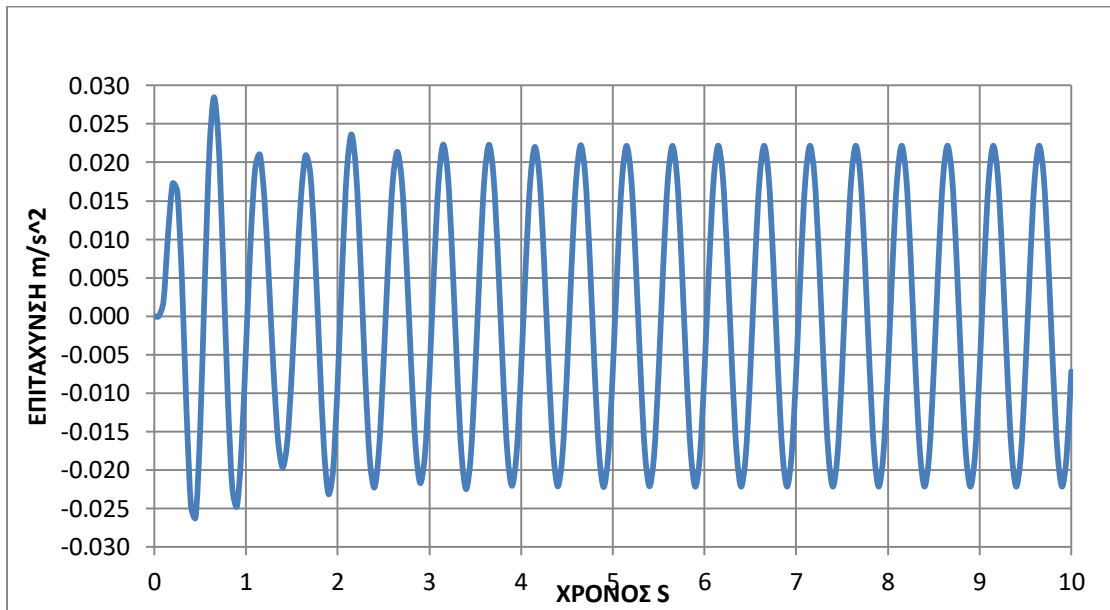


Εικόνα 5.222 Δίκτυο προτύπου (σενάριο 4)

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ)

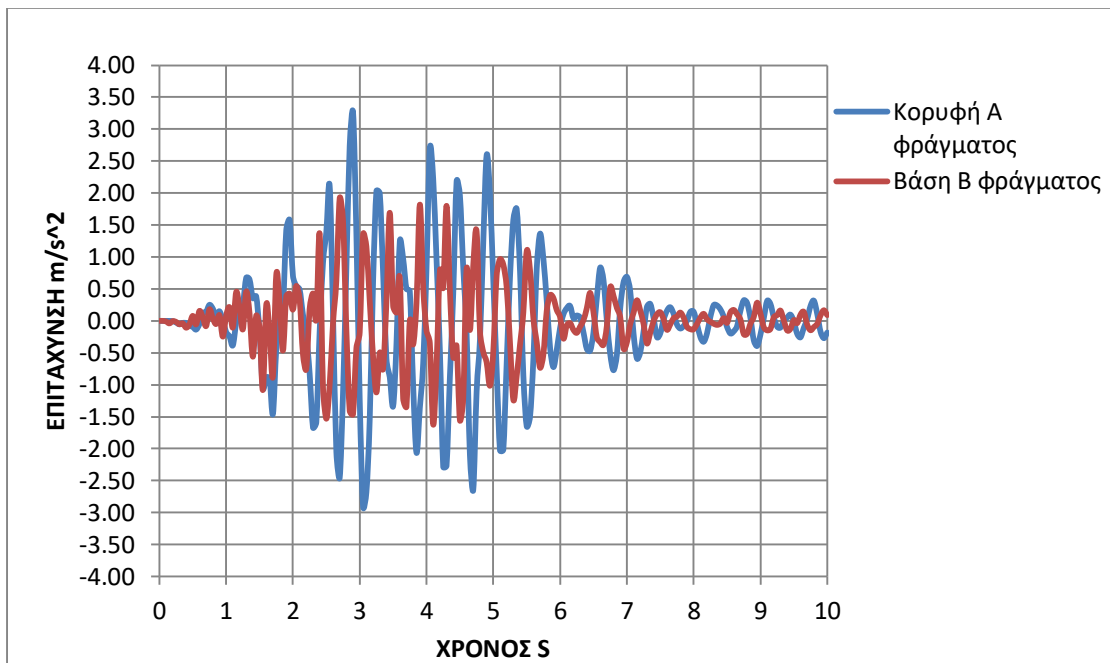


Εικόνα 5.223 Αποτελέσματα χρονιοιστριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ

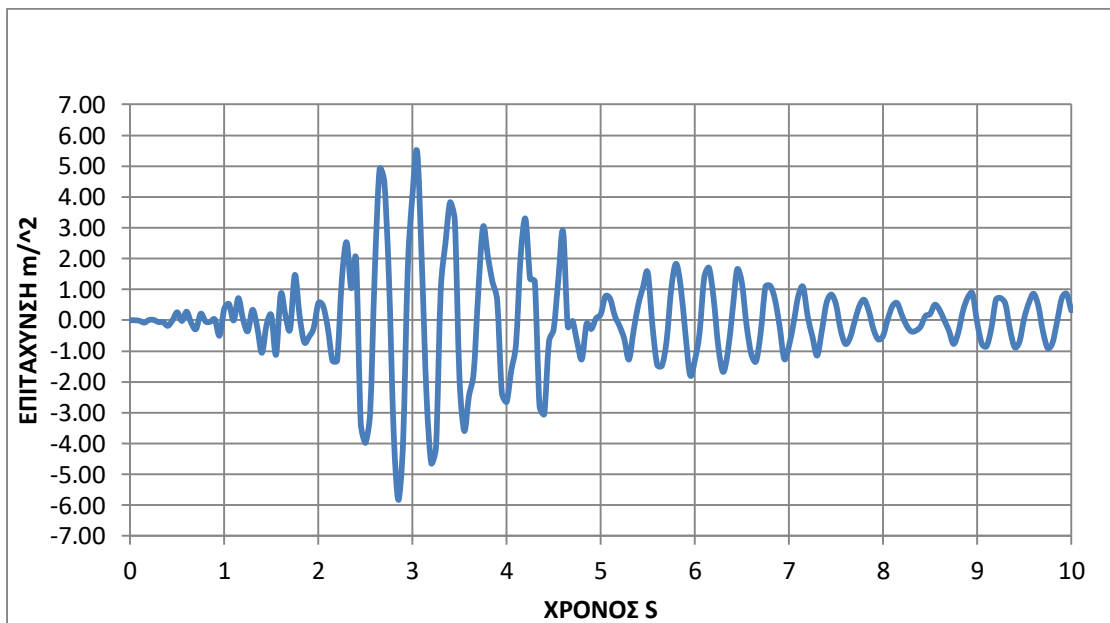


Εικόνα 5.224 Αποτέλεσμα χρονιοιστριας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση SIN-2HZ

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (225A)

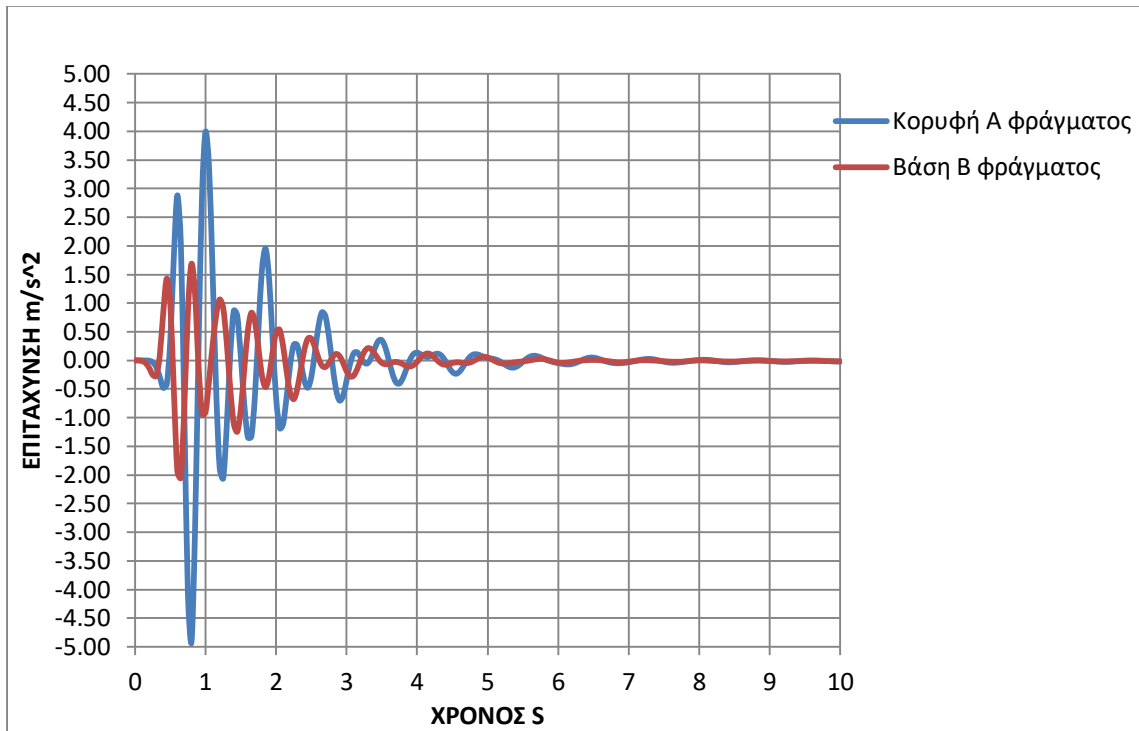


Εικόνα 5.225 Αποτελέσματα χρονιοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α

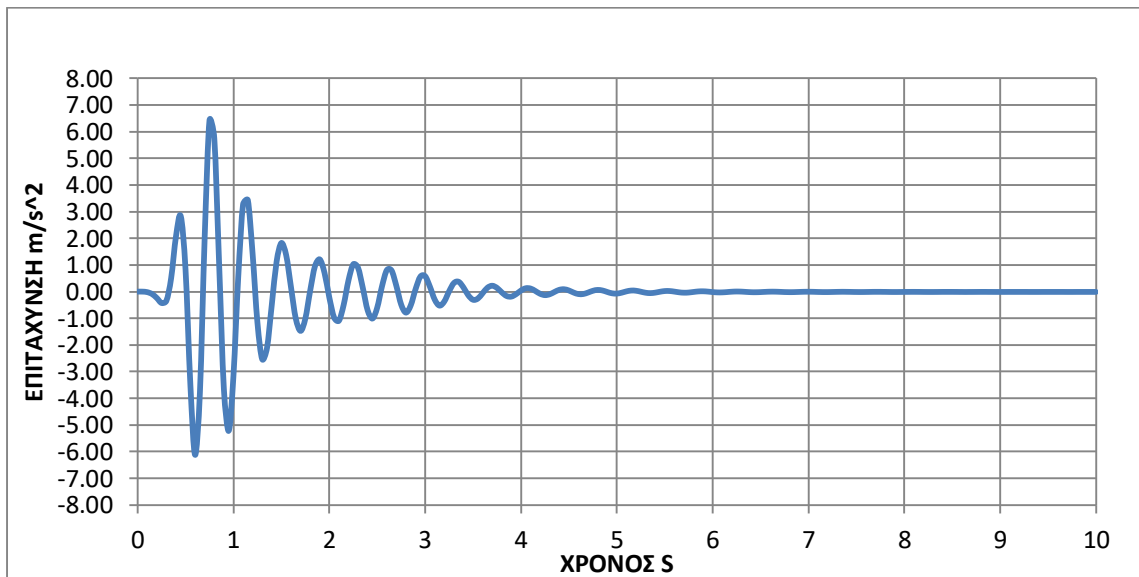


Εικόνα 5.226 Αποτελέσμα χρονιοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση 225Α

Αποτελέσματα σεισμικής δόνησης (Ricker-2hz)



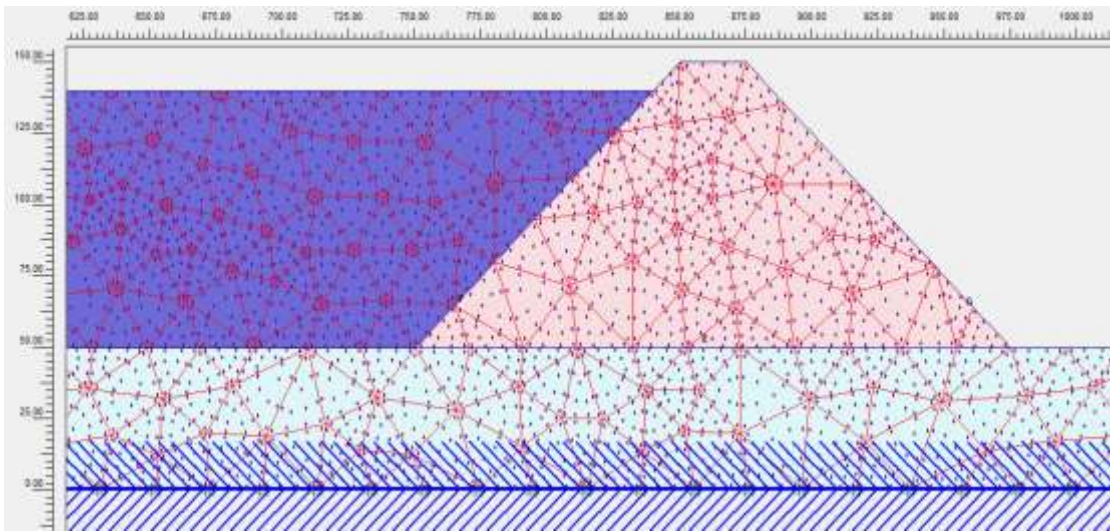
Εικόνα 5.227 Αποτελέσματα χρονοιστοριών σημείων Α και Β φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



Εικόνα 5.228 Αποτέλεσμα χρονοιστορίας κορυφής εδαφικής στρώσης σημείου Δ για δόνηση RICKER-2HZ

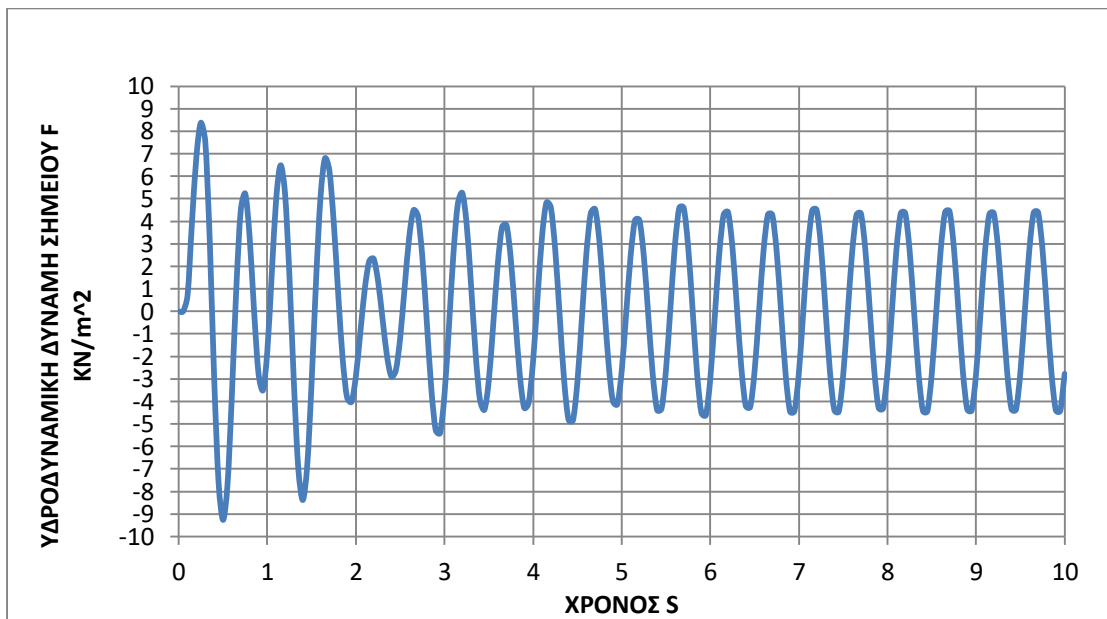
Το νερό για την περίπτωση της μέγιστης στάθμης του ταμιευτήρα επιδρά ευεργετικά μειώνοντας τα αποτελέσματα των σεισμικών δονήσεων για όλες τις περιπτώσεις μας.

Υδροδυναμικές ωθήσεις

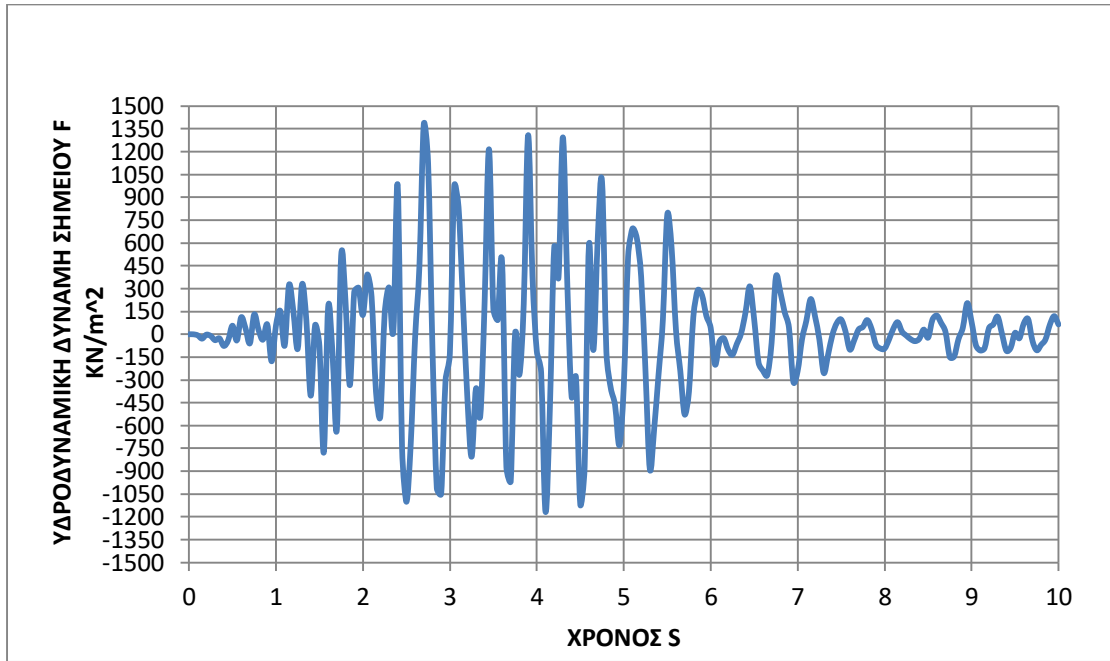


Εικόνα 5.229 Επιλογή σημείου F ανάντη πρανούς για τον υπολογισμό υδροδυναμικών ωθήσεων

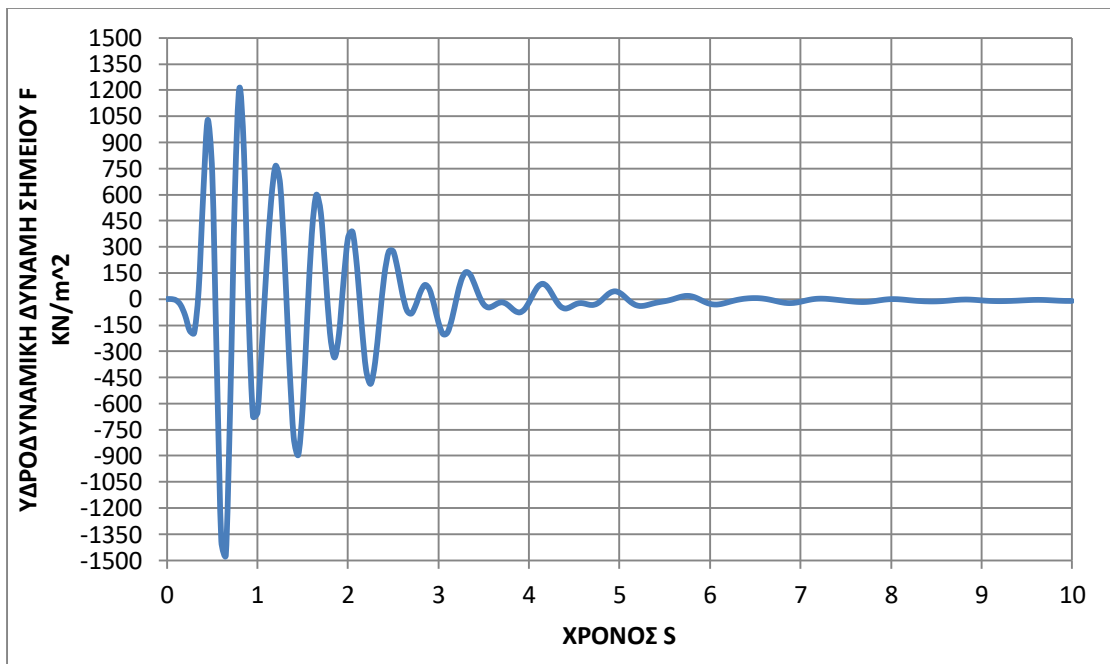
Το ειδικό βάρος του νερού στον ταμιευτήρα είναι $w=10\text{KN}/\text{m}^3$, η στάθμη του ταμιευτήρα είναι $h=90\text{m}$ και η απόσταση από την επιφάνεια της στάθμης του ταμιευτήρα προς το σημείο F ανάντη πρανούς είναι $y=75\text{m}$. Με βάση τον τύπο του Westergaard $p=0,875*\alpha*(h*y)^{0,5}*w$ προκύπτουν οι παρακάτω υδροδυναμικές ωθήσεις.



Εικόνα 5.230 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)



Εικόνα 5.231 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α (μέγιστη στάθμη νερού)



Εικόνα 5.232 Χρονοιστορία υδροδυναμικών ωθήσεων σημείου F φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ (μέγιστη στάθμη νερού)

5.6 Συγκρίσεις και γενικότερα συμπεράσματα

Σε αυτό το στάδιο της διπλωματικής διεξήχθησαν κάποιες συγκρίσεις και γενικότερα συμπεράσματα σχετικά την διαδικασία των προηγούμενων βημάτων. Οι συγκρίσεις

που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν την φόρτιση του φράγματος υπό στατικές συνθήκες χωρίς την παρουσία του νερού, τις στατικές συνθήκες όπου λαμβάνεται υπόψιν το νερό στον ταμιευτήρα. Στη συνέχεια για την παρουσία του σεισμού ελήφισαν υπόψιν τρεις παράμετροι σχετικά με την παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα, τη σημασία που παίζει η γεωμετρία του φράγματος στη συμπεριφορά του υπό σεισμική διέγερση και το υλικό από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζεται.

5.6.1 Συγκρίσεις για στατική φόρτιση χωρίς νερό

Όσον αφορά την στατική φόρτιση χωρίς την παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα παρατηρήθηκε πως το εδαφικό υπόστρωμα του φράγματος παίζει ρόλο. Συγκεκριμένα και στην περίπτωση του φράγματος με γωνία κλίσης πρανών 60 μοίρες, όσο και στην περίπτωση που είχαμε γωνία κλίσης πρανών 45 μοίρες το πρότυπό μας παρουσίαζε μεγαλύτερες παραμορφώσεις την περίπτωση που το υπέδαφος μας αποτελείτο από ημιβραχώδες υλικό. Αυτό συνέβαινε εξαιτίας των μεγαλύτερων καθιζήσεων που παρουσίαζε το φράγμα στην περίπτωση που είχαμε ημιβραχώδες υλικό. Το βραχώδες υλικό έχει μέτρο ελαστικότητας 11 φορές περισσότερο από ότι έχει το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα. Όσον αφορά τον ημίβραχο το μέτρο ελαστικότητας είναι το ίδιο με αυτό του υλικού από το οποίο αποτελείται το σώμα του φράγματος.

Συγκρίσεις παραγματοποιήθηκαν μεταξύ των διαφορετικών γεωμετριών του φράγματος. Πιο συγκεκριμένα για το ημιβραχώδες υπόστρωμα μεγαλύτερες παραμορφώσεις είχαμε στην περίπτωση που οι κλίσεις των πρανών του φράγματος ήταν 45 μοίρες, το αντίθετο συνέβει στην περίπτωση του βραχώδους υποστρώματος όπου οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις παρουσιαζόντουσαν στο φράγμα με κλίση πρανών 60 μοιρών.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι παραμορφώσεις ήταν αμελητέες μπορούσαν να αγνοηθούν για κάθε περίπτωση αφού ήταν της τάξεων 0,5-1cm.

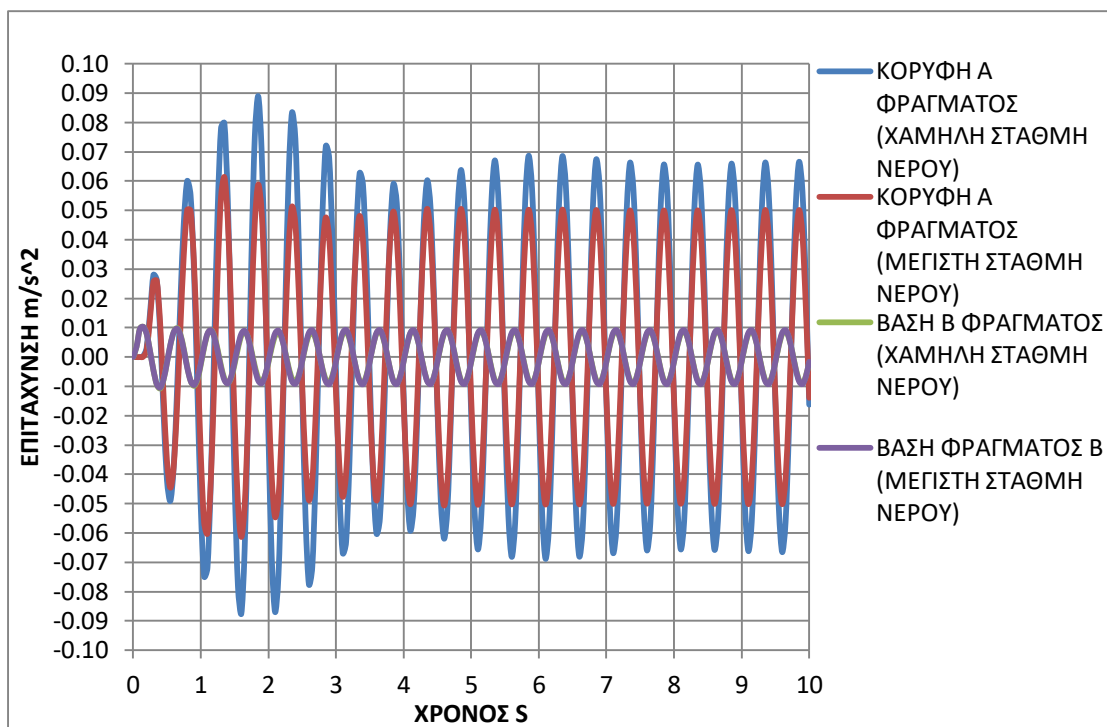
5.6.2 Στατική φόρτιση υπό την παρουσία του νερού

Το νερό και στα τέσσερα σενάρια (για τη μέση και μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα) ασκεί υδροστατικές ωθήσεις τόσο στο φράγμα όσο και στο υπέδαφος. Μεγαλύτερες παραμορφώσεις έχουμε για το φράγμα με κλίση πρανών 60 μοίρες από ότι με κλίση 45 μοιρών και στις δύο περιπτώσεις εδαφικού υλικού. Επίσης και για τις δύο γεωμετρίες για ημιβραχώδες εδαφικό υπόστρωμα έχουμε τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Για τα τέσσερα παραπάνω σενάρια έχουμε μεγαλύτερες παραμορφώσεις για την περίπτωση της μέγιστης στάθμης νερού στο ταμιευτήρα.

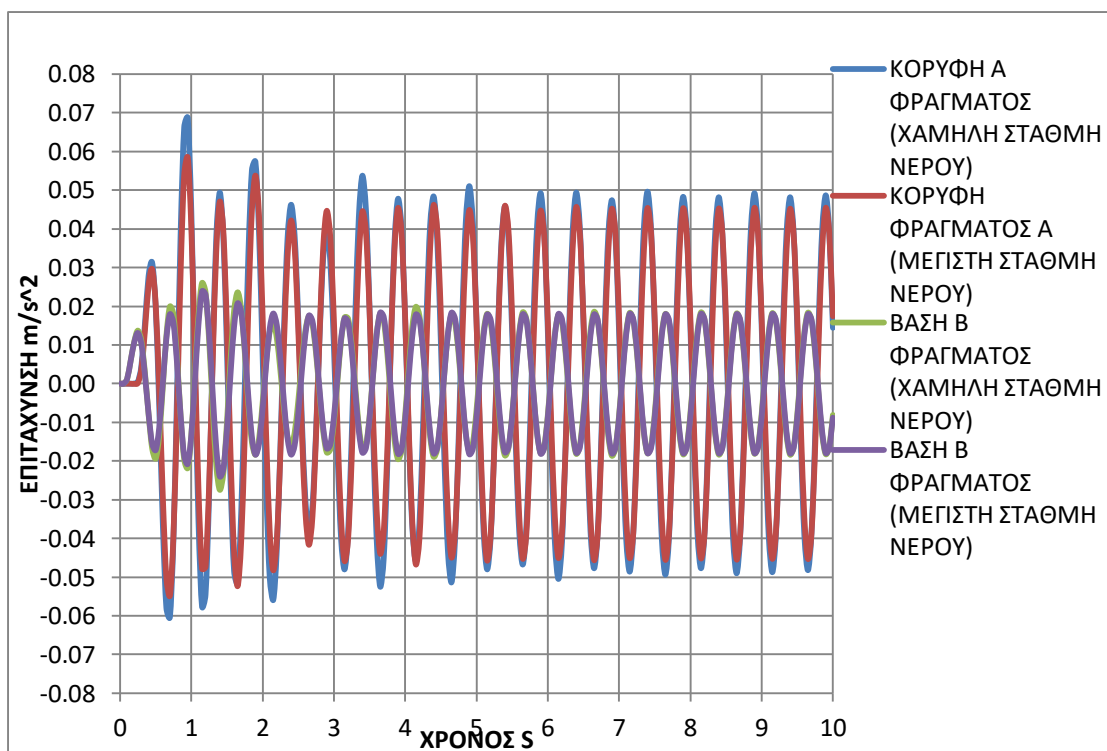
5.6.3 Σεισμική φόρτιση (με χαμηλή, μέση και μέγιστη στάθμη νερού)

Εδώ ελήφθησαν υπόψιν τρεις παράμετροι. Οι παράμετροι οι οποίοι ελήφθησαν ήταν η παρουσία του νερού στον ταμιευτήρα, το υλικό από το οποίο αποτελείται το εδαφικό υπόστρωμα στο οποίο εδράζεται το φράγμα και η γεωμετρία του φράγματος.

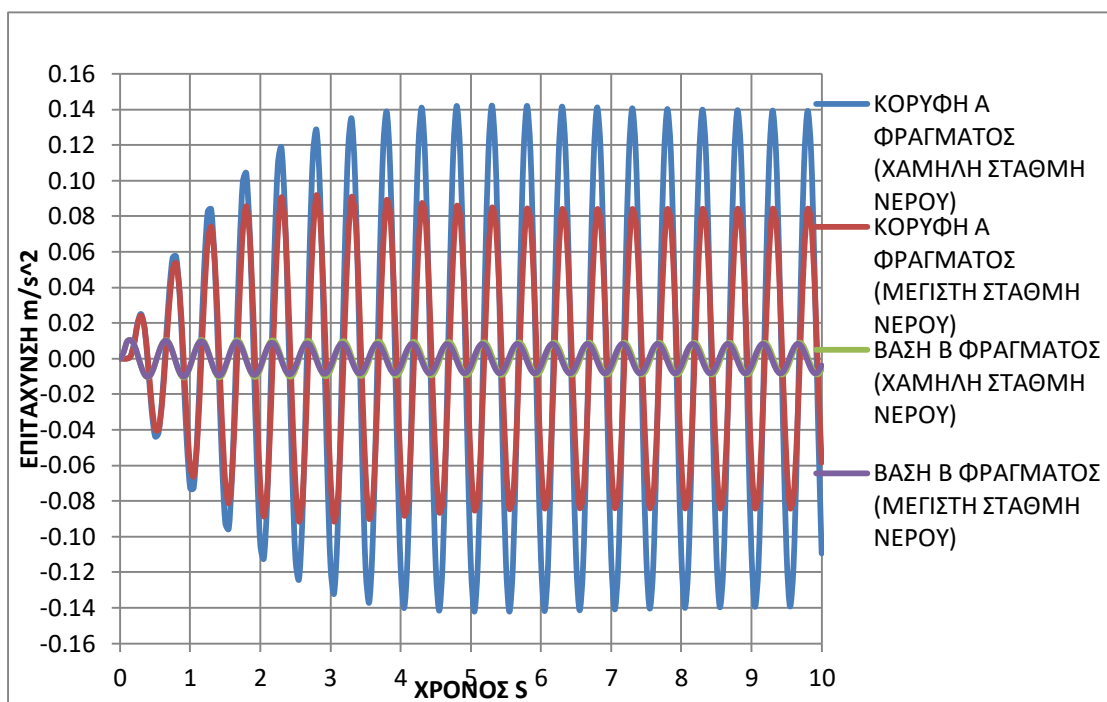
Παρακάτω φαίνονται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα συνδυάζοντας τις παραπάνω παραμέτρους. Οι επιταχύνσεις του σημείου που κυρίως μελετάμε είναι η κορυφή του φράγματος όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



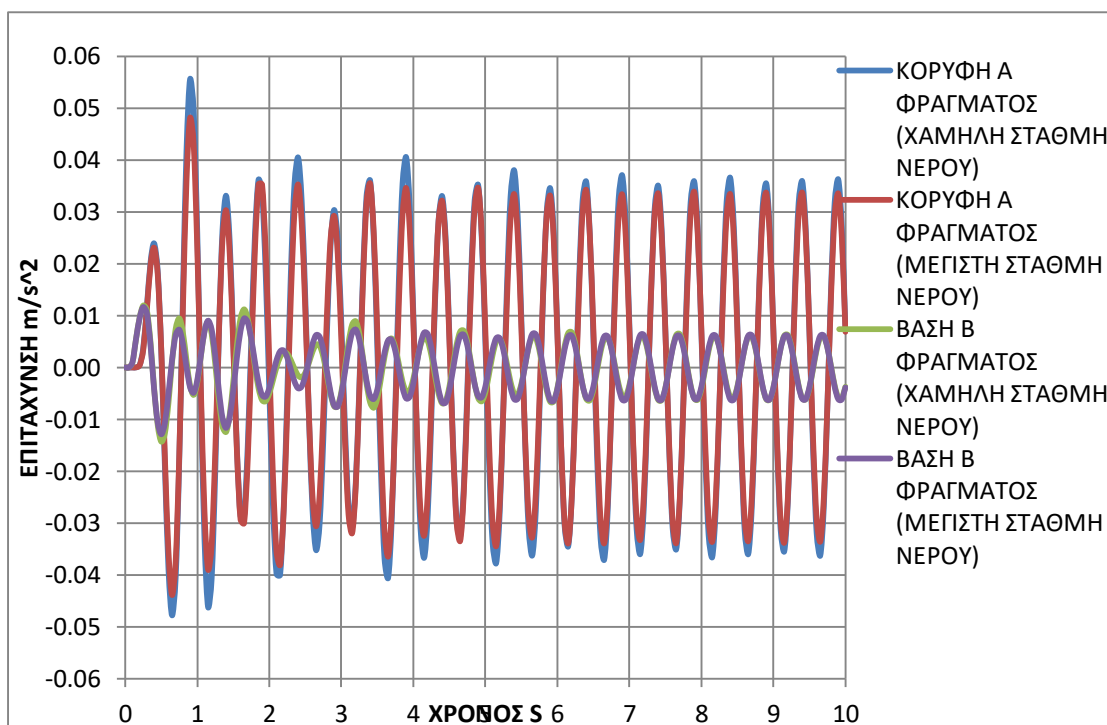
Εικόνα 5.233 Σύγκριση χρονιοιστριών σημείων Α και Β για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



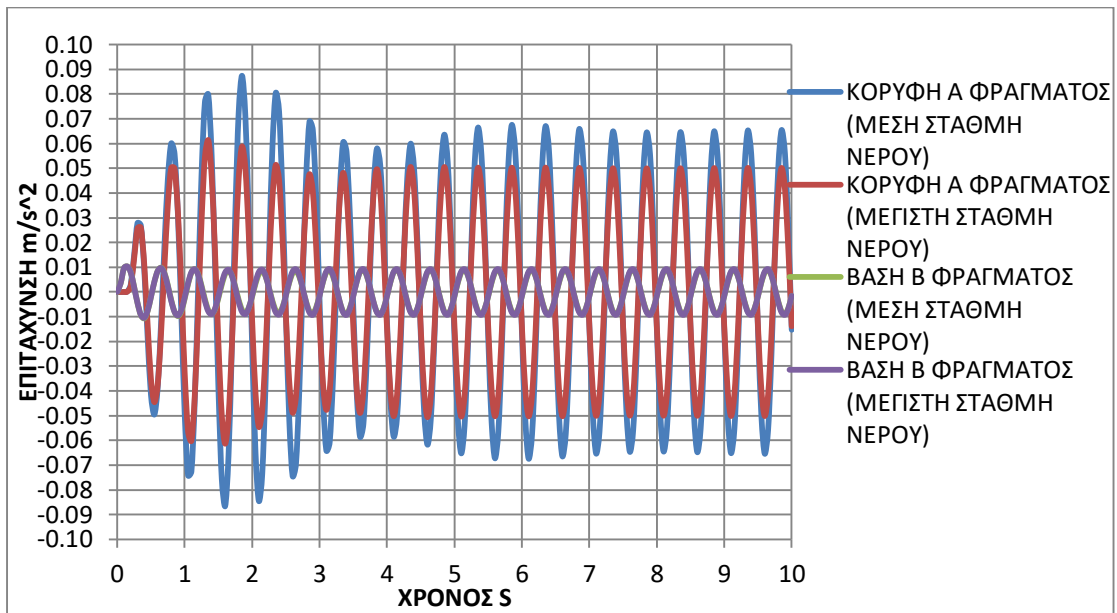
Εικόνα 5.234 Σύγκριση χρονιοιστριών σημείων Α και Β για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



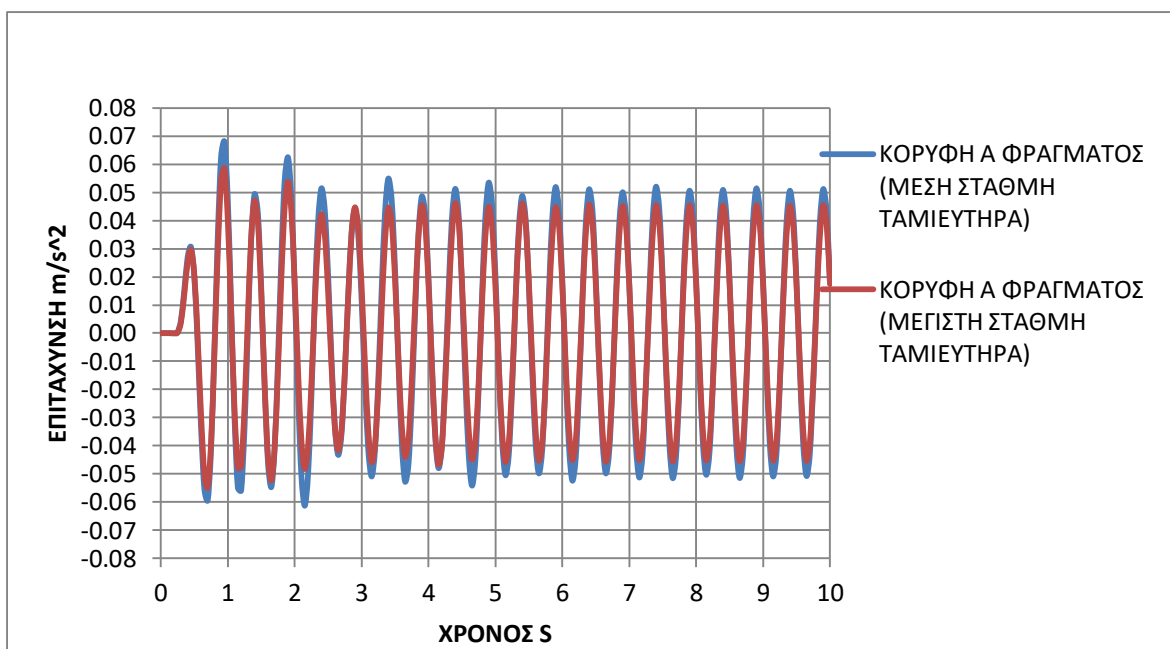
Εικόνα 5.235 Σύγκριση χρονοιστοριών σημείων A και B για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



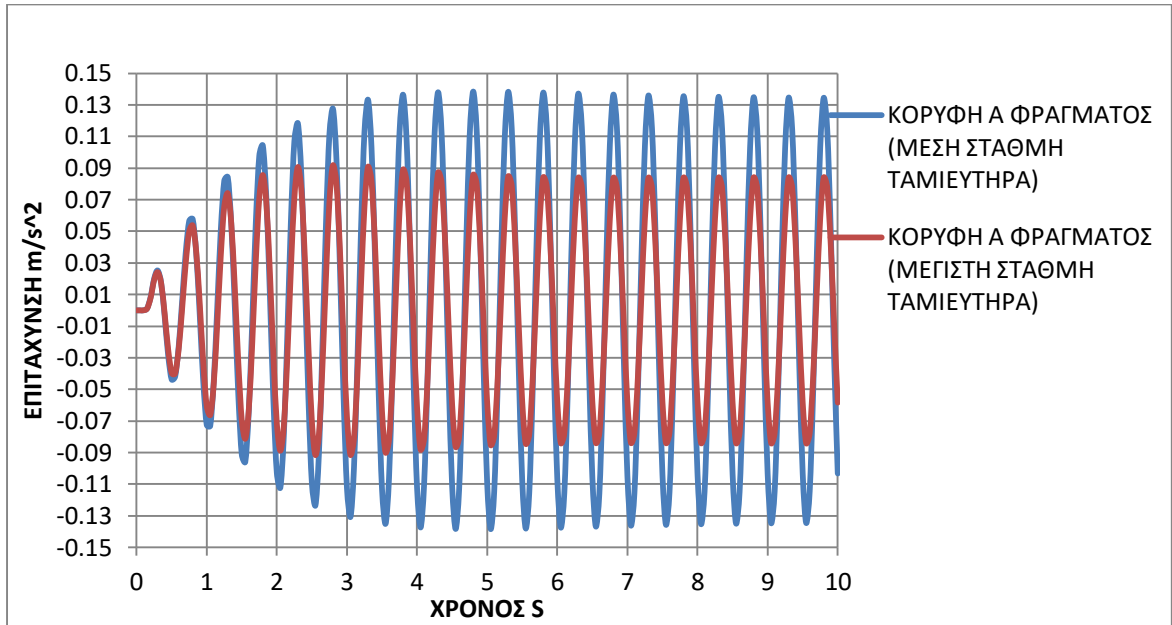
Εικόνα 5.14 Σύγκριση χρονοιστοριών σημείων A και B για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



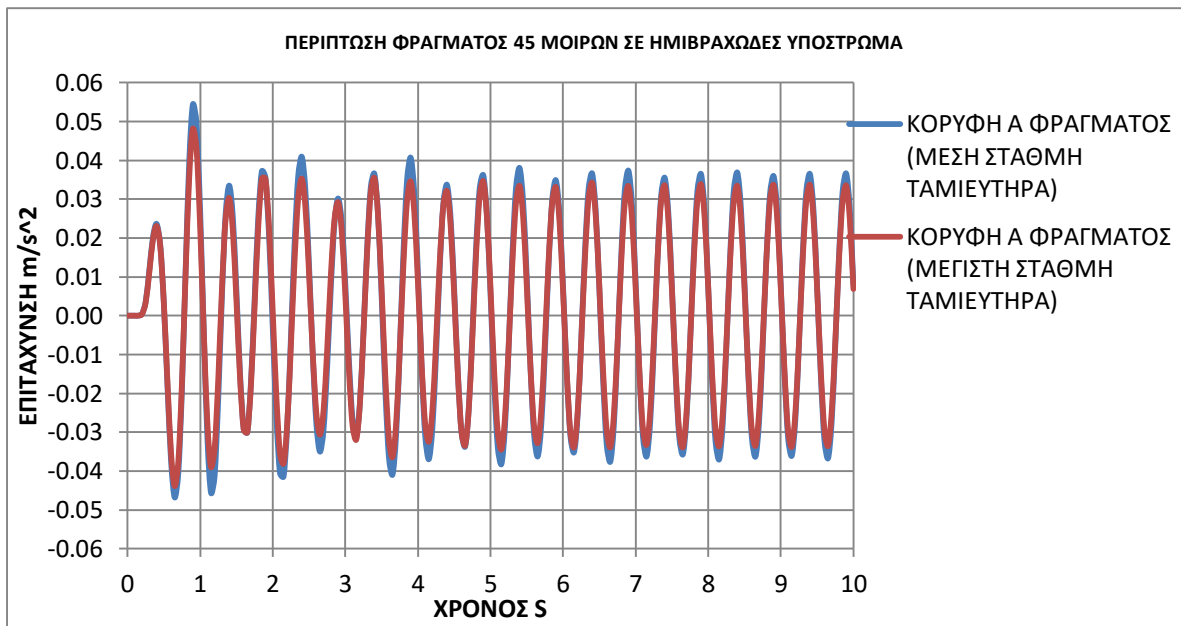
Εικόνα 5.237 Σύγκριση χρονιοιστοριών σημείων A και B για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



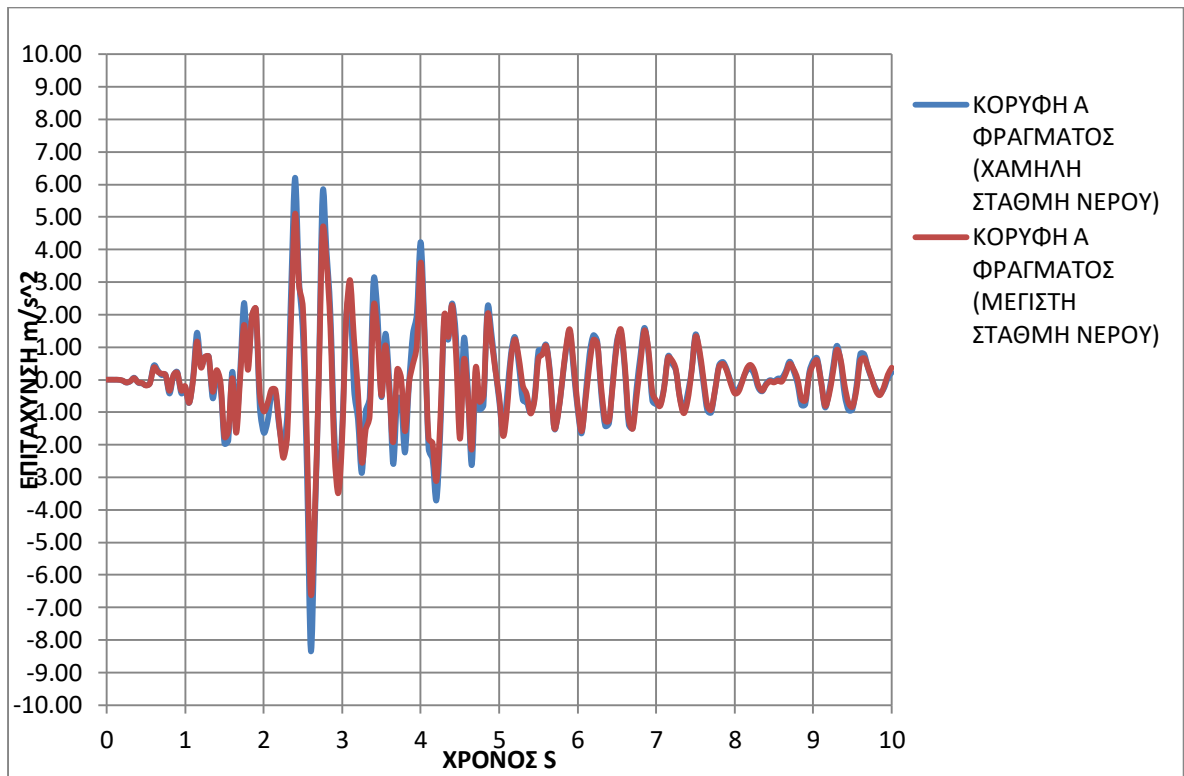
Εικόνα 5.238 Σύγκριση χρονιοιστοριών σημείου A για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



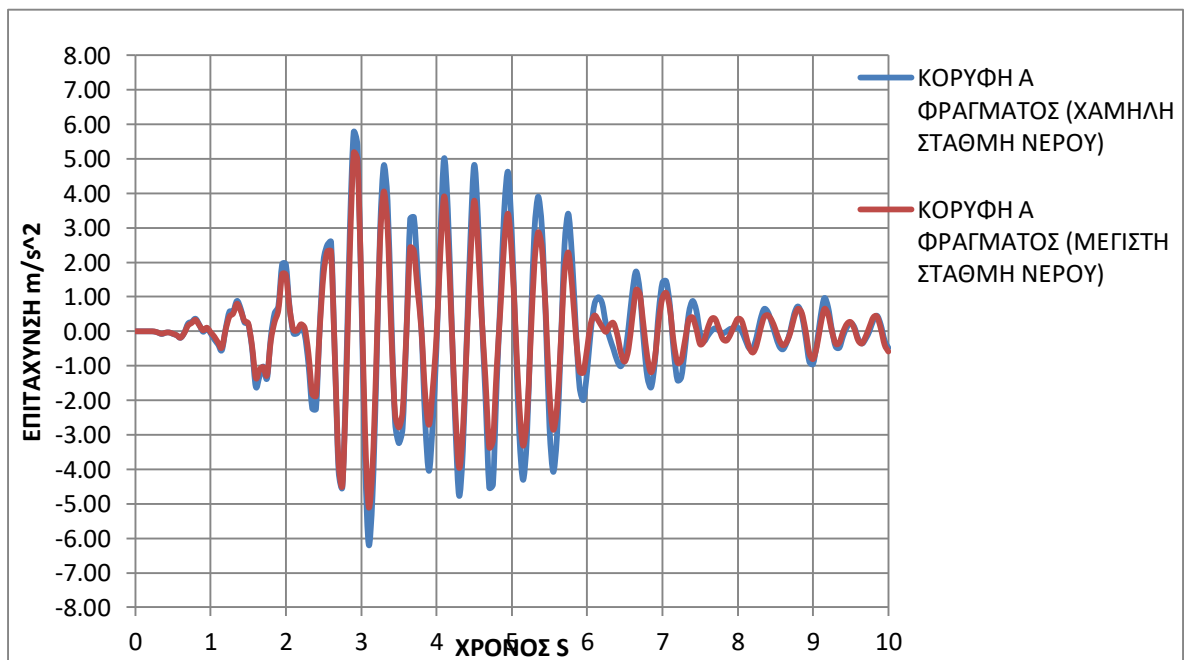
Εικόνα 5.239 Σύγκριση χρονιοστοριών σημείου A για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



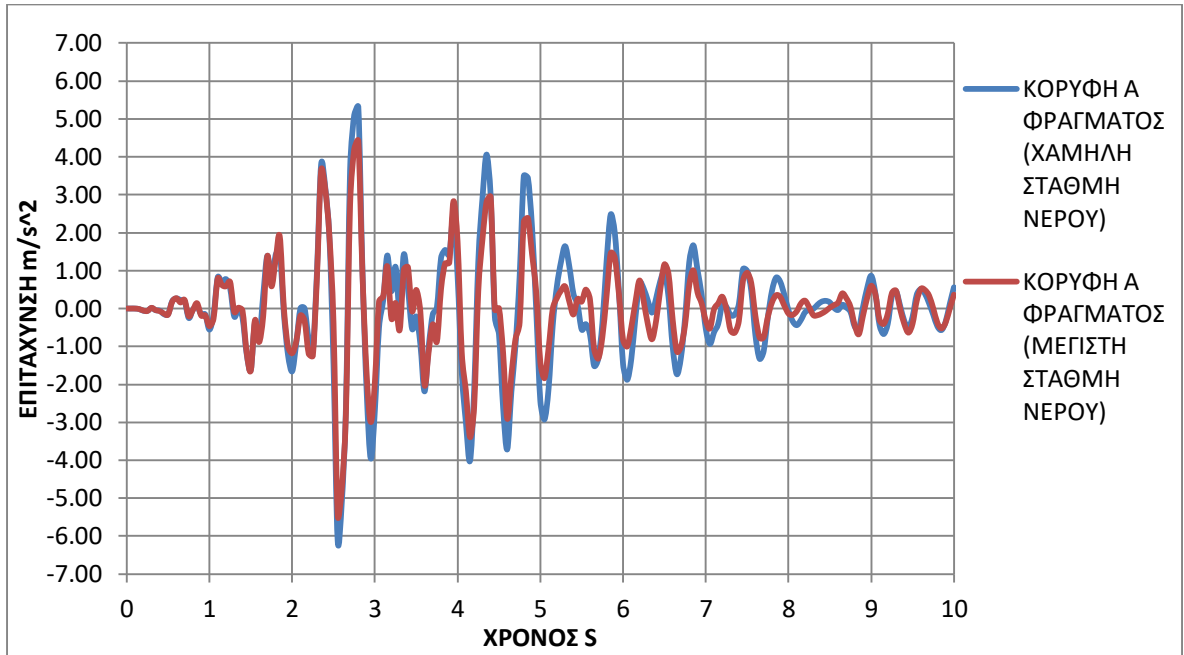
Εικόνα 5.240 Σύγκριση χρονιοστοριών σημείου A για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση SIN-2HZ



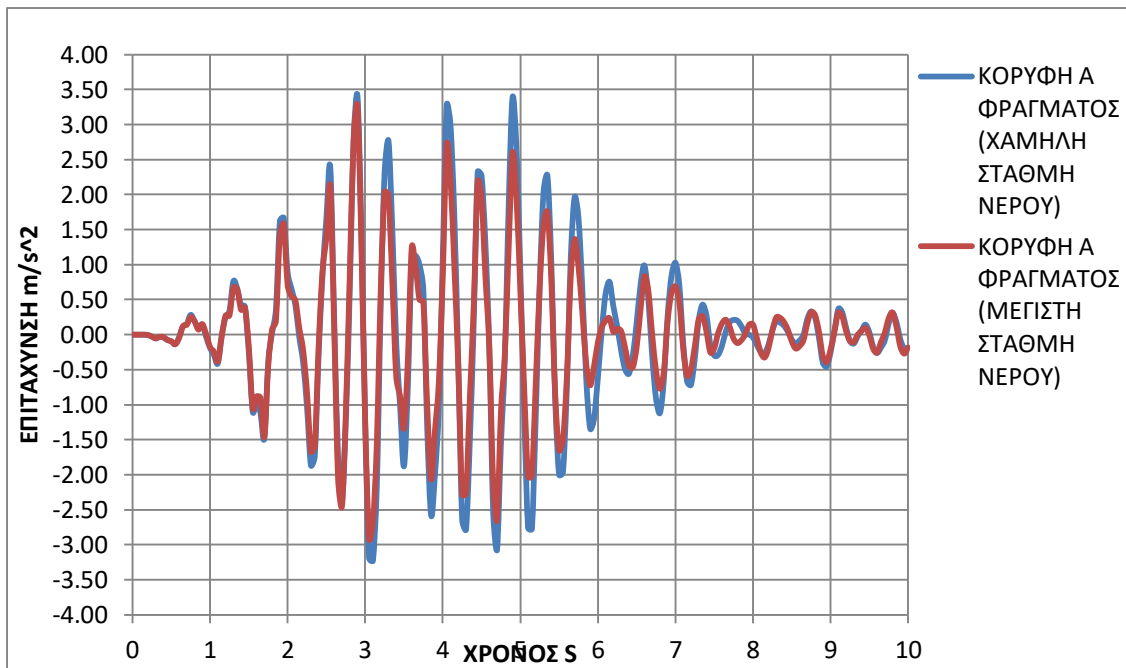
Εικόνα 5.241 Σύγκριση χρονιοιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α



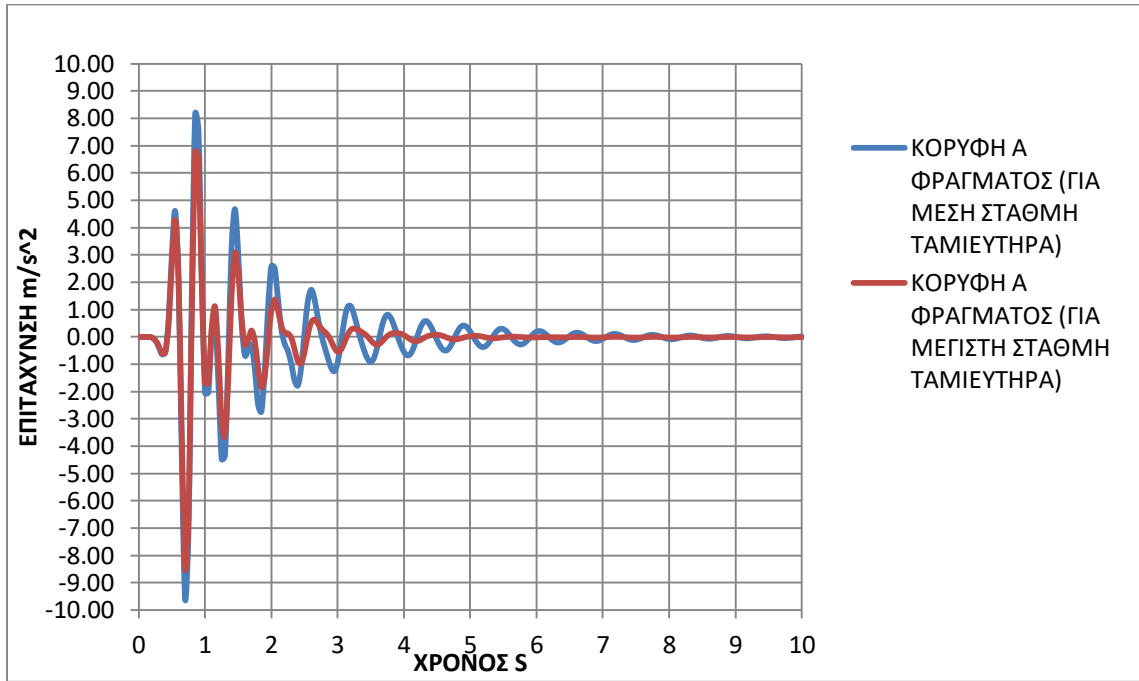
Εικόνα 5.242 Σύγκριση χρονιοιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α



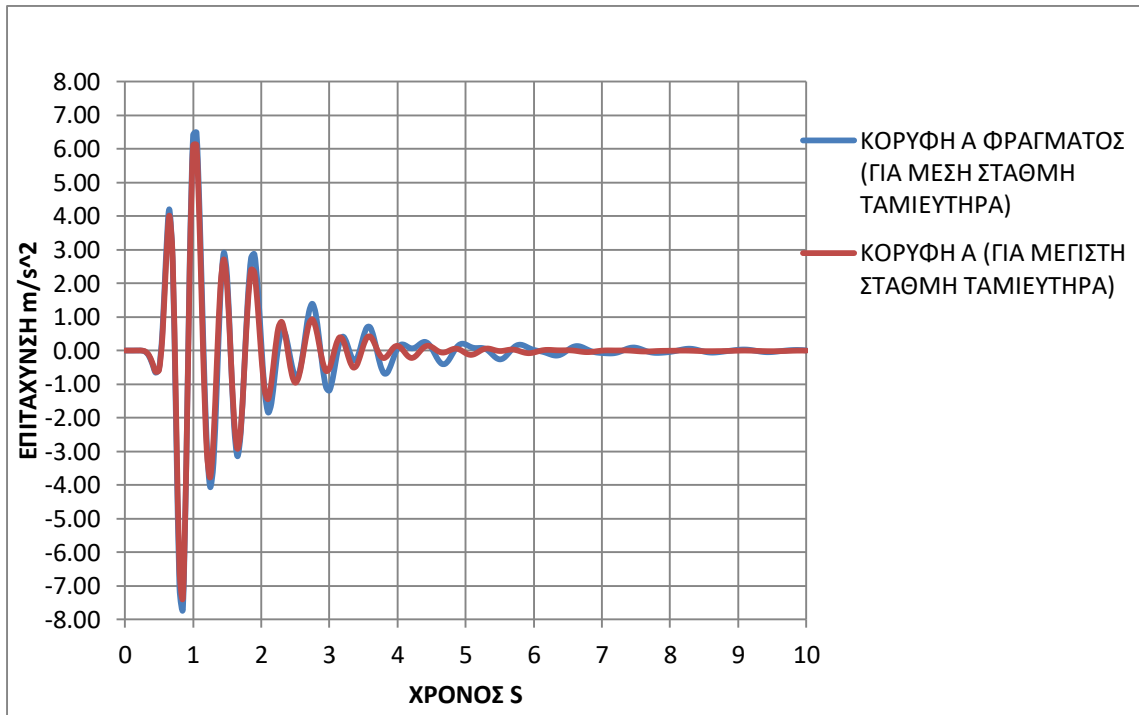
Εικόνα 5.243 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α



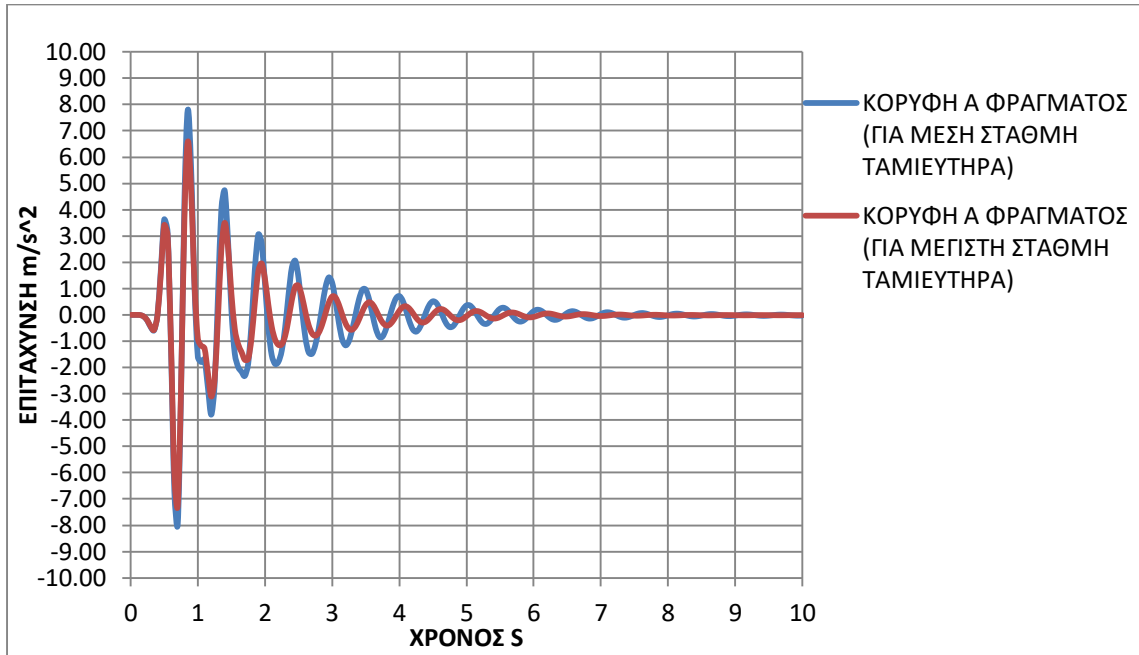
Εικόνα 5.244 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση 225Α



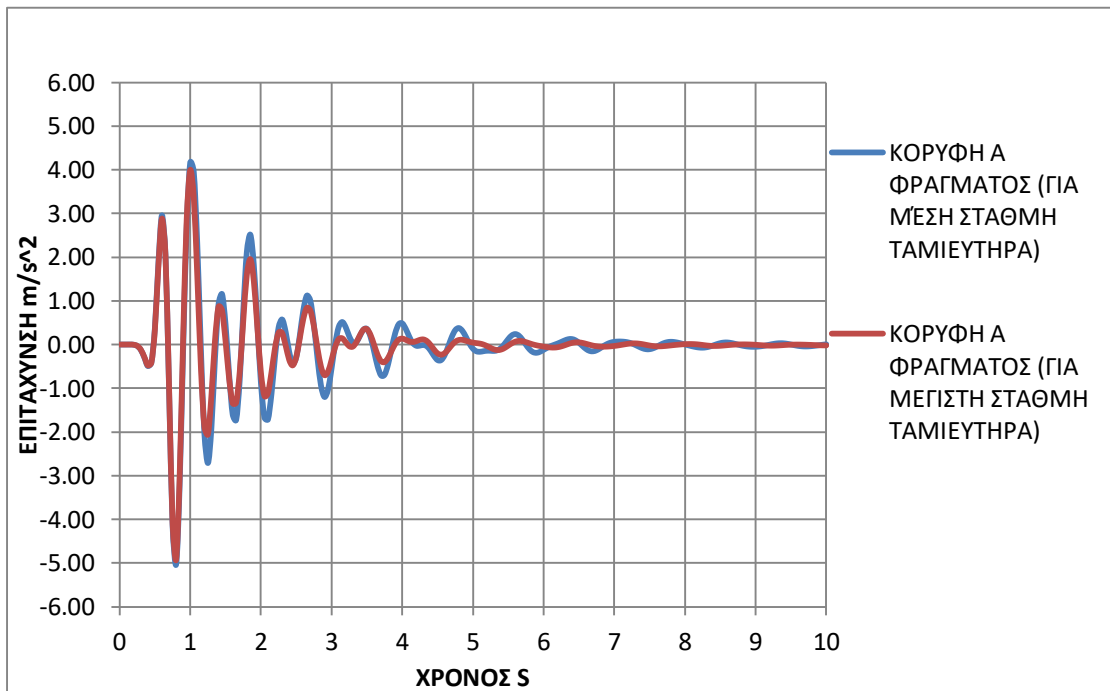
Εικόνα 5.245 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα



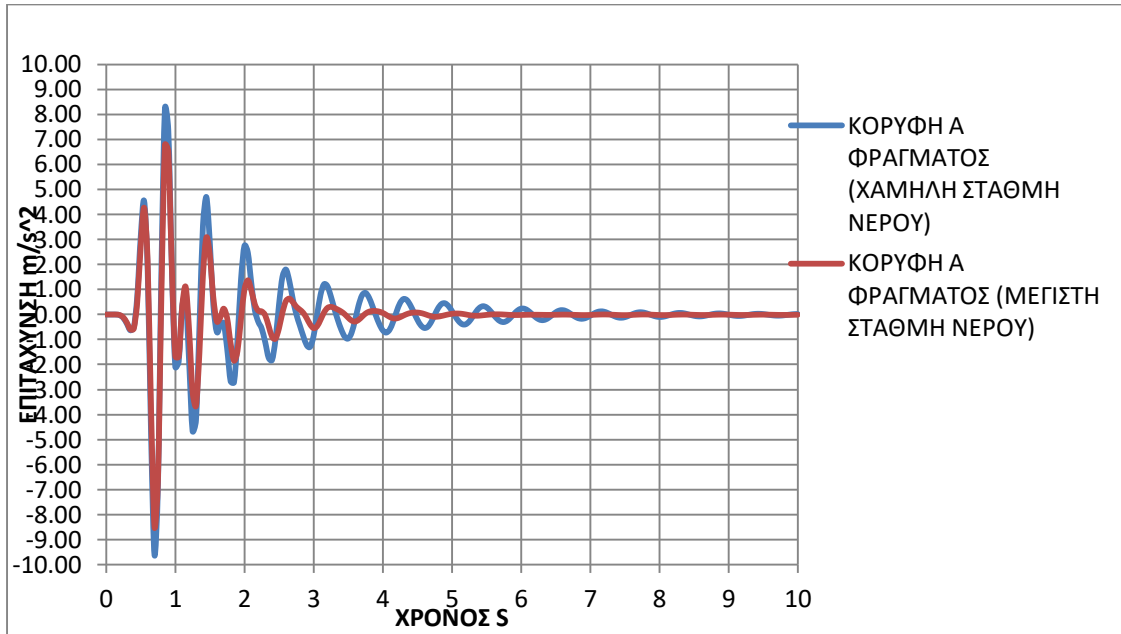
Εικόνα 5.246 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα



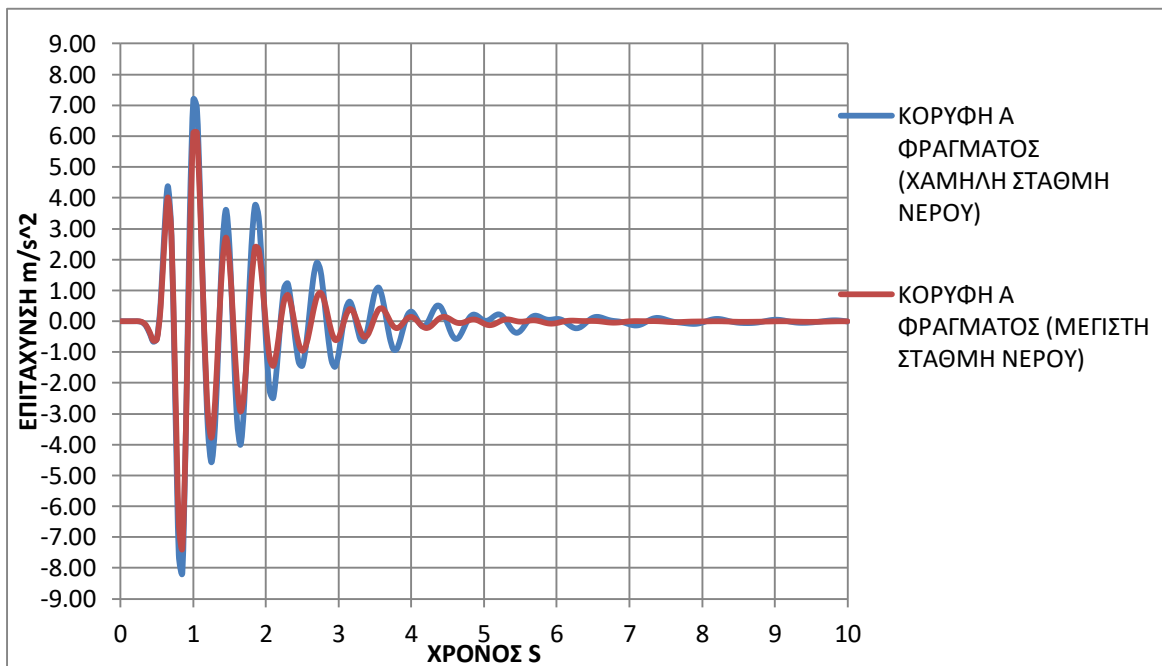
Εικόνα 5.247 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου A για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



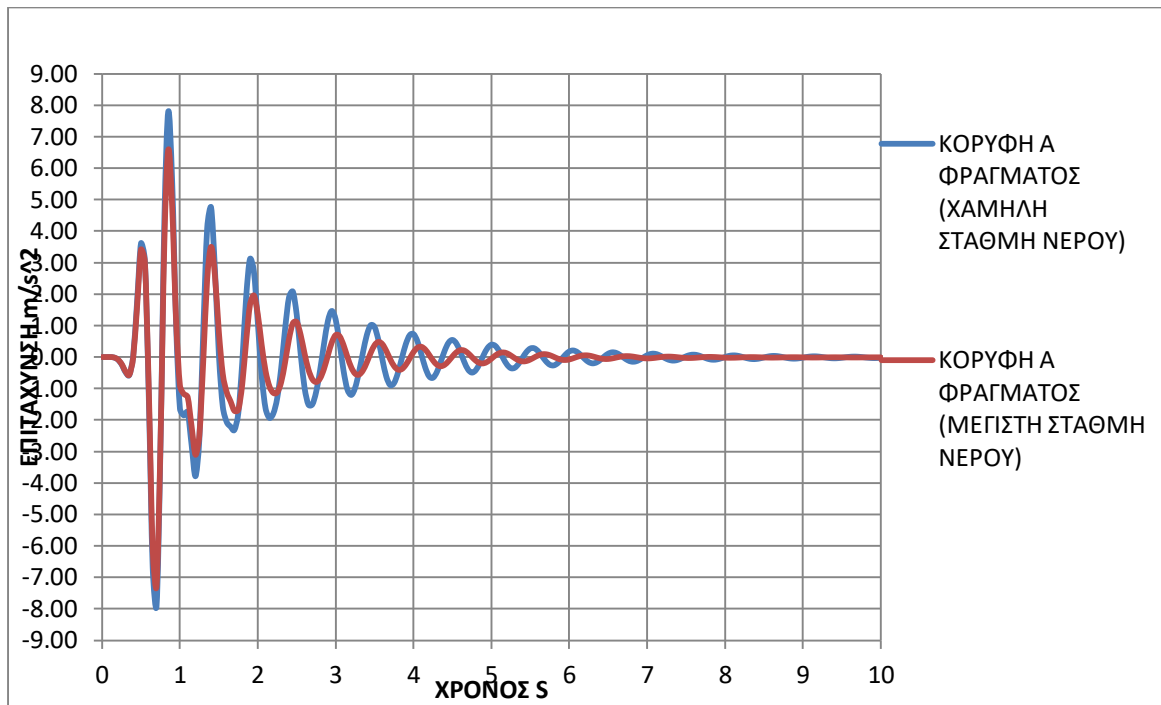
Εικόνα 5.248 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου A για μέση και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



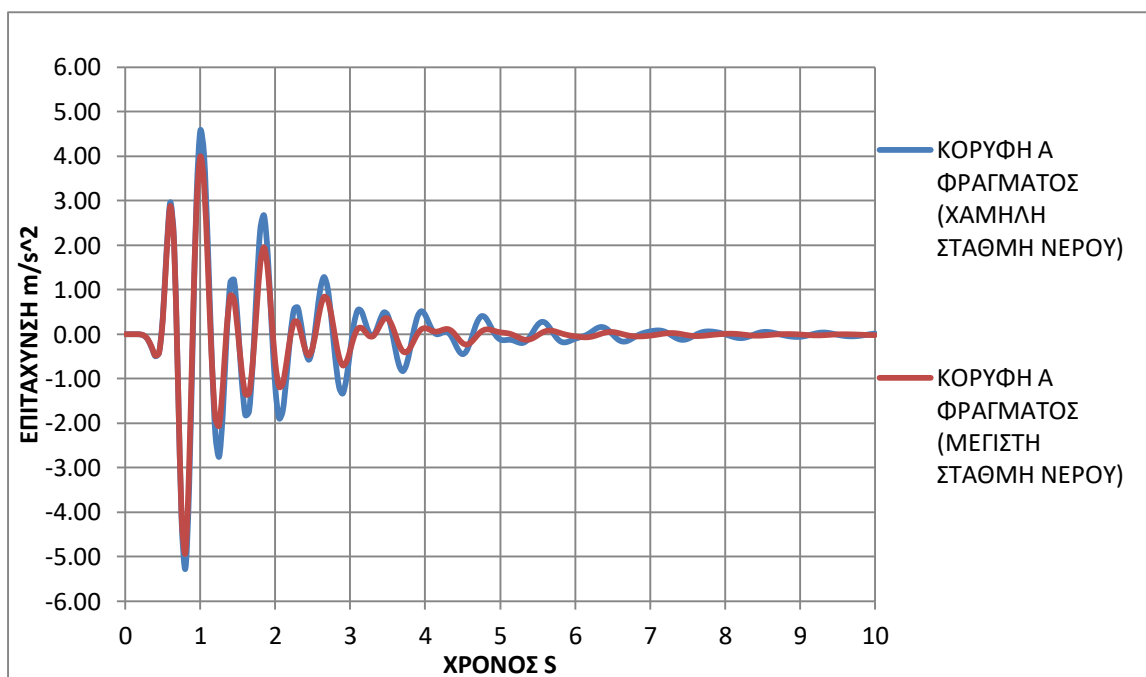
Εικόνα 5.249 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



Εικόνα 5.250 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 60 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



Εικόνα 5.251 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε βραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ



Εικόνα 5.252 Σύγκριση χρονιστοριών σημείου Α για χαμηλή και μέγιστη στάθμη νερού σε περίπτωση φράγματος κλίσης 45 μοιρών σε ημιβραχώδες υπόστρωμα για δόνηση RICKER-2HZ

Το πρώτο πράγμα που παρατηρήθηκε με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα είναι ότι η σεισμική συμπεριφορά του φράγματος εξαρτάται κυρίως από την συχνότητα της σεισμικής διέγερσης, την γεωμετρία του φράγματος, το εδαφικό υπόστρωμα στο οποίο εδράζεται και η ύπαρξη νερού στον ταμιευτήρα. Ο συντονισμός του

φράγματος είναι εξαρτάται εκτός από την συχνότητα της σεισμικής δόνησης και από την γεωμετρία της κατασκευής. Στην παραπάνω περίπτωση για διέγερση των 2HZ στην περίπτωση του φράγματος με κλίση 45 μοιρών έχουμε συντονισμό, πράγμα το οποίο δεν παρατηρείται στην περίπτωση του φράγματος με κλίση πρικών 60 μοίρες. Ο ημίβραχος αποτρέπει τον συντονισμό στην περίπτωση του φράγματος 45 μοιρών σε σχέση με τον βράχο. Παρόλο αυτά παρατηρήθηκε, για κάθε μία από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω, ότι ο ημίβραχος ενισχύει την επιτάχυνση των σημείων που βρίσκονται στην κορυφή της εδαφικής στρώσης σε αντίθεση με τον βράχο ο οποίος απλώς μεταφέρει την σεισμική διέγερση στα σημεία αυτά.

Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι το νερό όταν βρίσκεται στην μέση στάθμη του ταμιευτήρα η σεισμική συμπεριφορά του μοντέλου δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου. Ενώ όταν βρίσκεται στην μέγιστη στάθμη του τότε επιδρά κάπως ευεργετικά στο προσομοίωμά μειώνοντας την επιτάχυνση στα σημεία του φράγματος. Παρόλο αυτά η διαφορά θεωρείται σχετικά μικρή. Στην περίπτωση που το φράγμα μας έχει κλίση 45 μοίρες και βρίσκεται πάνω σε βράχο το νερό υπό την μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα το αποσυντονίζει μειώνοντας σημαντικά την μέγιστη επιτάχυνσή του για την σεισμική δόνηση των 2HZ. Το φράγμα με γωνία κλίσης 45 μοίρες σε βραχώδες υπόστρωμα δεν αποσυντονίζεται και όταν το νερό βρίσκεται στην μέση στάθμη στον ταμιευτήρα για τα 2HZ.

6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

1. Ο σχεδιασμός ενός φράγματος μπορεί να έχει οφέλη για τον άνθρωπο, για αυτό θα πρέπει να γίνονται εκτεταμένες και λεπτομερείς μελέτες ώστε να μην έχουν αρνητικές συνέπειες.
2. Οι τύποι φραγμάτων που επιλέγονται διαφέρουν ανάλογα με τις ανάγκες που εξυπηρετούν και τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.
3. Για τον σχεδιασμό ενός φράγματος θα πρέπει πρώτα να λαμβάνονται υπόψιν οι σεισμικοτεκτονικές συνθήκες που υπάρχουν στην περιοχή και η διερεύνηση της γύρω περιοχής όσο αφορά την ύπαρξη και τον εντοπισμό ενεργού ρήγματος
4. Θα πρέπει να δίνεται επίσης ιδιαίτερη έμφαση στις καθιζήσεις που μπορούν να προκύψουν λόγω του βάρους που δέχεται η εδαφική στρώση ή λόγω της μη καλής συμπύκνωσης του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται. Το τελευταίο αφορά κυρίως χωμάτινα φράγματα.

5. Θα πρέπει να γίνεται κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζονται τα φράγματα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος, όσο και τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του
6. Επιπλέον, θα πρέπει να γίνεται κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο μια σεισμική δόνηση επιδρά στην καταπόνηση του φράγματος και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η ύπαρξη του νερού στον ταμιευτήρα το οποίο εισάγει επιπλέον υδροδυναμικές ωθήσεις, το υπόστρωμα πάνω στο οποίο εδράζεται και ανάλογα με το υλικό του μπορεί να ενισχύει ή να περιορίζει την σεισμική δόνηση η οποία ασκείται στο σώμα του φράγματος. Ένας άλλος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η σεισμική συμπεριφορά του φράγματος είναι και η γεωμετρία της διατομής του. Συγκεκριμένα με βάση την παραπάνω μελέτη παρατηρήθηκε ότι διαφορετική συμπεριφορά απέναντι σε σεισμική δόνηση έχει ένα φράγμα σε σχέση με κάποιο άλλο όταν διαφέρει ως προς την γωνία κλίσης των πρανών του ή ως προς το ύψος του, με δεδομένο ότι το υλικό κατασκευής τους είναι το ίδιο για όλες τις περιπτώσεις
7. Κάποιες μεθοδολογίες μπορεί να είναι πιο απλές όσον αφορά το υπολογιστικό τους κομμάτι σε σχέση με άλλες οι οποίες είναι πιο περίπλοκες και πιο ακριβείς. Για παράδειγμα, η μέθοδος του ψευδοστατικού συντελεστή είναι η πιο απλή και η πιο συνηθισμένη μέθοδος υπολογισμού σε σχέση με την μέθοδο των τάσεων-παραμορφώσεων όμως είναι λιγότερο ακριβής γιατί μας παρέχει συντελεστή ασφαλείας
8. Επίσης κατά τον σχεδιασμό της αντισεισμικής προστασίας ενός φράγματος θα πρέπει να ακολουθούνται κάποιοι κανόνες-οδηγίες για όσο τον δυνατόν περισσότερη ασφάλεια. Εδώ αναφέραμε οδηγίες του ελληνικού αντισεισμικού σχεδιασμού (ΕΑΚ 2000), του ευρωπαϊκού αντισεισμικού σχεδιασμού και οδηγίες του αντισεισμικού σχεδιασμού των Η.Π.Α.
9. Οι οδηγίες που ακολουθούνται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι οι ίδιες ανεξαρτήτως κατηγορίας και τύπου φράγματος

6.2 Προτάσεις

Σαν προέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσαν να μελετηθούν διάφορα σχετικά με τα φράγματα:

1. Να ληφθούν υπόψιν περισσότερες σεισμικές διεγέρσεις, με μεγάλο εύρος συχνοτικών περιεχομένων, ώστε να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση σεισμών διαφόρων συχνοτήτων στο φράγμα
2. Να ληφθεί υπόψιν η κατακόρυφη συνιστώσα των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων, οι οποίες δεν ελήφθησαν στην παρούσα εργασία
3. Να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με χρήση λογισμικού το οποίο θα πραγματοποιεί τρισδιάστατες προσομοιώσεις καθώς εδώ δεν ελήφθηκε υπόψιν η τρίτη διάσταση του φράγματος η οποία αντιμετωπίστηκε σαν άπειρου μήκους

Βιβλιογραφία

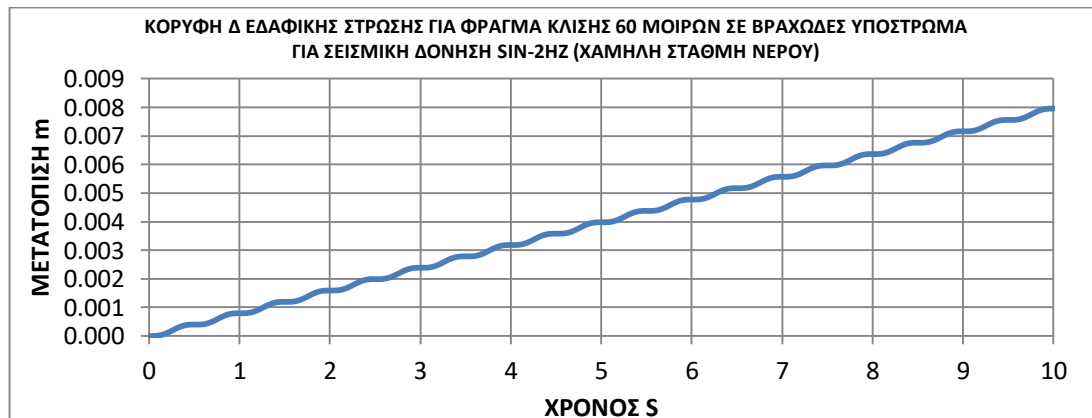
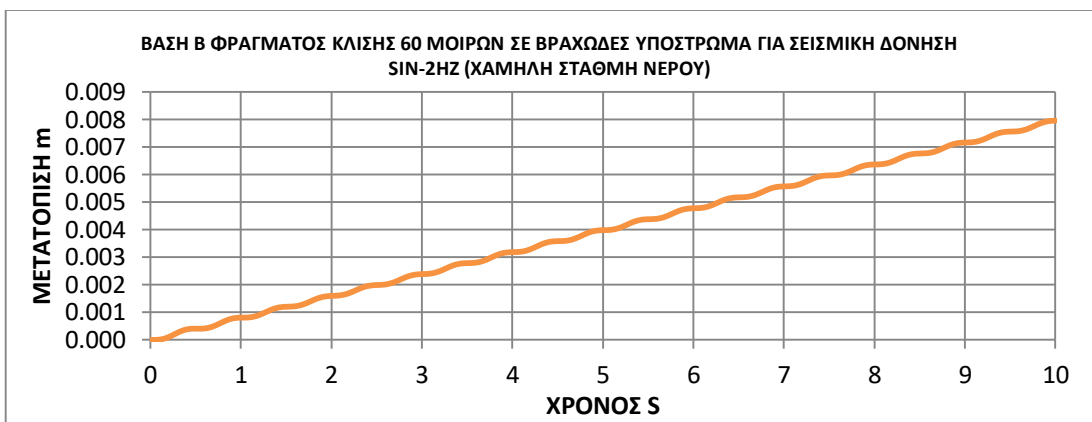
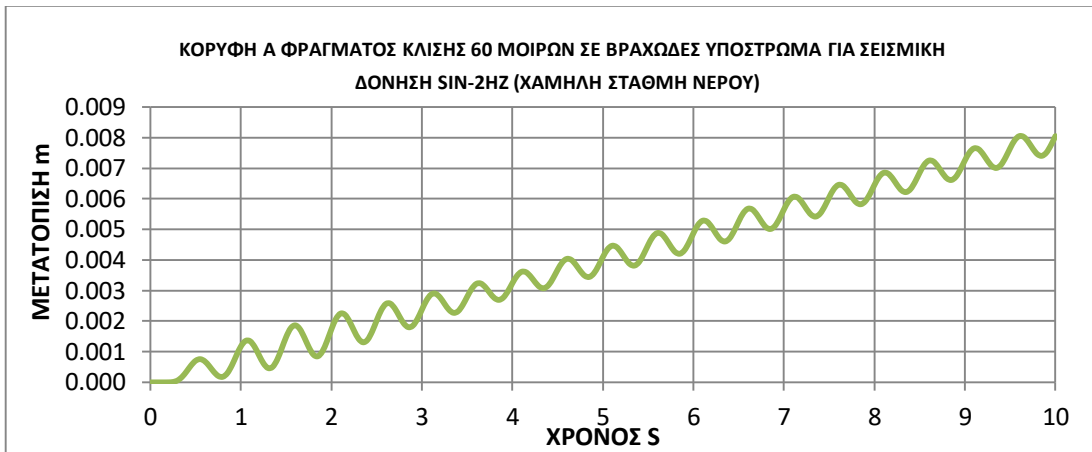
1. Robin fell, Patrick MacGregor, David Stapledon&Graeme Bell (2005) “GEOTECHNICAL ENGINEERING OF DAMS”, Taylor&Francis Group, London, UK
2. Ν.Ι.Μουτάφης (2009) “Τεχνολογία Γεωφραγμάτων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
3. Α.Γ. Παπαδημητρίου (2015) “ Ειδικά γεωτεχνικά έργα” , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
4. St. L. Kramer (1996) “GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING”, prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey 07458
5. Ελληνικός Αντισεισμικός Σχεδιασμός (ΕΑΚ 2000), ΟΑΣΠ, ΣΠΜΕ

6. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance (2004), EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels
7. Federal Guidelines for Dam safety (FEMA65): Earthquake Analyses and Design of Dams (2005)
8. Μ. Καββαδάς (2006) “ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ”, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Έκδοση 13, Αθήνα
9. Plaxis Version 8 Tutorial Manual
10. Μ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΤΟΣ (2019) “ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
11. Ι.Θανόπουλος & Κ.Αναστασόπουλος (2008): “Λιθόρριπτα φράγματα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος: Εμπειρίες από τον θεσσαλικό χώρο και σύγχρονη τεχνογνωσία, 1ο Πανελλήνιο συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ–Τμ.ΚΔΘ, 13-15 Νοεμβρίου, 2008: Λάρισα
12. Roller-Compacted Concrete, Second Edition (September 2017), U.S Department of the interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Denver, Colorado
13. Α.Δημοπούλου (2008): “ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΛΗΡΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ-ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»
14. Διαφάνειες Ν.Ι.Μουτάφης “Υδραυλικές κατασκευές-φράγματα (φράγματα χωμάτινα & λιθόρριπτα)”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
15. Φ.ΜΑΡΗΣ Διαλέξεις “Χαλαρά φράγματα ή γεωφράγματα Ξύλινοι και ξυλολίθινοι ουδοί” τόμος ΙΙΒ, Τμήμα Δασολογίας και διαχείρισης περιβάλλοντος και φυσικών πόρων εργαστήριο διευθέτησης ορεινών υδάτων και διαχείρισης κινδύνου, Προπτυχιακό Προπτυχιακό Πρόγραμμα σπουδών
16. <https://energypress.gr/news/aithiopia-kataskeyi-ydroilektrikoy-fragmatos-6000-mw>

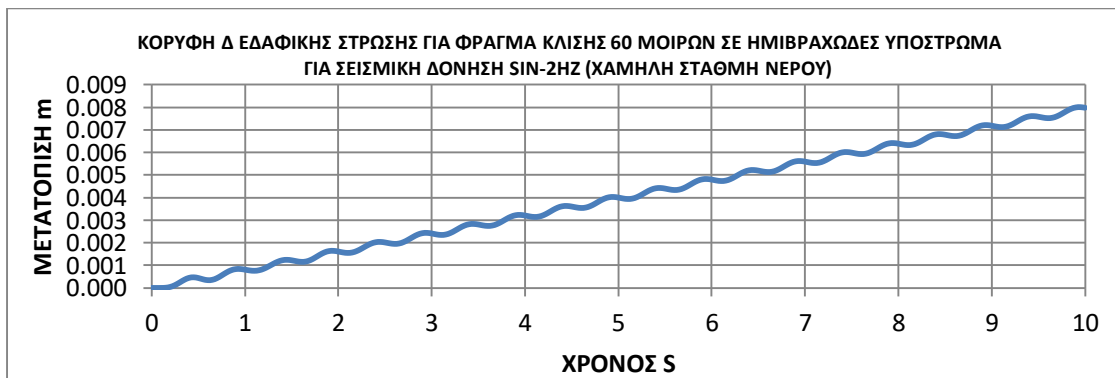
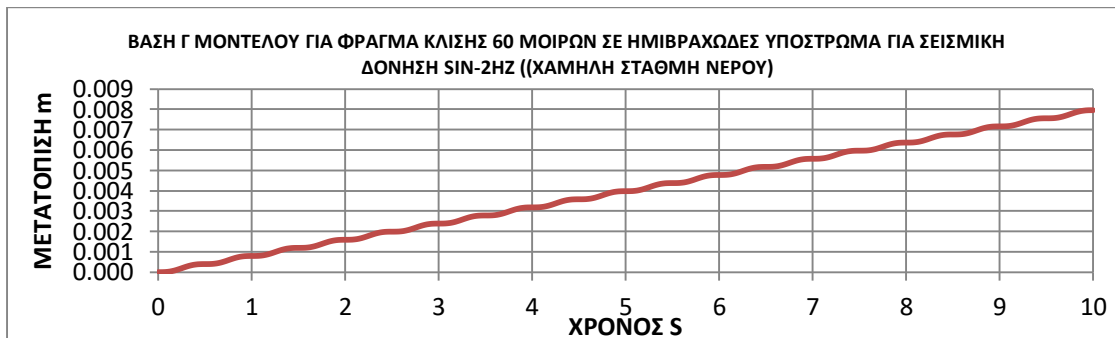
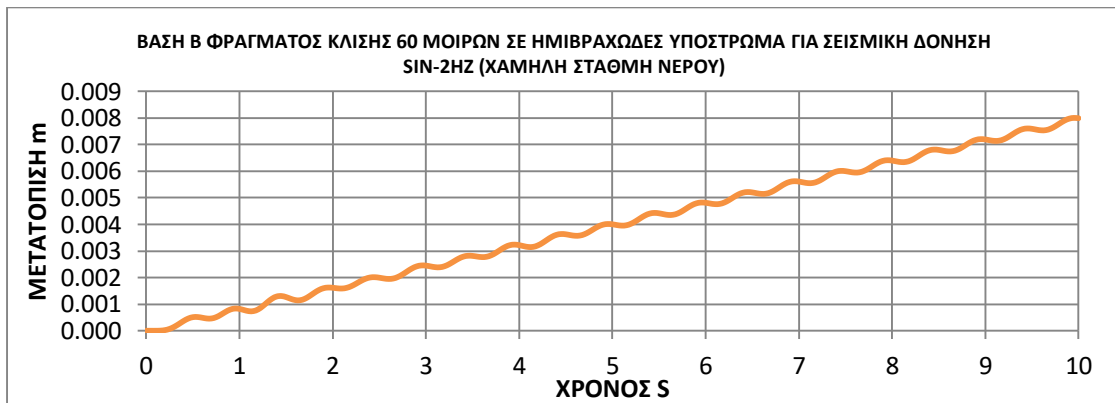
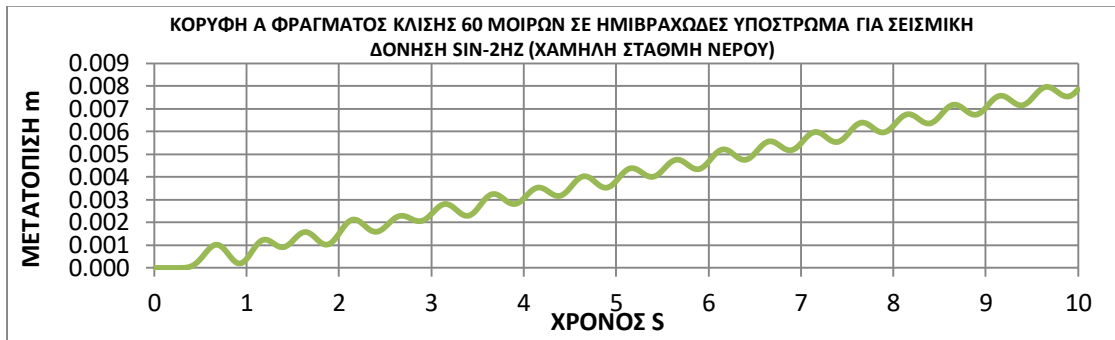
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ

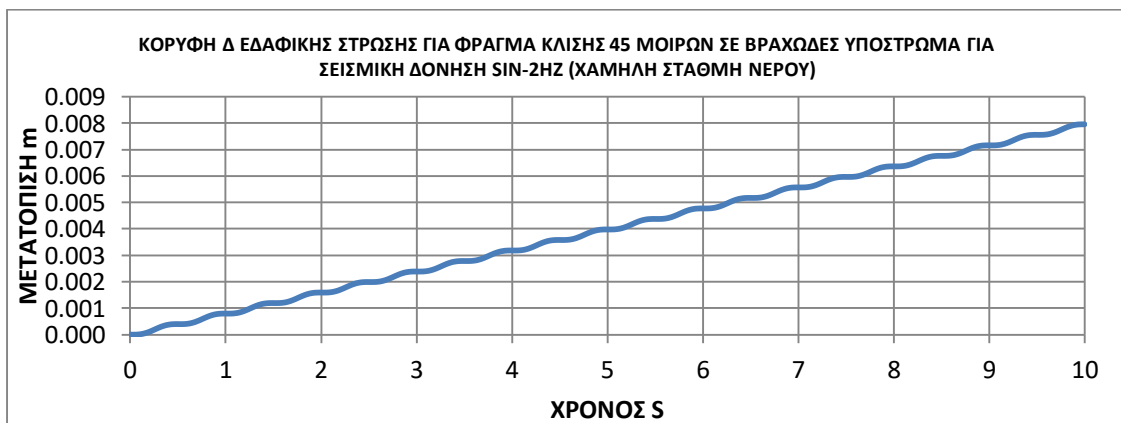
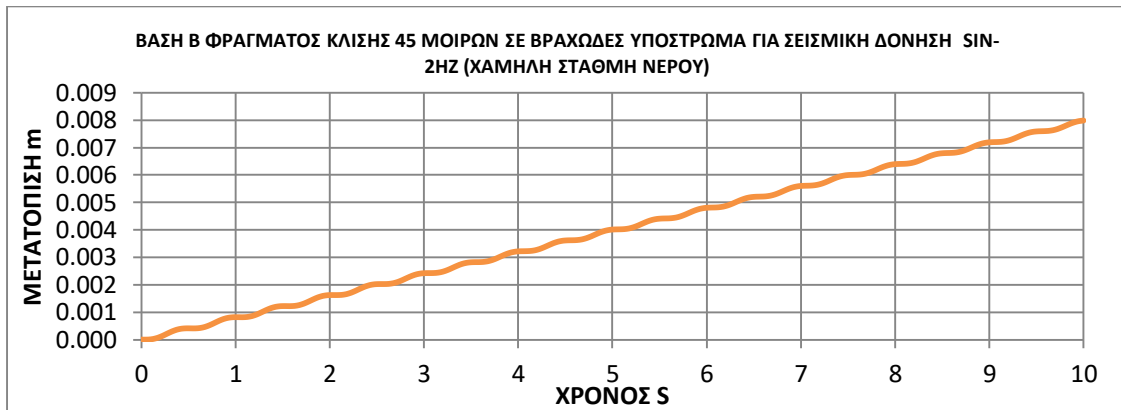
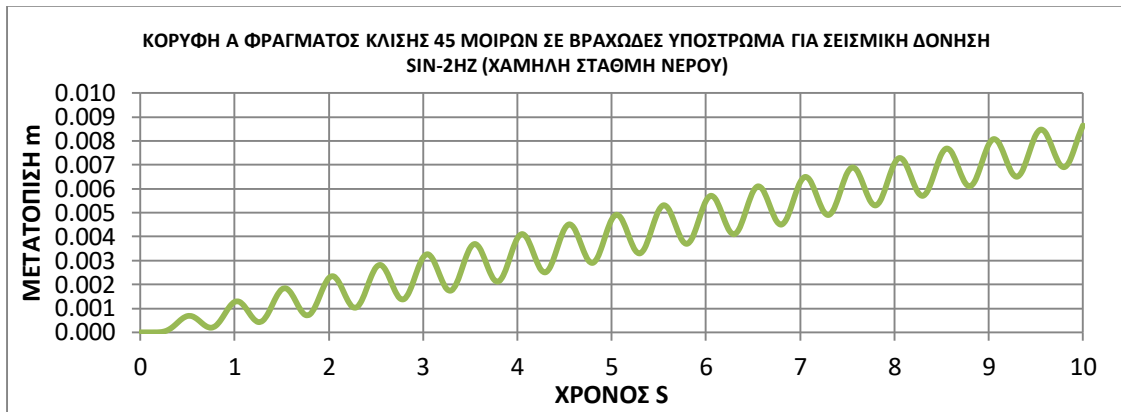
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



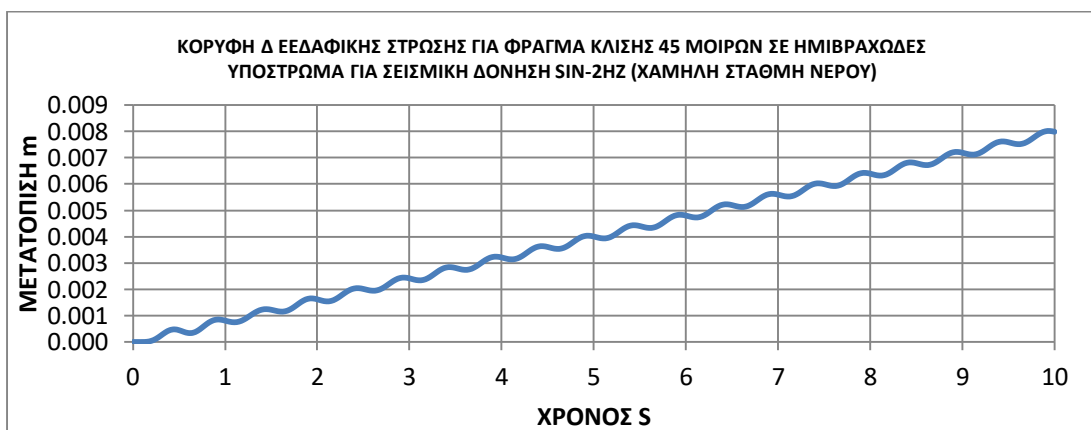
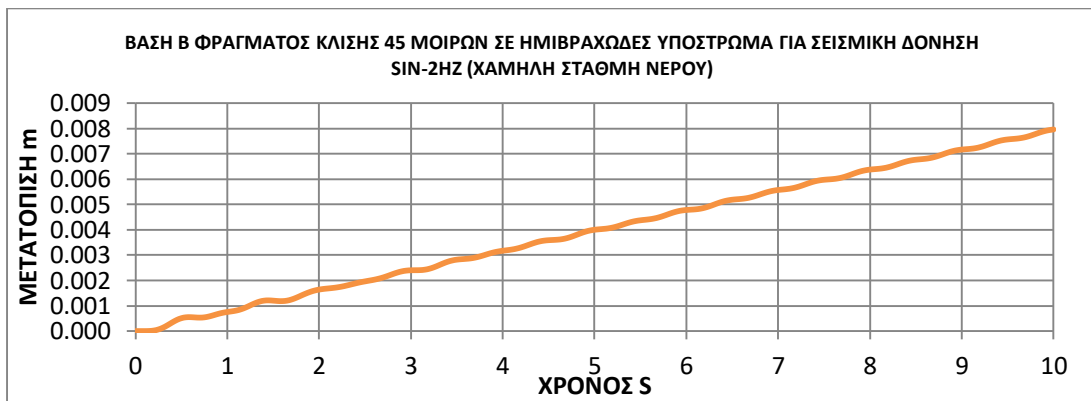
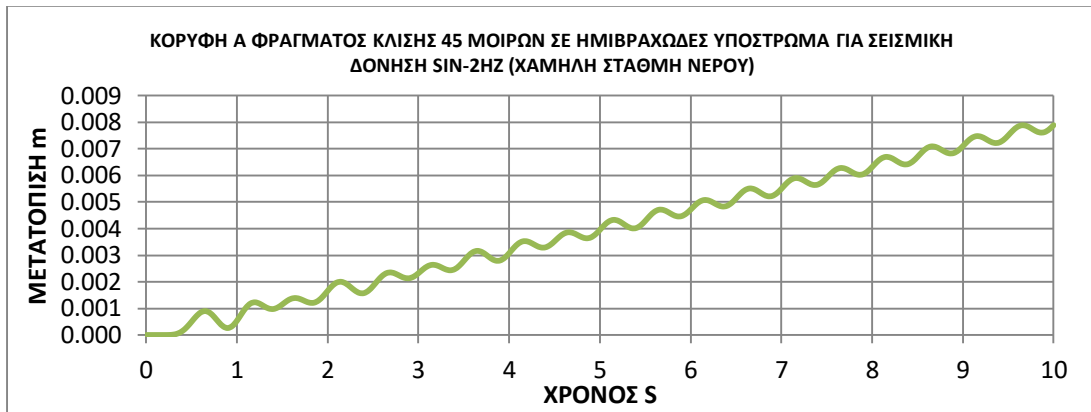
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



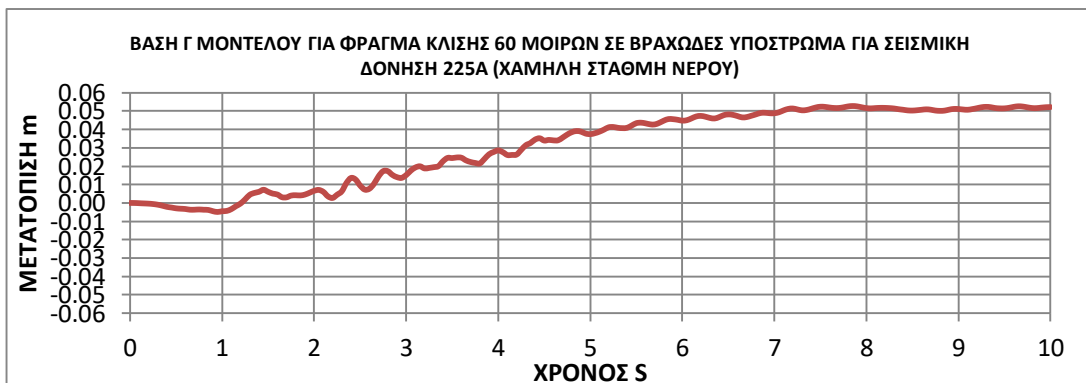
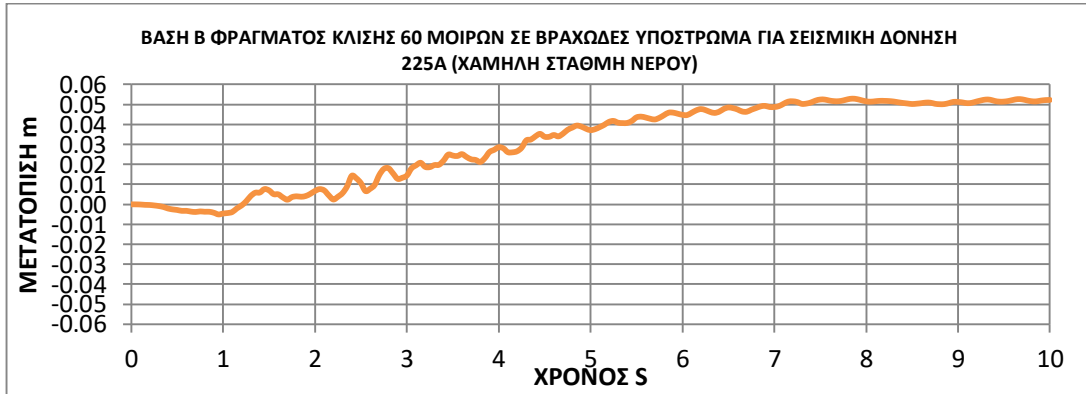
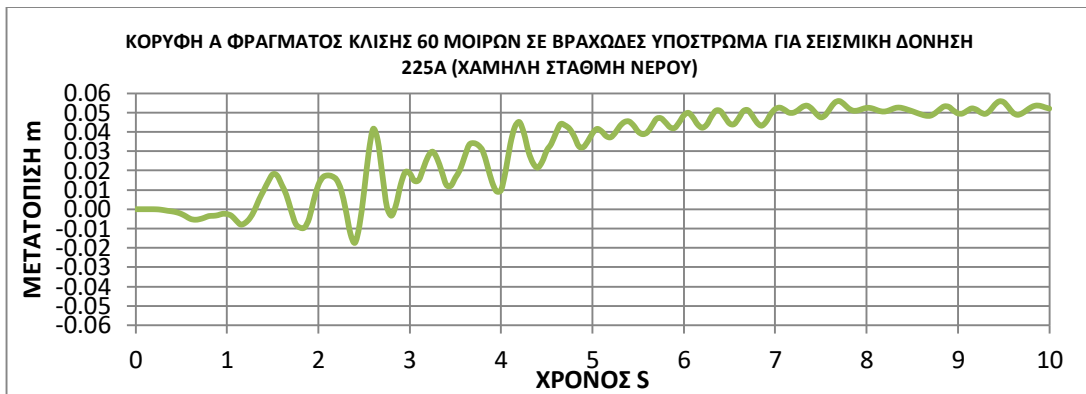
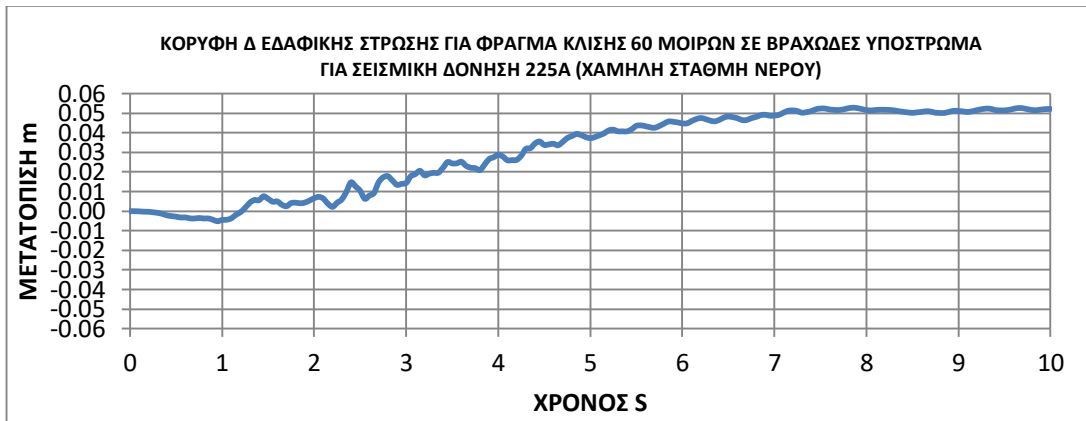
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



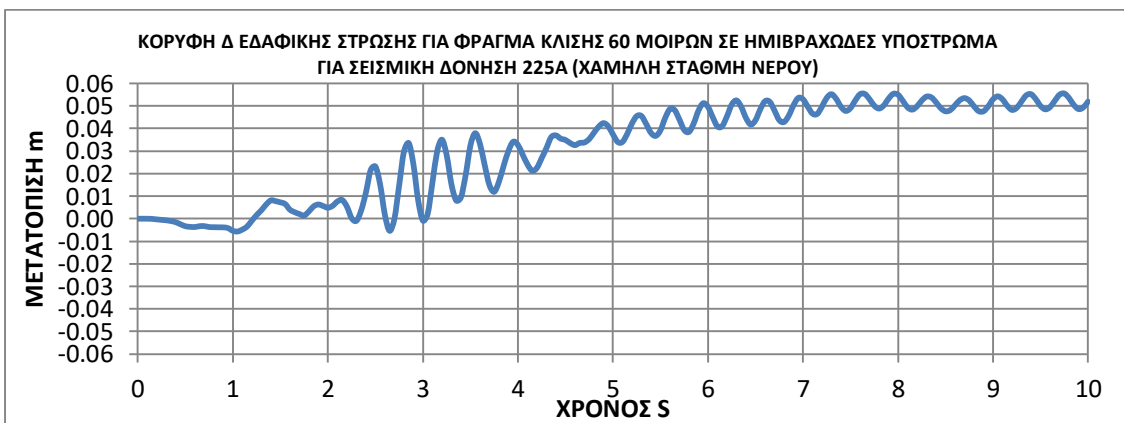
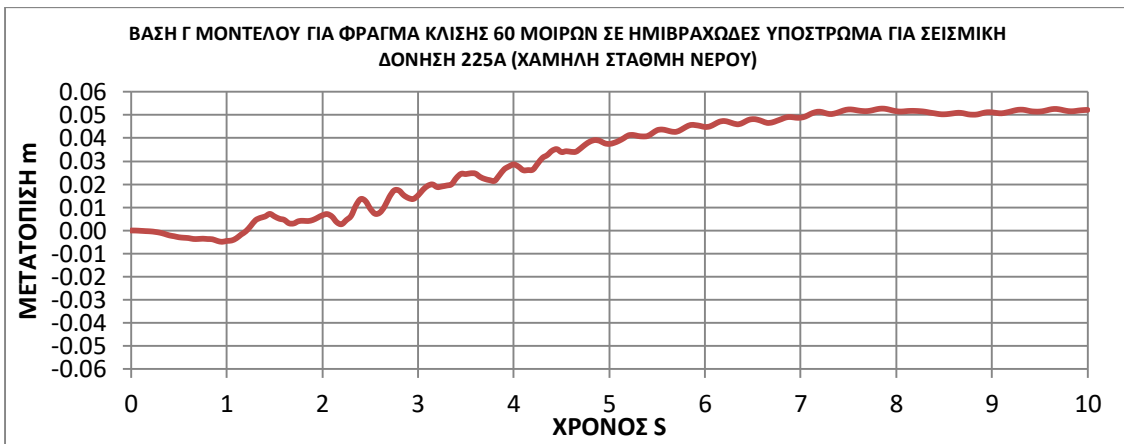
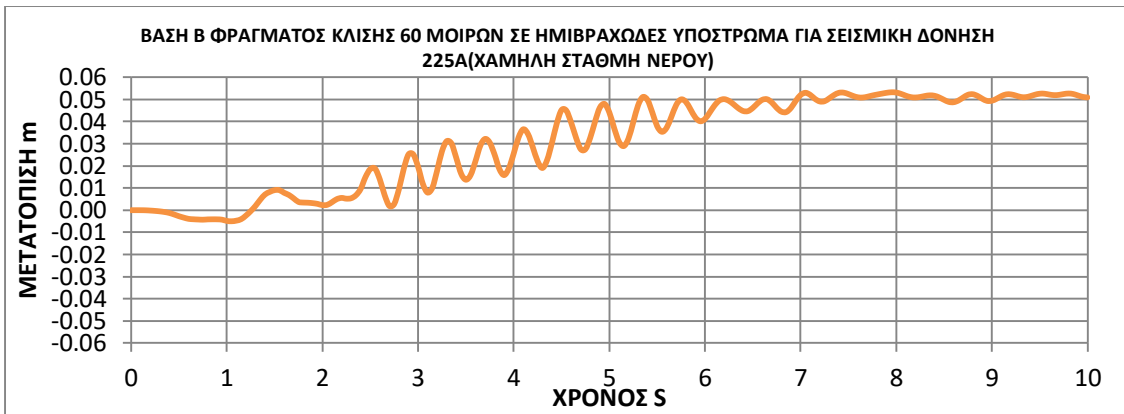
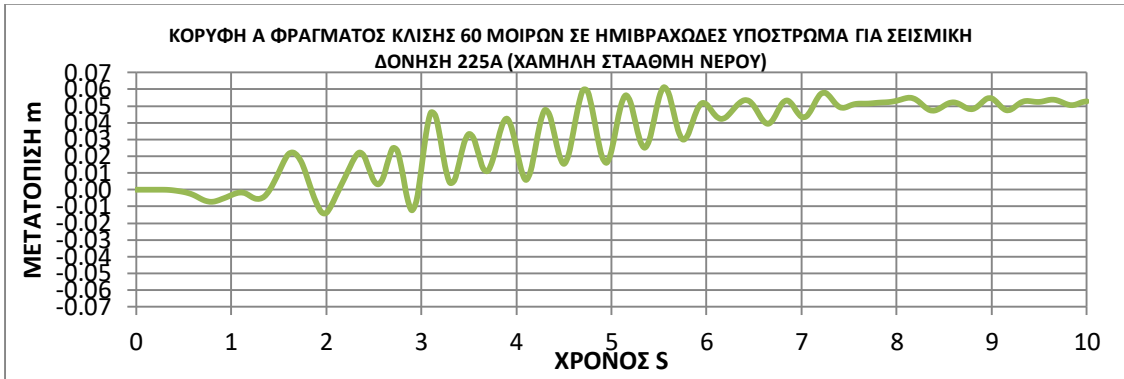
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



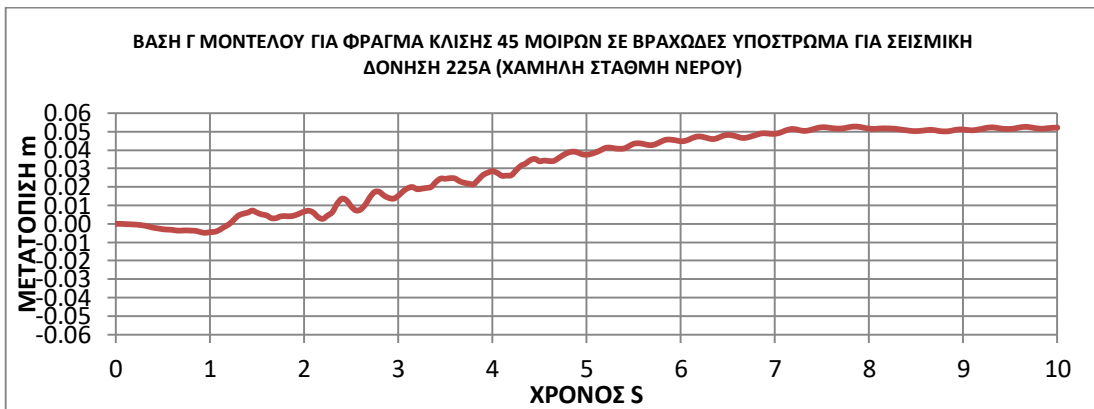
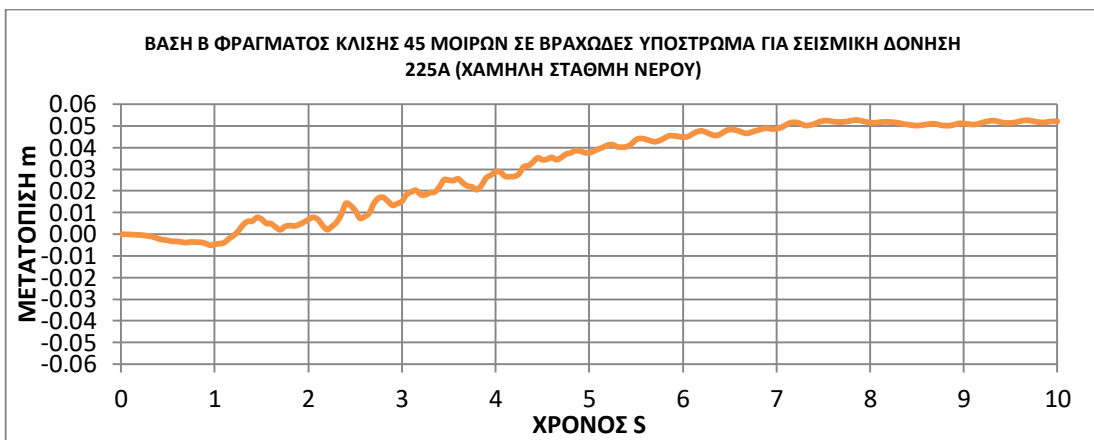
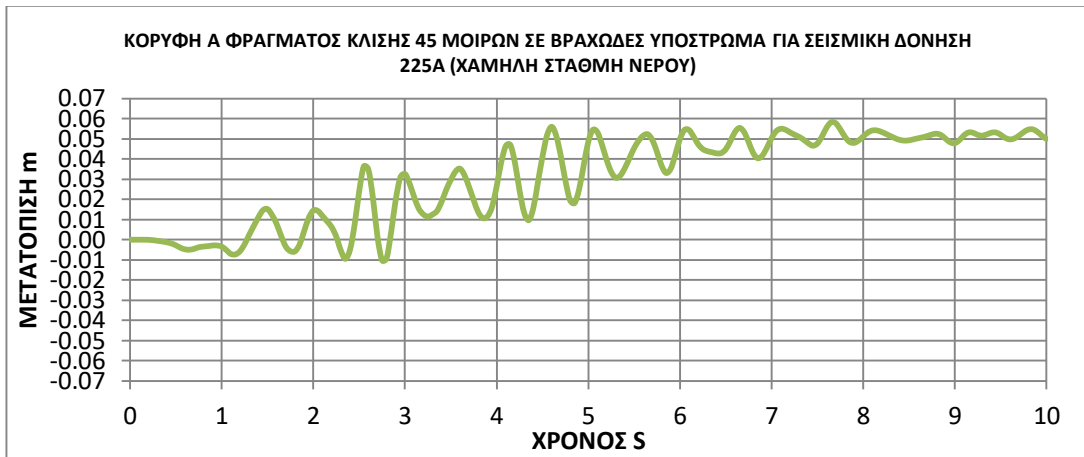
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



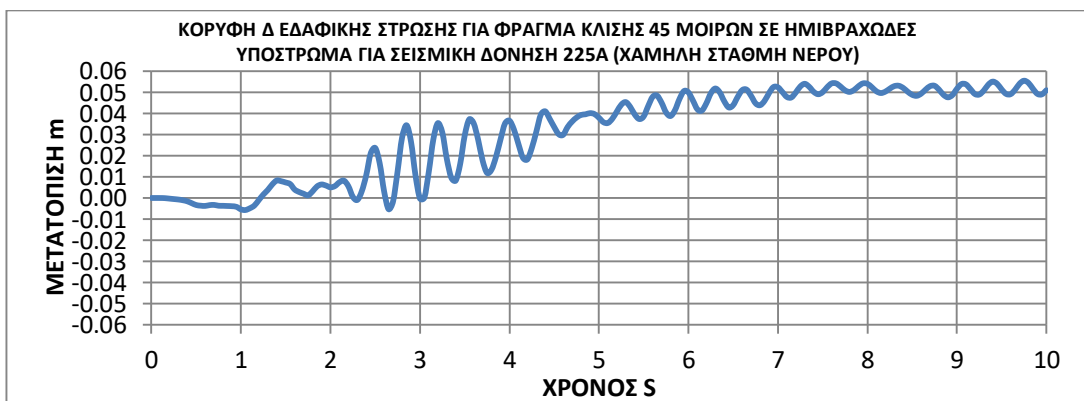
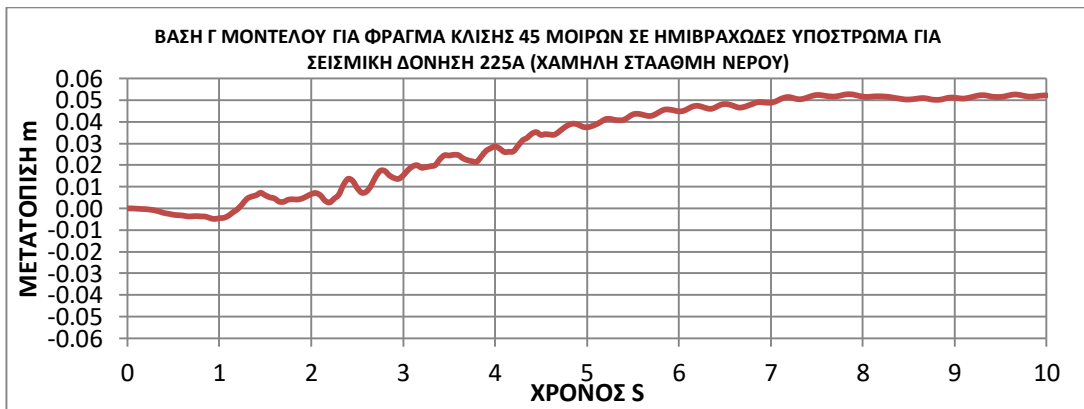
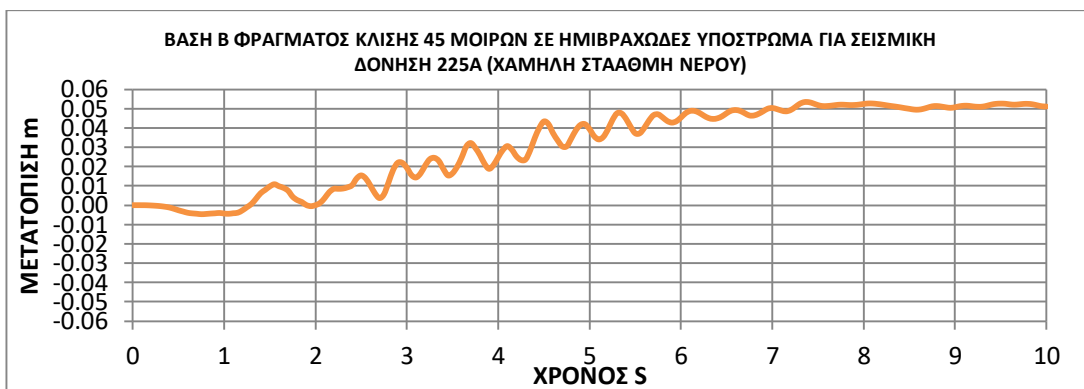
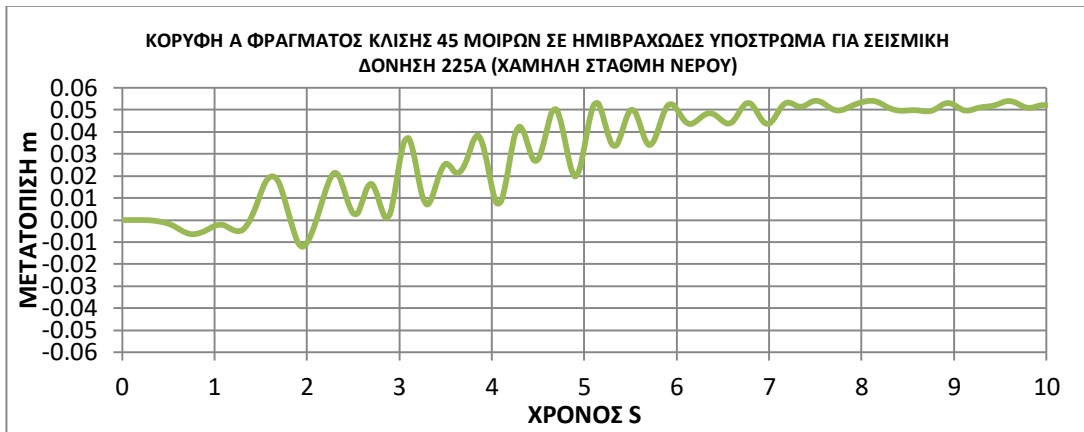
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



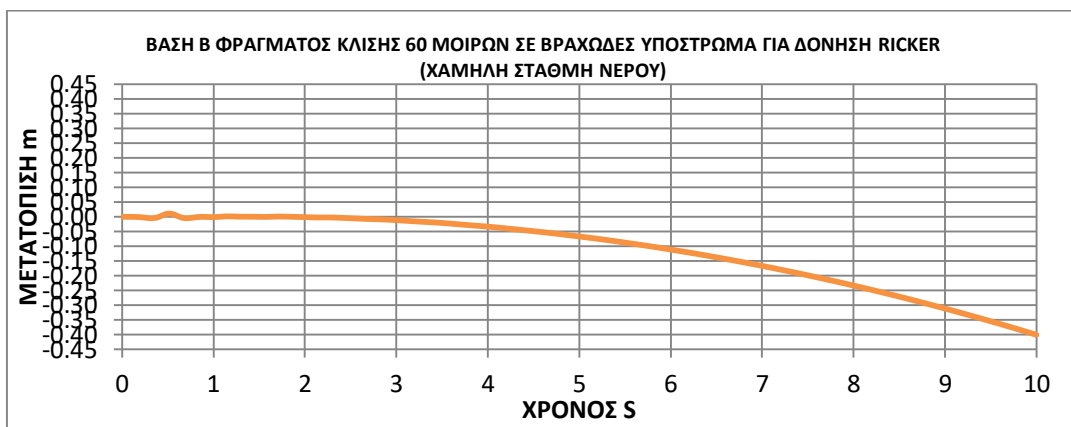
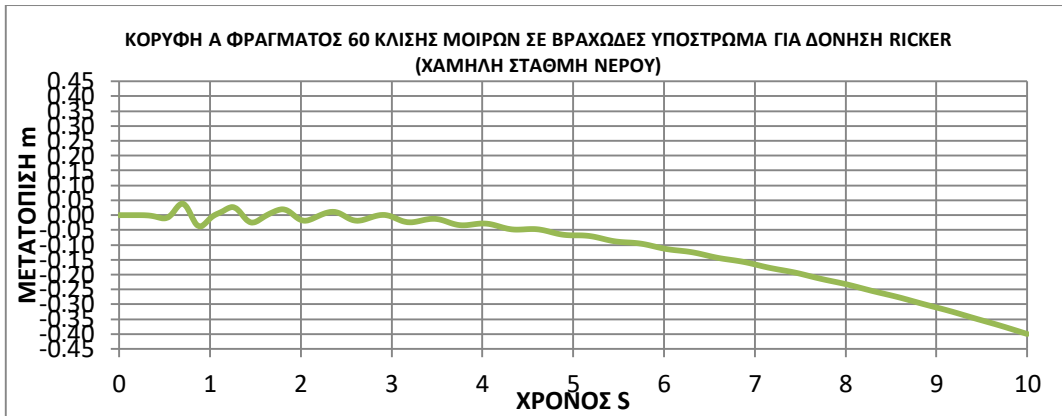
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



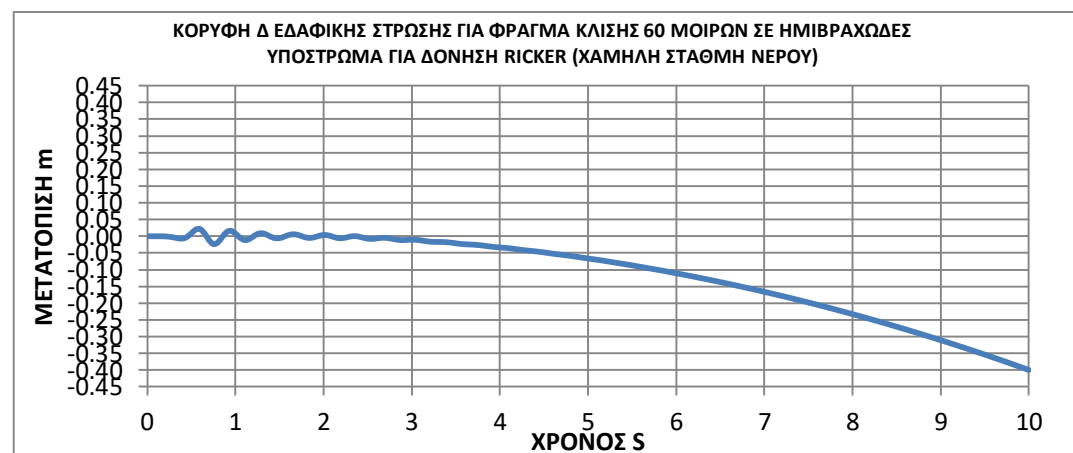
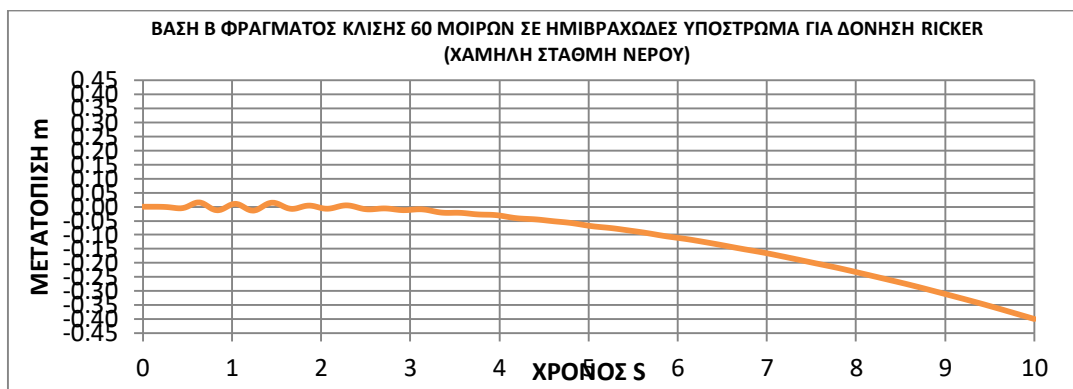
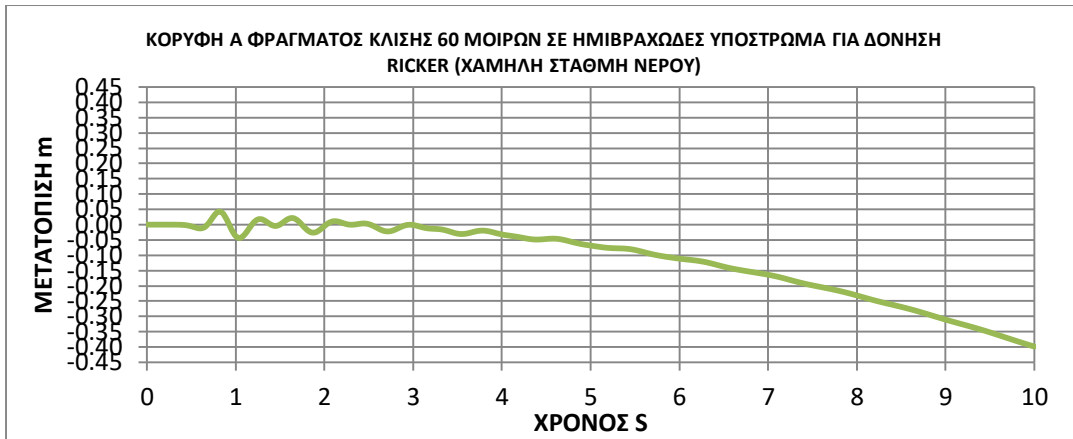
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



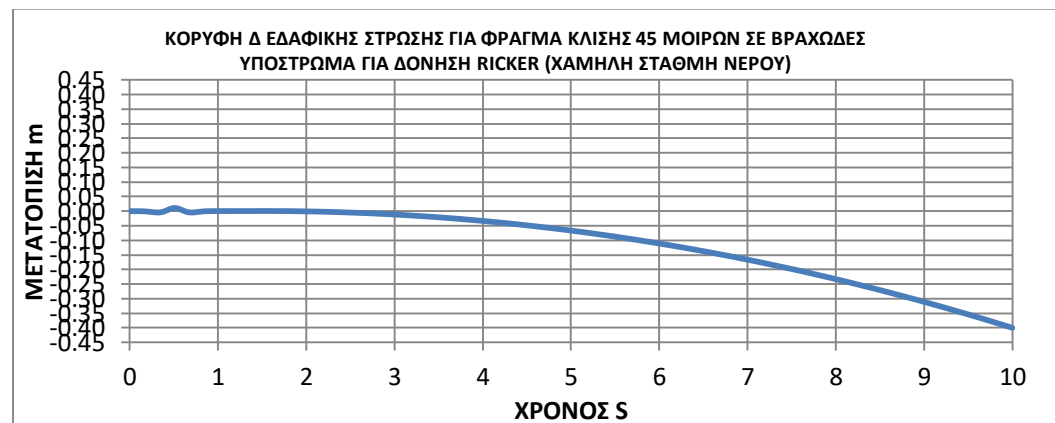
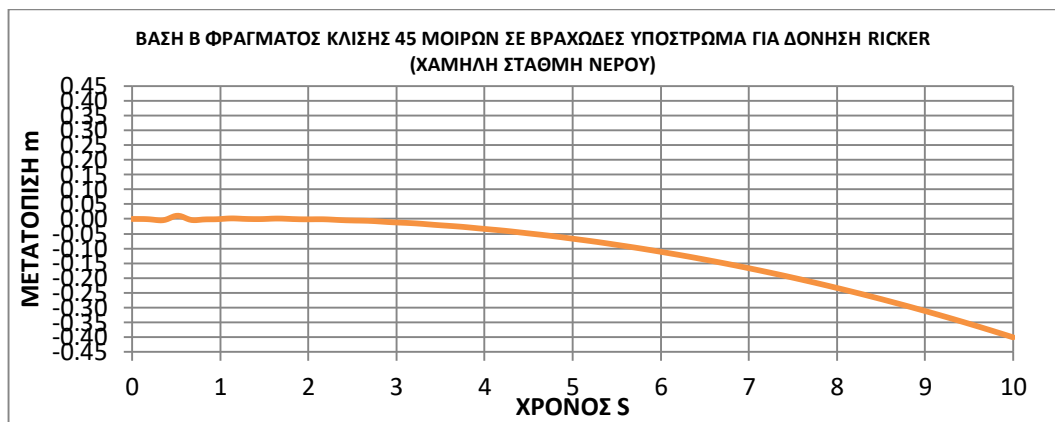
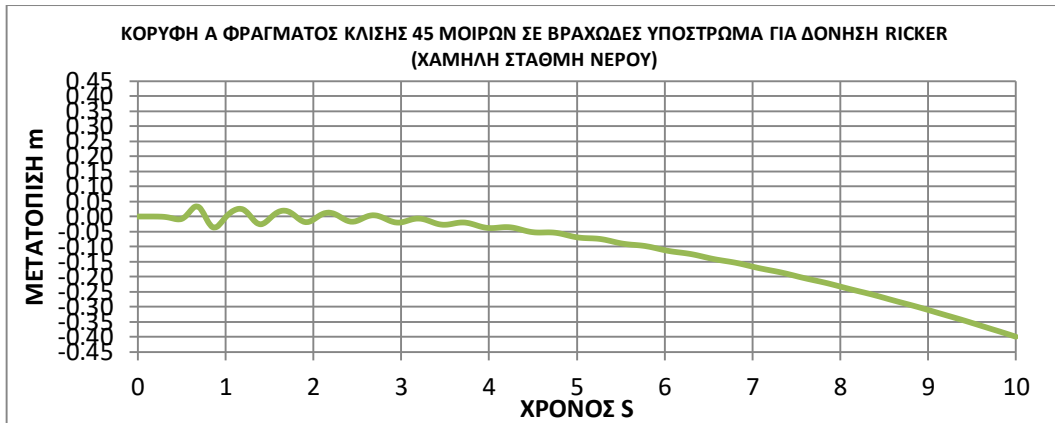
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο1



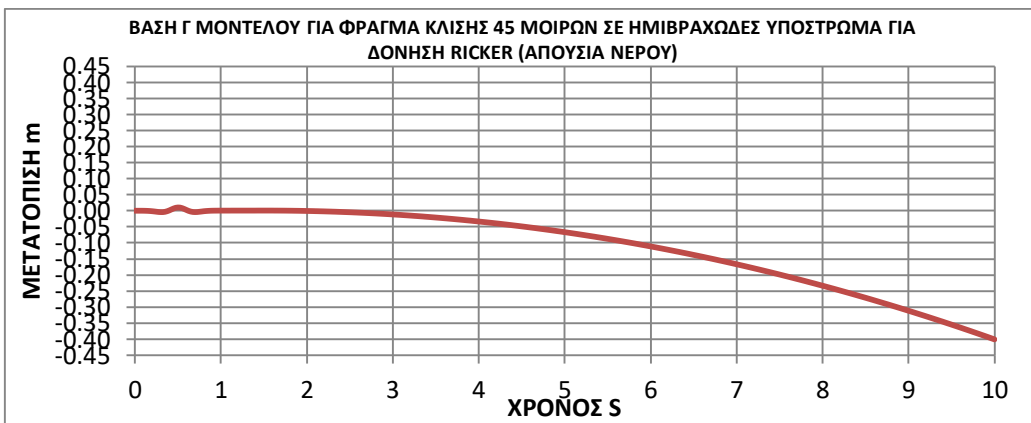
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο2



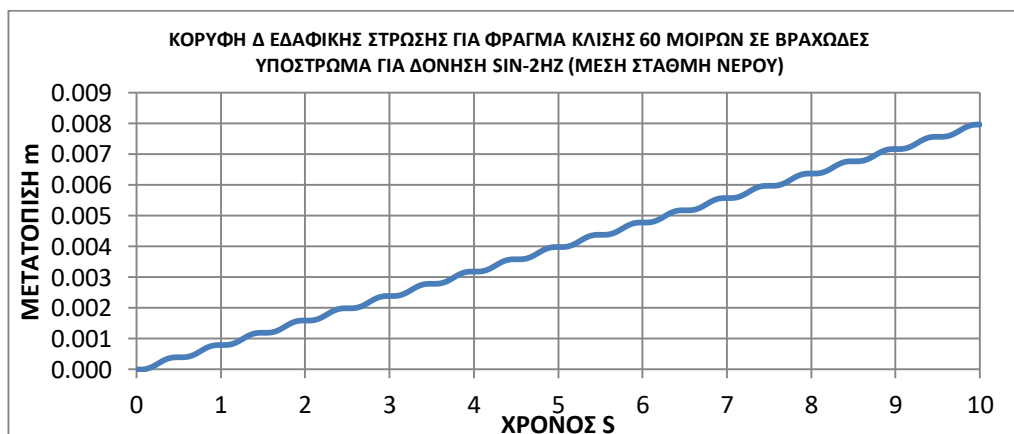
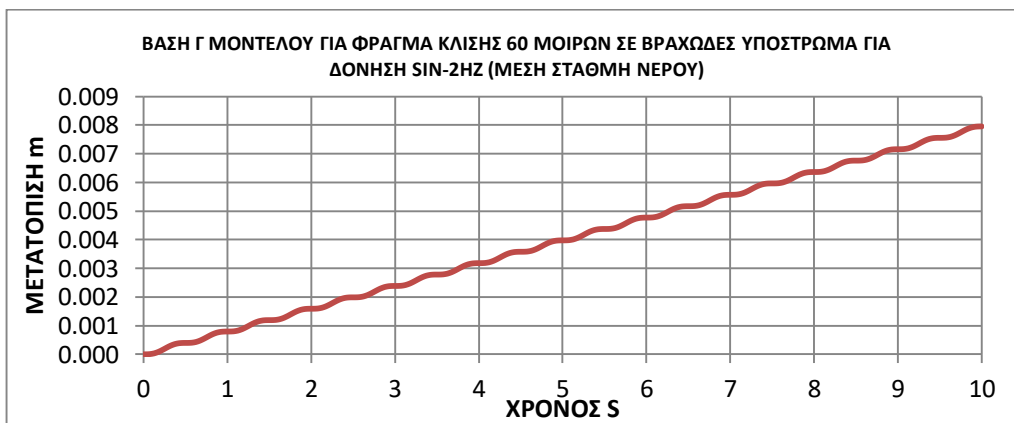
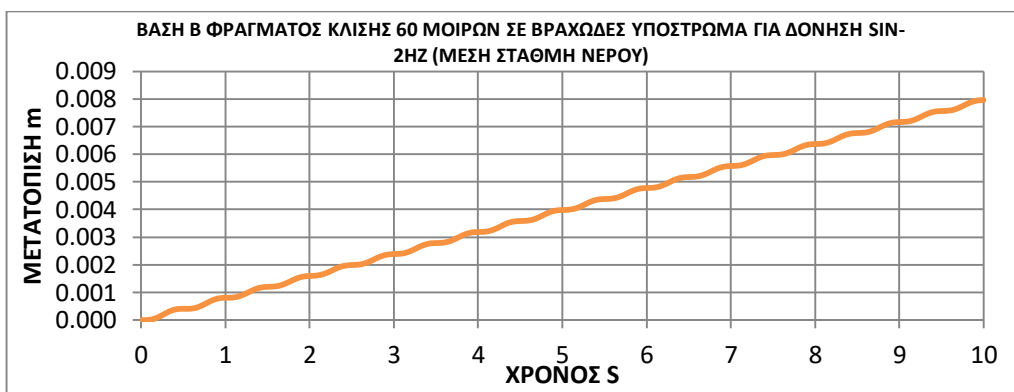
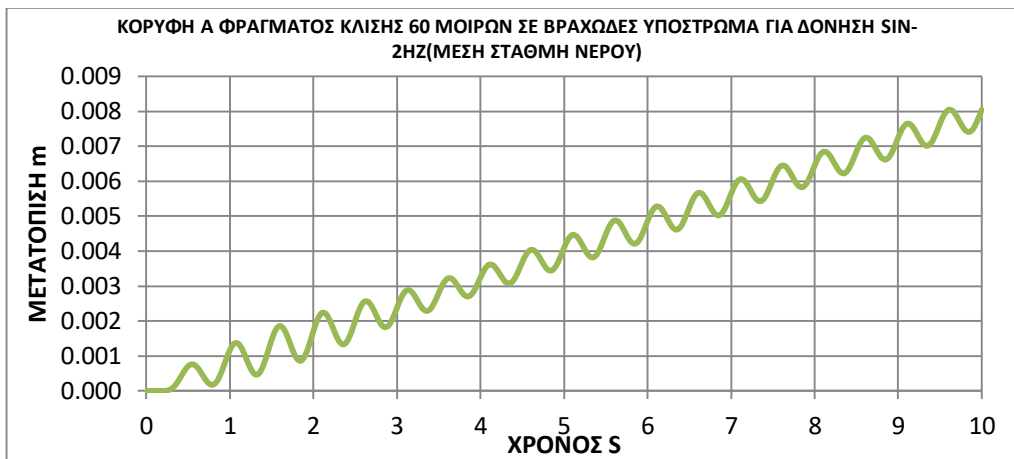
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο3



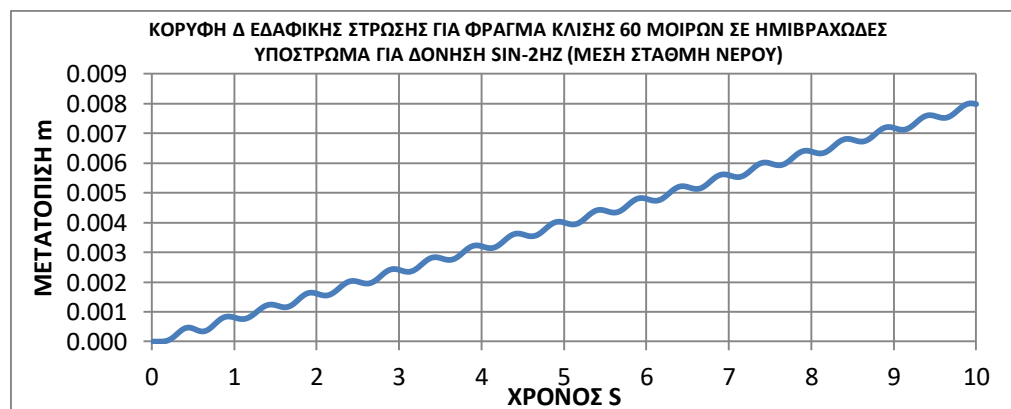
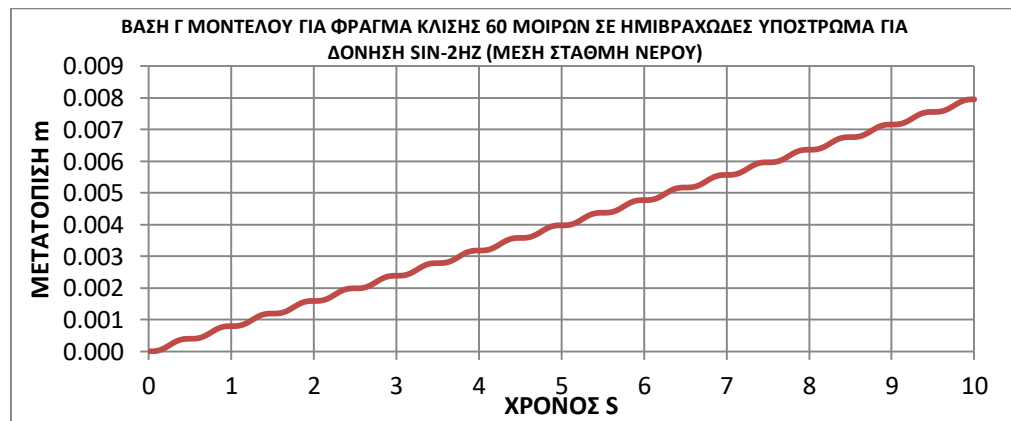
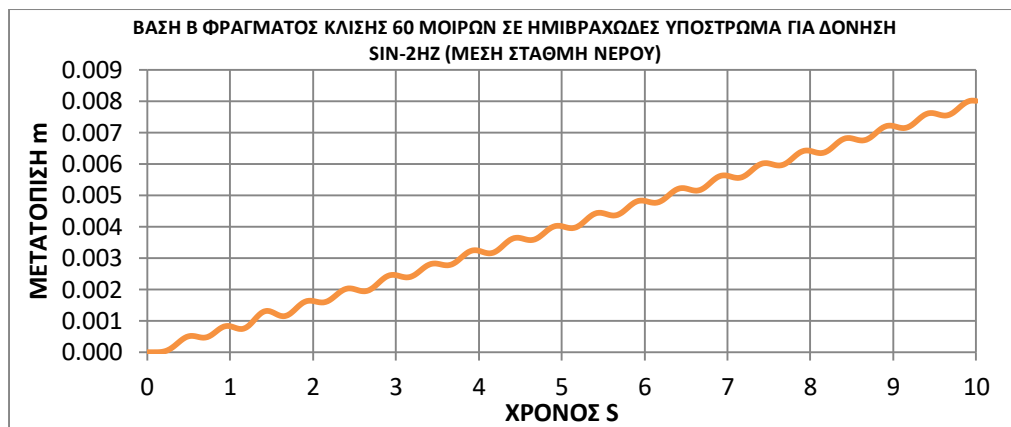
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο4



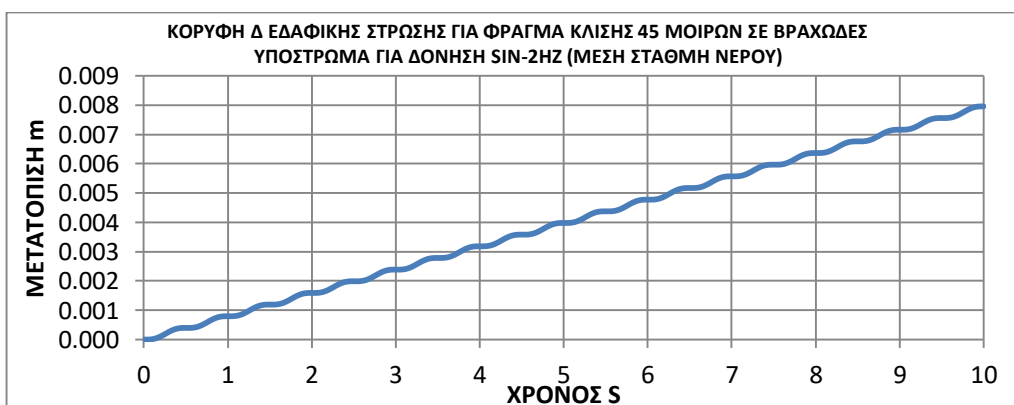
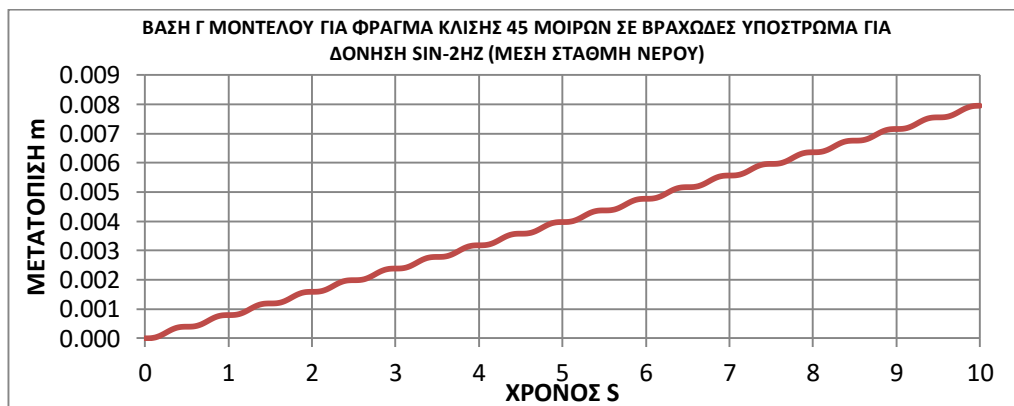
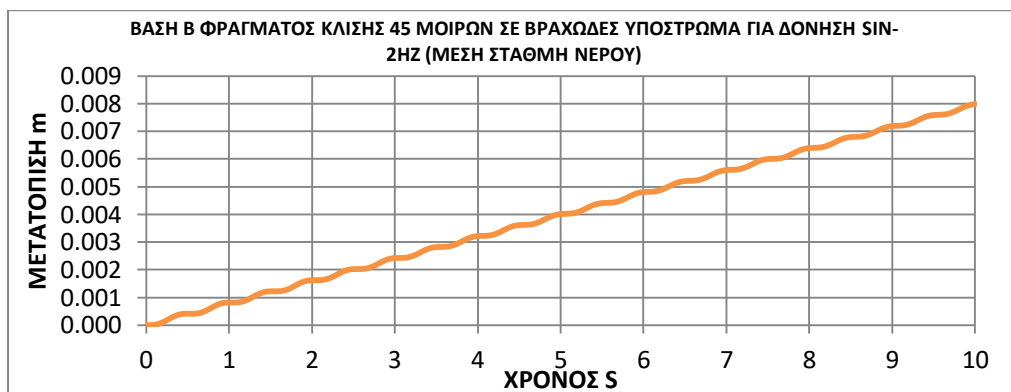
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



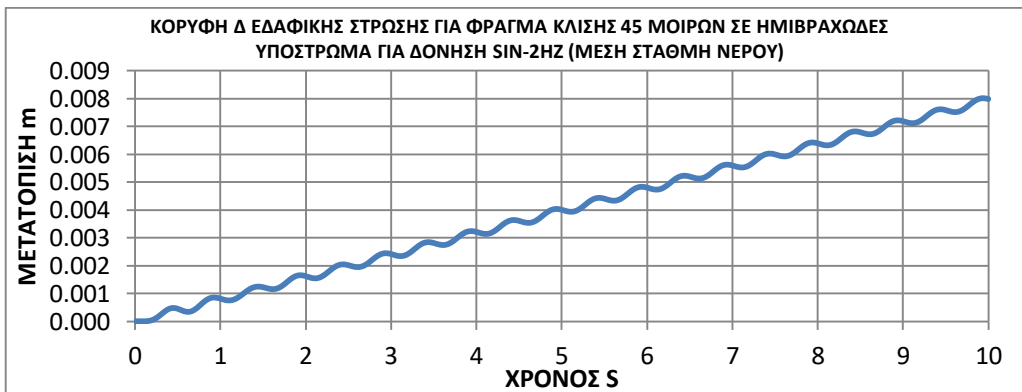
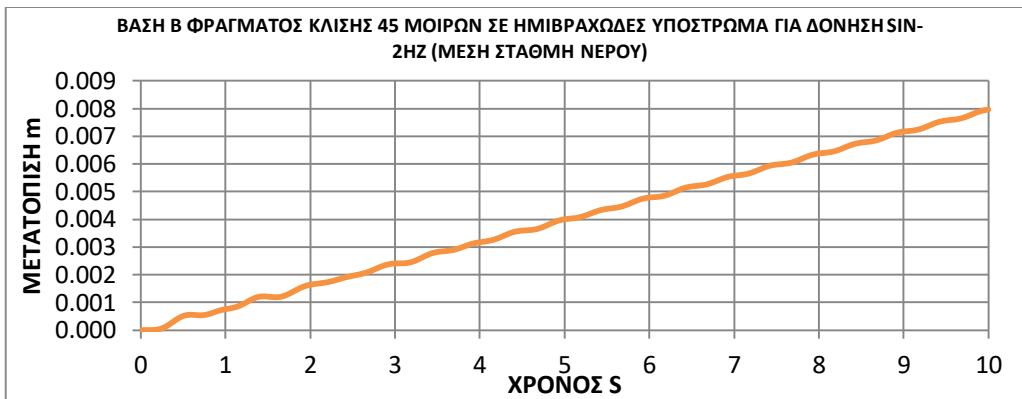
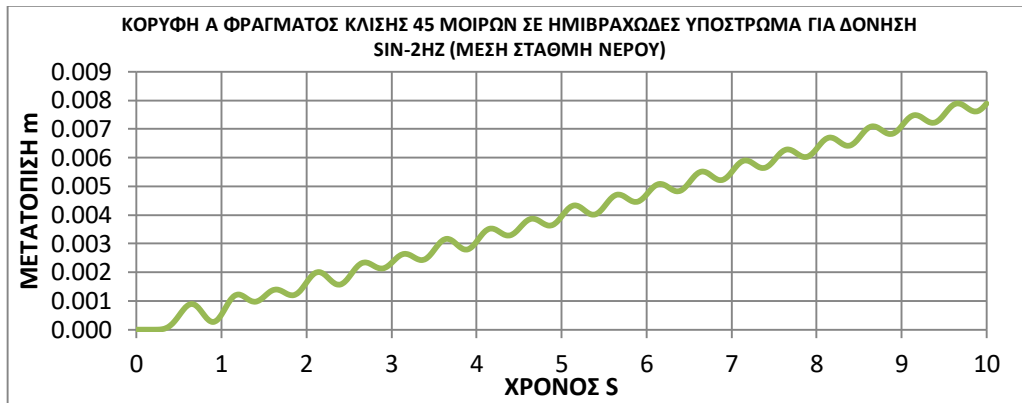
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



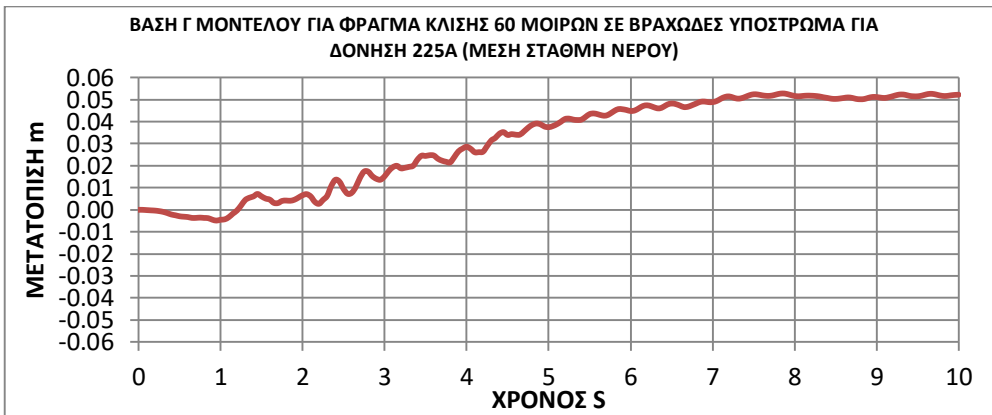
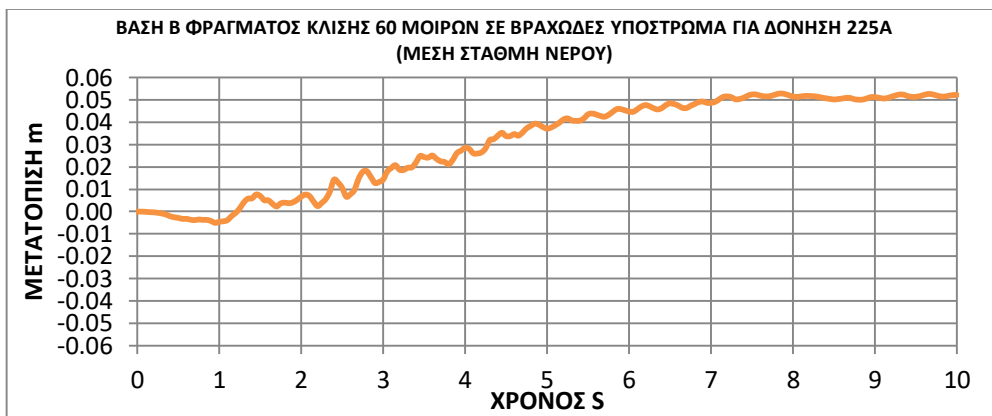
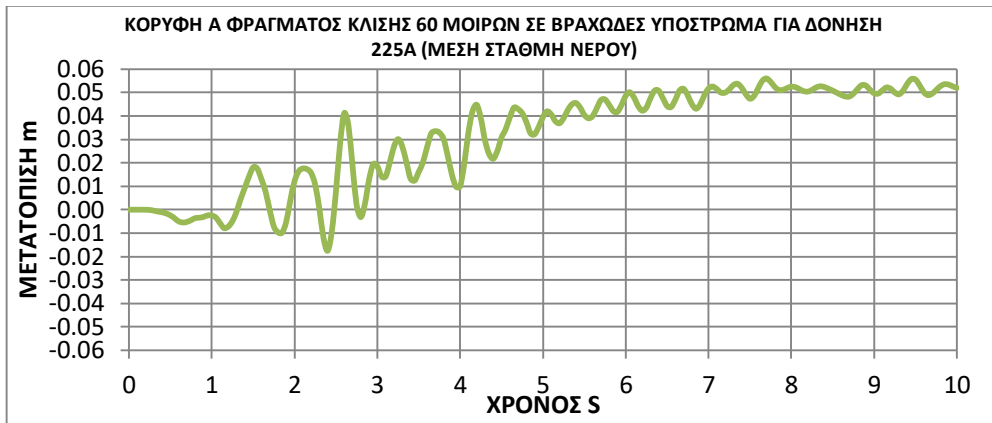
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



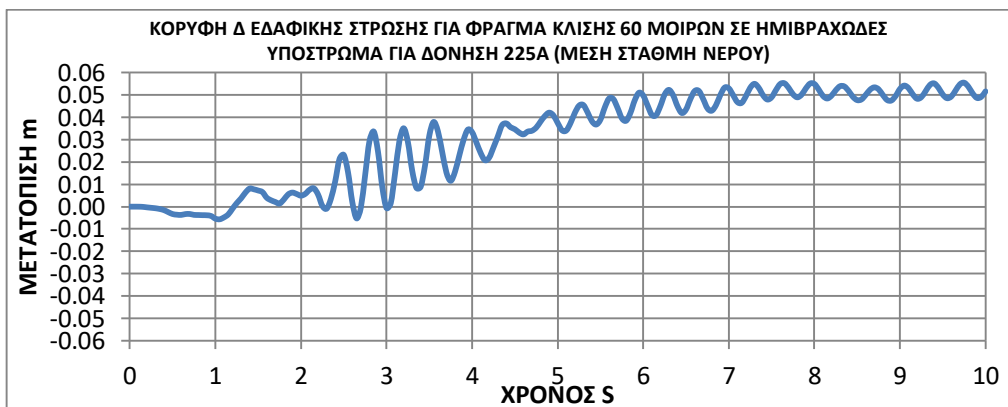
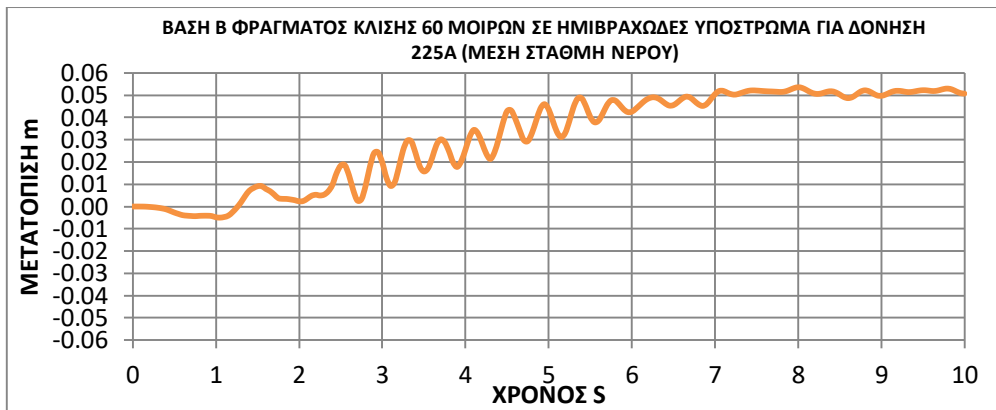
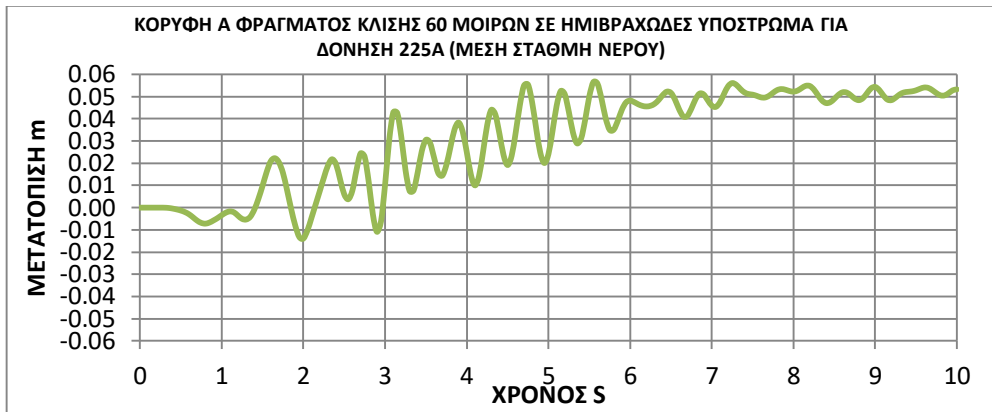
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



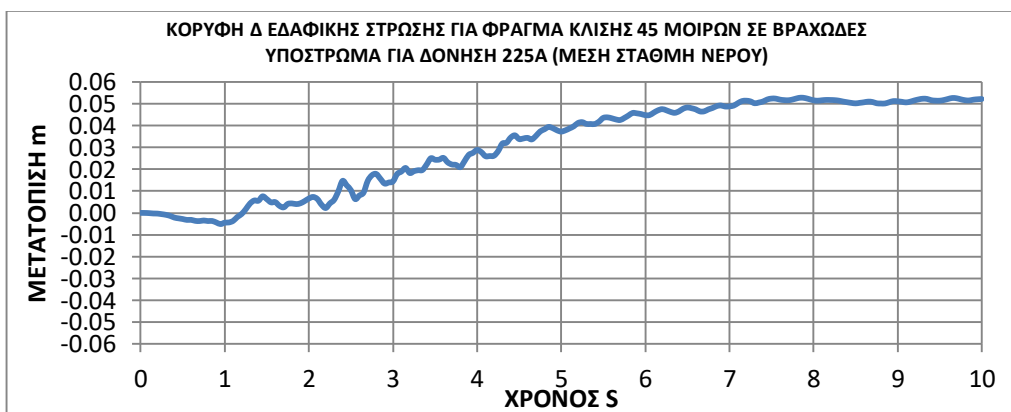
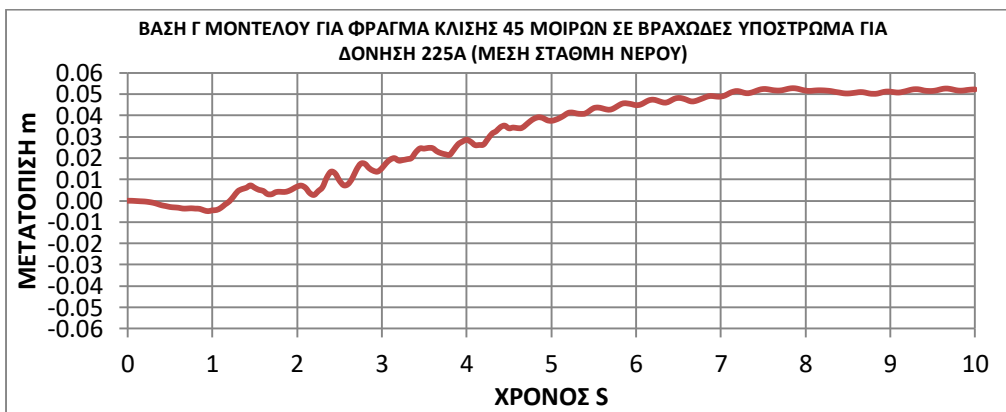
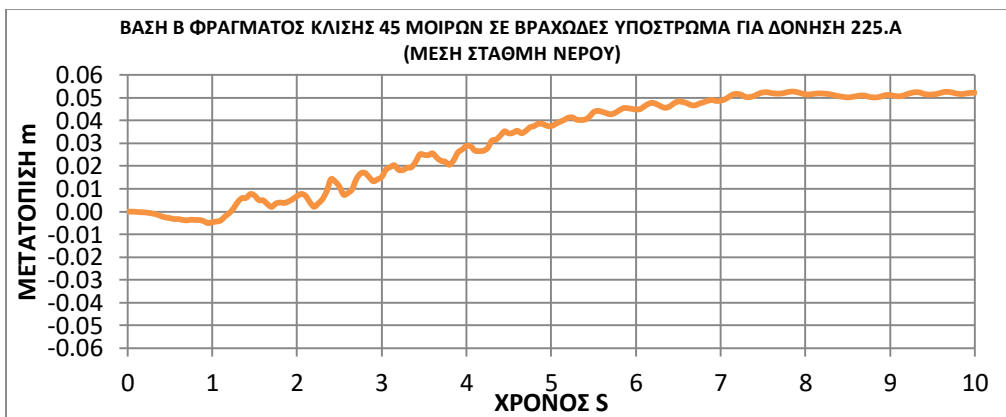
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



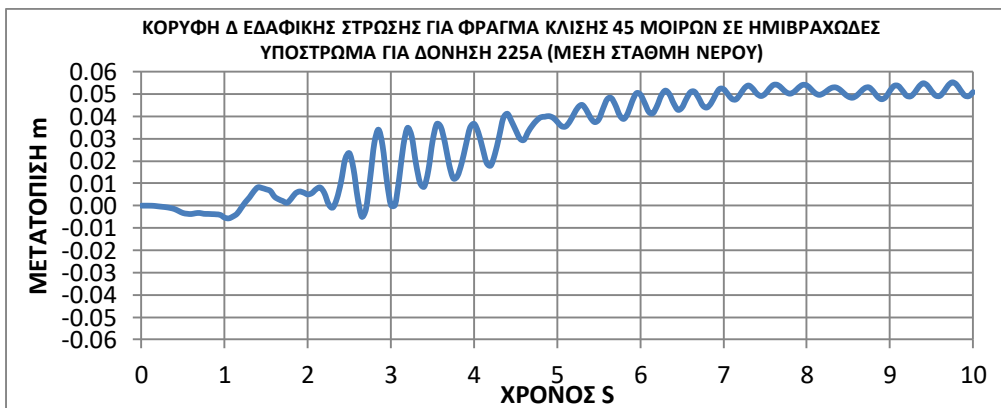
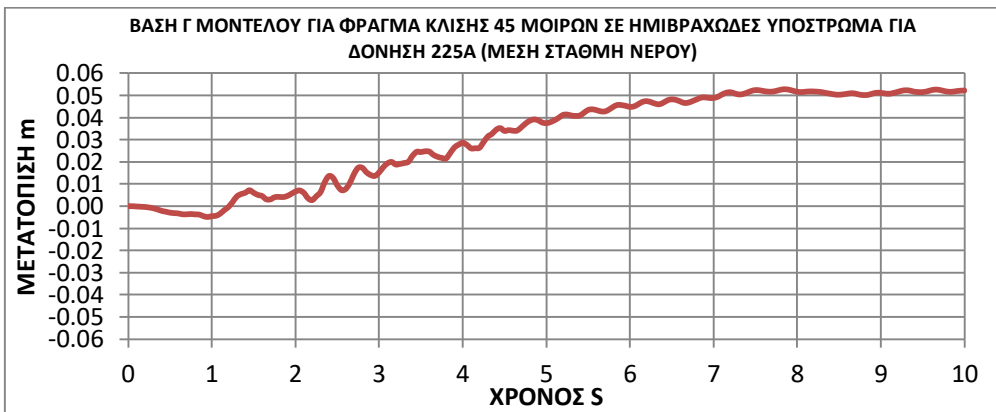
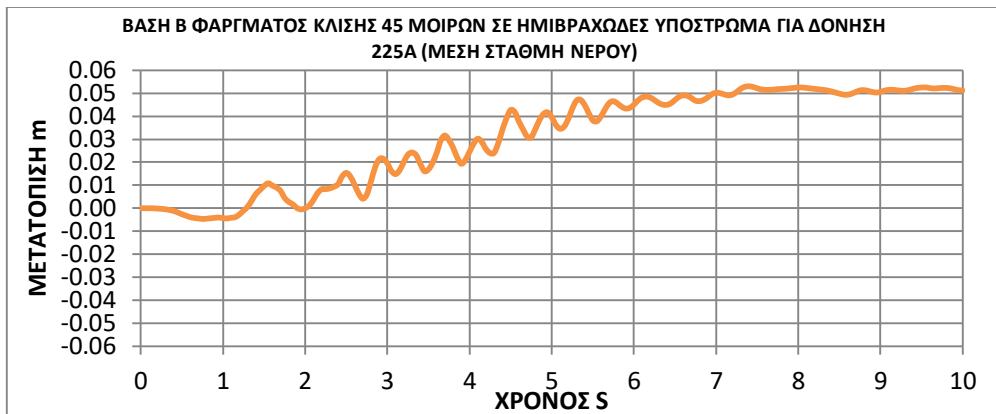
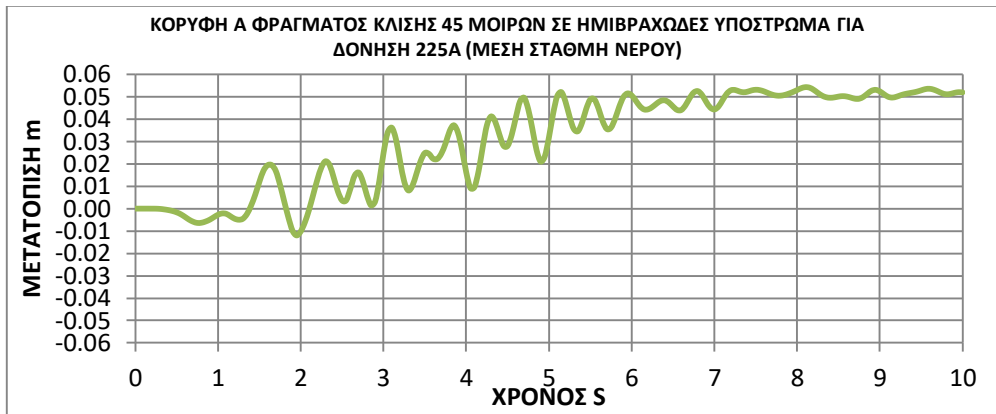
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



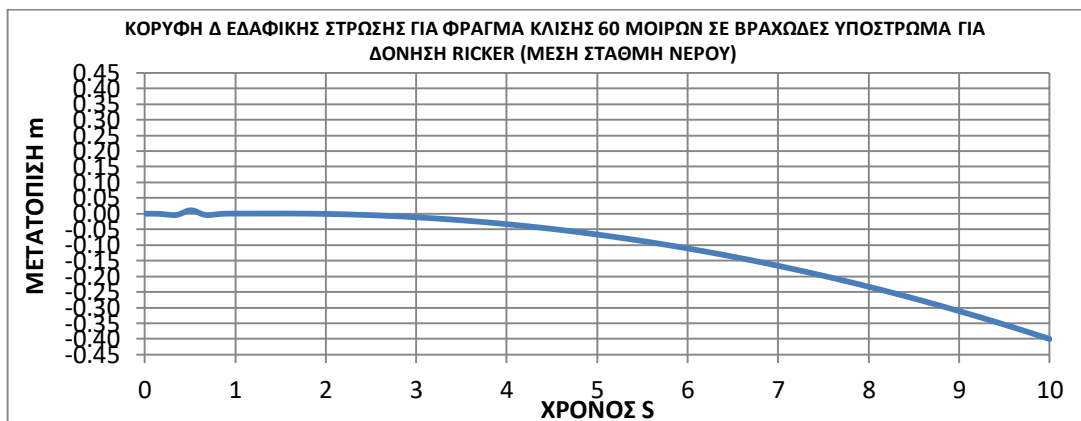
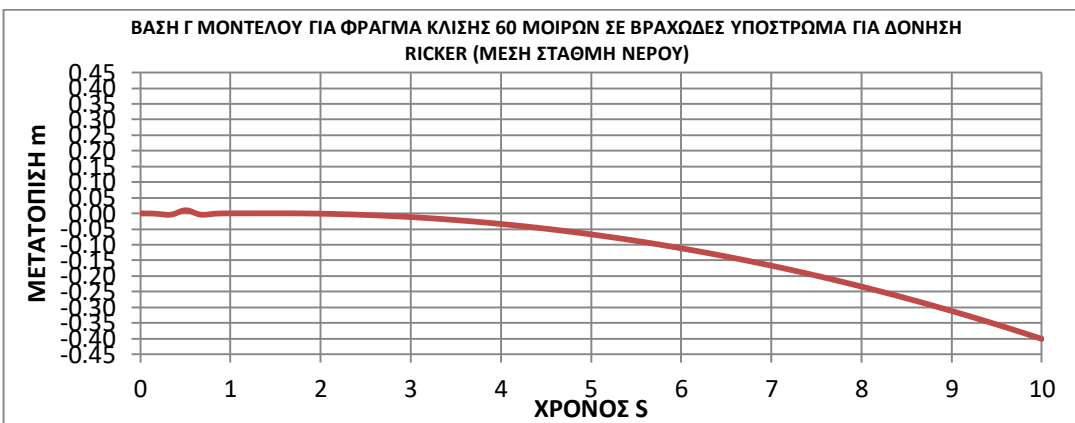
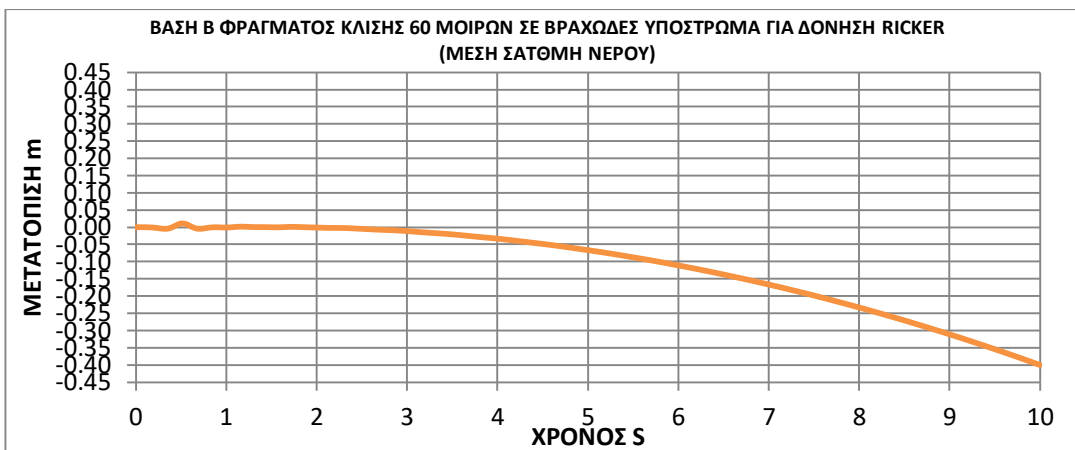
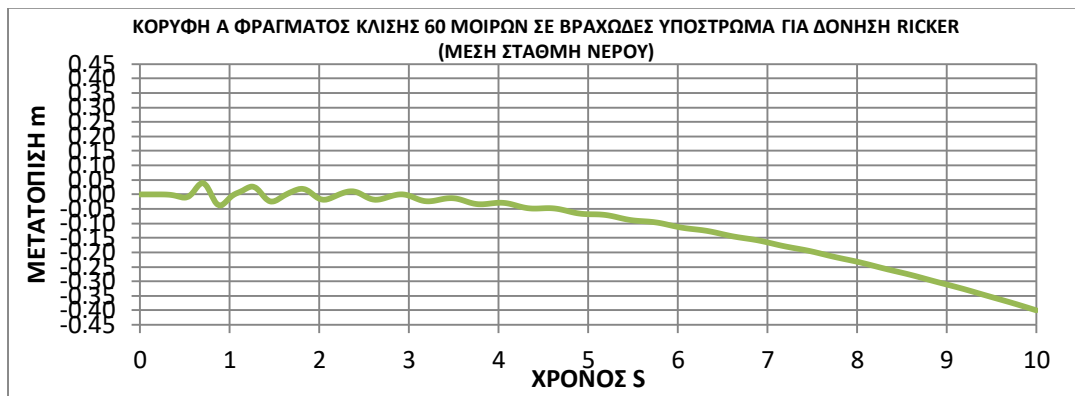
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



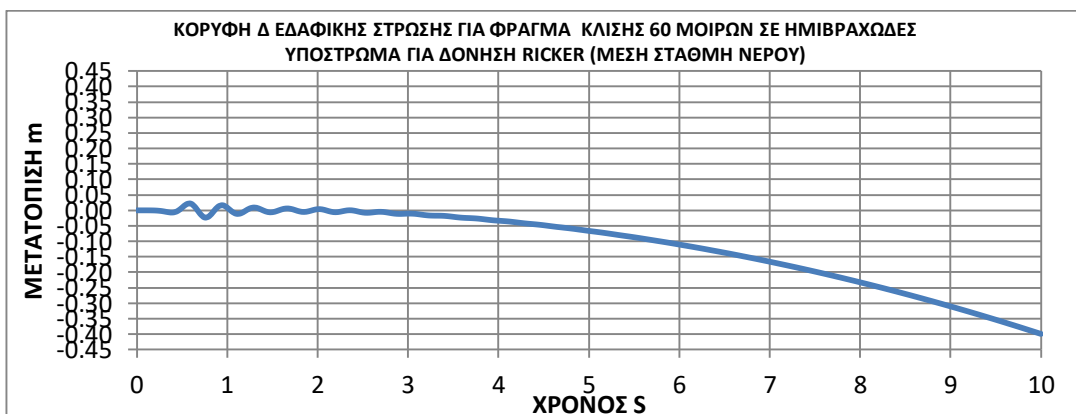
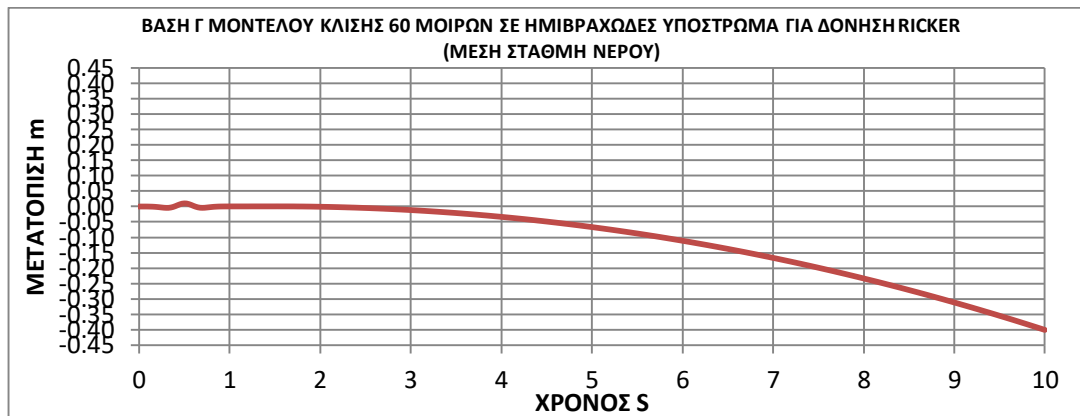
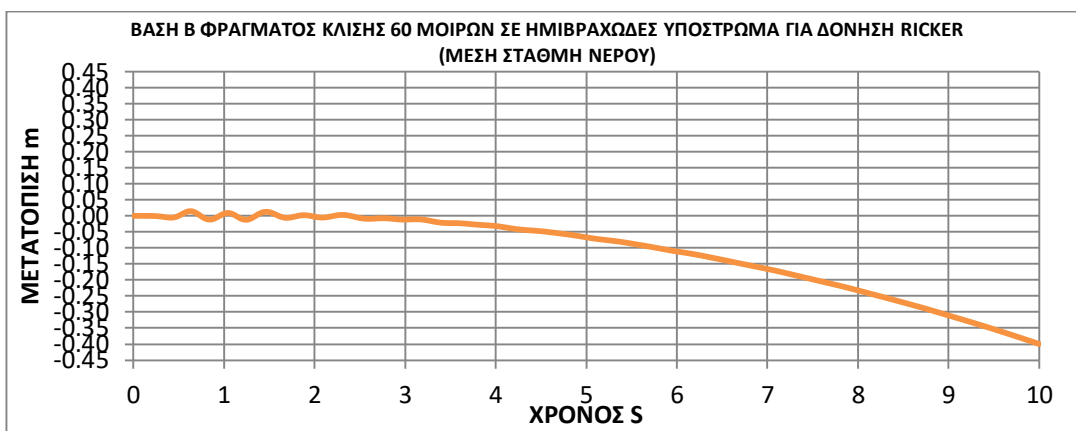
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



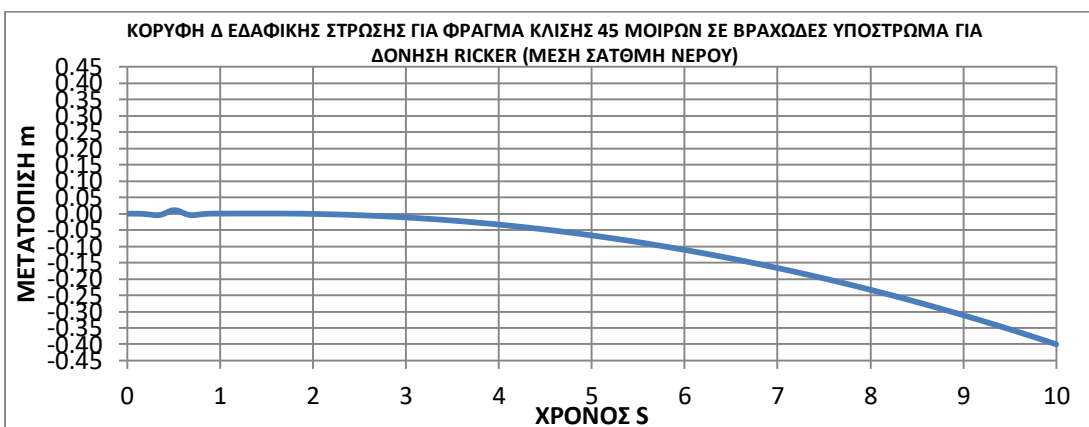
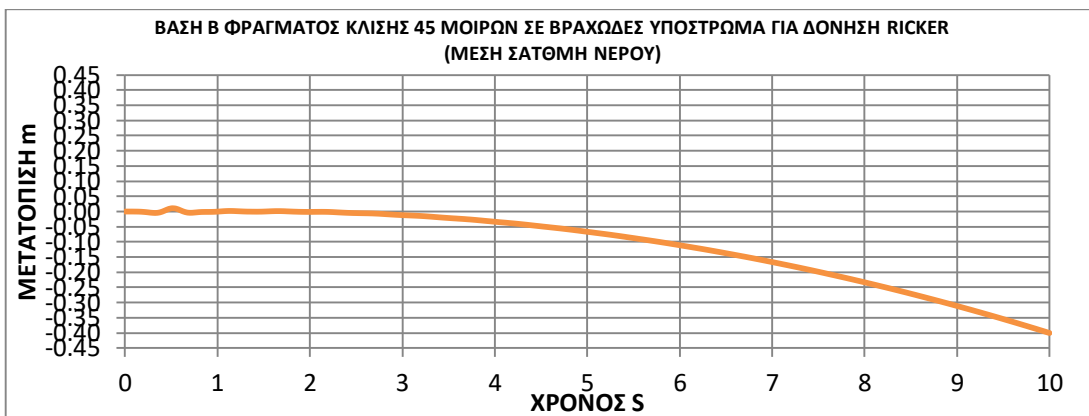
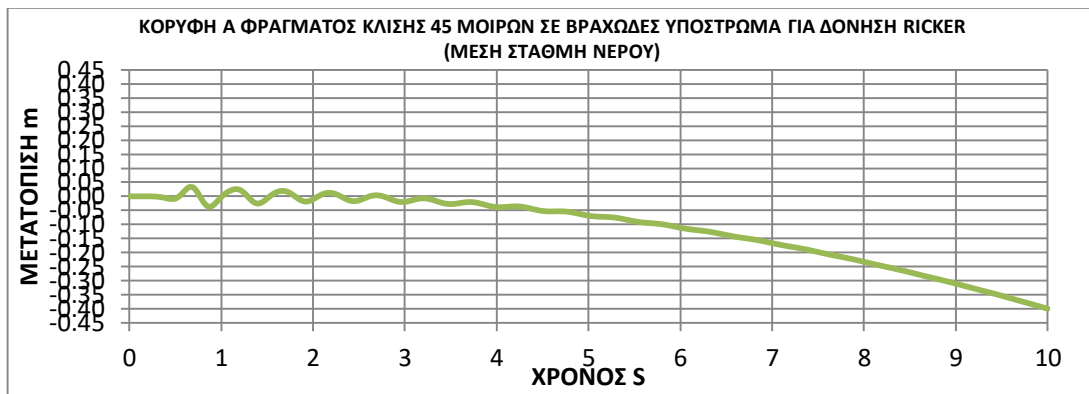
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



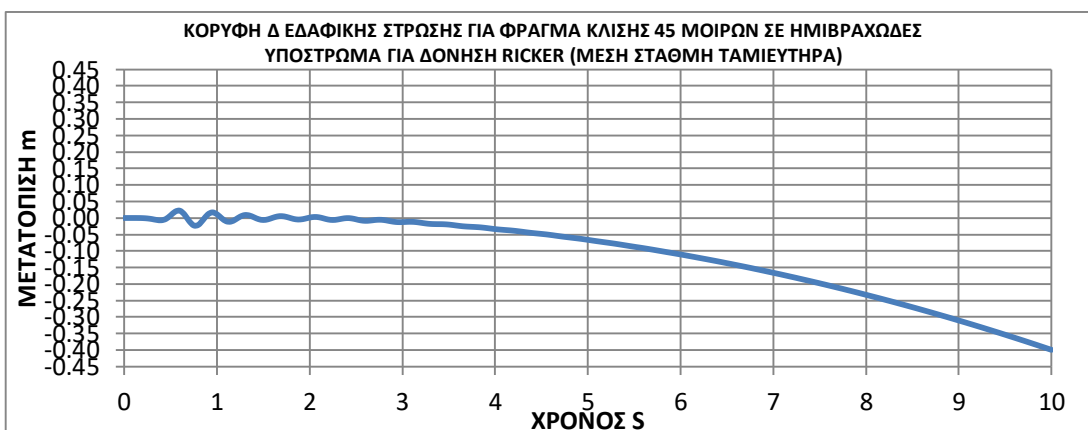
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



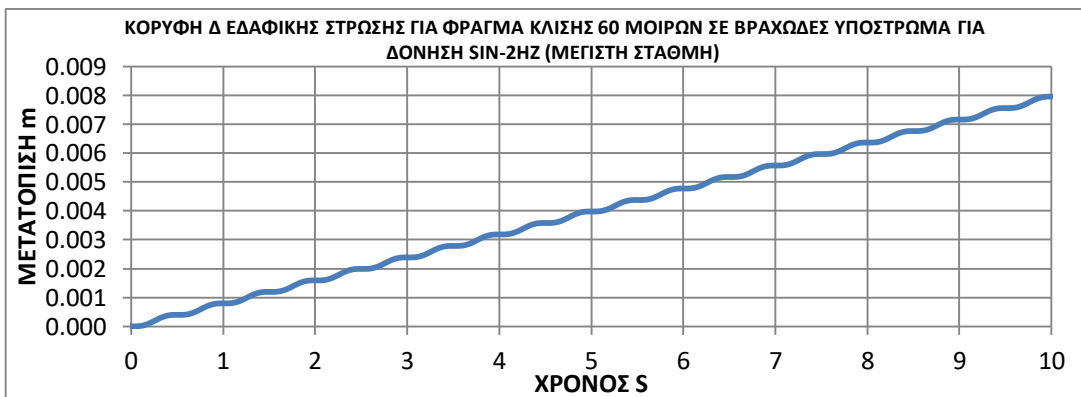
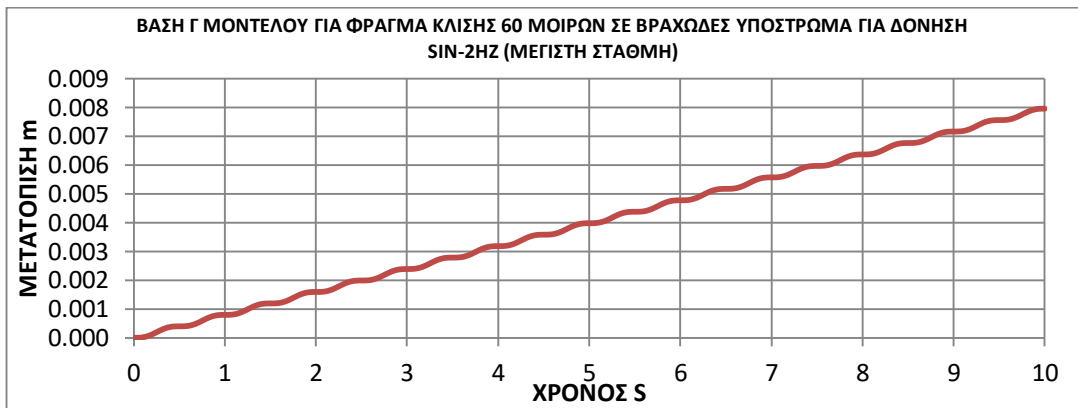
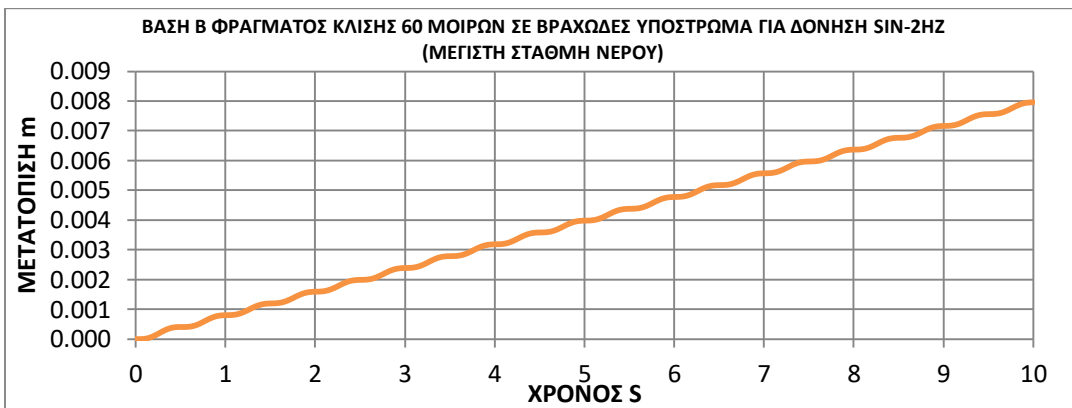
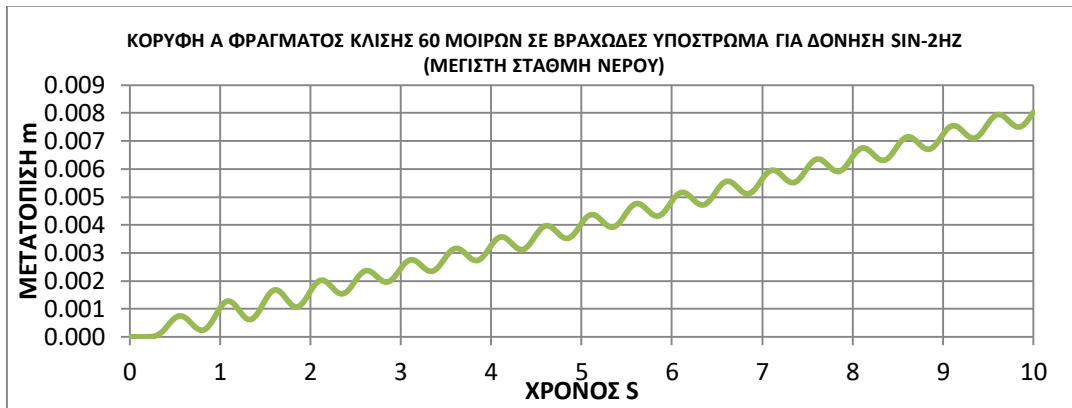
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



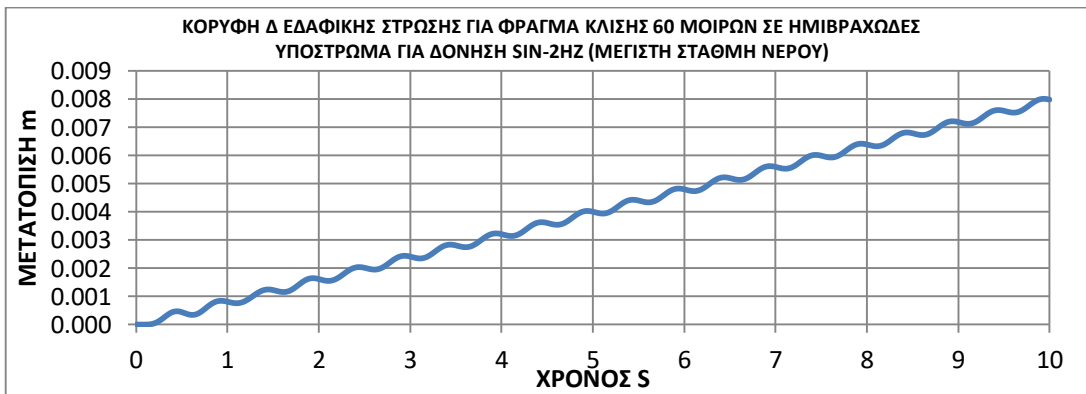
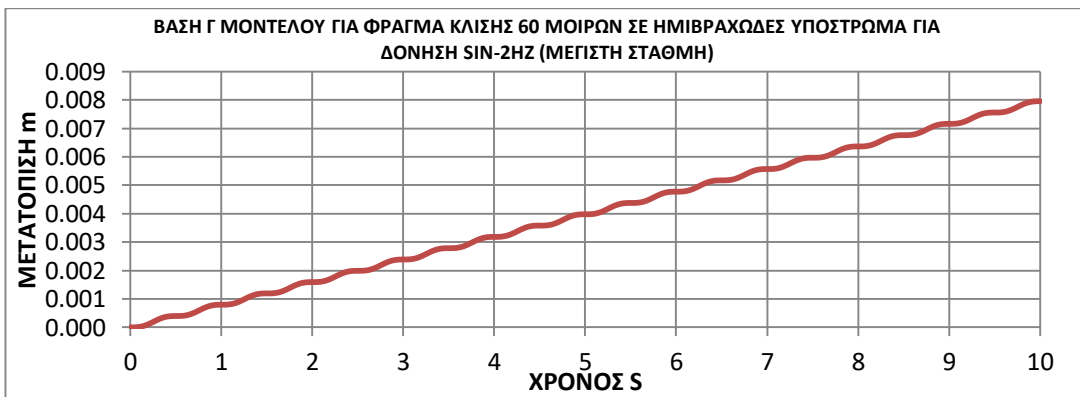
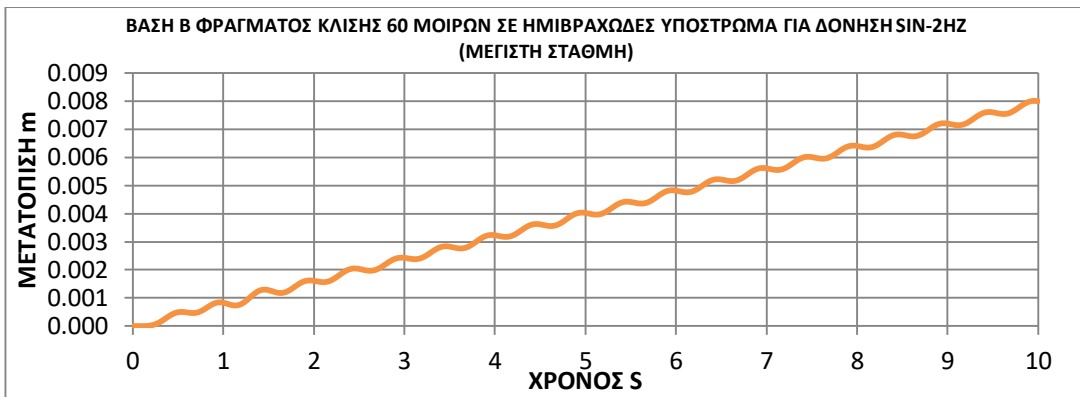
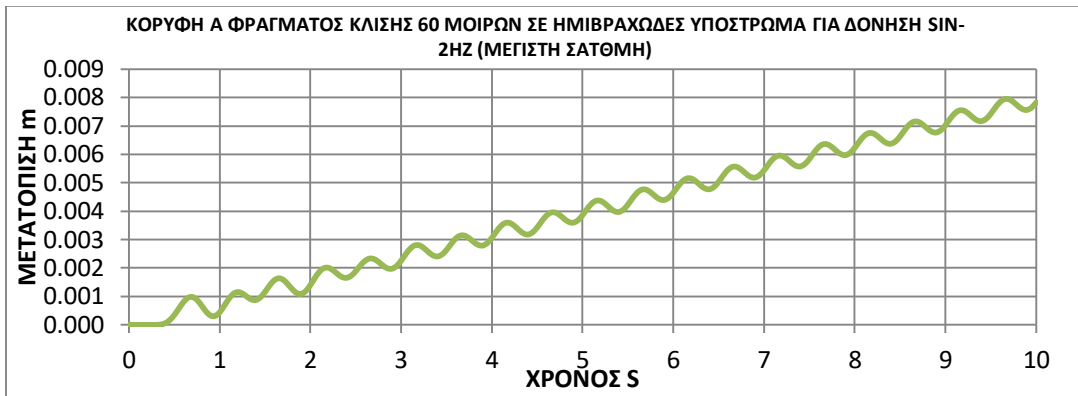
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



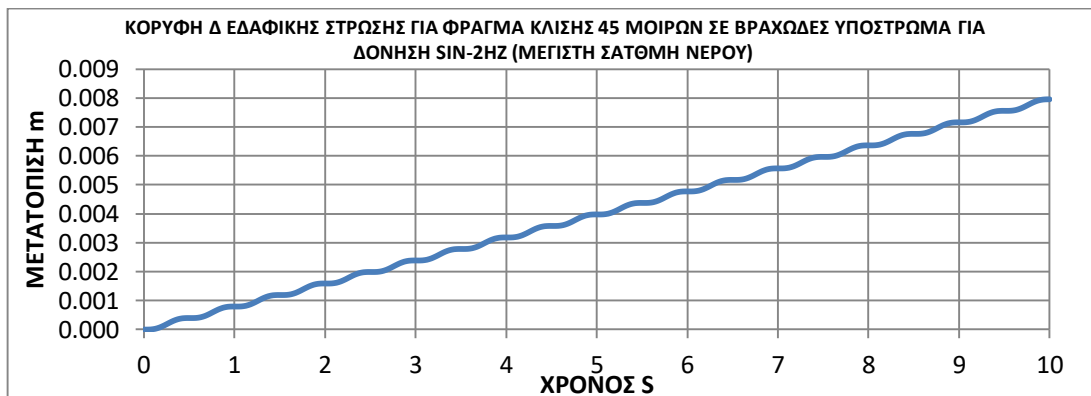
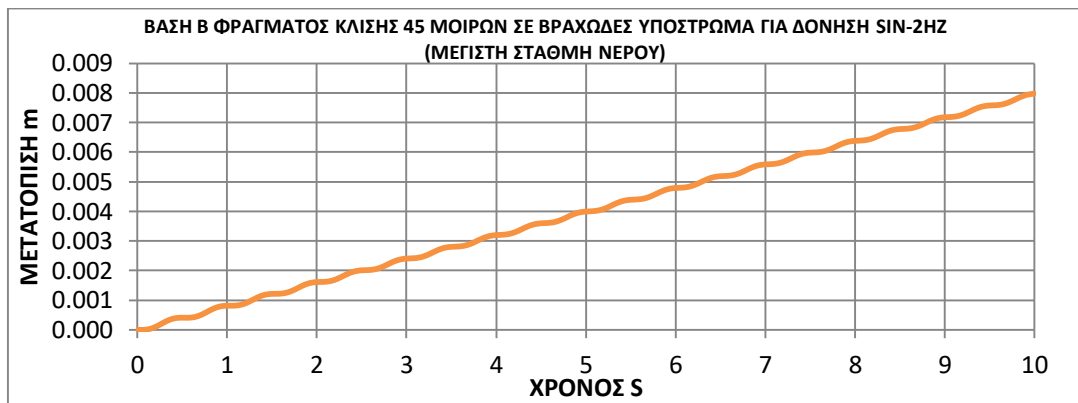
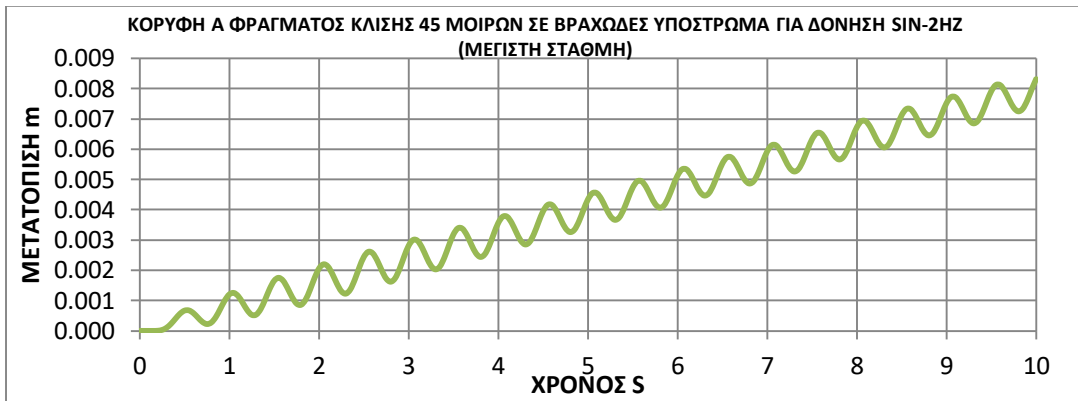
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



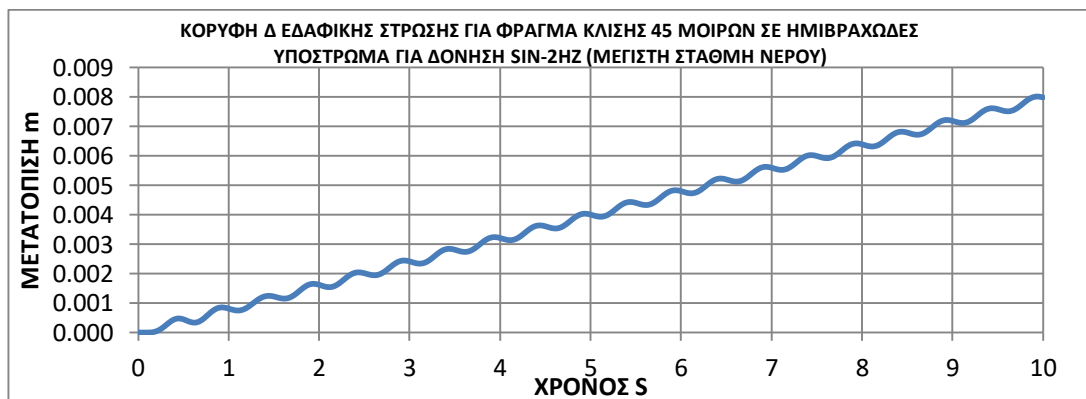
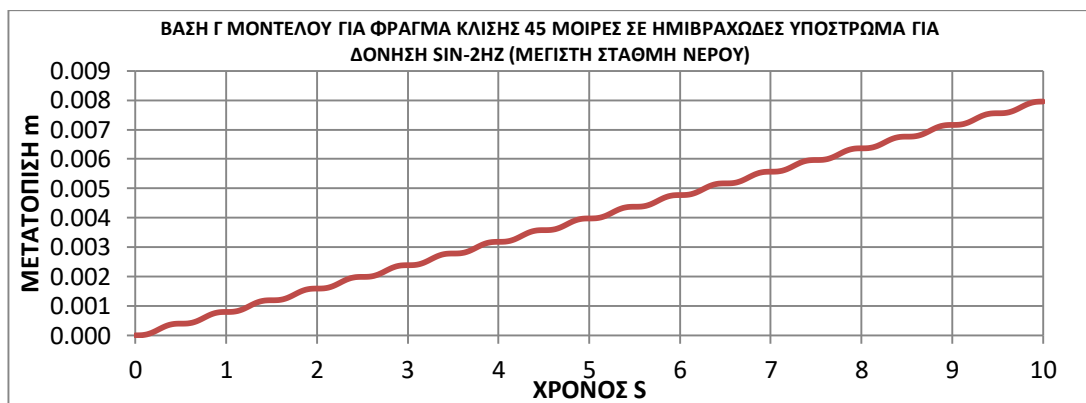
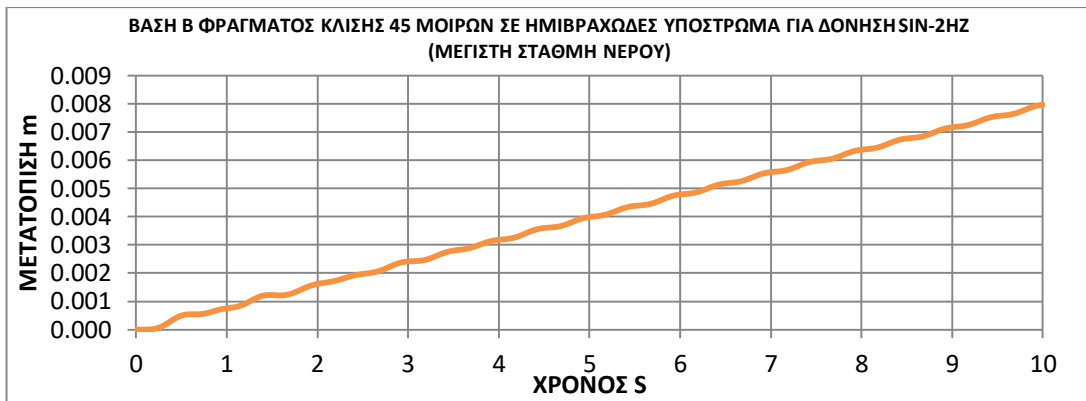
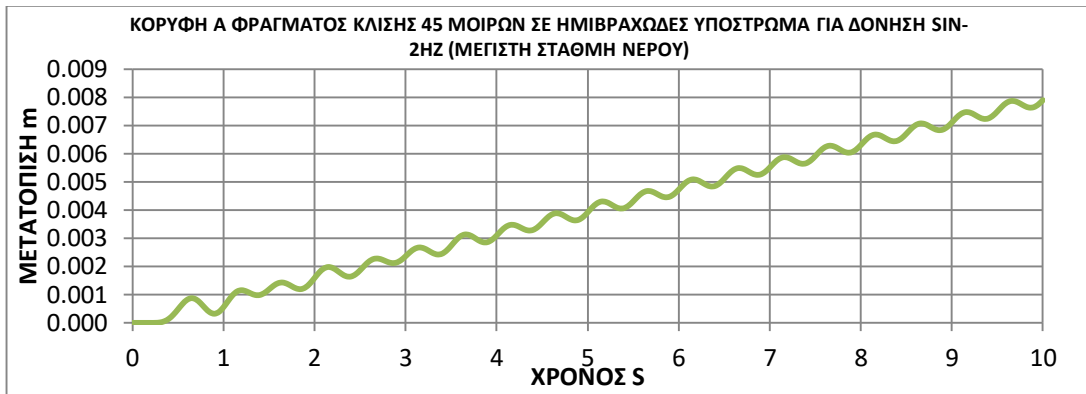
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



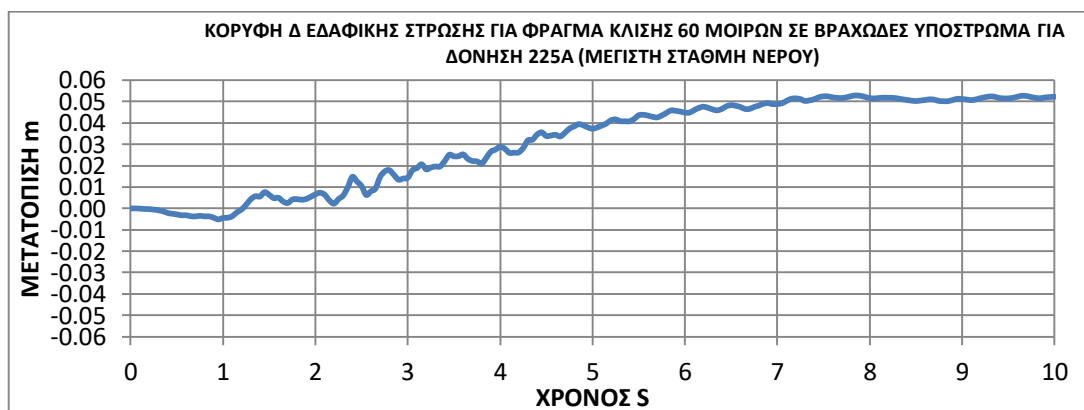
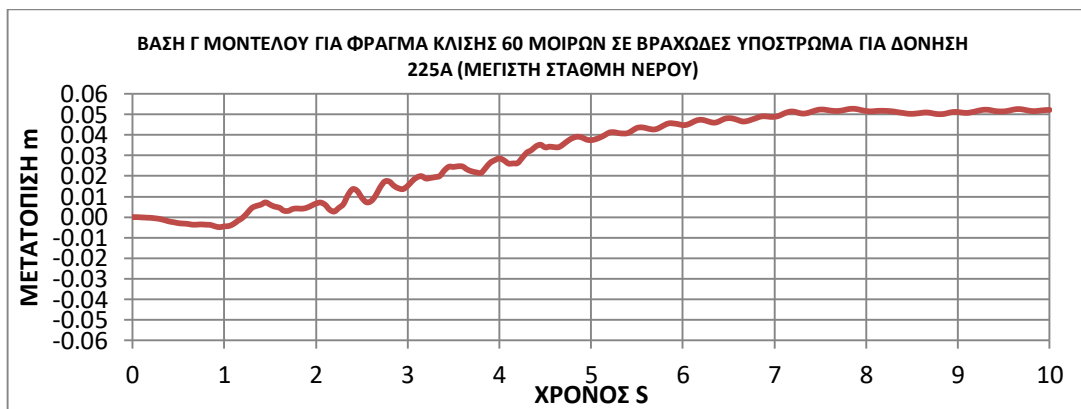
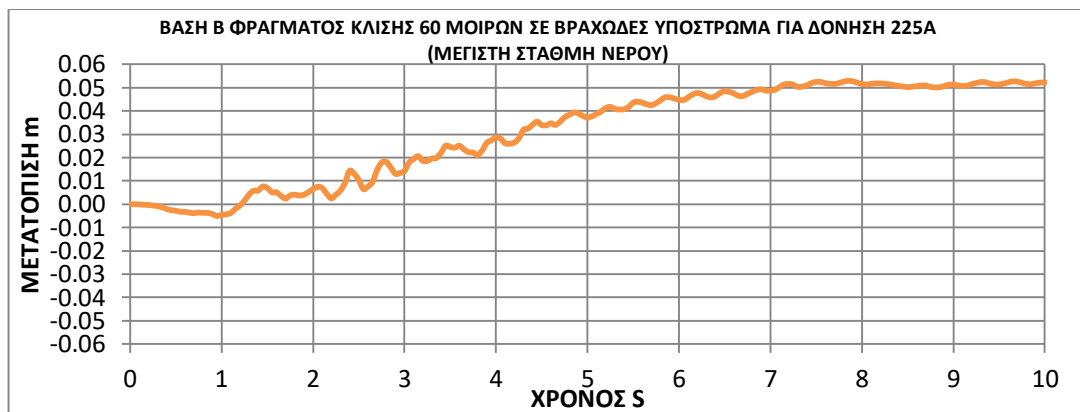
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3



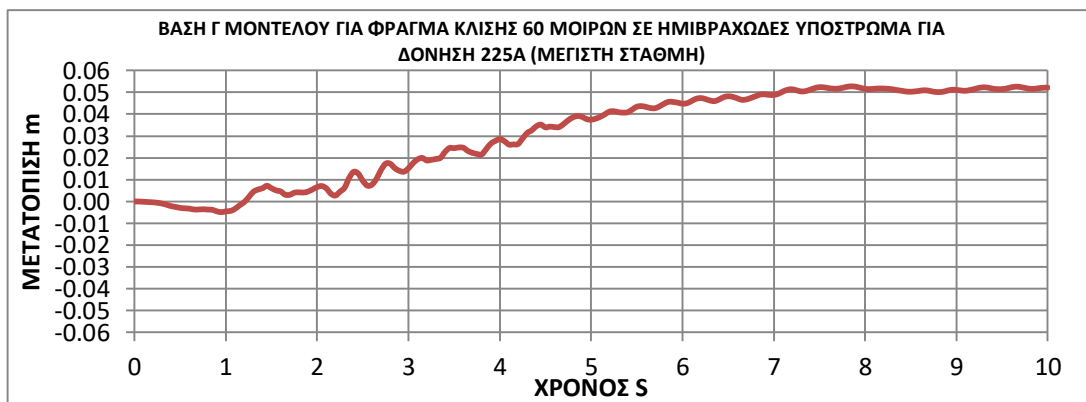
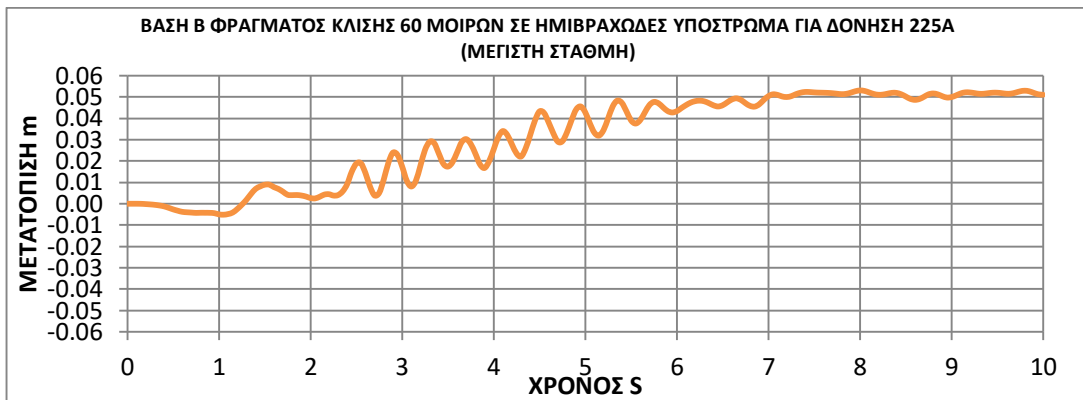
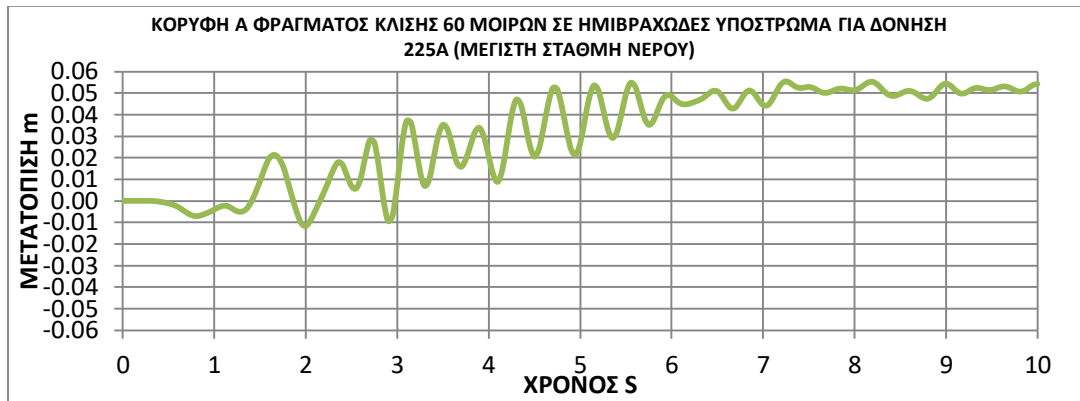
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



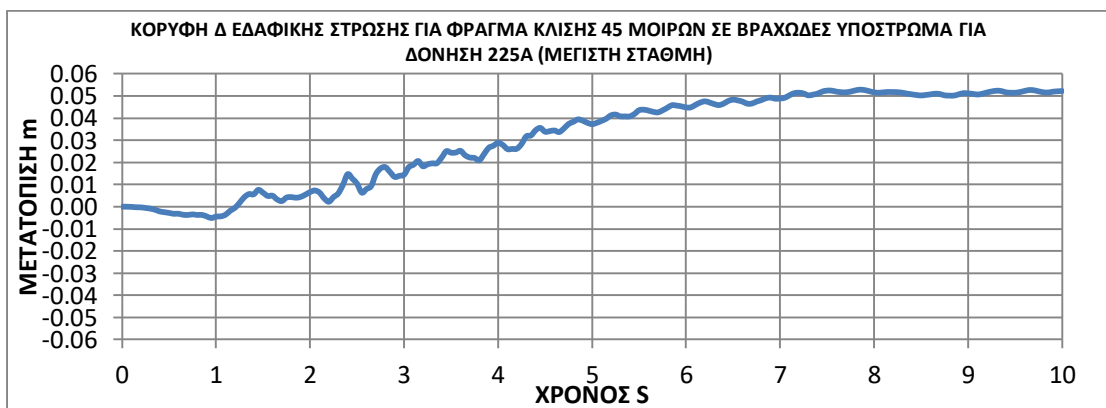
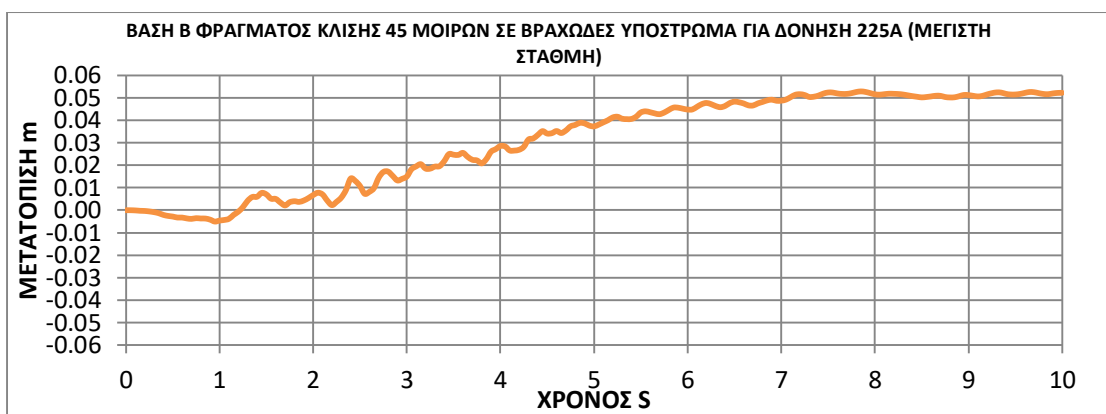
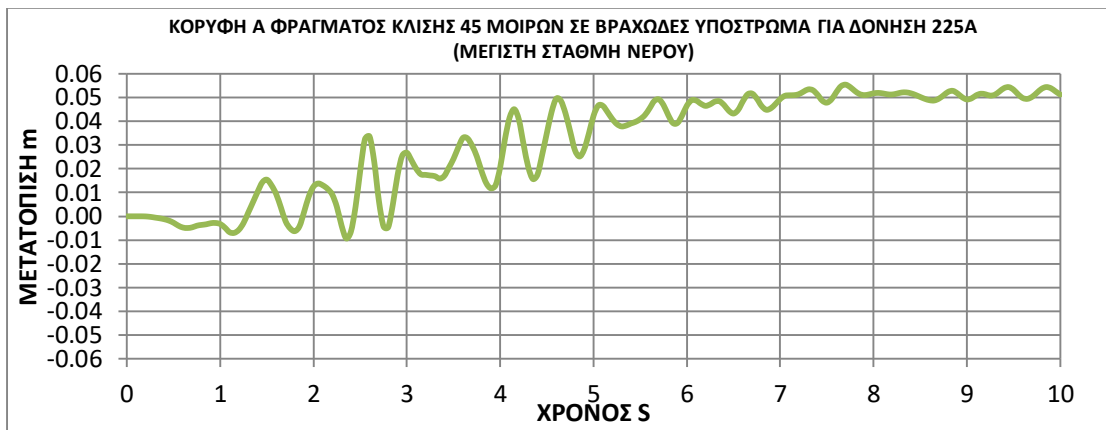
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



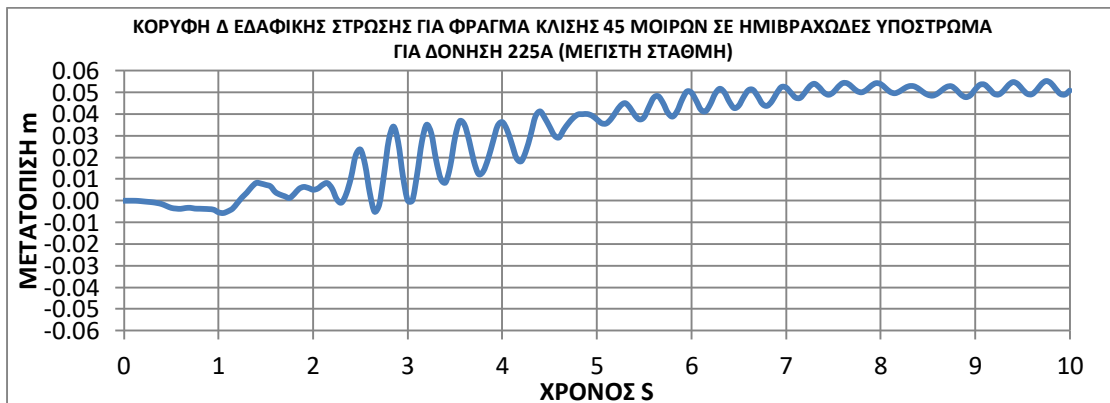
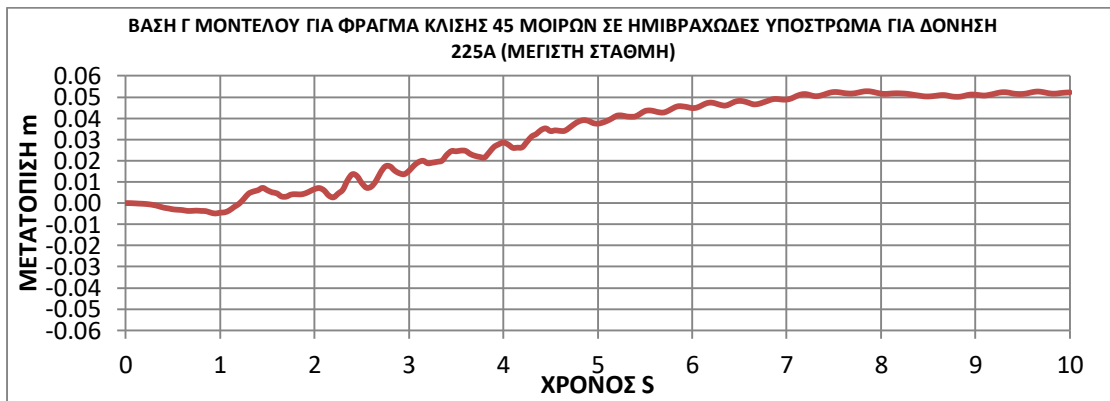
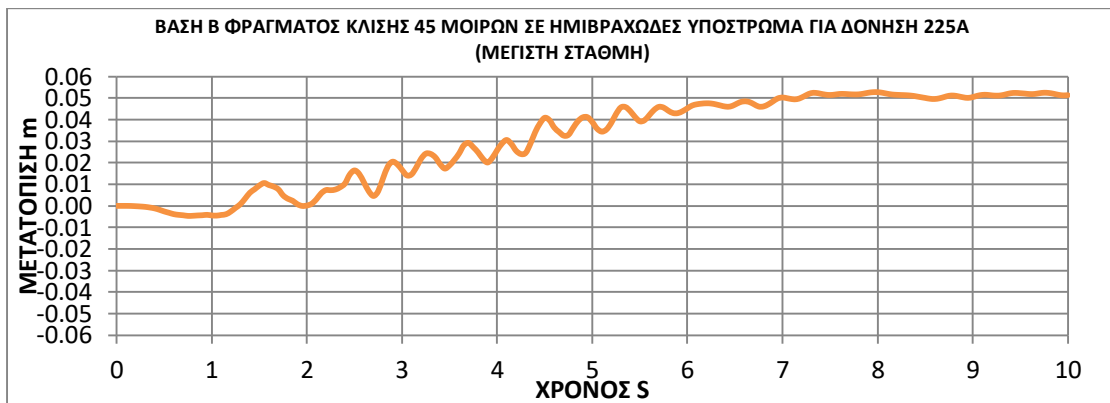
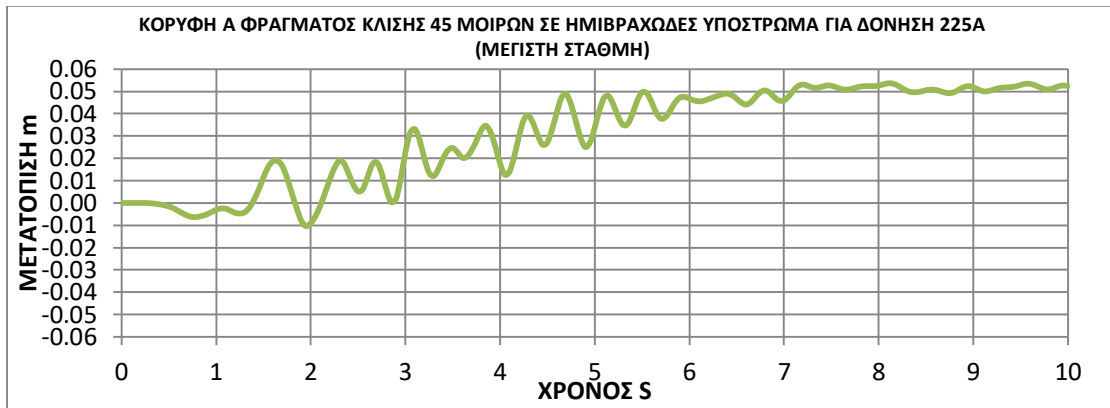
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



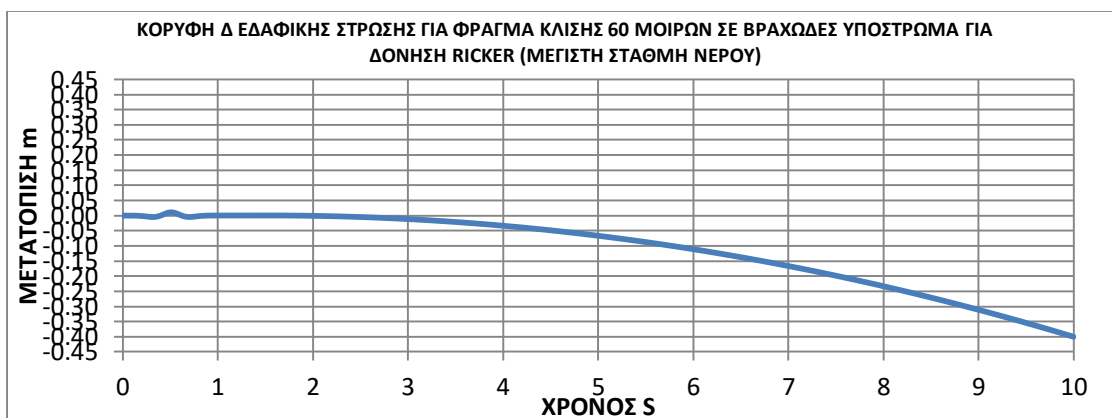
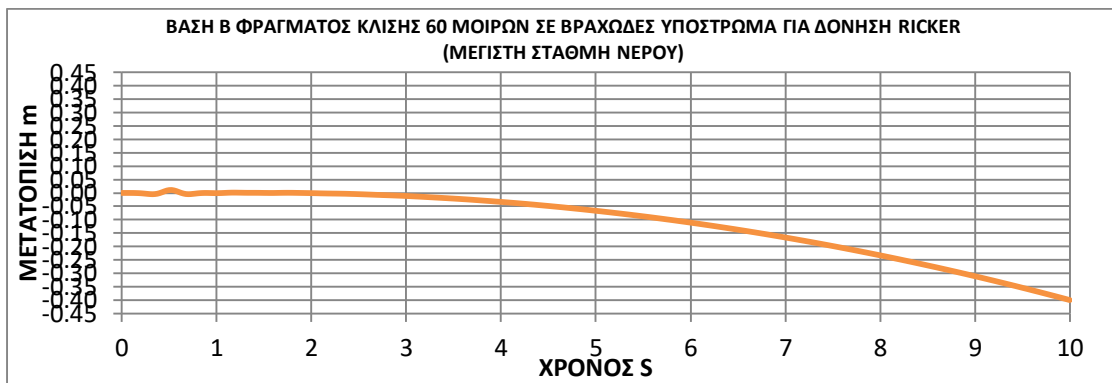
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3



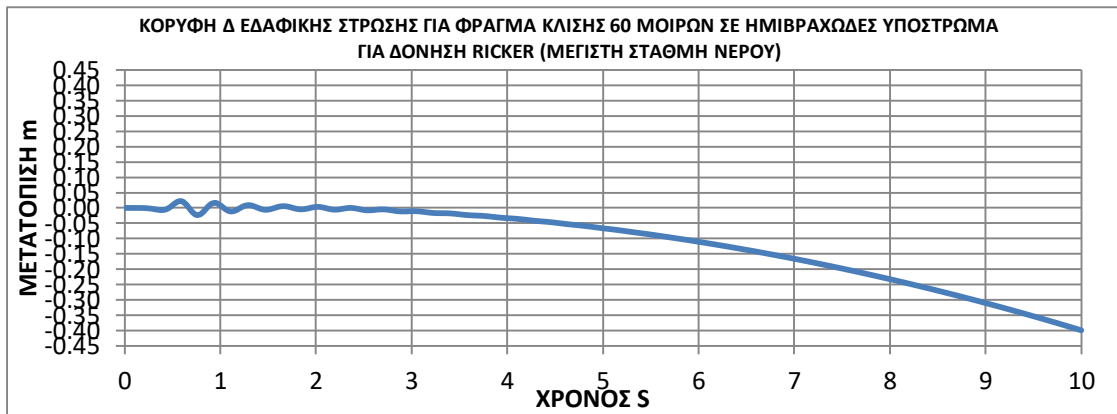
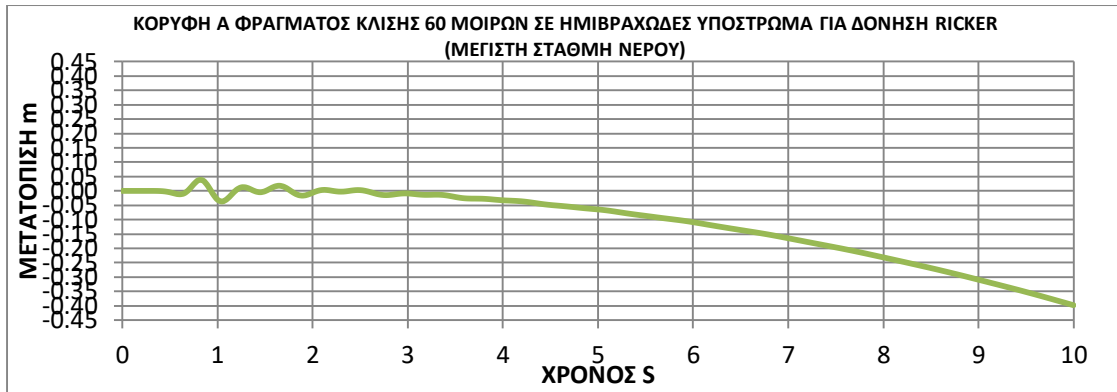
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



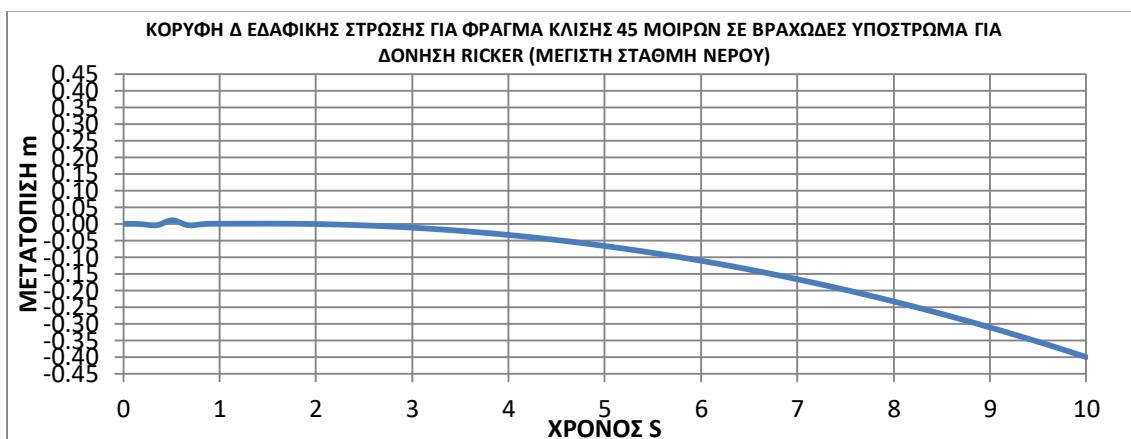
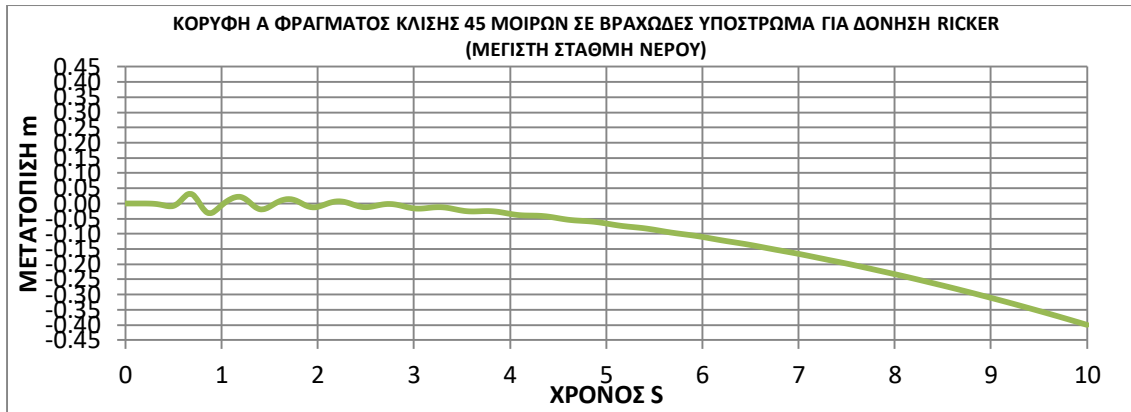
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



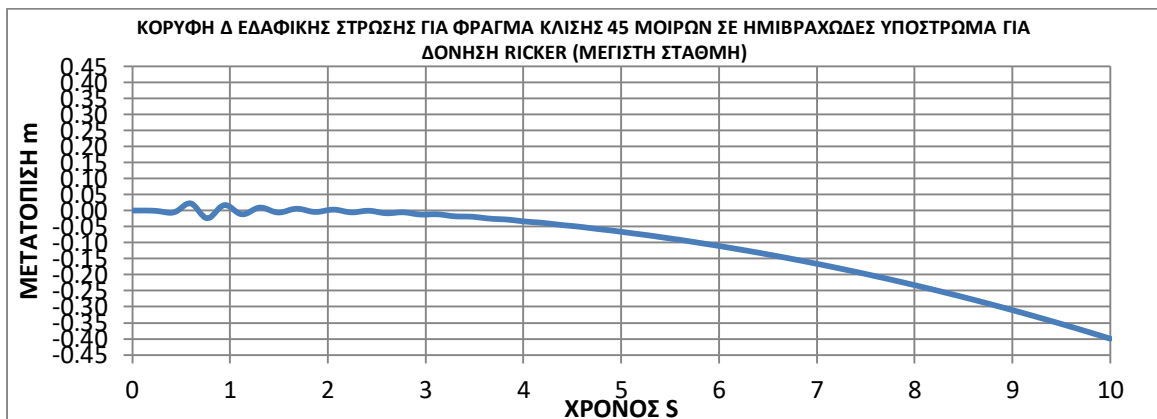
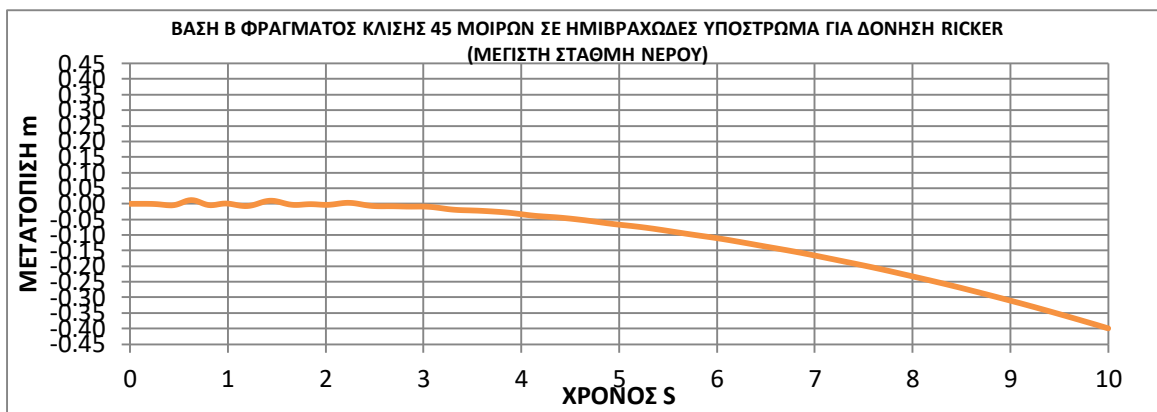
Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο2



Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο3

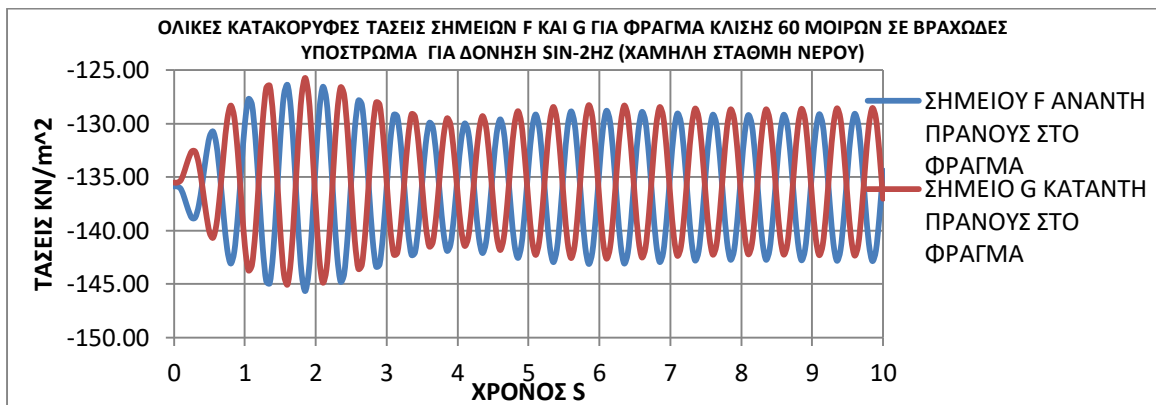
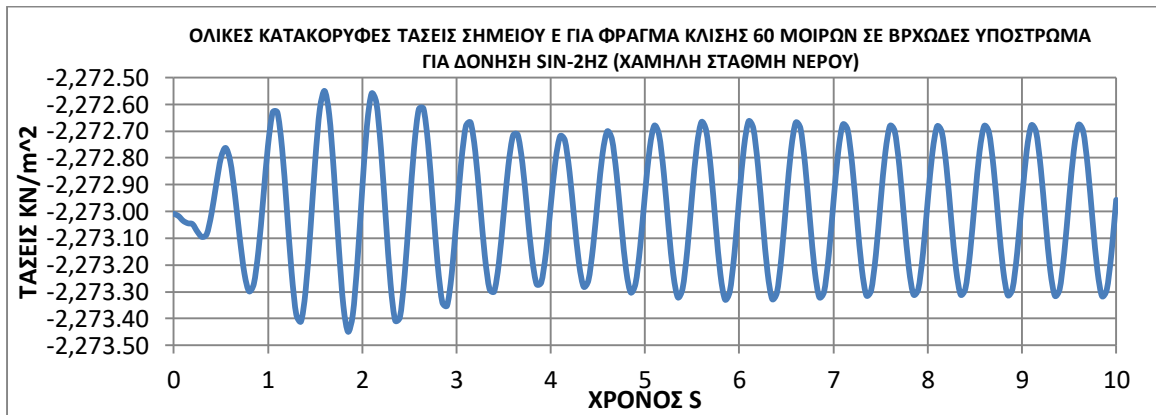
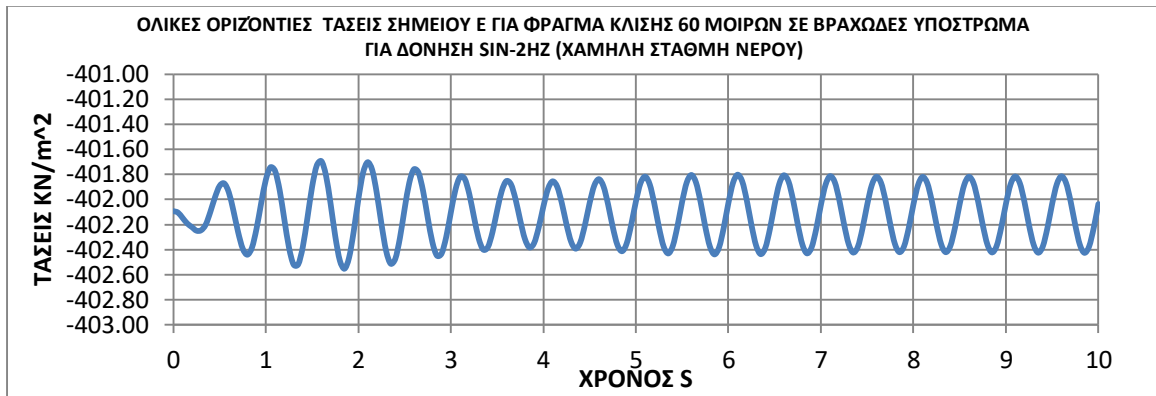


Χρονοιστορίες μετατοπίσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο4

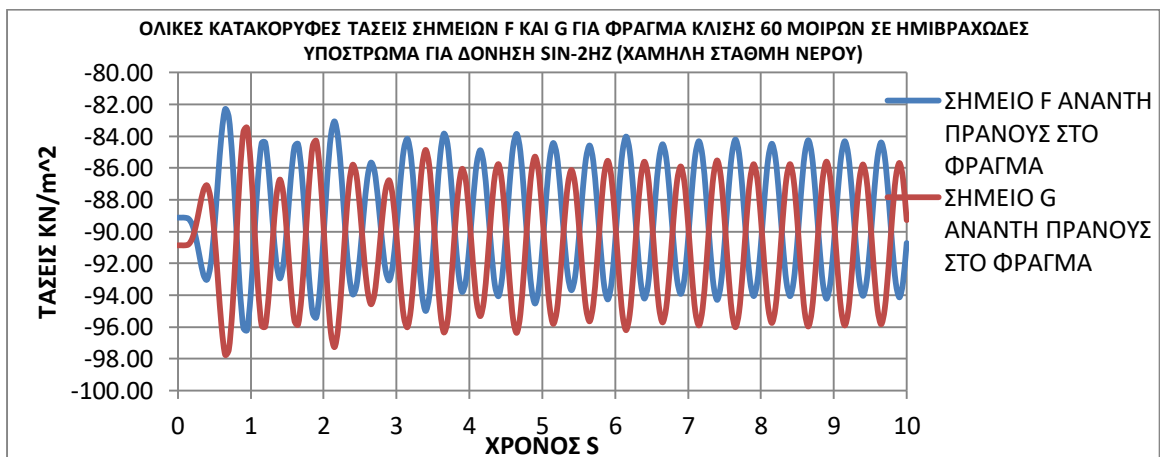
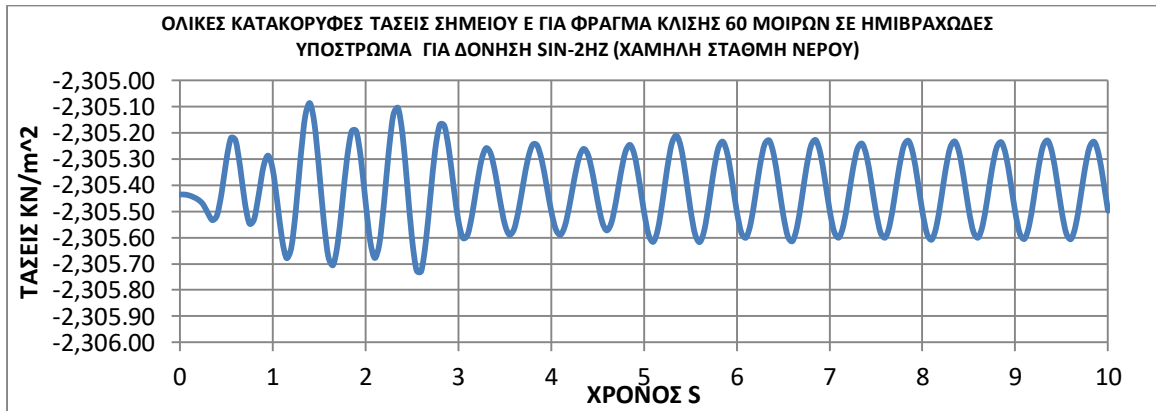
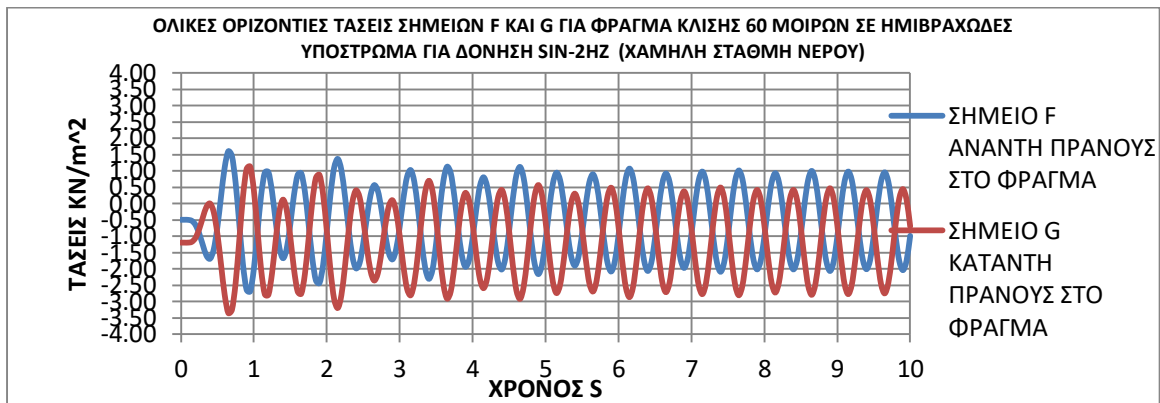


ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΟΛΙΚΩΝ ΤΑΣΕΣΩΝ

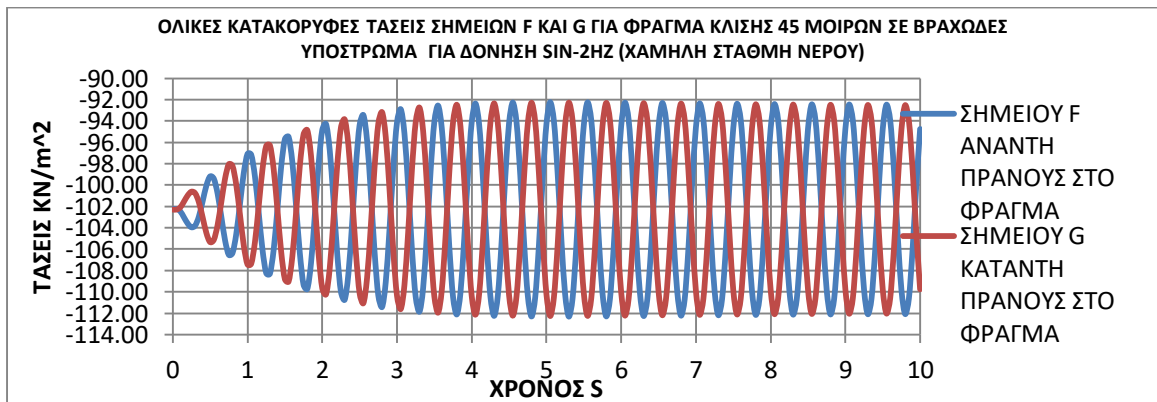
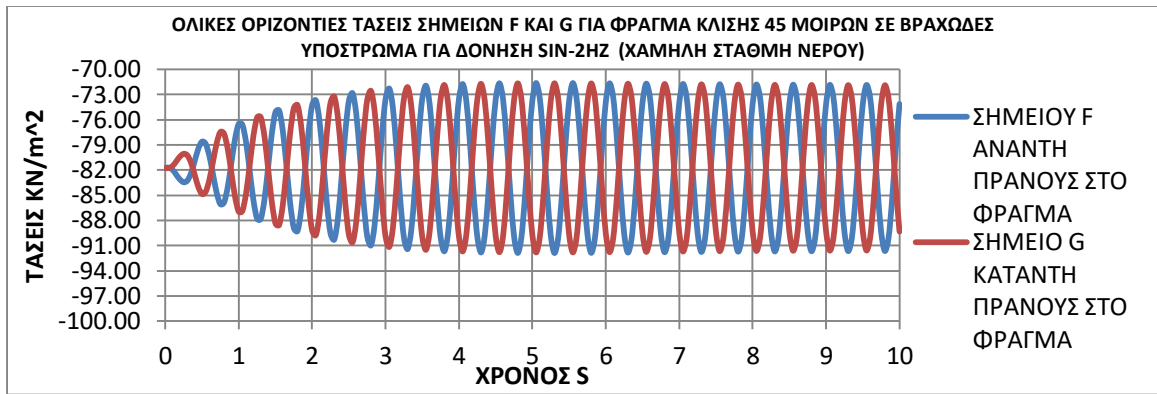
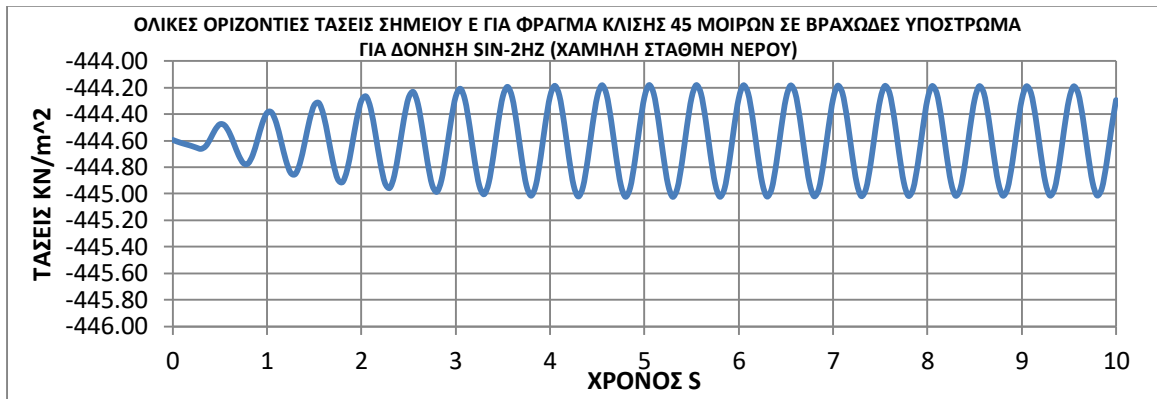
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



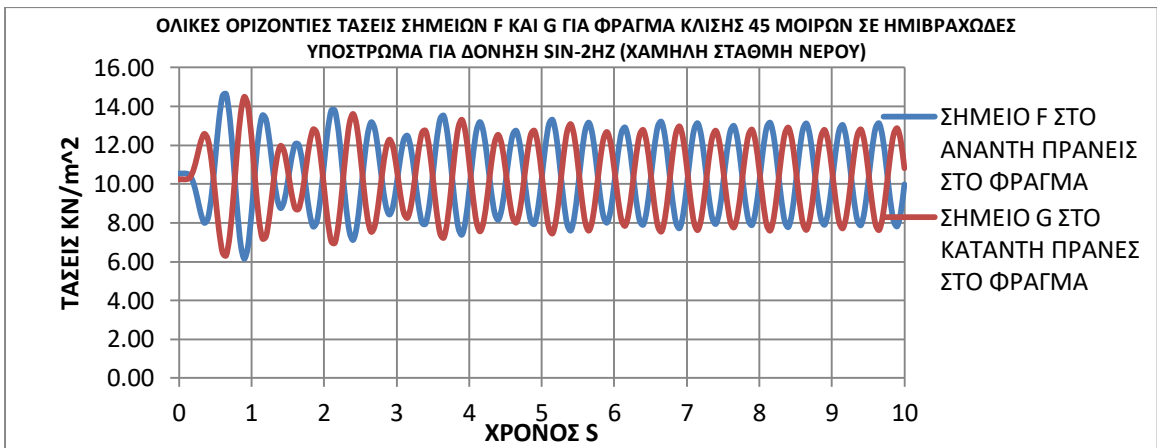
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



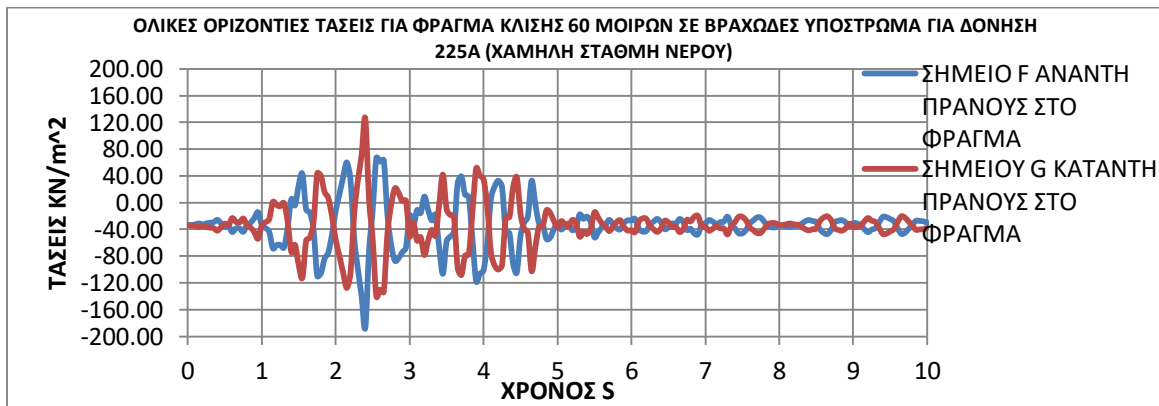
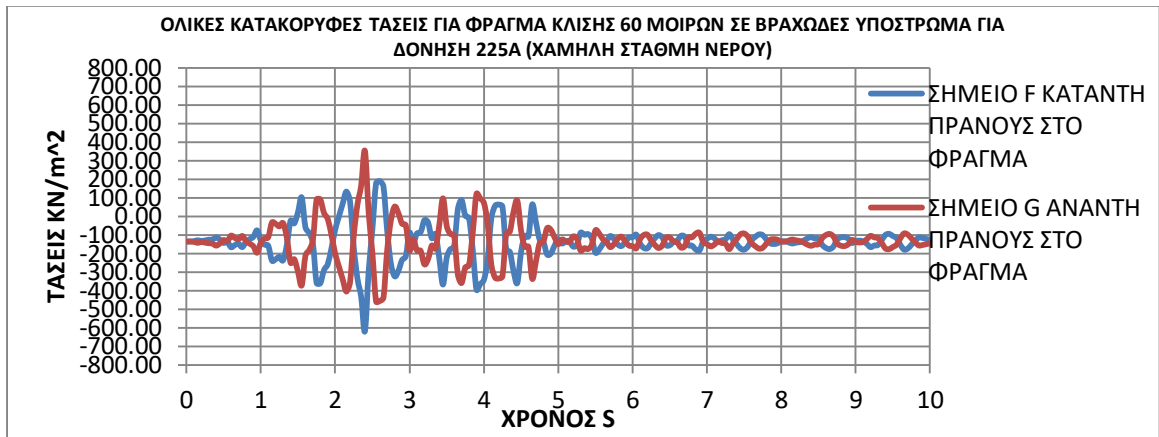
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



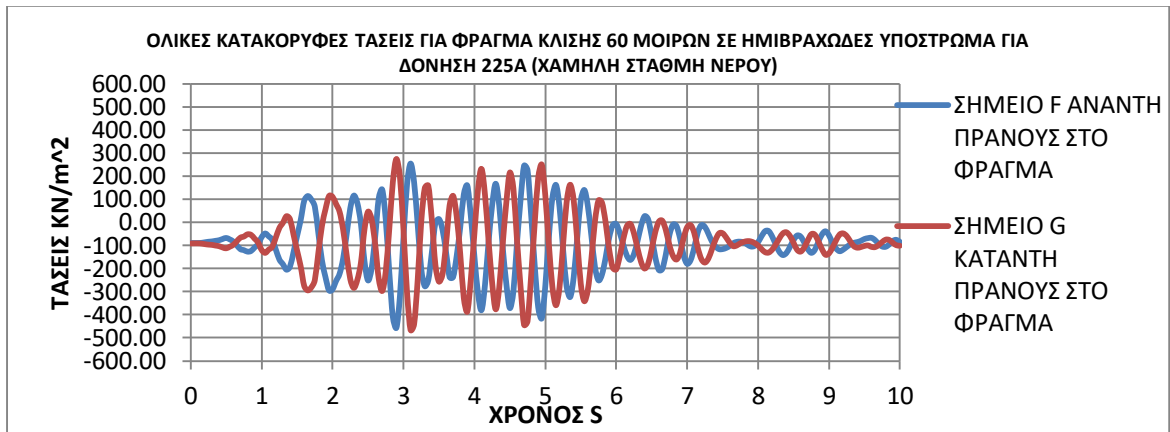
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



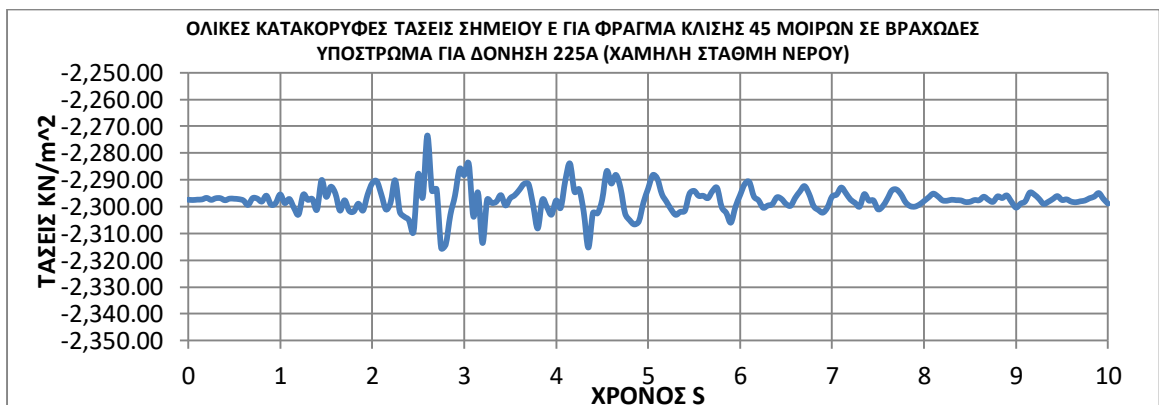
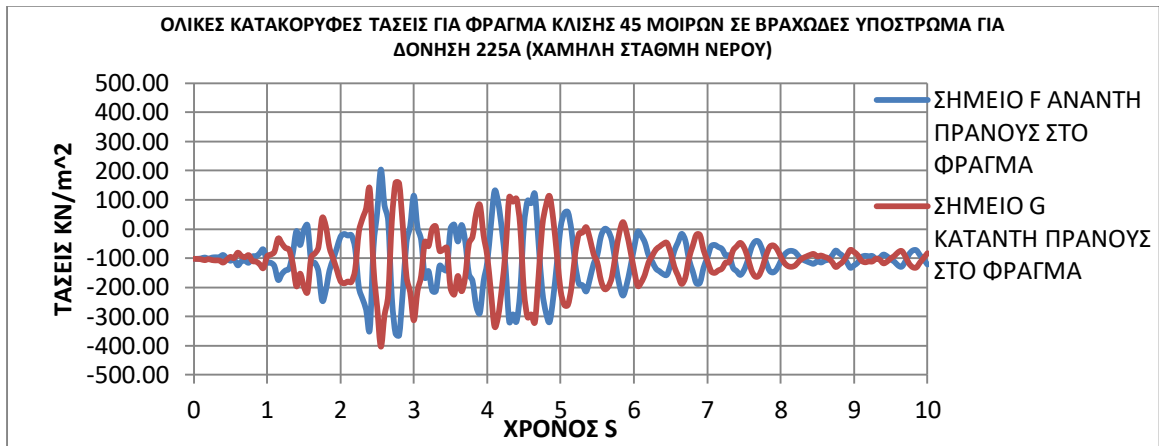
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225A) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



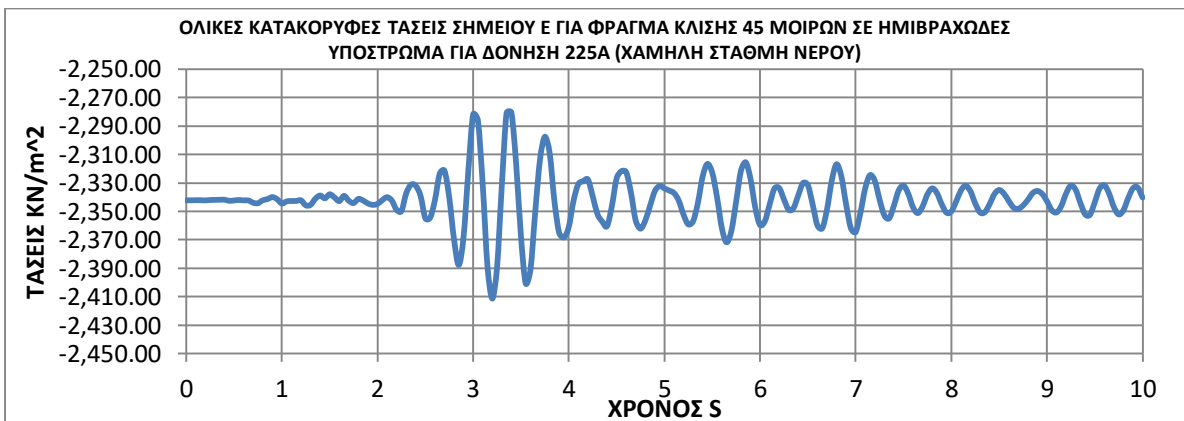
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



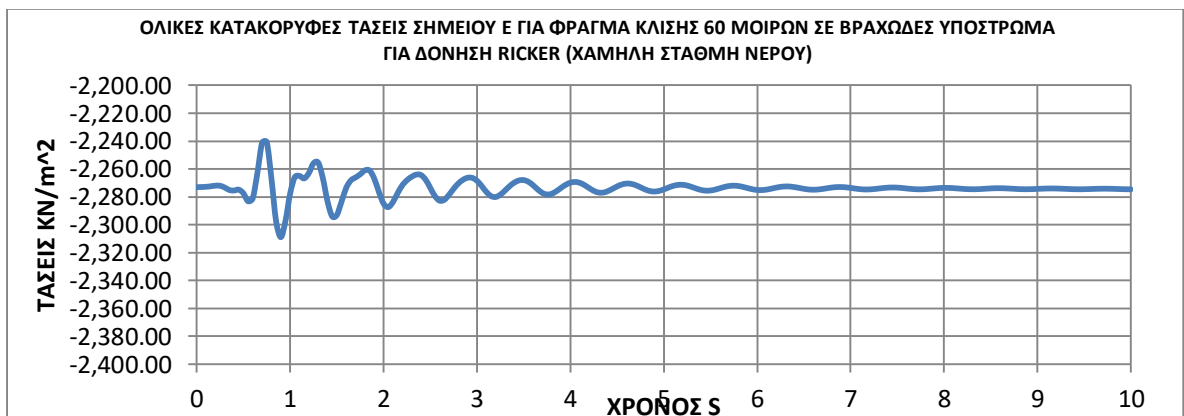
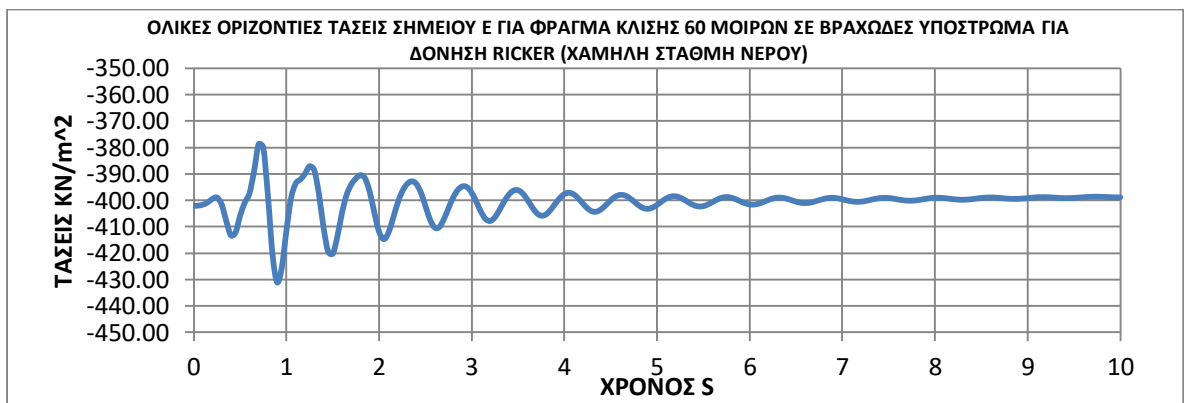
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



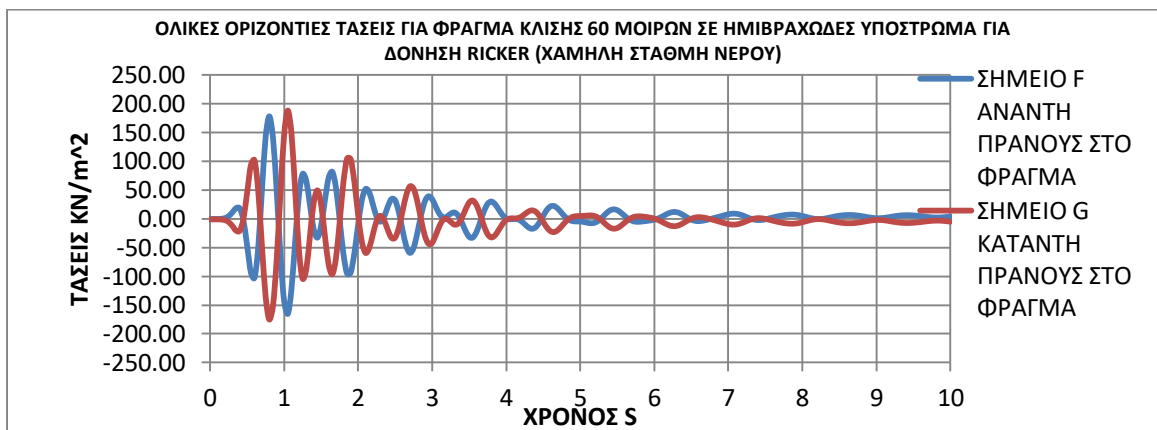
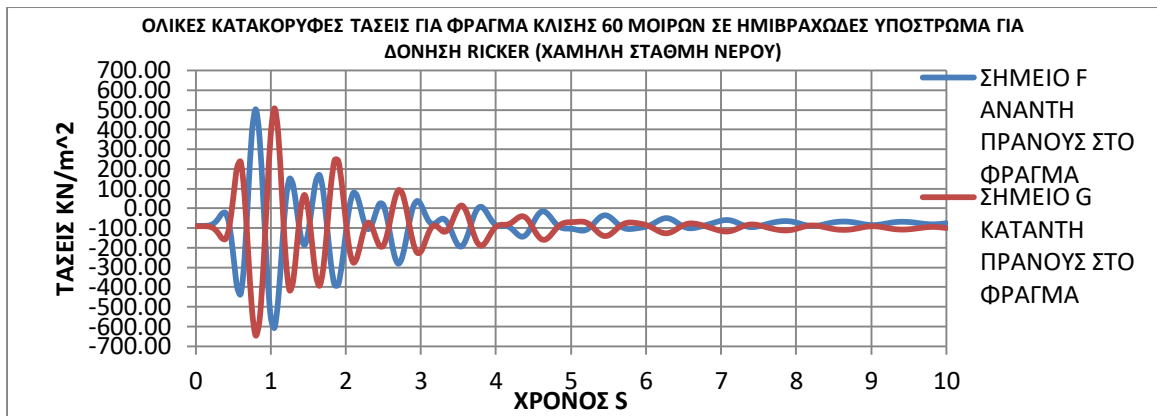
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225A) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



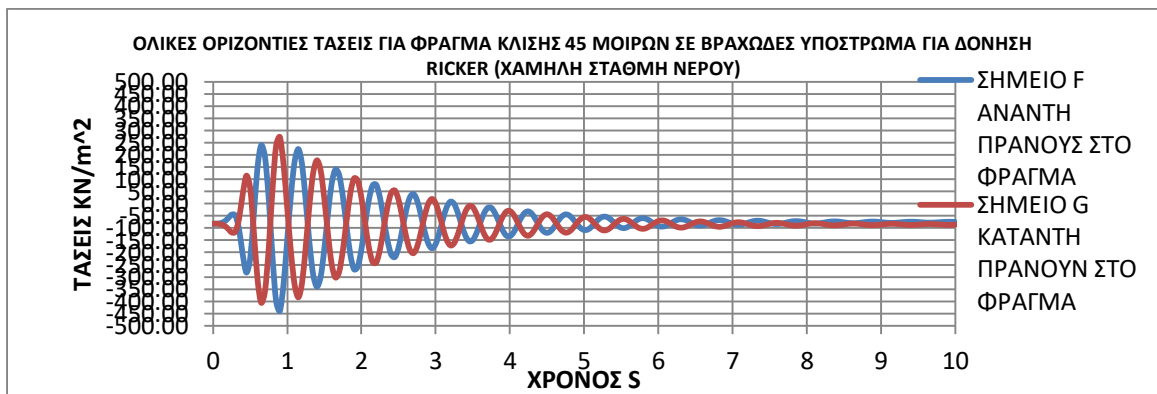
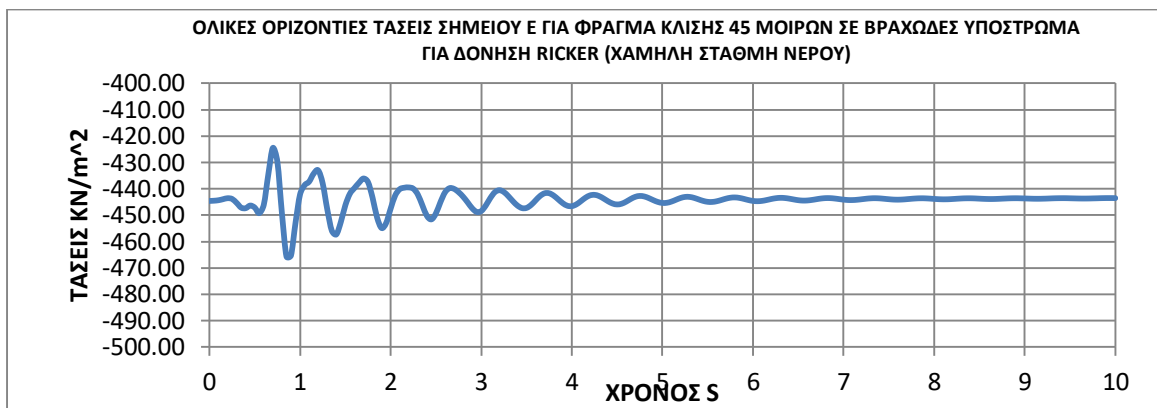
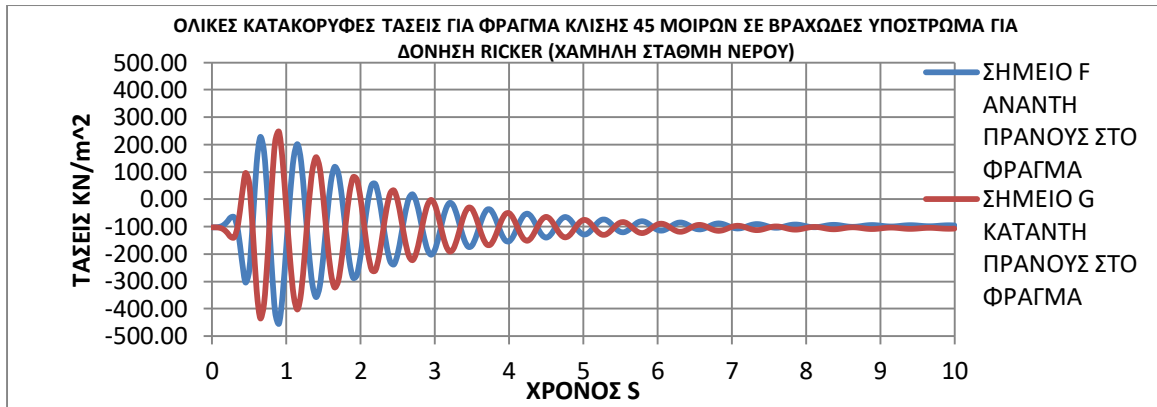
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



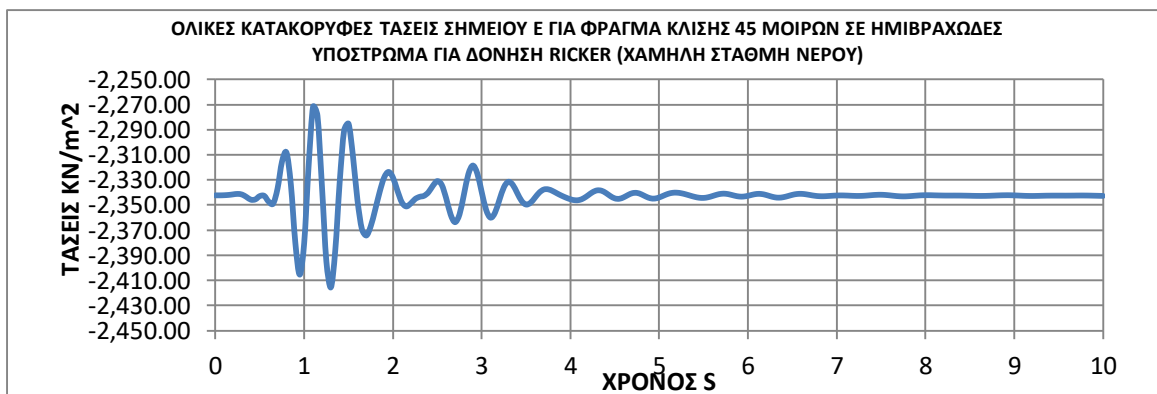
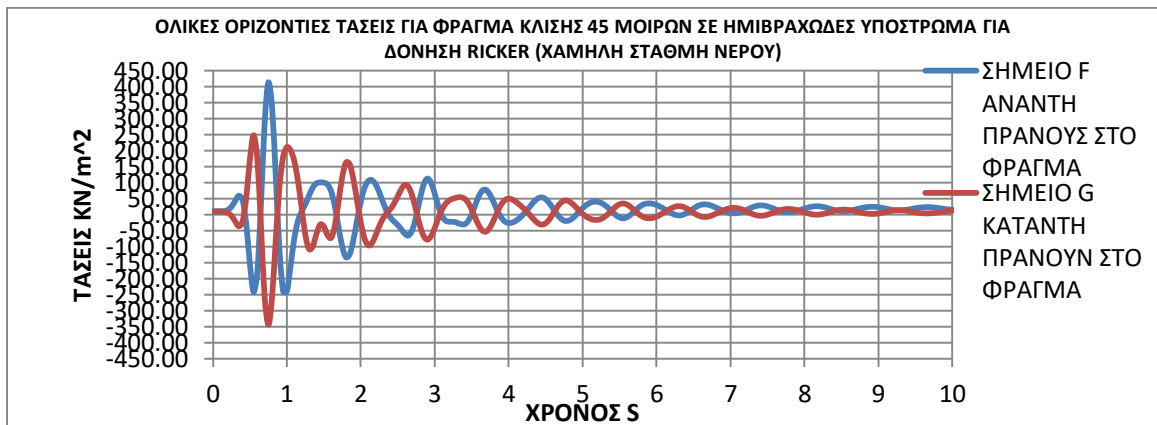
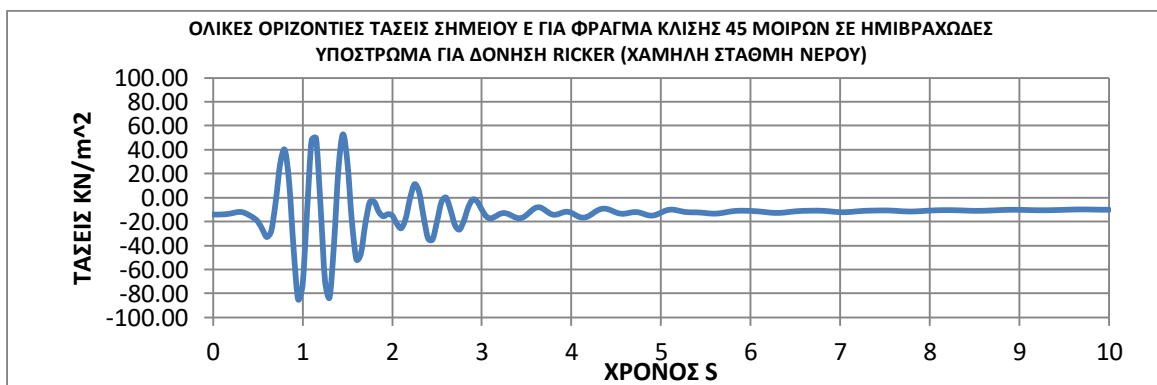
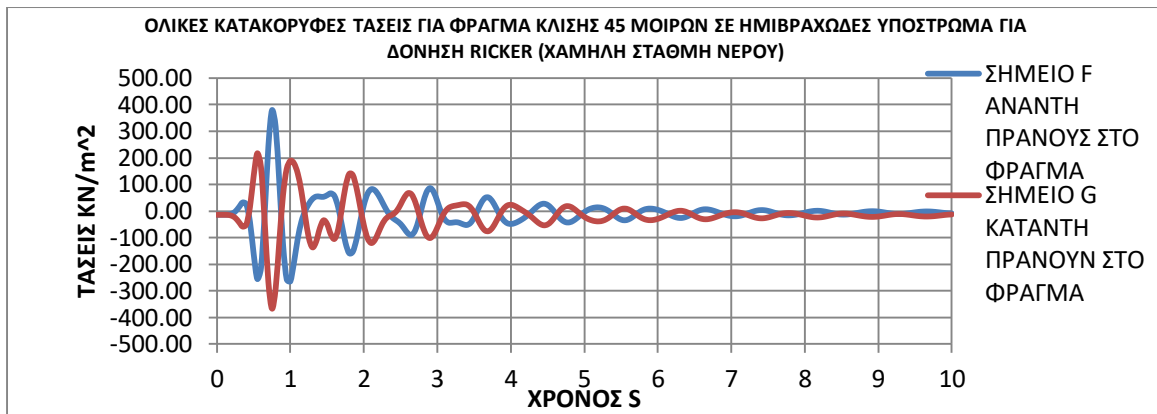
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



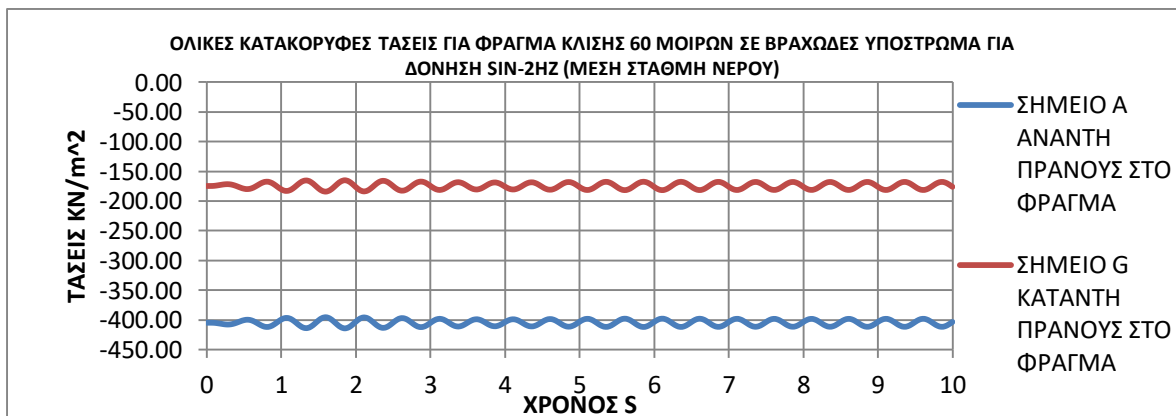
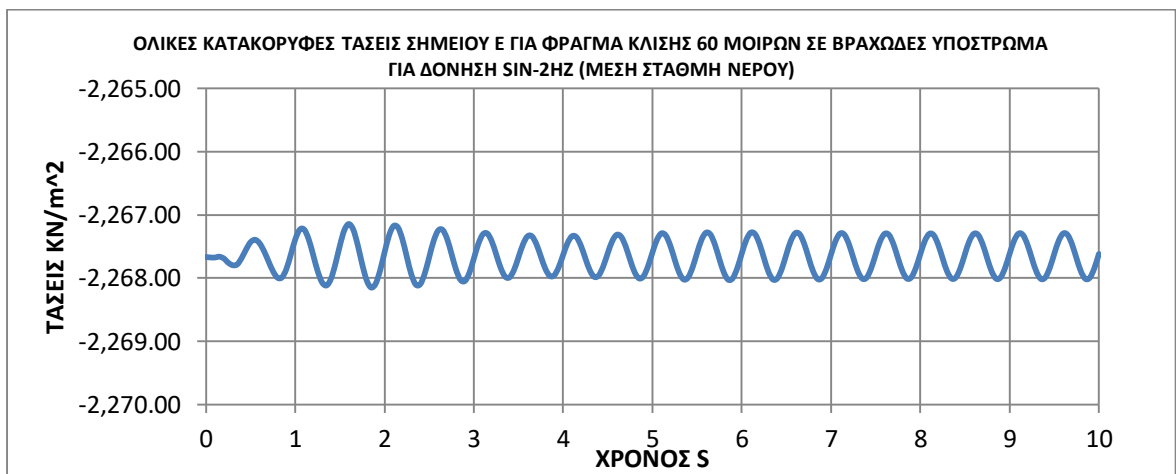
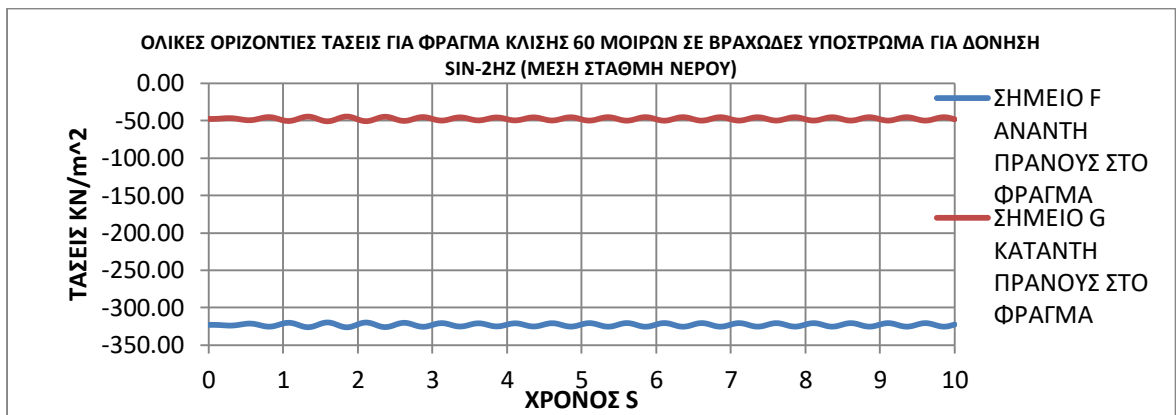
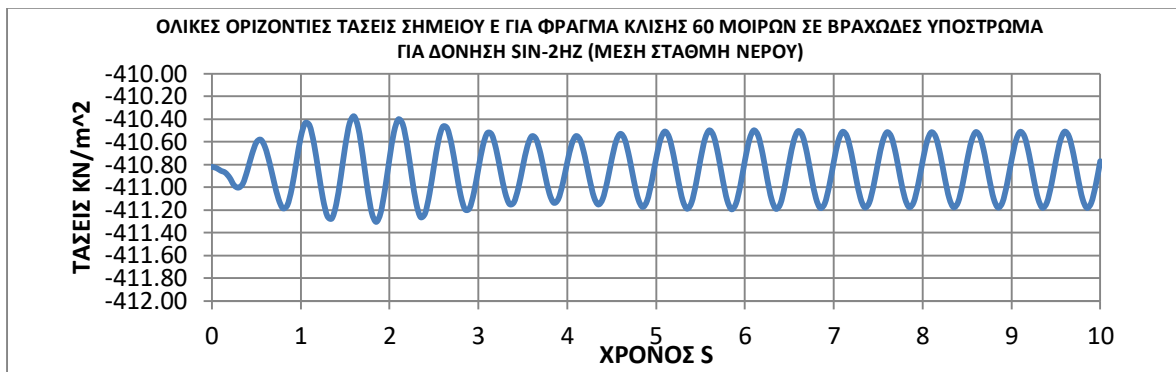
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



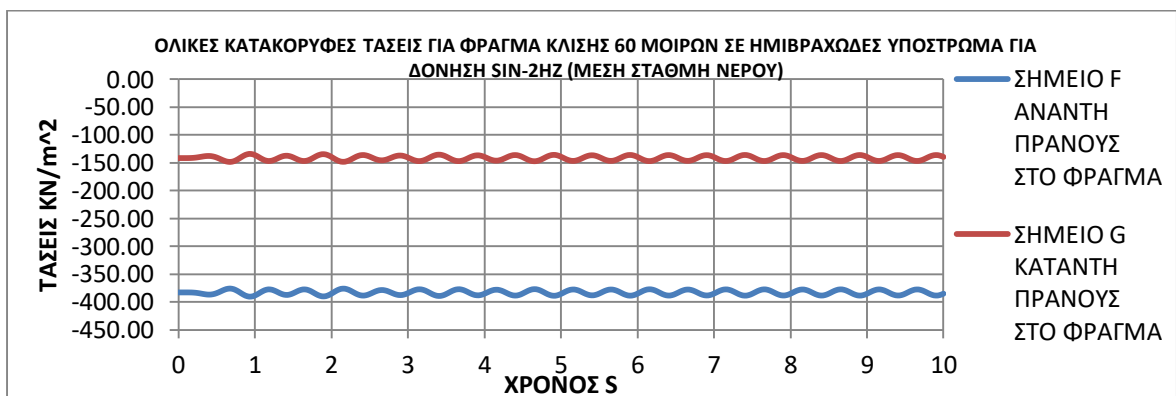
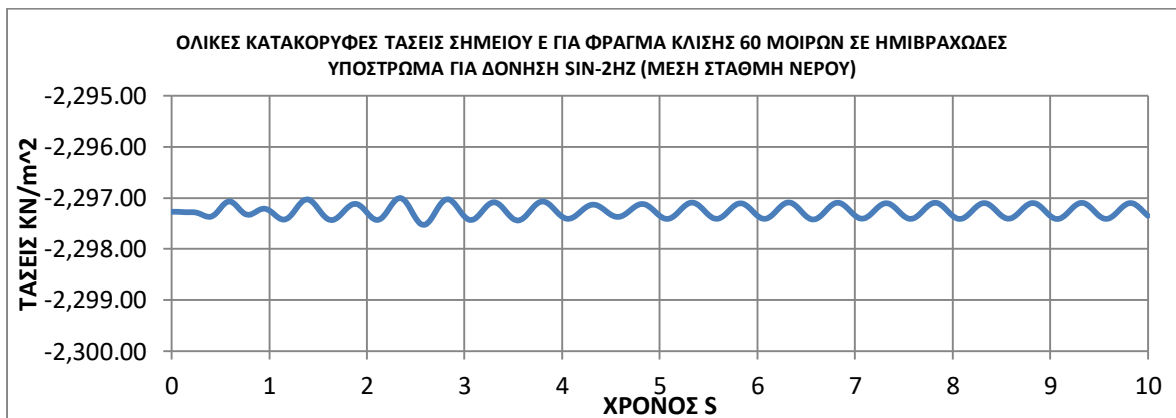
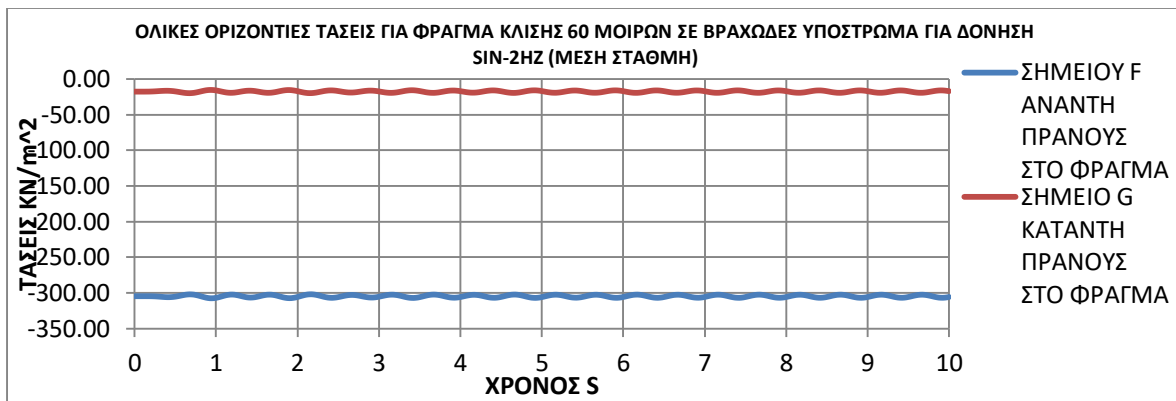
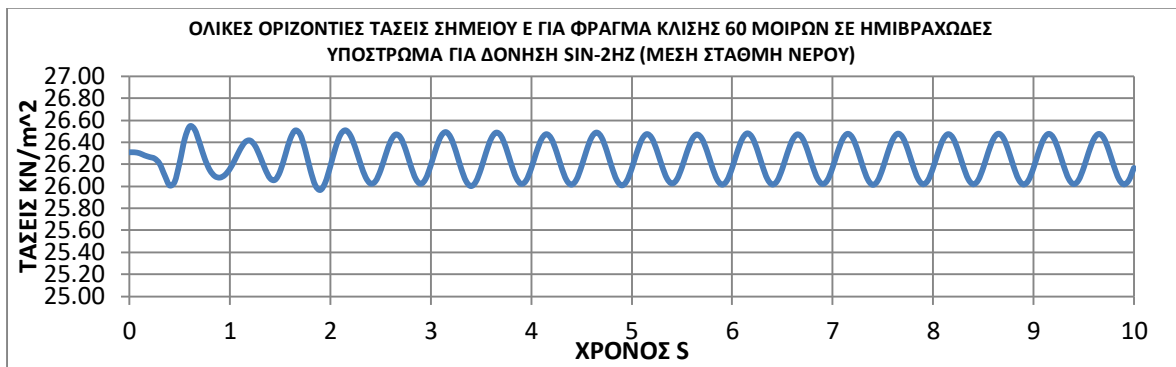
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



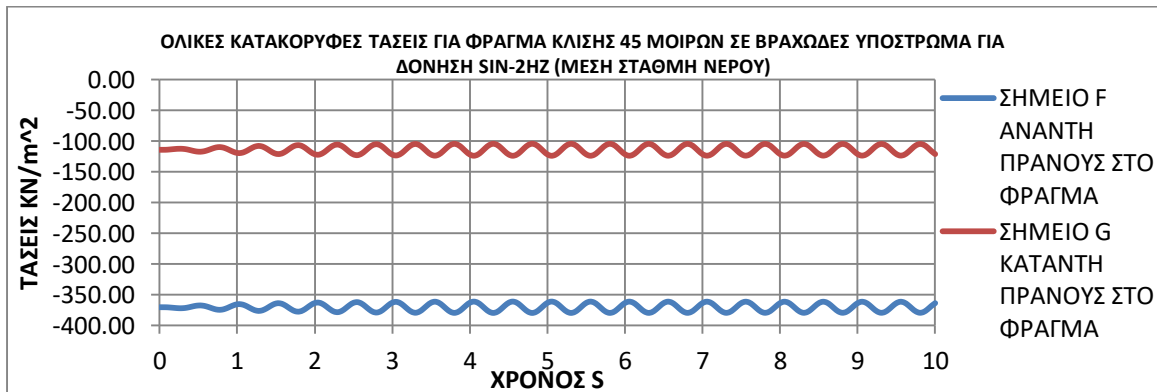
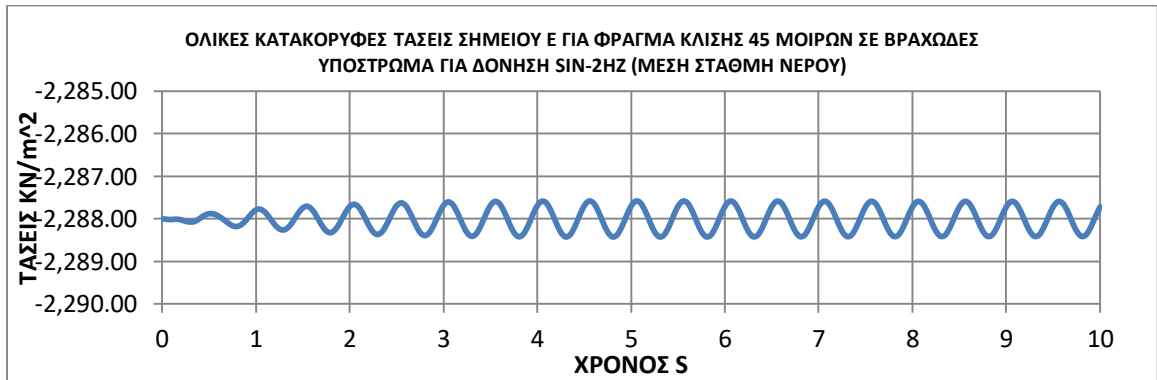
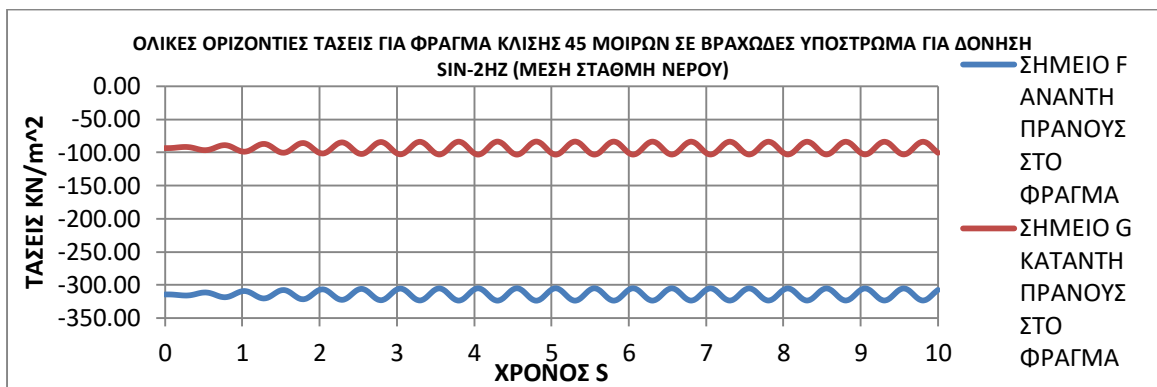
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



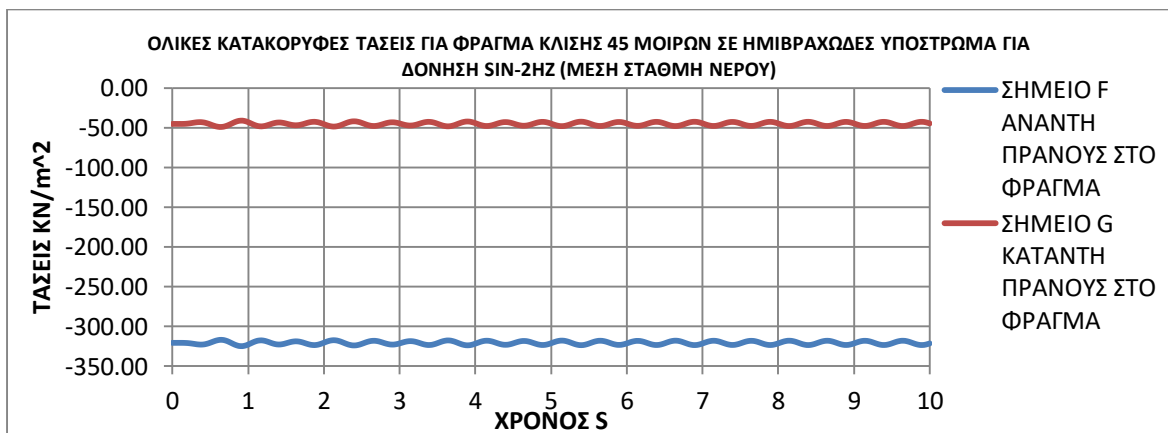
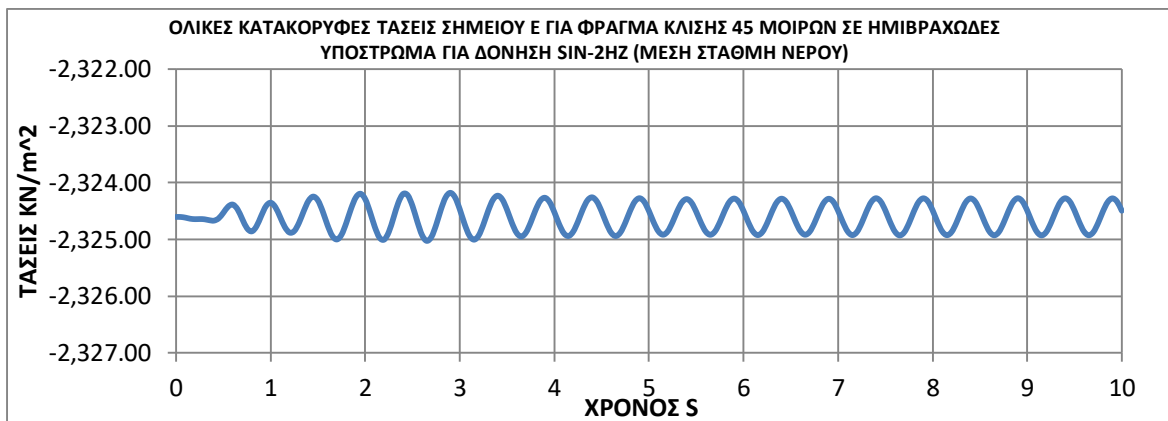
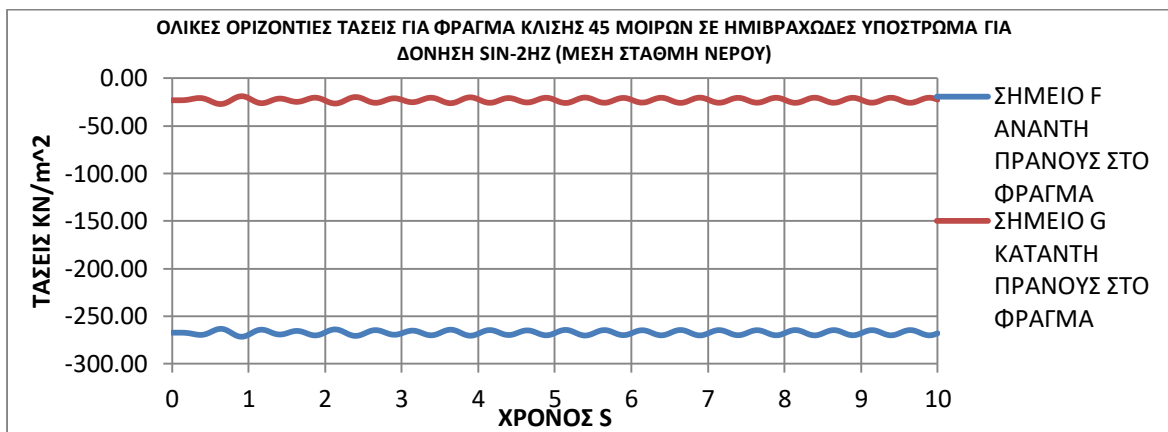
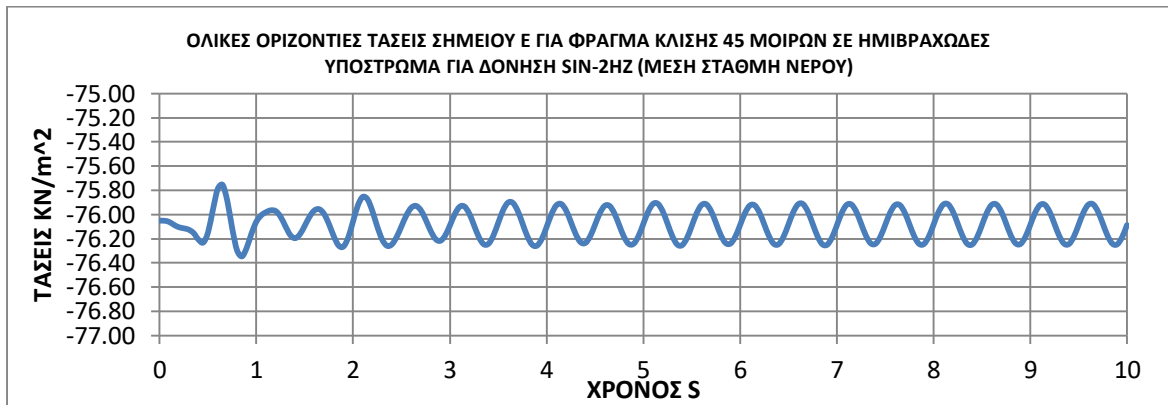
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



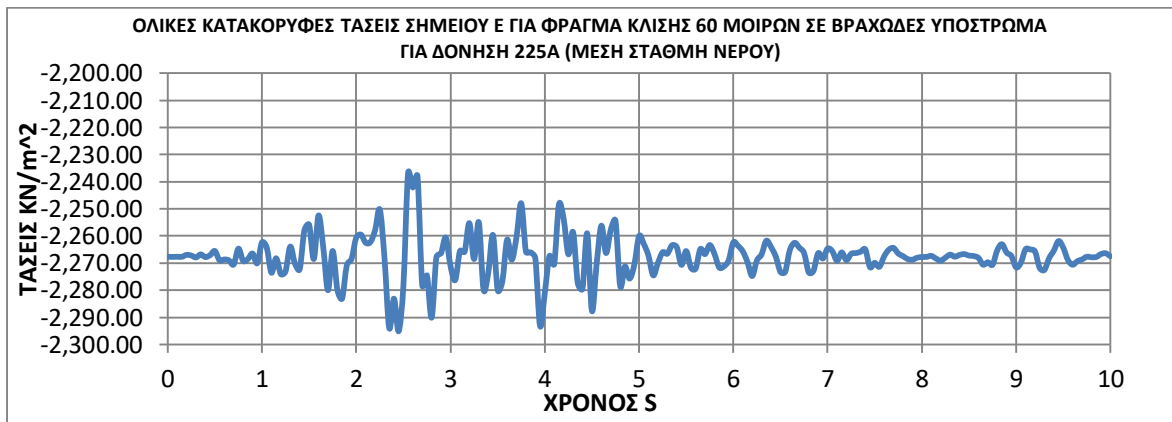
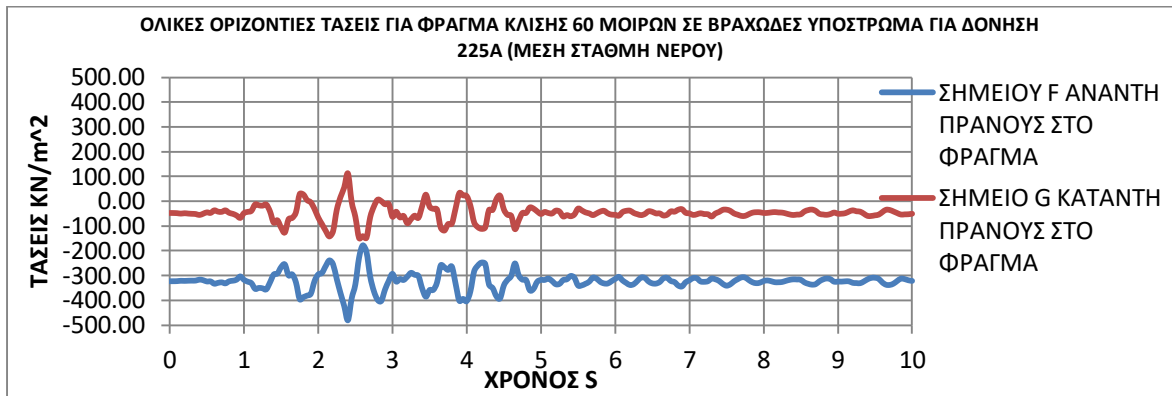
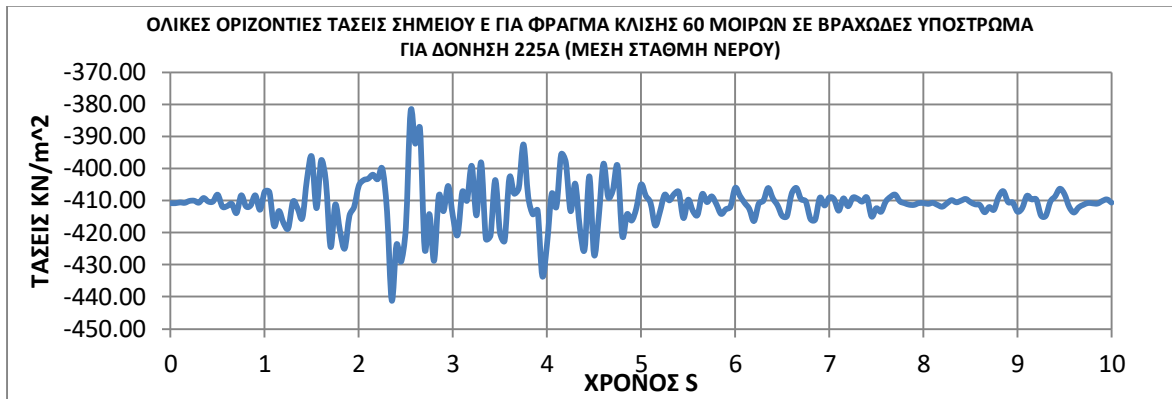
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



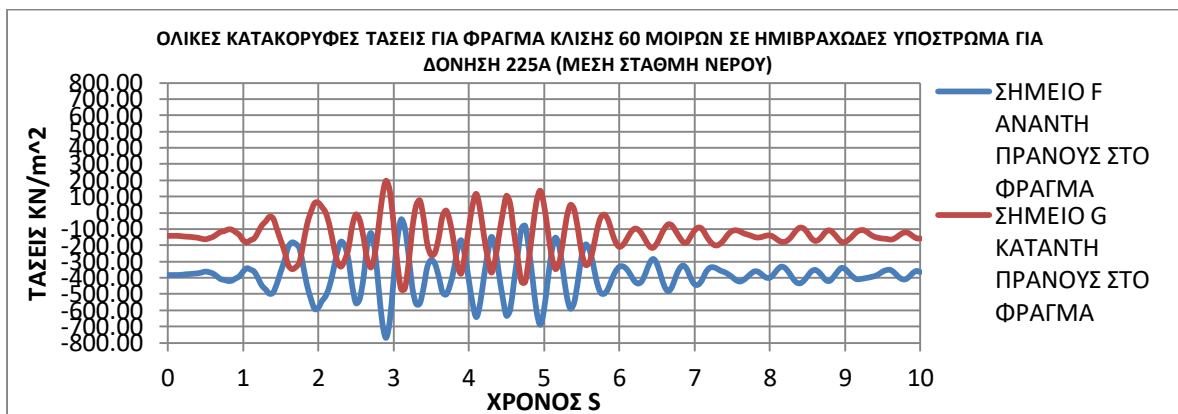
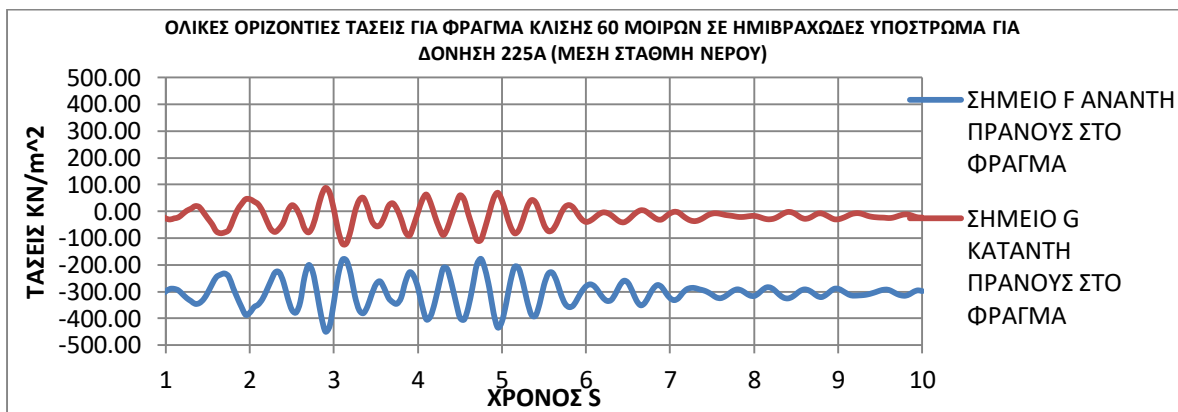
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



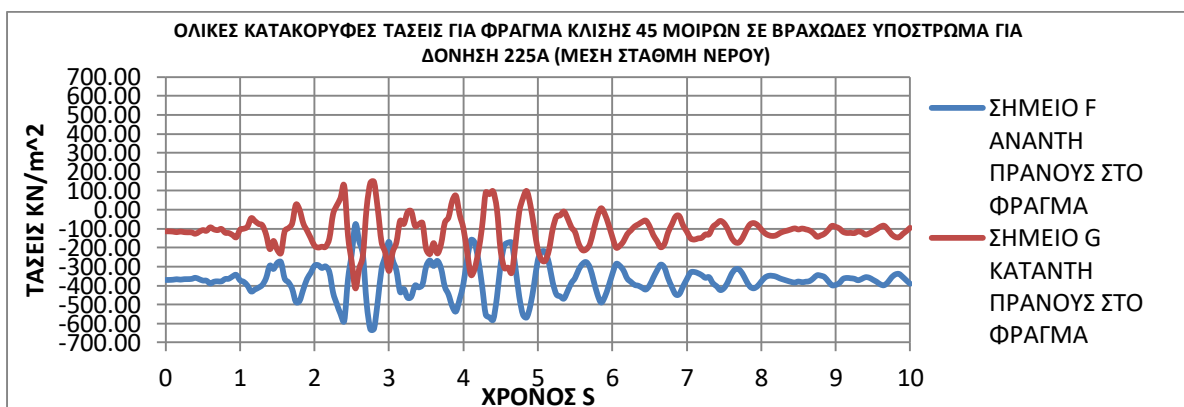
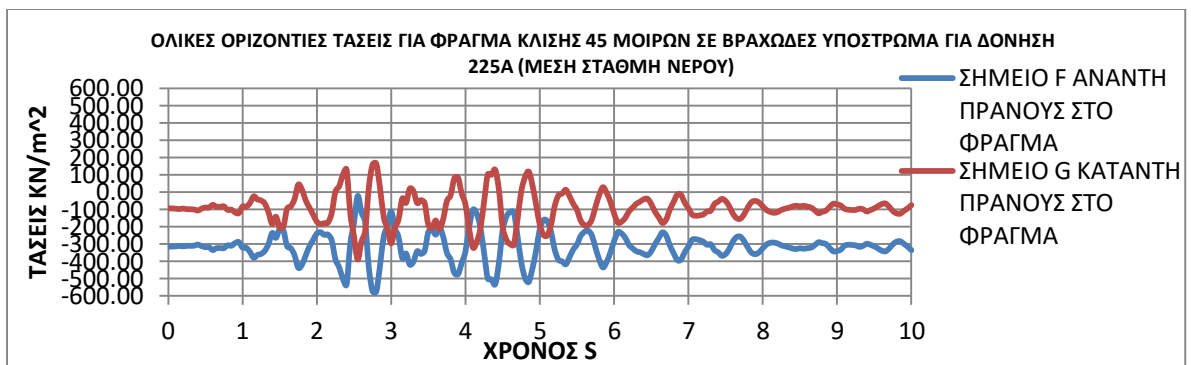
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225A) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



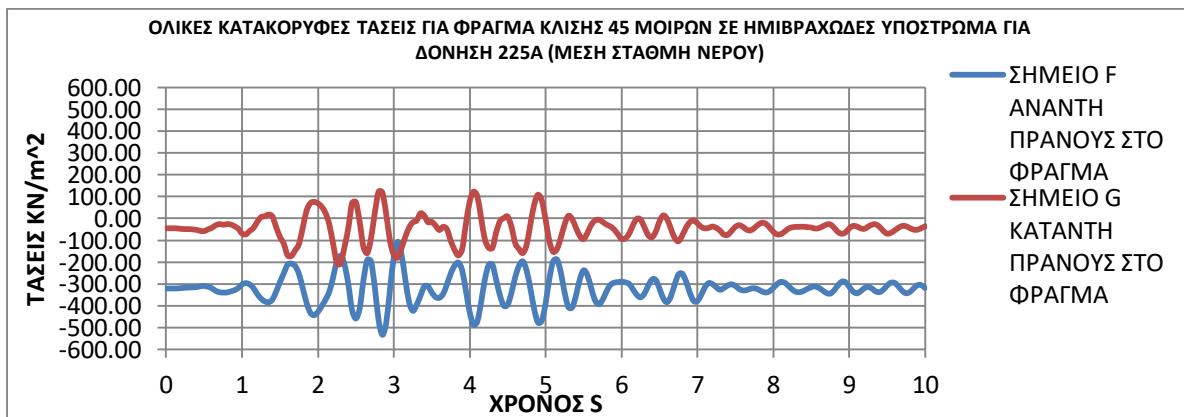
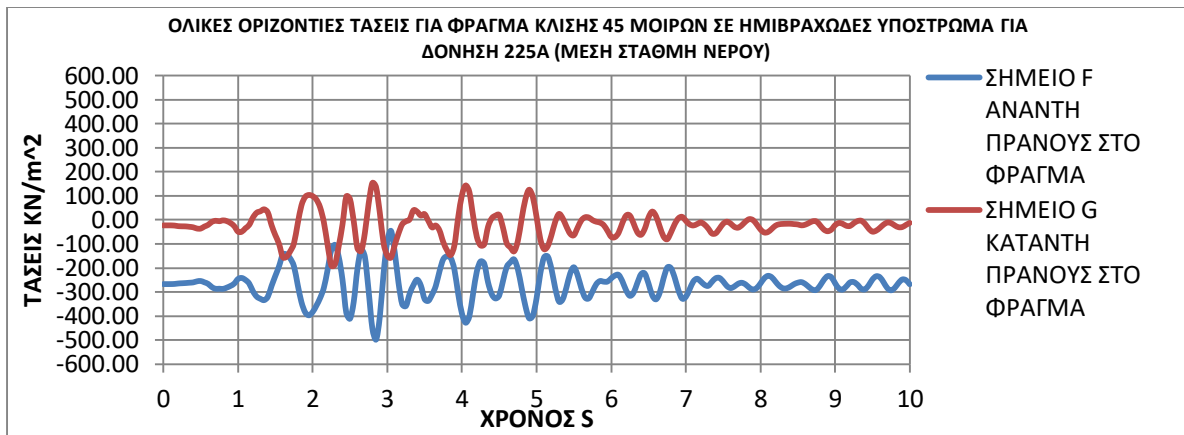
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



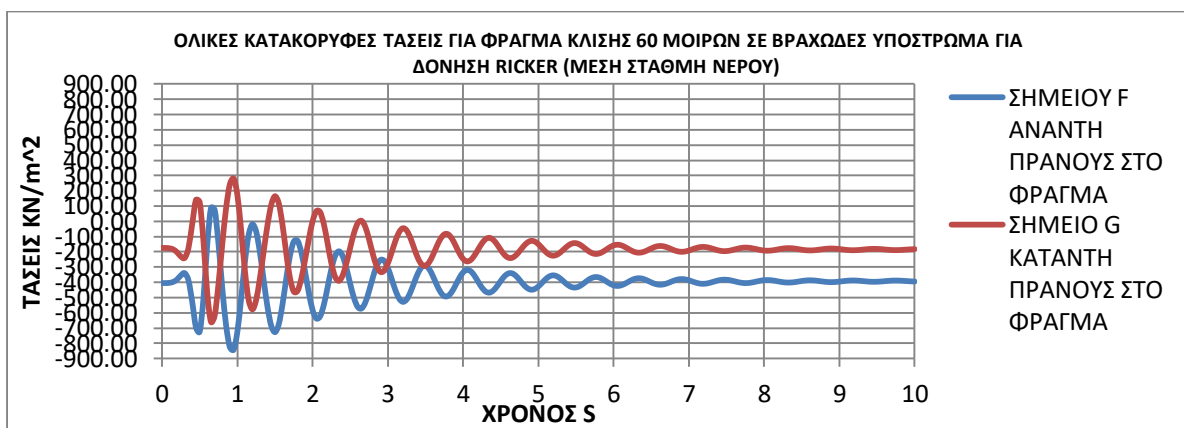
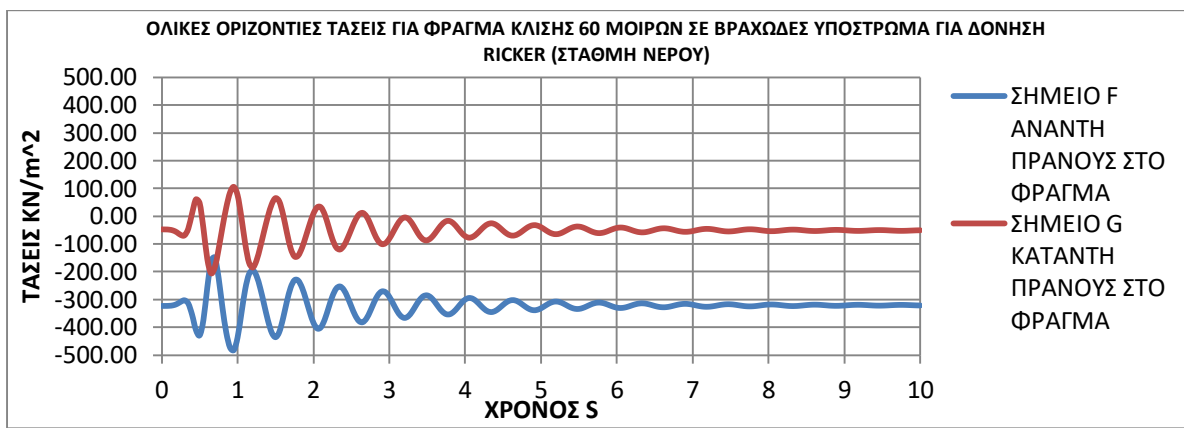
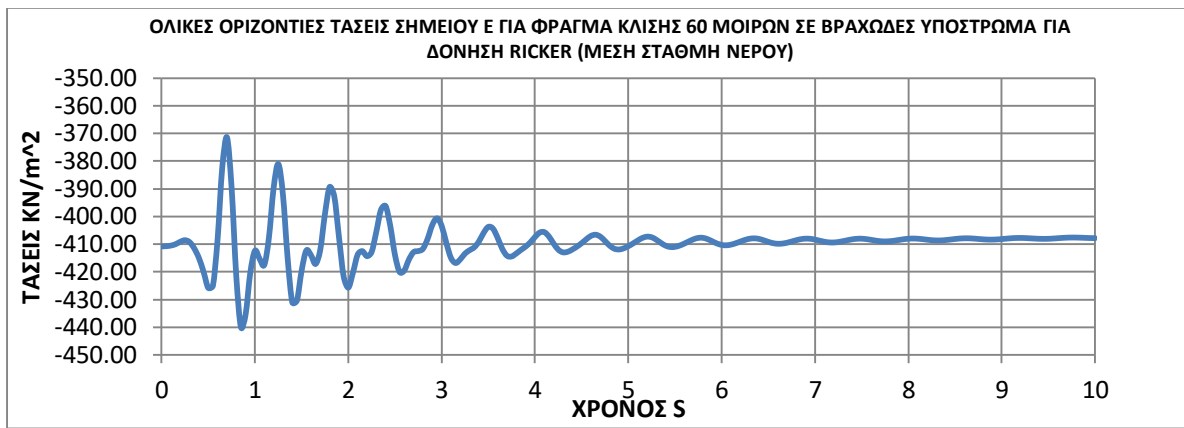
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



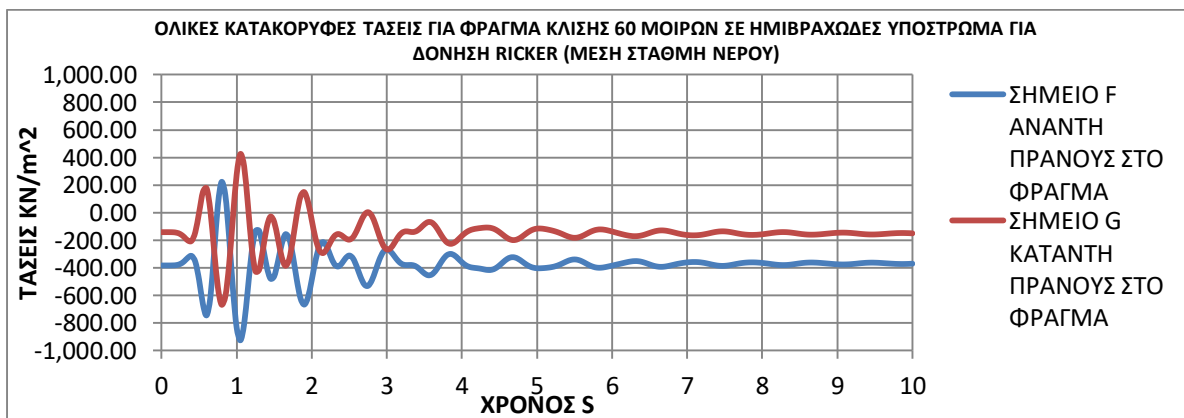
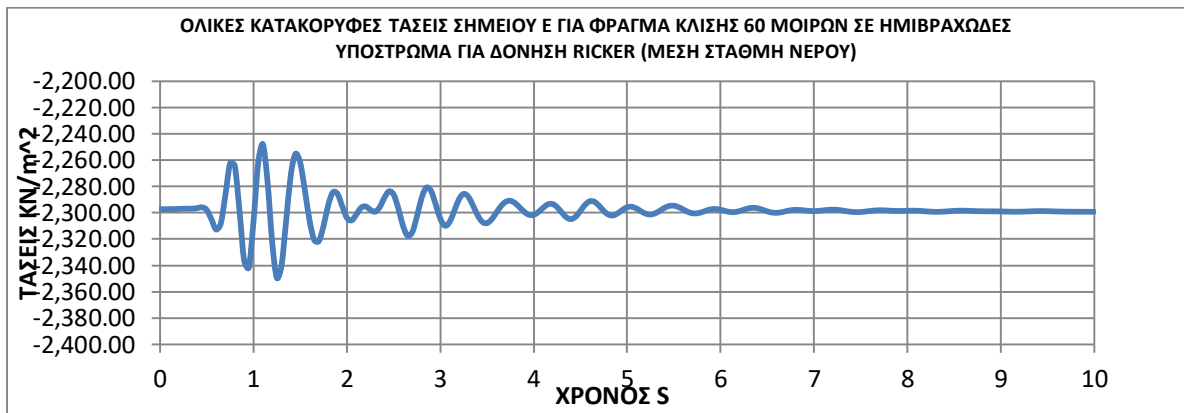
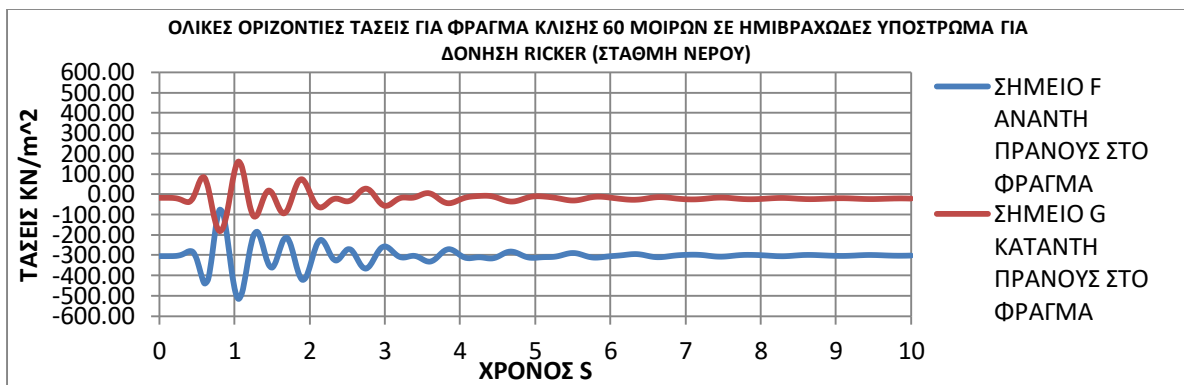
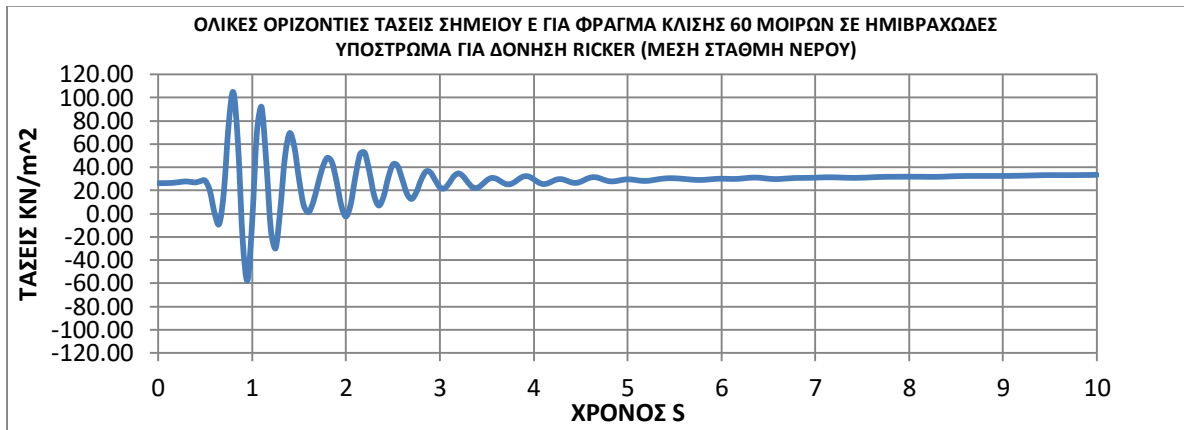
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



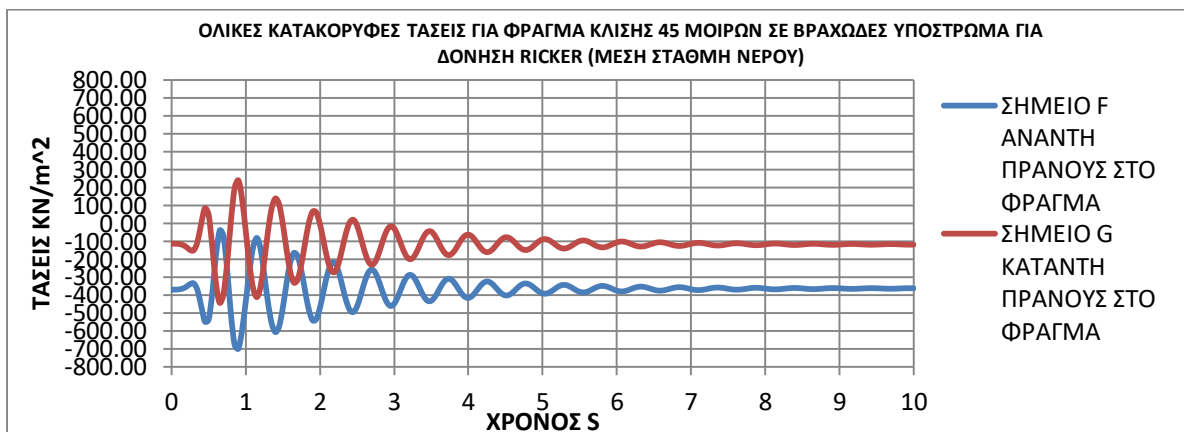
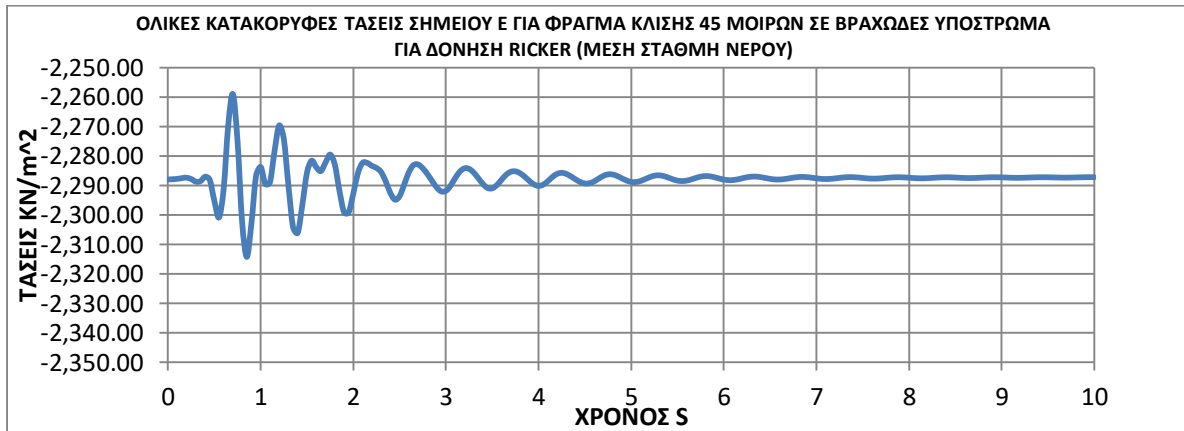
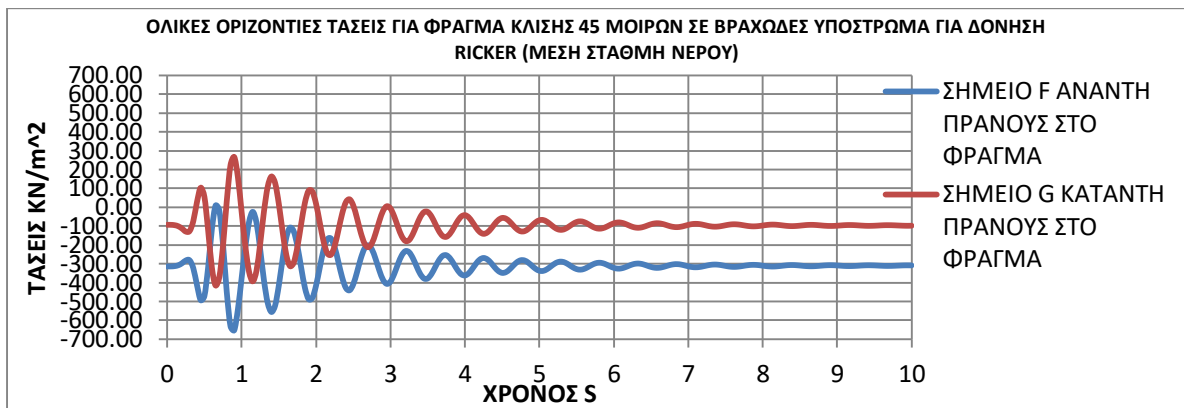
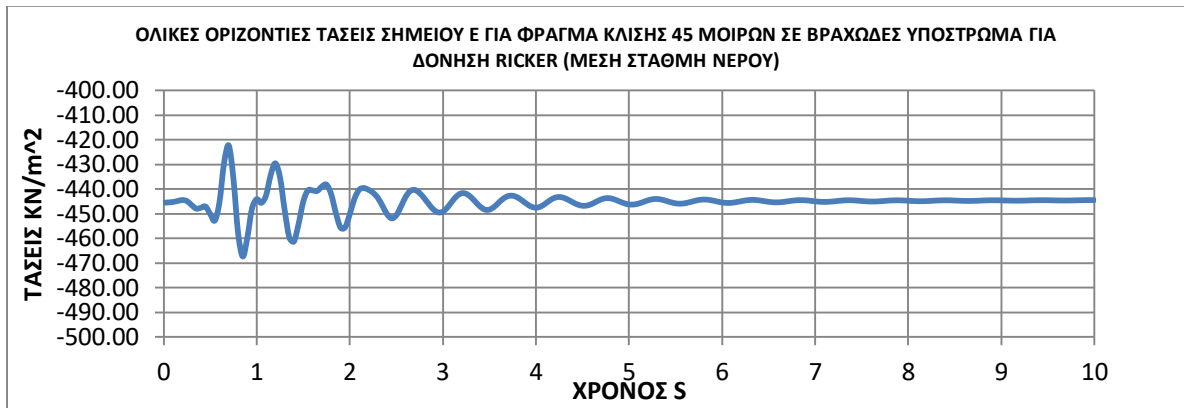
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



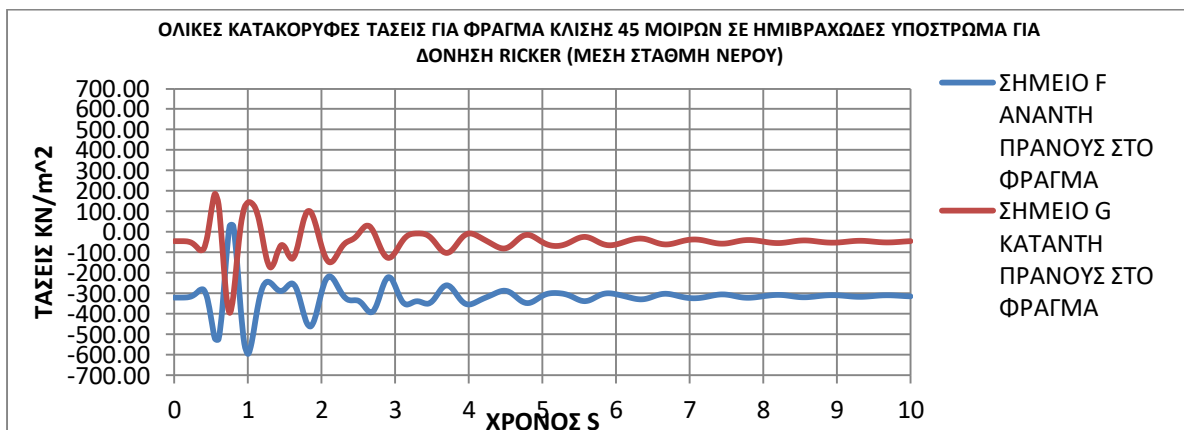
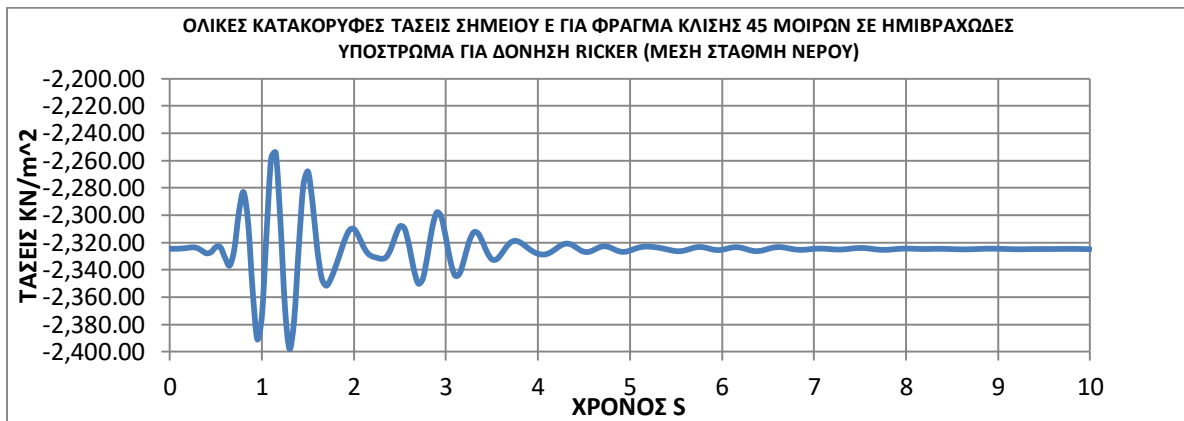
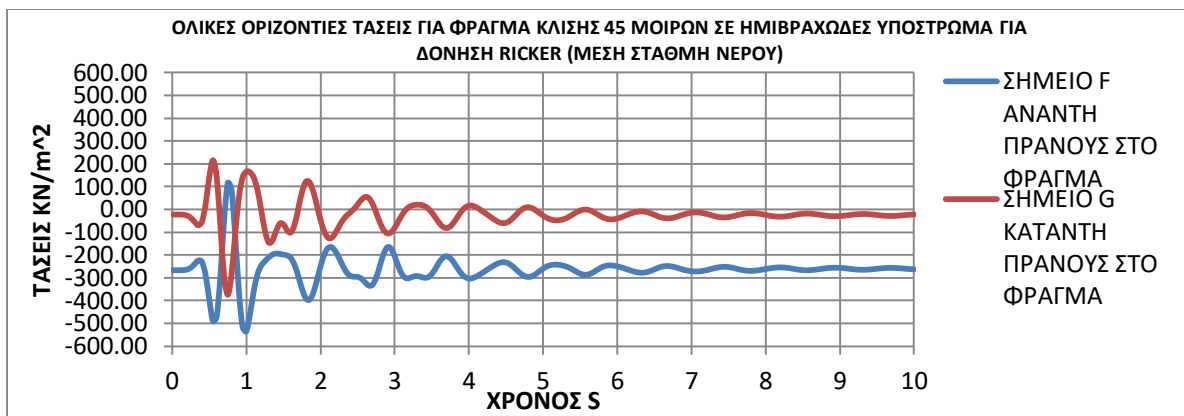
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



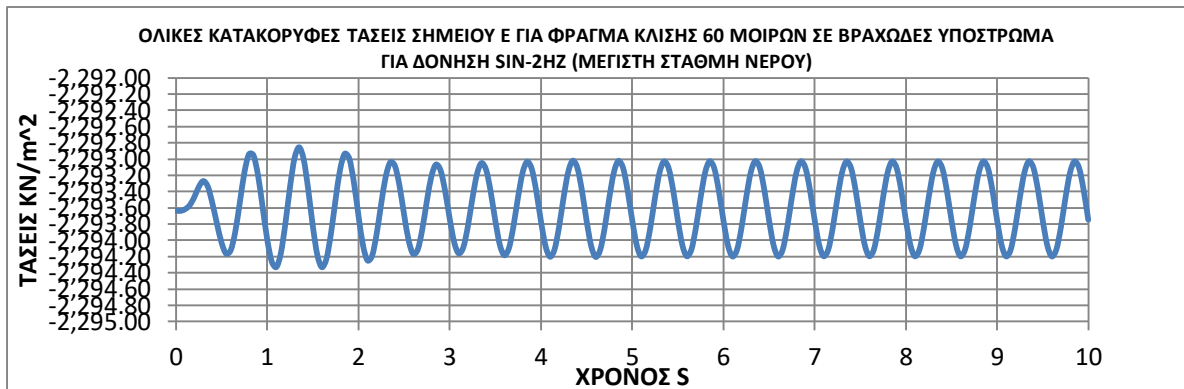
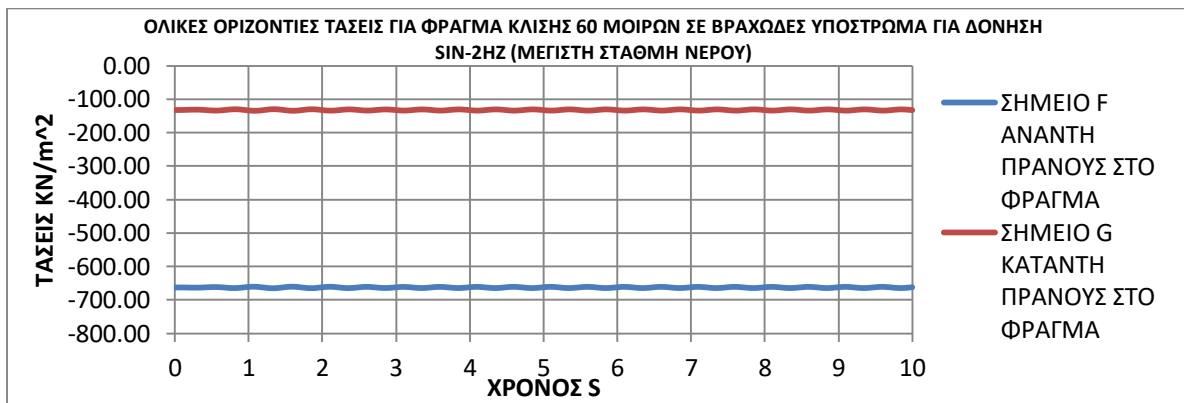
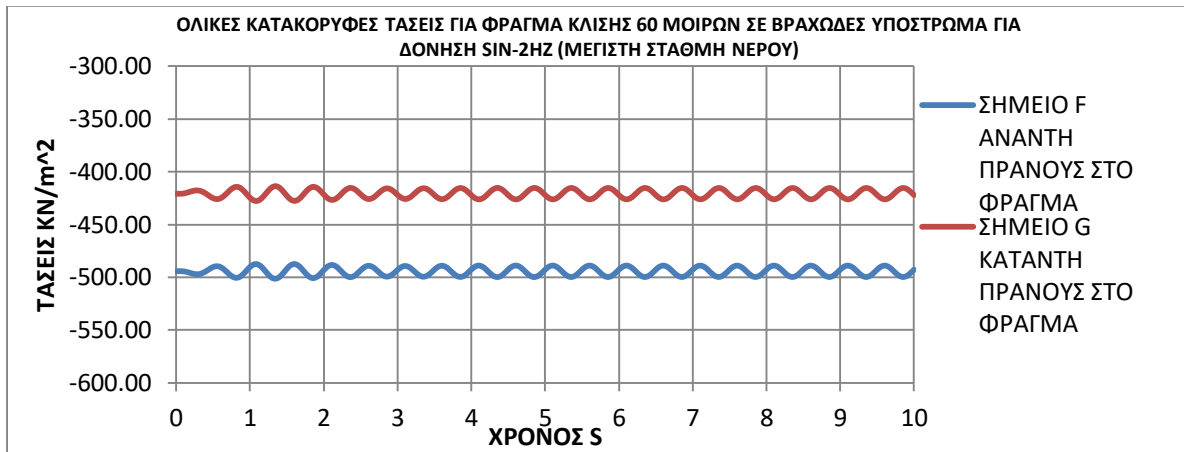
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



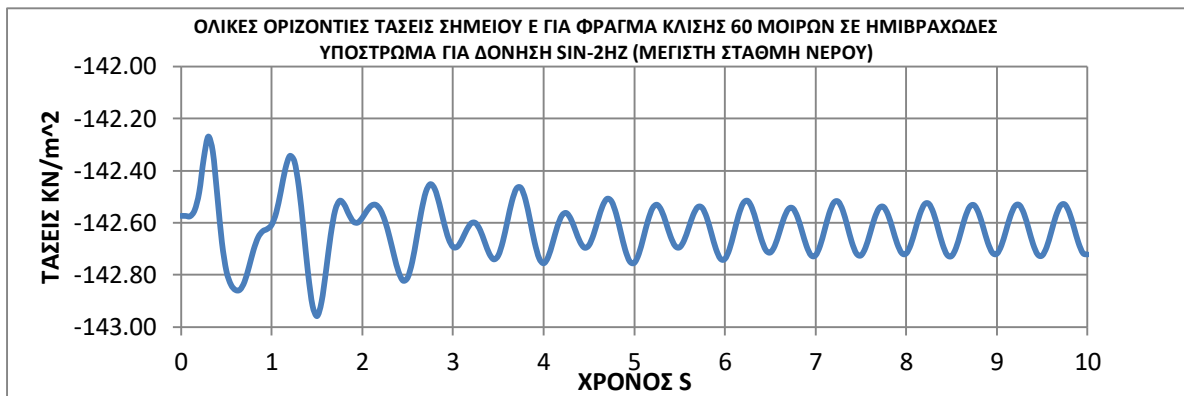
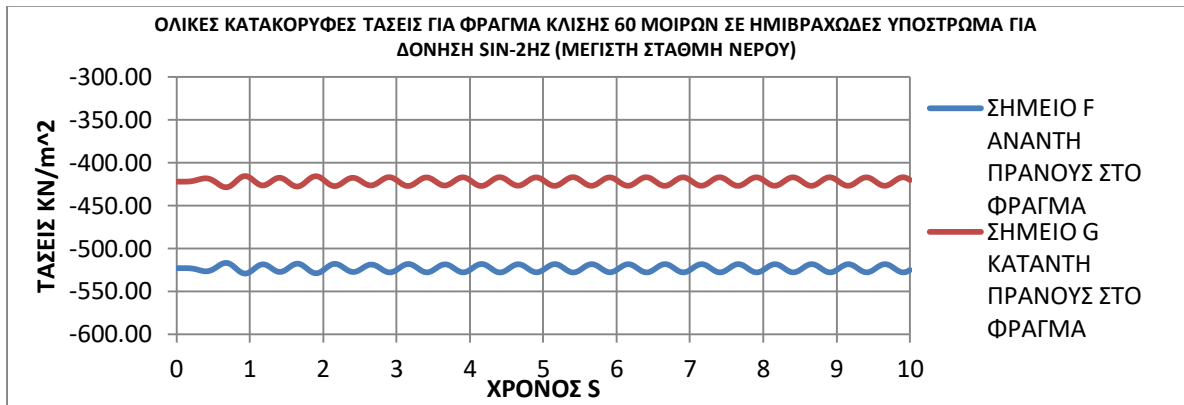
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



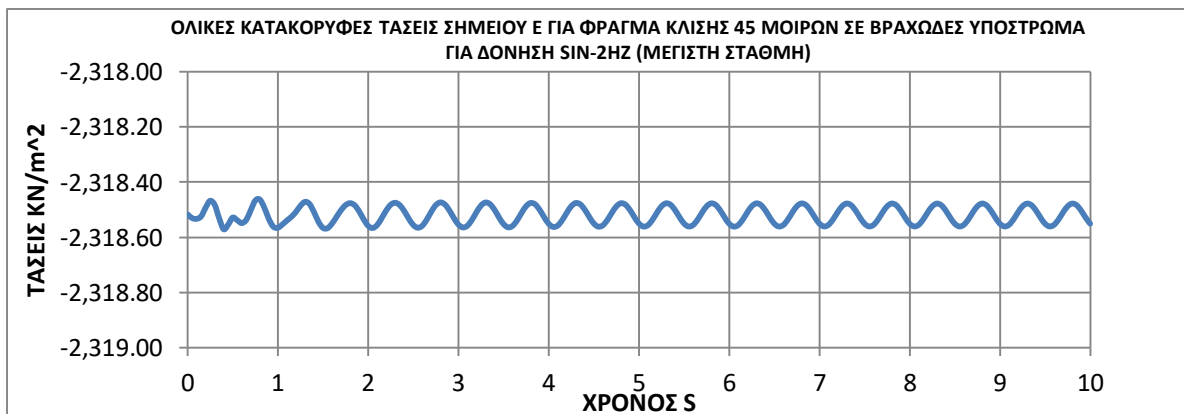
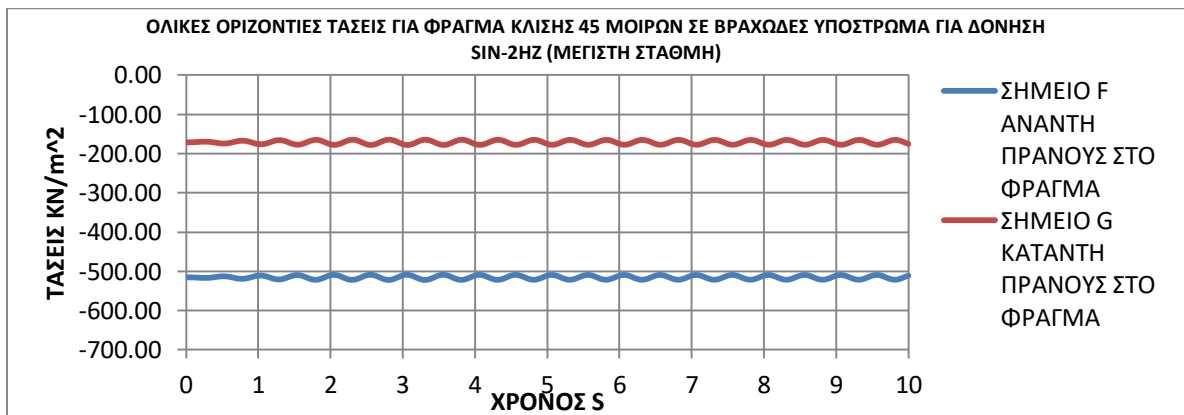
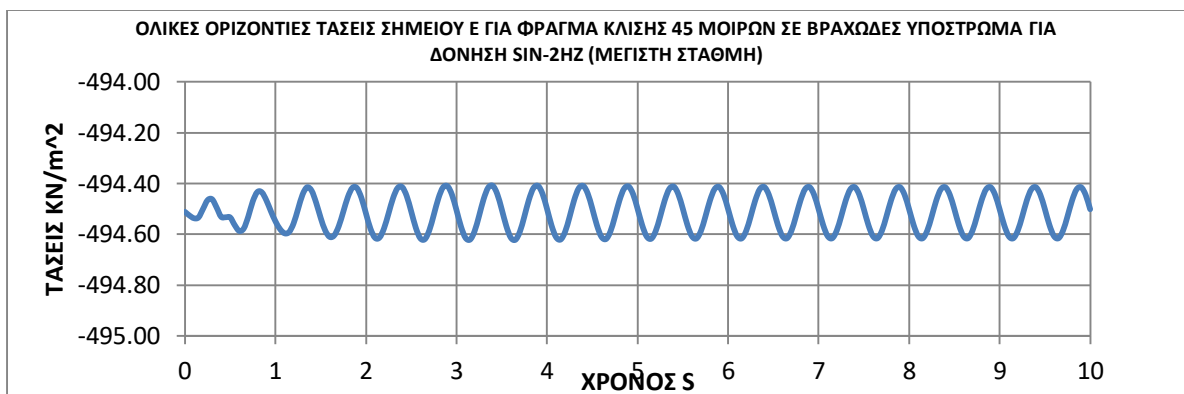
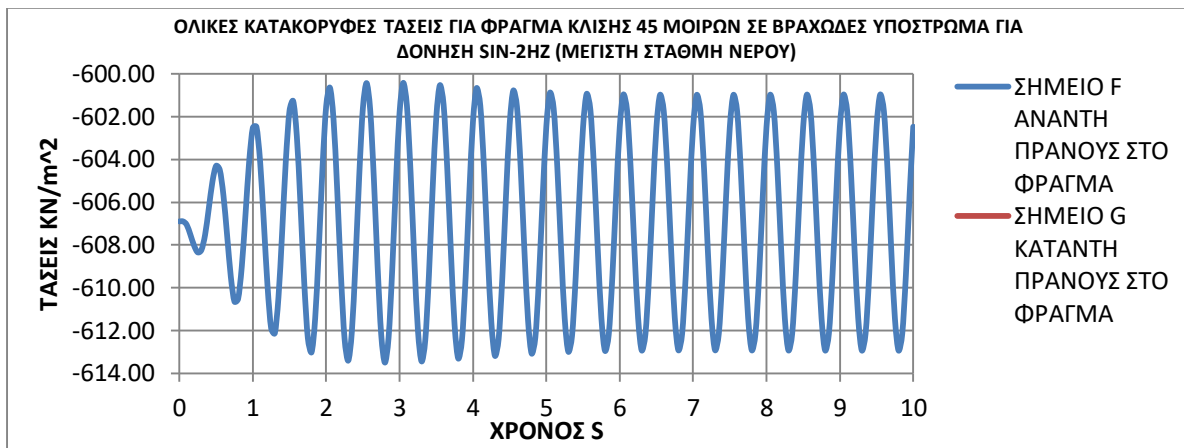
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



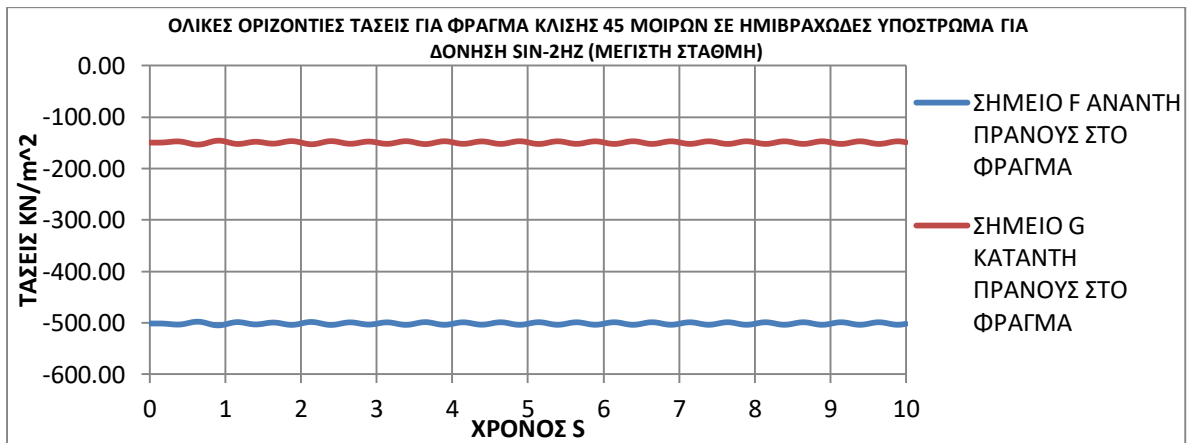
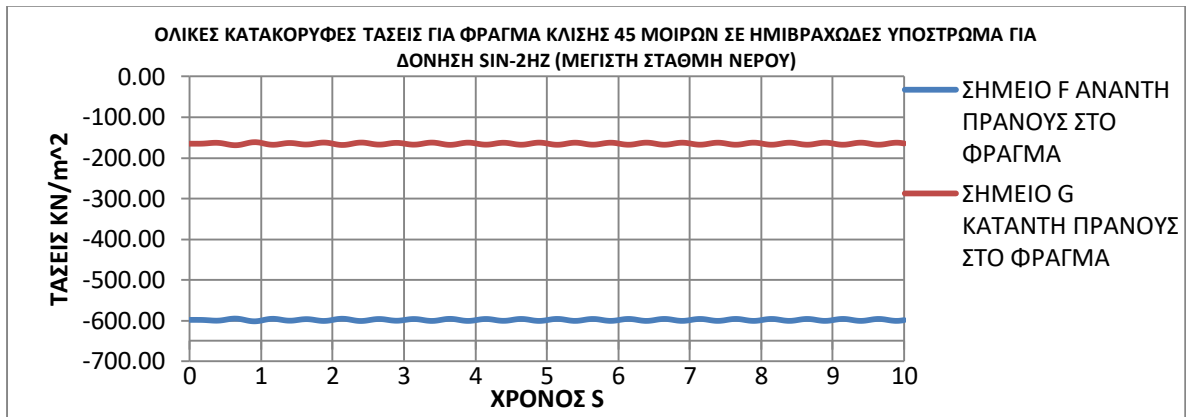
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



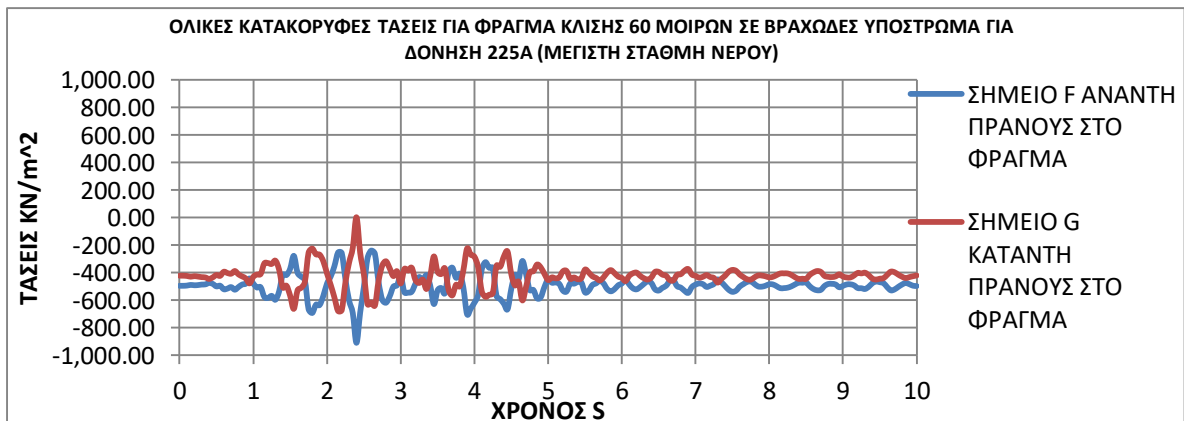
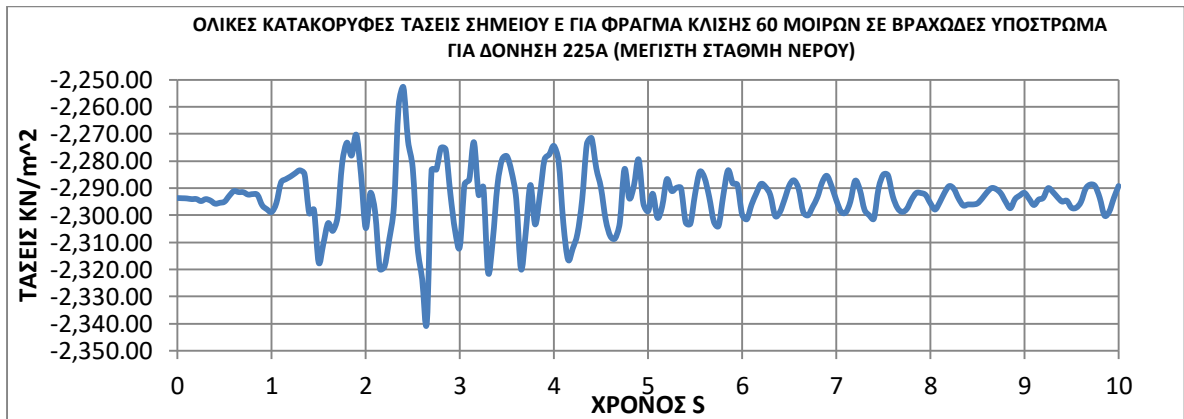
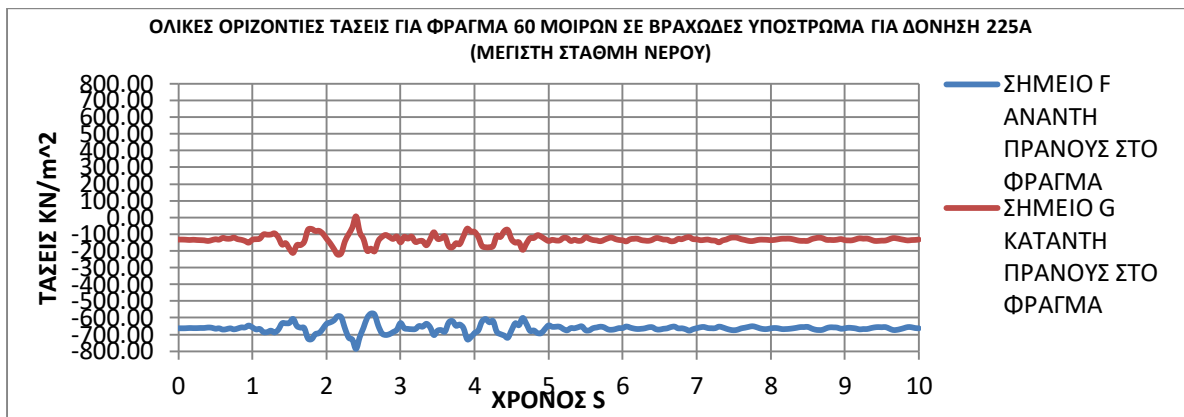
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3



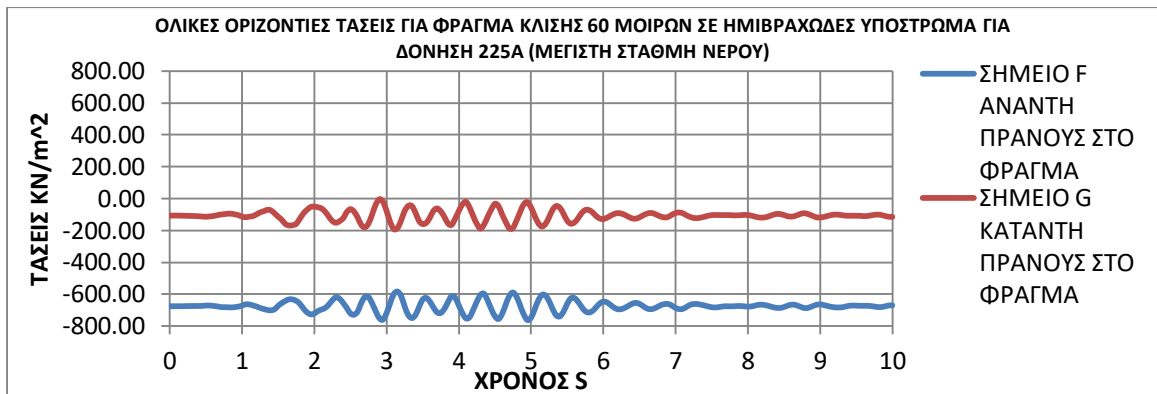
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



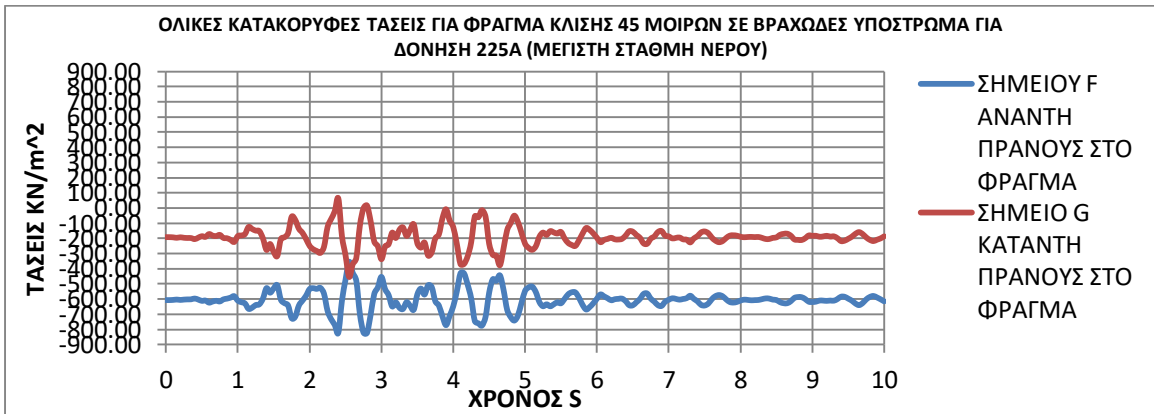
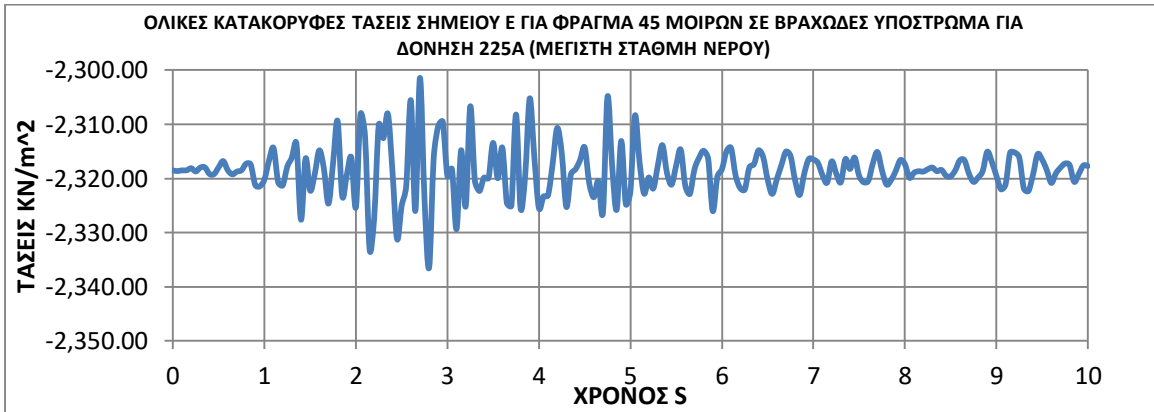
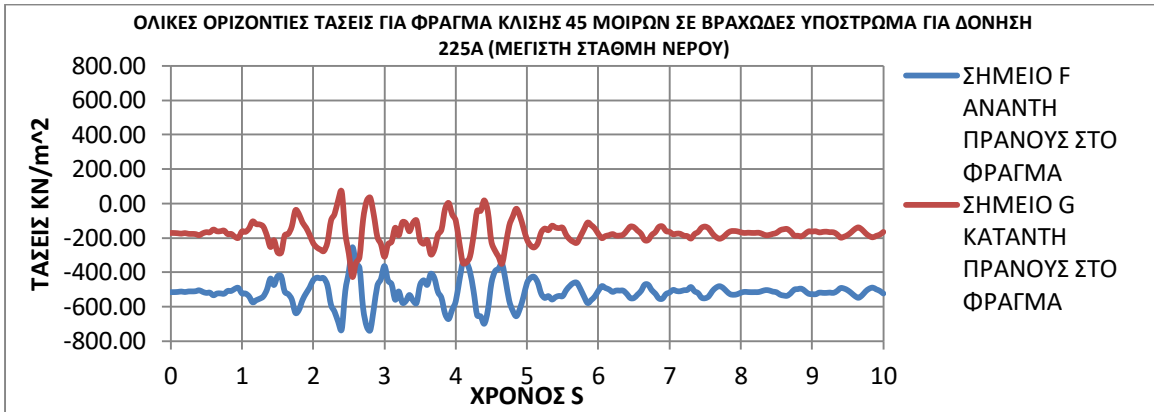
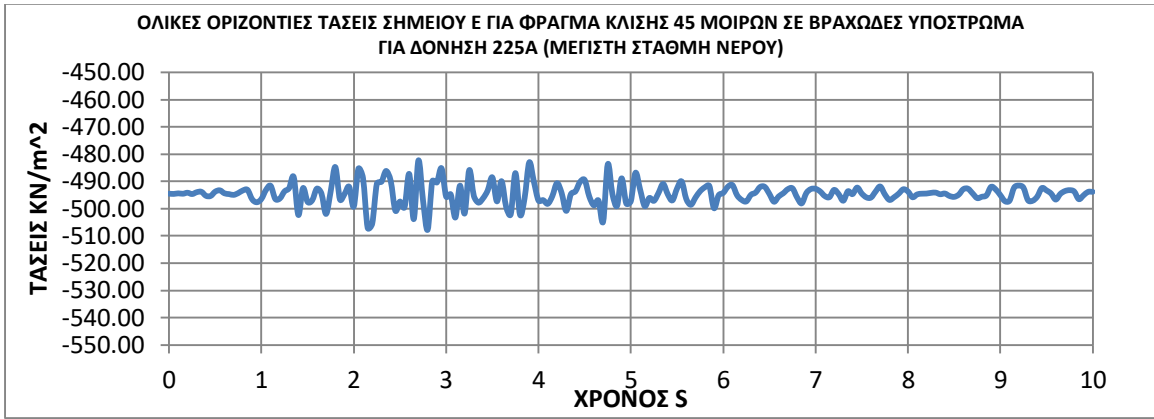
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



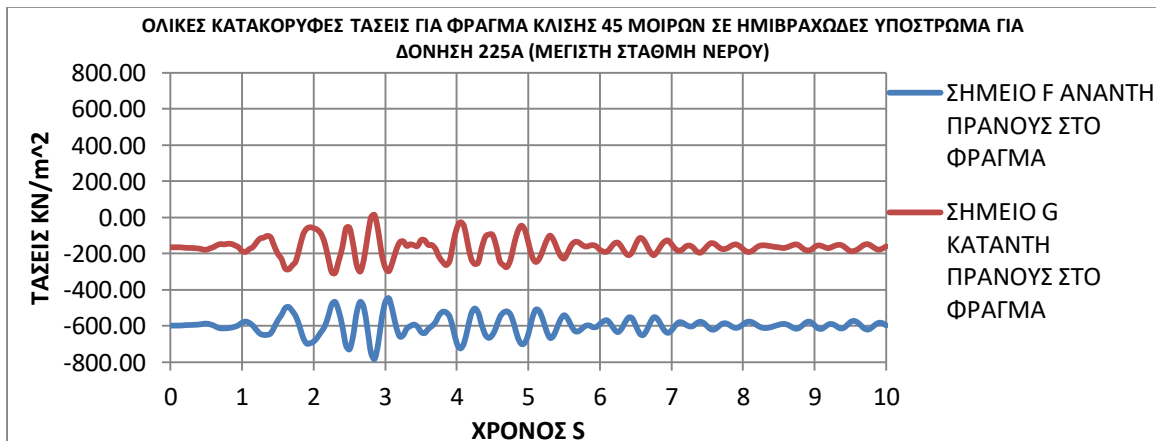
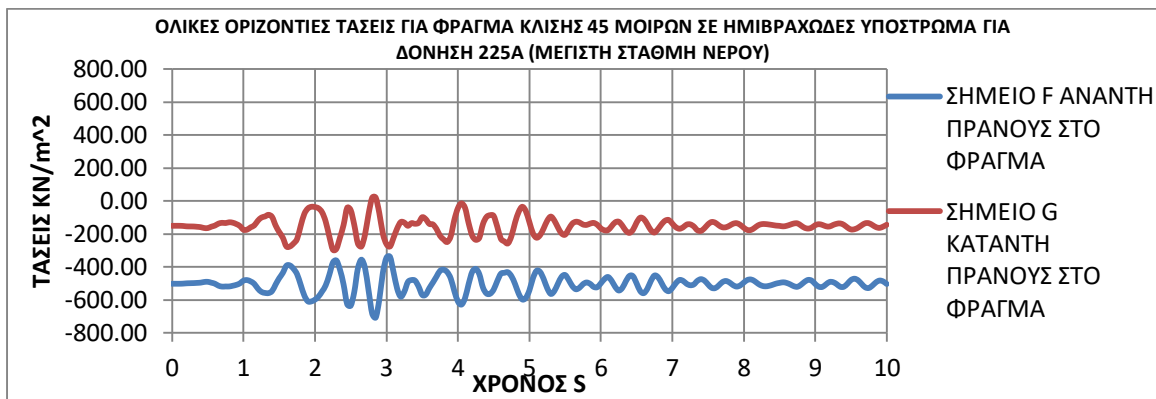
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



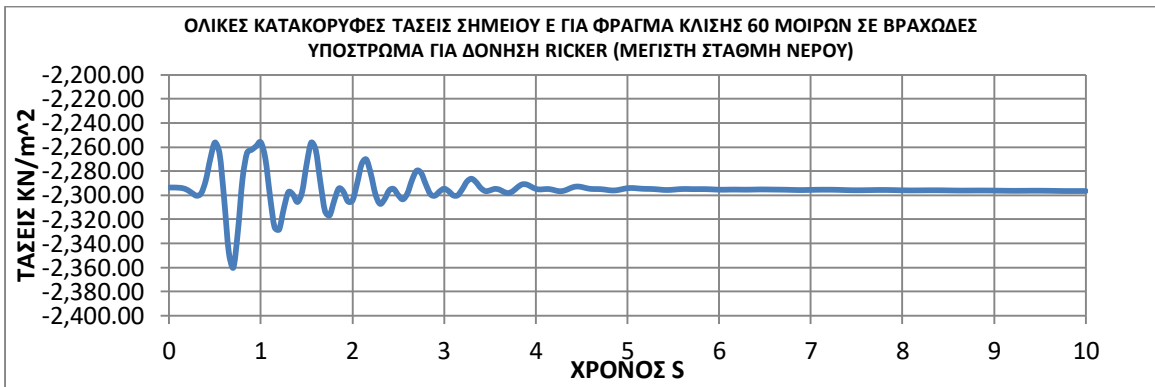
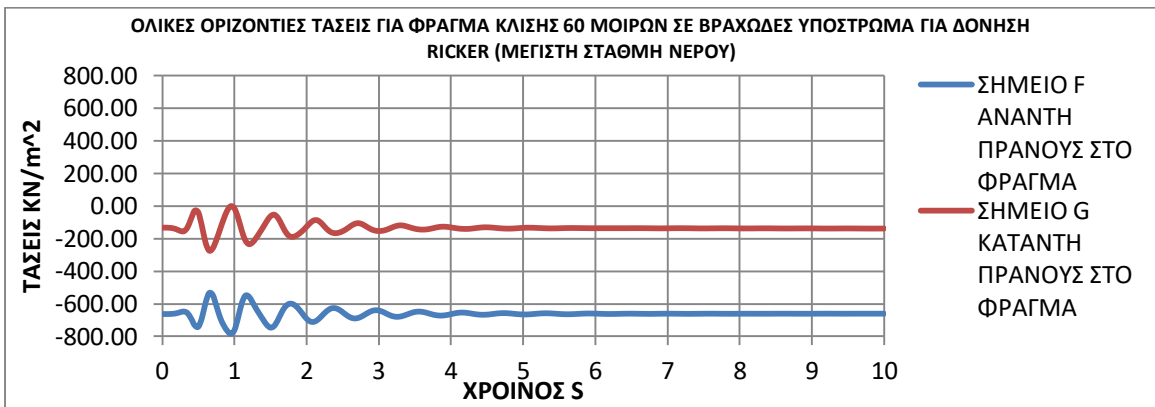
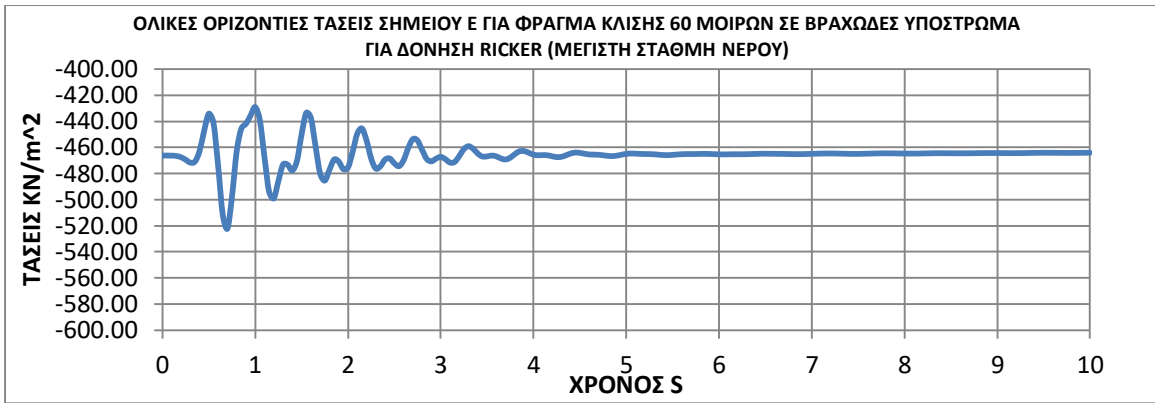
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3



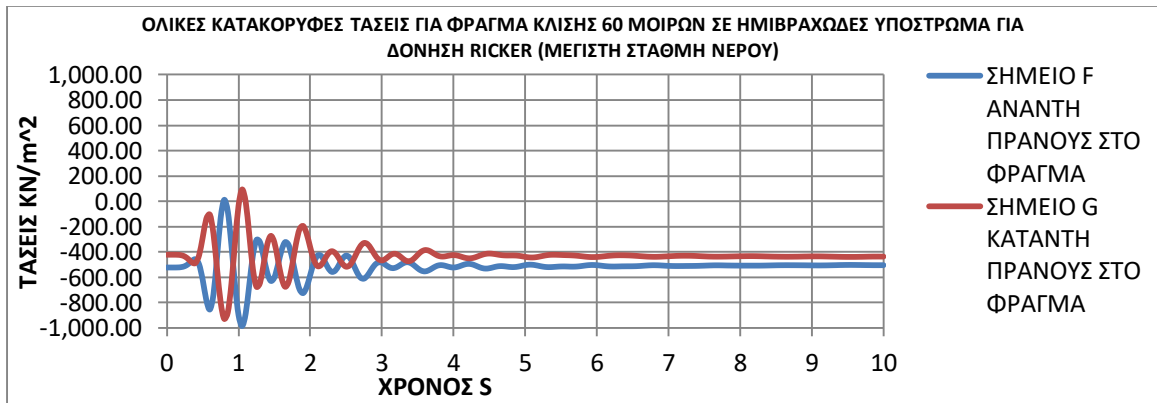
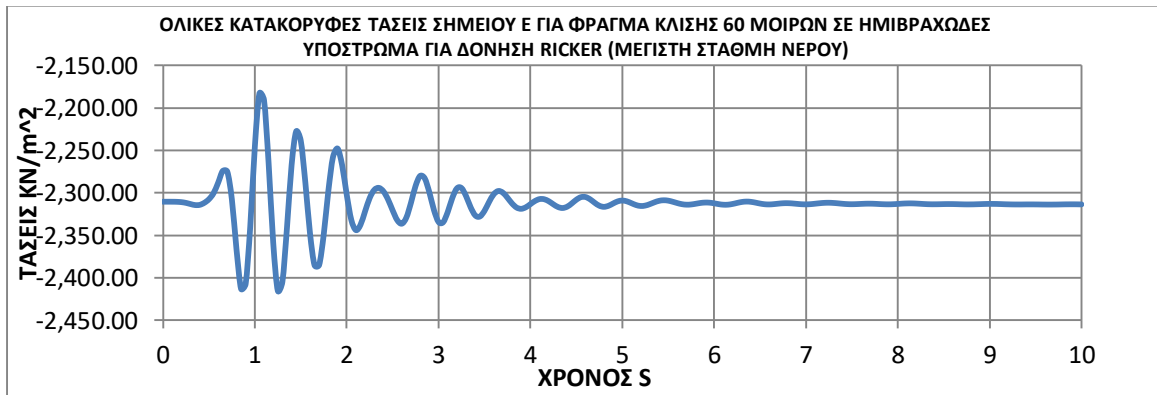
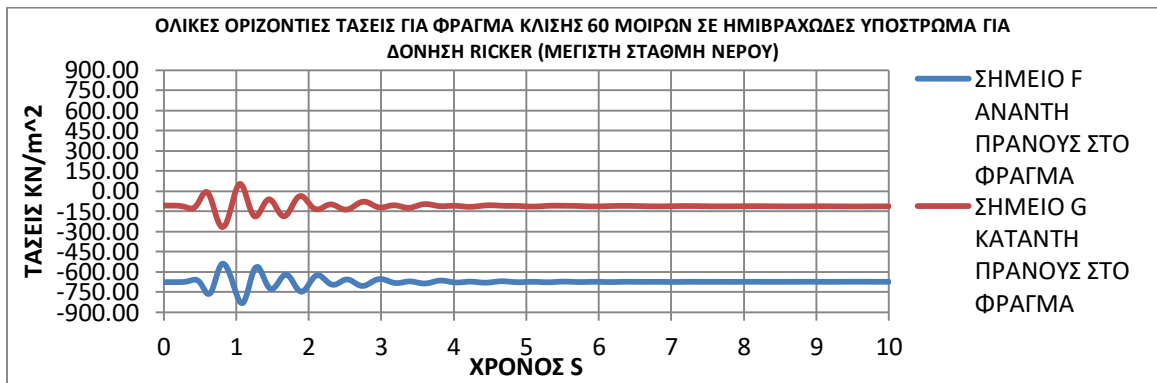
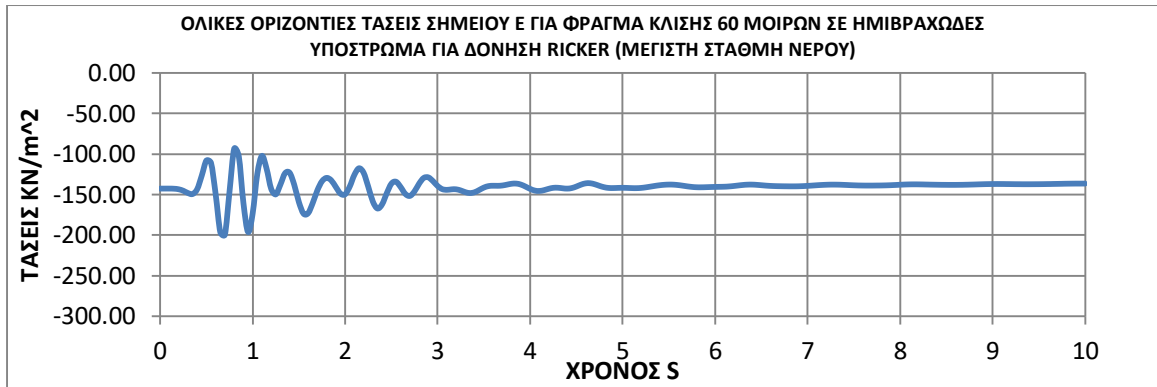
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



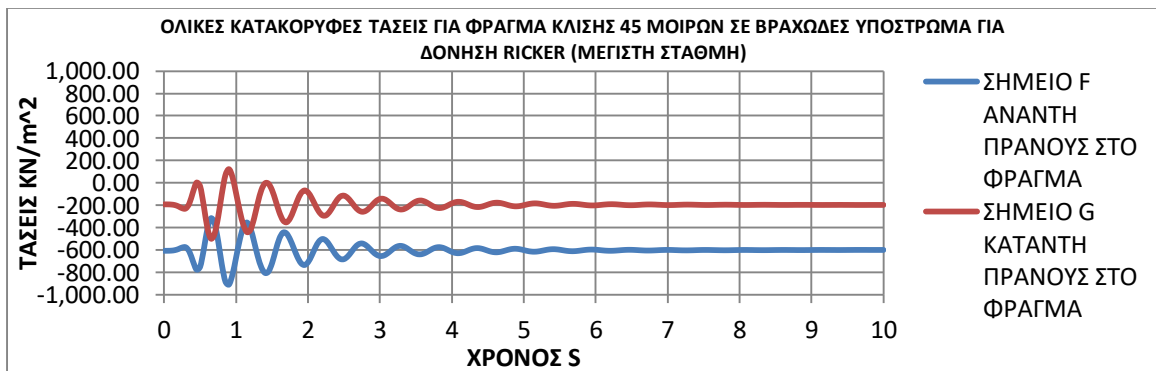
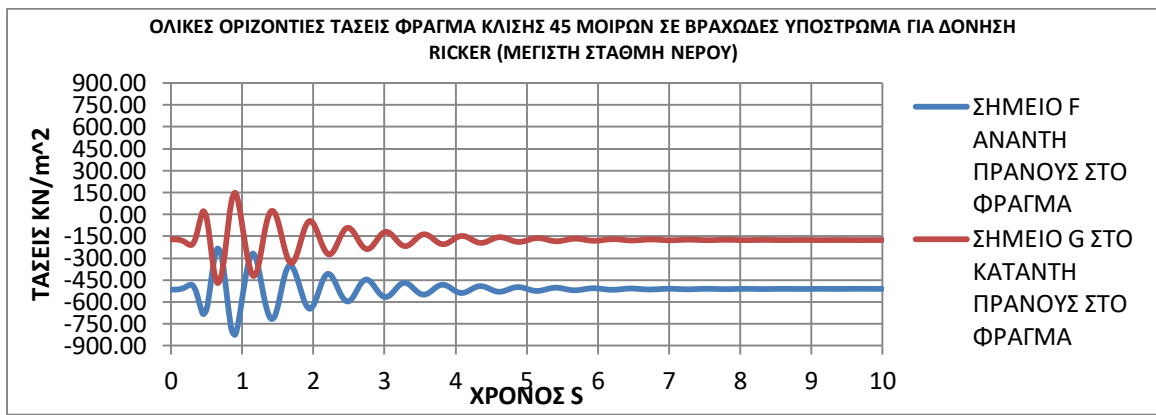
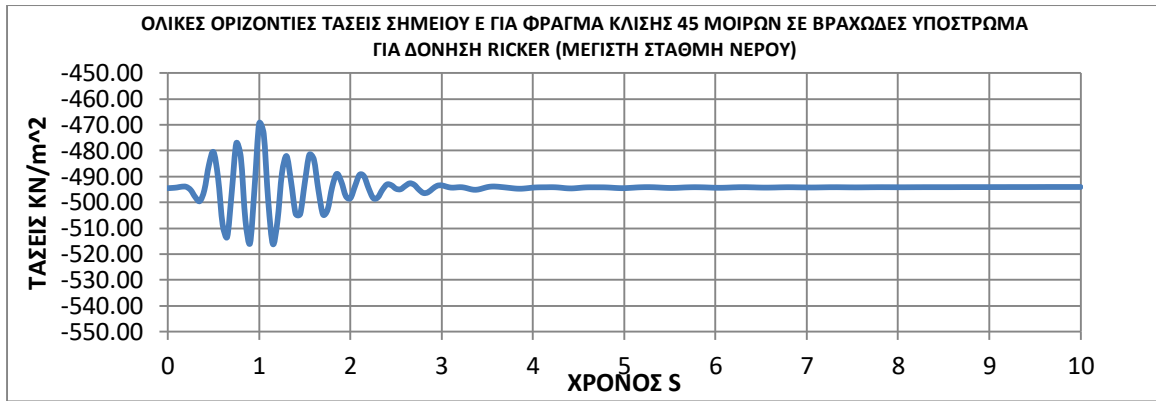
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



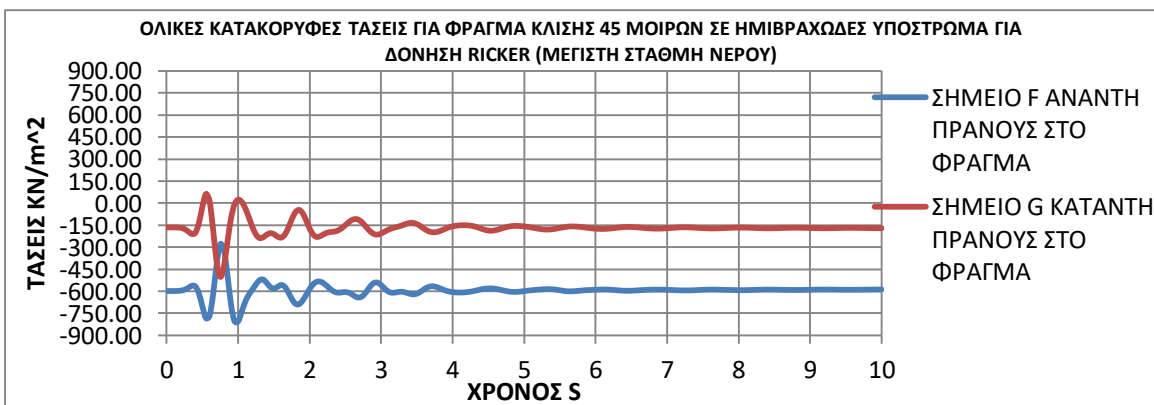
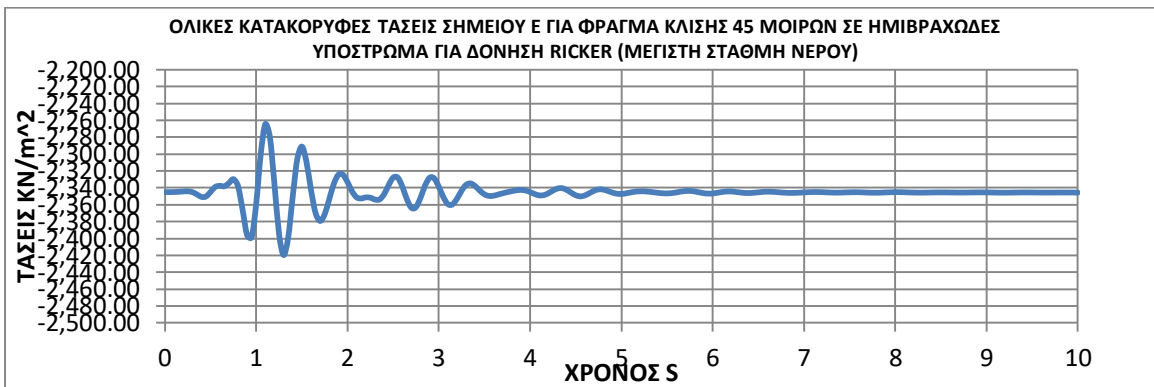
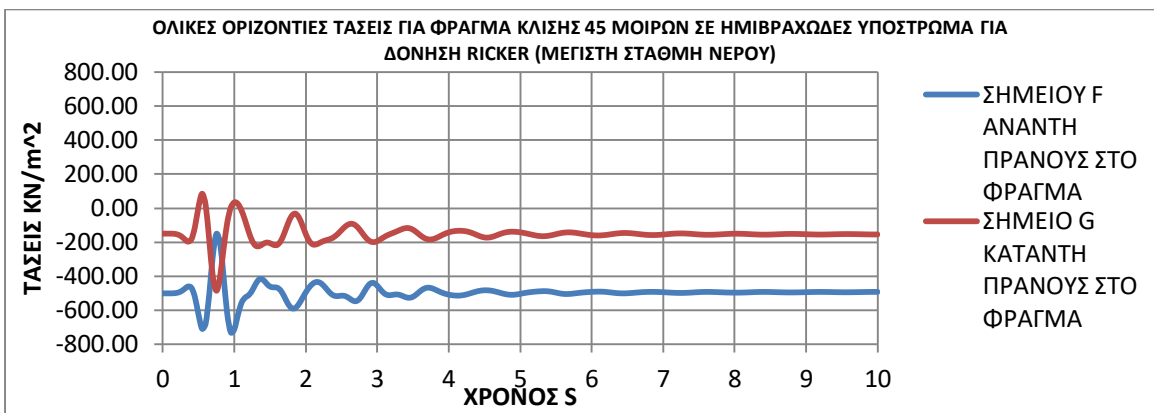
Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3

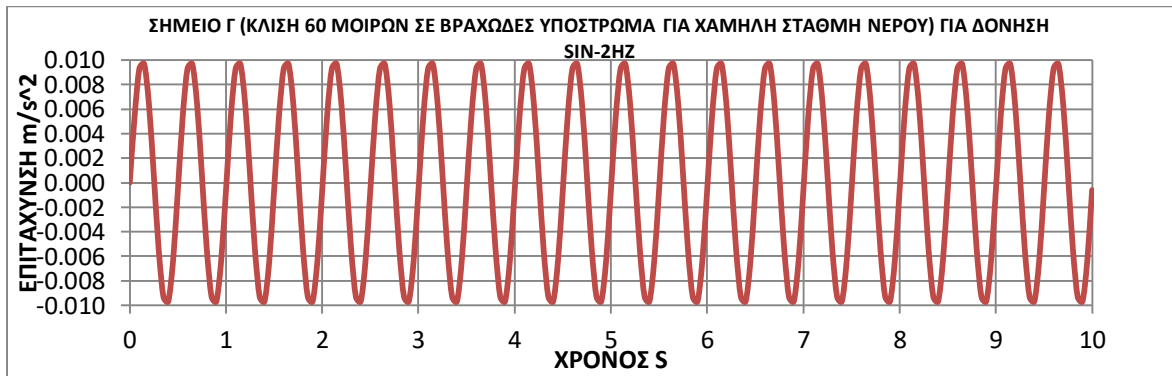
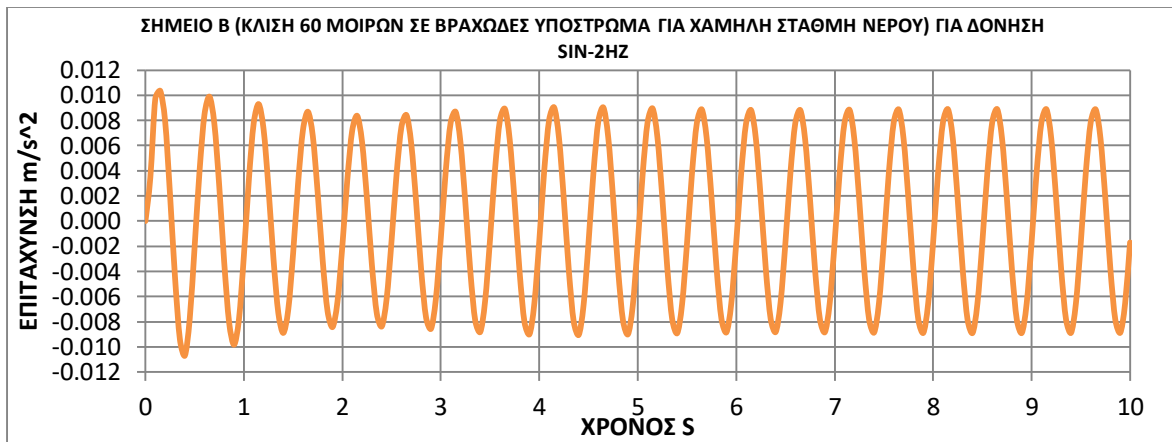


Χρονοιστορίες ολικών τάσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4

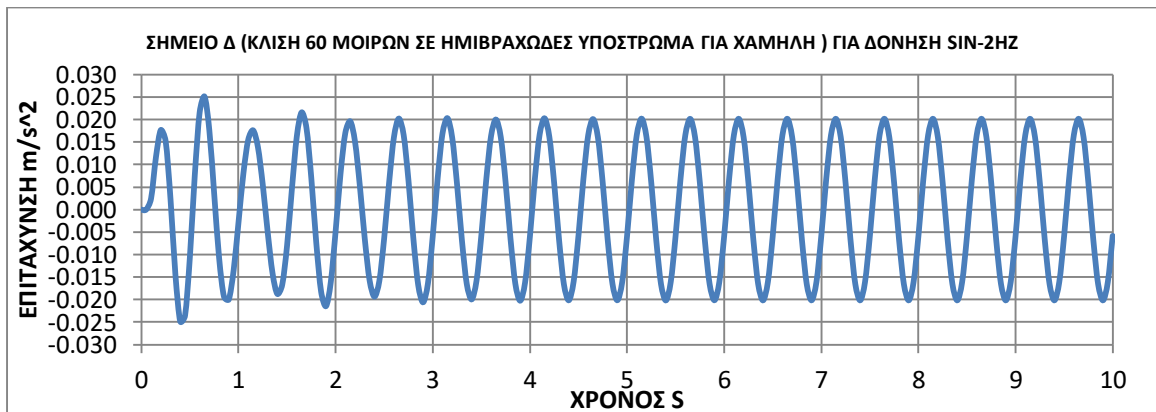


ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ

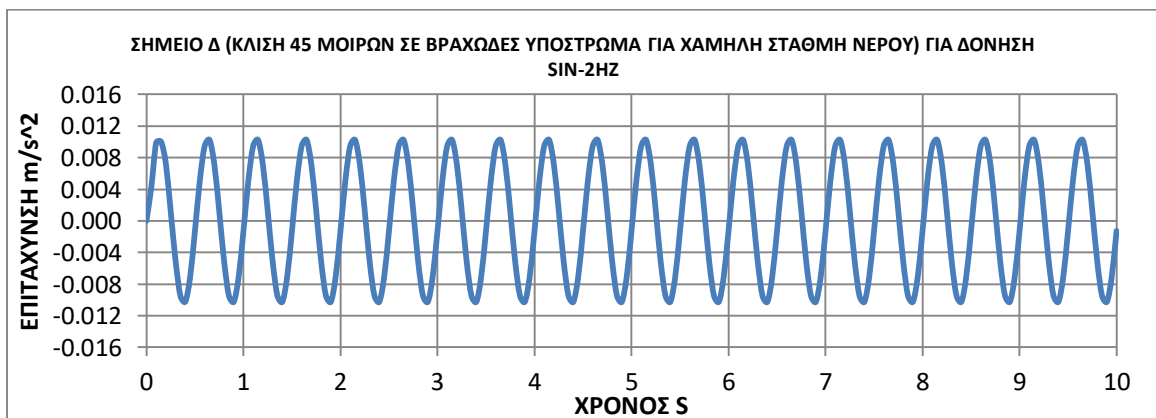
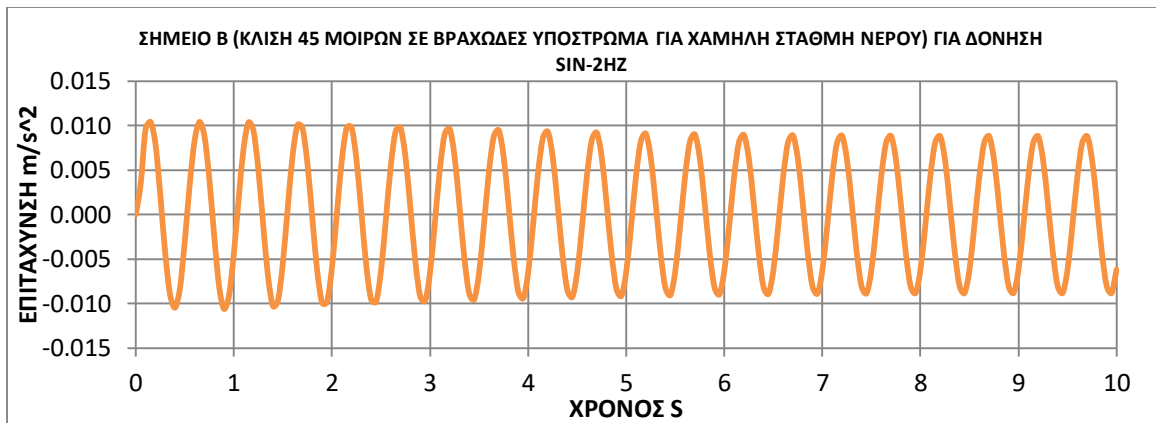
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



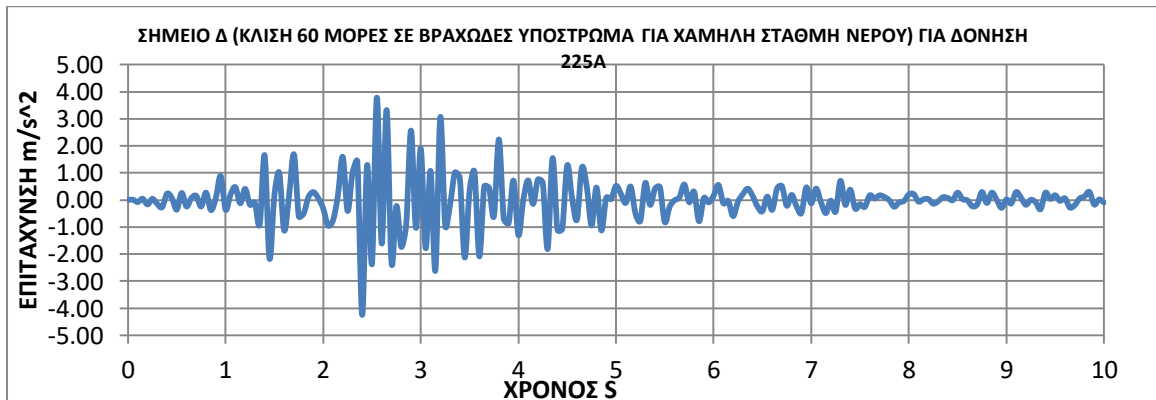
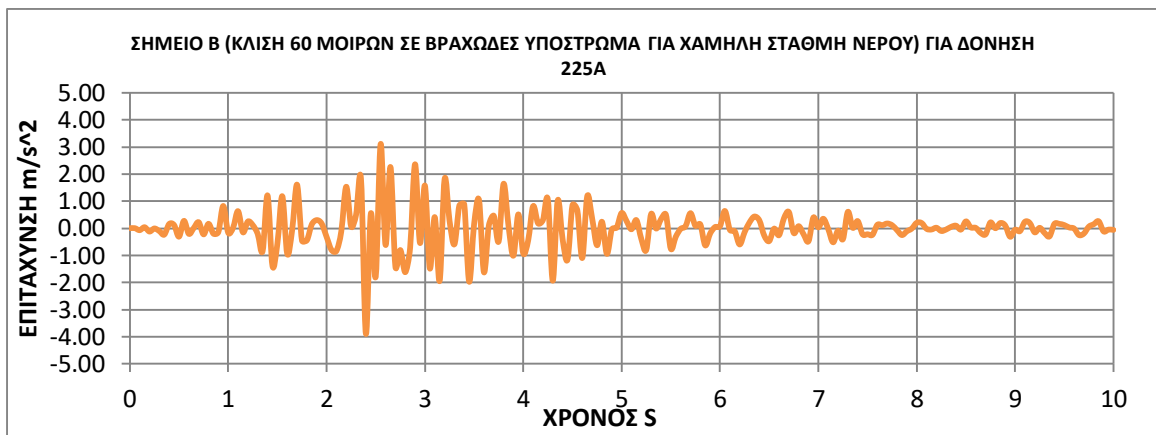
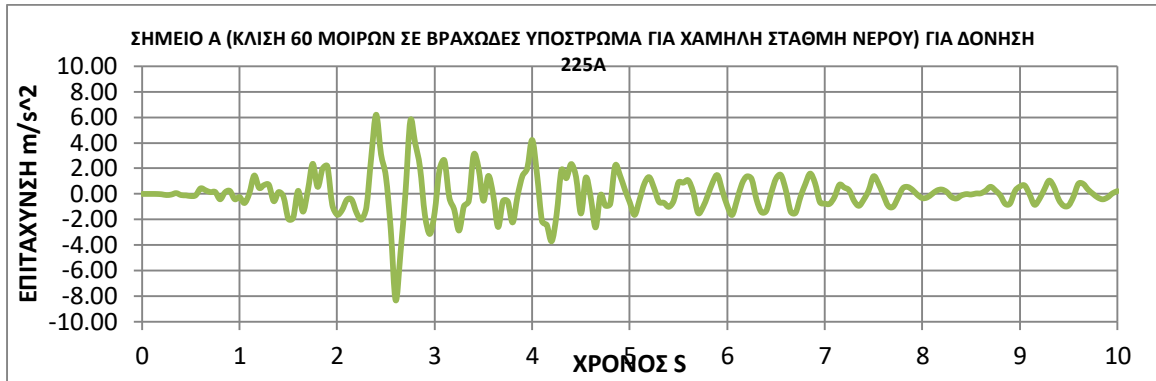
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



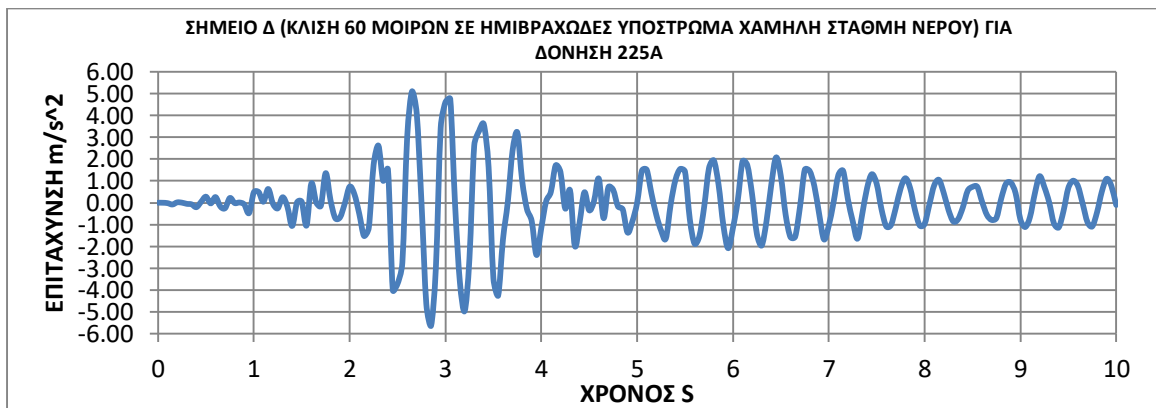
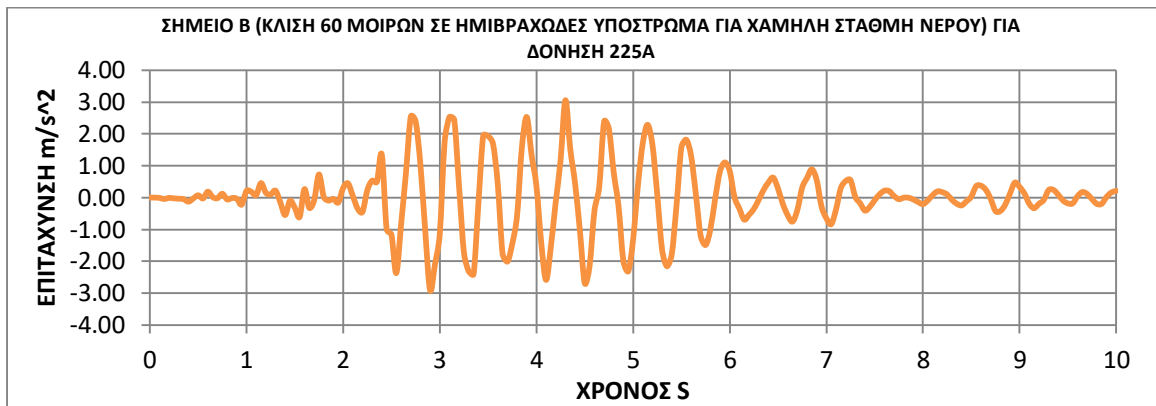
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



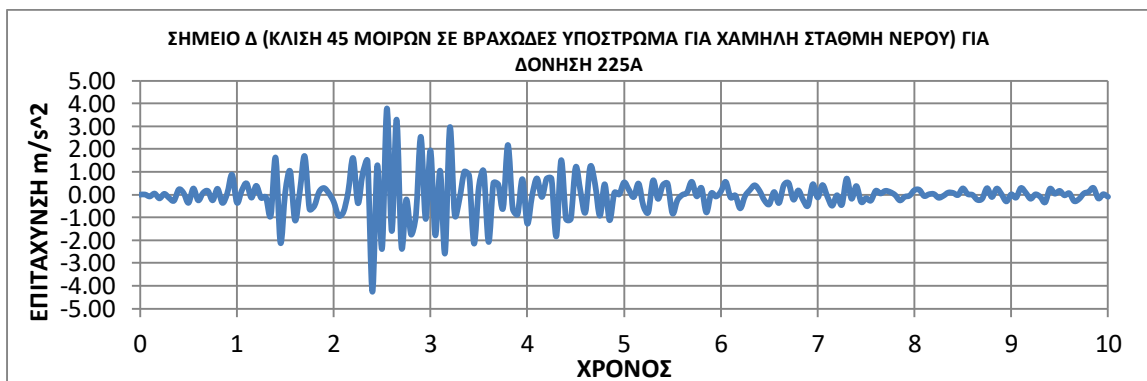
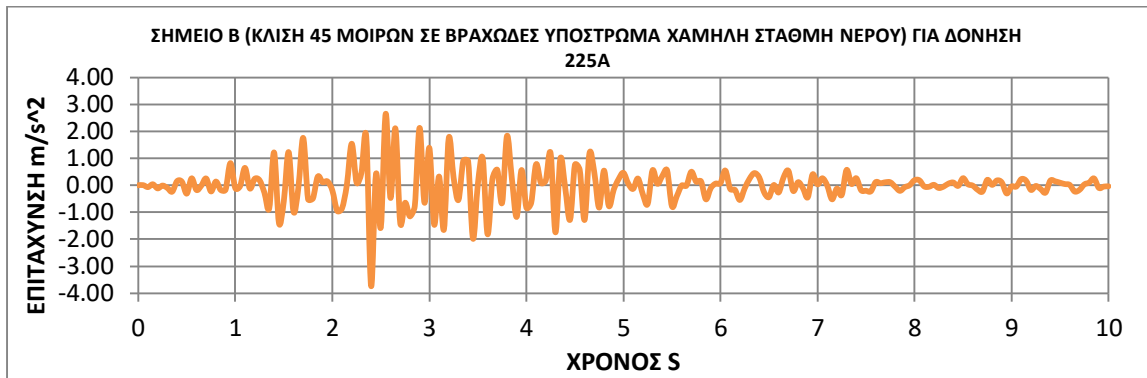
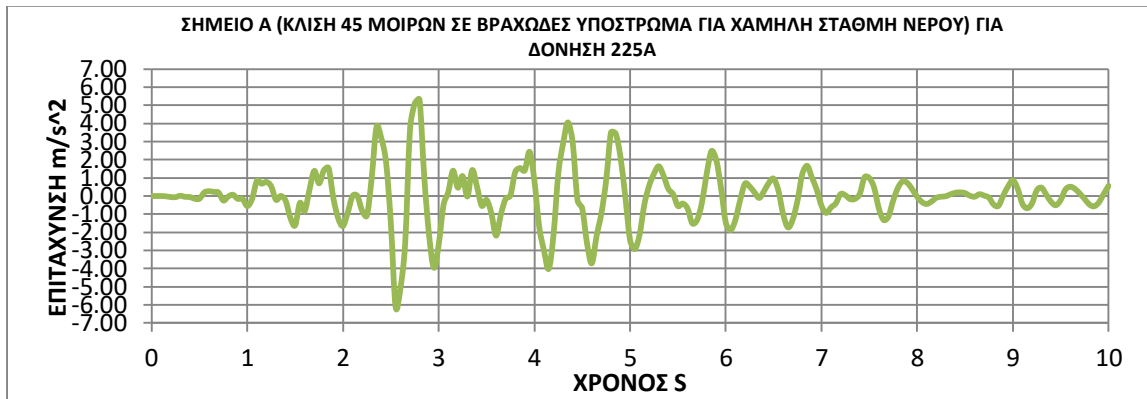
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



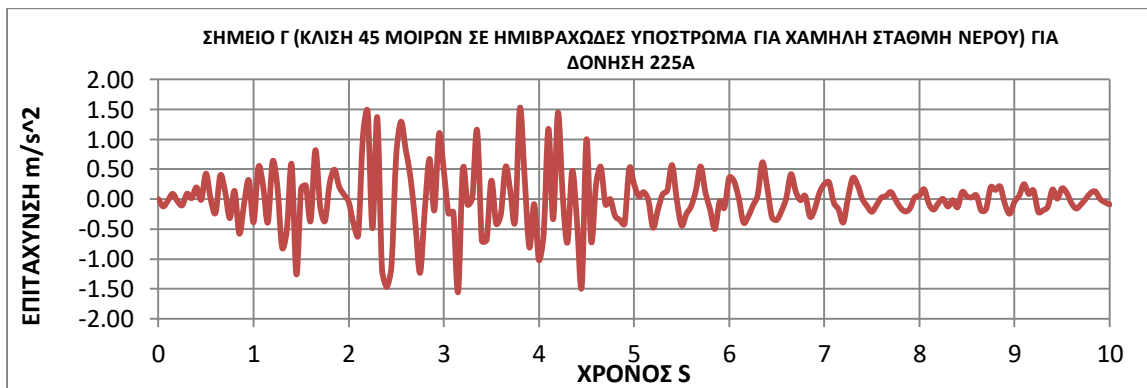
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



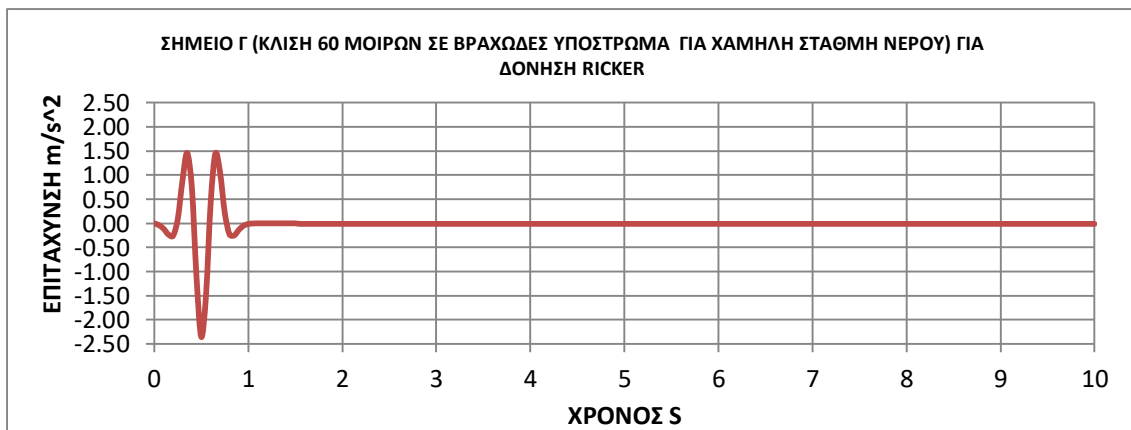
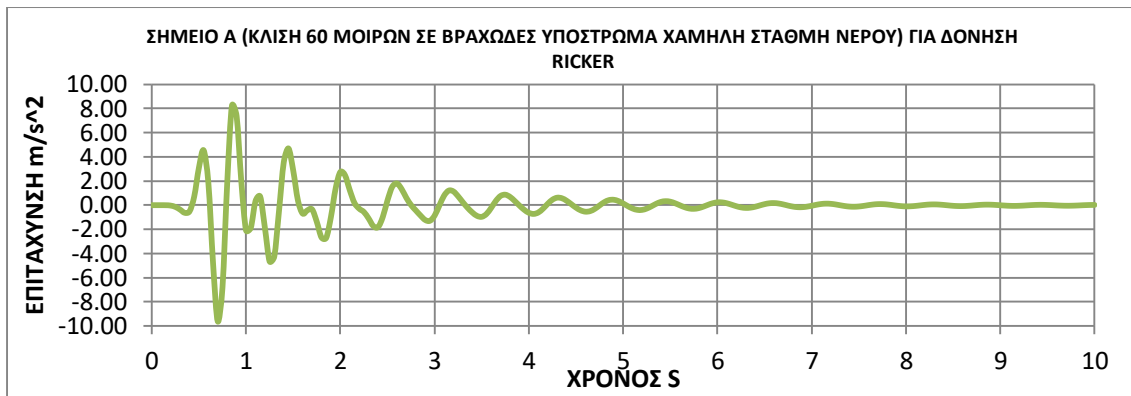
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



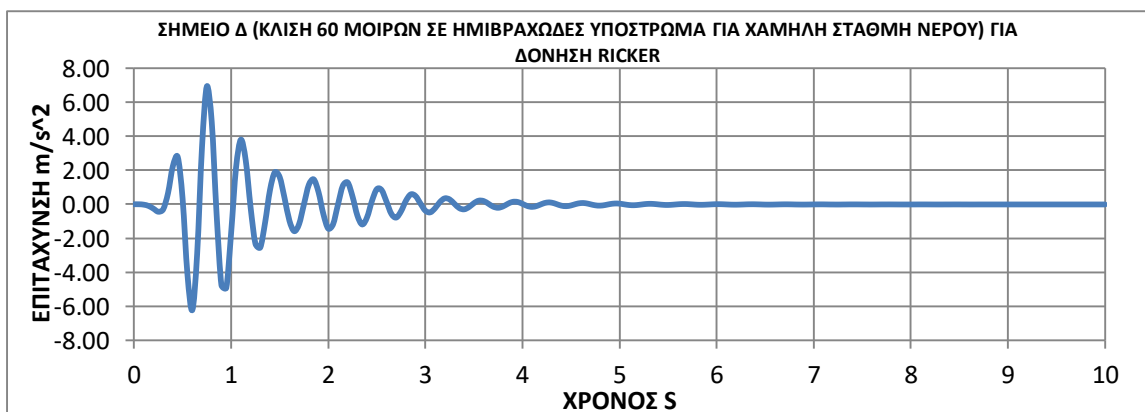
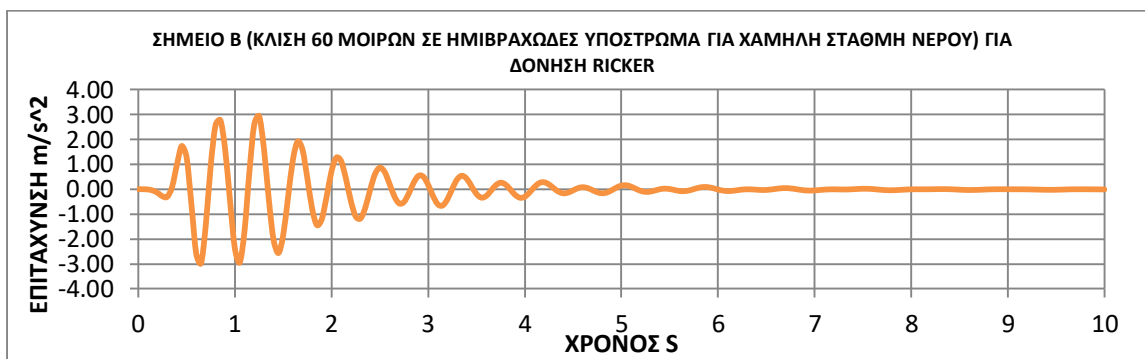
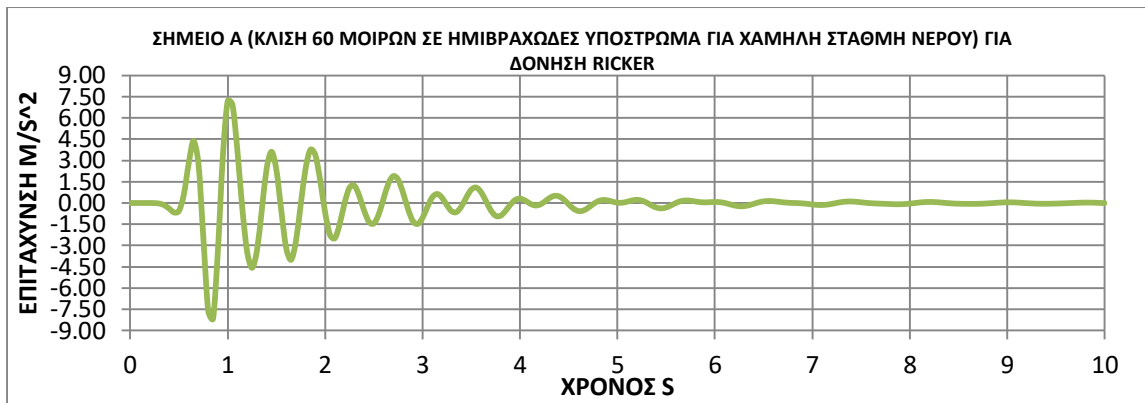
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



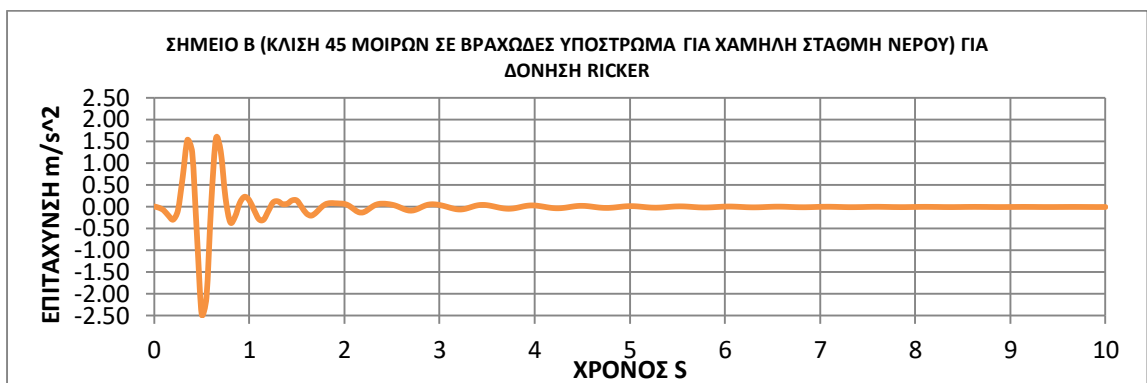
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 1



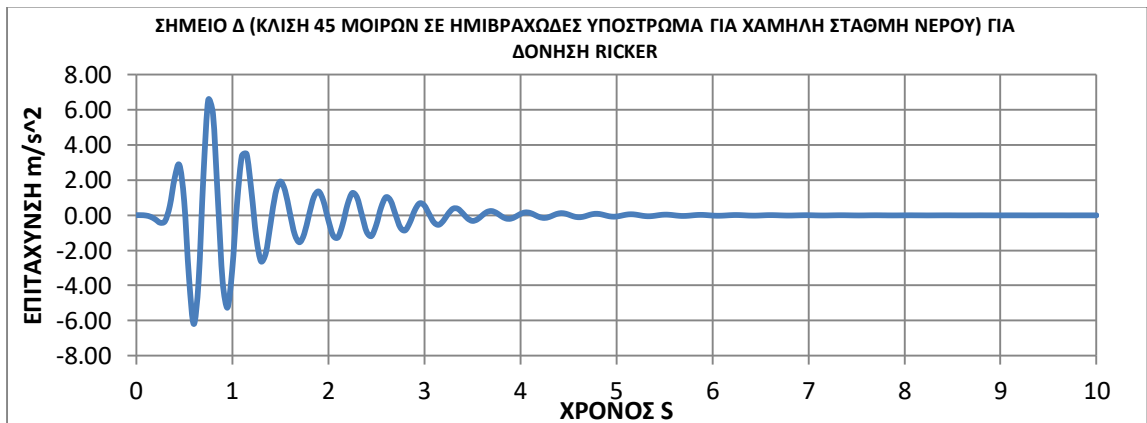
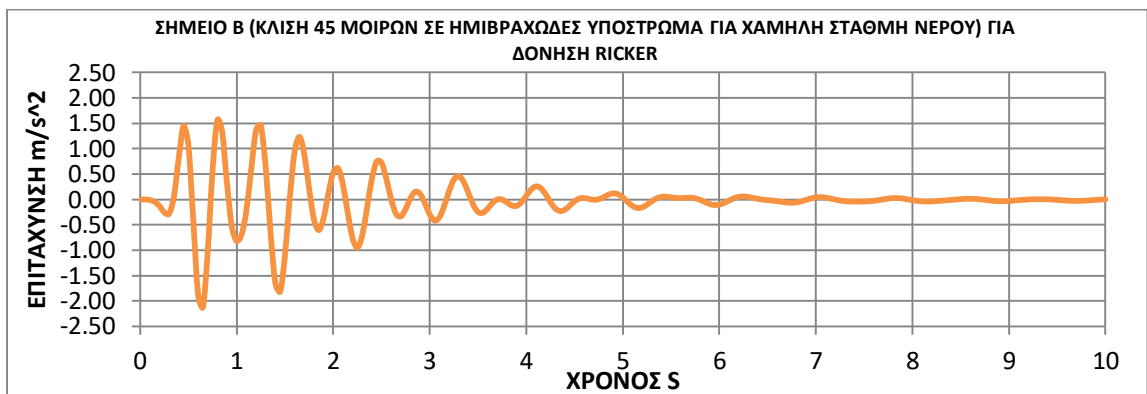
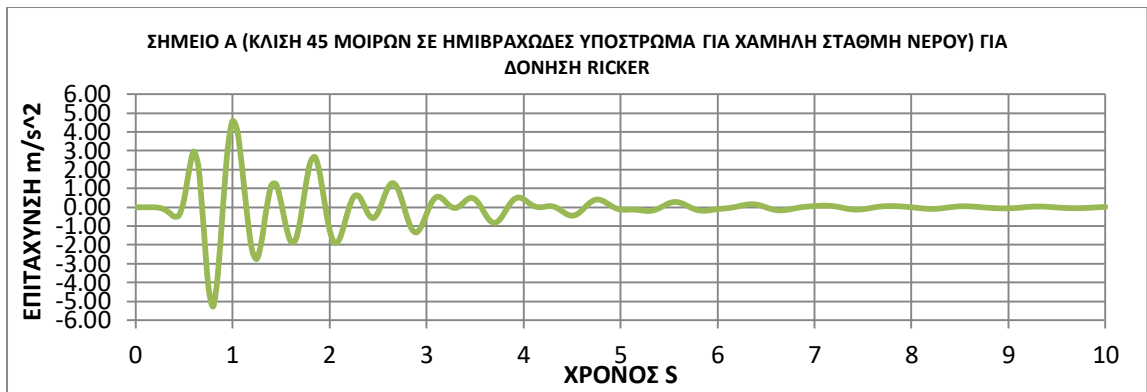
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 2



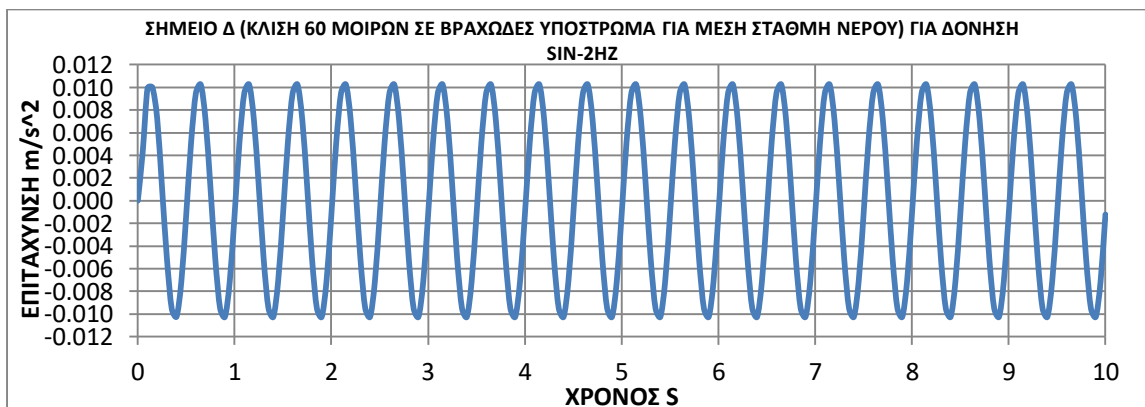
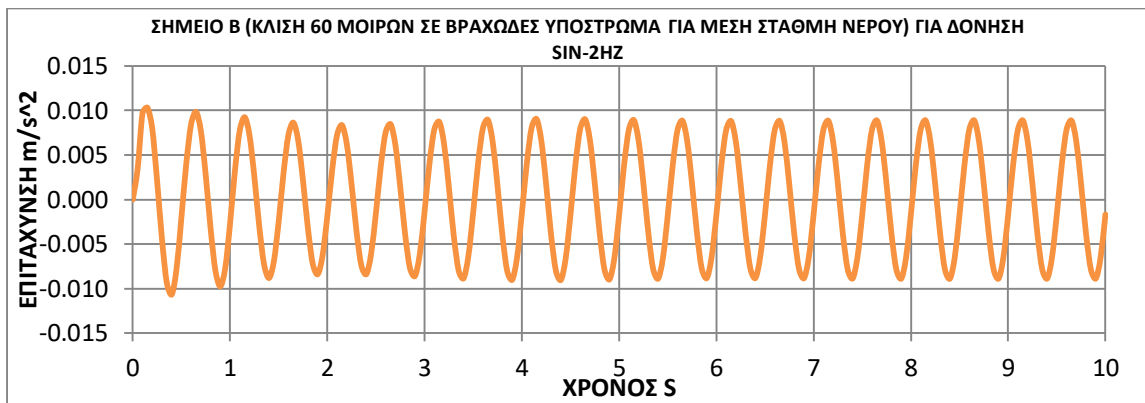
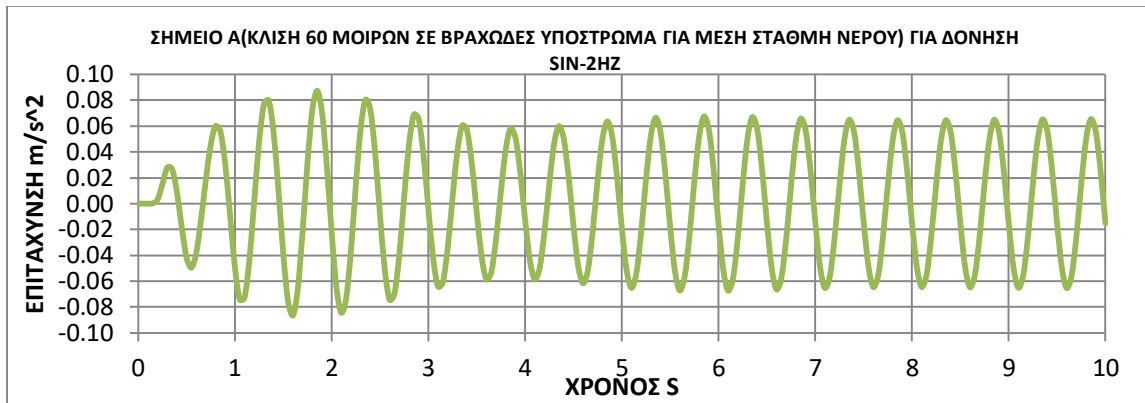
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 3



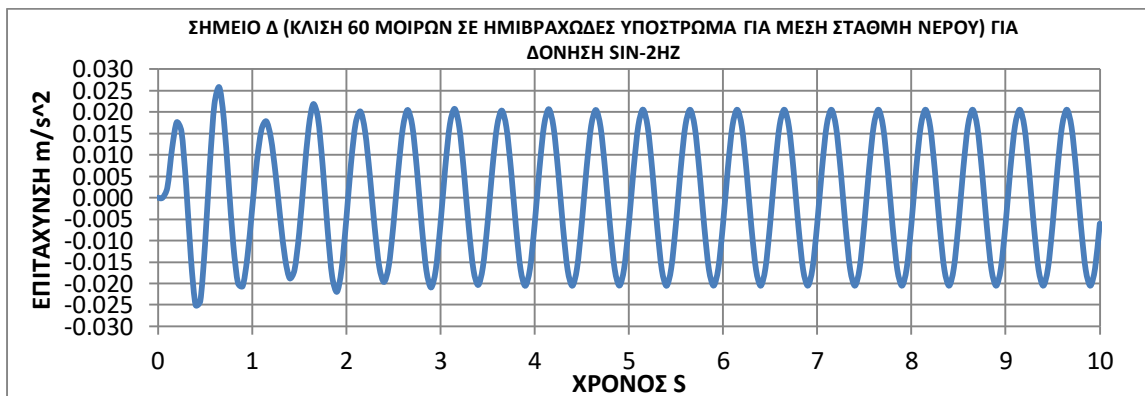
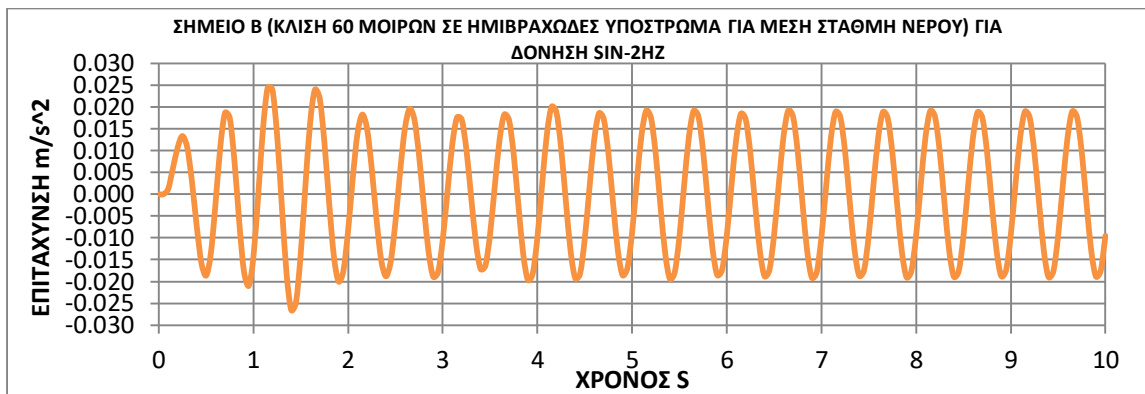
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για χαμηλή στάθμη νερού, σενάριο 4



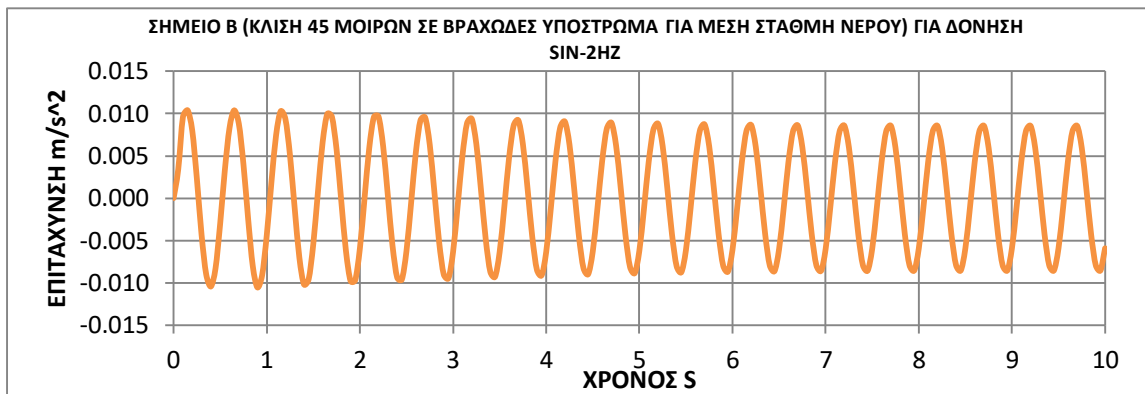
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



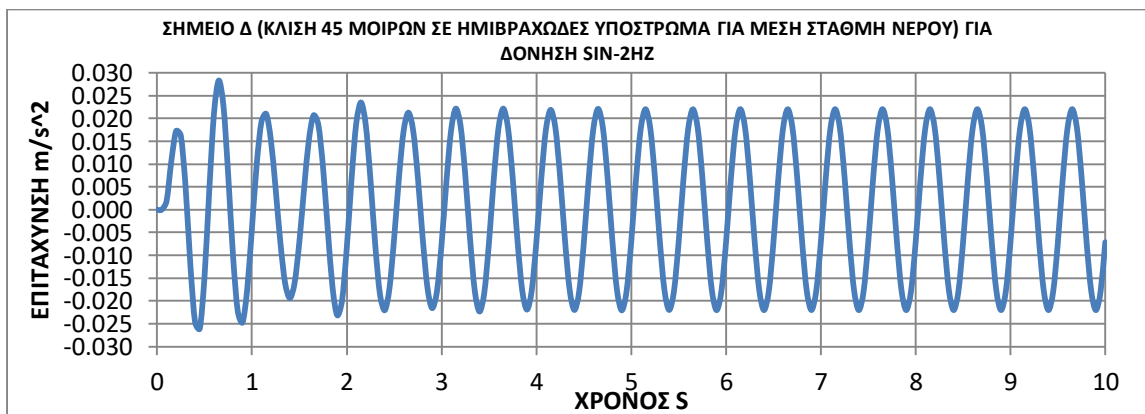
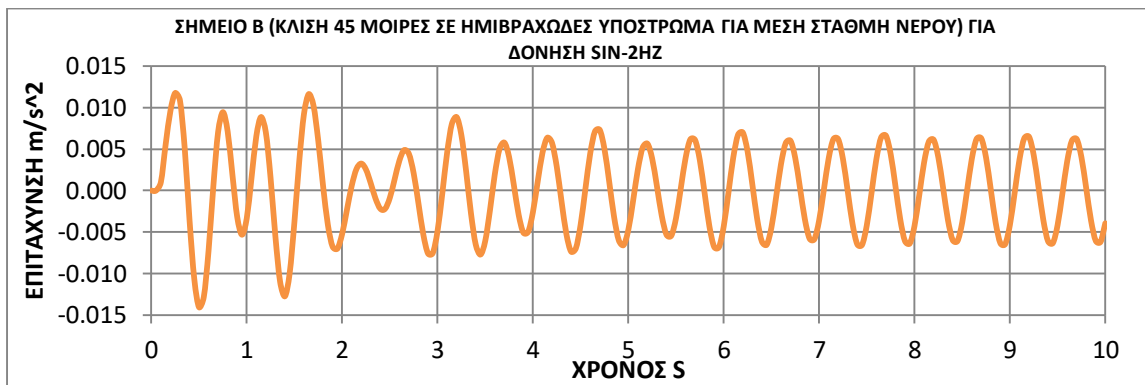
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



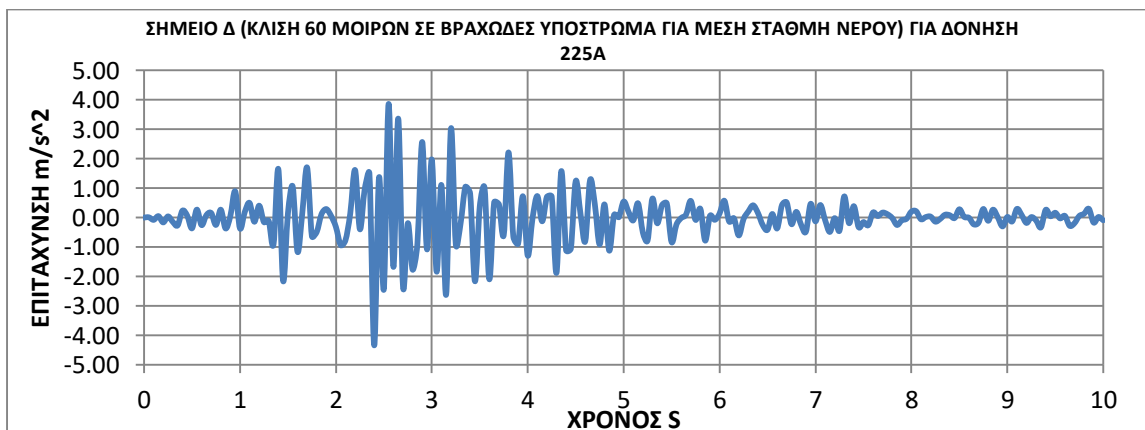
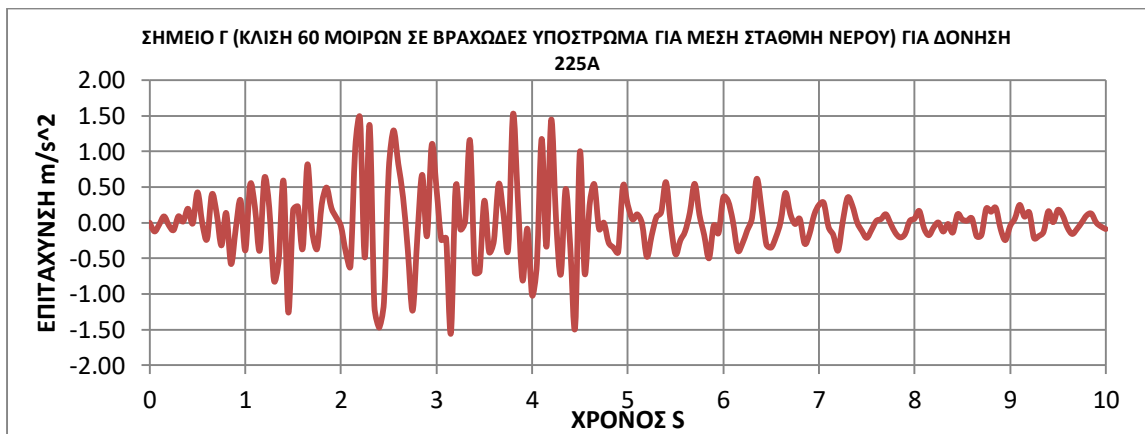
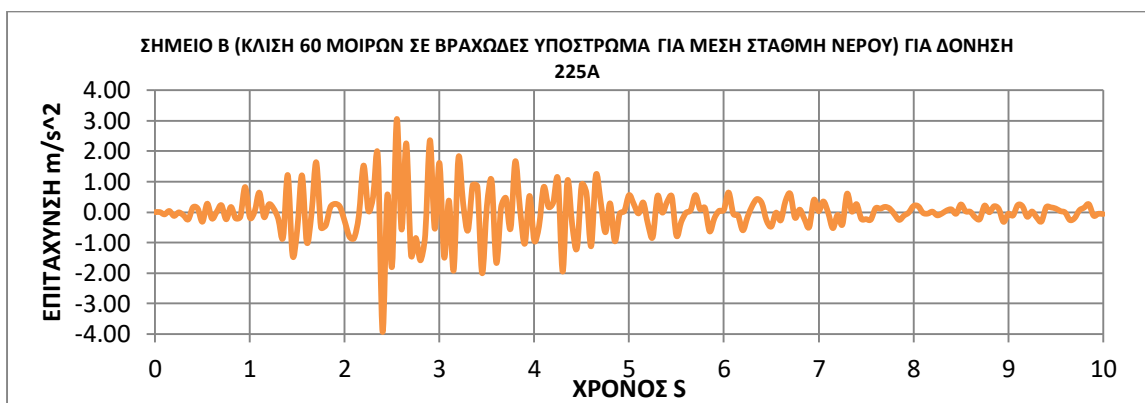
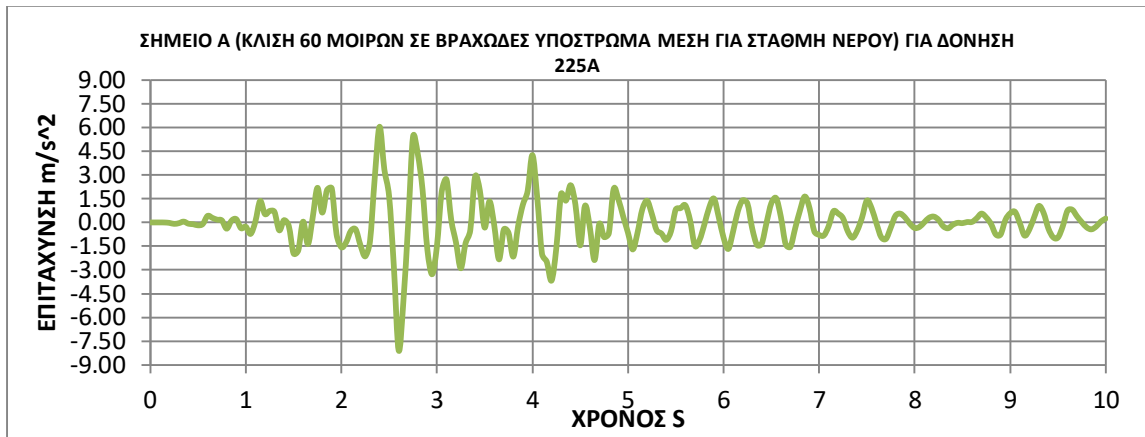
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



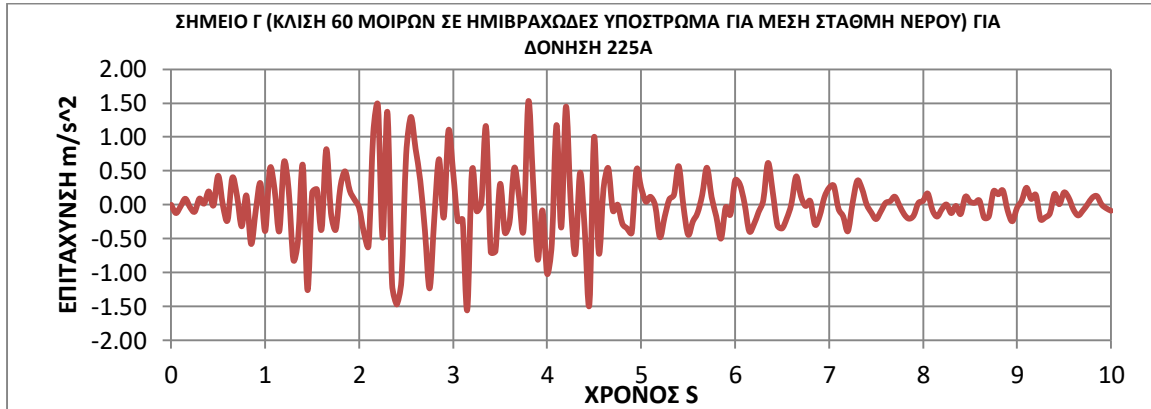
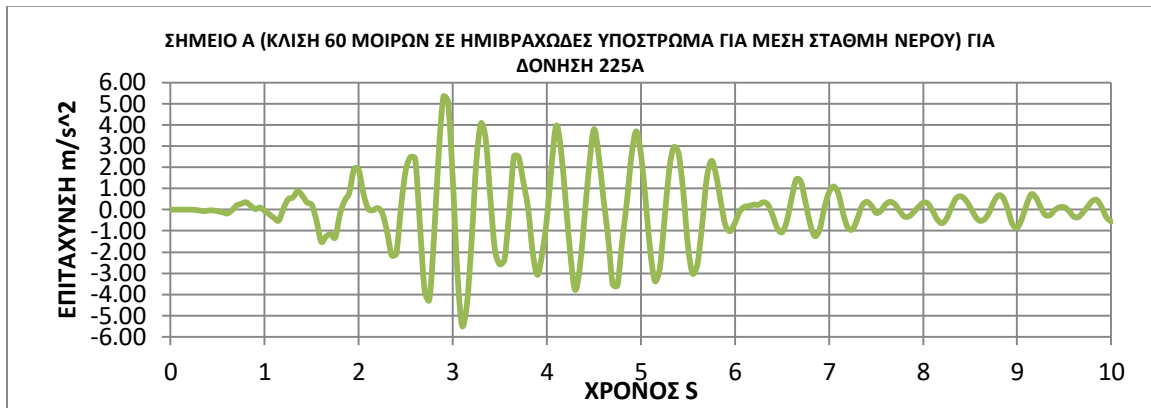
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



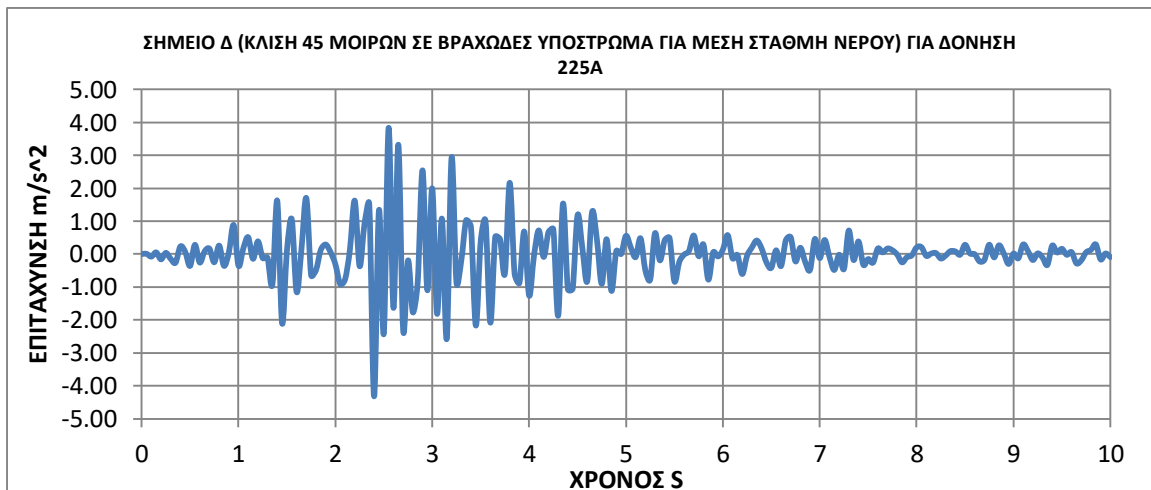
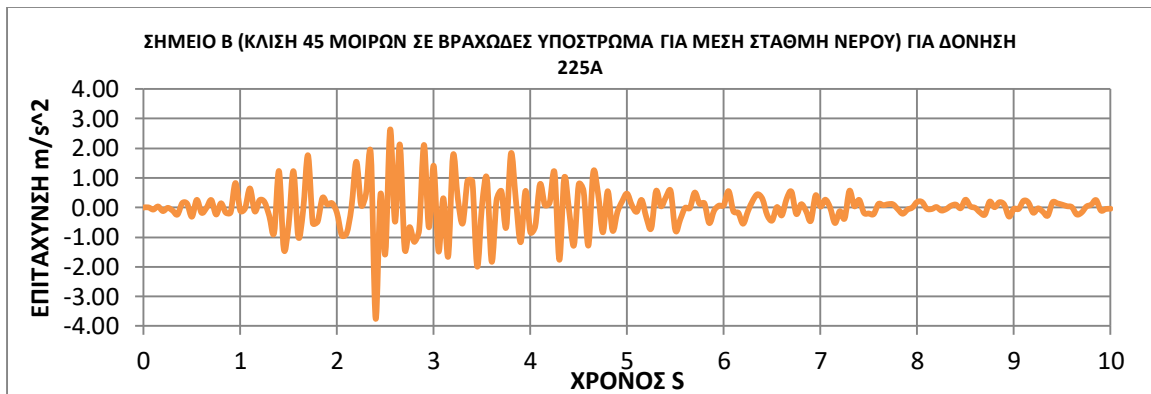
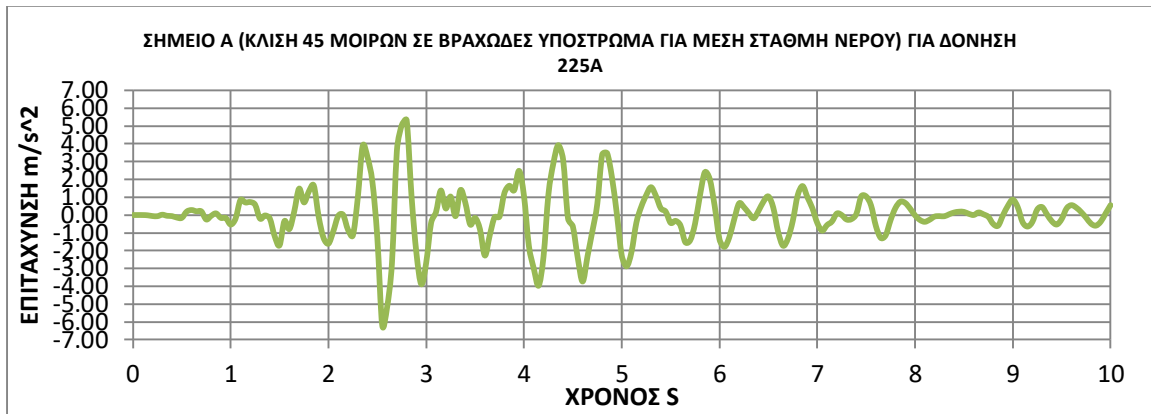
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



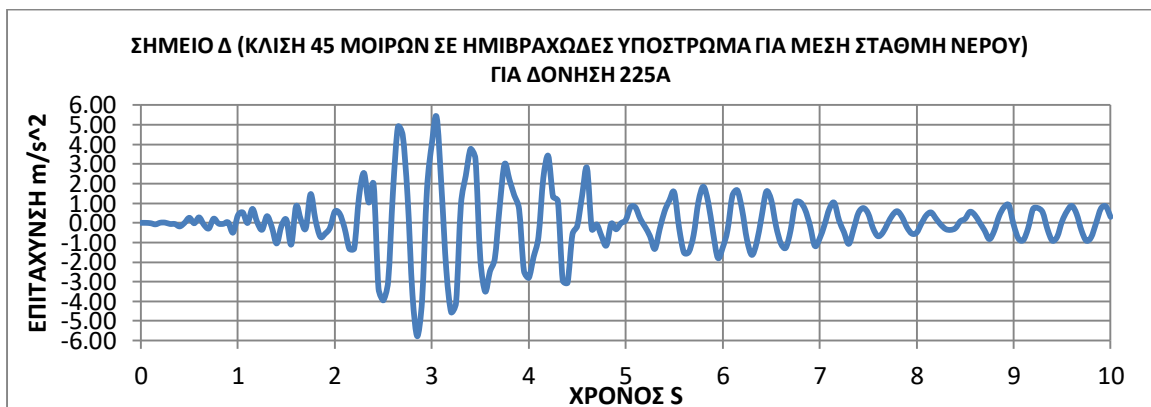
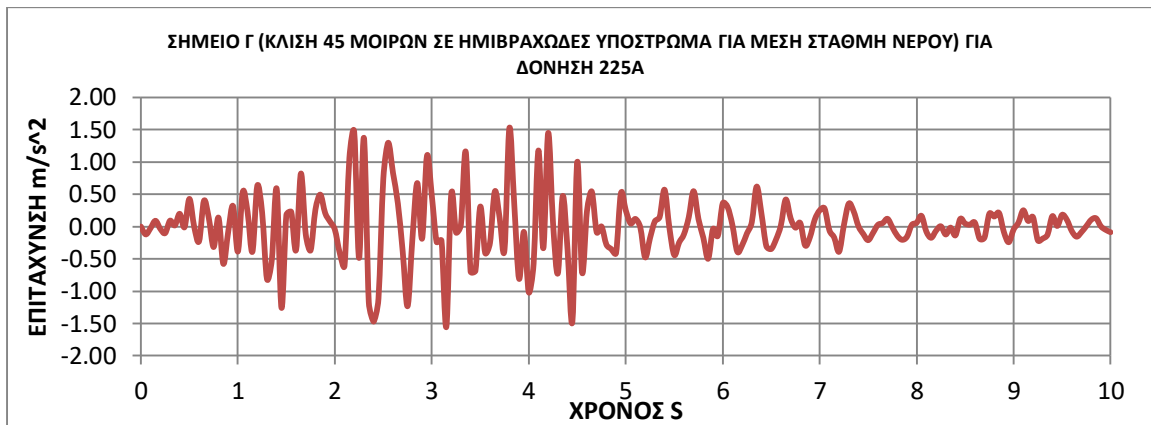
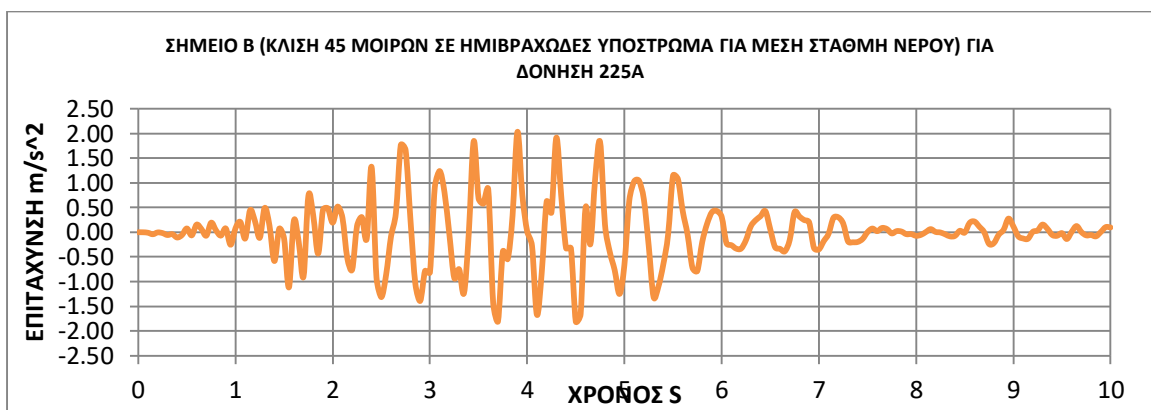
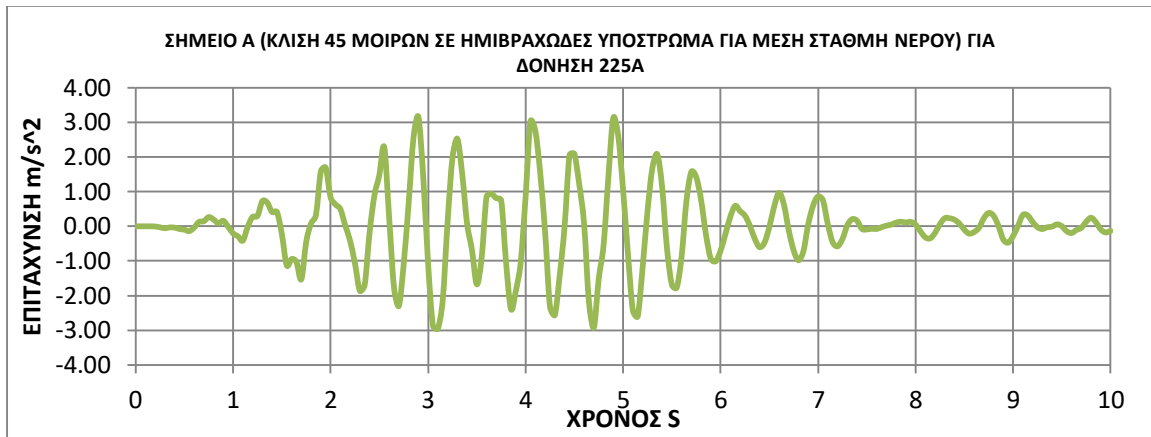
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



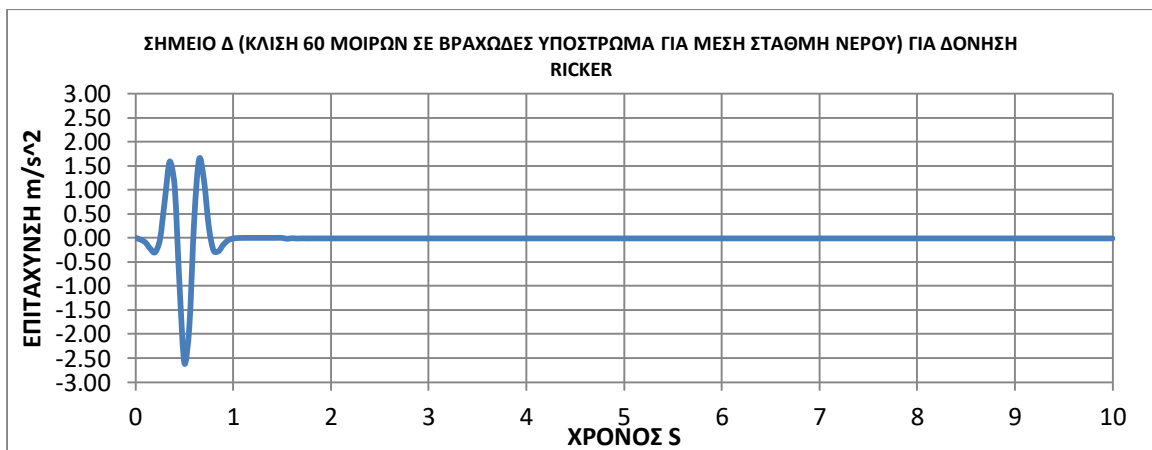
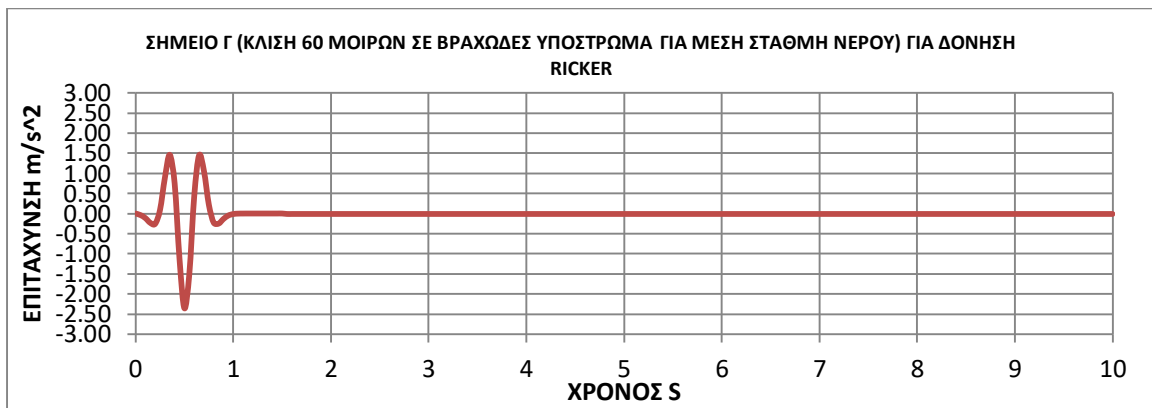
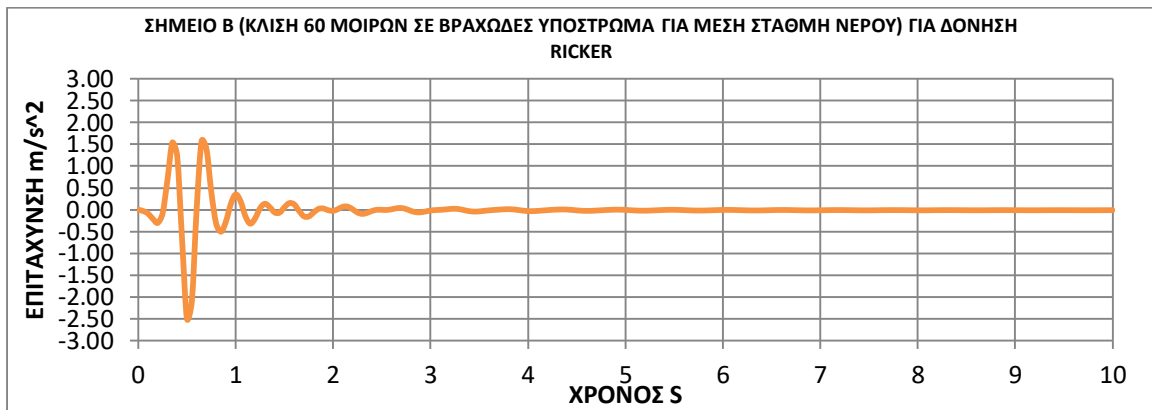
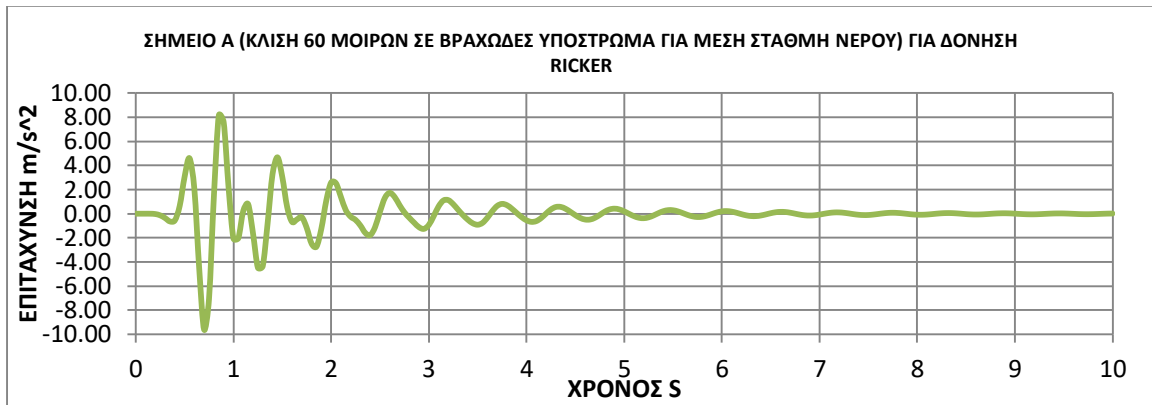
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



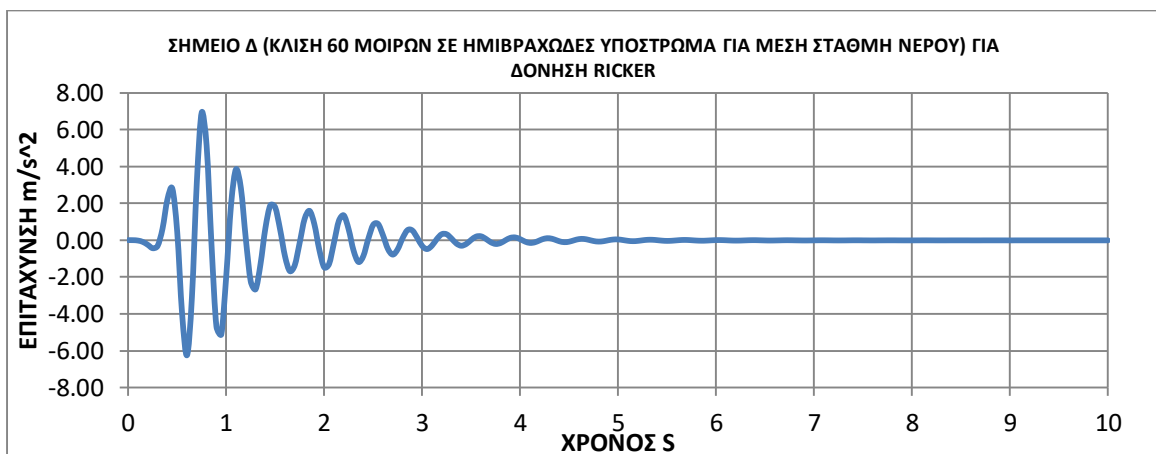
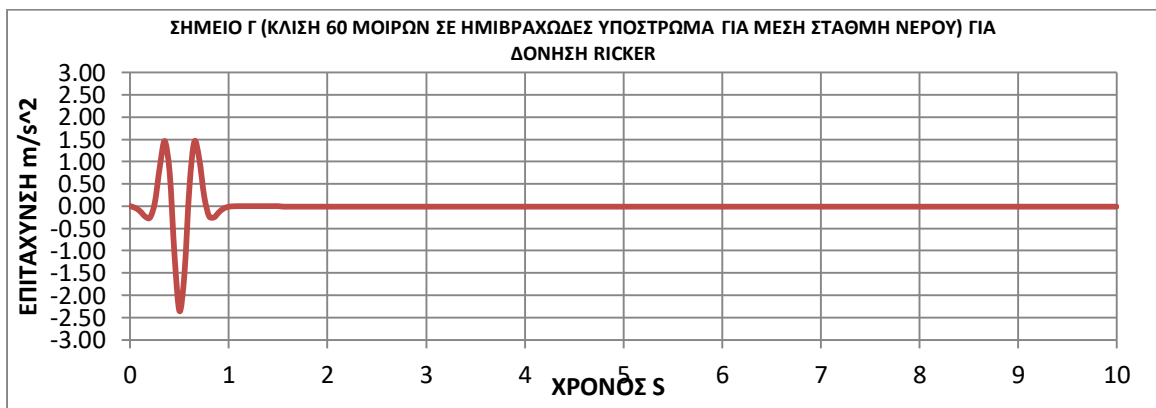
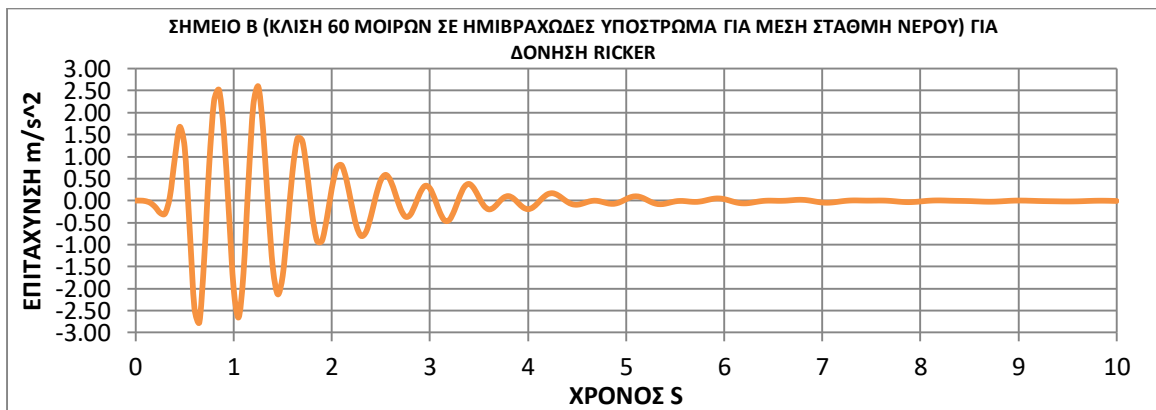
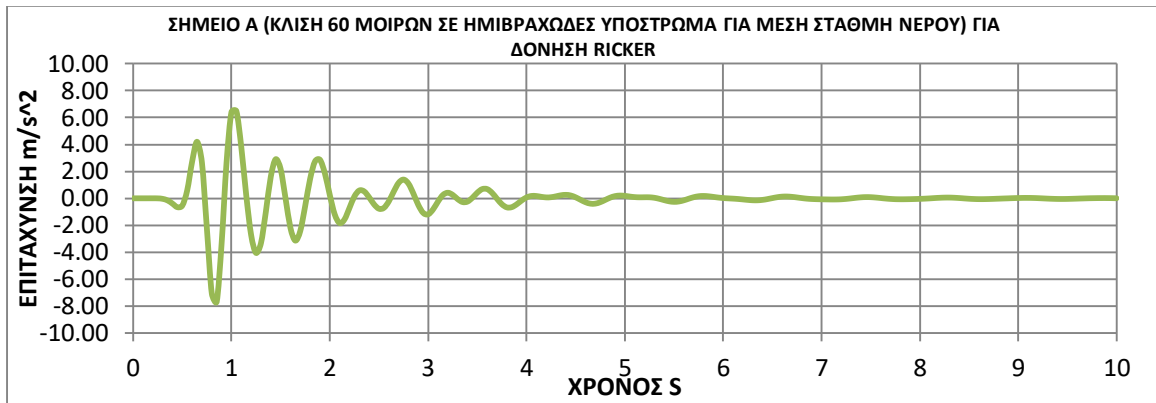
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



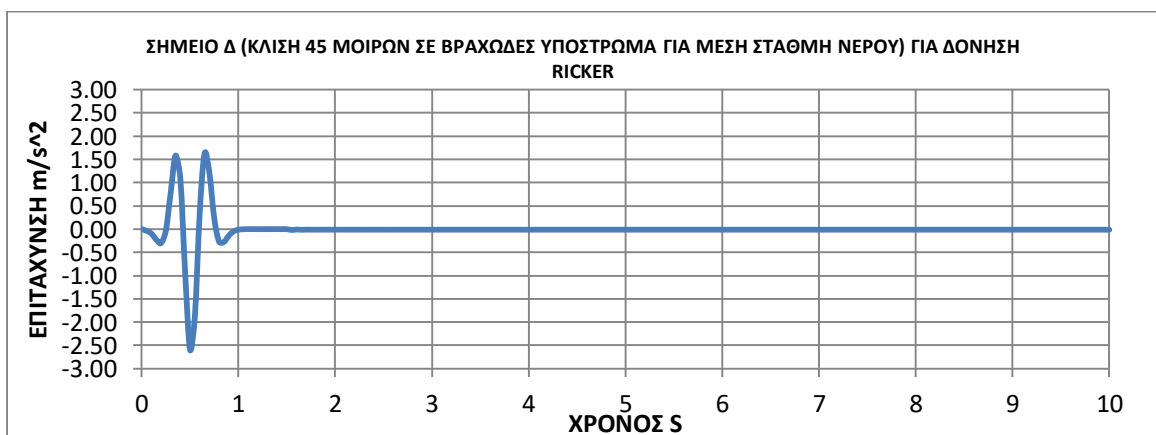
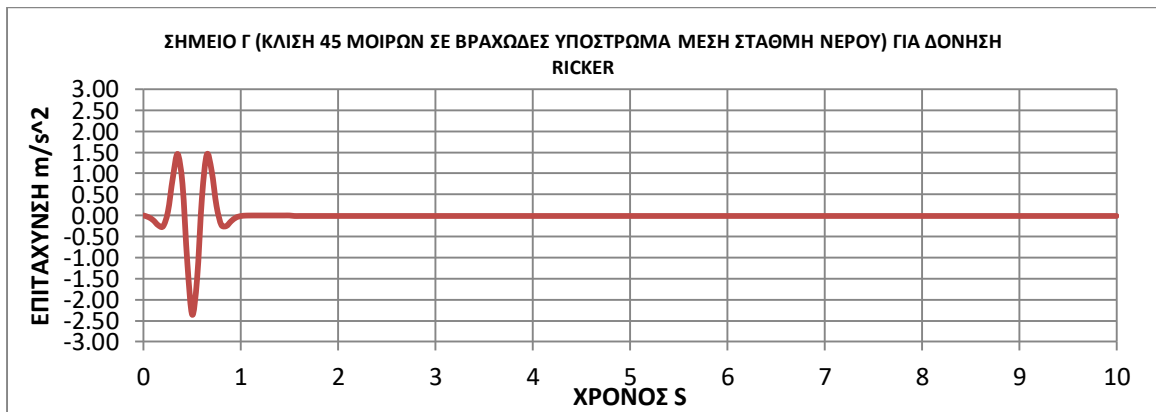
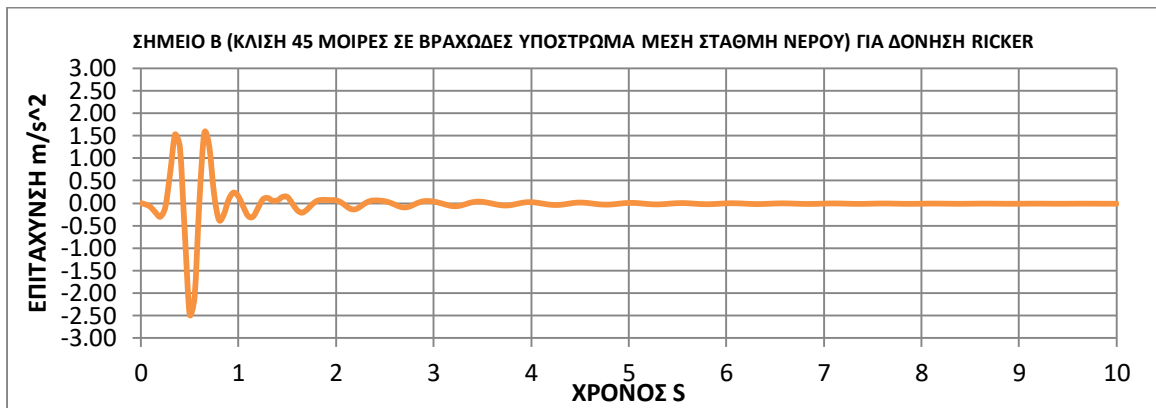
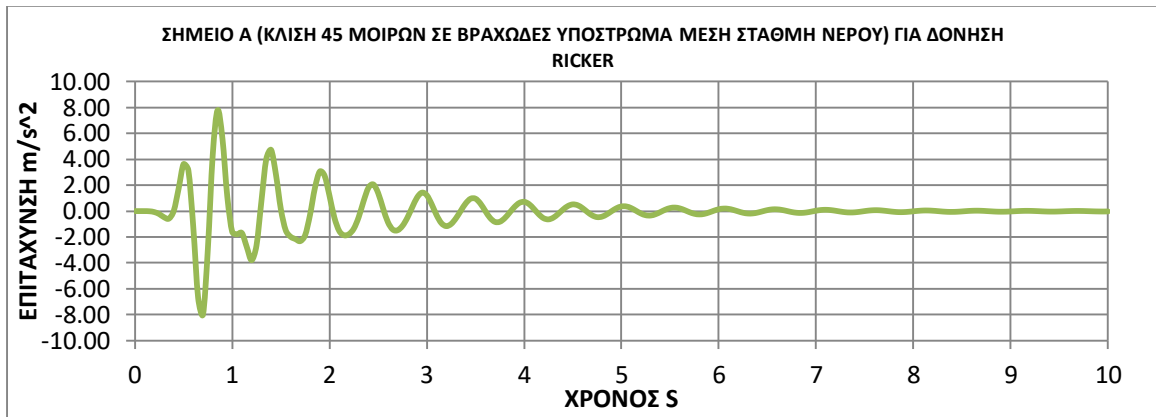
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 1



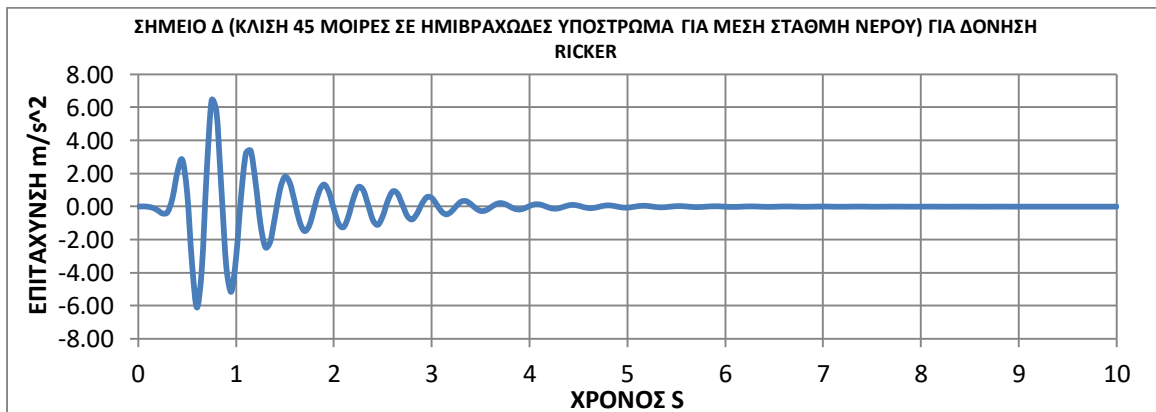
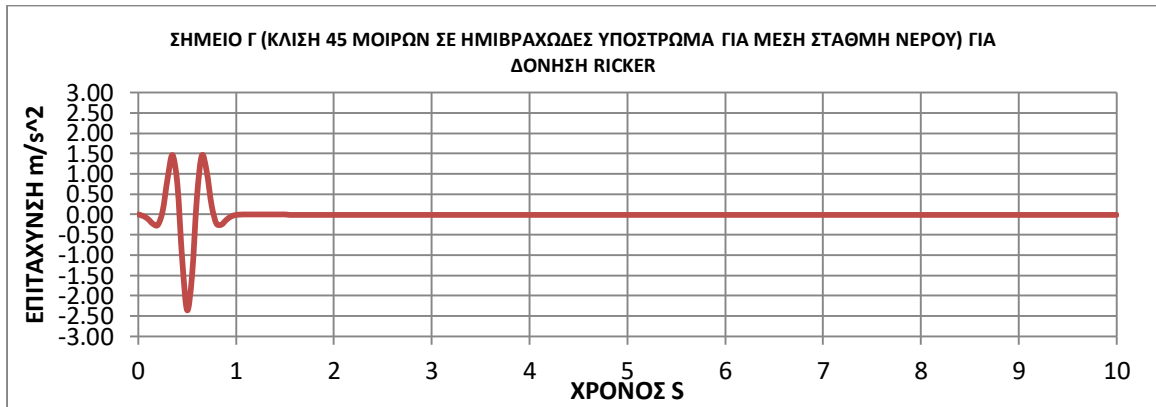
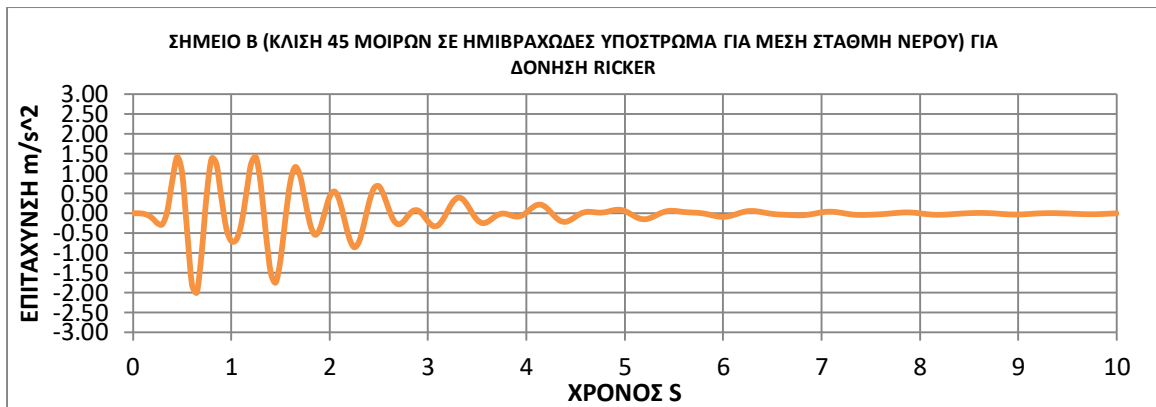
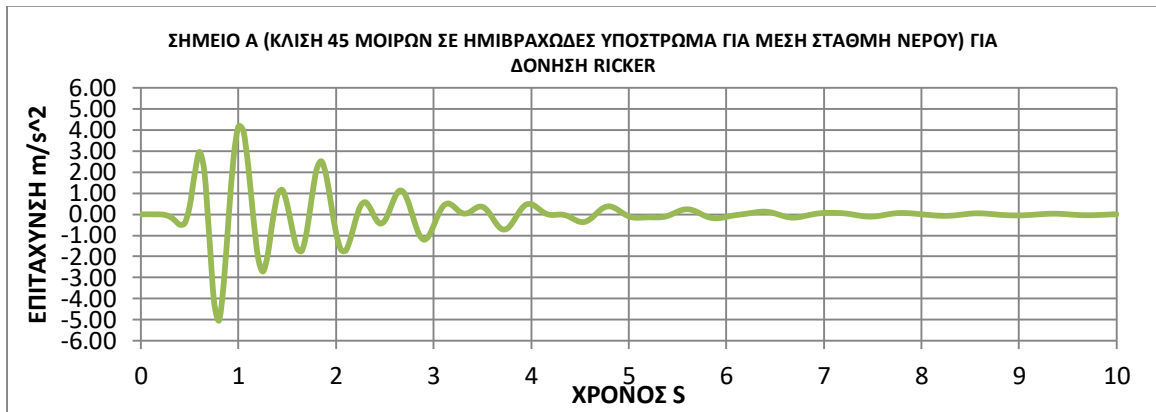
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 2



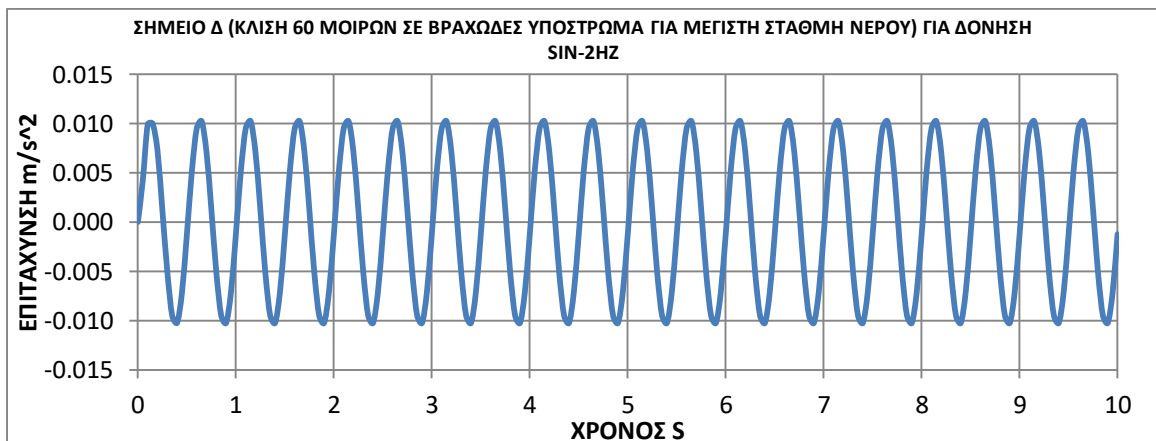
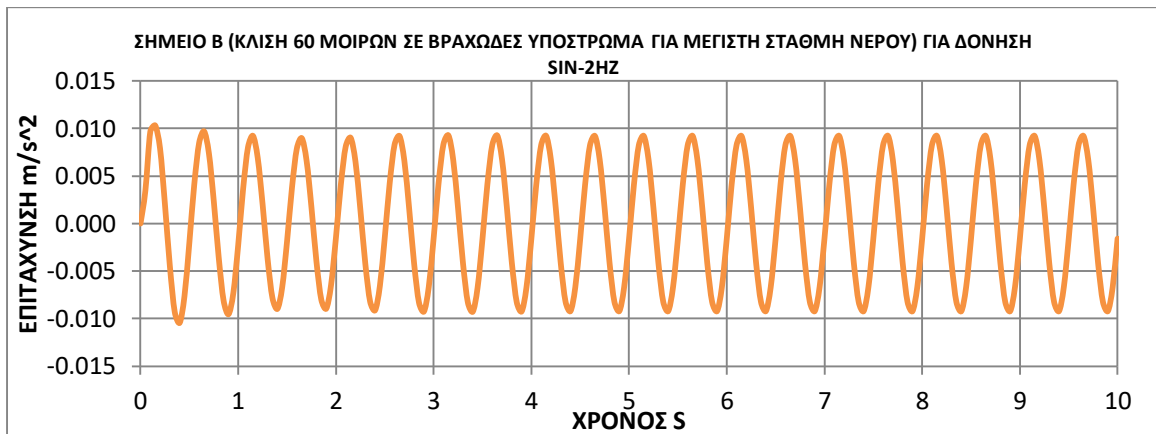
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 3



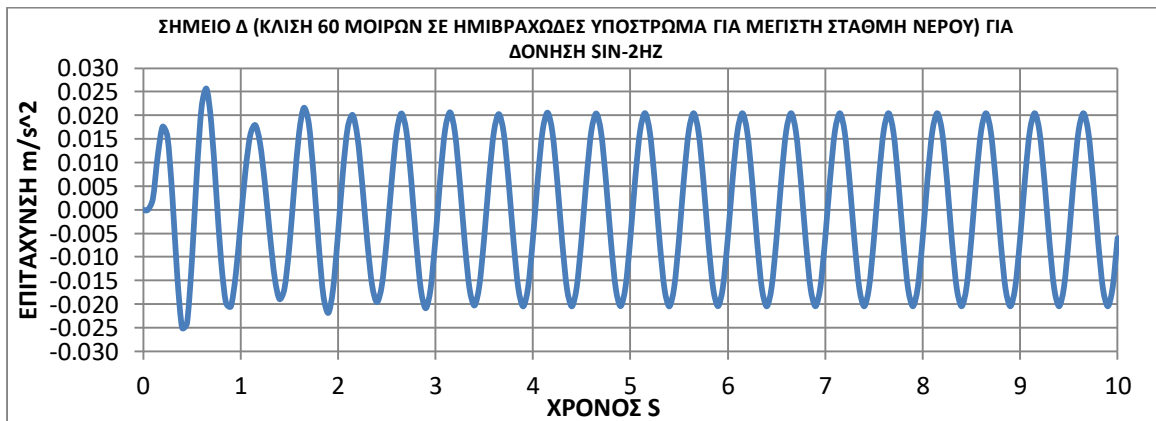
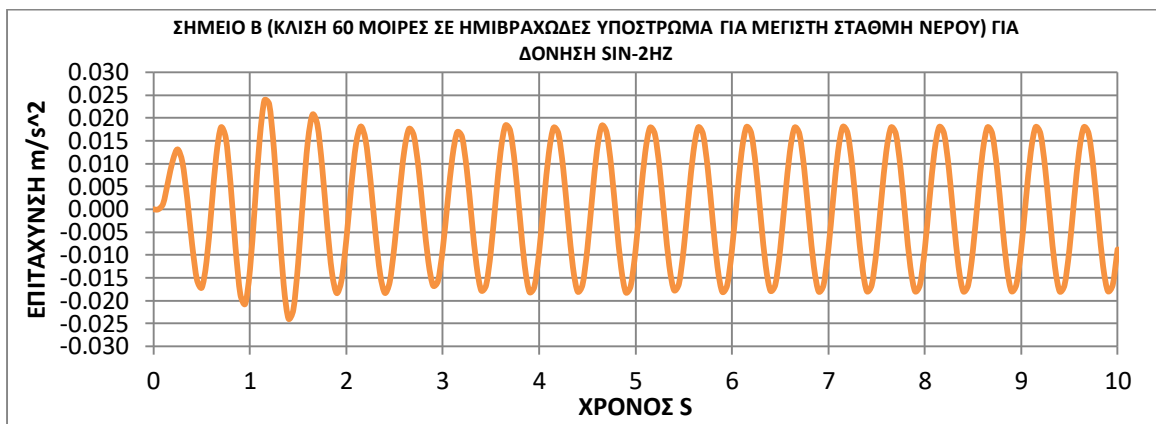
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέση στάθμη νερού, σενάριο 4



Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



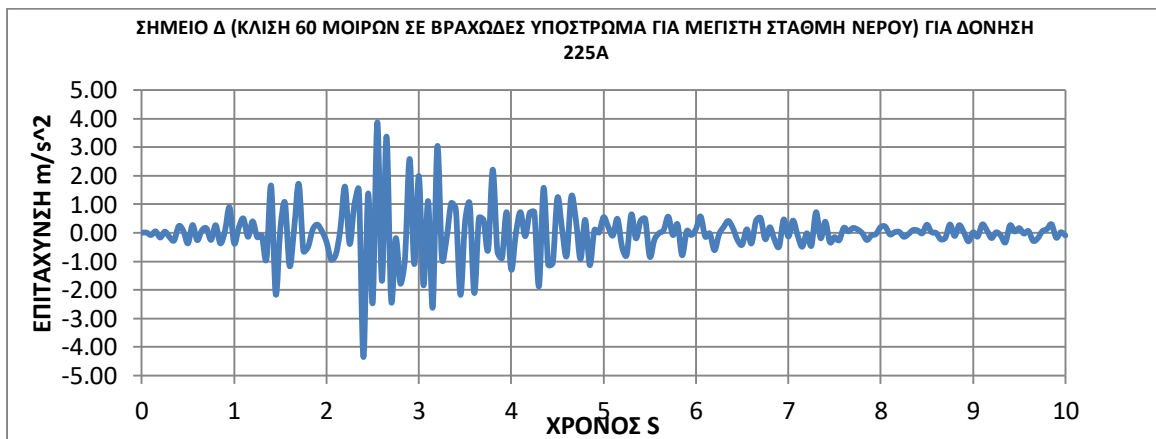
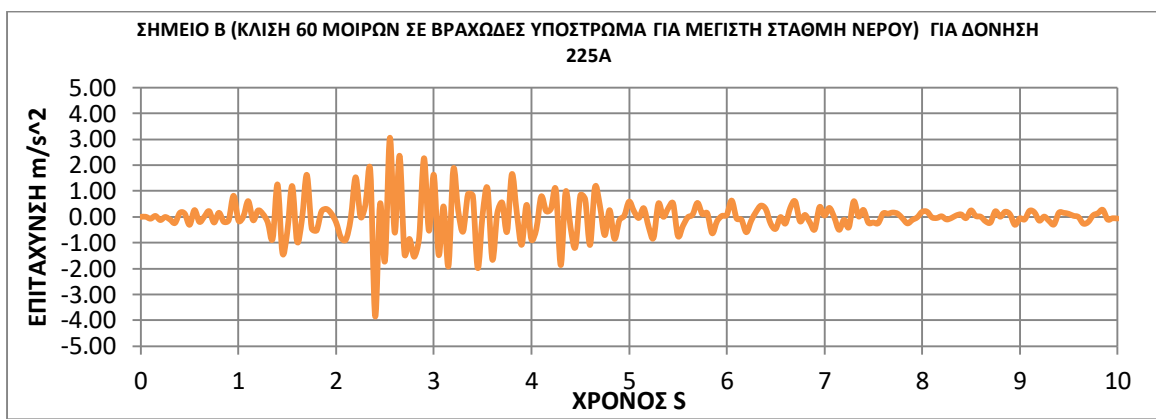
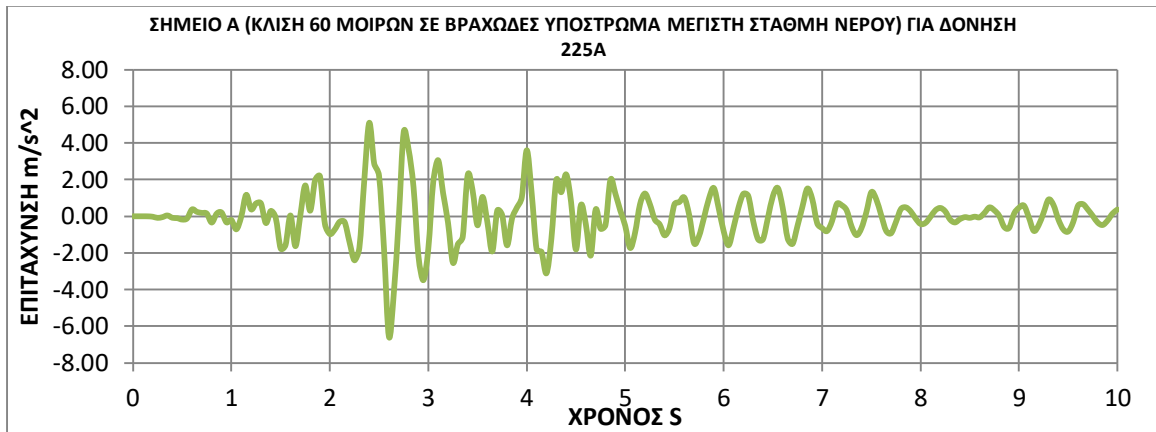
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3



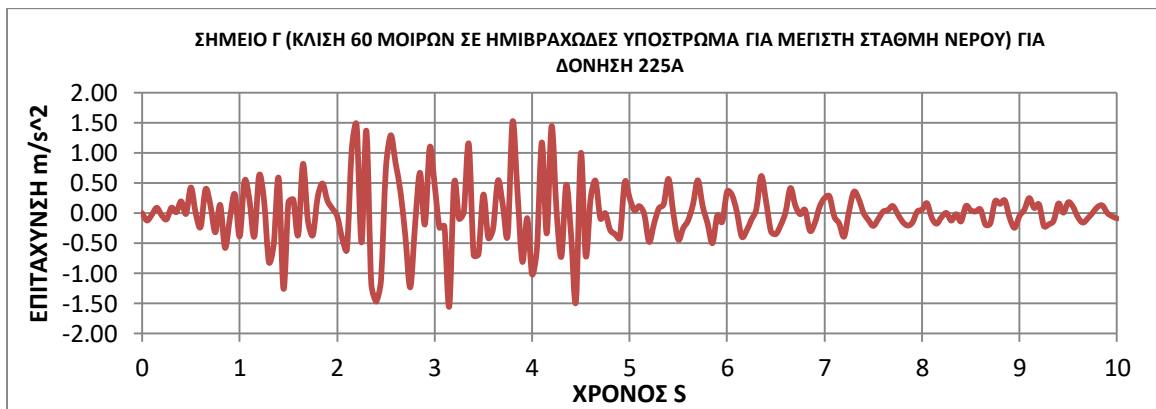
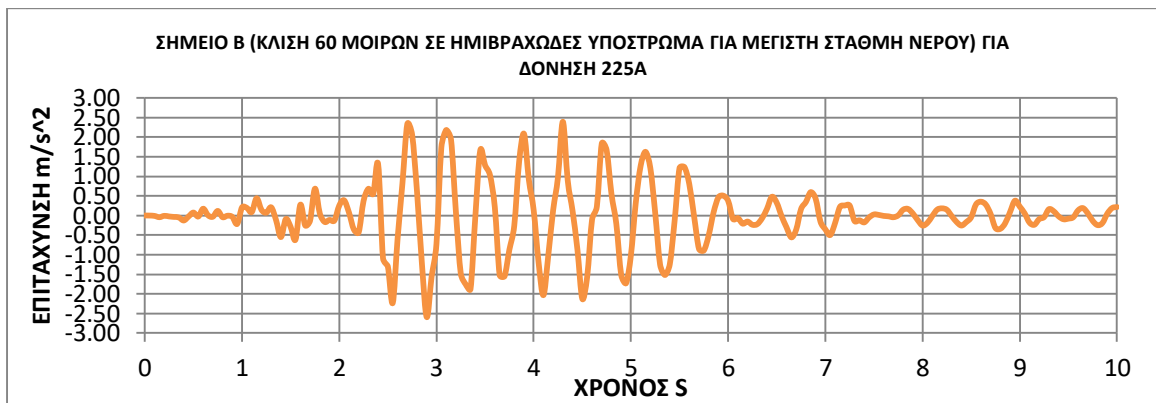
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (SIN-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



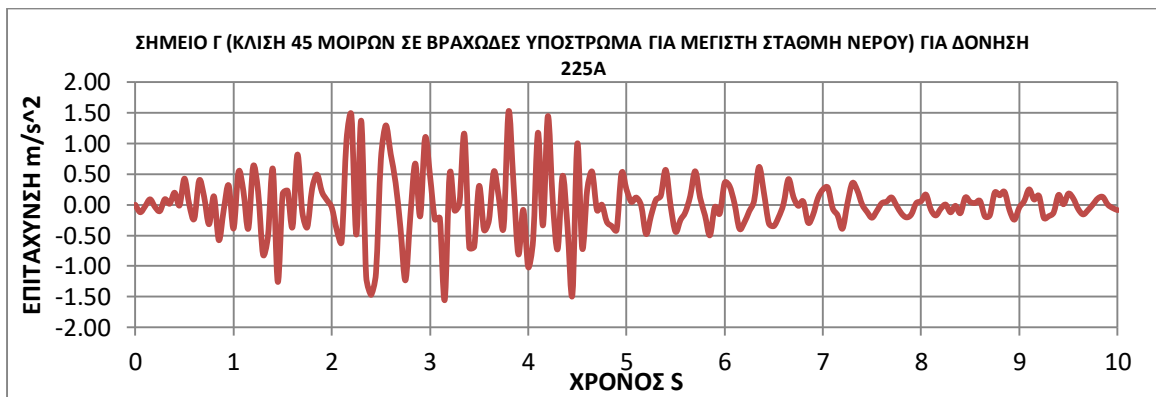
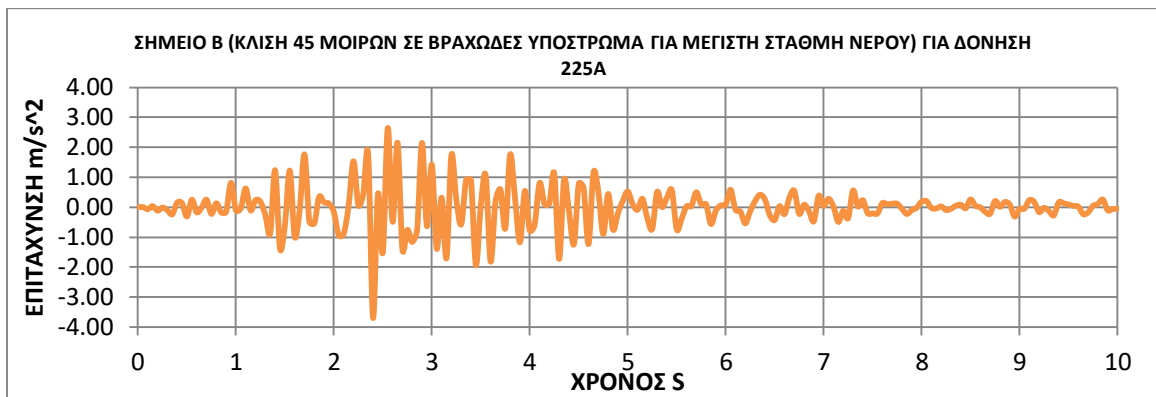
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



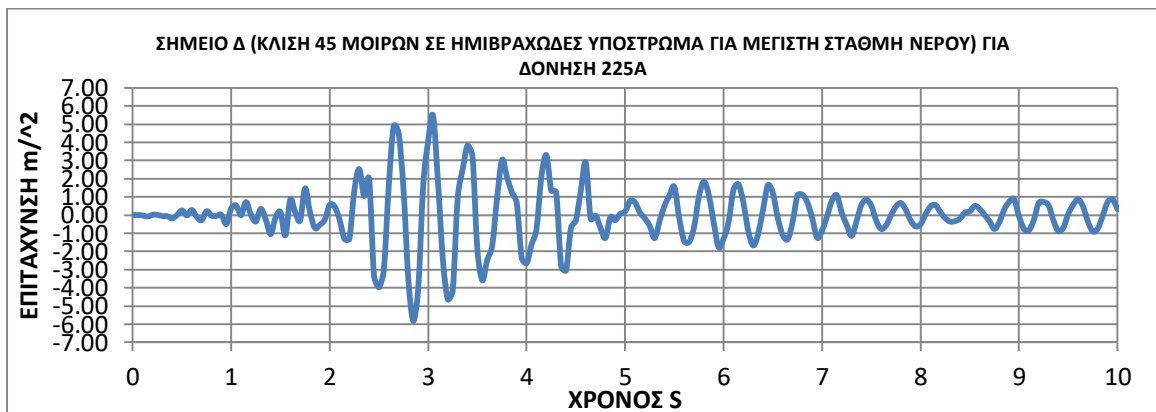
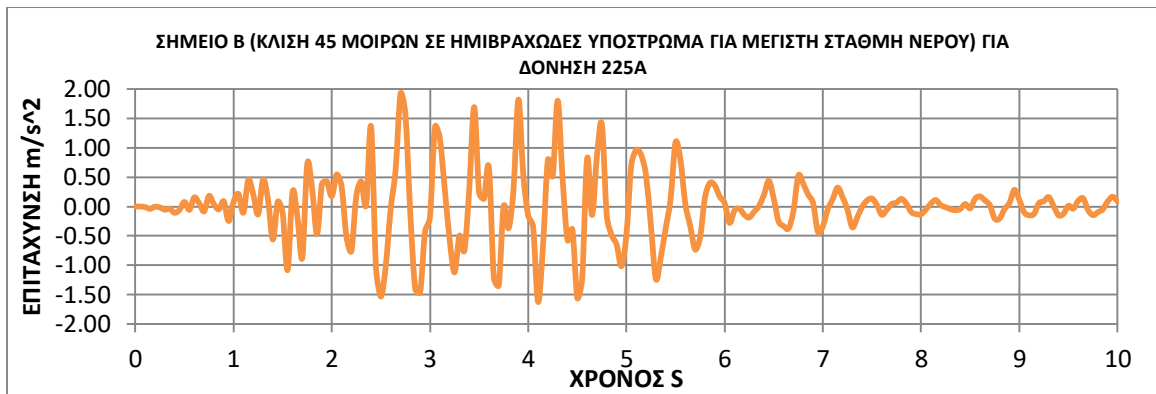
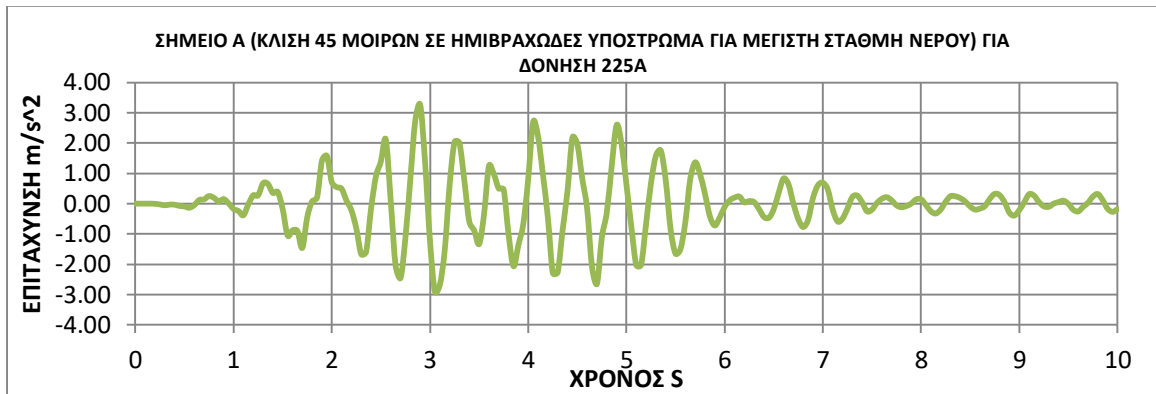
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



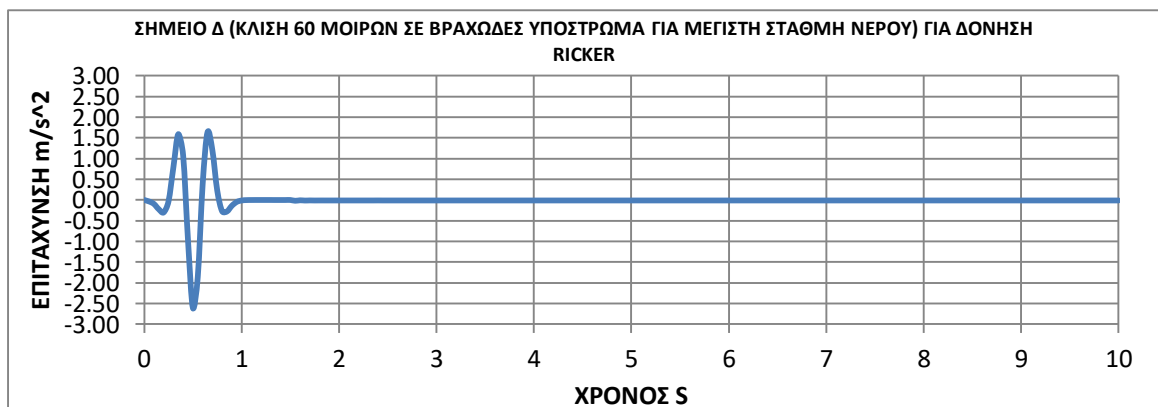
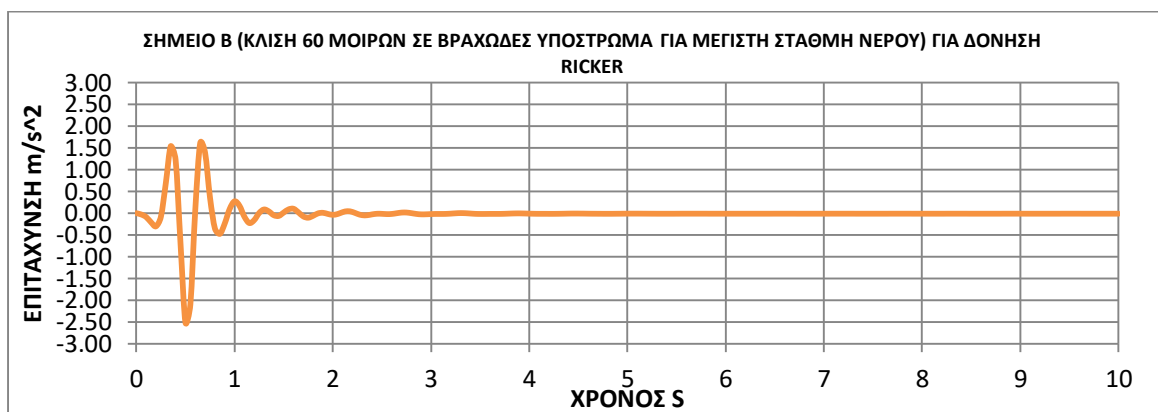
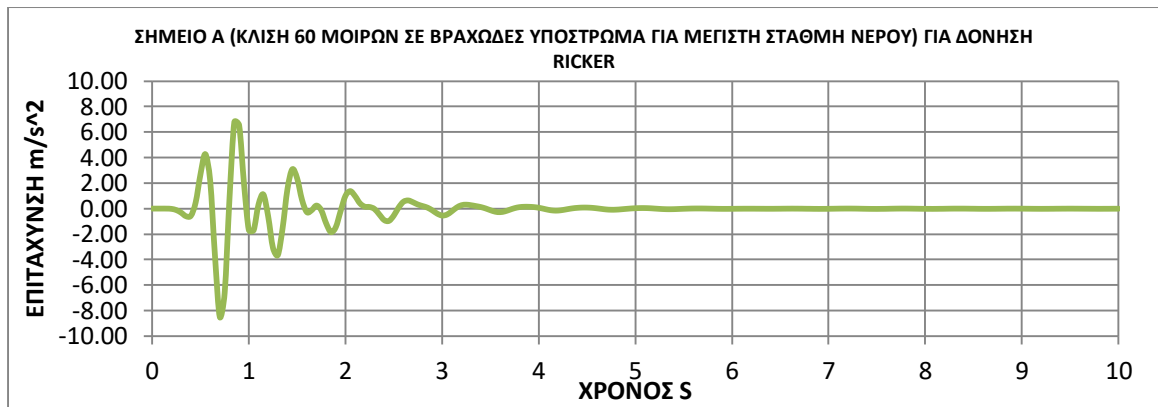
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3



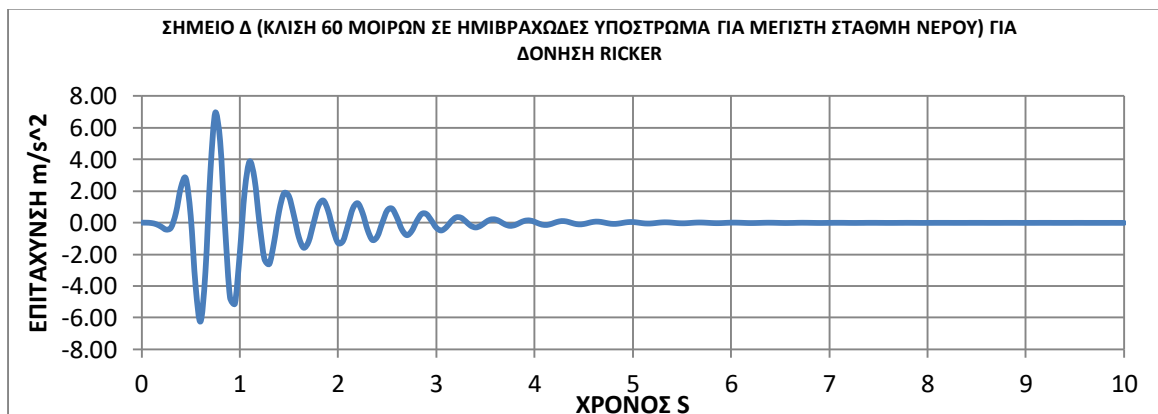
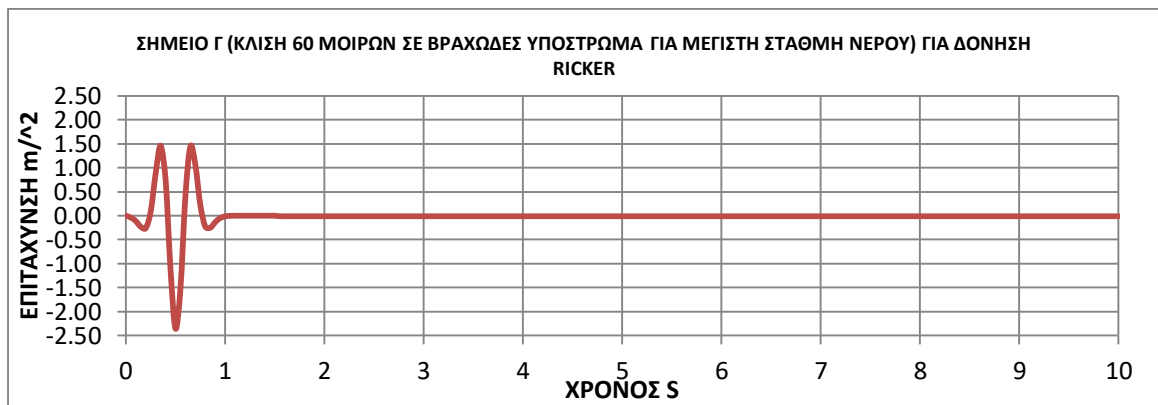
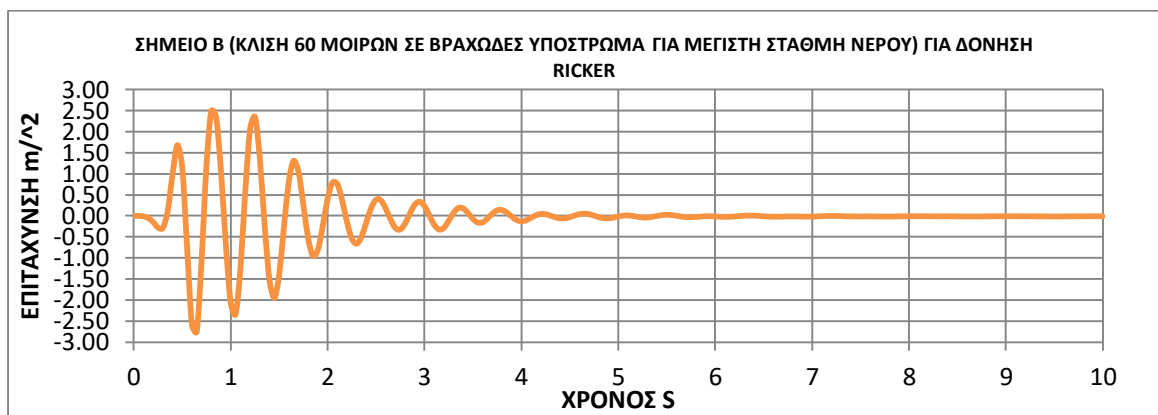
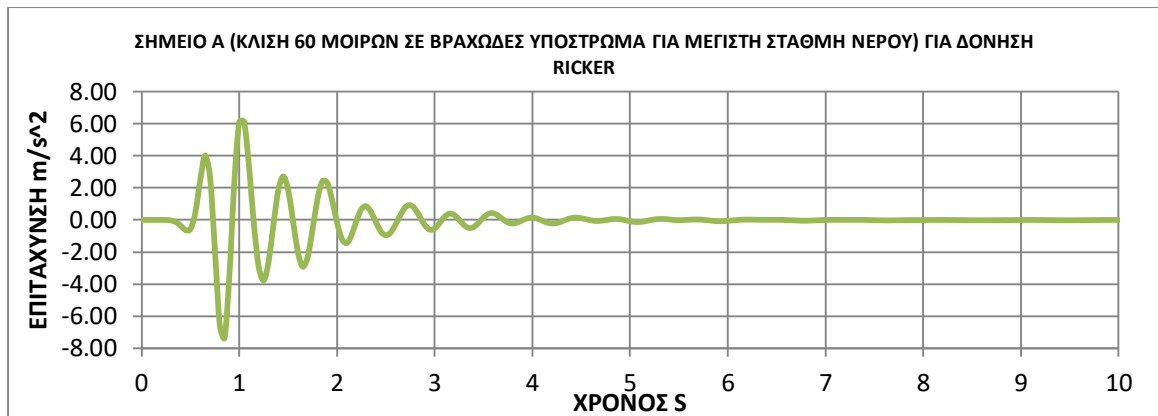
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (225Α) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



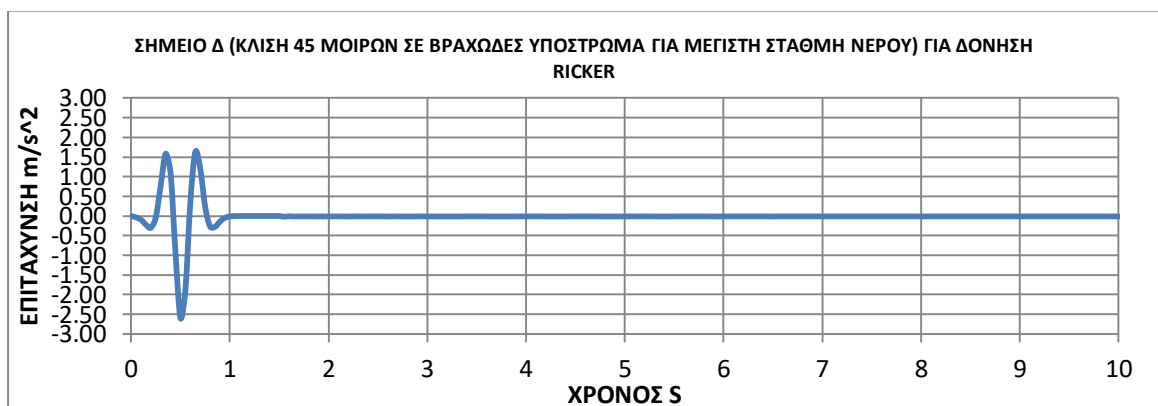
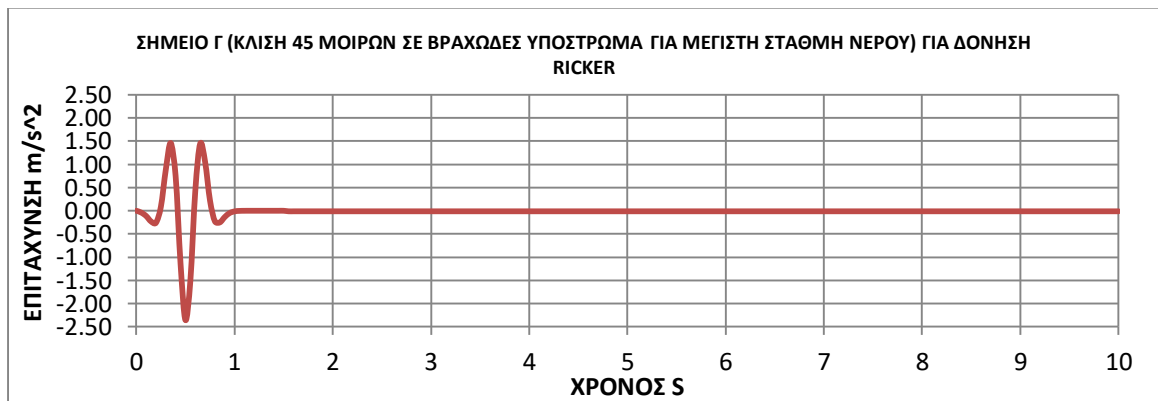
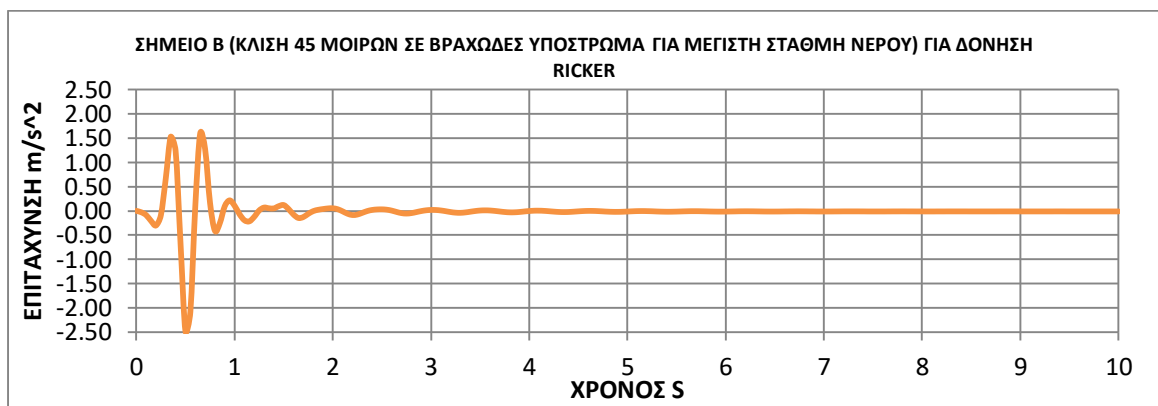
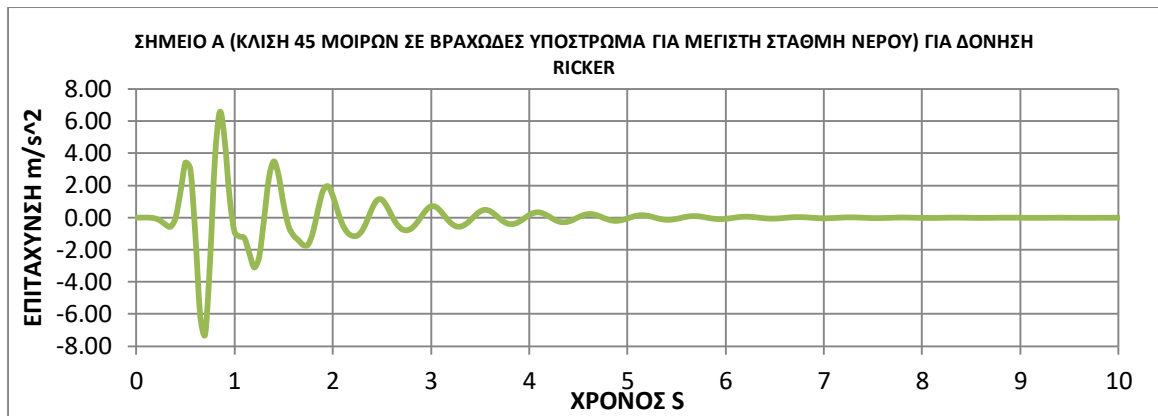
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 1



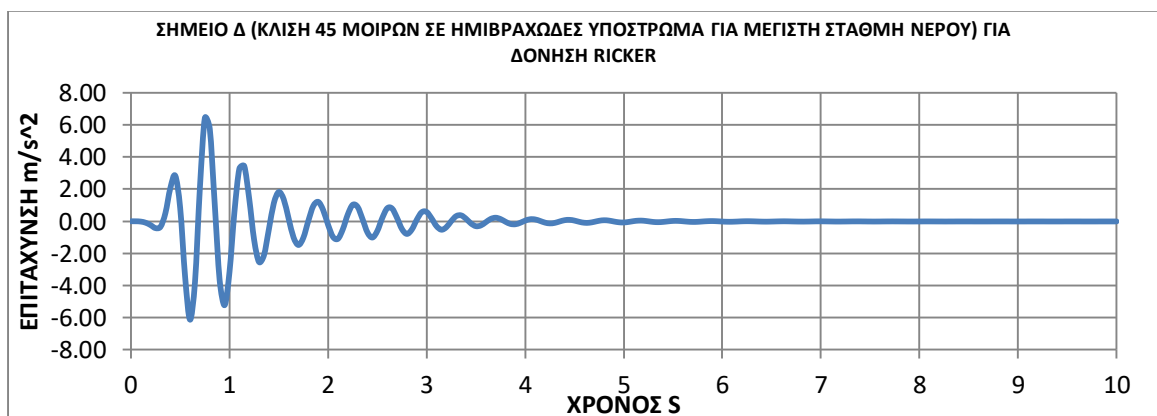
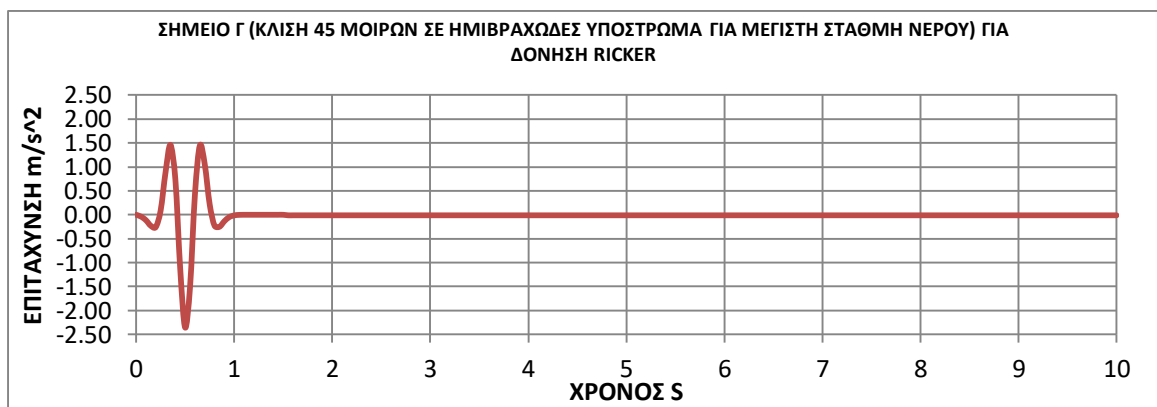
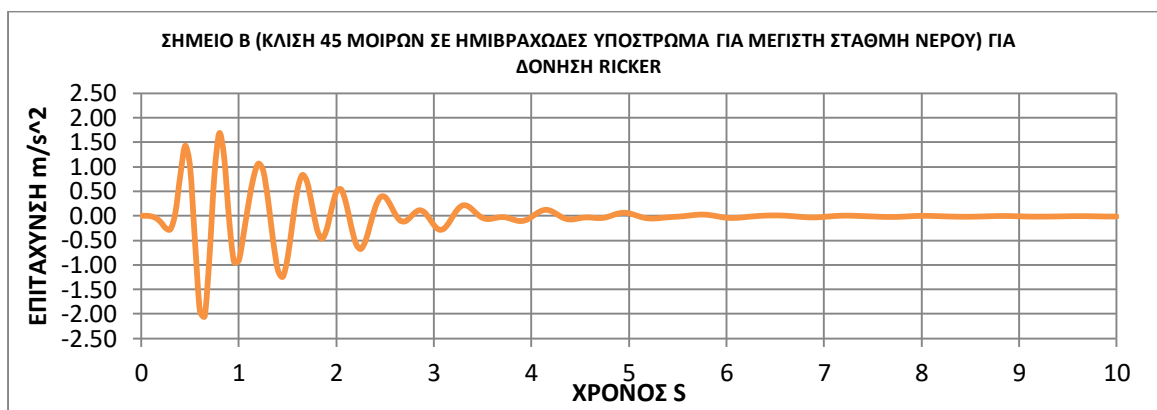
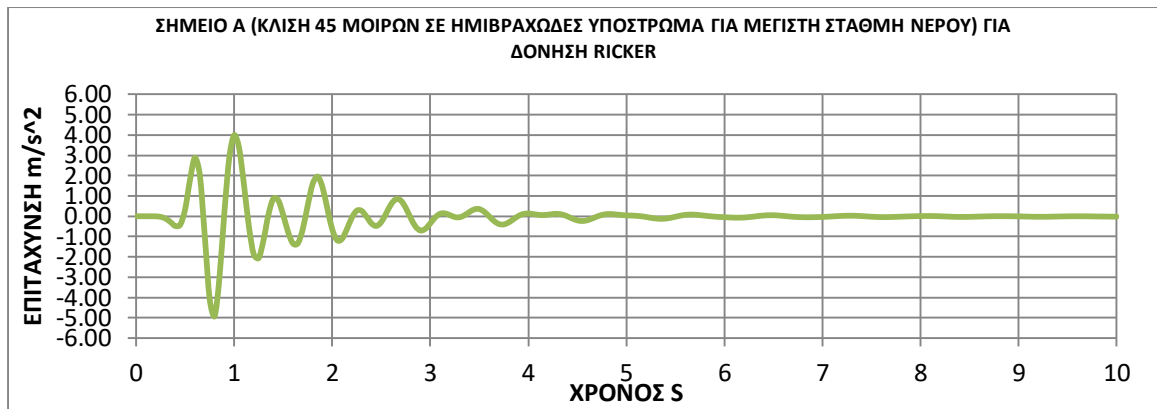
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 2



Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 3

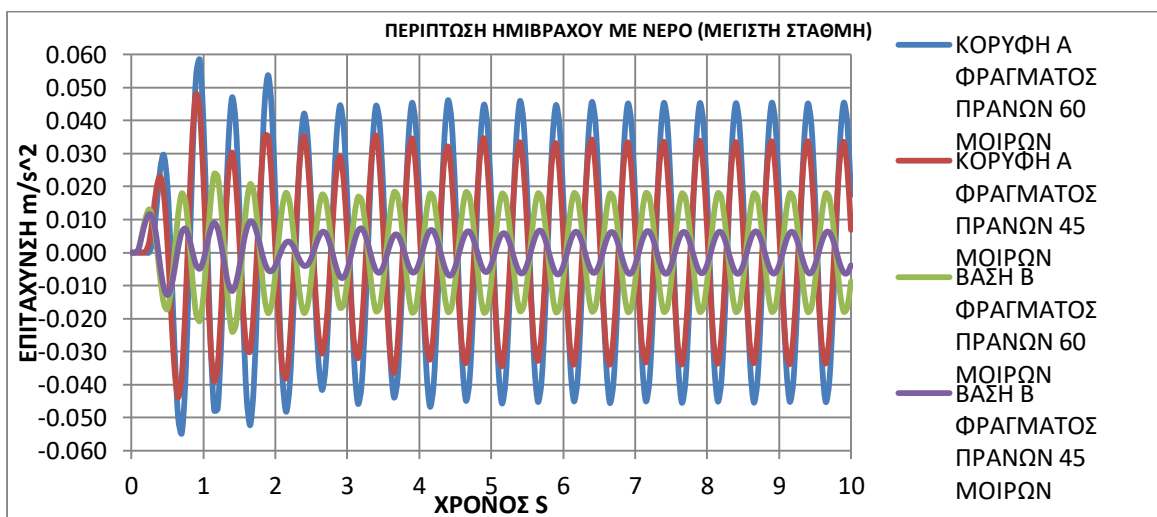
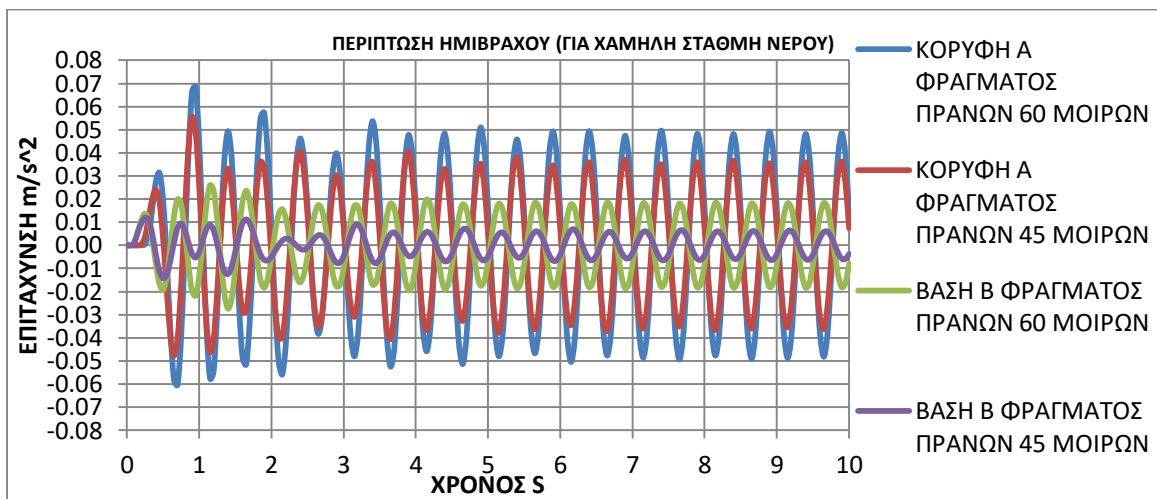


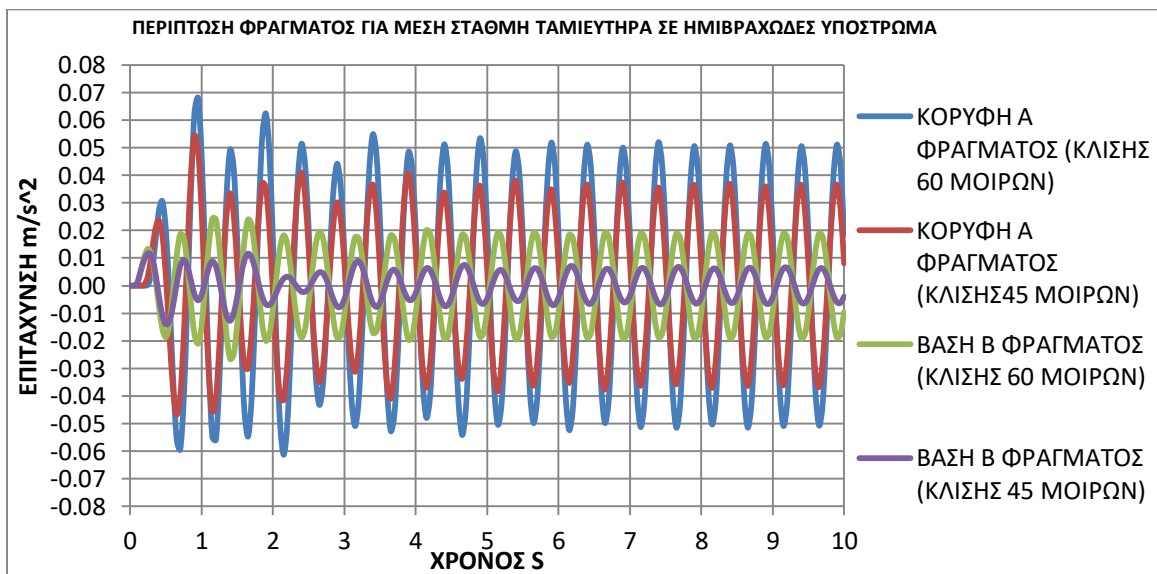
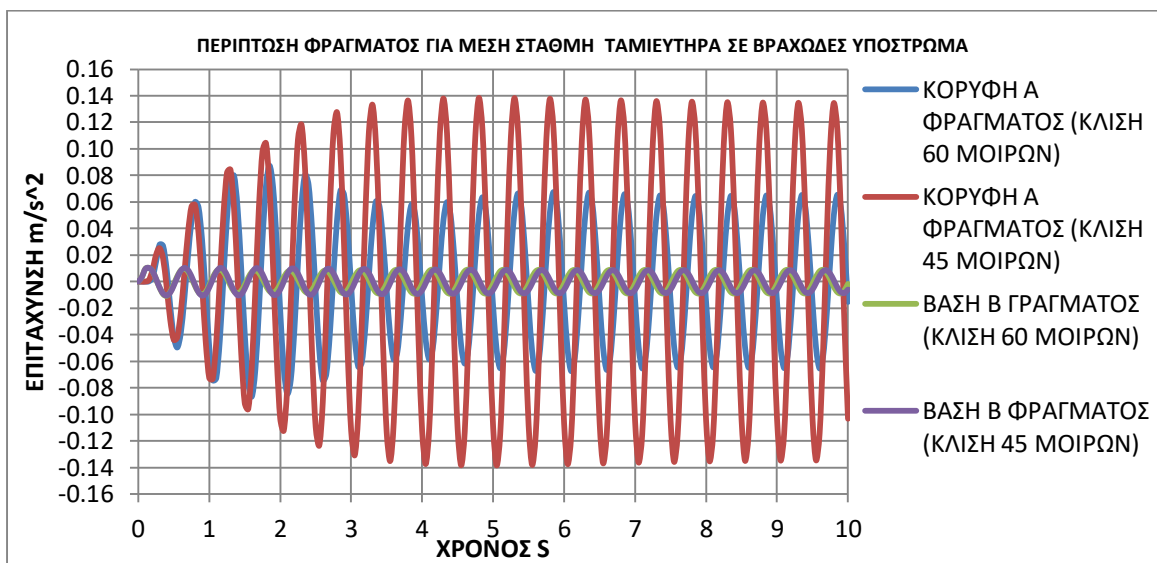
Χρονοιστορίες επιταχύνσεων σεισμικής δόνησης (RICKER-2HZ) για μέγιστη στάθμη νερού, σενάριο 4



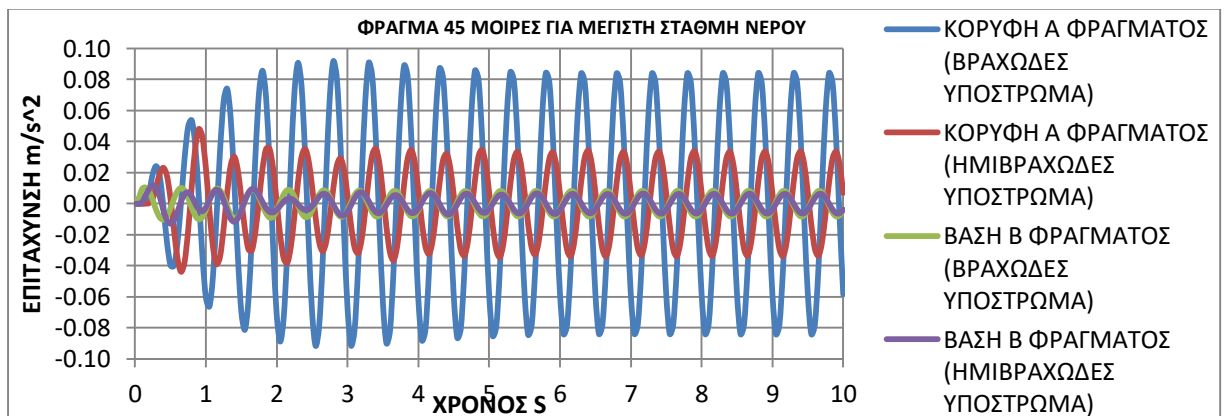
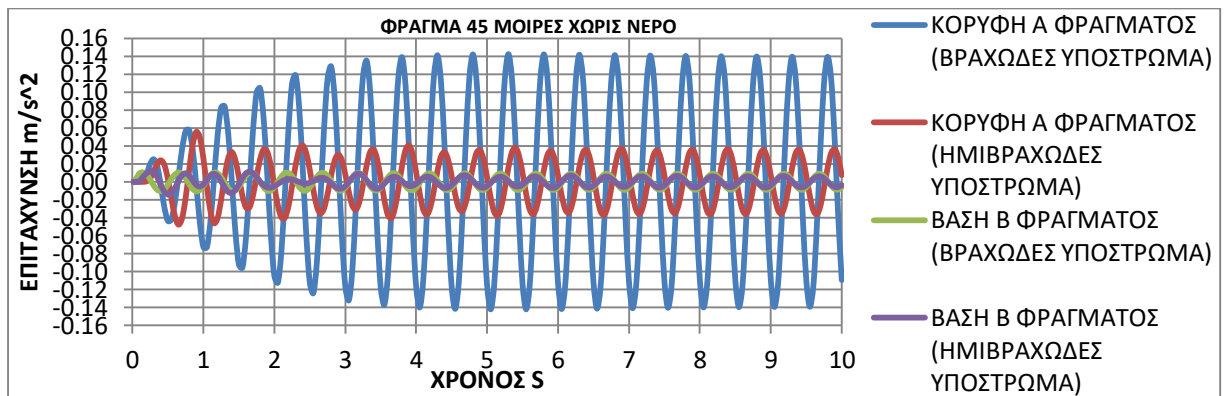
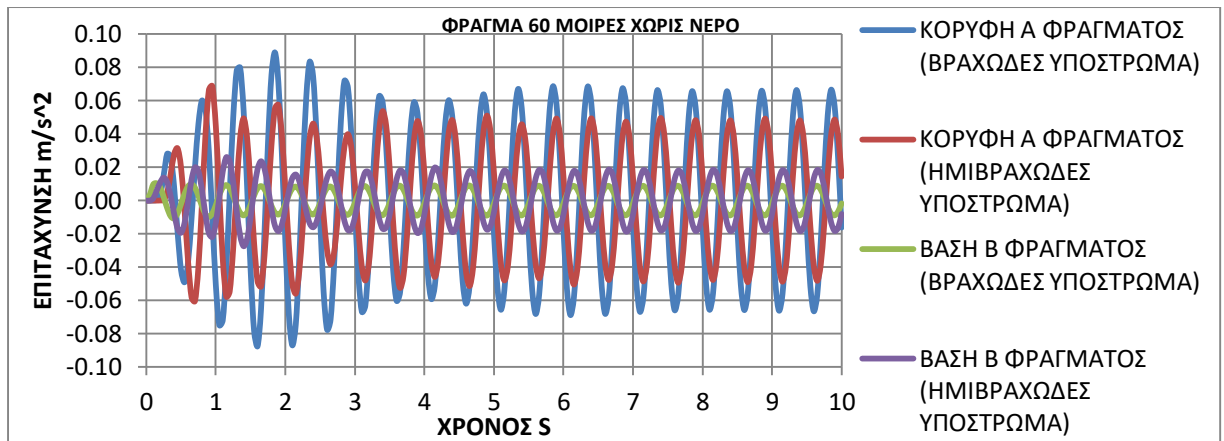
**ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ
ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ
ΔΟΝΗΣΗ SIN-2HZ**

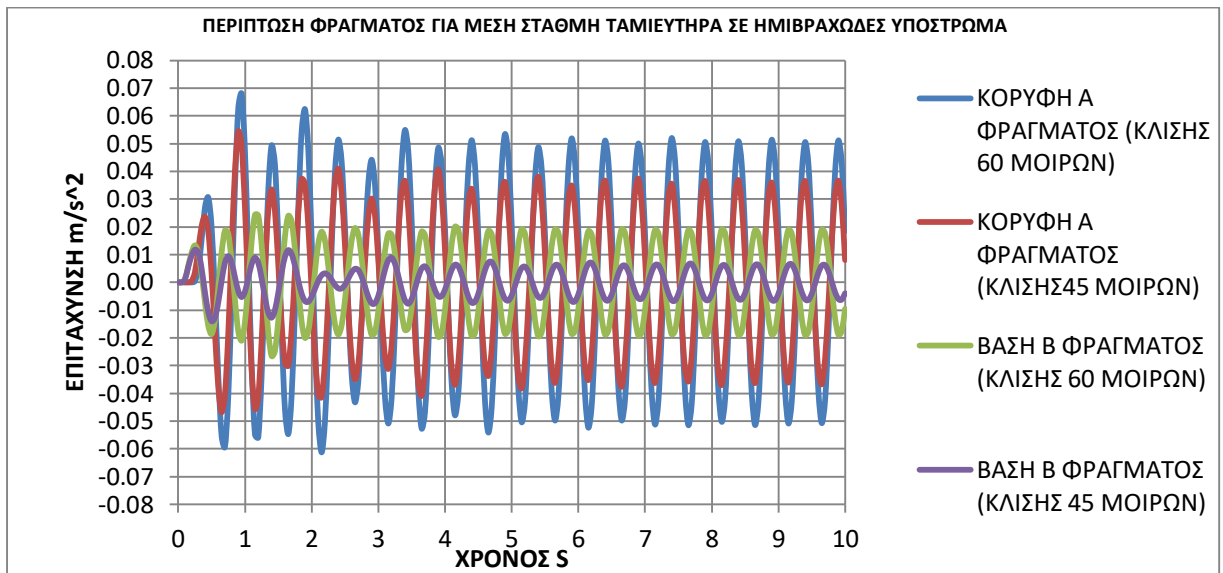
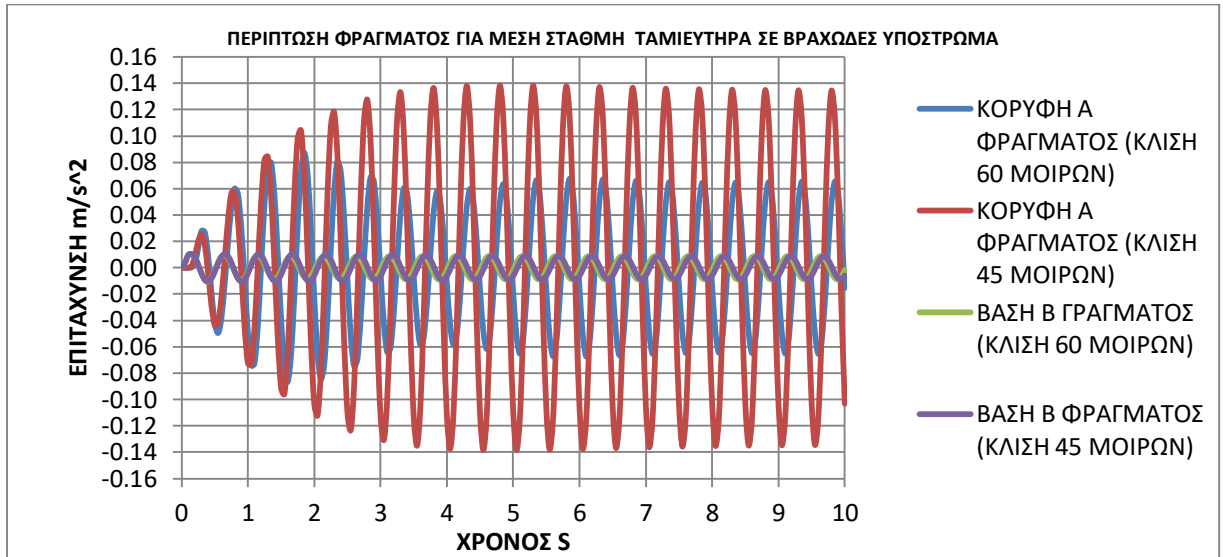
Συγκρίσεις χρονοιστοριών επιτάχυνσης για διαφορετική κλίση πρανών του φράγματος (κλίσεις 60 και 45 μοιρών)



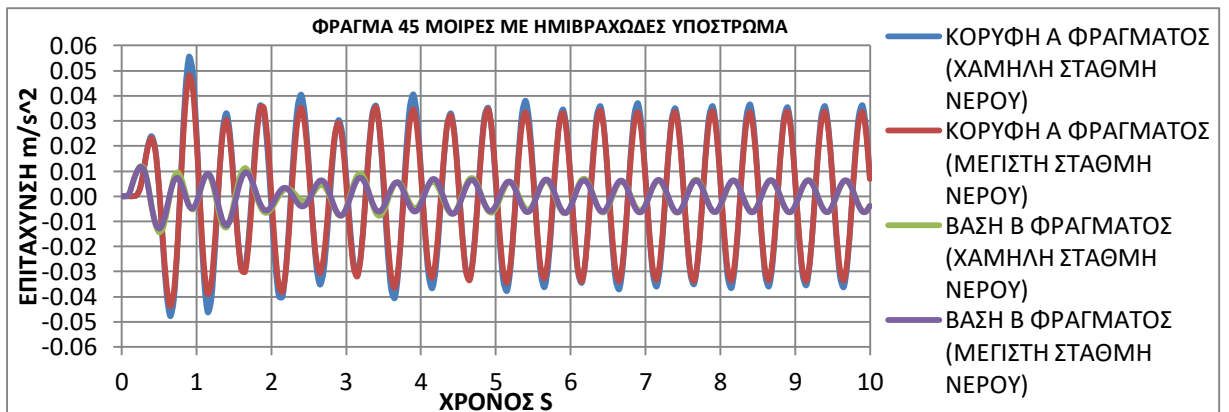
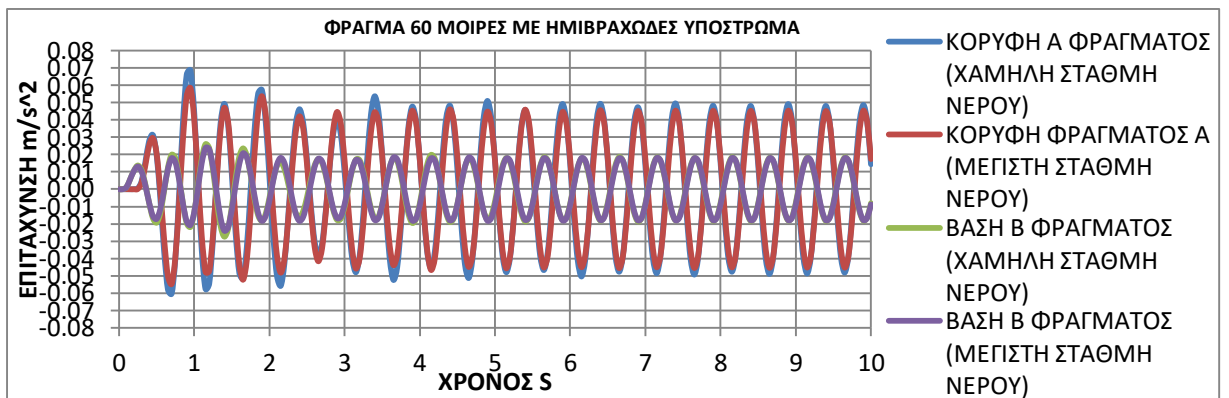
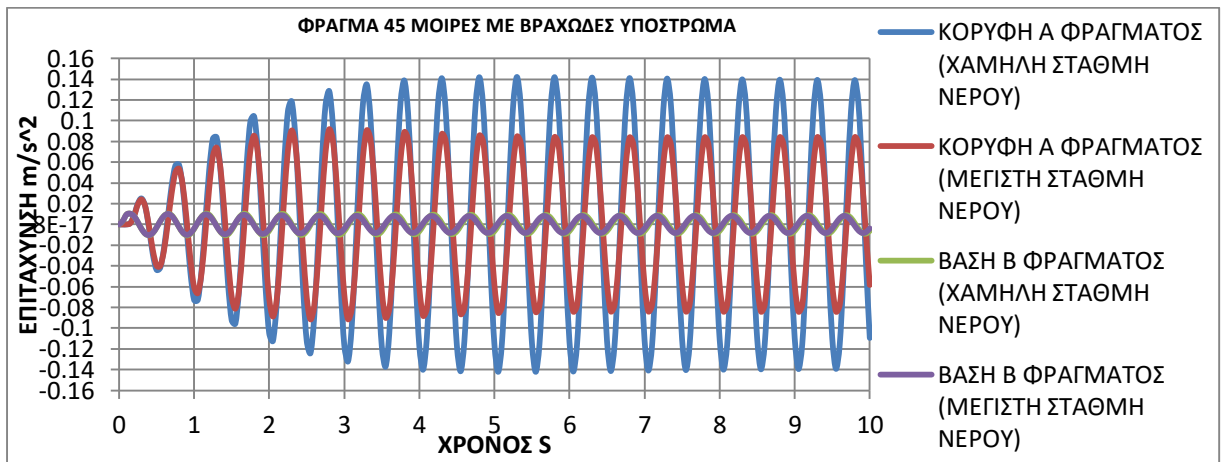
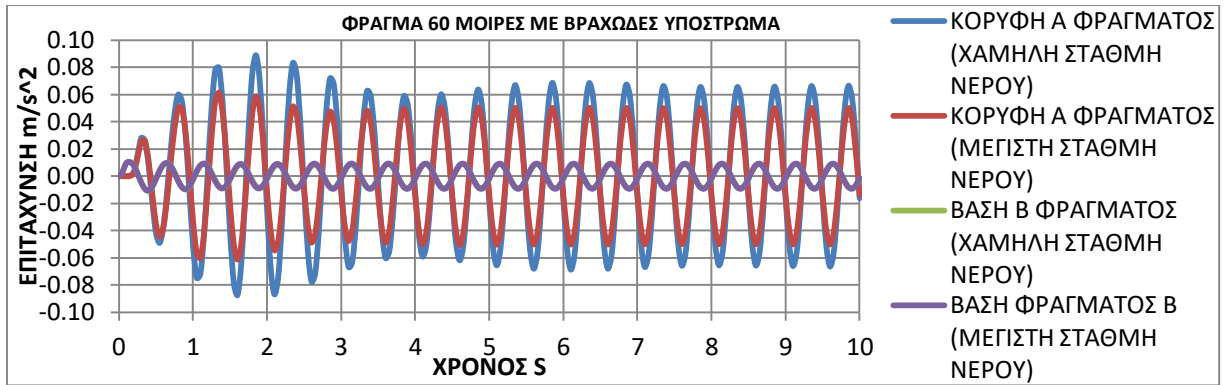


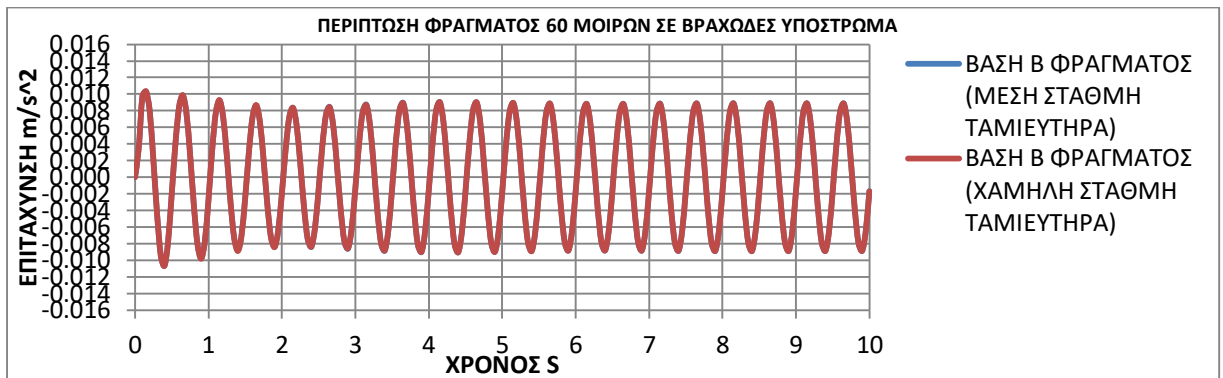
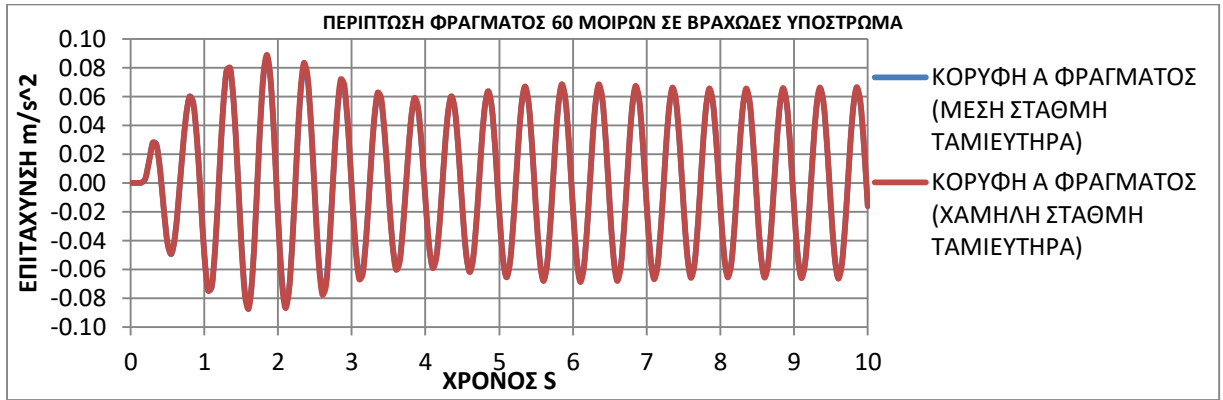
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης σχετικά με το υλικό από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα (περίπτωση για βραχώδες και ημιβραχώδες υλικό)

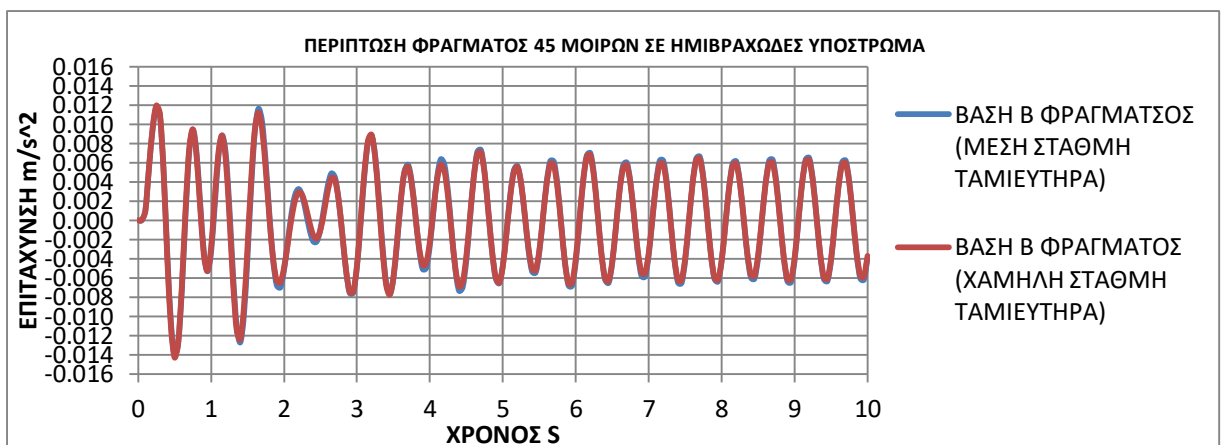
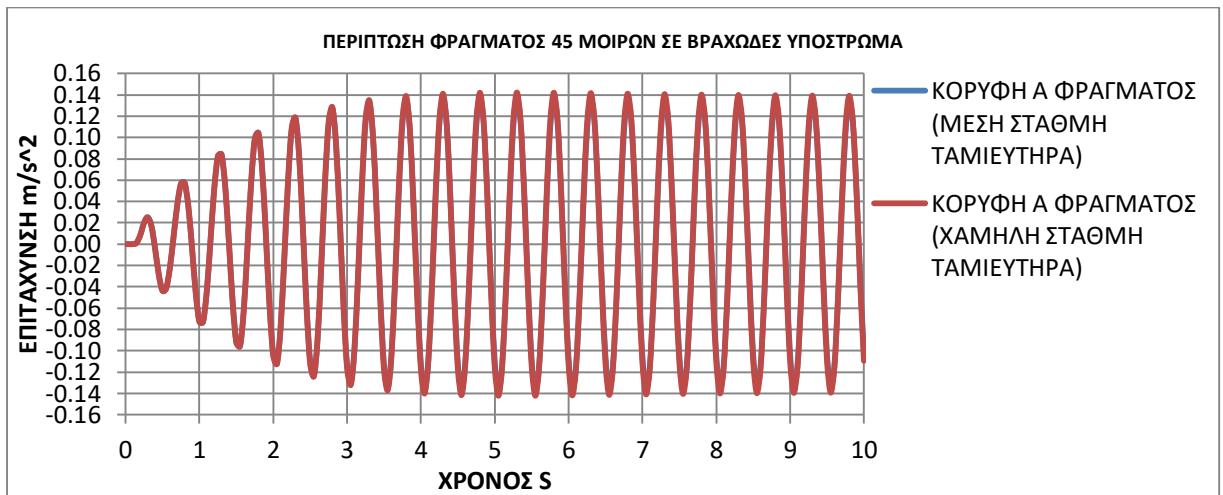




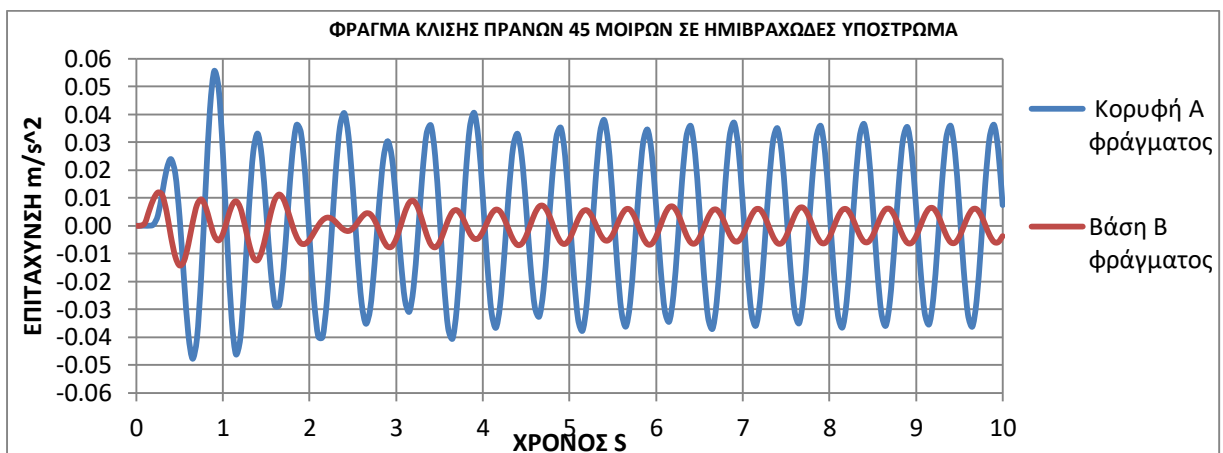
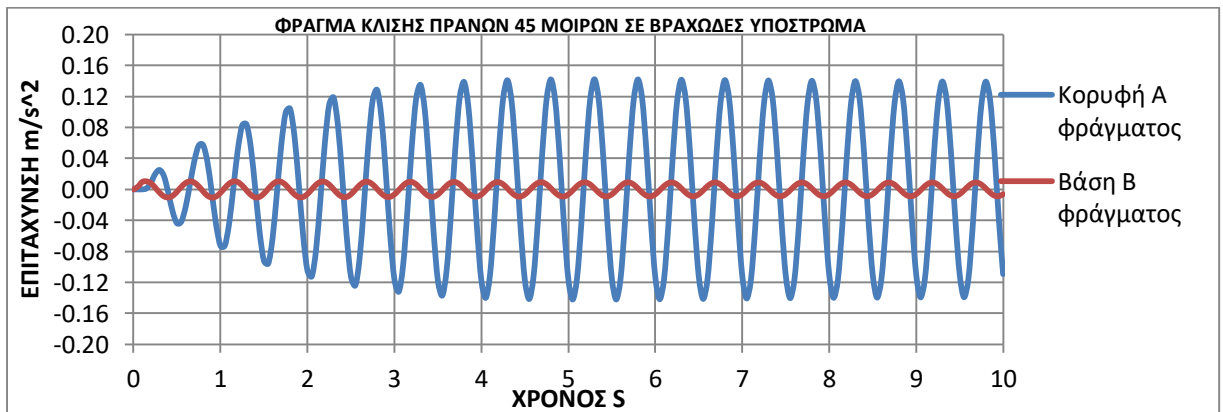
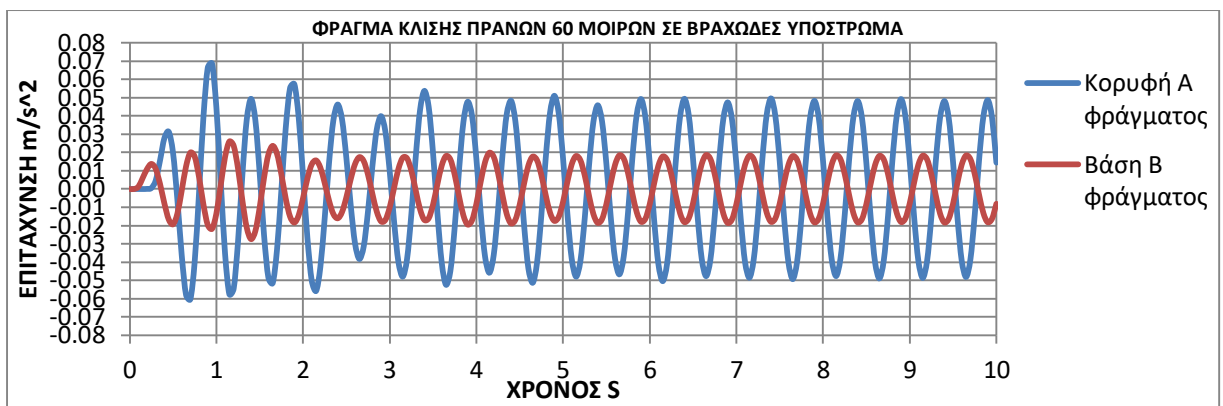
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης για διαφορετικές στάθμες νερού στον ταμιευτήρα
(περιπτώσεις χαμηλής, μέσης και μέγιστης στάθμης)



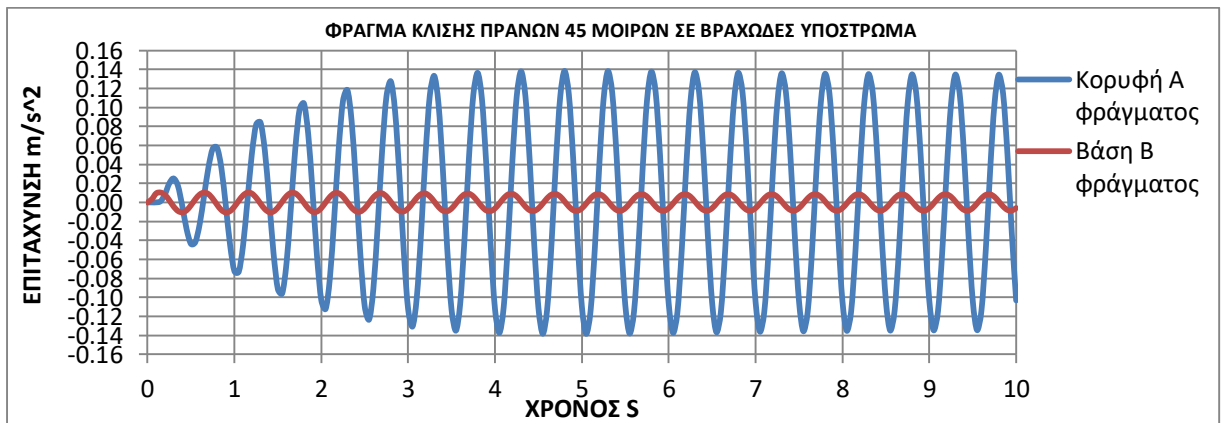
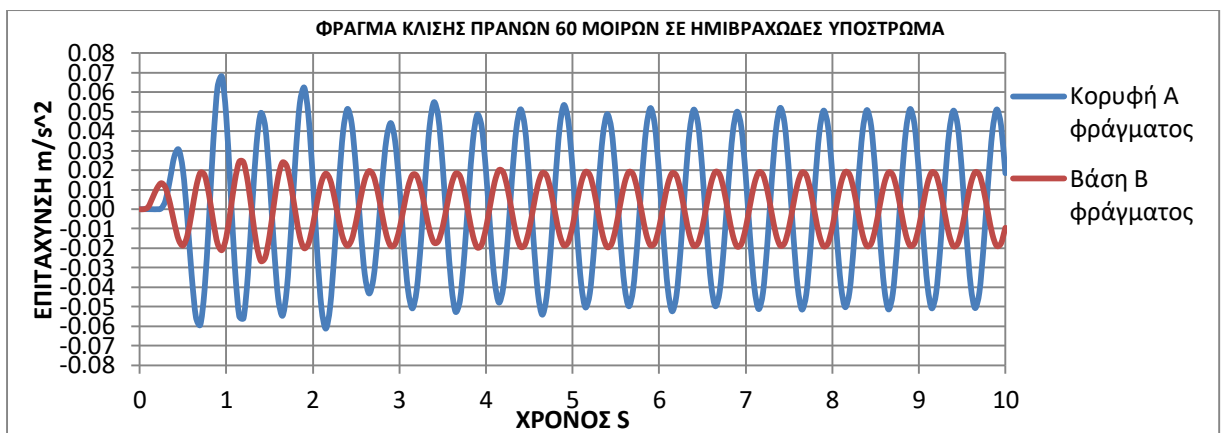
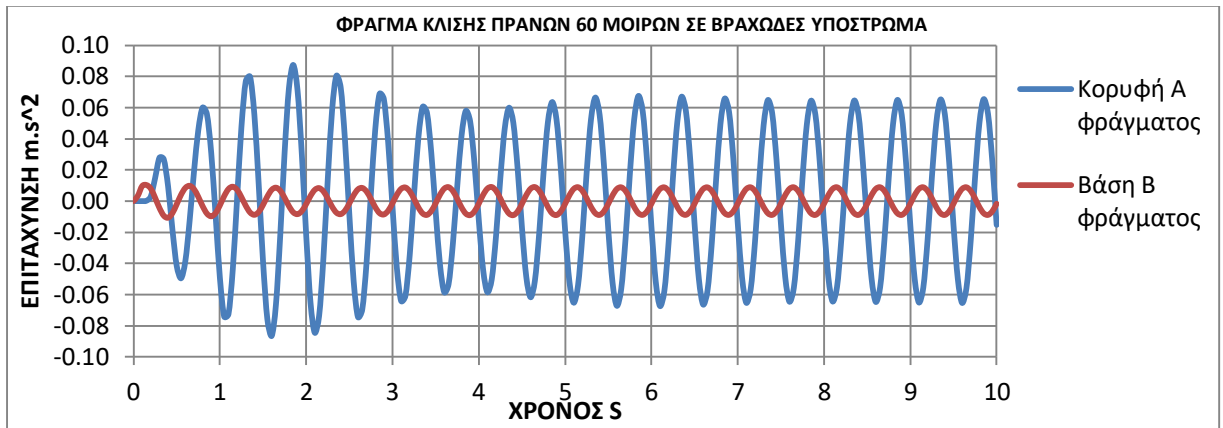




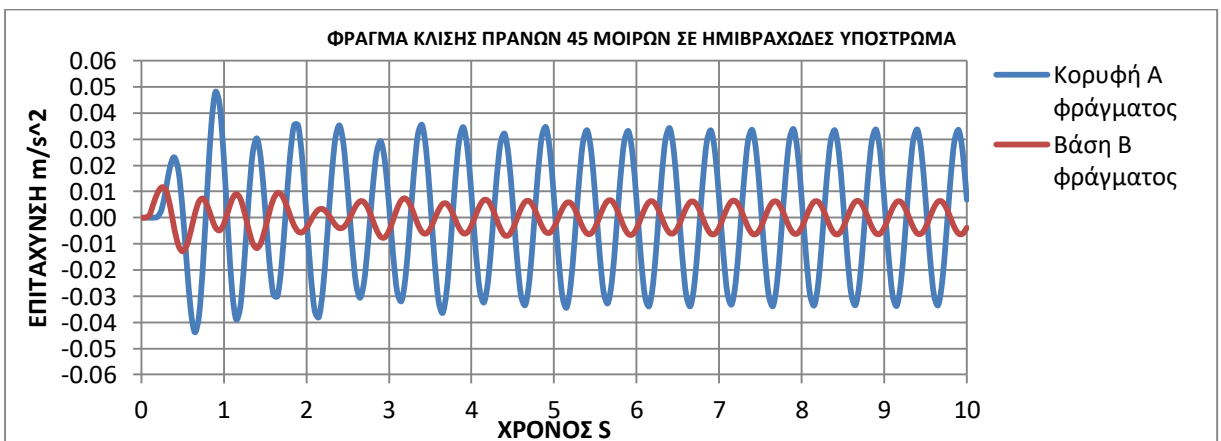
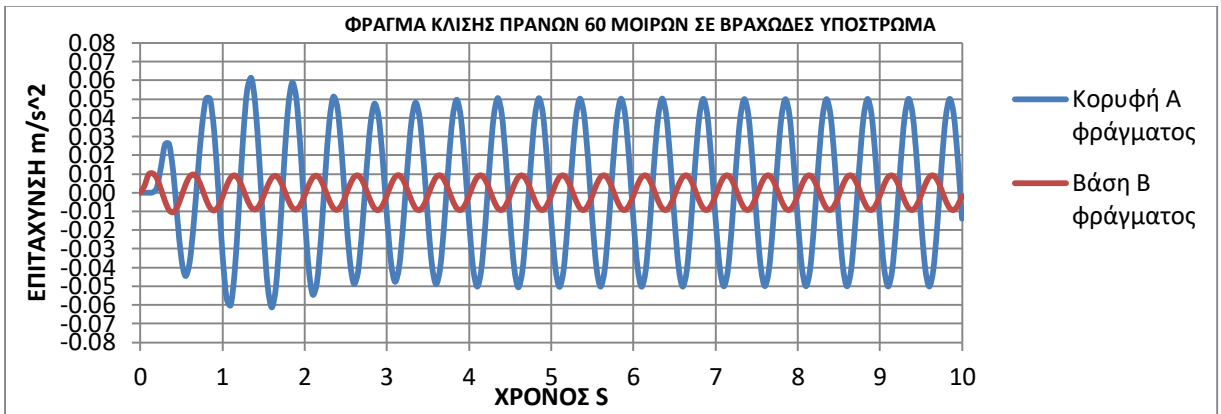
ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ SIN-2HZ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ



ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ SIN-2HZ ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

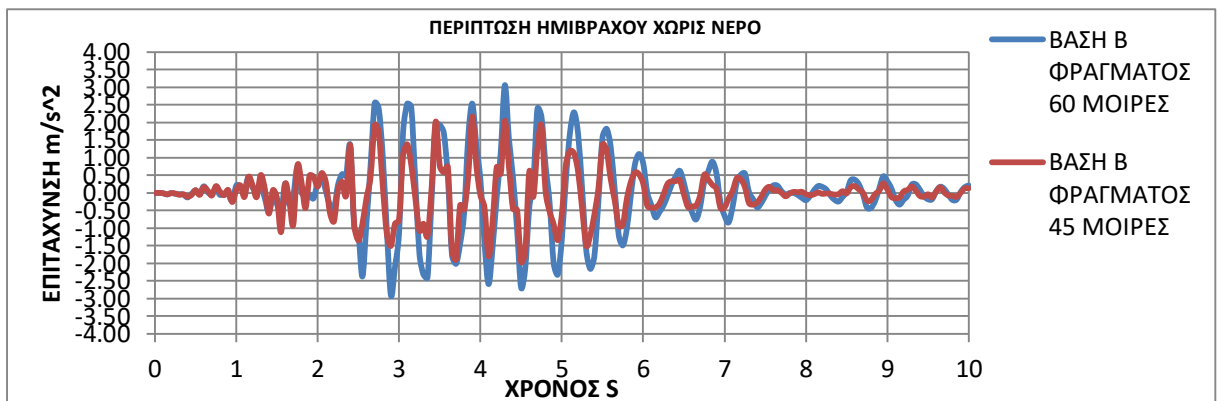
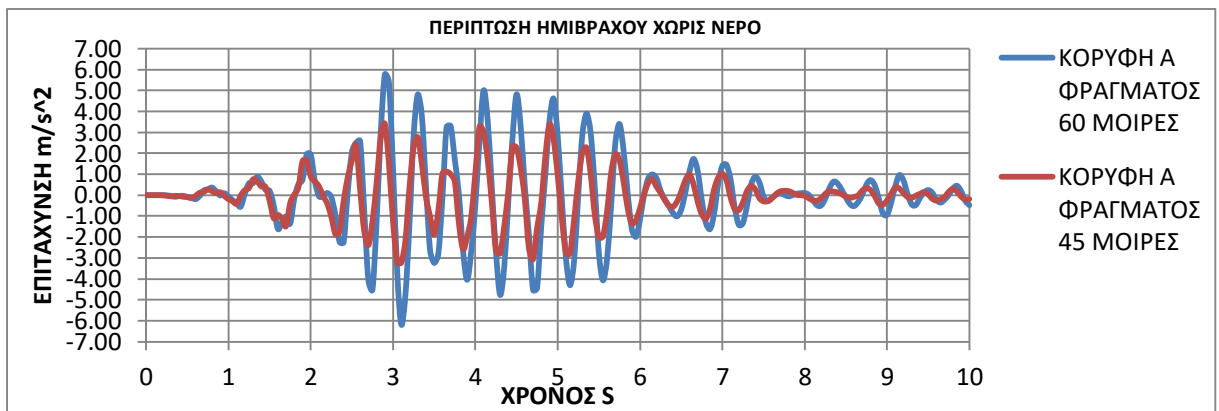
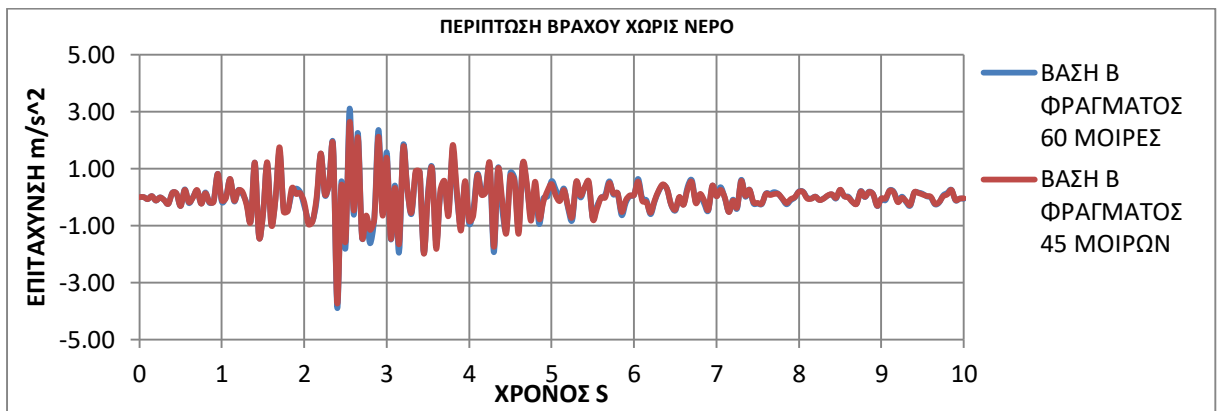


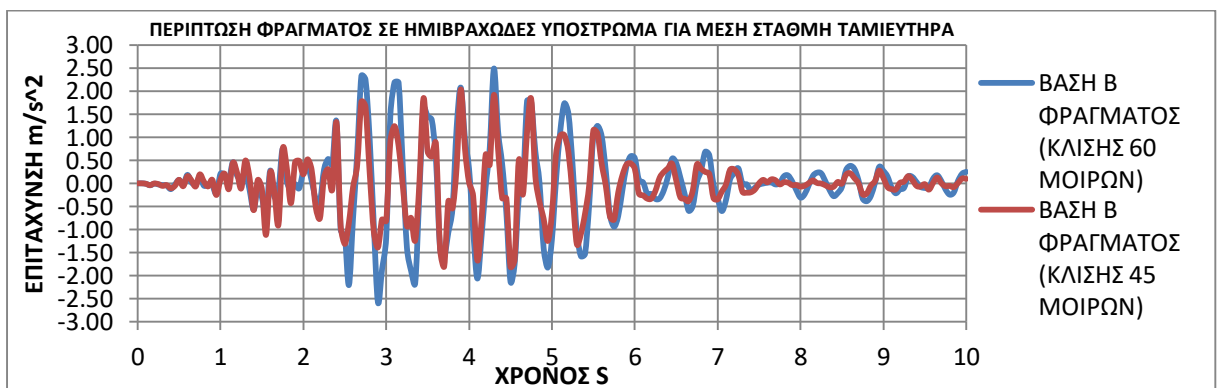
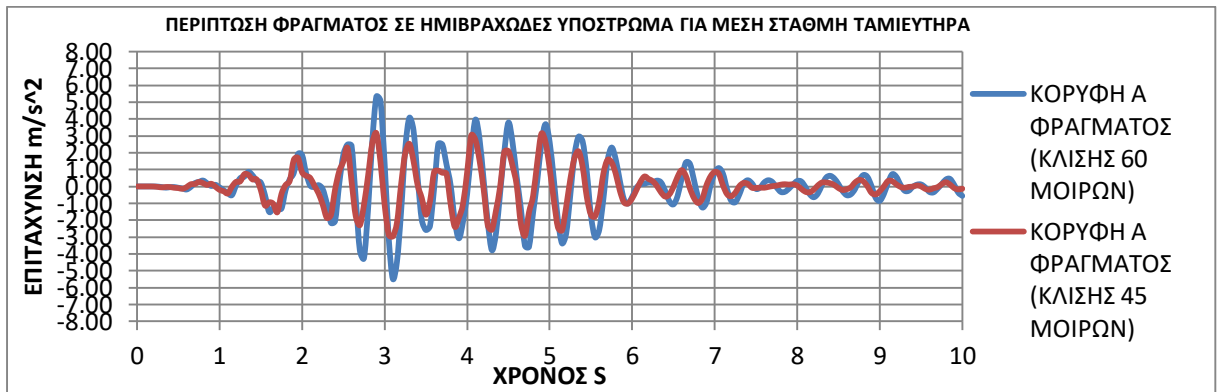
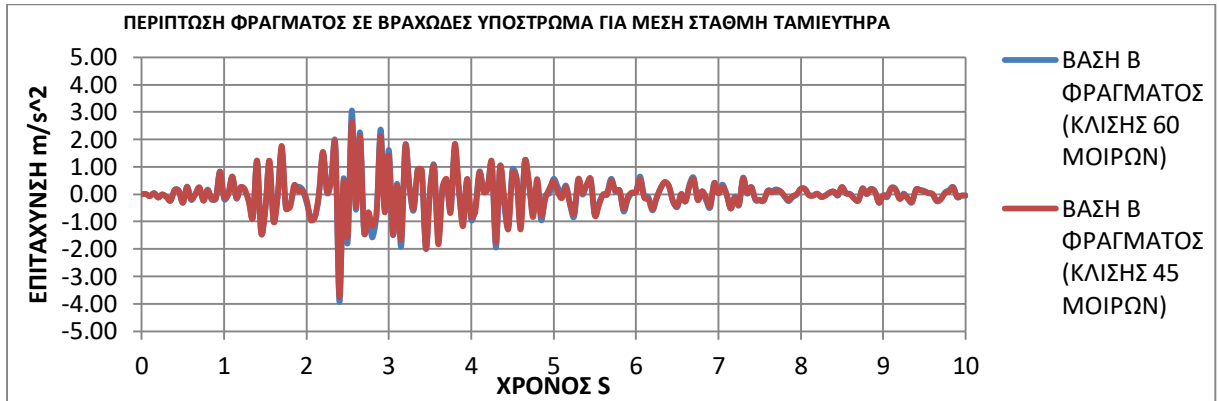
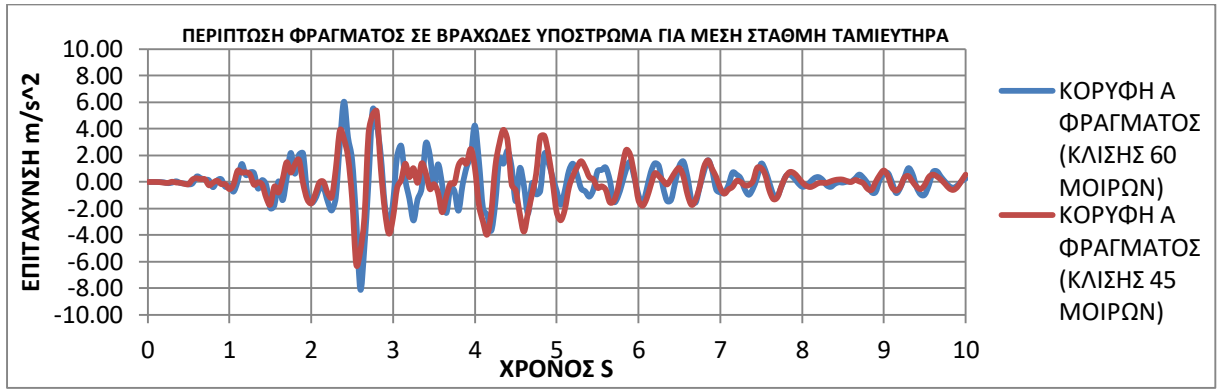
ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ SIN-2HZ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

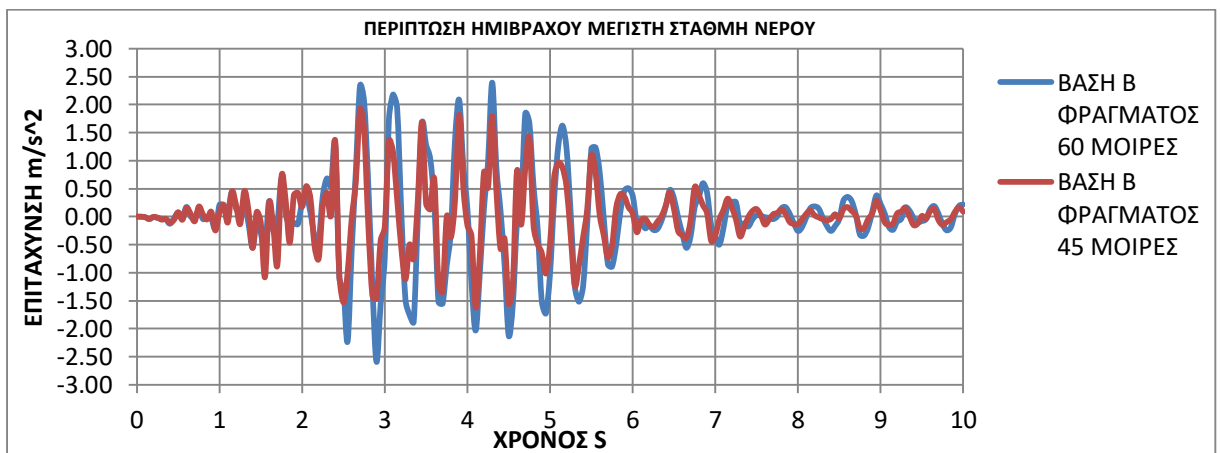
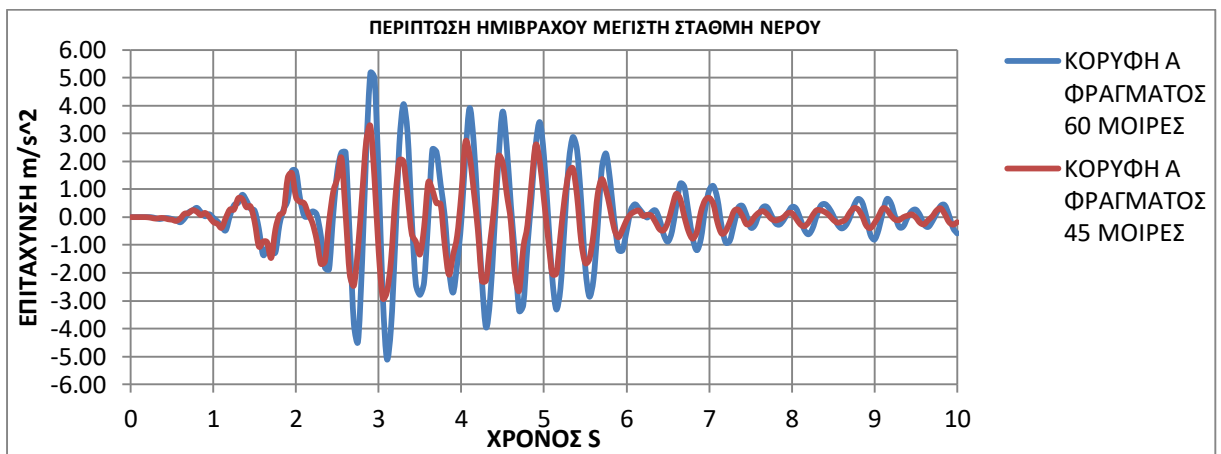
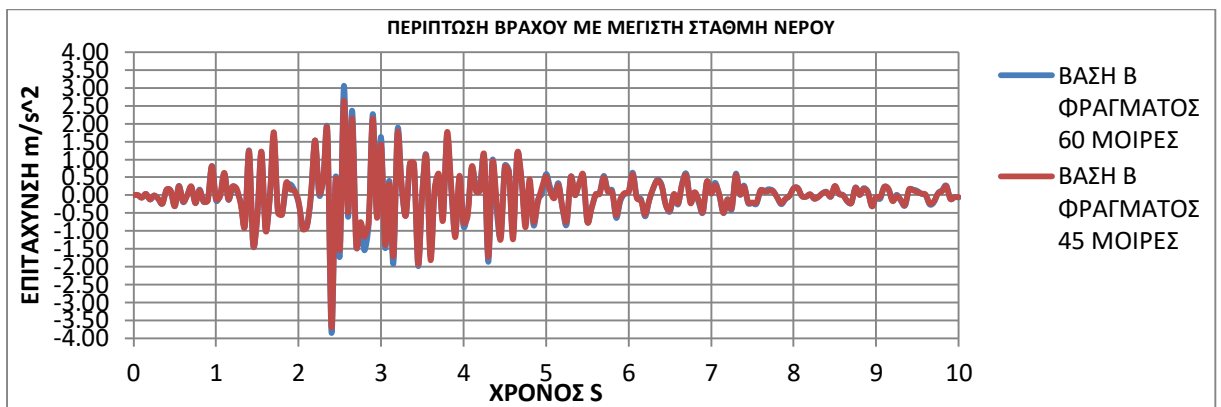
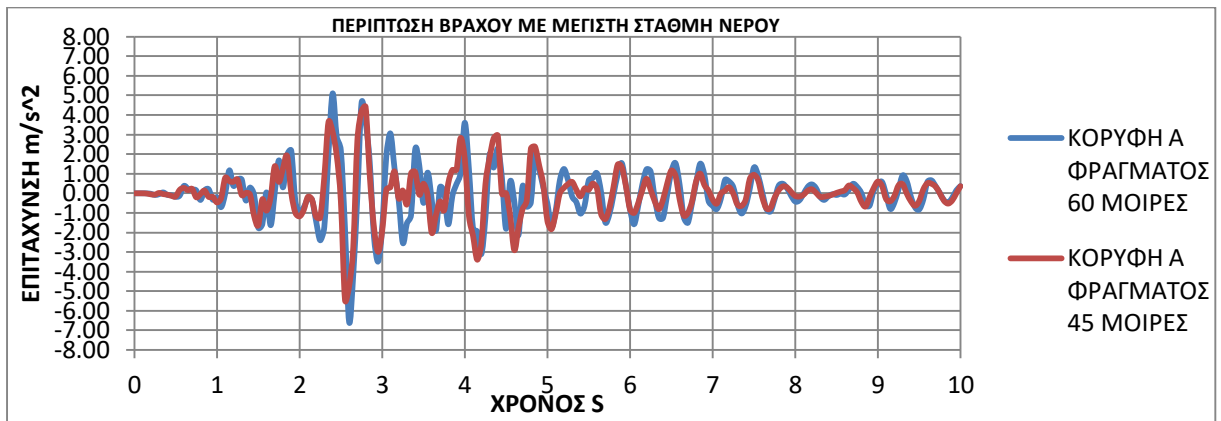


**ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ
ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ
ΔΟΝΗΣΗ 225Α**

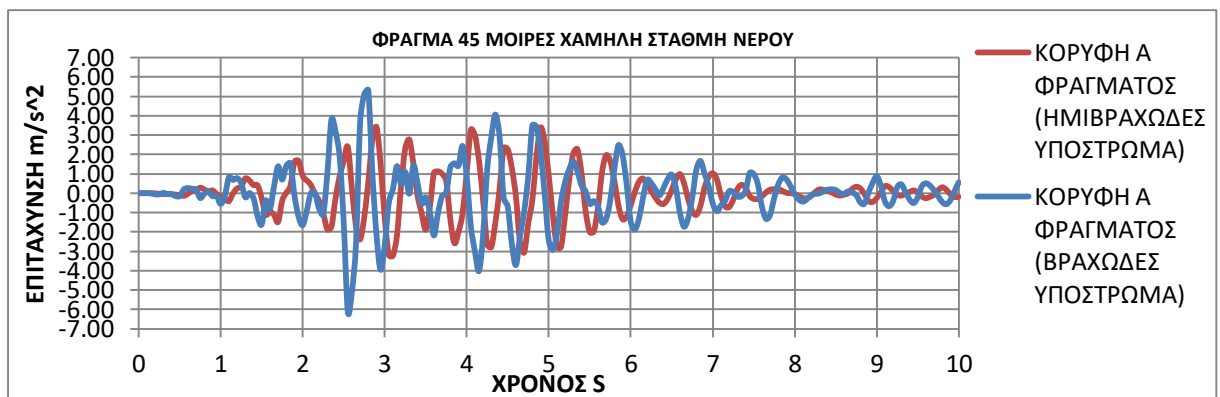
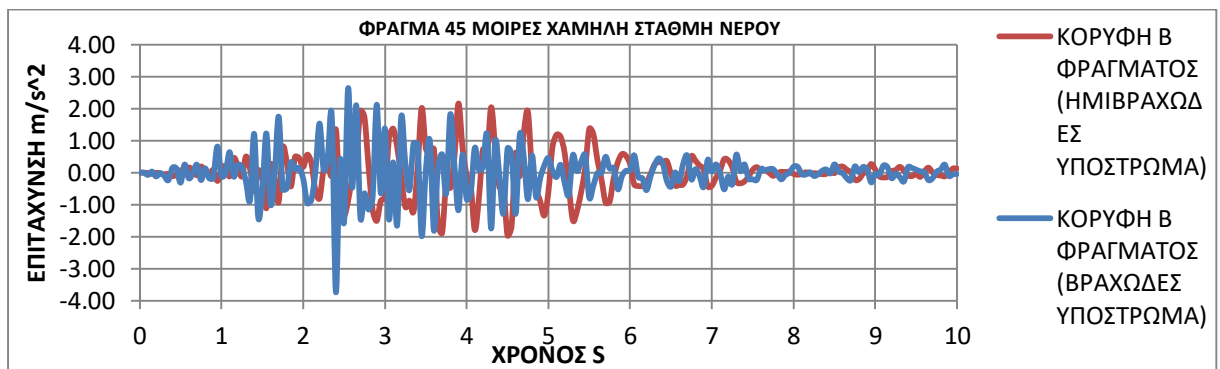
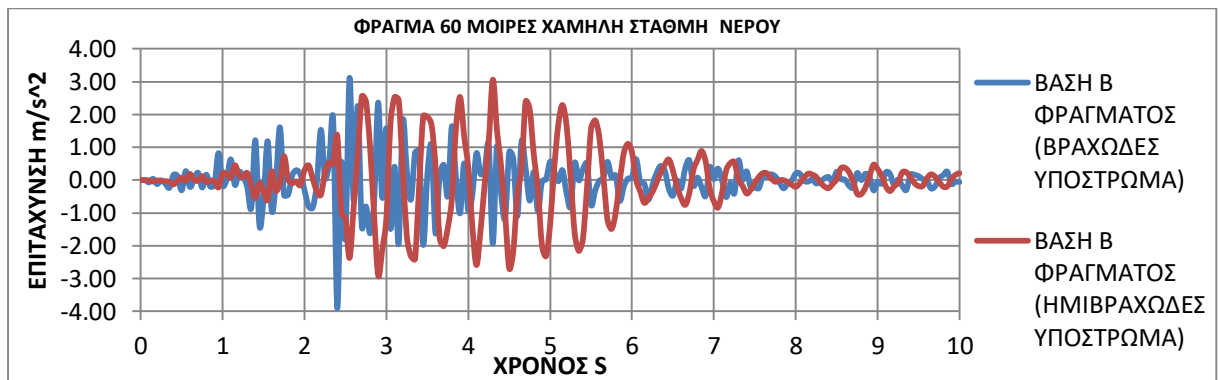
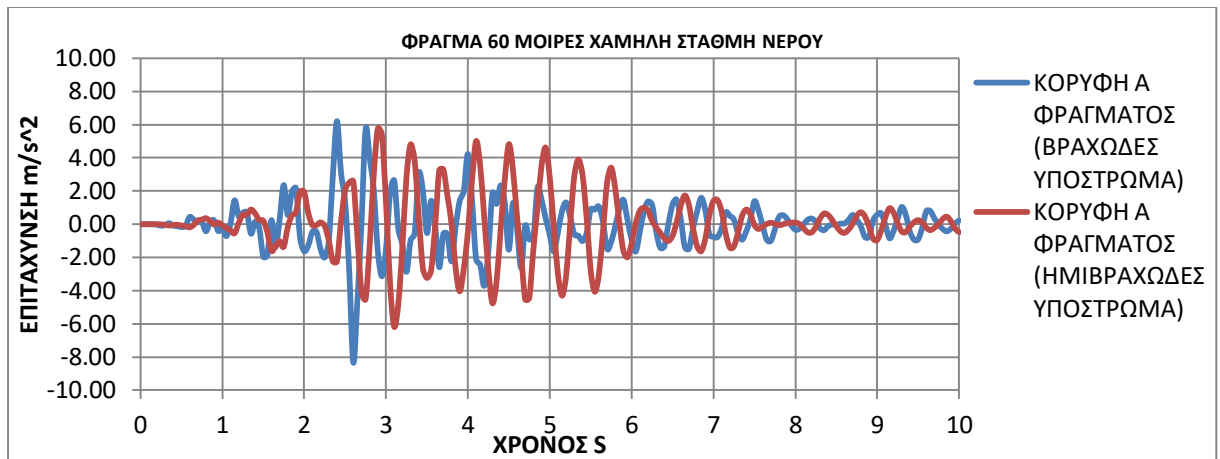
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης για διαφορετική κλίση πρανών του φράγματος (κλίσεις 60 και 45 μοιρών)

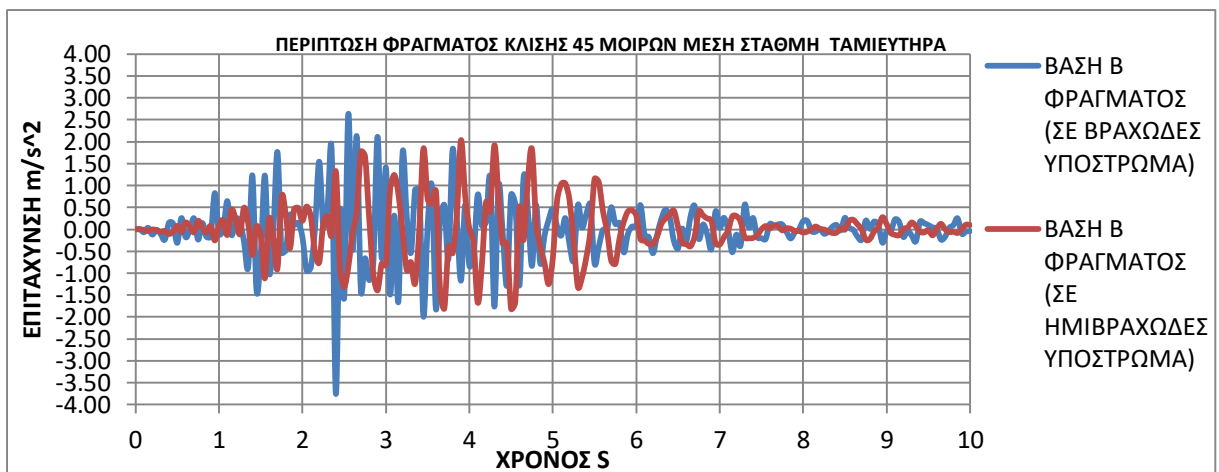
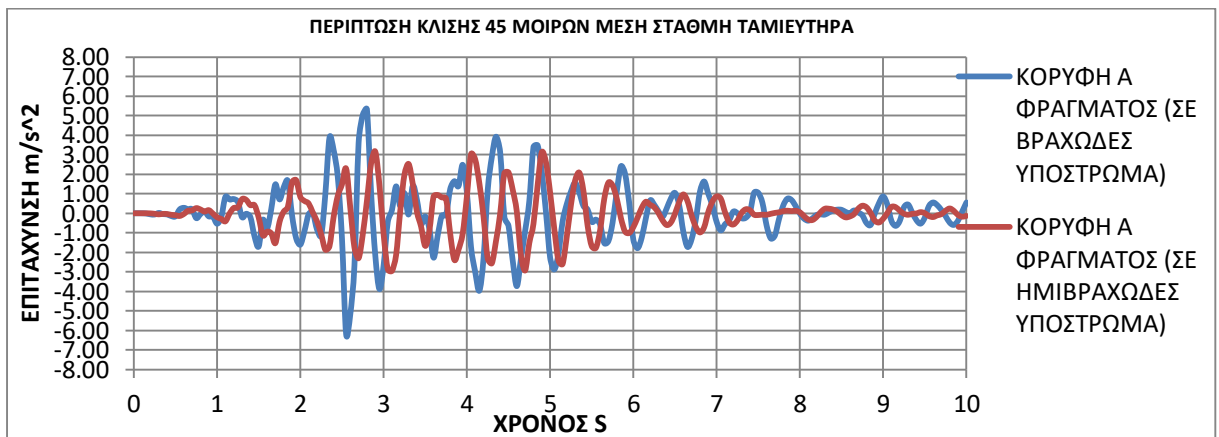
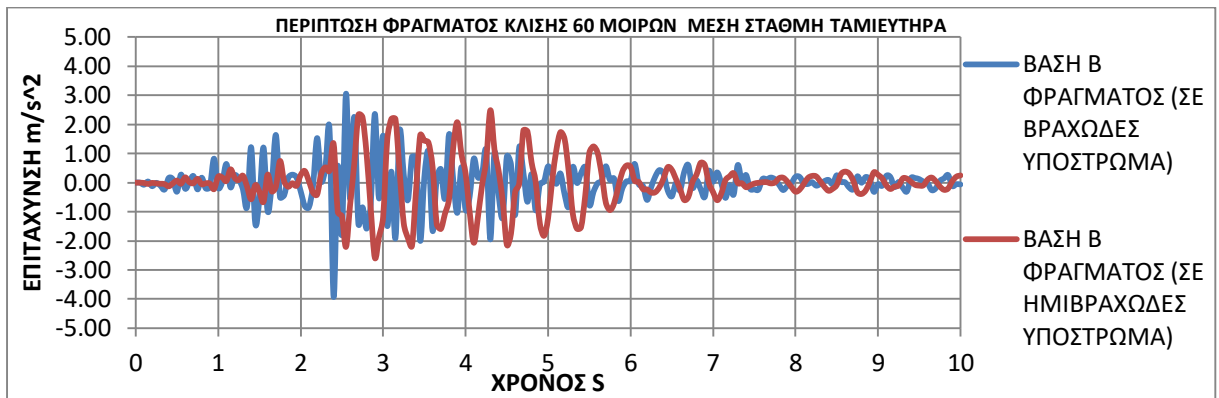
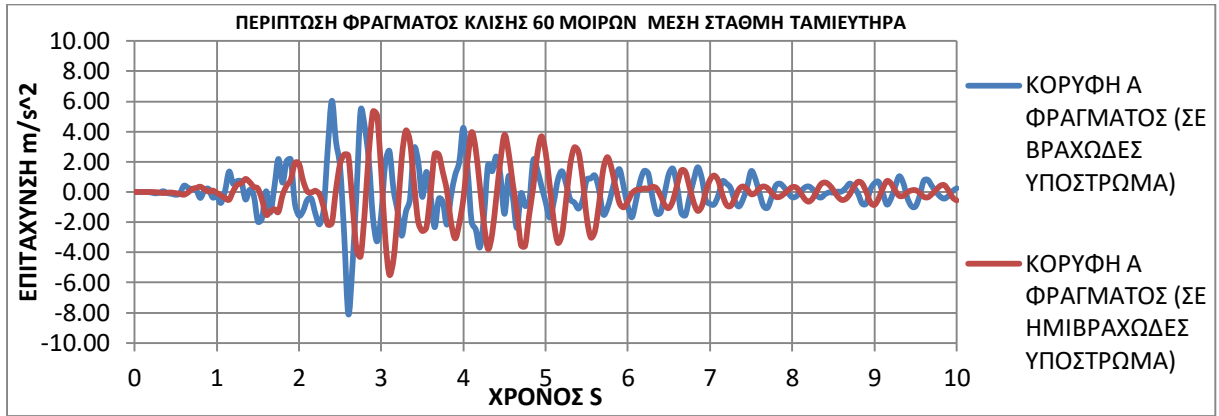


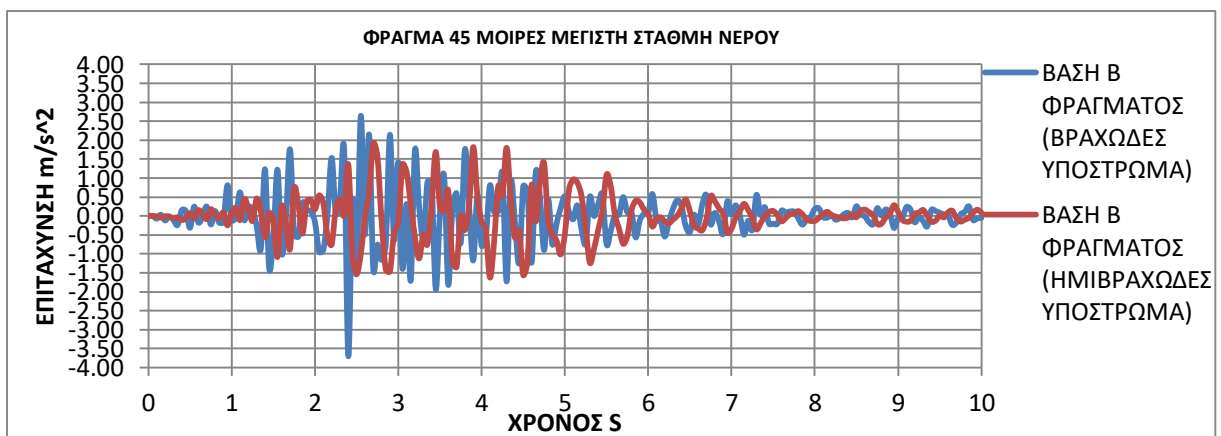
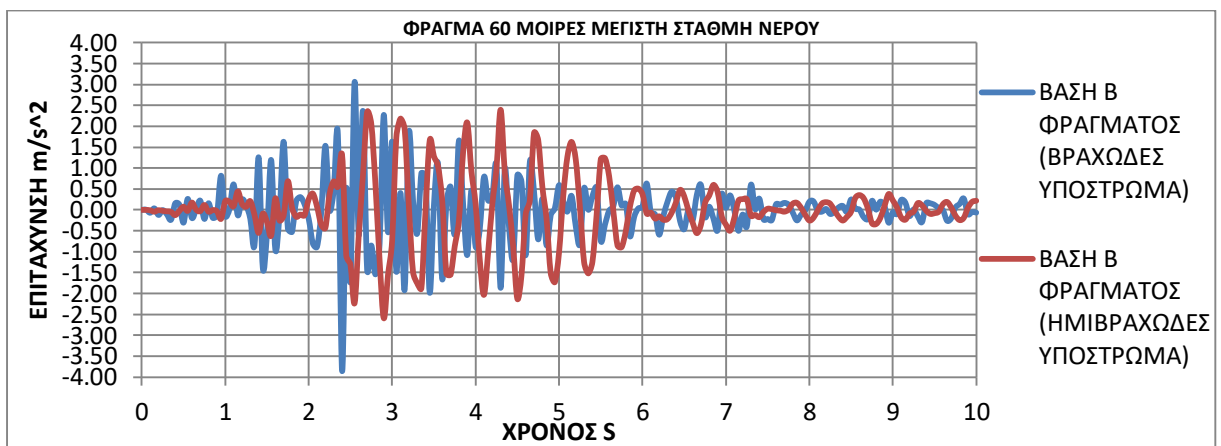
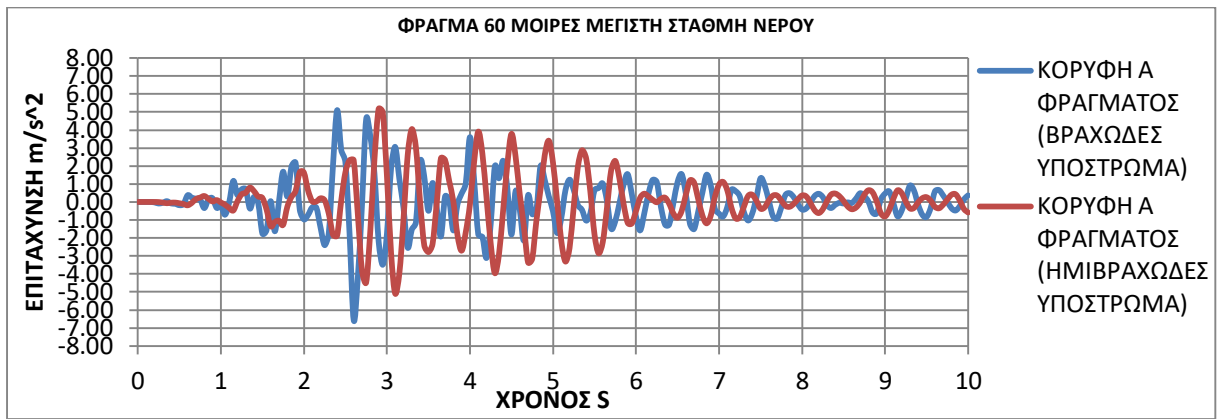




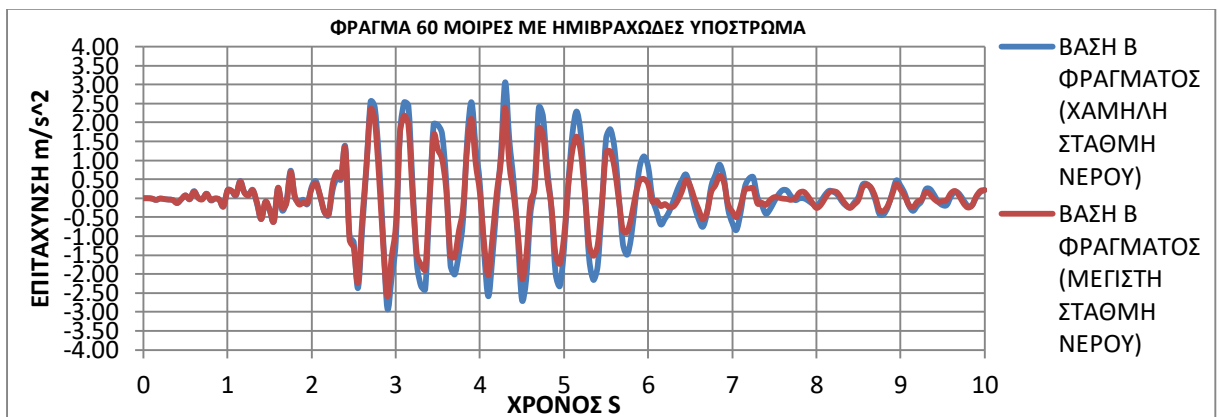
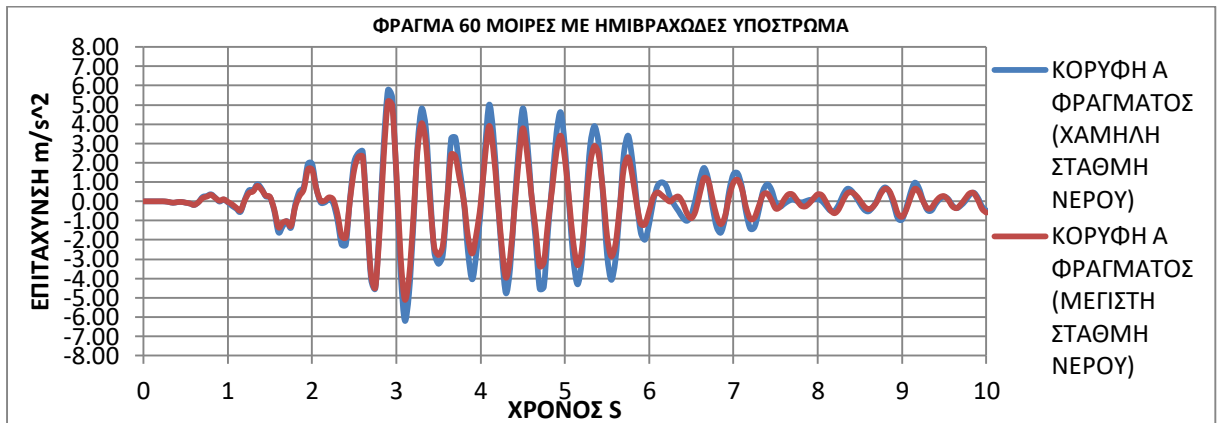
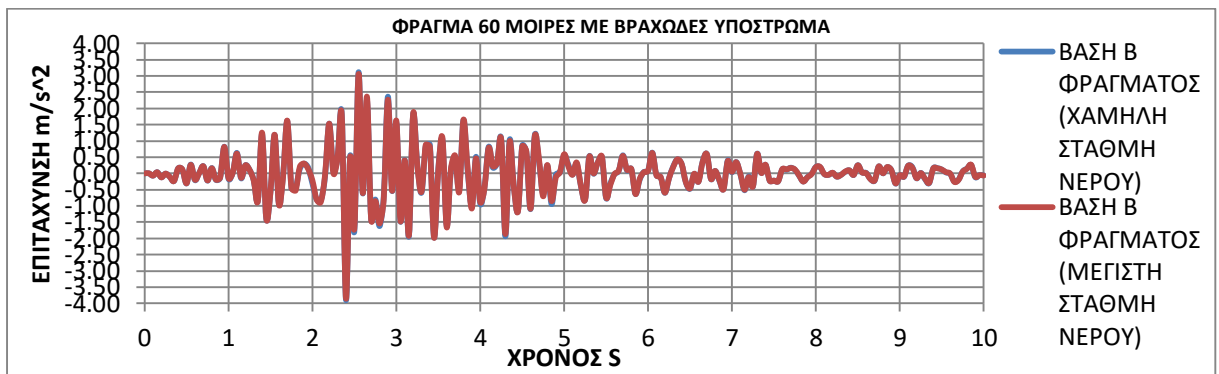
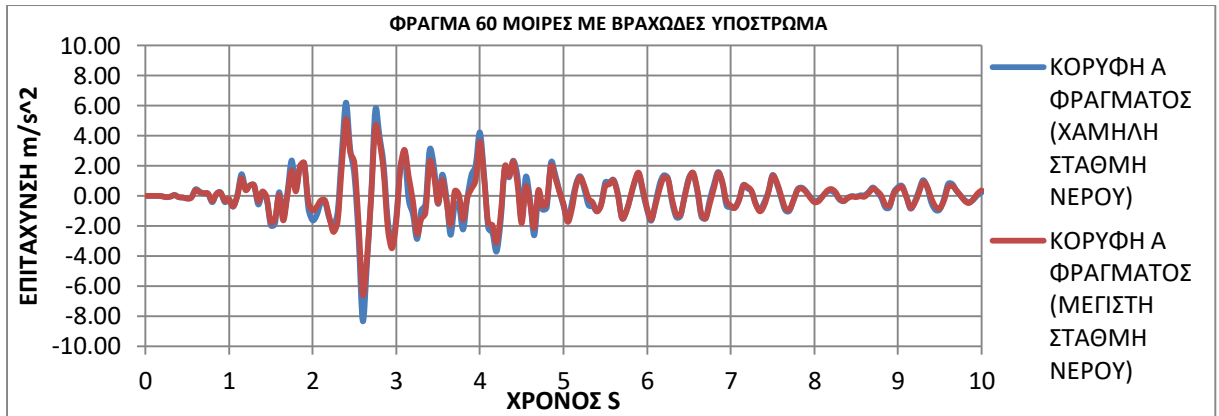
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης σχετικά με το υλικό από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα (περίπτωση για βραχώδες και ημιβραχώδες υλικό)

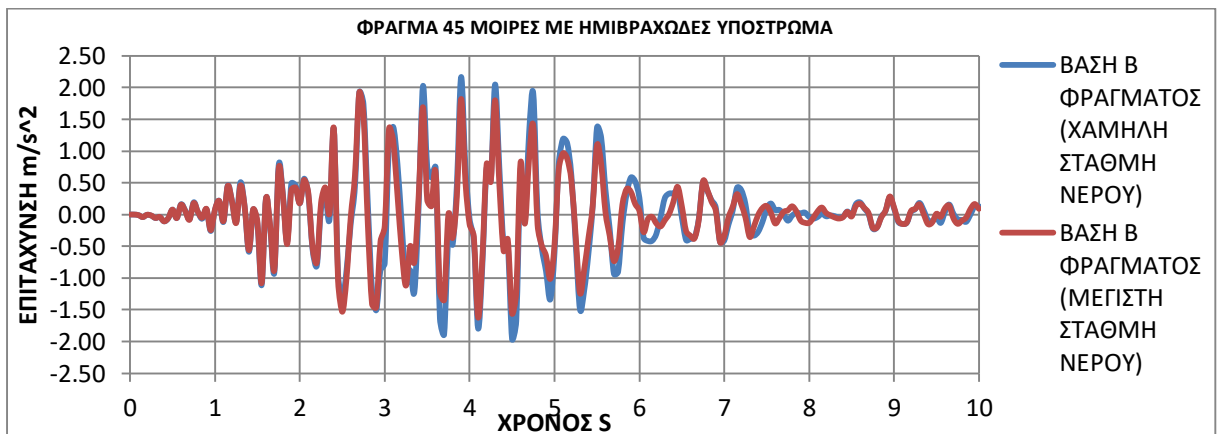
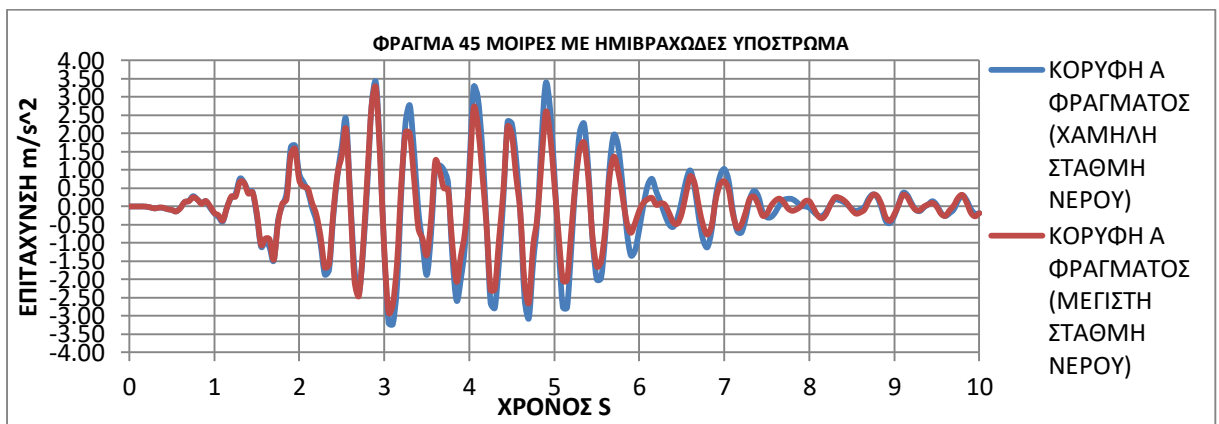
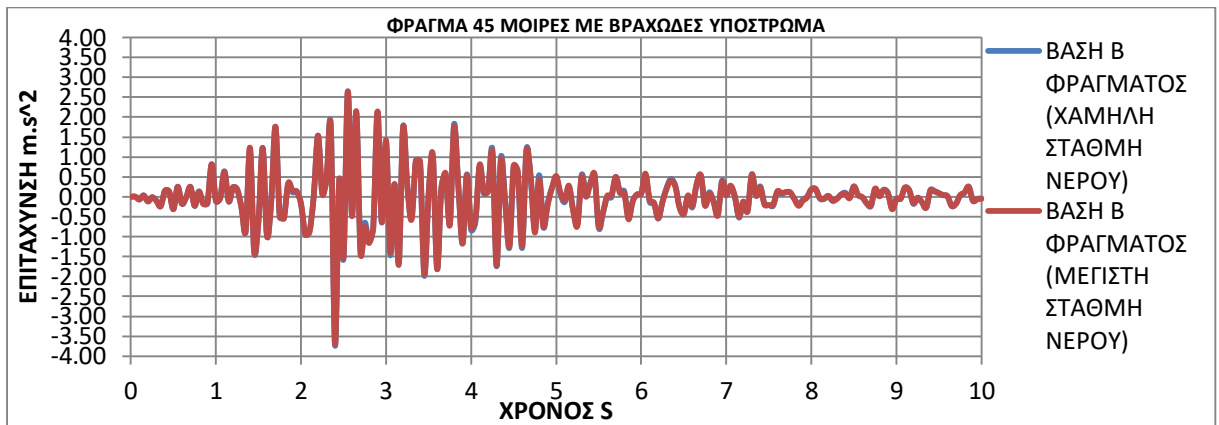
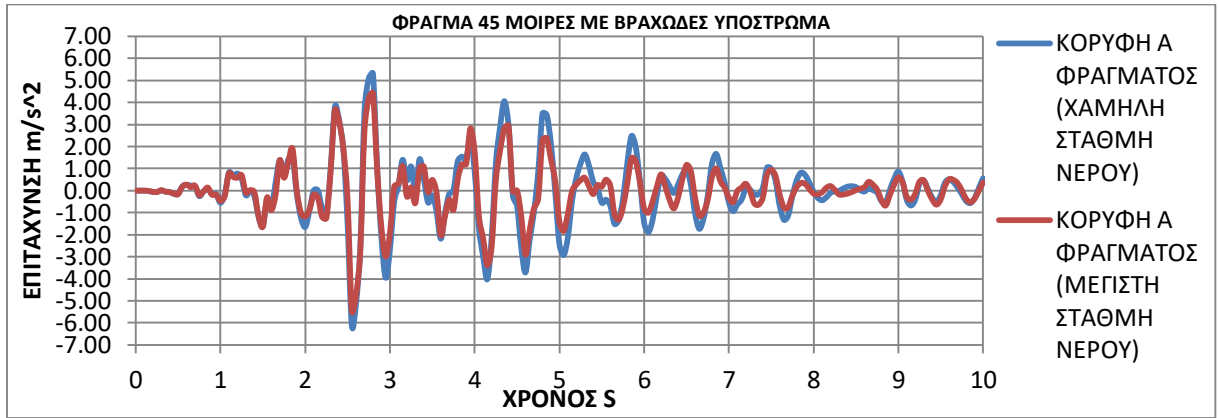


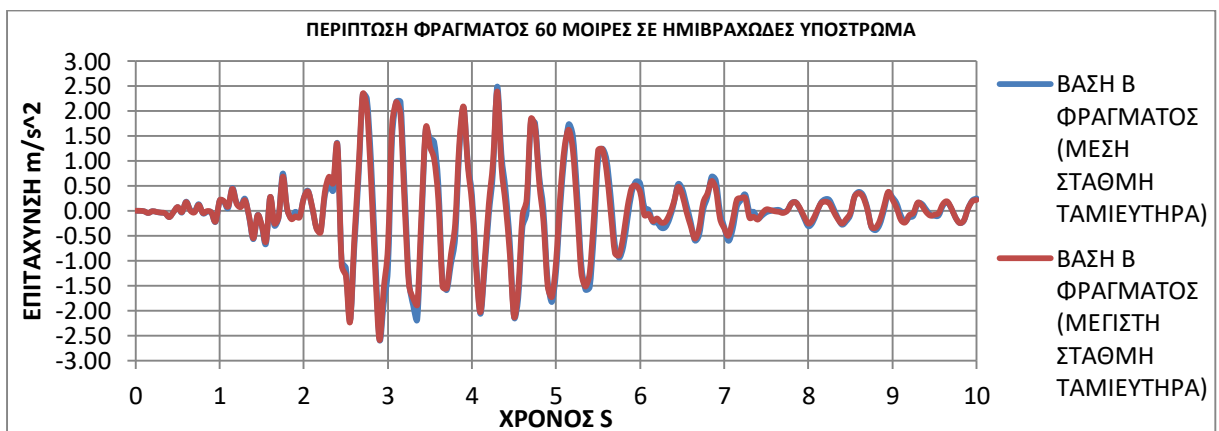
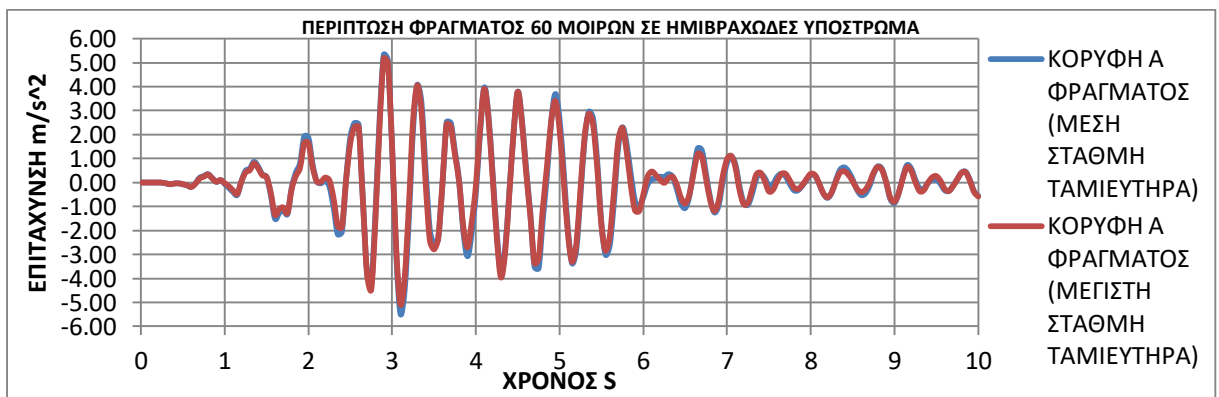
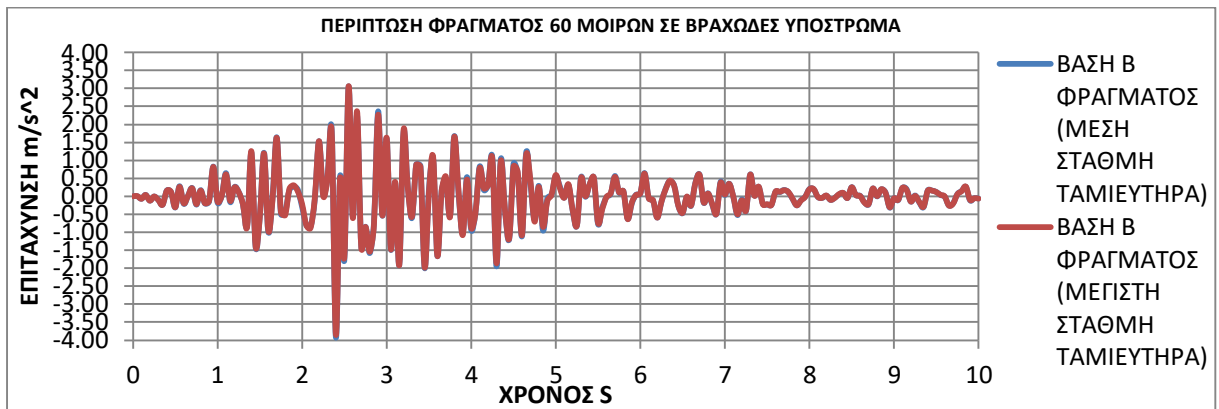
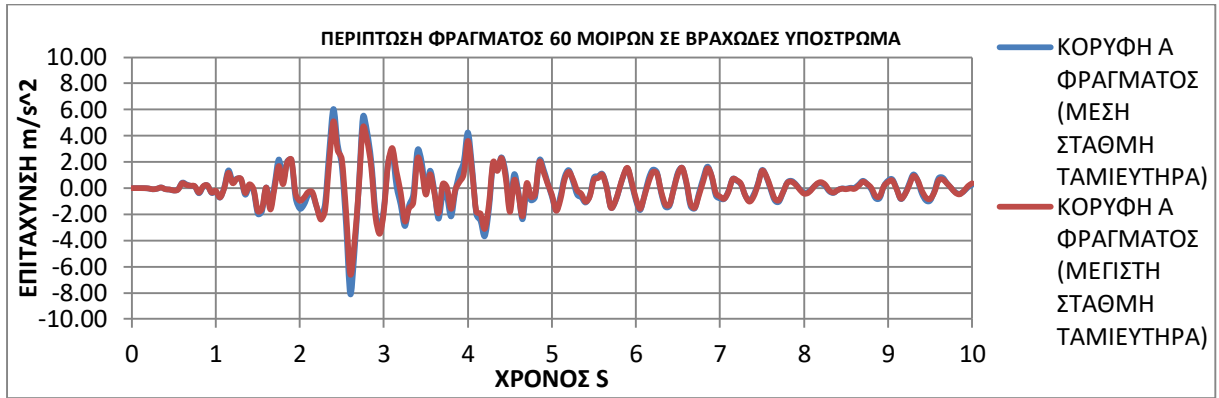


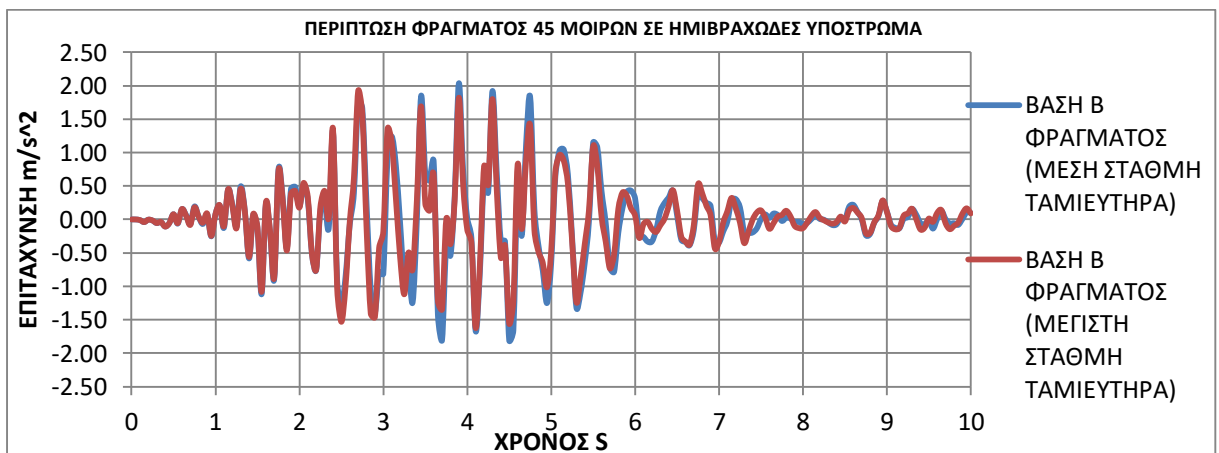
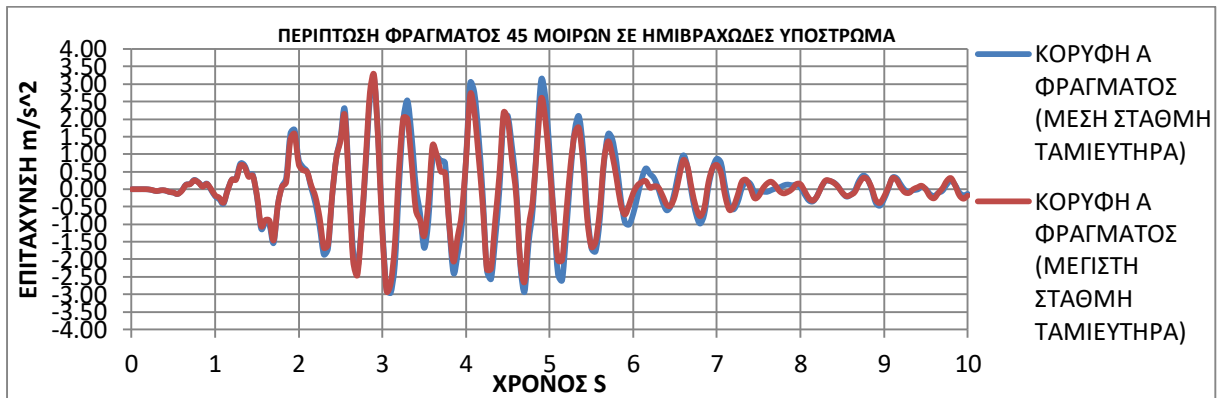
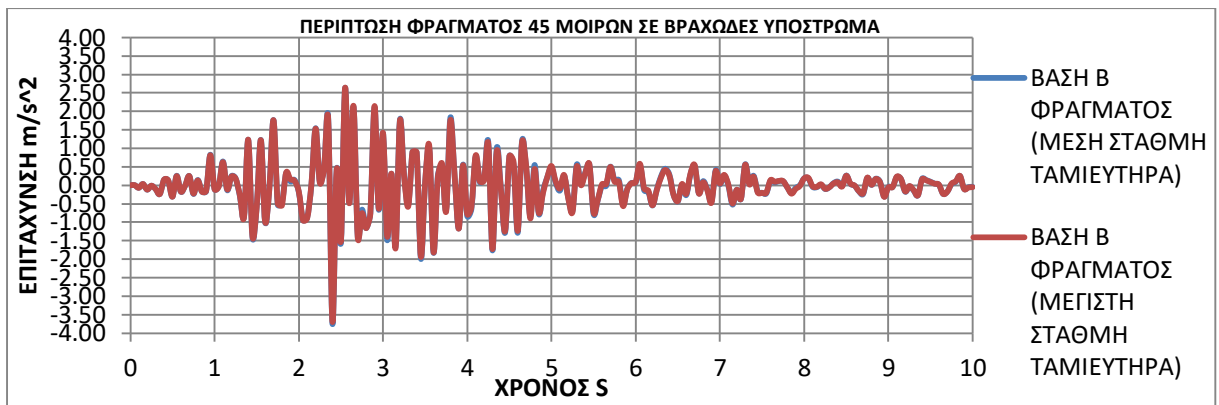
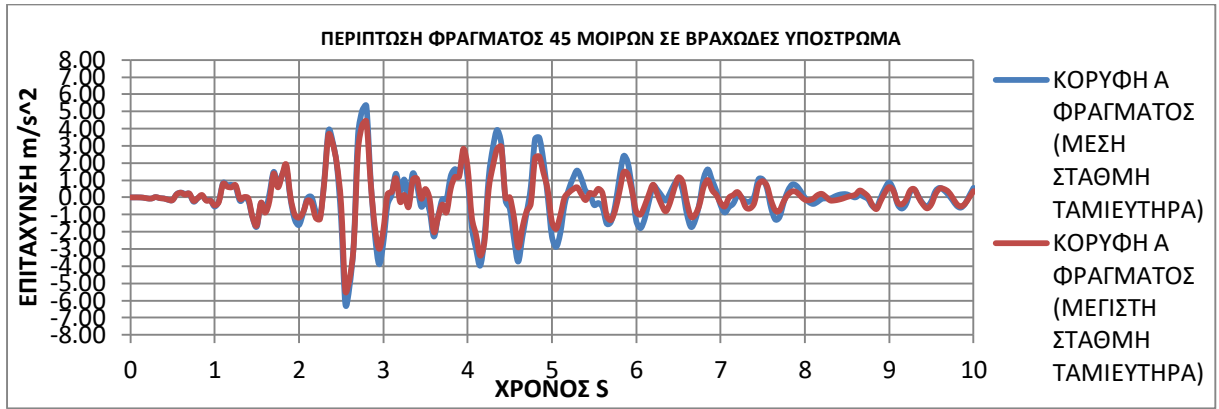


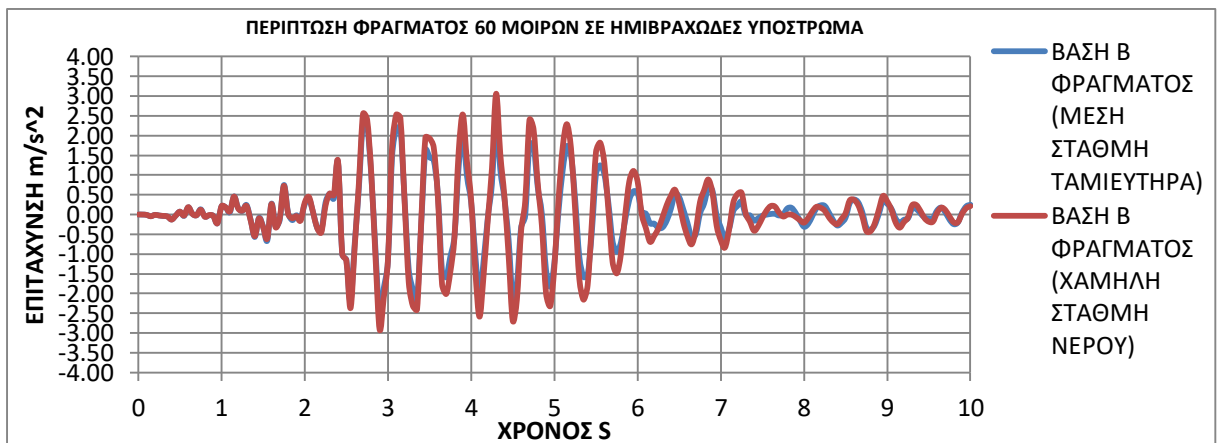
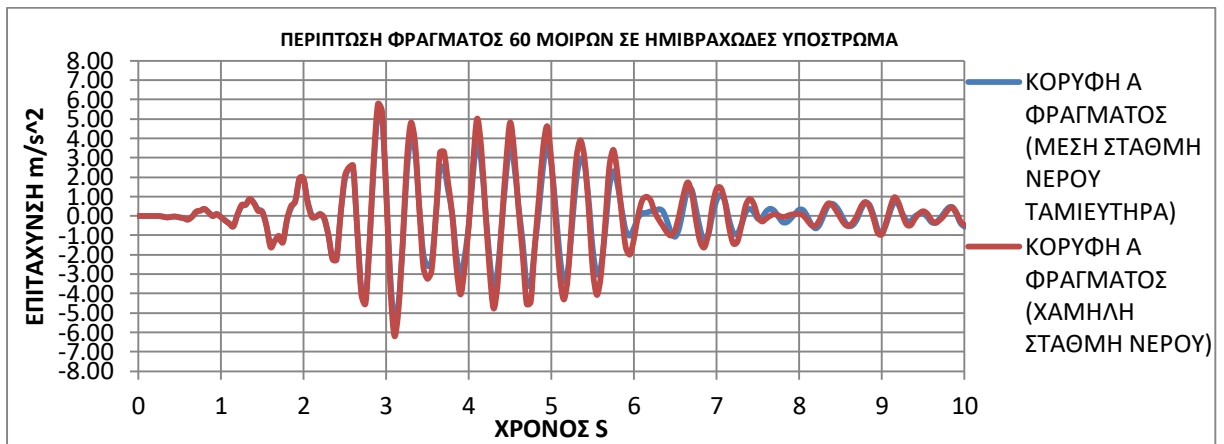
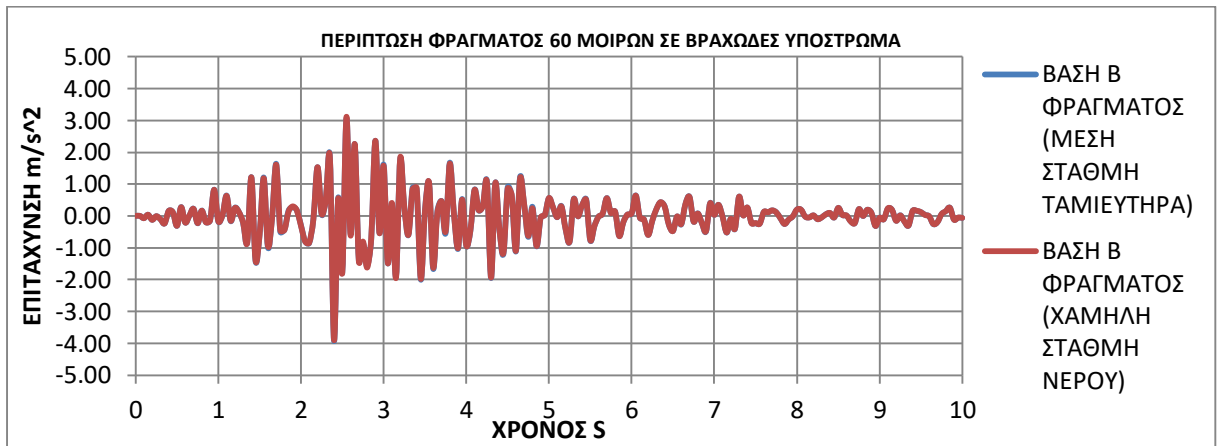
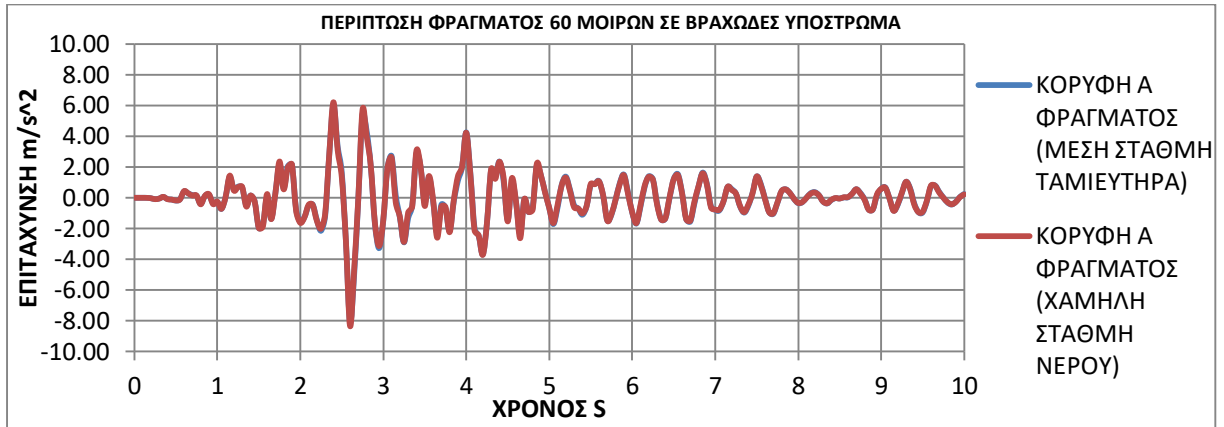
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης για διαφορετικές στάθμες νερού στον ταμειυτήρα (περιπτώσεις χαμηλής, μέσης και μέγιστης στάθμης)

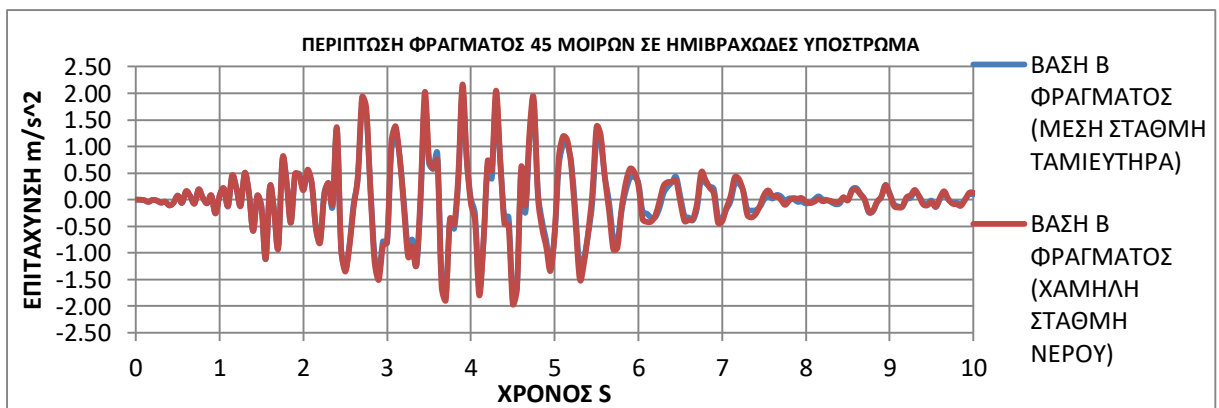
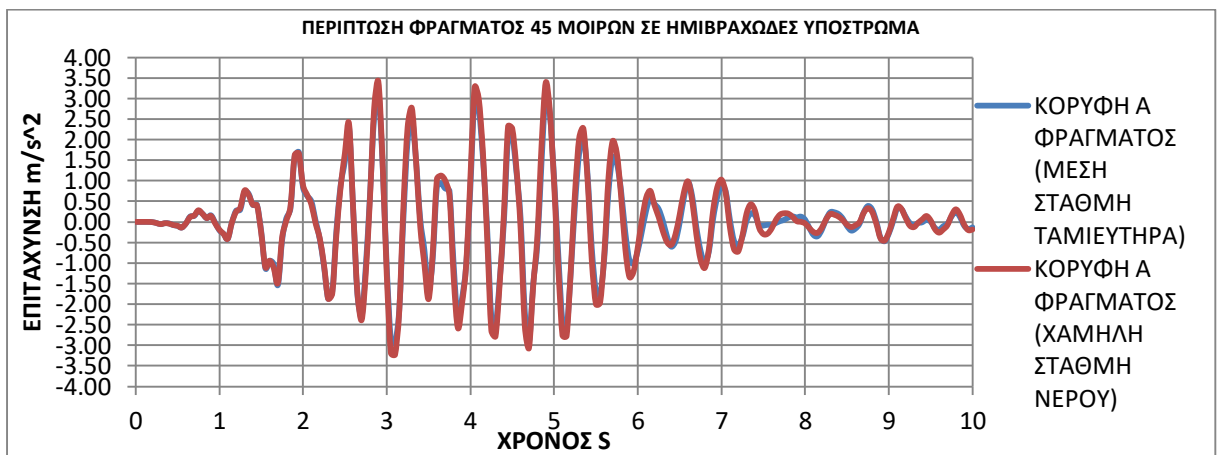
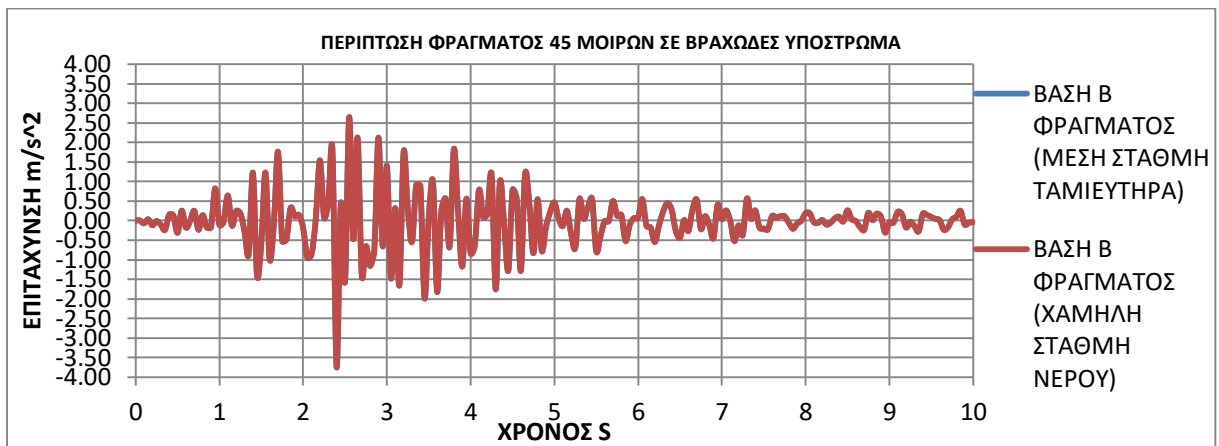




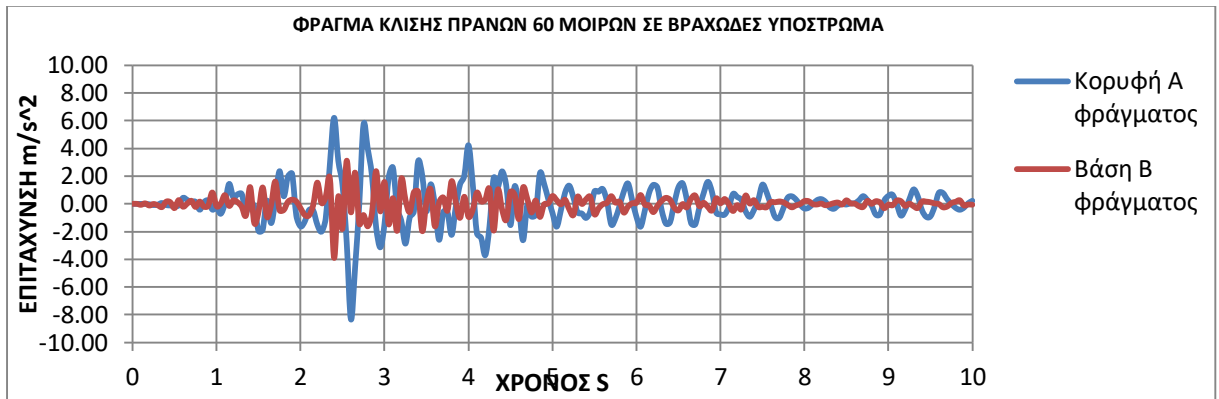




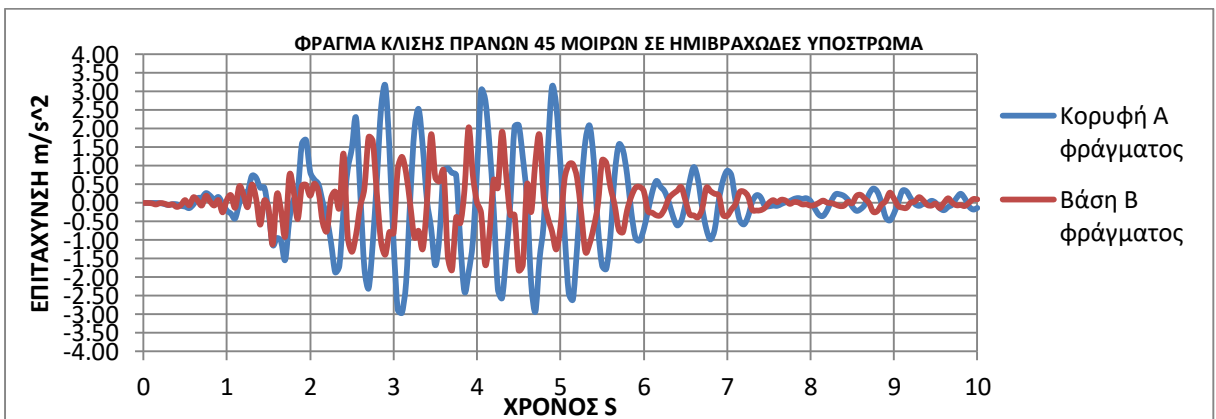
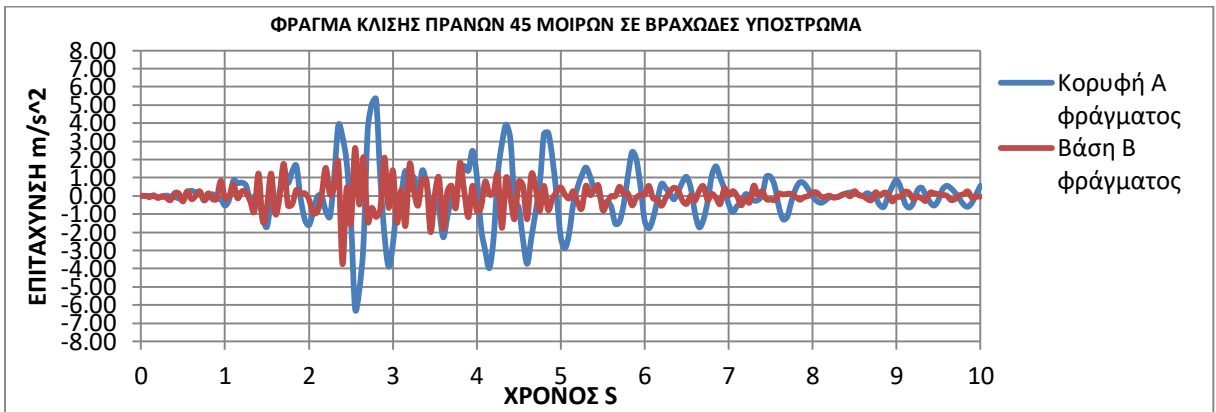
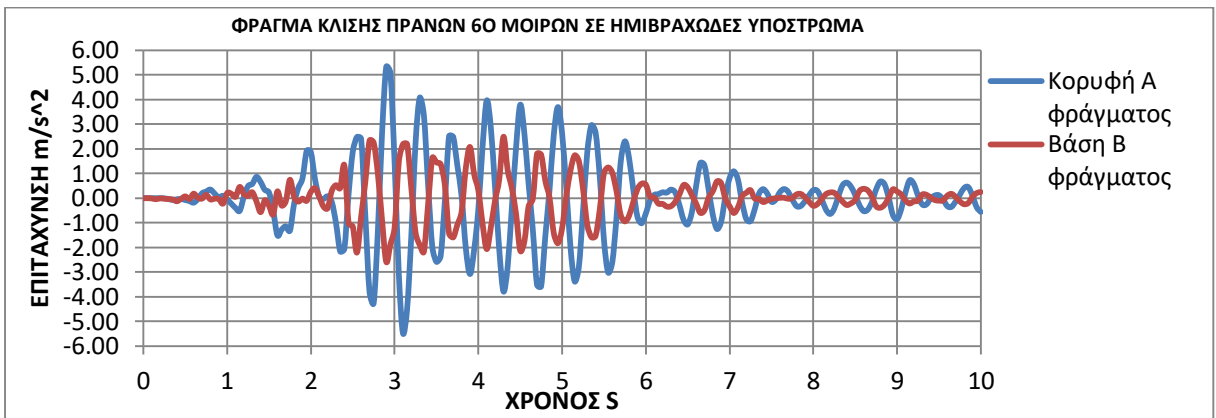
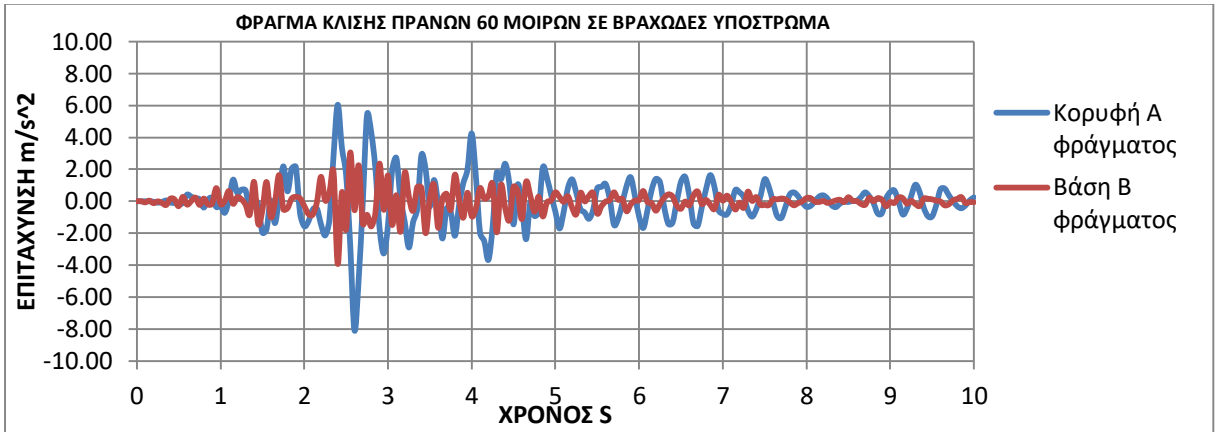




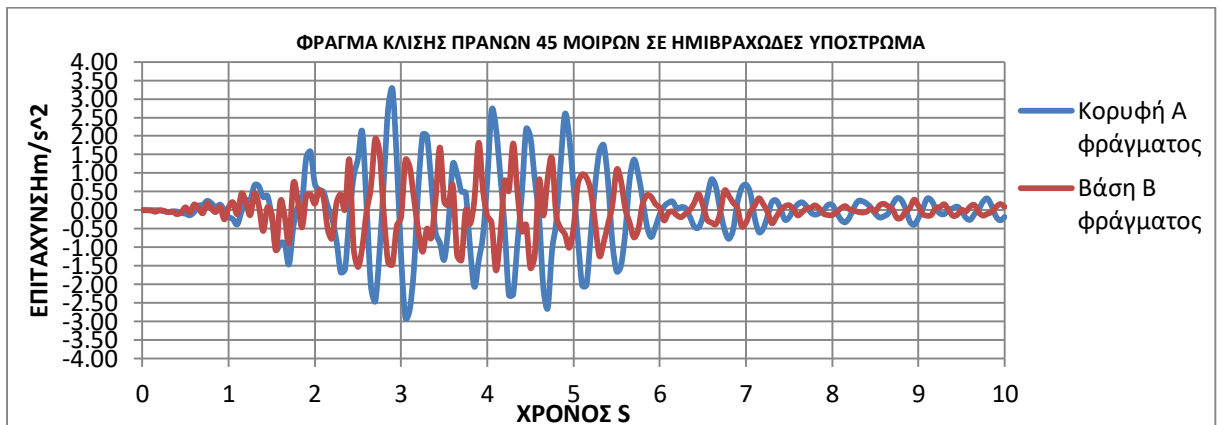
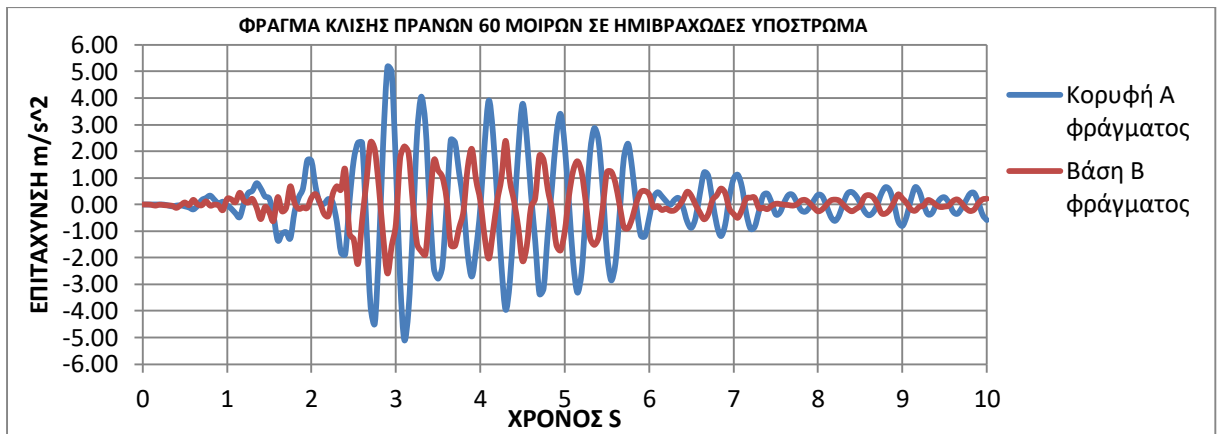
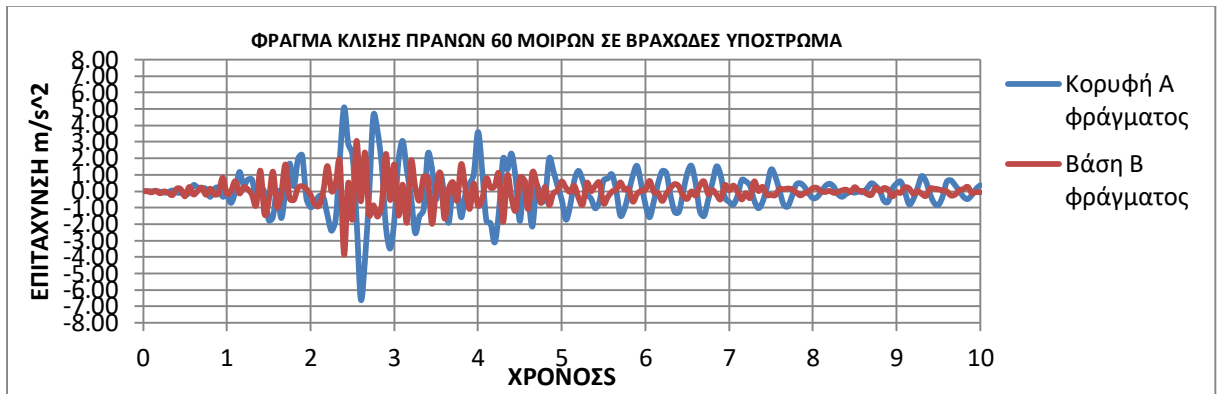
ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ 225Α ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ



ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ 225Α ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

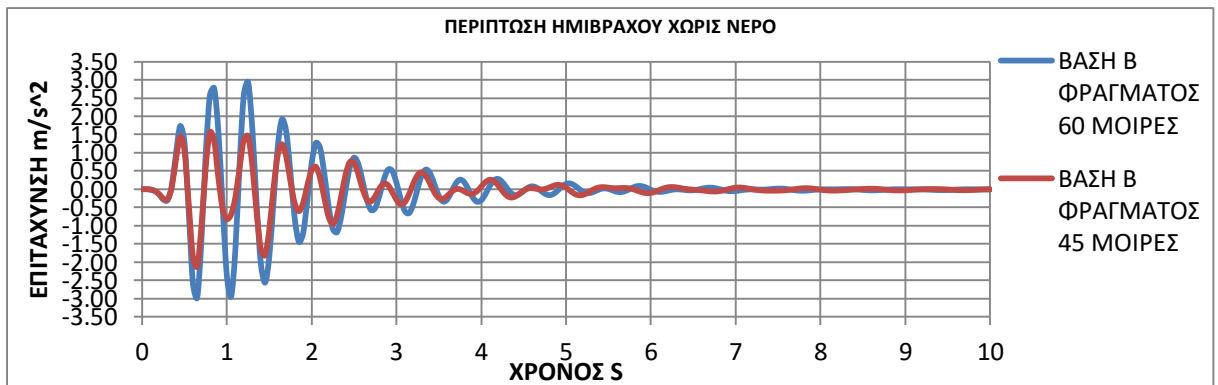
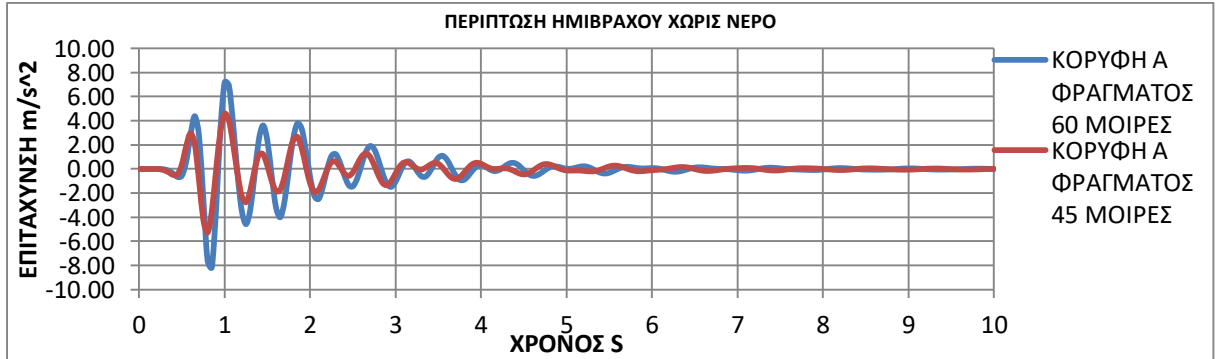
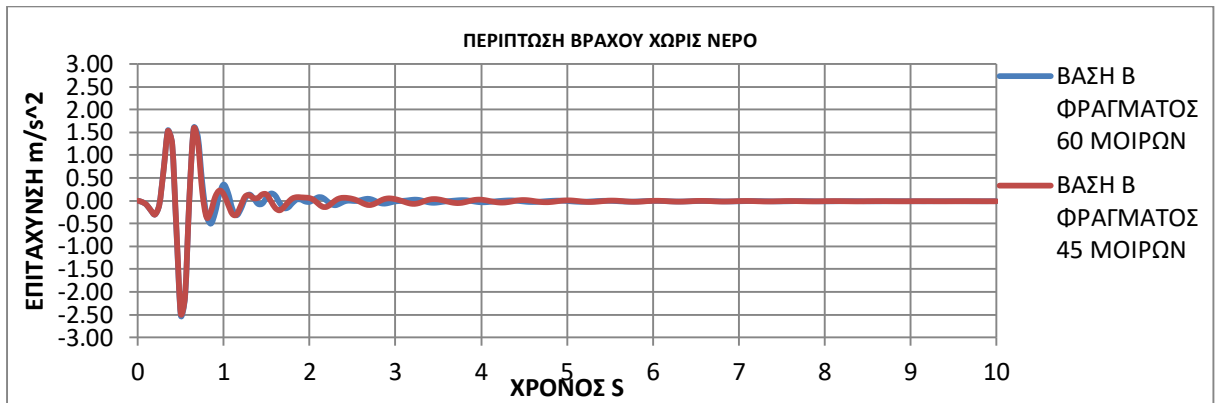
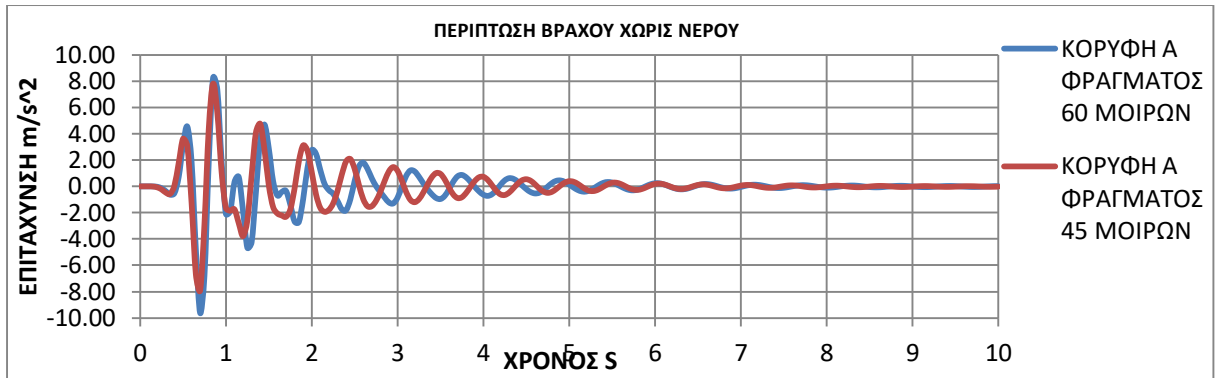


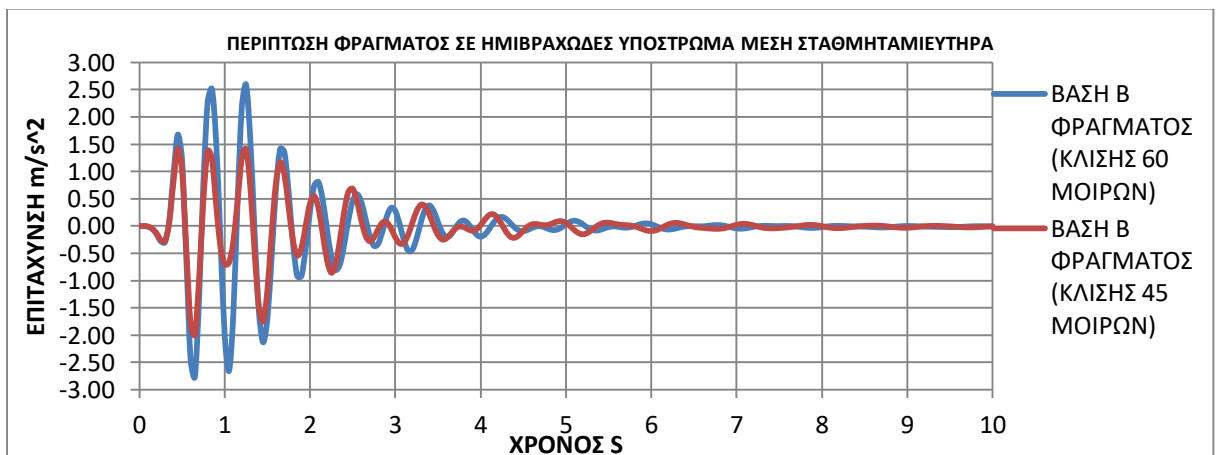
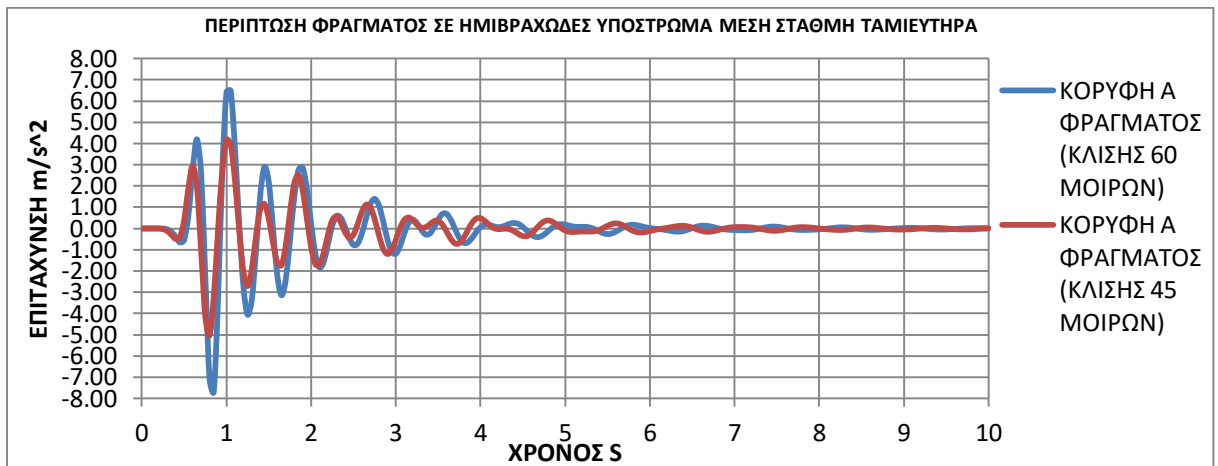
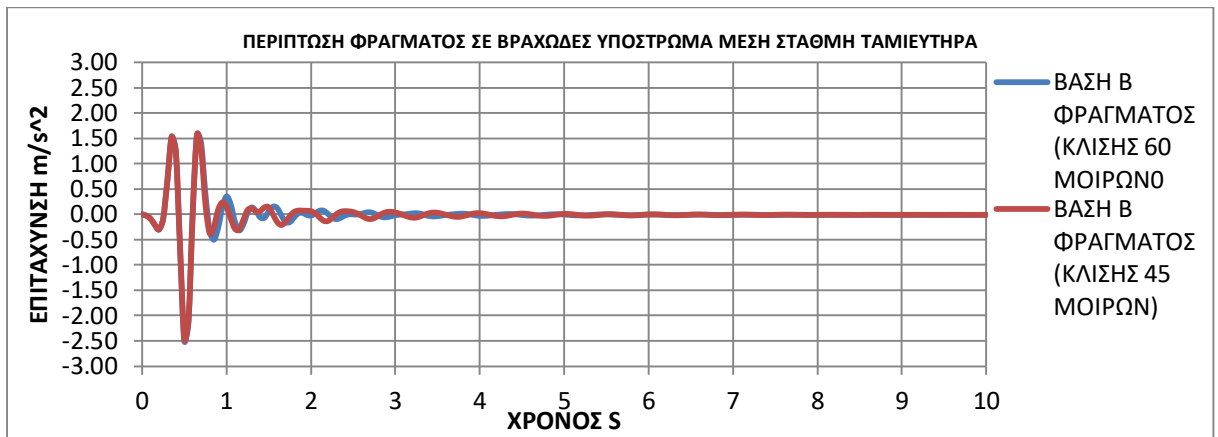
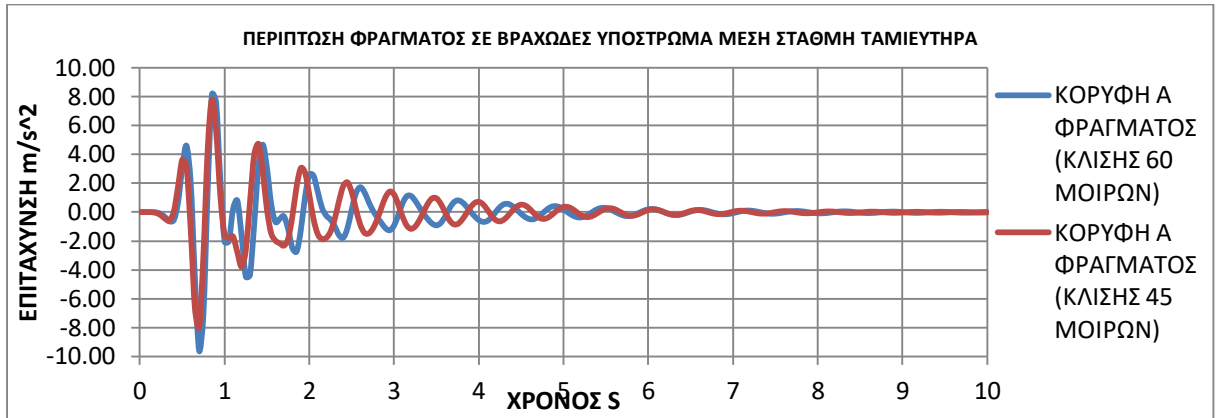
ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ 225Α ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

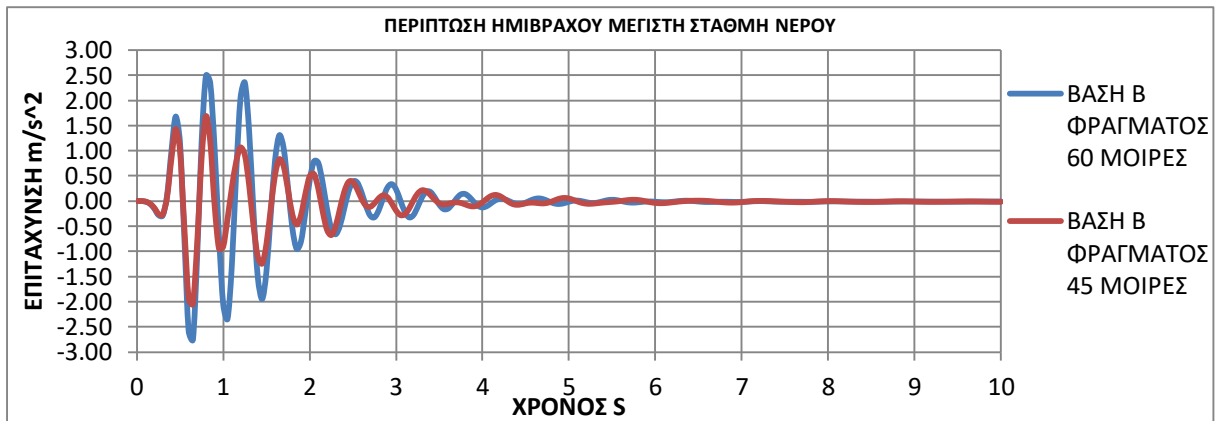
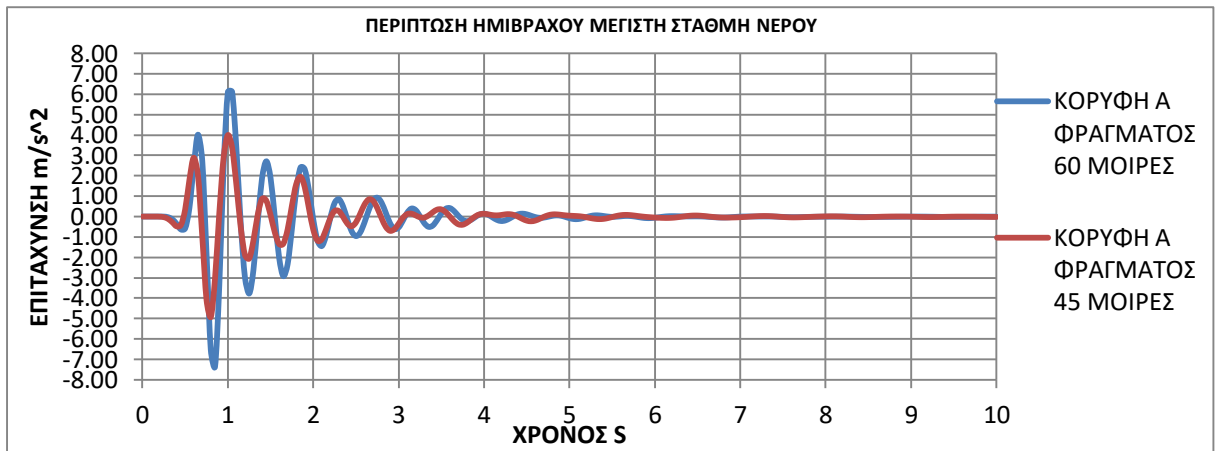
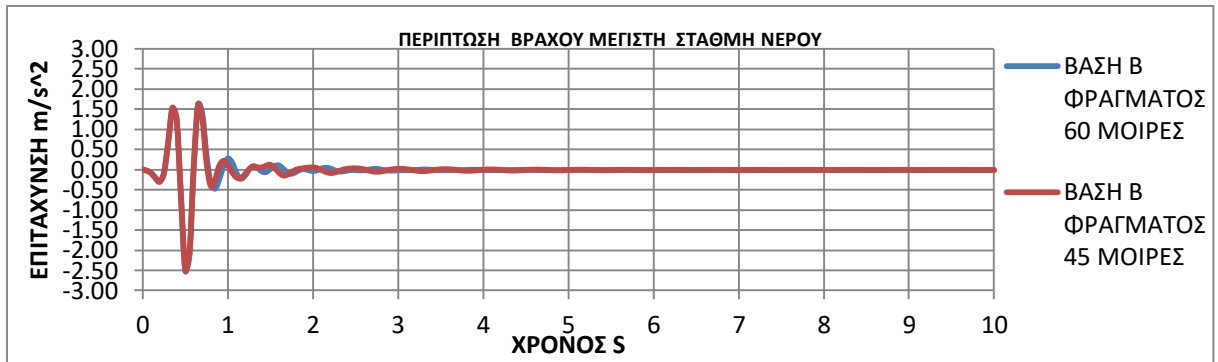
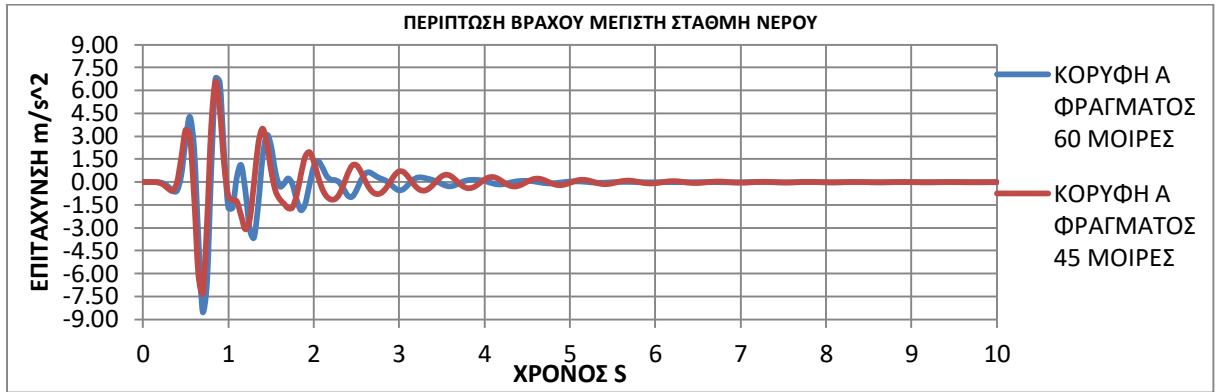


**ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ
ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ
ΔΟΝΗΣΗ RICKER-2HZ**

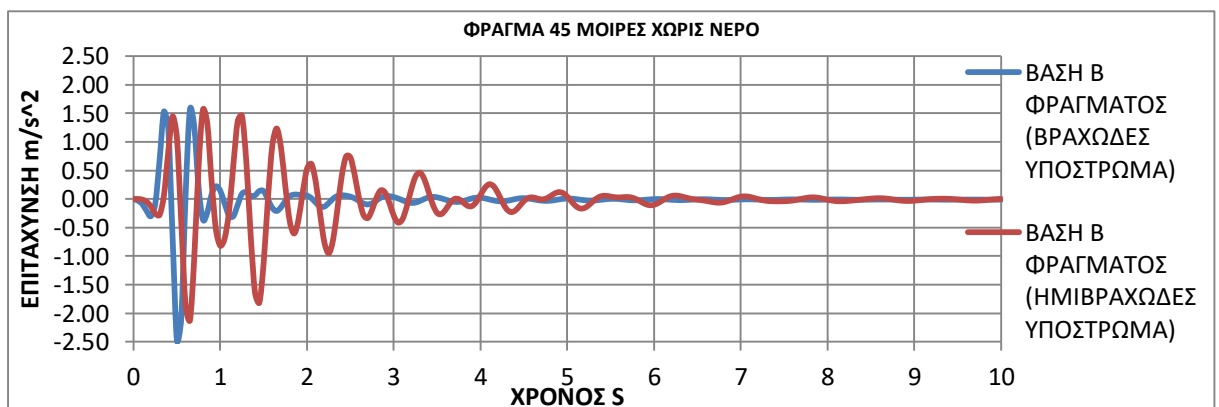
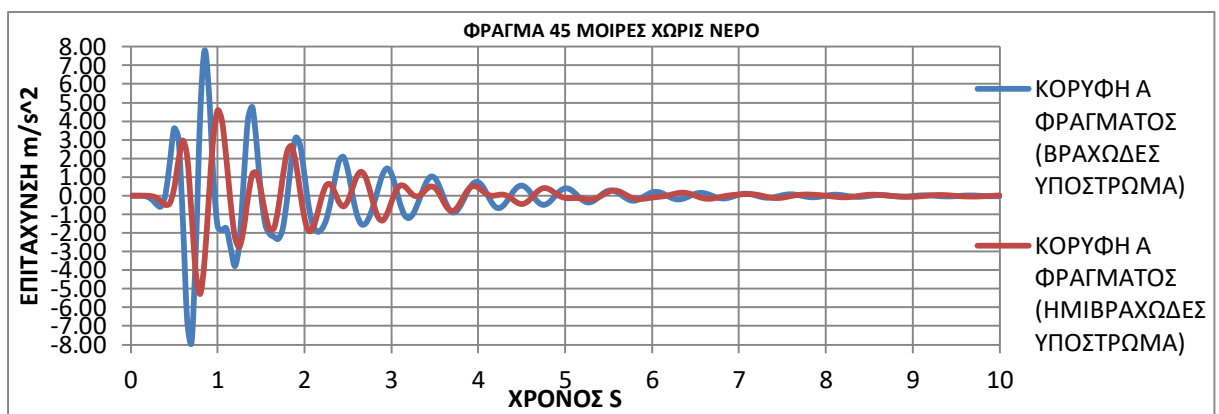
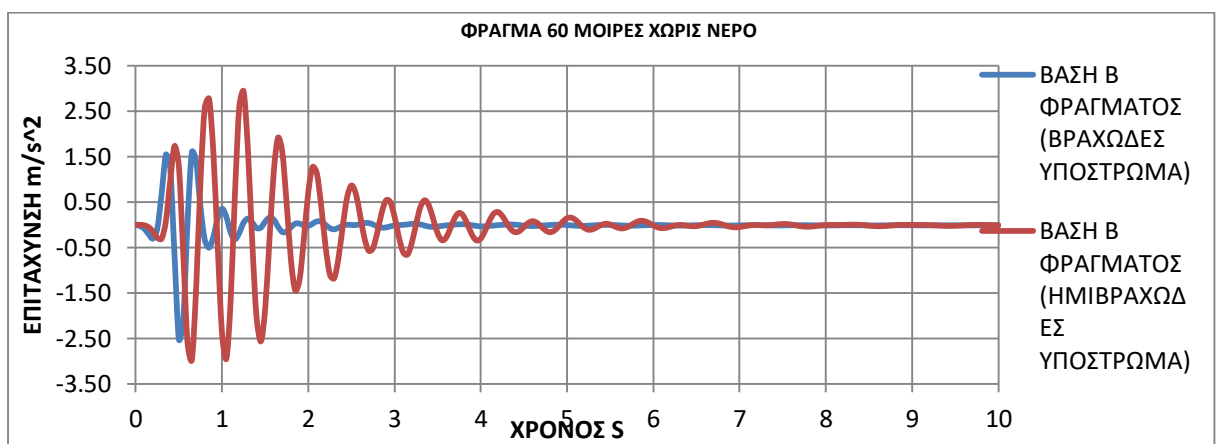
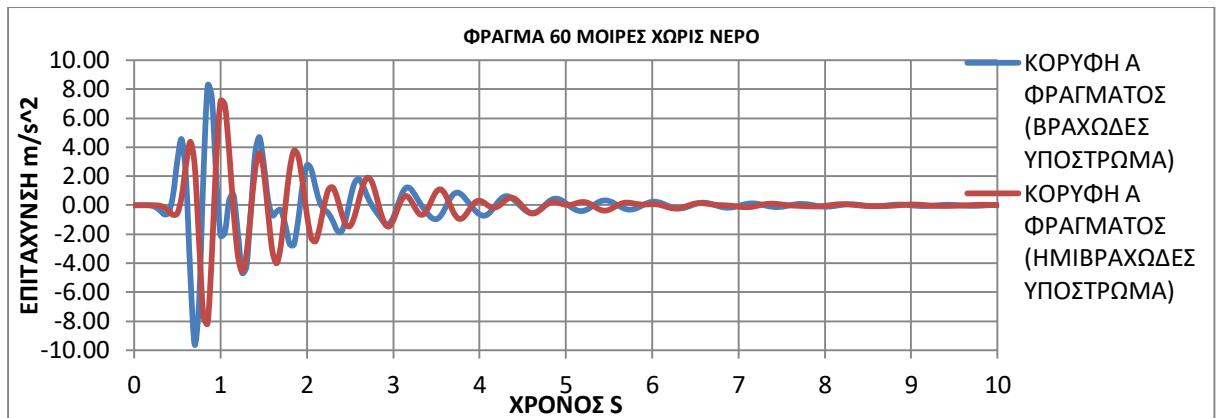
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης για διαφορετική κλίση πρανών του φράγματος (κλίσεις 60 και 45 μοιρών)

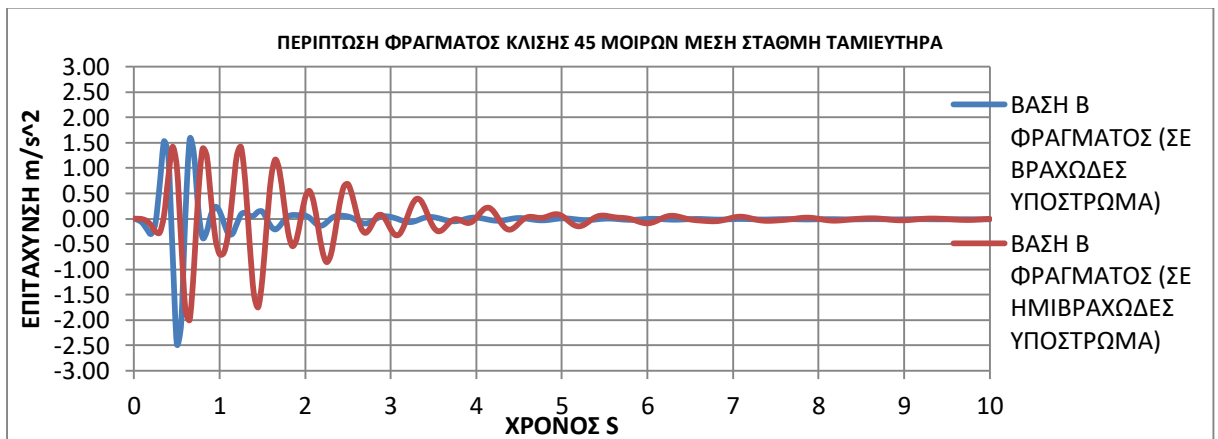
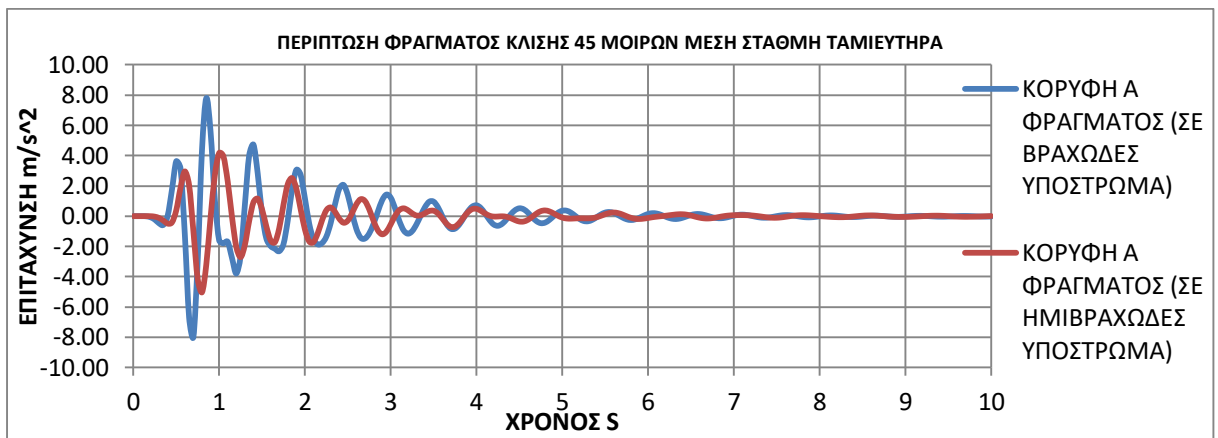
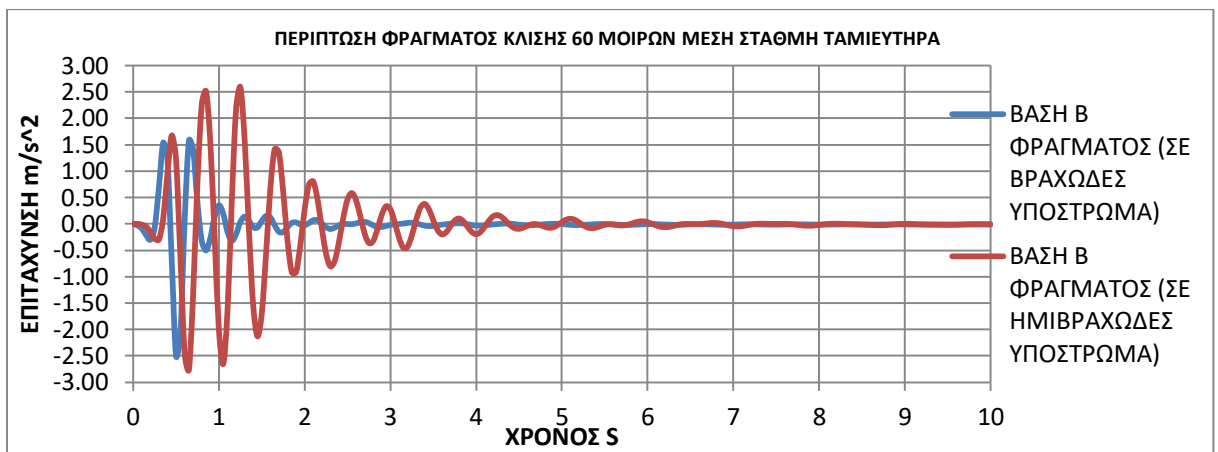
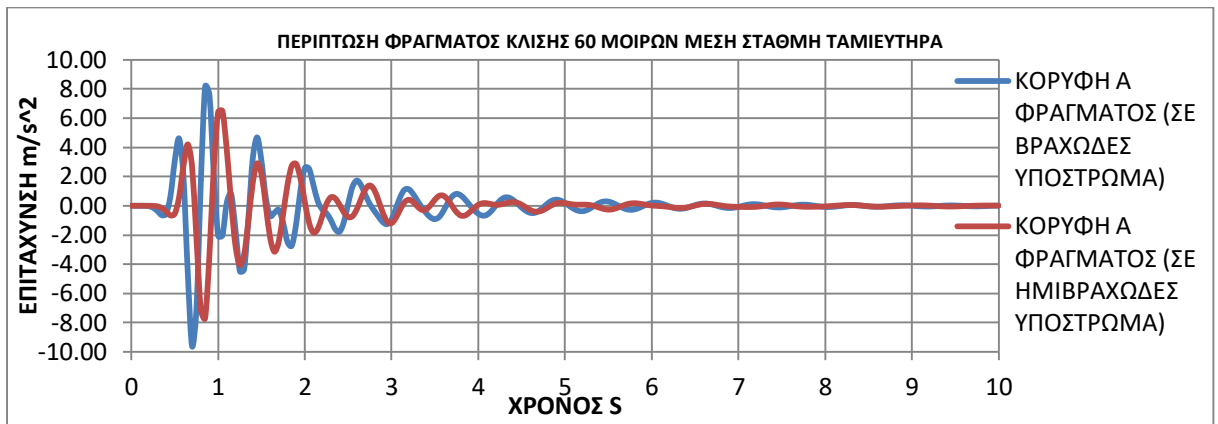


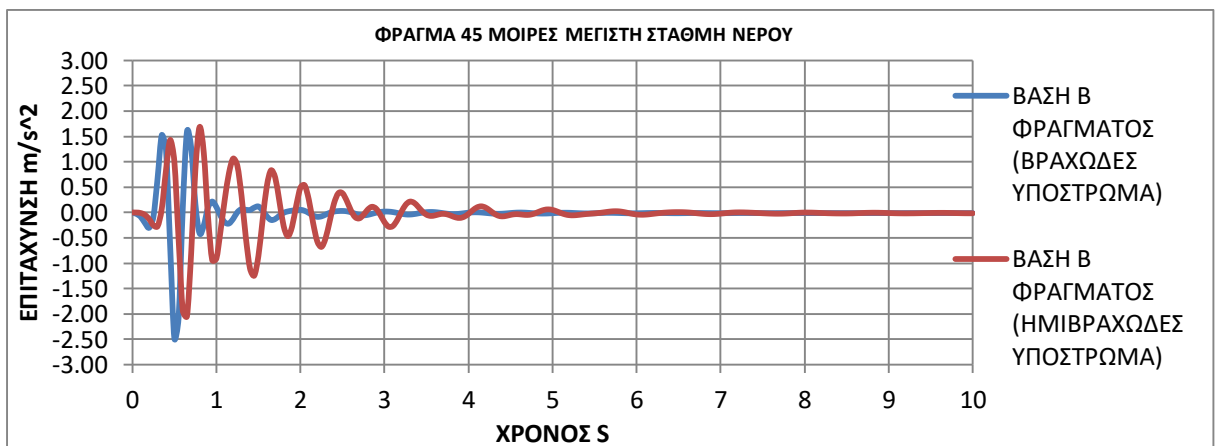
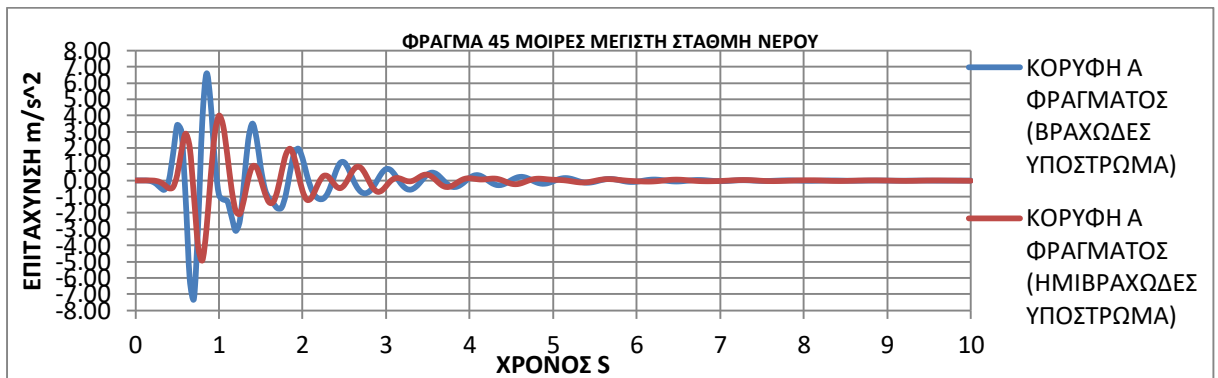
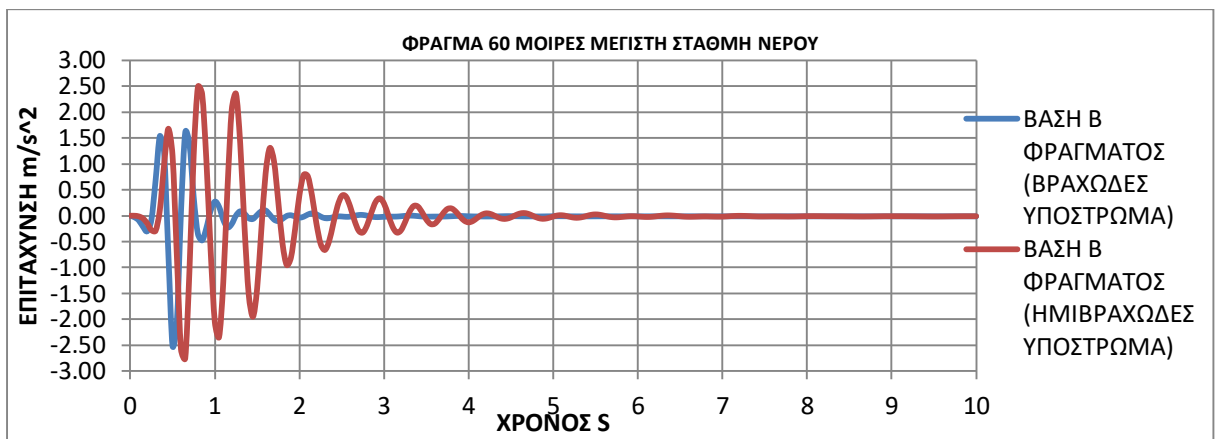
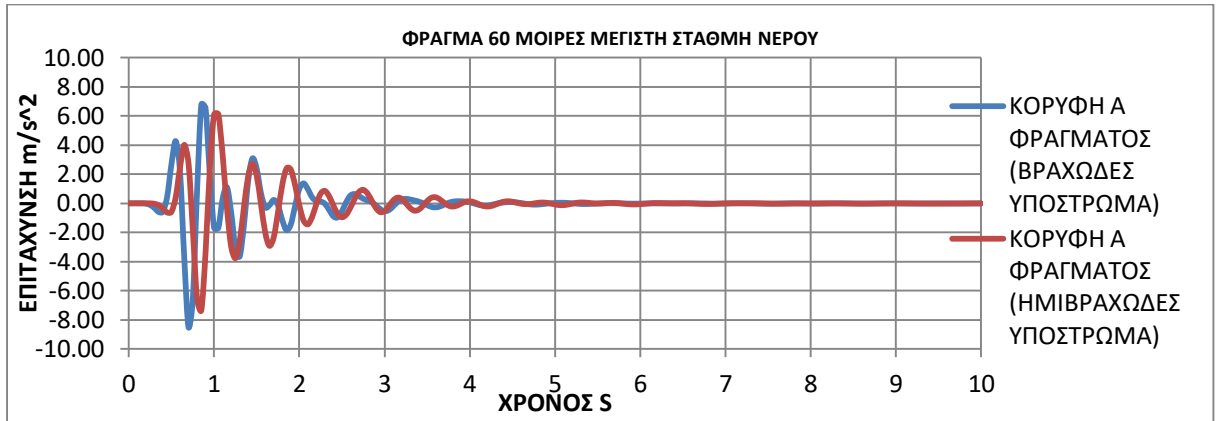




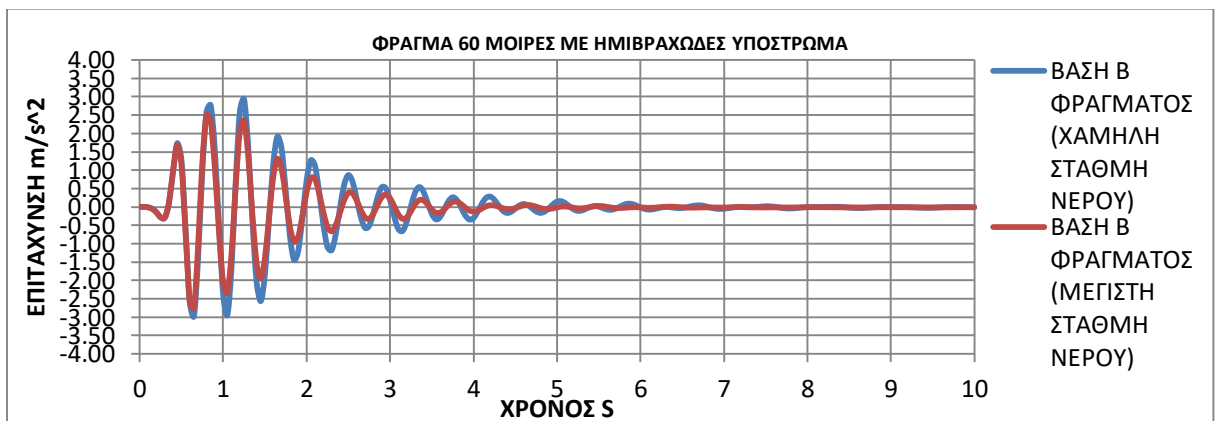
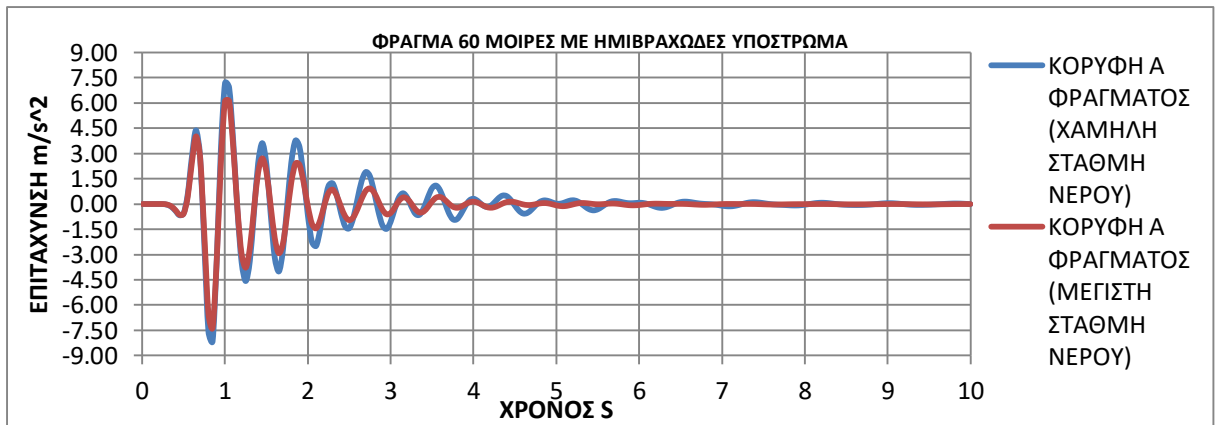
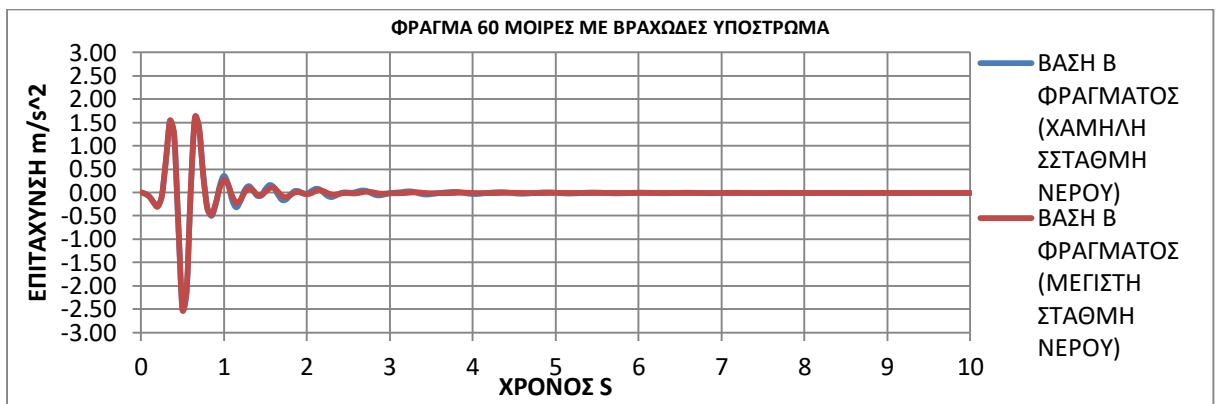
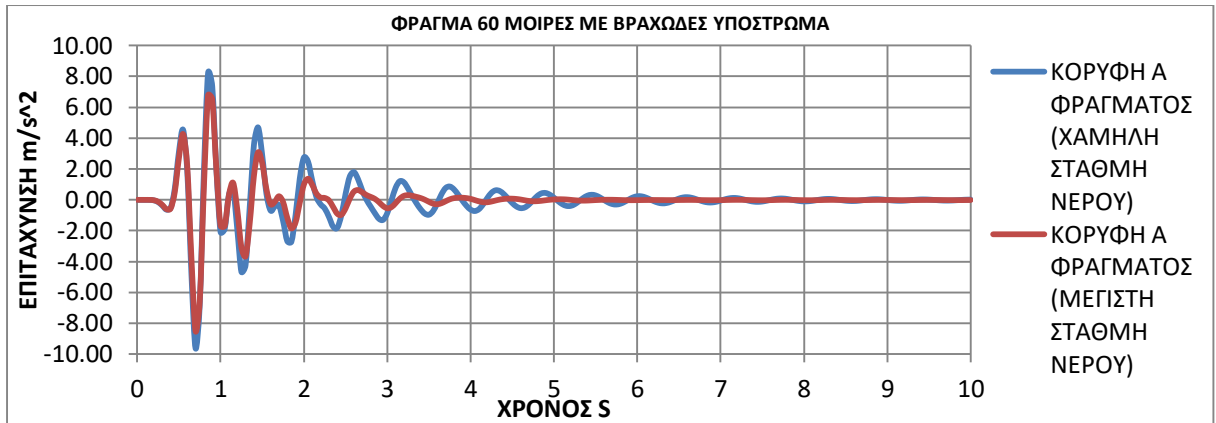
Συγκρίσεις χρονιστοριών επιτάχυνσης σχετικά με το υλικό από το οποίο αποτελείται το υπόστρωμα (περίπτωση για βραχώδες και ημιβραχώδες υλικό)

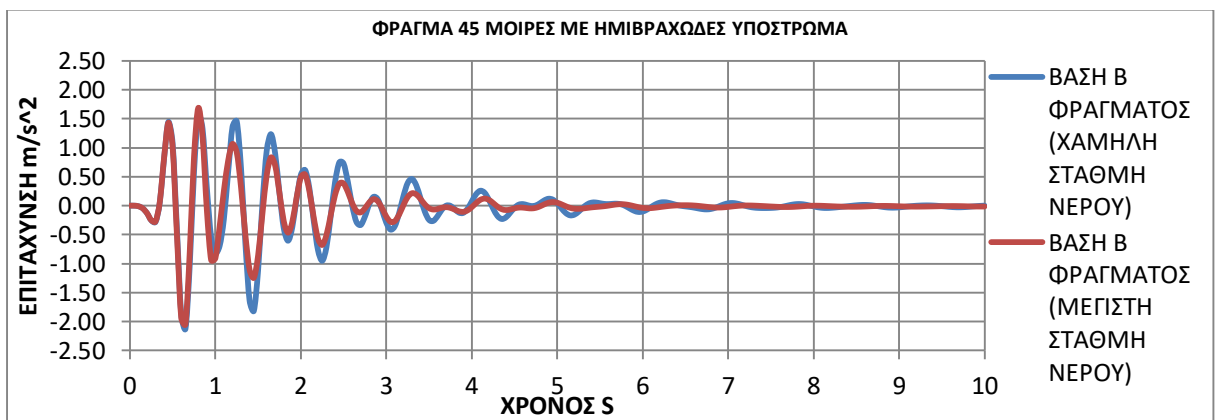
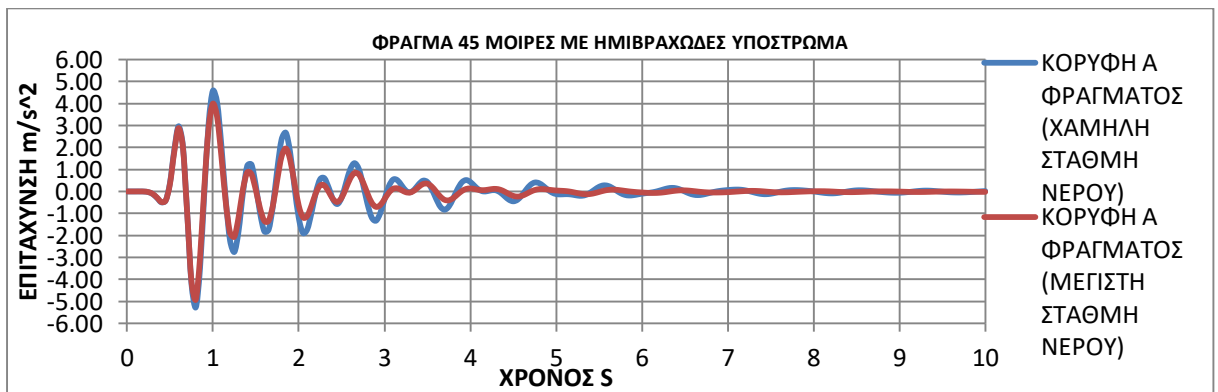
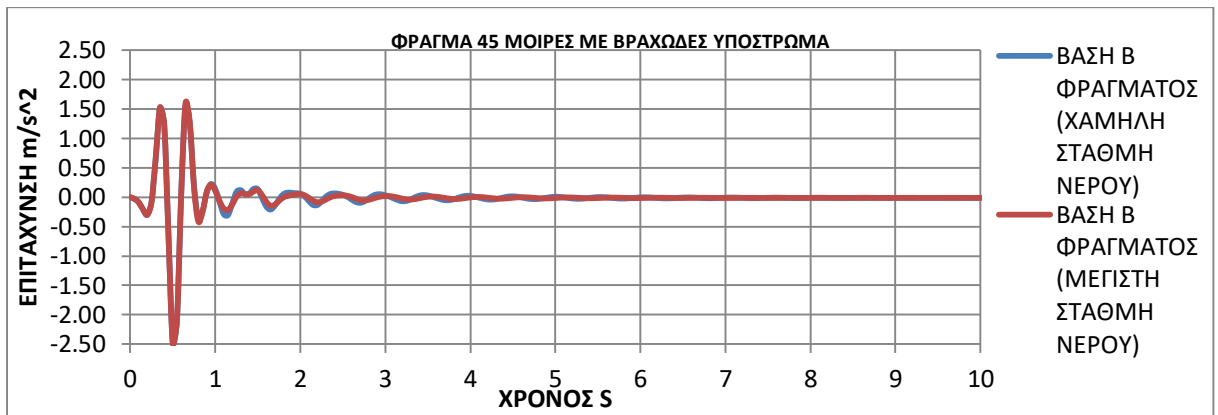
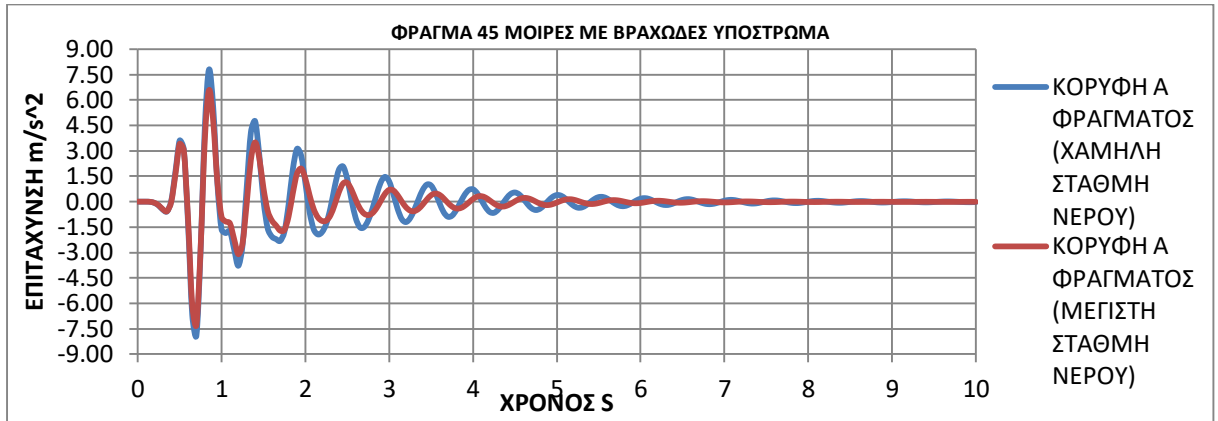


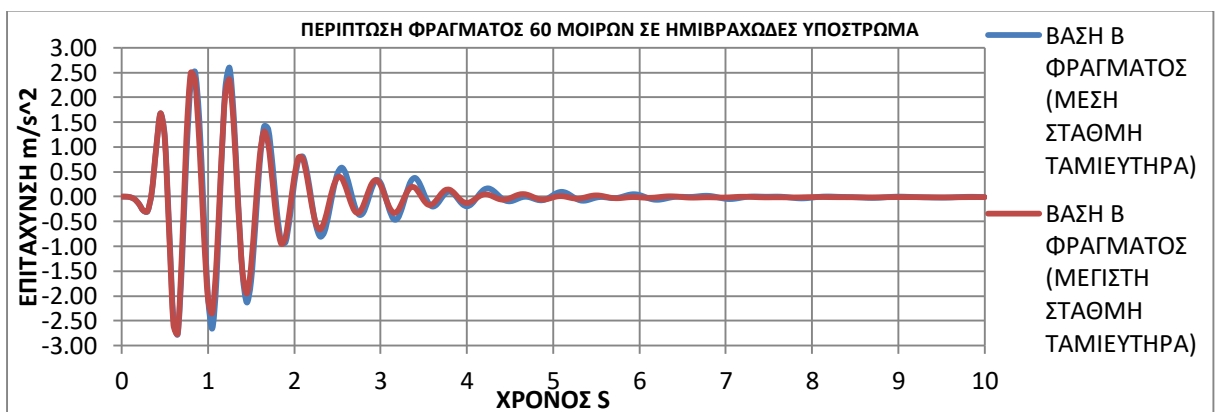
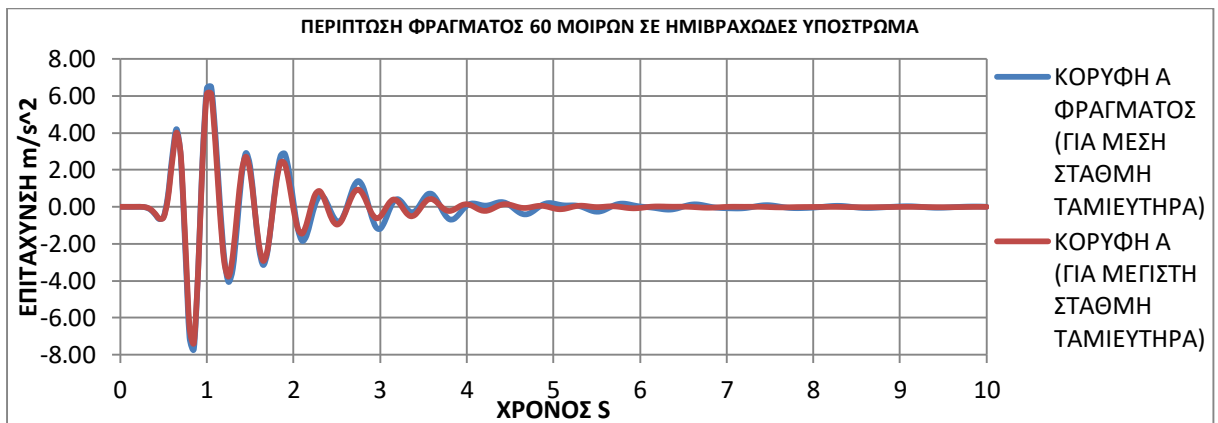
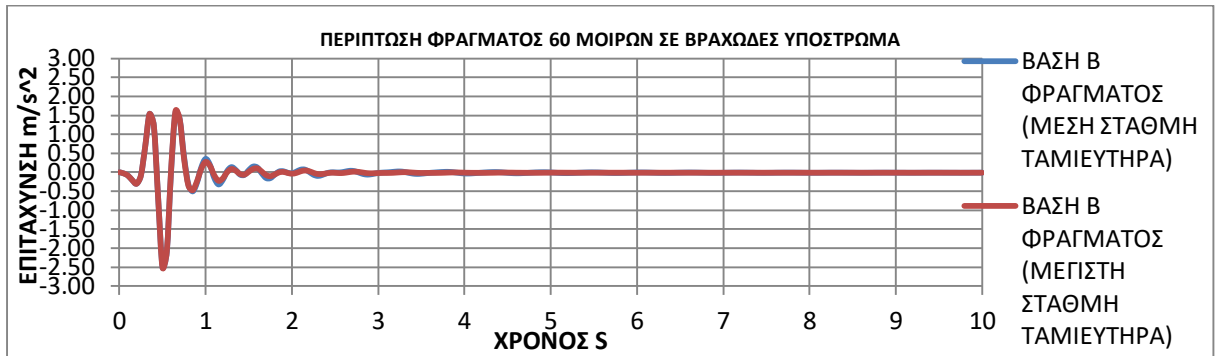
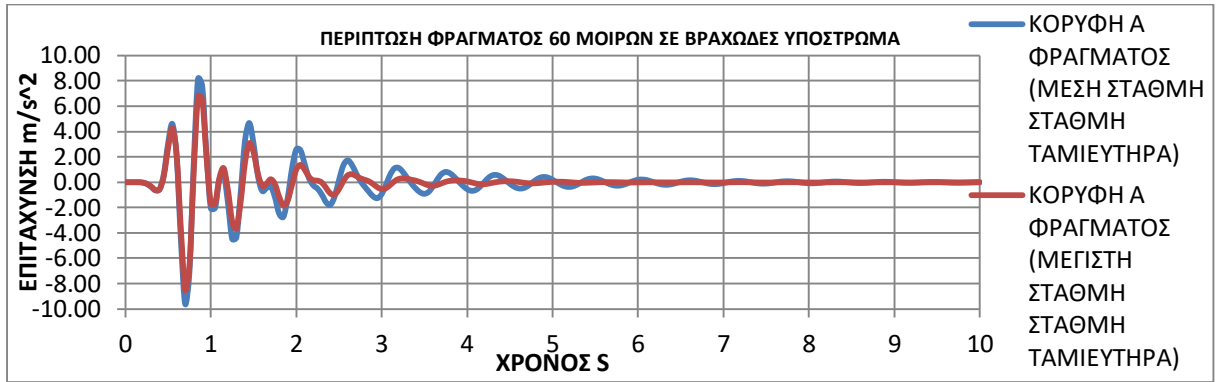


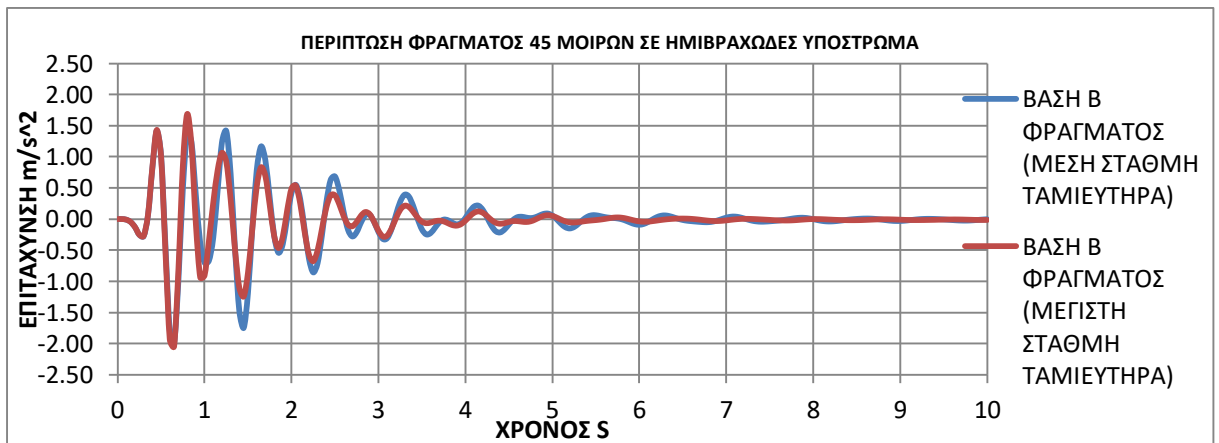
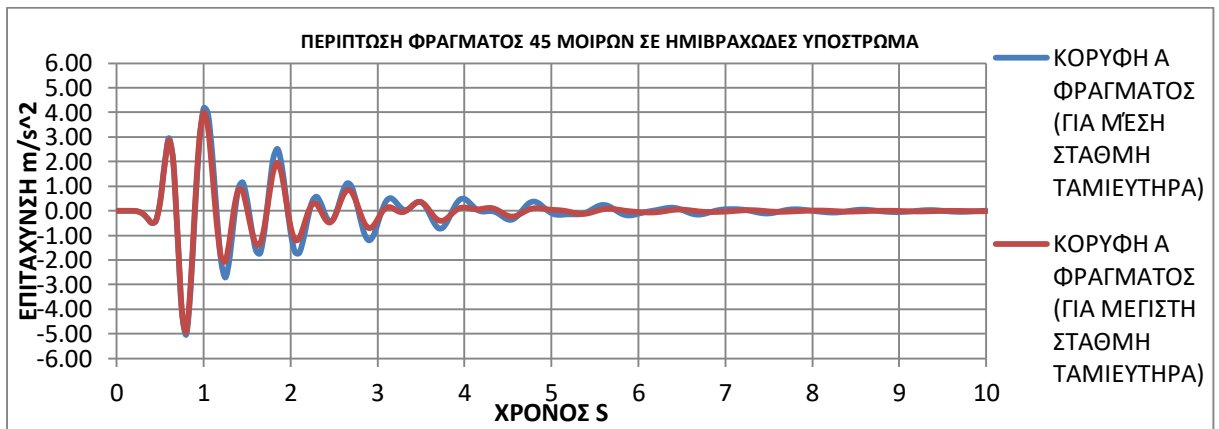
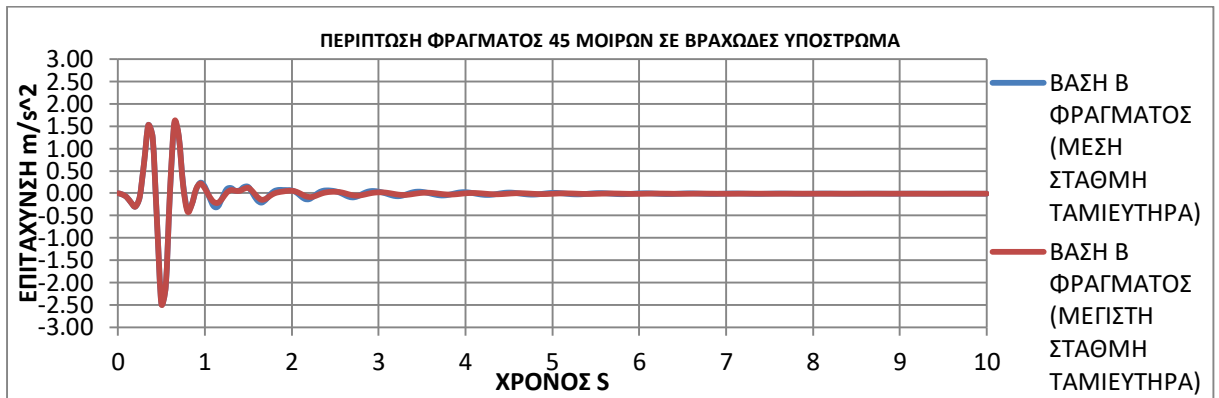
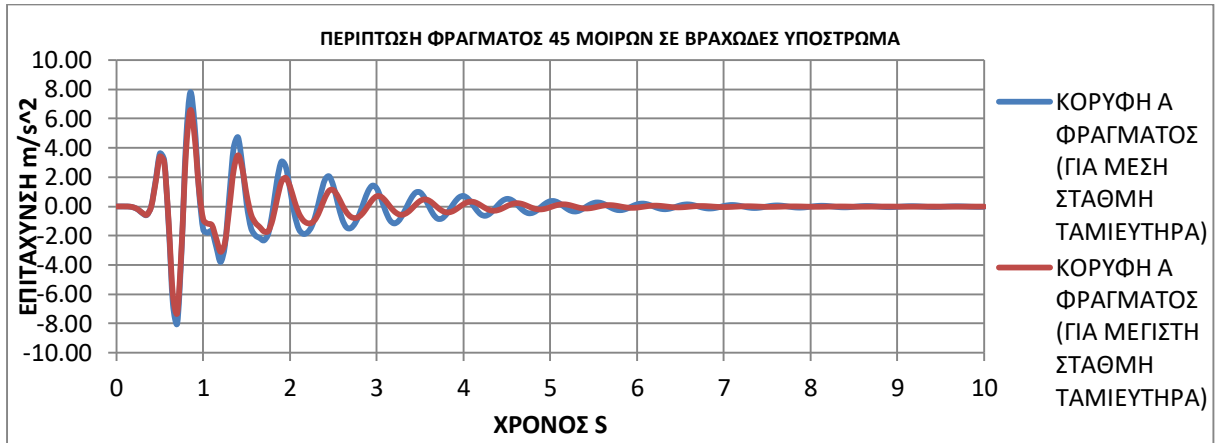


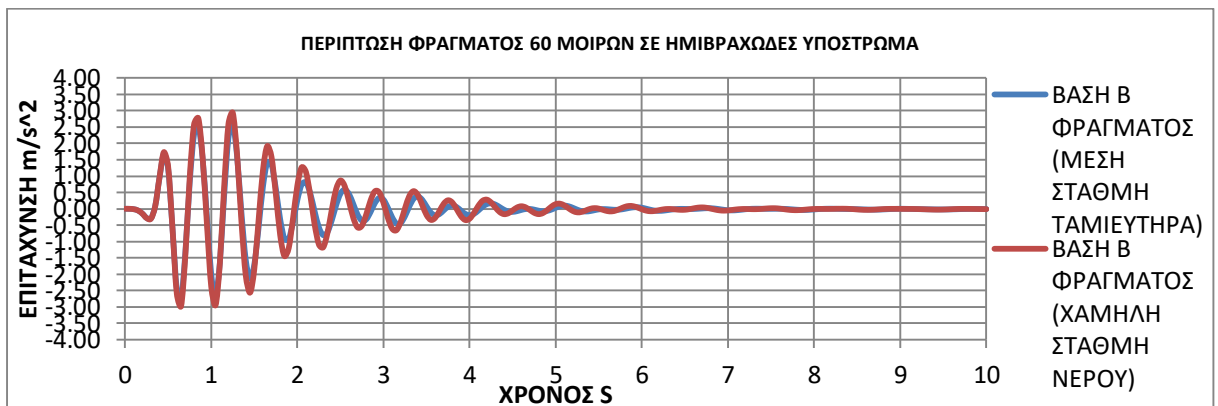
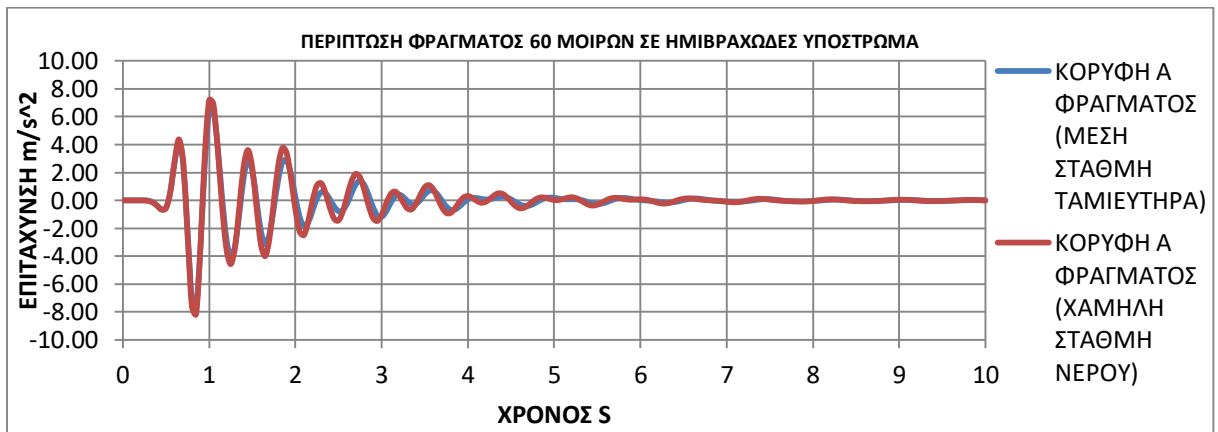
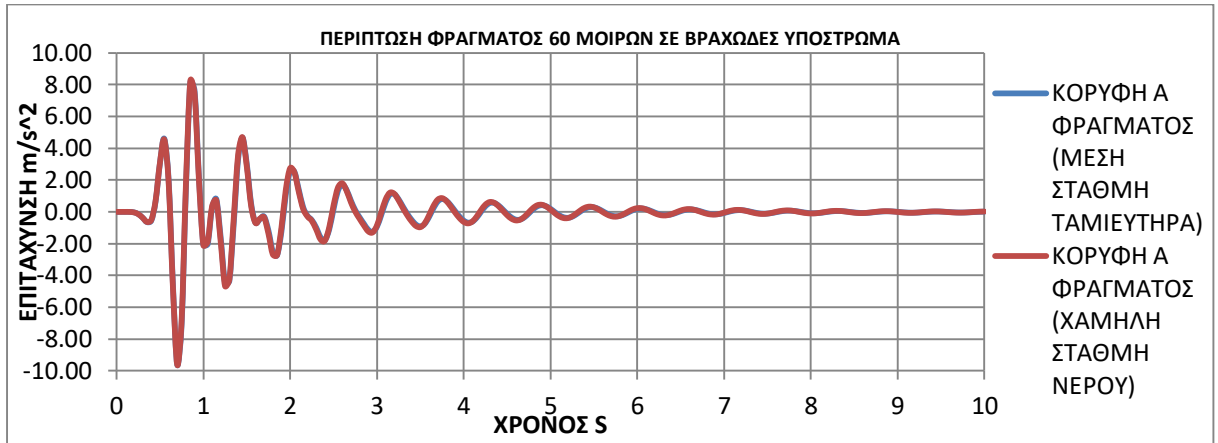
Συγκρίσεις χρονιοιστοριών επιτάχυνσης για διαφορετικές στάθμες νερού στον ταμιευτήρα
(περιπτώσεις χαμηλής, μέσης και μέγιστης στάθμης)

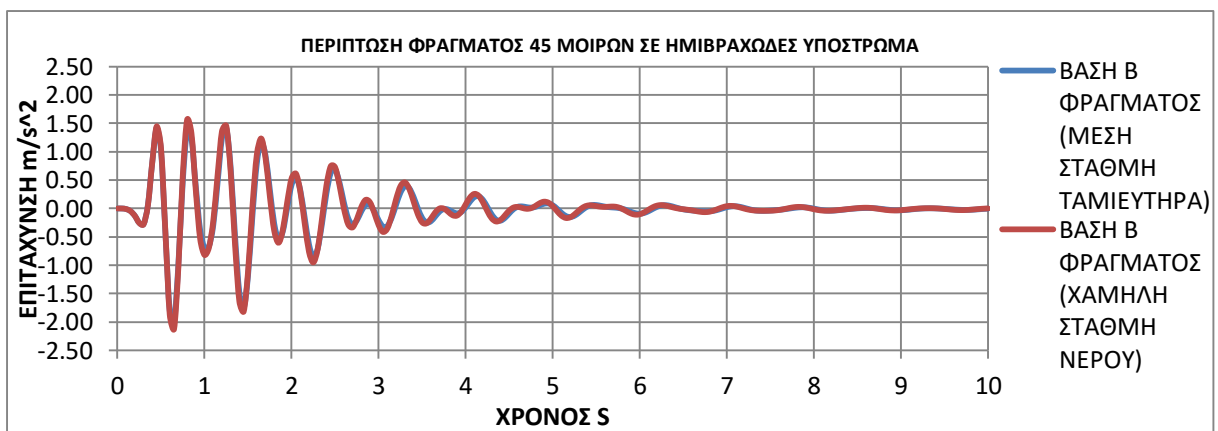
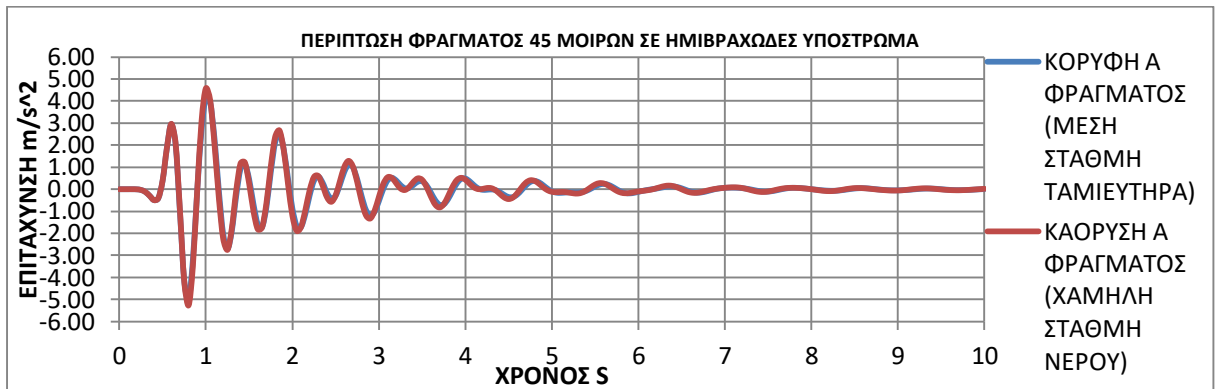
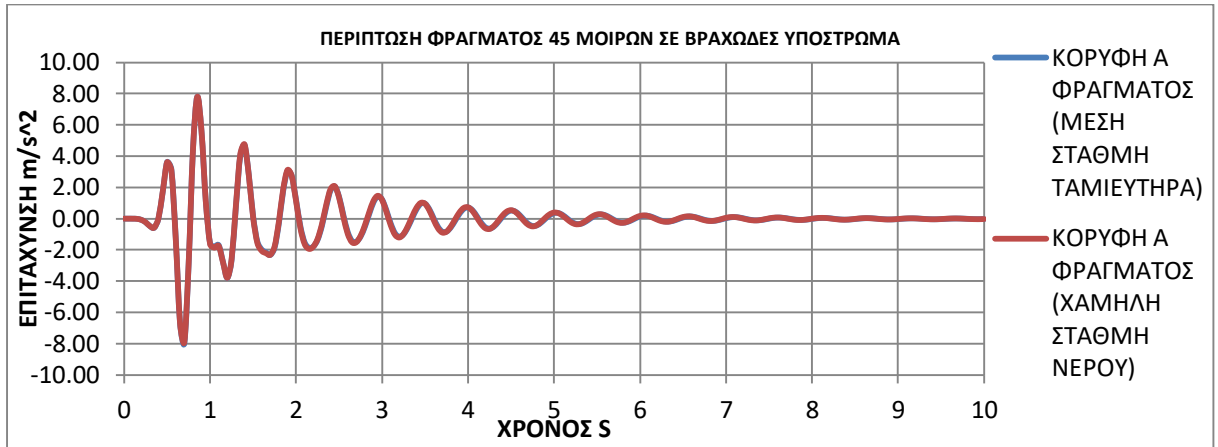




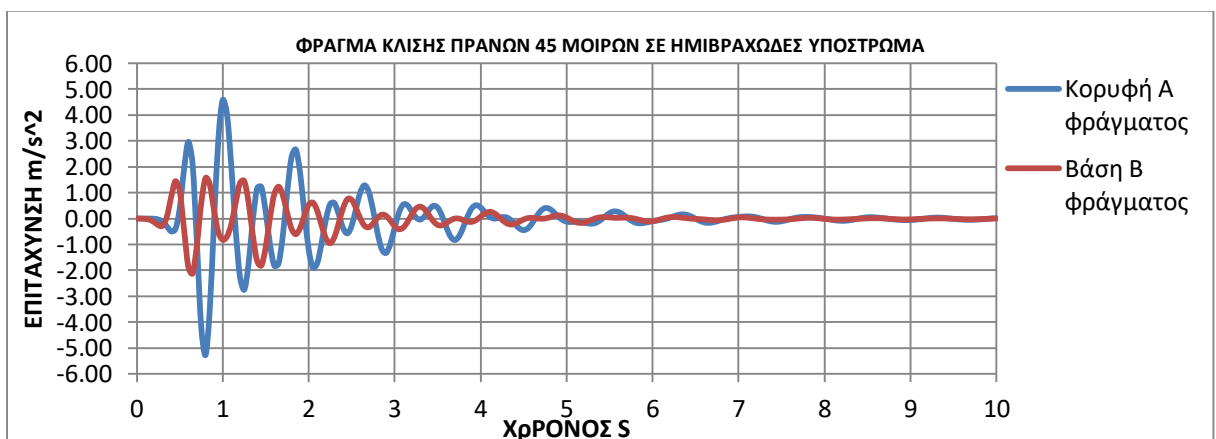
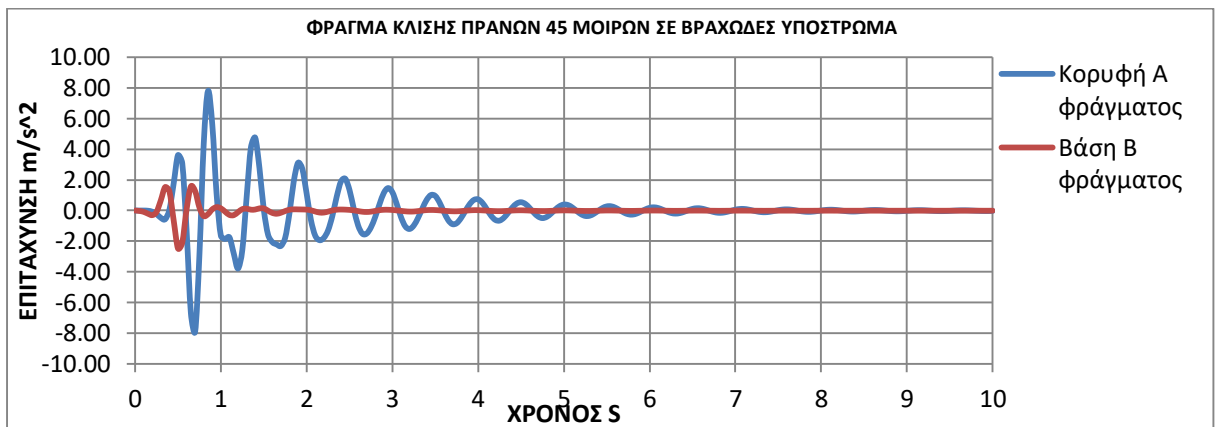
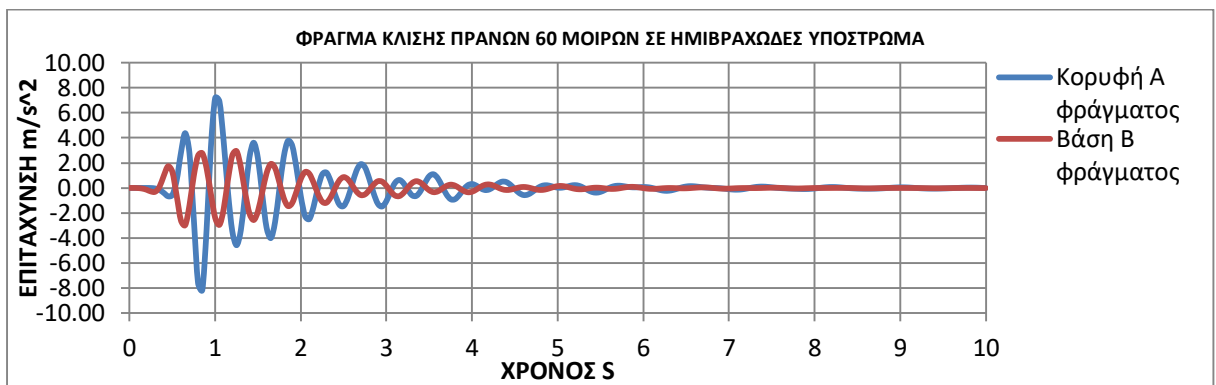
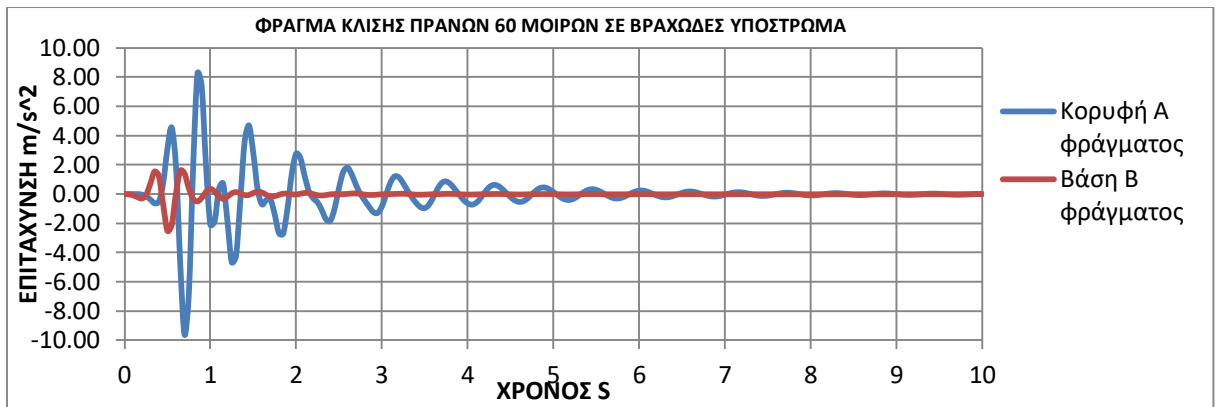




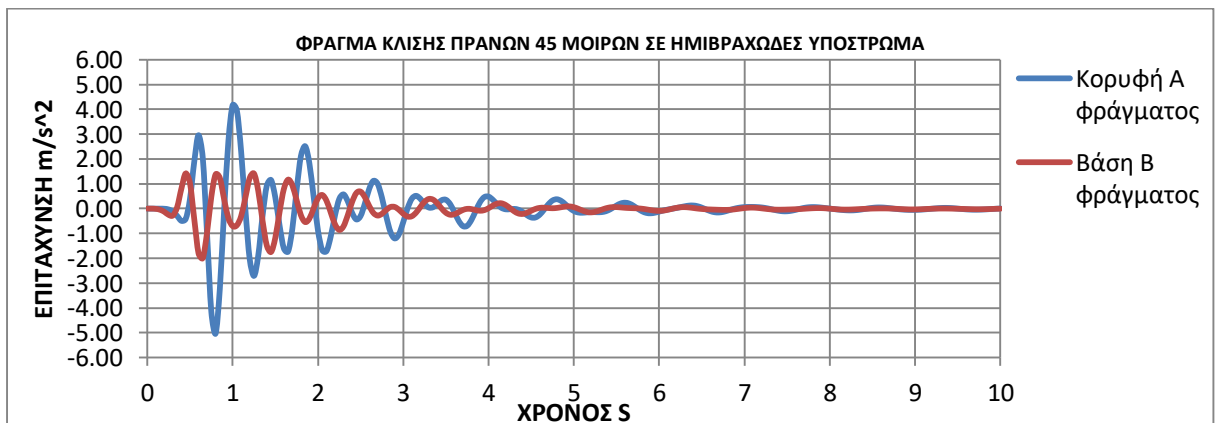
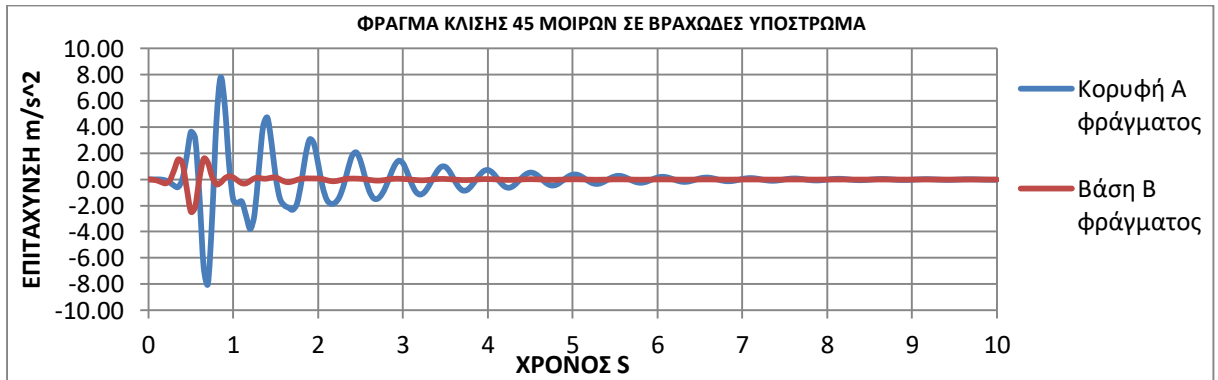
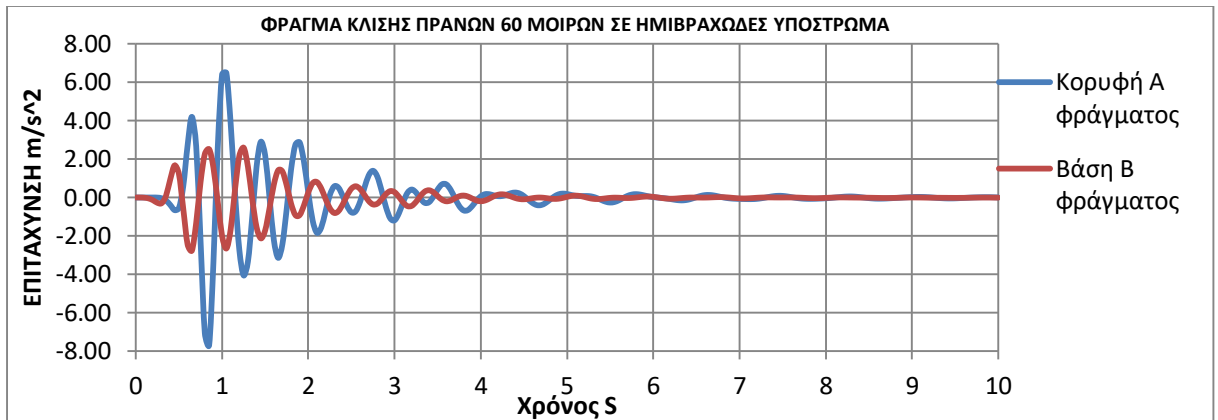
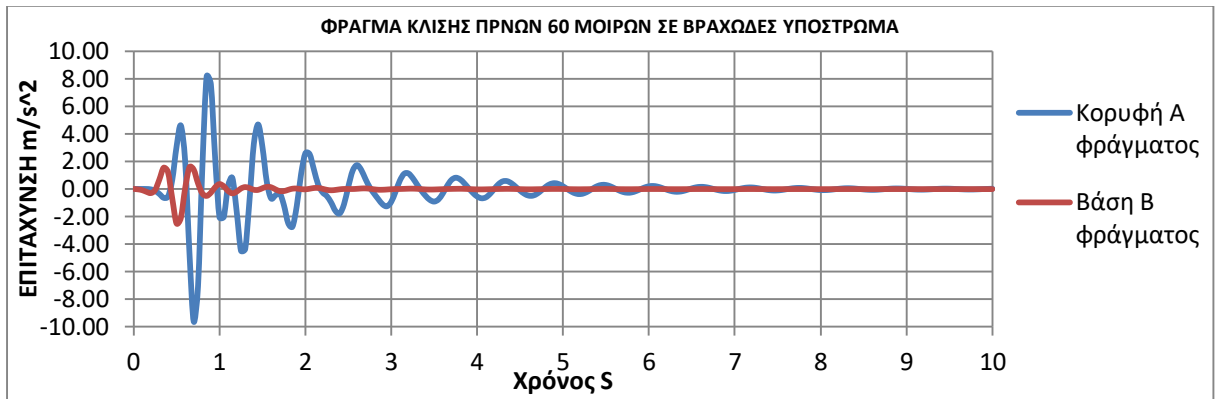




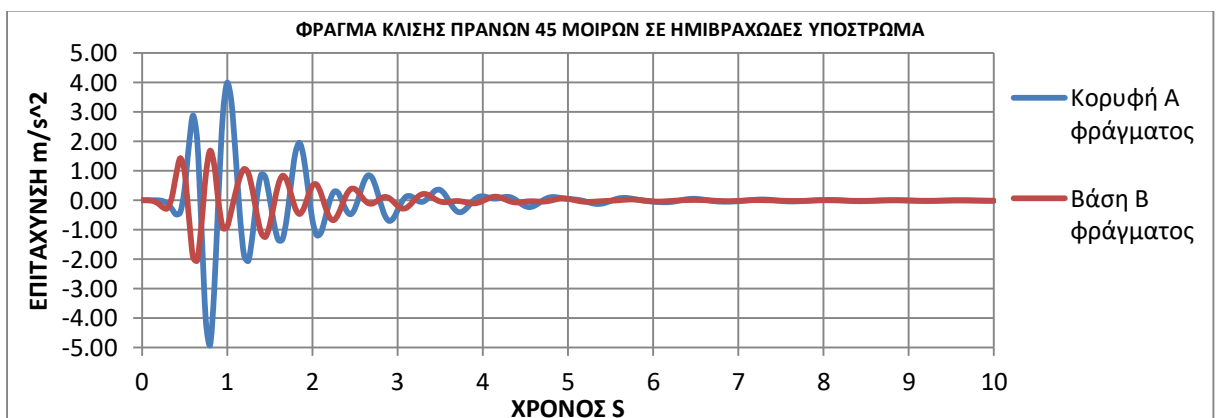
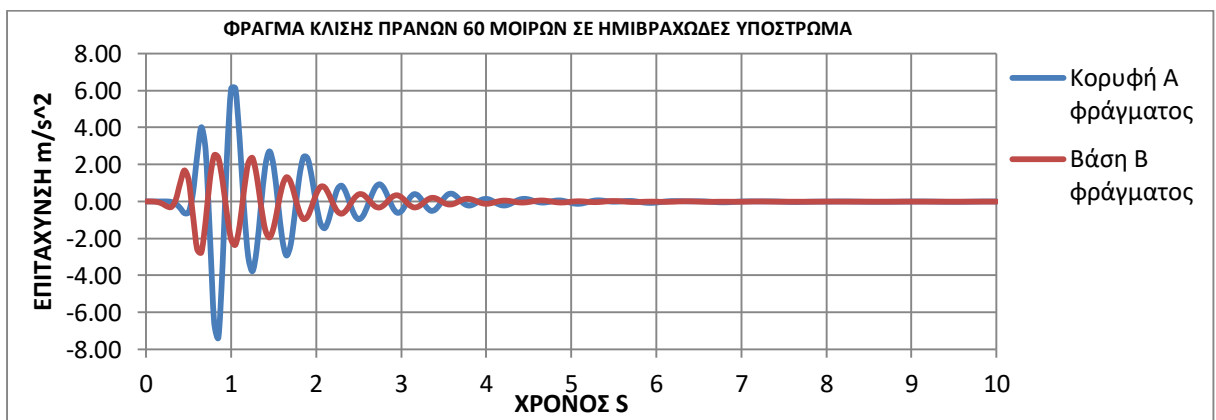
ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ RICKER-2HZ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ



ΧΡΟΝΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ RICKER-2HZ ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

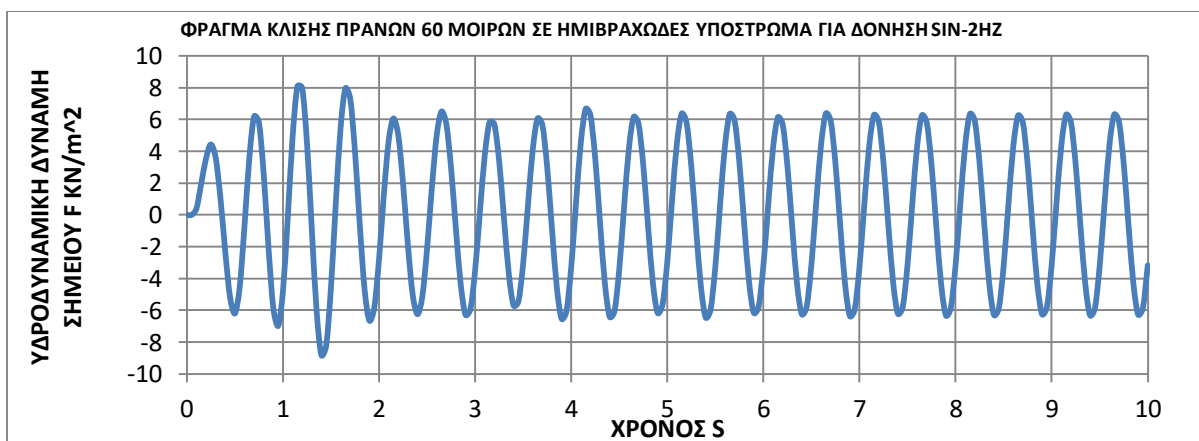
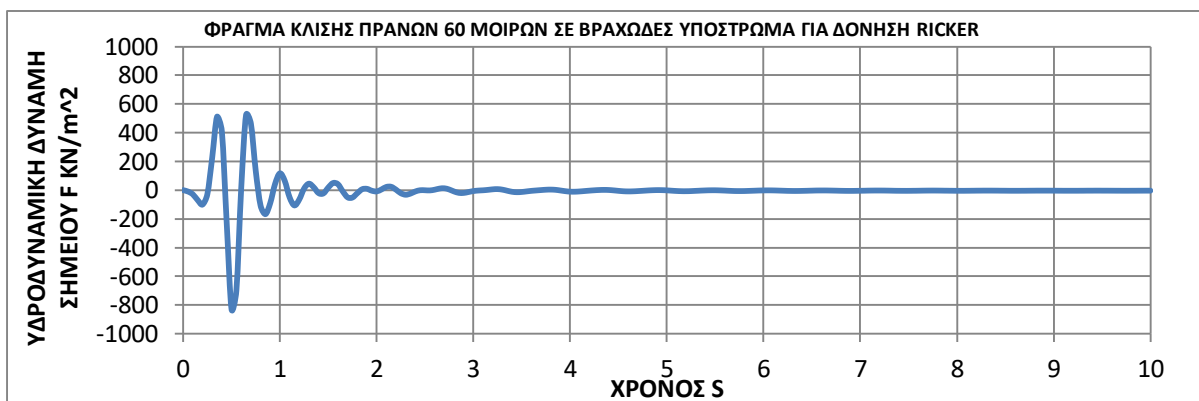
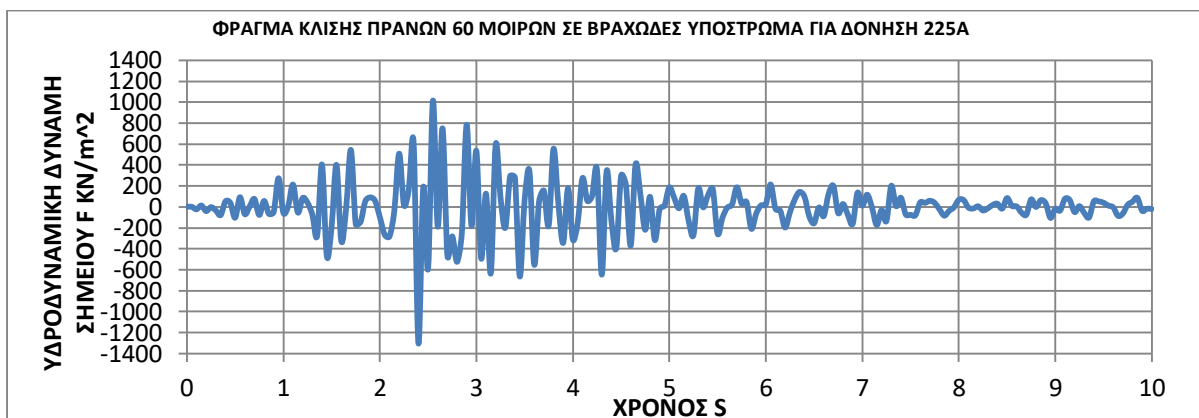
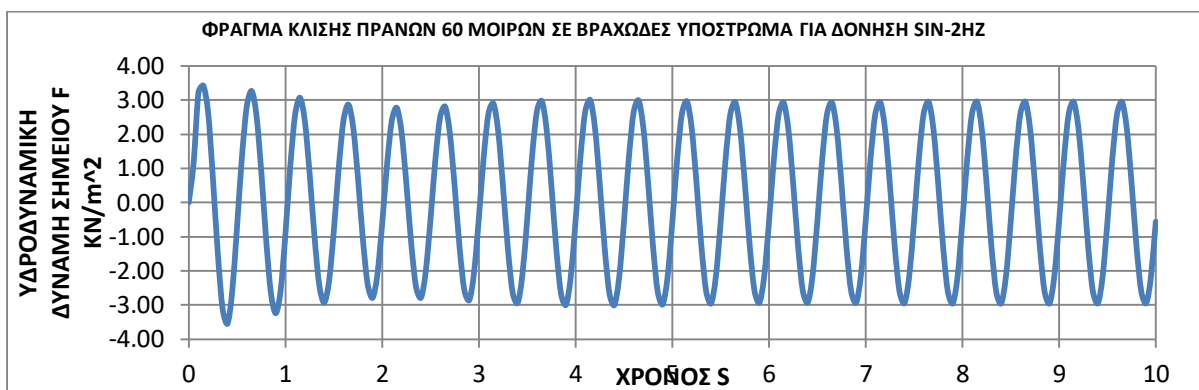


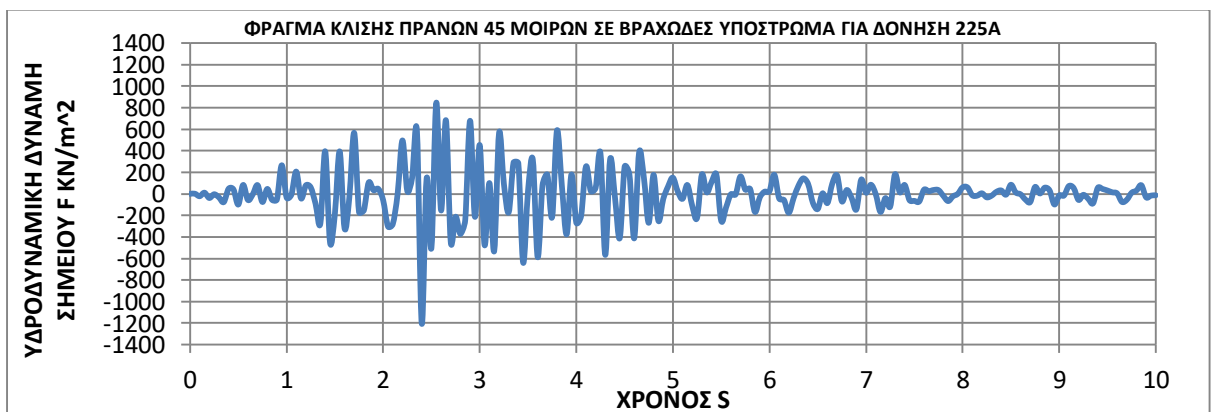
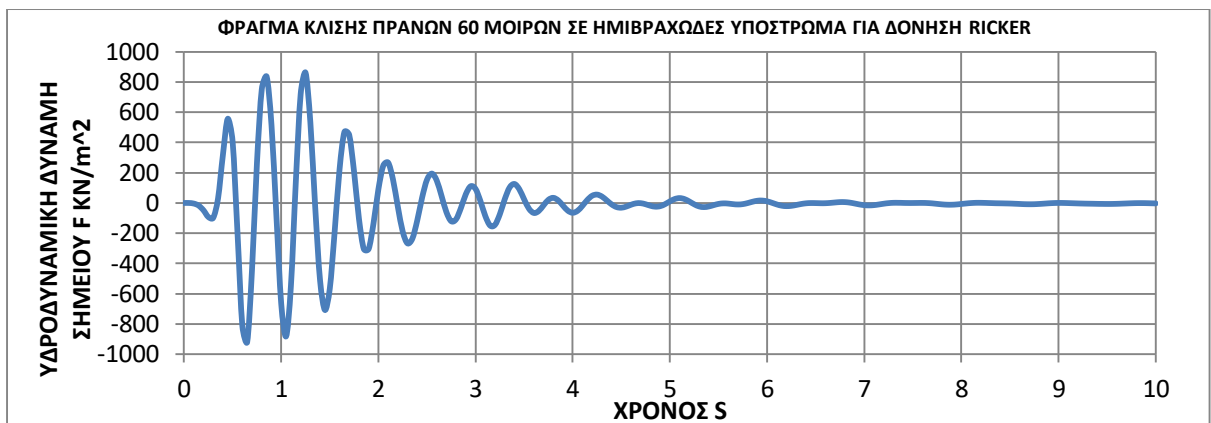
ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΟΝΗΣΗ RICKER-2HZ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

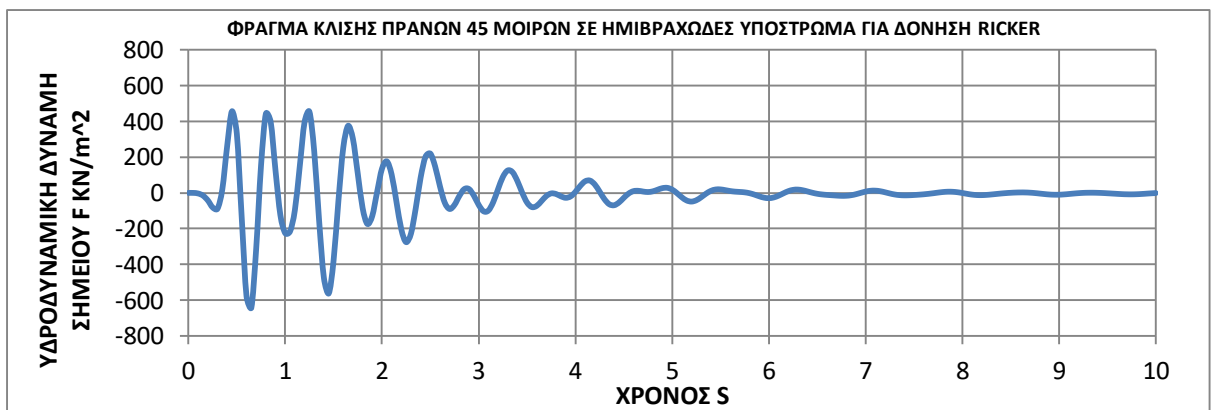
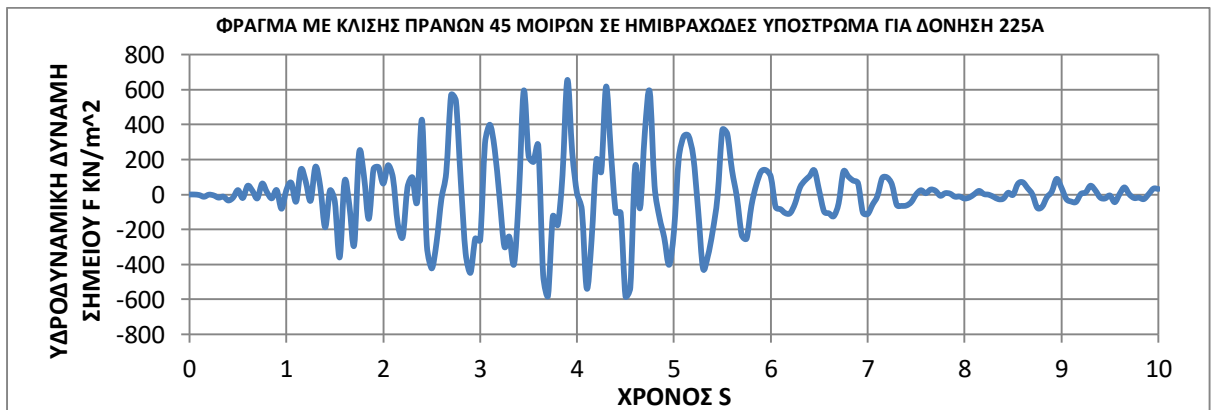
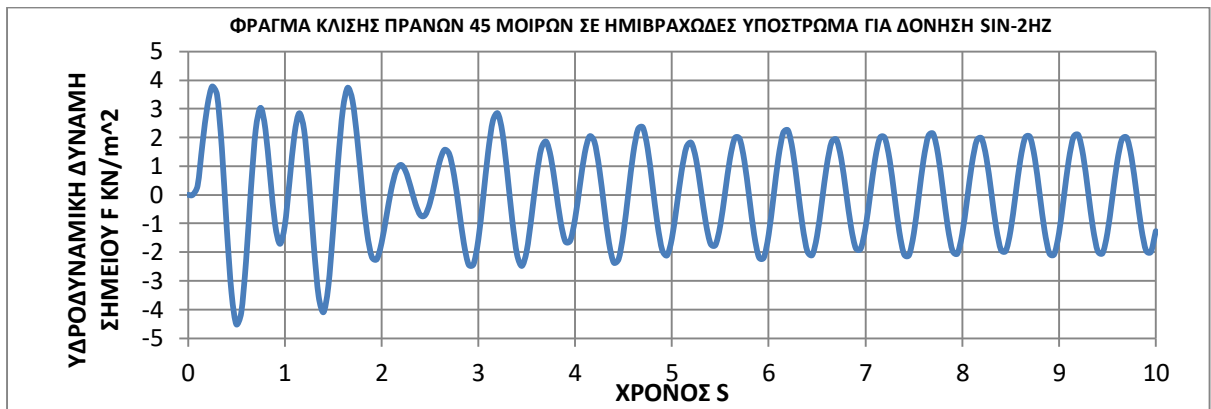
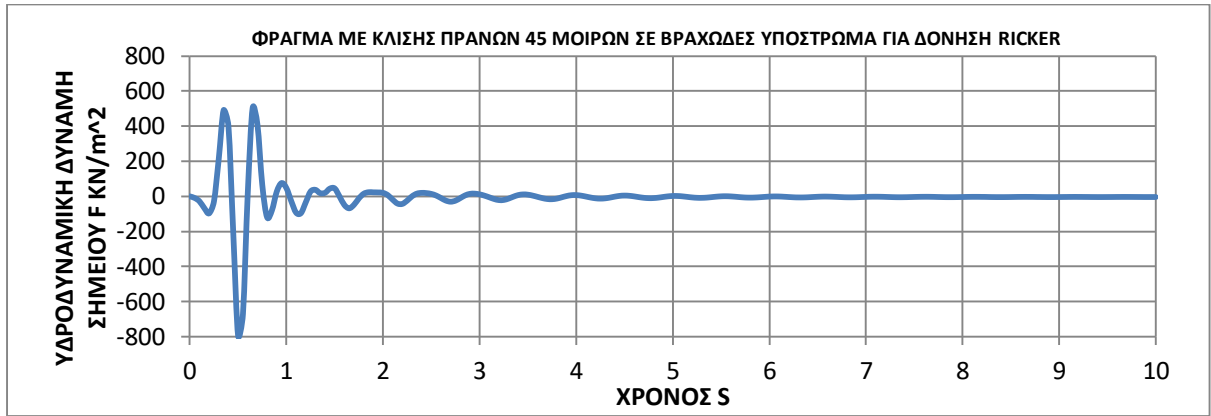


**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ
ΩΘΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ F ΤΟΥ
ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ
WESTERGAARD (ΔΥΝΑΜΗ-ΧΡΟΝΟΣ)**

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΩΘΗΣΕΙΣ ΣΗΜΕΙΟΥ F ΑΝΑΝΤΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ







ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΩΘΗΣΕΙΣ ΣΗΜΕΙΟΥ F ΑΝΑΝΤΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ

