



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ

ΝΙΚΟΣ ΚΑΛΥΒΑΣ - ΝΙΚΟΣ ΚΟΠΑΝΟΣ

Βόλος

2018

© 2018 Νίκος Καλύβας – Νίκος Κόπανος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητή κ. Ντακούλα Παναγιώτη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης και καταγραφής της διπλωματικής. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητές κα. Καλλιόγλου Πολυξένη και κ. Ευφραιμίδα Γεώργιο για την ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστούμε τους Καθηγητές μας κα. Καλλιόγλου Πολυξένη και κ. Ευφραιμίδα Γεώργιο για την πρώτη επαφή με τα υπολογιστικά περιβάλλοντα της γεωτεχνικής, ένα εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκε για την διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής. Ευχαριστούμε τους φίλους(ες) μας για την ηθική υποστήριξή τους και την αμέριμη συντροφιά τους σε ώρες αναζωογόνησης και αναψυχής. Πάνω απ' όλα, είμαστε ευγνώμονες στις οικογένειές μας για την ολόψυχη αγάπη και αδιαμφισβήτητη οικονομική, ψυχολογική και ηθική υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Νίκος Καλύβας, Νίκος Κόπανος

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Τυπική διατομή φράγματος CFRD	5
1.2 Μέθοδος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων – FEM.....	12
Κεφάλαιο 2 Συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος - CFRD	13
2.1 Στατική Συμπεριφορά των CFRD.....	14
2.1.1 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ROCKFILL	14
2.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	17
2.1.3 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	17
2.1.4 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ	18
2.1.5 ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	19
2.1.6 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	20
2.1.7 ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ	21
2.1.8 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ	21
2.1.9 ΧΑΛΙΚΙ	23
2.1.10 Μορφολογία της κοιλάδας.....	24
2.2 Σεισμική Συμπεριφορά των CFRD	25
Κεφάλαιο 3 Αριθμητική ανάλυση της συμπεριφοράς του φράγματος Μεσοχώρας	29
3.1 Χαρακτηριστικά του φράγματος Μεσοχώρας.....	29
3.2 Στατική ανάλυση φράγματος Μεσοχώρας.....	34
3.2.1 Ορισμός κανάβου.....	34
3.2.2 Γεωμετρία του φράγματος	35
3.2.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων των υλικών στις αντίστοιχες διαχωρισμένες ζώνες	35
3.2.4 Μέθοδος Προσομοίωσης Πλάκας Σκυροδέματος.....	36
3.3 Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης.....	39
3.4 Δυναμική ανάλυση φράγματος Μεσοχώρας	48
3.4.1 Σεισμική διέγερση: Σεισμός Λευκάδας (2003)	49
3.4.2 Απόσβεση Rayleigh και χρήση υστερετικού μοντέλου	52
3.4.3 Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης φράγματος Μεσοχώρας.....	58
3.5 Σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης και παρατηρήσεις.....	70
Κεφάλαιο 4 Επίδραση της σεισμικής έντασης	72
Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και συμπεράσματα	81
Βιβλιογραφία	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	116

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της σταδιακής κατασκευής και της δυναμικής συμπεριφοράς του φράγματος της Μεσοχώρας μέσω αριθμητικής προσομοίωσης. Πηγή δεδομένων και επιβεβαίωσης αποτελεσμάτων αποτέλεσε το άρθρο του κ. Π. Ντακούλα “Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons”, το οποίο βασίσθηκε σε τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση.

Πιο συγκεκριμένα, για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγιναν δισδιάστατες αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του φράγματος της Μεσοχώρας. Η προσομοίωση του προβλήματος έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D. Δημιουργήθηκε αριθμητικό προσομοίωμα της γεωμετρίας του φράγματος και του υλικού θεμελίωσης στο πρόγραμμα FLAC, ενώ η παρουσία του νερού προσομοιώθηκε με ισοδύναμες υδροστατικές πιέσεις. Το καταστατικό μοντέλο που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών είναι του Mohr-Coulomb, το οποίο στην δυναμική ανάλυση συνδυάζεται με ένα υστερητικό προσομοίωμα κατάλληλα βαθμονομημένο για την προσομοίωση χαλίκων και λιθορριπής.

Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης εστιάζουν στις ορθές κατακόρυφες τάσεις και καθιζήσεις του φράγματος κατά την κατασκευή του, ενώ της δυναμικής ανάλυσης επικεντρώνονται στις ανάντη-κατάντη οριζόντιες μετατοπίσεις και επιταχύνσεις στην στέψη και διάφορα σημεία καθ' ύψος στο κέντρο της διατομής καθώς και με τις μόνιμες μετατοπίσεις μετά το πέρας της σεισμικής δόνησης. Συγκρίσεις με τα αποτελέσματα της

τρισδιάστατης ανάλυσης καταδεικνύουν την σημαντική επίδραση της στενότητας της κοιλάδας, η οποία στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς.

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Ένα φράγμα ΛΑΠΣ ή CFRD είναι ένα φράγμα κατασκευασμένο από λιθορριπή, στο οποίο τοποθετείται πλάκα σκυροδέματος στην όψη του ανάντη πρανούς. Στον σχεδιασμό αυτό η πλάκα σκυροδέματος λειτουργεί ως ένα αδιαπέραστο τοίχωμα για την αποφυγή διαρροών, ικανό να αναλάβει τα φορτία που προκύπτουν από το βάρος του νερού της λεκάνης, τις καθιζήσεις της λιθορριπής και τις σεισμικές δράσεις.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός CFRD είναι ευέλικτος για την τοπογραφία, έχει ταχύτερη κατασκευή και λιγότερο δαπανηρή από τα χωμάτινα φράγματα. Η ιδέα του CFRD προέκυψε στην περιοχή εξόρυξης της Σιέρα Νεβάδα (California Gold Rush) στη δεκαετία του 1860 όταν οι ανθρακωρύχοι κατασκεύαζαν φράγματα ξύλινων επιφανειών για την εκκαθάριση κομματιών χρυσού από χαλίκια η πέτρες στο τρεχόμενο νερό, κατά την διάρκεια εκσκαφής. Η ξύλινη επιφάνεια αργότερα αντικαταστάθηκε από σκυρόδεμα, καθώς το σχέδιο εφαρμόστηκε σε συστήματα άρδευσης και παροχής ισχύος [21].

Δεδομένου ότι τα CFRD αυξήθηκαν σε ύψος κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, το γέμισμα (λιθορριπή) συμπίεστηκε και οι οριζόντιοι και κατακόρυφοι αρμοί της πλάκας αντικαταστάθηκαν με βελτιωμένους κατακόρυφους αρμούς.

Εξαιτίας των εξελίξεων στο χώρο της κατασκευής φραγμάτων και της τεχνολογίας που εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος των CFRDs διαδόθηκε παγκοσμίως, όταν πρόκειται για κατασκευή ψηλών φραγμάτων, καθώς και σε περιοχές με έλλειψη αδιαπέρατων εδαφών.

Με τον εμπλουτισμό των ήδη υπάρχοντων και των καινοτόμων κατασκευαστικών τεχνικών στις κατασκευές φραγμάτων, τα CFRDs που κατασκευάζονται σήμερα να ξεπερνούν τα 200m ύψους. Επί του παρόντος, το ψηλότερο φράγμα λιθορριπής με πλάκα σκυροδέματος στον κόσμο είναι το φράγμα Shuibuya (Κίνα), ύψους 233 m, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2008.



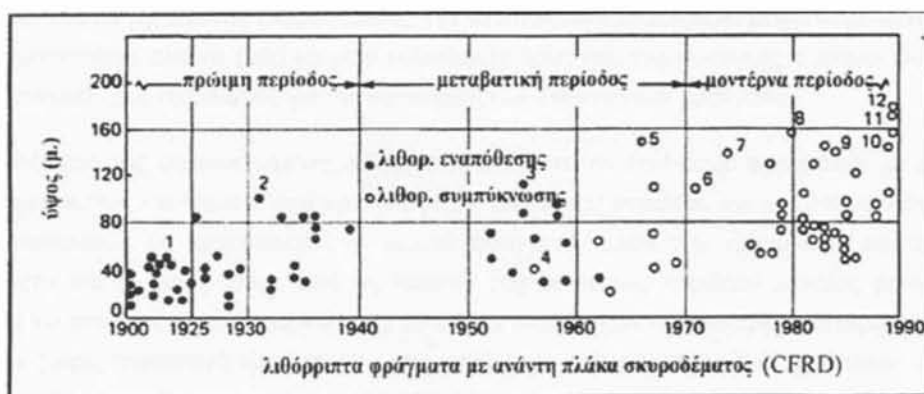
Σχήμα 1.1: Φράγμα Shuibuya (CFRD), ύψους 233m, China [13].

Σύμφωνα με τον Cooke, η εξέλιξη λιθορριπών φραγμάτων μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κύριες περιόδους : την πρώιμη περίοδο (1850-1940), την μεταβατική περίοδο (1940-1965) και την μοντέρνα περίοδο (από το 1965 μέχρι και σήμερα). Τα πρώτα φράγματα λιθορριπής με απλά εναποθετημένη λιθορριπή κατασκευάστηκαν σε οροσειρές της California με μέγιστο ύψος 25m και απότομες κλίσεις από 0,5:1 (οριζόντια:κάθετα) έως 0,75:1 (οριζόντια:κάθετα). Τα πρώτο CFRD έλαβε χώρα στην California το 1895 (Clatworth Park) και τα πρώτα ψηλά CFRDs κατασκευάστηκαν με ύψος που έφτανε τα 84m στο Kentucky

(Dix River) και τα 101m στην California (Salt Springs), τα οποία παρά τα μικρά προβλήματα εισροής λειτουργούν ικανοποιητικά μέχρι και σήμερα. Τα λιθόρριπτα φράγματα κατασκευάζονταν με αδιαπέρατα φίλτρα στην επιφάνεια τους έως και το 1940, οπότε άρχισαν να διαδίδονται τα χωμάτινα φράγματα (Cooke, 1984).

Στην μεταβατική περίοδο, προέκυψαν προβλήματα που συνιστούσαν τον περιορισμό ύψους των λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος στα 90m. Δύο από τα βασικά προβλήματα ήταν η μικρή διαθεσιμότητα υλικού θλιπτικής αντοχής για να αρμόζει με τη λιθορριπή και η μεγάλη συμπίεστίτητα της λιθορριπής καθώς η εναπόθεση της γινόταν σε στρώσεις από 18-60m. Συχνά φαινόμενα σε αυτά τα φράγματα λόγω σοβαρών καθιζήσεων της λιθορριπής κατά την περίοδο πλήρωσης της δεξαμενής τους, ήταν αυτά της εισροής.

Το 1955-1965, η αναγκαιότητα για την κατασκευή ψηλότερων φραγμάτων σε συνδυασμό με την έλλειψη βράχων υψηλής αντοχής για τη λιθορριπή, καθώς και με την εξέλιξη πιο ήπιων δονητικών μηχανημάτων διάστρωσης αντικατέστησαν τη λιθορριπή απλής εναπόθεσης σε συμπυκνωμένη λιθορριπή. Στο Σχ.1.2 φαίνεται αυτή η μετάβαση και η σταδιακή αύξηση ύψους και των δυο τύπων λιθορριπής.



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη στον τύπο και το ύψος των λιθόρριπτων φραγμάτων (Cooke, 1991)

Κατά τη διάρκεια της μοντέρνας περιόδου μεγάλες βελτιώσεις έγιναν στον τρόπο σχεδιασμού των CFRDs, όπως για παράδειγμα καλύτερες λεπτομέρειες των αρμών χωρίς συμπίεστά υλικά πλήρωσης, καθώς και ο περιορισμός των οριζόντιων αρμών στην πλάκα σκυροδέματος. Η πλάκα έπαψε να έχει τη μορφή σκακιάρας και κατασκευάζεται με ανερχόμενο μεταλλότυπο, όπου το σκυρόδεμα ρίχνεται στην πλάκα με κινητή φόρμα (slipforming).

Στις μέρες μας, τα CFRDs αποτελούν μια βασική μέθοδο κατασκευής ψηλών φραγμάτων έναντι των χωμάτων, αφού υπερτερούν ως προς το κόστος και τον απλό σχεδιασμό. Στην Ελλάδα το 1966 ολοκληρώθηκε η κατασκευή του φράγματος της Μεσοχώρας με ύψος 150m και αποτελεί μέχρι το 2005 το ψηλότερο CFRD της Ευρώπης.

1.1 Τυπική διατομή φράγματος CFRD

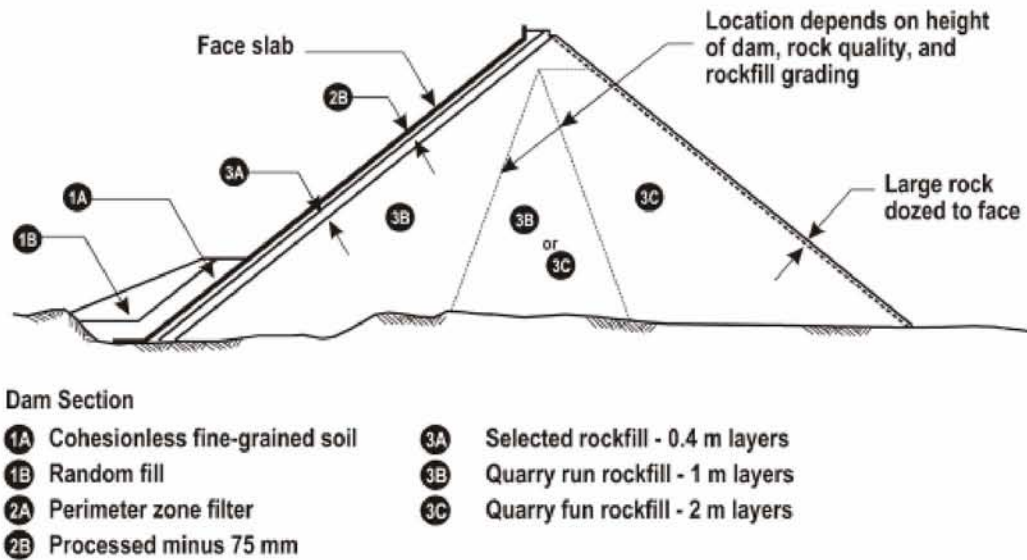
Η τυπική διατομή ενός φράγματος CFRD φαίνεται στο παρακάτω Σχ.1.3. Τα ανάντη και κατάντη πρανή ενός φράγματος CFRD μπορούν να έχουν ως μέγιστη κλίση 1,3H : 1V. Για πιο αδύναμα πετρώματα λιθορριπής και θεμέλια, ανάντη και κατάντη πλαγιές, η χωροθέτηση, η αποστράγγιση και η κατασκευή προσαρμόζονται έτσι ώστε να συμβιβάζονται με τον ασθενή βράχο. Για μία δυνητικά διαβρώσιμη θεμελίωση, κατασκευάζονται πρόσθετες διατάξεις στεγανοποίησης και φίλτρου κατάντη του πλίνθου.

Στην κατασκευή του φράγματος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω κατηγορίες ζωνών υλικών (Σχήμα 1.3):

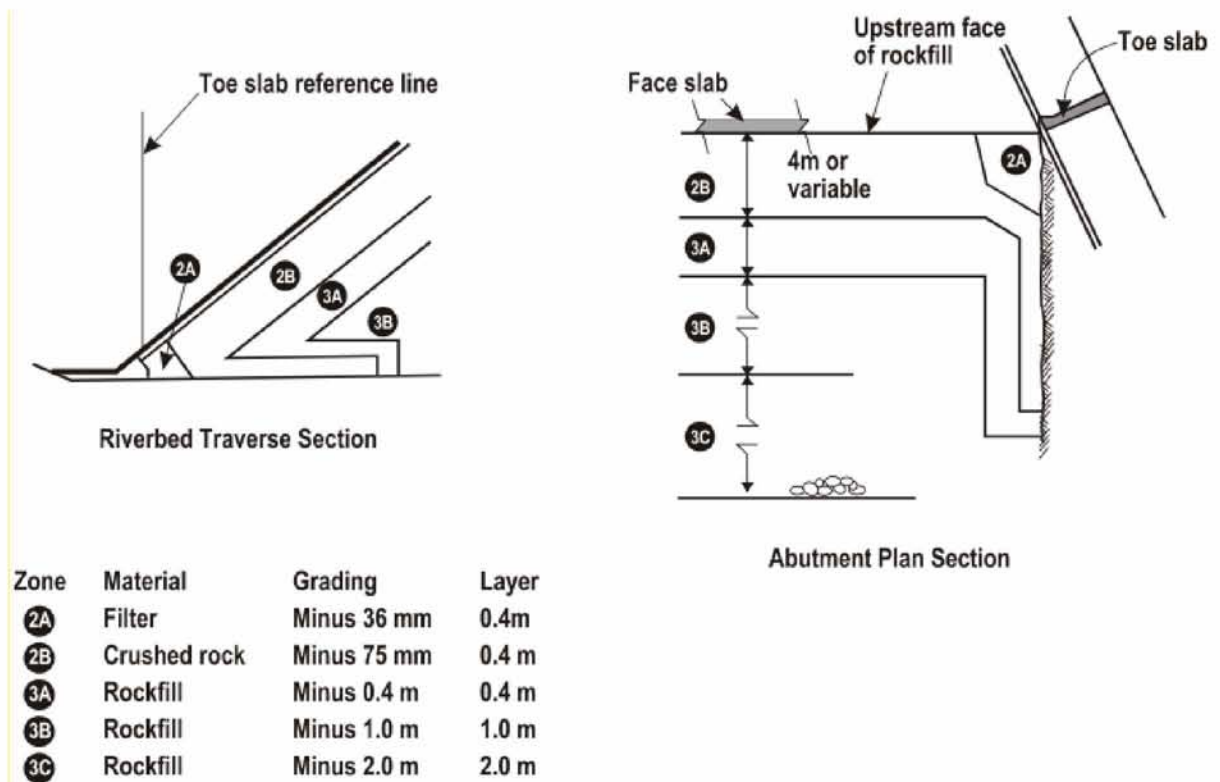
- **Ζώνες 1A ,1B:** ζώνες προστασίας της ανάντη πλάκας από λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά με αυξανόμενη σειρά μέγιστου μεγέθους κόκκων.
- **Ζώνες 2A, 2B:** ζώνες στήριξης της ανάντη πλάκας, με αυξανόμενη σειρά μέγιστου μεγέθους κόκκων (επεξεργασμένα κοκκώδη υλικά).
- **Ζώνες 3A, 3B, 3C:** ζώνες λιθορριπής, με αυξανόμενη σειρά μέγιστου μεγέθους κόκκων.

Η Ζώνη 1B παρέχει στήριξη στη Ζώνη 1A και σε μερικές περιπτώσεις αντιστέκεται και στην ανύψωση της ανάντη πλάκας πριν από την πλήρωση δεξαμενής. Η ζώνη 1A, μια χωρίς συνοχή ή λεπτή άμμος, τοποθετείται σε μεγαλύτερο ύψος στα ψηλότερα φράγματα έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει προστατευτικά για την μείωση της ροής νερού στην περιοχή των περιμετρικών και των κατακόρυφων αρμών ή ενδεχομένως ρωγμών στο κάτω μέρος της πλάκας σκυροδέματος.

Η ζώνη 2A είναι επεξεργασμένο λεπτό φίλτρο με συγκεκριμένα όρια διαβάθμισης, <math><20\text{ mm}</math> ή <math><12\text{ mm}</math>. Χρησιμεύει στον περιορισμό της διαρροής σε περίπτωση αστοχίας και για την αυτοθεραπεία με υποβρύχια τοποθέτηση ιλύος ή ιλυώδες άμμου.



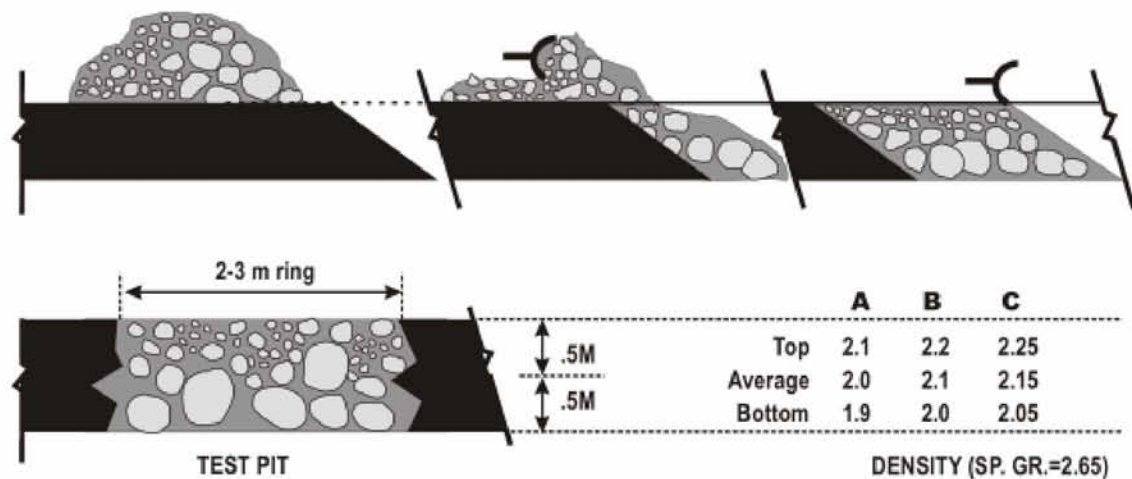
Σχήμα 1.3: Ζώνες τυπικής διατομής φράγματος με πλάκα σκυροδέματος (CFRD) [18].



Σχήμα 1.4: Ζώνες τυπικής διατομής φράγματος με πλάκα σκυροδέματος (CFRD) στην περιοχή της κοίτης του ποταμού (αριστερά) και στην περιοχή του αντερείσματος (δεξιά) [18].

Η ζώνη 3 είναι πετρώματα λατομείων (λιθορριπή). Οι διαφορές στις A, B και C είναι κατά κύριο λόγο στο πάχος στρώσης και το μέγεθος και τον τύπο του βράχου. Η ζώνη 3A είναι για να παρέχει συμβατότητα και να περιορίζει το μέγεθος κενών δίπλα στη Ζώνη 2B. Η ζώνη 3B αντιστέκεται στο βάρος νερού και περιορίζει την παραμόρφωση της όψης. Η ζώνη 3C δέχεται μικρό φορτίο νερού και η καθίζηση της ζώνης γίνεται ουσιαστικά κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Το παχύτερο στρώμα στη ζώνη 3C δέχεται μεγαλύτερο μέγεθος λιθορριπής, είναι πιο οικονομικό να τοποθετηθεί και η χαμηλότερη πυκνότητα (περίπου 5% μικρότερη από την πυκνότητα της ζώνης 3B) εξοικονομεί όγκο πετρωμάτων. Μεγάλο

μέγεθος λιθορριπής τοποθετείται συχνά στο κάτω μέρος του πόδα για την αντίσταση της τριβής και την επιρροή ποσότητας νερού που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την κατασκευή.



Σχήμα 1.5: Τοποθέτηση και συμπύκνωση λιθορριπής (Cooke, 1991, 1997) [18]

Το σχήμα 1.5 απεικονίζει μία μάζα λιθορριπής η οποία αφήνεται στην επιφάνεια του στρώματος και απλώνεται από την μπουλντόζα. Υπάρχει φυσικός διαχωρισμός στην απόθεση και σκόπιμος διαχωρισμός στην εξάπλωση. Η λεία επιφάνεια των λεπτόκοκκων στο άνω μέρος του στρώματος είναι επιθυμητή για συμπίεση και για μειωμένο κόστος φθοράς των μηχανημάτων. Το άνω μισό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα, αποτελείται από πέτρες μικρότερου μεγέθους και είναι καλύτερα διαβαθμισμένο σε σύγκριση με τους μεγαλύτερους βράχους στο κάτω μισό. Η ενέργεια μεταδίδεται μέσω των μεγαλύτερων βράχων που παρέχουν αντοχή και πυκνότητα με σφήνωση και θραύση των άκρων. Χρησιμοποιείται μία προδιαγραφή συμπύκνωσης κατά την οποία λαμβάνονται κάποιες φορές δοκιμές πυκνότητας για το αρχείο. Τα γράμματα A, B, C του σχήματος 1.5 αντιστοιχούν σε κακό, μέτριο και καλό διαβαθμισμένο πέτρωμα, τοποθετημένο σε στρώματα 1m μήκους και συμπιεσμένο από 10-τονο στατικό οδοστρωτήρα με 4 διελεύσεις. Οι πυκνότητες είναι ικανοποιητικές ανάλογα με

το ειδικό βάρος του βράχου και την αναλογία κενών της γεμισμένης ζώνης. Οι χαμηλοί λόγοι κενών είναι επιθυμητοί και οδηγούν στην ελάχιστη καθίζηση μέσα στη γεμισμένη ζώνη.

Το μέγιστο μέγεθος βράχου σε ένα στρώμα μπορεί να είναι ίσο με το πάχος στρώσης. Τα άμεσα γειτονικά πετρώματα δεν θα είναι εντελώς συμπιεσμένα και δεν χρειάζεται να είναι. Τα μεγαλύτερα μεγέθη βράχου θα δέχονται τα μεγαλύτερα φορτία στην περιοχή.

Όσο αναφορά την ποιότητα και την διαβάθμιση του αναχώματος δεν υπάρχουν στερεότυπες προδιαγραφές για τα λιθορριπτα φράγματα, όπως υπάρχουν για τα φράγματα βαρύτητας. Αναγκαίο είναι ο βράχος να είναι συμπαγής και όχι επιρρεπής σε διάβρωση λόγω αποσάθρωσης. Οι πιο κατάλληλοι τύποι βράχου για τη λιθορριπή είναι οι συμπαγείς πυριγενείς ή μεταμορφωσιγενείς βράχοι. Χαρακτηριστικές αναφορές της βιβλιογραφίας, αναφέρονται σε φράγματα που συμπεριφέρθηκαν πολύ καλά με λιθορριπής από : διορίτη, γνεύσιο, βασάλτη, πυκνό ψαμμίτη με χαλαζία και άμμο, πυκνό αμμοχάλικο, κ.α.

Η θλιπτική αντοχή των βράχων που χρησιμοποιούνται για την λιθορριπή των CFRDs κυμαίνεται από 100 μέχρι 2500 kg/cm². Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θλιπτική αντοχή των βράχων που χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ 500 και 1500kg/cm².

Ο Cooke διαπίστωσε ότι, κατά την επιλογή του βράχου θα πρέπει απαραίτητως να ελέγχεται η συμπεριφορά του σε διαβροχή. Σε περίπτωση που ο βράχος σπάει και χάνει την διαπερατότητα του με την συμπύκνωση, θα πρέπει να κατασκευαστούν ζώνες αποστράγγισης.

Για την κοκκομετρία της λιθορριπής ο Cooke διατύπωσε το 1984 τις ακόλουθες προδιαγραφές οι οποίες και ακολουθούνται στα περισσότερα CFRDs :

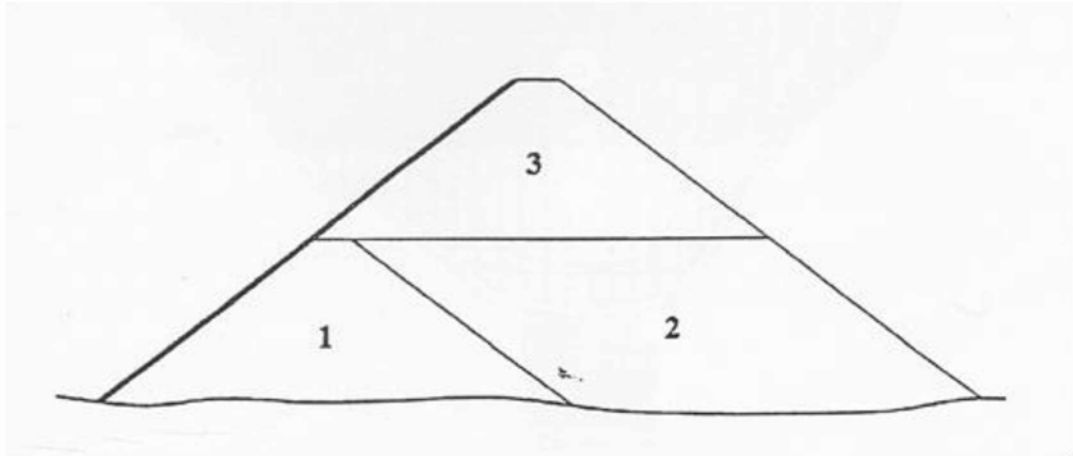
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 50% της λιθορριπής να έχει διάμετρο > 25 mm.
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 6% των κόκκων να είναι άργιλος.
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 10% των κόκκων να είναι μικρότερο των 0.075 mm
- Δεν θα πρέπει πάνω από το 20% των κόκκων να έχει διάμετρο < 4.76 mm (Fell et al, 2005).

Για την επιλογή της κατάλληλης κοκκομετρίας για τη λιθορριπή λαμβάνονται και οι εξής παράμετροι:

- Το μέγιστο μέγεθος κόκκου καθορίζεται ανάλογα με το πάχος της στρώσης ώστε να εξασφαλίζει ομαλές επιφάνειες. Η κοκκομετρική διαβάθμιση θα πρέπει να καταλήγει σε διαπερατή λιθορριπή.
- Το κοκκώδες υλικό της λιθορριπής θα πρέπει να επιλέγεται ώστε να είναι όσο το δυνατόν διαθέσιμου μεγέθους για να ελαχιστοποιούνται απώλειες λόγω υπέρ/υποδιάστασης.

Ο τρόπος κατασκευής του αναχώματος είναι εξίσου σημαντικός. Γι' αυτό το λόγο η κατασκευή λιθορριπτων φραγμάτων ενδείκνυται να γίνεται τμηματικά. Το κάθε στάδιο κατασκευής μπορεί να διεκπεραιωθεί ξεχωριστά από τα άλλα μη έχοντας περιορισμούς όπως υφίστανται σε άλλους τύπους κατασκευής φραγμάτων. Η αλληλουχία της κατασκευής των τμημάτων του CFRD (πλίνθος, ανάχωμα, πλάκα) μπορεί να προσαρμοστεί στο εκάστοτε φράγμα και είναι πολύ σημαντική για τη συνολική συμπεριφορά του φράγματος. Σε φράγματα που κατασκευάζονται σε πολλά στάδια η τήρηση της αλληλουχίας των βημάτων αποδεικνύεται πως θα πρέπει να ακολουθείται αυστηρά.

Ένας γενικός τρόπος διάταξης της σταδιακής κατασκευής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.1.6: Σταδιακή κατασκευή του αναχώματος (ANCOLD,1991).

1.2 Μέθοδος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων – FEM

Οι Clough et al (1984) ήταν οι πρώτοι μελετητές των CFRDs που χρησιμοποίησαν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός γεωφράγματος και έκτοτε η FEM αποτελεί απαραίτητο μέσον για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς λιθόρριπτων και χωμάτινων φραγμάτων. Οι Clough et al (1984) χρησιμοποίησαν απλό γραμμικό ελαστικό μοντέλο για να προσομοιάσουν τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών του φράγματος. Με τις εξελίξεις όμως στον τομέα του προγραμματισμού, αναπτύχθηκαν πιο εξελιγμένα μοντέλα προσομοίωσης όπως το μη-γραμμικό υπερβολικό μοντέλο των Duncan & Chang (1970).

Κεφάλαιο 2 Συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος - CFRD

Παρόλο που απαιτούνται λίγες αναλύσεις για τον σχεδιασμό των CFRD, διάφορες αναλύσεις είναι προτεινόμενες να χρησιμοποιήσει ο μηχανικός για την αξιολόγηση της απόδοσης του φράγματος καθ' όλη τη διάρκεια του έργου από την κατασκευή, την πρώτη πλήρωση δεξαμενής, και την φυσιολογική λειτουργία του έργου. Εκτιμήσεις της συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια ενός ακραίου συμβάντος, όπως ένας σεισμός ή οι μεγάλες πλημμύρες είναι χρήσιμες για τη σύγκριση μετά από ένα τέτοιο γεγονός. Οι περισσότερες λεπτομέρειες σχεδιασμού αναπτύσσονται με βάση το προηγούμενο και την κατανόηση του κατασκευαστικού κανονισμού, τις συνθήκες και τα δομικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στο φράγμα.

Αυτό το κεφάλαιο συνοψίζει απλουστευμένες αναλύσεις που μπορούν να εκτελεστούν για την αξιολόγηση της στατικής και δυναμικής σταθερότητας, κατασκευαστικού κανονισμού της μετατόπισης και της εισροής νερού. Παρακάτω συνοψίζονται επίσης, τα αίτια παραμορφώσεων πολλών φραγμάτων λιθορριπής που λειτουργούν ικανοποιητικά μέχρι και σήμερα.

- Συμπύκνωση με βαρύτερους στρωτήρες από τους τυπικούς (10 tn) δεν εγγυάται μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (περίπτωση Tiangesquiao: στρωτήρας 15 tn).

- Το τελικό στάδιο της 1ης πλήρωσης αποδεικνύεται ότι είναι το πιο κρίσιμο για το άνω μέρος της πλάκας. Υπάρχουν πολλές καταγραφές για ρηγμάτωση σε αυτή τη χρονική στιγμή (π.χ. φράγμα Itarébi).
- Η διαβροχή της λιθορριπής σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ. όχι σε αποσαθρωμένες λιθορριπές), συντελεί δραστικά στη βελτίωση των ιδιοτήτων της λιθορριπής και της απόκρισης του φράγματος.
- Απότομες κλίσεις των συνοριακών γραμμών μεταξύ των ζωνών ενισχύουν τη ρηγμάτωση και τη διεύρυνση των αρμών. Παρόμοιες συνέπειες θα είχε μια εκσκαφή στα κατάντη ενός φράγματος και δεν συνιστάται.
- Η μια εργασία θα πρέπει να διαδέχεται την άλλη με την κατάλληλη σειρά και τρόπο. Πρώτα πρέπει να κατασκευάζεται η λιθορριπή και μετά να τοποθετείται η πλάκα. Καθώς και πρώτα πρέπει να υποχωρούν τα φαινόμενα του ερπυσμού και μετά να ξεκινά η πλήρωση της δεξαμενής. Όμως, όταν οι συνθήκες επιβάλλουν την πρόωγη εκτέλεση κάποιων βημάτων, όπως π.χ. στο φράγμα El Cajon, τα μεγάλα προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με συνεχή παρακολούθηση των παραμορφώσεων και μέτρα ενίσχυσης της πλάκας, η οποία καταπονείται ιδιαίτερα (Filho & Pinto, 2005).

2.1 Στατική Συμπεριφορά των CFRD

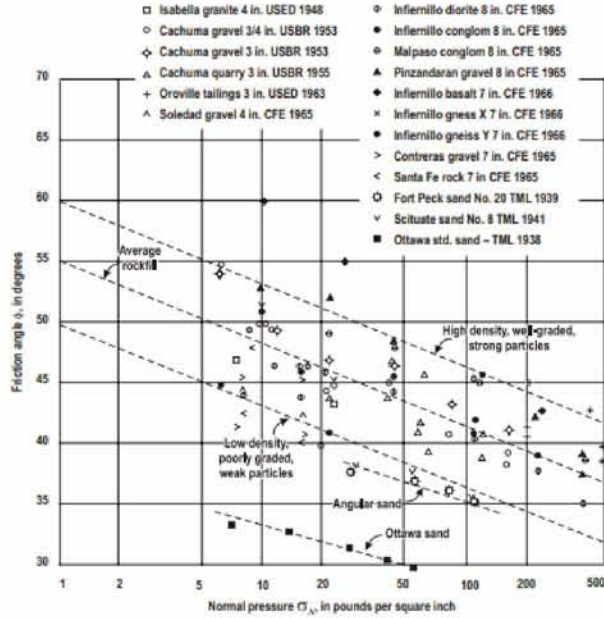
2.1.1 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ROCKFILL

Οι Leps (1970) επανεξέτασαν την αντοχή διάτμησης του συμπυκνωμένου πετρώματος και του χαλικιού όπως μετρήθηκε με τη χρήση εργαστηριακών τριξονικών δοκιμών μεγάλης

διαμέτρου. Το συνοπτικό σχήμα των δεδομένων, φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Η διατμητική αντοχή, μετρούμενη από τη γωνία εσωτερικής τριβής, απεικονίζεται γραφικά σε σχέση με την κανονική τάση στο επίπεδο αστοχίας. Σημειώνεται ότι η διατμητική αντοχή δεν περιλαμβάνει συνοχή. Τα δεδομένα δείχνουν σαφώς τη μεταβολή της αντοχής σε διάτμηση με την ορθή πίεση. Σε γενικές γραμμές, οι Leps διαπίστωσαν ότι:

- Σε κύρια τάση κάτω από περίπου 70 kPa, η γωνία εσωτερικής τριβής ποικίλλει από περίπου 45° για χαμηλή πυκνότητα, κακώς ταξινομημένα αδύναμα υλικά έως και 60° για υψηλή πυκνότητα, καλά διαβαθμισμένα ισχυρά υλικά. Οι Leps καθόρισαν τα αδύναμα σωματίδια ως βράχους που είχαν μονοαξονική αντοχή σε θλίψη από 3,4 έως 17,2 MPa και ισχυρά σωματίδια ως βράχος μια μονοαξονική θλιπτική αντοχή από 69 έως 207 MPa.
- Οι γωνίες τριβής μειώνονται κατά 6° ή 7° κατά την δεκαπλάσια αύξηση της κανονικής πίεσης στο επίπεδο αστοχίας.
- Τα καλά διαβαθμισμένα υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάτμηση από τα υλικά με όχι καλή διαβάθμιση.
- Υλικά υψηλότερης πυκνότητας παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή διατμήσεως από υλικά χαμηλής πυκνότητας.
- Τα γωνιακά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάτμηση από τα στρογγυλεμένα υλικά.
- Τα ξηρά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή διατμήσεως από τα κορεσμένα υλικά.
- Η θλιπτική αντοχή του υλικού του βράχου προέλευσης επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της συμπύκνωσης. Η θλιπτική αντοχή του υλικού

προέλευσης αποδείχτηκε ότι δεν έχει άμεση επίδραση στη διατμητική αντοχή της λιθορριπής (Marsal, 1967, Marachi et al, 1972).



Σχήμα 2.1: Διατμητική αντοχή της Λιθορριπής από μεγάλες τριαξονικές δοκιμές πετρώματος (Leps, 1970) [23].

Διάφορες μελέτες της διατμητικής αντοχής του πετρώματος Marsal 1973 [25], Barton και Kjaernli 1981 [24], Charles και Watts 1980[26], ICOLD 1993 [27] και άλλοι) επιβεβαίωσαν ότι η πραγματική συμπεριφορά του φράγματος λιθορριπής είναι μη γραμμική και ότι η σχέση μεταξύ της διατμητικής αντοχής και της ορθής τάσης έχει τη μορφή:

$$\tau = A * (\sigma')^b$$

όπου:

- τ = διατμητική αντοχή
- σ' = ενεργός τάση
- A, b = εμπειρικοί συντελεστές που εξαρτώνται από τον τύπο του βράχου

2.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

Η ανάλυση της ευστάθειας των πρανών πραγματοποιείται με μία απλή μη γραμμική ανάλυση. Επειδή ο σύγχρονος εξοπλισμός συμπίκνωσης μπορεί εύκολα και συστηματικά να δημιουργήσει μια πυκνή, υψηλής αντοχής πλήρωση, οι κλίσεις της CFRD επιλέγονται με βάση:

- Το ύψος του φράγματος. Κάπως πιο επίπεδα πρανά επιλέγονται για φράγματα που υπερβαίνουν τα 120 μ.
- Η ποιότητα του πετρώματος. Τα πιο επίπεδα πρανά επιλέγονται όταν χρησιμοποιούνται πετρώματα φτωχότερης ποιότητας.
- Η σεισμικότητα της περιοχής στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί το CFRD. Πιο επίπεδα πρανά επιλέγονται όταν το έργο βρίσκεται σε περιοχή με ισχυρή σεισμικότητα.

Πρανά με απότομη κλίση (π.χ. 1,2H:1V) έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατάντη πλευρά μεταξύ των οδικών οδών πρόσβασης σε ορισμένα CFRD.

2.1.3 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Ο ρόλος της συμπίκνωσης της λιθορριπής είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του αναχώματος. Η εκτεταμένη συμπίκνωση της λιθορριπής των CFRDs ήταν η πρακτική που αύξησε θεαματικά την ασφάλεια αυτού του τύπου φραγμάτων και το κύριο χαρακτηριστικό τους μαζί με την πλάκα σκυροδέματος. Παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπίκνωση της λιθορριπής, είναι το πάχος στρώσης, το ποσοστό υγρασίας, και ο αριθμός των διελεύσεων του στρωτήρα κατά τη συμπίκνωση.

Για καλής ποιότητας λιθορριπές συνιστάται συμπύκνωση με 4-8 διελεύσεις από μηχανή 10 tn και ο Cooke επισημαίνει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις για καλύτερη διάσθρωση από τη χρήση βαρύτερων μηχανημάτων. Τα βαρύτερα μηχανήματα θρυμματίζουν τη λιθορριπή, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα (Fell et al., 2005 [28]). Η συμπύκνωση είναι πιο αποτελεσματική σε λιθορριπές καλύτερα διαβαθμισμένες και λιγότερο γωνιώδεις (Ozkuzukiran, 2005).

Όσον αφορά τον αριθμό διελεύσεων, οι ερευνητές διαπιστώνουν ότι με περισσότερες διελεύσεις του στρωτήρα επιτυγχάνεται πυκνότερη και λιγότερο παραμορφώσιμη λιθορριπή, ενώ οι παχύτερες στρώσεις δεν διευκολύνουν τη συμπύκνωση.

2.1.4 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Σύμφωνα με δοκιμές που έγιναν σε διάφορες λιθορριπές, με διαφορά στο σχήμα των κόκκων, επισημαίνεται ότι το σχήμα των κόκκων έχει επίδραση στην παραμορφωσιμότητα και τη διατμητική αντοχή. Είναι γνωστό ότι σε άμμους με μικρή διάμετρο κόκκου η γωνία διατμητικής αντοχής αυξάνει γενικά με το γωνιώδες σχήμα, διότι αυξάνει η αλληλεμπλοκή των κόκκων. Όμως τόσο η διάμετρος κόκκου και όσο και η περιβάλλουσα τάση είναι δυνατόν να επηρεάζουν σημαντικά την σχέση μεταξύ σχήματος κόκκου και της γωνίας διατμητικής αντοχής. Ο Leps (1972) διαπίστωσε μεγαλύτερη γωνία διατμητικής αντοχής για πιο γωνιώδεις κόκκους, όμως στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει σε μικρές τιμές της περιβάλλουσας τάσης.

Περισσότερο στρογγυλεμένοι κόκκοι έχουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, σε συνδυασμό με καλή διαβάθμιση και συμπύκνωση. Η στρογγυλεμένη λιθορριπή υφίσταται δυσκολότερα μείωση του όγκου εξαιτίας της συμπίεσης, της αναδιάταξης και του θρυμματισμού των κόκκων. Αυτό συνεπάγεται αύξηση της δυσκαμψίας. Αντίθετα, οι

γωνιώδεις κόκκοι σε υψηλές τάσεις θρυμματίζονται και οδηγούν σε μεγαλύτερες ογκομετρικές παραμορφώσεις.

Επίσης, πολύ γωνιώδεις λιθορριπές εμφανίζουν αρχικά (υπό την επιβολή μικρών τάσεων) φαινομενικά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας απ' αυτό που στην πραγματικότητα έχουν (βλ. Mohale και Karahnjukar). Στην περίπτωση αύξησης της περιβάλλουσας τάσης όμως, εξαιτίας του έντονου θρυμματισμού των γωνιωδών κόκκων, μειώνεται η αλληλεμπλοκή και η λιθορριπή γίνεται τελικά πιο παραμορφώσιμη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η λύση είναι η ισχυρότερη συμπύκνωση (Johannesson, 2007).

2.1.5 ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο θρυμματισμός είναι ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε σε πολλά φράγματα, είτε κατά τη διάρκεια της κατασκευής, είτε και κατά τη λειτουργία. Επιδρά άμεσα στη συμπεριφορά του φράγματος και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση.

Η ευθραυστότητα ή μη των κόκκων, όπως διαπιστώνει ο Marsal, είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή και τη συμπίεστικότητα.

Ο θρυμματισμός εντείνεται με την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης. Η αύξηση αυτή σταματάει για μια οριακή τιμή περιβάλλουσας τάσης η οποία είναι ανάλογη με την ποιότητα της λιθορριπής. Το ποσοστό της λιθορριπής που θρυμματίζεται σχετίζεται και με την κοκκομετρία της. Η διατμητική αντοχή των κόκκων μειώνεται όσο διαρκεί ο θρυμματισμός (Σχ. 3.7) (Marsal, 1967).

Όταν όμως ο θρυμματισμός παρέλθει, η λιθορριπή αποκτά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας λόγω της καλύτερης αναδιάταξης των κόκκων που επιτυγχάνεται. Επομένως, η επίδραση του θρυμματισμού στη συνολική συμπεριφορά του φράγματος εξαρτάται από τη χρονική στιγμή που θα σημειωθεί ο θρυμματισμός. Αν ο θρυμματισμός συμβεί κατά τη

συμπύκνωση, τελικώς η πλάκα θα εδραστεί πάνω σε πιο καλά συμπυκνωμένη και πιο δύσκαμπτη λιθορριπή, από την περίπτωση που δεν γίνει θρυμματισμός.

Όμως, αν η λιθορριπή υποστεί θρυμματισμό από τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία, αυτό θα επιφέρει πολύ μεγάλες παραμορφώσεις στη λιθορριπή θέτοντας σε άμεσο κίνδυνο και την πλάκα.

Πρέπει να σημειωθεί επιπλέον ότι ο θρυμματισμός εγκυμονεί τον κίνδυνο ότι όταν ολοκληρωθεί, καθιστά τη λιθορριπή πιο λεπτόκοκκη και επομένως λιγότερο διαπερατή. Το νερό μπορεί να εγκλωβιστεί στις θρυμματισμένες περιοχές και να αναπτυχθούν υπερπίεσεις πόρων ή να γίνει απομάκρυνση των λεπτόκοκκων με τη ροή, πράγμα πολύ επικίνδυνο, ιδιαίτερα για τη ζώνη όπου εδράζεται η πλάκα. Για το λόγο αυτό σε λιθορριπές επιρρεπείς σε θρυμματισμό θα πρέπει να υπάρχουν αποστραγγιστικές ζώνες με φίλτρα.

2.1.6 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η υψηλή διαπερατότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των λιθορριπτών φραγμάτων. Εξαιτίας της διαπερατότητας της λιθορριπής τους, τα CFRDs δεν κινδυνεύουν από ρευστοποίηση καθώς δεν εγκλωβίζεται νερό στο εσωτερικό τους και δεν δημιουργούνται υπερπίεσεις πόρων. Μεγαλύτερη διαπερατότητα προβλέπεται για την ανάντη ζώνη του φράγματος, ώστε το νερό που θα εισρεύσει σε περίπτωση ρηγμάτωσης της πλάκας να διαφύγει άμεσα. Για τις υπόλοιπες ζώνες θα πρέπει να ικανοποιούνται τα «κριτήρια φίλτρου» ώστε να αποφεύγεται η απομάκρυνση των μικρότερων κόκκων από την ανάντη προς την κατάντη πλευρά. Έτσι, και στα κατάντη, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση πολύ αδιαπέρατης λιθορριπής, γιατί αν το φράγμα υπερχειλίσει και το νερό φτάσει στη στέψη της λιθορριπής, είναι απαραίτητο να διαφύγει μέσα από το σώμα της λιθορριπής και όχι από το κατάντη πρηνές (βλ. παρακάτω φράγμα Gouhou) (Fell et al, 2005).

2.1.7 ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Ένα από τα στάδια κατασκευής του αναχώματος των CFRDs είναι η ύγρανση της λιθορριπής πριν υποβληθεί σε συμπίκνωση με στρωτήρα. Η διαβροχή μαλακώνει και διατάσσει καλύτερα τη λιθορριπή διευκολύνοντας έτσι τη συμπίκνωσή της. Ανεπαρκής διαβροχή είναι μια από τις αιτίες κακής συμπίκνωσης. Αποτελεί ακόμα, μια μορφή ελέγχου της ποιότητας της διαθέσιμης λιθορριπής. Βράχοι που με την ύγρανση μαλακώνουν δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται στις κρίσιμες περιοχές της λιθορριπής (δηλ. στην περιοχή που φέρει την πλάκα και στη στέψη) παρά μόνο στην κατάντη ζώνη αν υπάρχει αποστραγγιστικός αγωγός. Ο λόγος είναι ότι τέτοιοι βράχοι, είναι επιρρεπείς σε καθιζήσεις στις επερχόμενες βροχές και πλημμύρες της δεξαμενής και σε ερπυστικές παραμορφώσεις.

Η συνήθης ποσότητα νερού που προστίθεται είναι 15-20% του όγκου της λιθορριπής και επιτυγχάνει μείωση της συμπίεστικότητας και μικρή βελτίωση της ποιότητας. Σε βράχους μικρής διαπερατότητας απαιτείται προσθήκη μικρής ποσότητας νερού.

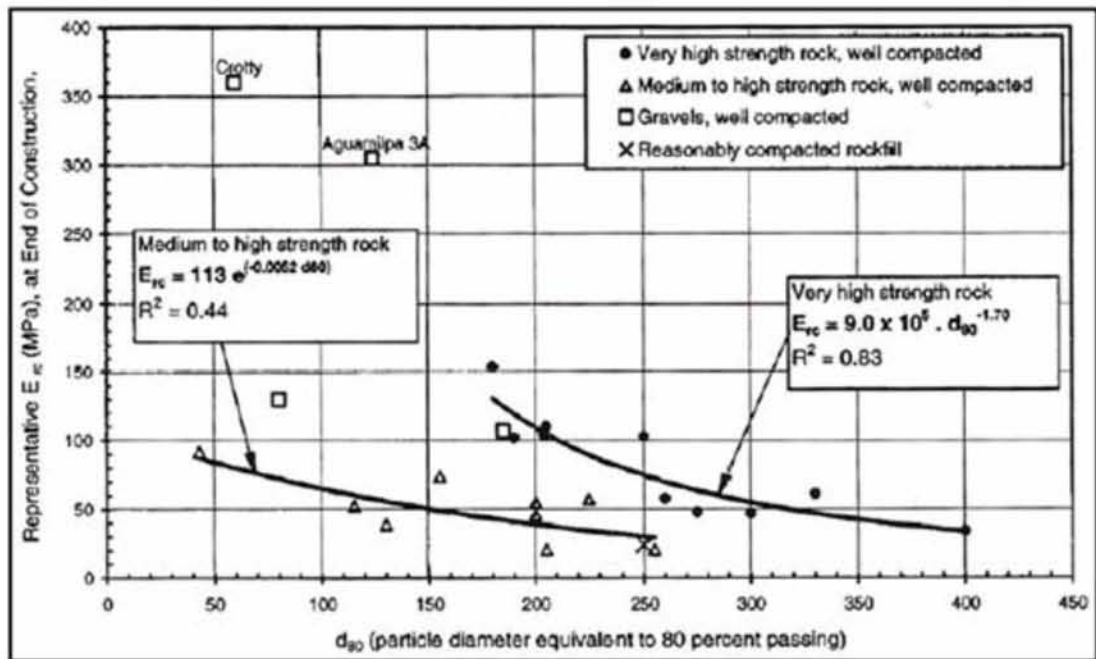
Η διαβροχή δεν είναι δυνατή σε συνθήκες παγετού. Επιπλέον, μπορεί να δυσχεράνει την συμπίκνωση του χαλικιού όταν αυτό είναι ιλυώδες και για το λόγο αυτό δεν προστίθεται νερό στο χαλίκι.

2.1.8 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ

Η κοκκομετρική διαβάθμιση της λιθορριπής θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη επιμέλεια. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου πολύ καλά διαβαθμισμένες λιθορριπές συμπεριφέρθηκαν άριστα παρά την μικρή τους αντοχή. Κατ' αρχήν, η καλή κοκκομετρία επιφέρει σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής της λιθορριπής.

Για λιθορριπές ίδιου σχήματος, η γωνία διατμητικής αντοχής μπορεί να διαφέρει ως και 15° λόγω της διαφορετικής κοκκομετρίας (Marsal,1967). Η καλή κοκκομετρική διαβάθμιση εξασφαλίζει επαρκή διαπερατότητα και είναι εξίσου κρίσιμη με το δείκτη κενών για την ανάντη ζώνη (Johannesson, 2007).

Επιπλέον, διαπιστώνεται η άμεση επιρροή της κοκκομετρίας στη δυσκαμψία της λιθορριπής. Σύμφωνα με το εμπειρικό διάγραμμα των Hunter & Fell (2003) [29] (Σχ. 2.2) προκύπτει ότι σε μεγαλύτερες τιμές του D80 αντιστοιχεί μικρότερη τιμή μέτρου ελαστικότητας. Έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής ομοιομορφίας $C_u = D_{80}/D_{10}$ μειώνεται όταν η τιμή του D80 αυξάνει, και επομένως η λιθορριπή είναι πιο ομοιομορφή. Συνεπώς, η πιο φτωχή κοκκομετρική διαβάθμιση (μεγαλύτερο D80) συνεπάγεται και πιο παραμορφώσιμη λιθορριπή.



Σχήμα 2.2: Αντιπροσωπευτικό τέμνον μέτρο ελαστικότητας συμπυκνωμένης λιθορριπής κατά το πέρας της κατασκευής συναρτήσει της αντοχής και της κοκκομετρικής διαβάθμισης (Hunter & Fell, 2003).

2.1.9 ΧΑΛΙΚΙ

Ως υλικό λιθορριπής σε πολλά φράγματα έχει χρησιμοποιηθεί χαλίκι με πολύ καλύτερη απόδοση μάλιστα από τη συνήθη λιθορριπή. Ο Mohri το 1999 πρότεινε τη χρήση αλλουβιακού χαλικιού στο ανάντη 1/3 του φράγματος με στόχο τον περιορισμό των παραμορφώσεων και της ρηγμάτωσης. Η πρακτική αυτή εφαρμόστηκε σε πολλά CFRDs και απέδωσε μεγάλη δυσκαμψία. Τα φράγματα που αποτελούνται αποκλειστικά από χαλίκι είναι ελάχιστα (Fell et al, 2005).

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι σπουδαιότερες ιδιότητες της λιθορριπής από χαλίκι:

Το χαλίκι κατέχει 5-πλάσια έως και 10-πλάσια δυσκαμψία της λιθορριπής. Σύμφωνα με εμπειρικά δεδομένα για τα μέτρα ελαστικότητας λιθορριπών από χαλίκι, ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του χαλικιού κατά την φόρτιση προς το μέτρο ελαστικότητας, μετά το πέρας της κατασκευής (Erf/Erc) είναι σχετικά μικρότερος (Hunter et al., 2003). Αυτό εξηγείται και από την μεγάλη δυσκαμψία που παρουσιάζεται στο χαλίκι χωρίς την πίεση του νερού, σε αντίθεση με την απλή λιθορριπή που η δυσκαμψία της αυξάνεται μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Το χαλίκι επίσης είναι πιο οικονομικό υλικό από τη λιθορριπή καθώς, απαιτεί λιγότερη και πιο οικονομική επεξεργασία, χαμηλό κόστος εκσκαφής και επίχωσης.

Στις ζώνες από χαλίκι μπορεί να προστεθεί μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων, αρκεί να διαμορφωθούν φίλτρα αποστράγγισης στο άνω μέρος του αναχώματος και τις διεπιφάνειες μεταξύ των ζωνών. Σε περιπτώσεις χρήσης χαλικιού στην ανάντη ζώνη θα πρέπει να εξασφαλίζεται μεγάλη δυσκαμψία και για την κατάντη λιθορριπή, ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλες διαφορές δυσκαμψίας μέσα στο φράγμα.

Το χαλίκι προτιμάται για ψηλά CFRDs. Επιπλέον, για λιθορριπές από χαλίκι συνιστώνται και ηπιότερες κλίσεις (1.5-1.6 H : 1V) Η χρήση χαλικιού επομένως για την κατασκευή ψηλών φραγμάτων απαιτεί και μεγάλη έκταση (Fell et al, 2005).

2.1.10 Μορφολογία της κοιλάδας

Το σχήμα της κοιλάδας έχει πολύ μεγάλη επίδραση στις καθιζήσεις του αναχώματος εξαιτίας τρισδιάστατων φαινομένων που επηρεάζουν τις κατακόρυφες τάσεις στις πλαγιές της κοιλάδας. Το κυριότερο φαινόμενο που χαρακτηρίζει τις στενές κοιλάδες είναι το φαινόμενο της ανίδωσης (arching).

Το φαινόμενο της ανίδωσης είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η διάχυση των τάσεων δεν είναι κατακόρυφη, αλλά παρεκκλίνει προς τις πλαγιές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην μείωση της τιμής της τάσης στο κάτω μέσον της κοιλάδας. Γι' αυτό το λόγο η λιθορριπή είναι πιο αποτελεσματική σε μια στενή κοιλάδα απ' ότι σε μια με άπειρο πλάτος. Αποδεικνύεται ακόμα ότι η επίδραση του φαινομένου είναι πιο έντονη στη φάση πλήρωσης της δεξαμενής (Chan & Zhang, 2005).

Το παράδειγμα του φράγματος της Μεσοχώρας, που είναι θεμελιωμένο σε πολύ στενή κοιλάδα, αποδεικνύει την αναγκαιότητα των τρισδιάστατων αναλύσεων για την εκτίμηση του arching και την ρεαλιστική προσέγγιση των καθιζήσεων.

Επίσης, η ύπαρξη μίας μη ομαλής μορφολογίας της κοιλάδος ή των αντρεισμάτων (εναλλαγές της κλίσης, ανώμαλη γεωμετρία των επιφανειών) οδηγεί σε απότομες αλλαγές της κλίσης της πλίνθου και της υποκείμενης δυσκαμψίας, και συχνά προκαλεί κύρτωση στο κάτω μέρος της πλάκας (Fell et al, 2005). Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτούνται εξομαλύνσεις των επιφανειών, εκσκαφές και πρόβλεψη περισσότερων μεταβατικών ζωνών.

2.2 Σεισμική Συμπεριφορά των CFRD

Ο δείκτης σεισμικής επικινδυνότητας που εισήχθη από τον Bureau το 1985 [18] ορίζεται ως εξής:

$$ESI=PGA*(M-4,5)^2$$

Όπου:

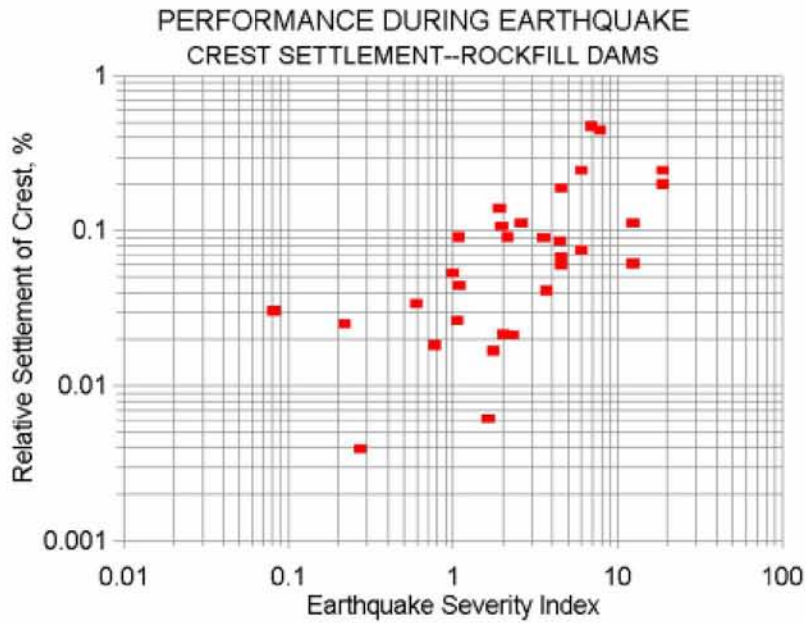
ESI = δείκτης σεισμικής επικινδυνότητας

PGA = μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση εδάφους

M = μέγεθος σεισμού

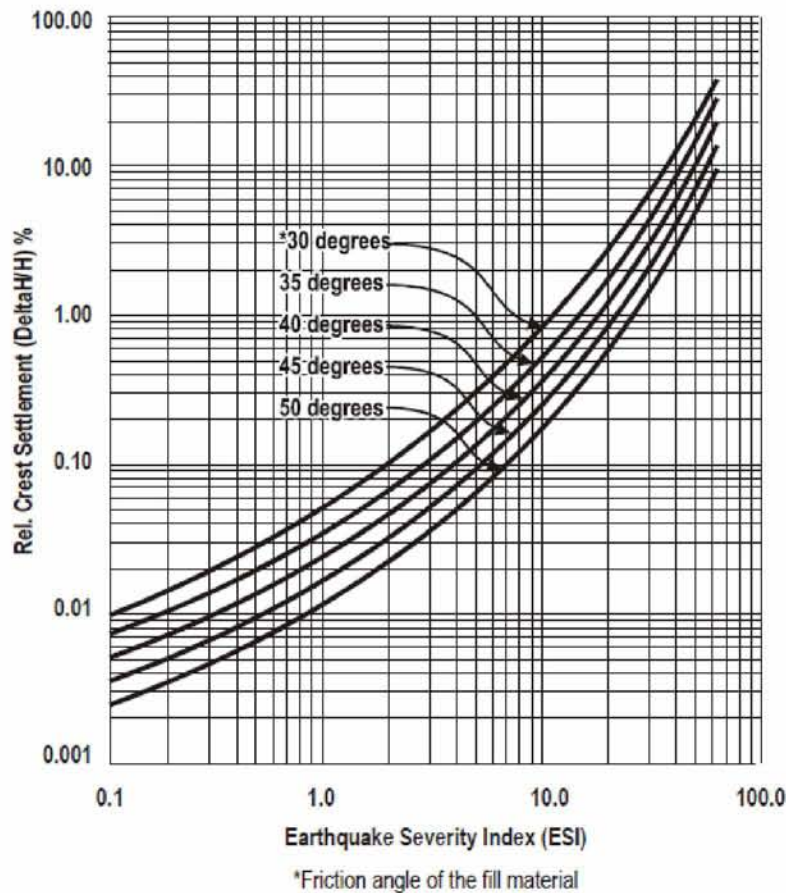
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, υπάρχει μια στενή σχέση μεταξύ της σχετικής καθίζησης και του δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας [18].

Γενικά, και οι δύο τύποι φραγμάτων λιθορριπής, δηλαδή τα φράγματα με χωμάτινο πυρήνα (ECRD) και με πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά (CFRD), έχουν αποφέρει θετικά αποτελέσματα συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμών. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τύπων φραγμάτων είναι ότι το ανάντη κέλυφος του ECRD είναι κορεσμένο, ενώ στα CFRD, κανένα τμήμα του αναχώματος δεν είναι κορεσμένο. Εκτός από τις πιθανότητες ρωγμών στο σκυρόδεμα ή στο τοίχωμα των παραπέτων, η απόδοση των CFRD κατά τη διάρκεια του σεισμού αναμένεται να είναι τόσο καλή όσο των ECRD.



Σχήμα 2.3: Συμπεριφορά φραγμάτων λιθορριπής: καθίζηση στέψης ως προς τον δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας [18]

Ο Bureau (1997) [18] παρουσίασε ένα γράφημα (Σχήμα 2.4) που δίδει την σχετική μετατόπιση στέψης ως προς τον δείκτη ESI (Earthquake Severity Index) για αρκετές τιμές της γωνίας τριβής του υλικού πλήρωσης. Το διάγραμμα βασίζεται σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορα φράγματα λιθορριπής. Η καθίζηση λαμβάνεται από το διάγραμμα κανονικοποιημένη ως προς το ύψος του φράγματος (ως %). Η χρήση αυτής της μεθόδου υποδηλώνει καθίζηση περίπου δύο μέτρων κατά τη διάρκεια του μέγιστου σεισμού σχεδιασμού (MDE), όταν χρησιμοποιείται γωνία τριβής 40° . Χρήση γωνίας τριβής των 50° θα έδειχνε μια καθίζηση της κορυφής της τάξης του 1 μέτρου.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Καθίζησης Στέψης ως προς τον δείκτη ESI (Bureau 1997) [18]

Κατά την διάρκεια του μέγιστου σεισμού σχεδιασμού είναι πιθανό να δημιουργηθούν ρωγμές και μετατόπιση της στέψης, καθώς και ασυνέχειες (άνοιγμα αρμών) στην πλάκα σκυροδέματος. Για να αποφευχθούν τα αρνητικά σενάρια κατασκευής φράγματος σε σεισμό, τρόποι πρόβλεψης είναι η κατασκευή πλάκας σκυροδέματος από επεξεργασμένα αδρανή υψηλής αντοχής. Τα υλικά δεν πρέπει να είναι κορεσμένα, έτσι ώστε να μην υπάρχουν παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού ή και μετά από αυτόν, λόγω της αυξημένης πίεσης πόρων του εσωτερικού του φράγματος. Η χωροθέτηση των υλικών του φράγματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε η διαπερατότητα να αυξάνεται σταδιακά από την ανάντη προς την κατάντη πλευρά.

Εάν το ανάχωμα αποτελείται από ημι-διαπερατό άμμο και χαλίκια, με κεκλιμένη ζώνη αποστράγγισης αποτελούμενη από θρυμματισμένο βράχο, πρέπει να διαχωριστούν οι ανάντη ζώνες από τις κατάντη ζώνες άμμου, χαλικιού και πετρώματος. Αυτή η ζώνη αποστράγγισης πρέπει να είναι συνεχής από τον ένα πόδα μέχρι τον άλλο και από τη βάση έως την κορυφή του φράγματος. Η διαρροή θα πρέπει να συνδεθεί με ένα στραγγιστήριο υψηλής χωρητικότητας που βρίσκεται στη βάση του φράγματος. Παρακολούθηση της ροής με ηλεκτρονικά μέσα πρέπει να ενσωματωθεί στο σχεδιασμό κατά τη διάρκεια της πρώτης πλήρωσης, κατά τη λειτουργία του έργου και αμέσως μετά από σεισμούς και πλημμύρες. Λαμβάνοντας έτσι υπόψη τις μετρήσεις των ρυθμών ροής, των παραμορφώσεων και των κινήσεων των αρθρώσεων αξιολογείται η συνολική απόδοση του φράγματος μετά τον σεισμό.

Κεφάλαιο 3 Αριθμητική ανάλυση της συμπεριφοράς του φράγματος Μεσοχώρας

3.1 Χαρακτηριστικά του φράγματος Μεσοχώρας

Η κατασκευή του φράγματος της Μεσοχώρας ολοκληρώθηκε το 1995. Το φράγμα είναι θεμελιωμένο σε μια στενή κοιλάδα του ποταμού Αχελώου, στη Βορειοδυτική Ελλάδα. Η λειτουργία του όμως δεν έχει ξεκινήσει ακόμα λόγω περιβαλλοντικών ενστάσεων και επαναπροσδιορισμού κάποιων περιβαλλοντικών όρων. Επομένως τα αποτελέσματα των σεισμικών αναλύσεων θα πρέπει να συγκριθούν με τη συμπεριφορά υπαρχόντων φραγμάτων. Για το λόγο αυτό, λήφθηκαν υπόψη καταγραφές από φράγματα με παρόμοια χαρακτηριστικά.

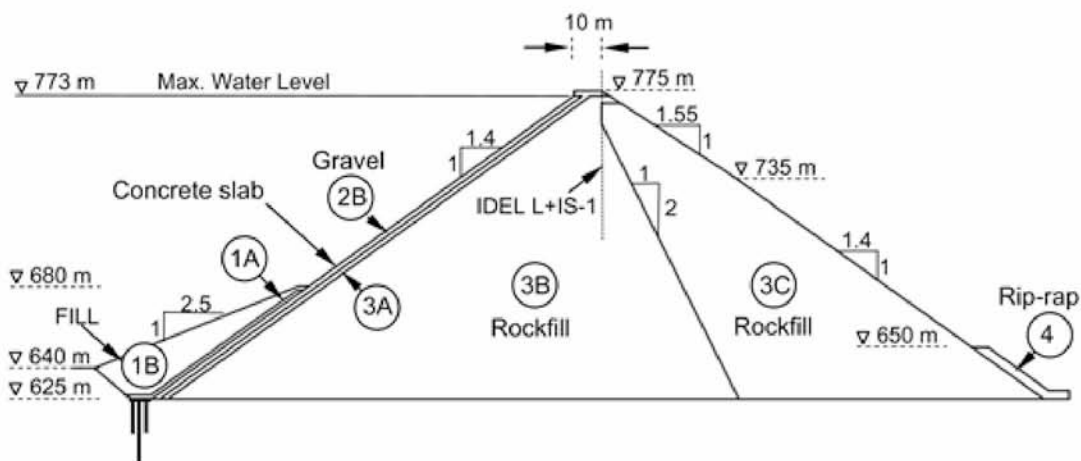
Το φράγμα της Μεσοχώρας [19] έχει ύψος 150 m (μέγιστη διατομή) και μήκος στέψης 350 m. Η ηλεκτρική ισχύς του είναι 160 MW και η αποθηκευτική του ικανότητα $228 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Η κλίση είναι ίση με 1.4:1 ανάντη και στα κάτω 110 m κατάντη, ενώ είναι ίση με 1.55:1 στα άνω 40m του κατάντη πρηνούς. Για τη λιθορριπή χρησιμοποιήθηκε υγιής και αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος, ο οποίος συμπυκνώθηκε με 4 διελεύσεις από στρωτήρα 12 tn σε στρώσεις πάχους 1 m ανάντη και 1.5 m κατάντη. Ο δείκτης κενών μετρήθηκε ίσος με 0.38. Η πλάκα τοποθετήθηκε πάνω σε ιδιαίτερα δύσκαμπτη ζώνη 4 m, από καλά διαβαθμισμένο και συμπυκνωμένο χαλίκι. Επίσης, για τον περιορισμό της εισροής, στο κάτω μέρος της πλάκας κατασκευάστηκε επίχωμα ύψους 55 m.



Σχήμα 3.1: Φράγμα Μεσοχώρας ανάντη πλευρά [22]



Σχήμα 3.2: Φράγμα Μεσοχώρας ανάντη πλευρά [22]



Σχήμα 3.3: Τυπική Διατομή Φράγματος της Μεσοχώρας [1]

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσουμε την διαδικασία μοντελοποίησης του φράγματος της Μεσοχώρας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του FLAC 2D (Itasca Inc, 1998) [15]. Το πρόγραμμα FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) είναι λογισμικό αριθμητικής μοντελοποίησης για προηγμένη γεωτεχνική ανάλυση εδάφους, βράχου, υπογείων υδάτων και ενίσχυση εδάφους σε δύο διαστάσεις. Το FLAC χρησιμοποιείται για την ανάλυση, προσομοίωση της συμπεριφοράς και το σχεδιασμό κάθε είδους έργων γεωτεχνικής μηχανικής.

Το FLAC εφαρμόζεται για την επίλυση διδιάστατων προβλημάτων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η μέθοδος μπορεί να διαμορφώσει σύνθετες συμπεριφορές, όπως προβλήματα που συνίστανται από διάφορα στάδια, μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, υλικά με μη γραμμική συμπεριφορά ή ασταθή συστήματα.

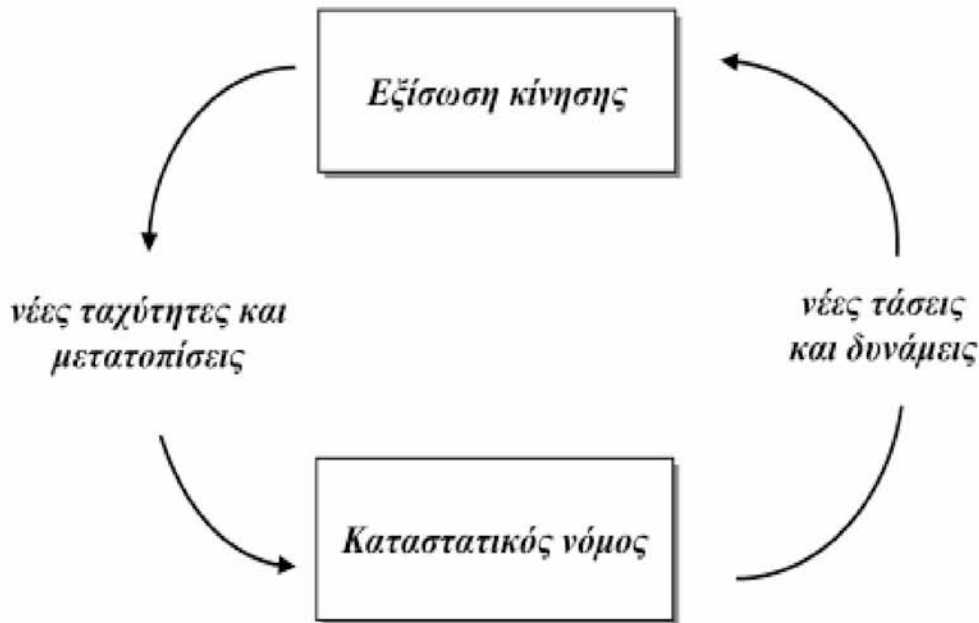
Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι ίσως η παλαιότερη αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση πολλών διαφορετικών εξισώσεων, δεδομένων αρχικών τιμών

και / ή οριακών συνθηκών. Στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, κάθε παράγωγος στο σύνολο των διαφορικών εξισώσεων αντικαθίσταται άμεσα από μια αλγεβρική έκφραση γραμμένη με όρους εντατικών μεγεθών του πεδίου (π.χ. τάση ή μετατόπιση) σε συγκεκριμένα σημεία στο χώρο.

Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει κύρια απαίτηση ότι οι ποσότητες πεδίου (π.χ. τάση και μετατόπιση) μεταβάλλονται σε κάθε στοιχείο με έναν προκαθορισμένο τρόπο, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες συναρτήσεις ελεγχόμενες από παραμέτρους. Η επίλυση περιλαμβάνει την προσαρμογή αυτών των παραμέτρων για την ελαχιστοποίηση του εύρους σφάλματος.

Η κύρια διαδικασία επίλυσης του FLAC φαίνεται στο παρακάτω Σχ.3.4. Στις Πεπερασμένες Διαφορές, δεν απαιτείται μόνρφωση καθολικού μητρώου ακαμψίας αλλά ούτε και επαναληπτική διαδικασία σε αντίθεση με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Η διαδικασία καλεί πρώτα τις εξισώσεις κίνησης για να αντλήσει νέες ταχύτητες και μετατοπίσεις από τις τάσεις και δυνάμεις του προβλήματος. Μετά την επίλυση των εξισώσεων σε αυτά τα σημεία και τον υπολογισμό των ταχυτήτων των αντίστοιχων κόμβων, καλείται ο καταστατικός νόμος για τον υπολογισμό των τάσεων. Μπορεί να φαίνεται περίεργο σαν τρόπος επίλυσης γιατί γενικά αν αλλάξει κάποια τάση επηρεάζει τα γειτονικά σημεία και τις ταχύτητες τους. Για αυτό το λόγο, το χρονικό βήμα που επιλέγεται σε μία επίλυση πρέπει να είναι τόσο μικρό ώστε να αποφευχθεί η επιρροή γειτονικού στοιχείου κατά τη μεταβολή της εντατικής κατάστασης σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Το καταστατικό προσομοίωμα δεν επεμβαίνει στον αλγόριθμο επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας παρά μόνο χρησιμοποιείται για να υπολογισθούν τα εντατικά μεγέθη αφού έχει επιτευχθεί ισορροπία.



Σχήμα 3.4: Υπολογιστικός κύκλος κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος στο FLAC (Itasca 2005) [15,19].

Για στατικά προβλήματα, η χρήση της εξίσωσης κίνησης στο FLAC εξασφαλίζει σταθερότητα στο σύστημα ακόμα και για περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστάθειας (π.χ. σε μη-γραμμικά υλικά κοντά στην αστοχία). Συμπεριλαμβάνοντας κατά την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας αδρανειακές δυνάμεις και μετατρέποντας μέρος της ενέργειας του συστήματος σε κινητική ενέργεια που αποσβένεται, επιτυγχάνεται πιο σωστή προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων καταστατικών προσομοιωμάτων που δημιουργούνται από το χρήστη. Επίσης, τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξάγονται με ελεγχόμενη ακρίβεια.

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (ο οποίος συγκρίνεται με τον κώδικα Flac2D στην παρούσα εργασία) βελτιώνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια και αποτελεί σημαντικό εργαλείο σε εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού, του μηχανολόγου μηχανικού, του αεροναυπηγού κλπ. Το πρόγραμμα ABAQUS μπορεί να προσφέρει πλήρη προσομοίωση

στην σταδιακή κατασκευή, στην στατική συμπεριφορά, στην δυναμική συμπεριφορά, στη ροή διαμέσου του εδάφους, στην διάχυση θερμότητας, κλπ. Διαθέτει μεγάλο αριθμό έτοιμων καταστατικών προσομοιωμάτων για διάφορα υλικά και διάφορες διεπιφάνειες μεταξύ υλικών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος είναι ότι επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων καταστατικών προσομοιωμάτων που δημιουργούνται από το χρήστη. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξάγονται με ελεγχόμενη ακρίβεια και μεγάλη ταχύτητα.

Για την δυναμική ανάλυση του φράγματος της Μεσοχώρας δημιουργήθηκε ένα διδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων διαφορών στο FLAC.

3.2 Στατική ανάλυση φράγματος Μεσοχώρας

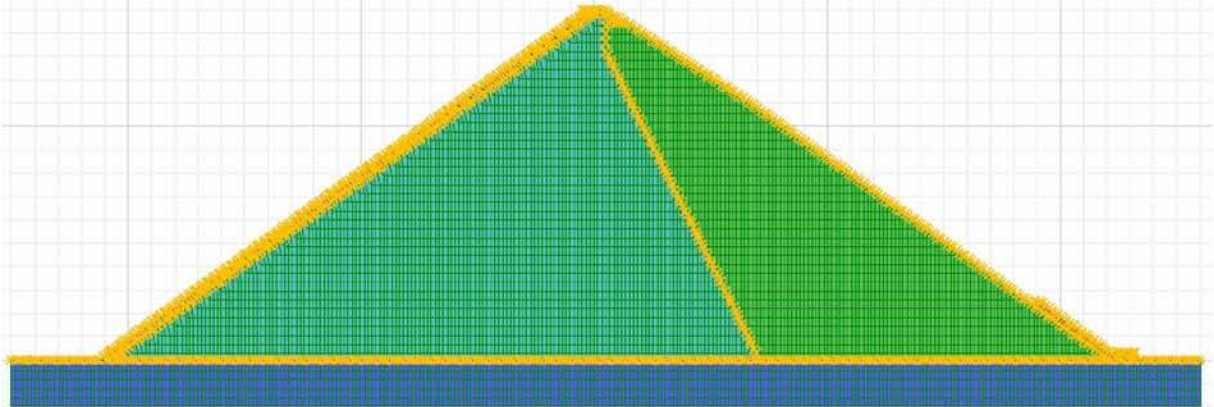
Προϋπόθεση για την δυναμική ανάλυση του φράγματος είναι ο προσδιορισμός των αρχικών τάσεων με στατική ανάλυση, η οποία πραγματοποιήθηκε σταδιακά σε 40 βήματα, προσομοιώνοντας την πραγματική σταδιακή κατασκευή με προσθήκη διαδοχικών στρώσεων.

3.2.1 Ορισμός καννάβου

Ορίστηκε ένας κάνναβος διαμόρφωσης της γεωμετρίας, οποίος έχει 300 στοιχεία στην οριζόντια διεύθυνση x και 50 στοιχεία στην κατακόρυφη διεύθυνση y. Τα στοιχεία του καννάβου στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχουν διαστάσεις 1,7m x 3,75 m.

3.2.2 Γεωμετρία του φράγματος

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γεωμετρία του φράγματος μετά τον διαχωρισμό



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση γεωμετρίας φράγματος.

3.2.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων των υλικών στις αντίστοιχες διαχωρισμένες ζώνες

Οι ιδιότητες των υλικών του επιχώματος που δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1. Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για τα εδαφικά υλικά είναι το ελαστοπλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb. Οι ιδιότητες της πλάκας σκυροδέματος ελήφθησαν από το αντίστοιχο άρθρο για το φράγμα της Μεσοχώρας «Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons» (Dakoulas, 2011) [1].

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες υλικών του φράγματος

Ζώνες Υλικών	Ιδιότητες Υλικών				
	Μέτρο Διάτμησης G (MPa)	Μέτρο Συμπίεστικότητας K (MPa)	Γωνία Τριβής ϕ (°)	Πυκνότητα D (kg/m ³)	Συνοχή c (KPa)
Foundation	100	200	35	2500	600
Gravel 2B	32	42,667	51	2150	20
Rockfill 3B	16	21,333	51	2150	20
Rockfill 3C	12	16	51	2150	20
Rip-Rap	12	16	51	2150	20

Το βασικό πέτρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του φράγματος της Μεσοχώρας τόσο για την λιθορριπή όσο και για την θεμελίωση, είναι ασβεστόλιθος.

3.2.4 Μέθοδος Προσομοίωσης Πλάκας Σκυροδέματος

Για μία αρχική δοκιμή προσομοίωσης της πλάκας σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά χρησιμοποιήθηκε το δομικό στοιχείο δοκού (beam structural element). Η πλάκα κατασκευάστηκε από τον ακριανό κόμβο στον πόδα του φράγματος της ανάντη πλευράς έως τον αντίστοιχο κόμβο στην στέψη.

Η διεπιφάνεια μεταξύ πλάκας σκυροδέματος – ζώνης χαλικιών (Gravel 2B) περιλαμβάνει διατμητικά ελατήρια. Το manual του FLAC [15] συνιστά κατά κανόνα ότι τα k_s και k_n , ορίζονται ως δέκα φορές η ισοδύναμη δυσκαμψία της γειτονικής ζώνης με την μεγαλύτερη δυσκαμψία. Τα k_s και k_n μπορούν να ορισθούν με την παρακάτω εξίσωση:

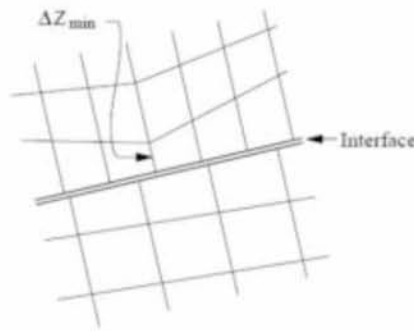
$$k_n = k_s = 10 \times \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta_{z-\min}} \right] \quad (3.1)$$

Όπου:

- k_n : ορθή δυσκαμψία (Pa/m)
- k_s : διατμητική δυσκαμψία (Pa/m)
- K : μέτρο ισότροπης συμπίεσης (Pa)

- G : μέτρο διάτμησης (Pa)
- $\Delta_{z-\min}$: είναι το μικρότερο πλάτος μιας παρακείμενης ζώνης στην κανονική κατεύθυνση (m)

Η μέγιστη τιμή που αναφέρεται στην εξίσωση 3.1 υποδηλώνει πως πρέπει να μετρηθεί η μέγιστη τιμή από όλες τις γειτονικές ζώνες και να χρησιμοποιηθεί για όλες αυτές που βρίσκονται στην διεπιφάνεια.



Σχήμα 3.6: Διάσταση ζώνης χρησιμοποιούμενη στον υπολογισμό της δυσκαμψίας

Από τον πίνακα 3.1 βλέπουμε τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως **K**, **G** από τη ζώνη **Gravel 2B** για $\Delta_{z-\min} = 2,58\text{m}$. Έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα:

$$k_n = k_s = \mathbf{330,749 \text{ MPa/m}}$$

Επιπλέον, οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή της πλάκας σκυροδέματος (beam) είναι οι εξής:

- Πυκνότητα $d = 2350 \text{ kg/m}^3$
- Μέτρο ελαστικότητας του Young $E = 29 \text{ GPa}$
- Θλιπτική αντοχή 25 MPa

- Εφελκυστική αντοχή 3 MPa
- Λόγος Poisson $\nu = 0,2$

Πρέπει να τονιστεί ότι επειδή η ανάλυση προσομοίωσης πραγματοποιείται σε δύο διαστάσεις, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της πλάκας σκυροδέματος στο FLAC αλλάζει κατά τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{(2D-flac)} = \frac{E_{(Young)}}{(1-\nu^2)} \quad (3.2)$$

Τελικά υπολογίστηκε ως $E_{(2D-flac)} = 30,283 \text{ GPa}$

Η μέθοδος που αναφέρεται παραπάνω για την προσομοίωση πλάκας σκυροδέματος στο Flac 2D, είναι η συνηθέστερη διαδικασία προσομοίωσης. Όμως στην παρούσα εργασία, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν ήταν λειτουργική αφού η πλάκα δεν μπορούσε να εδραιωθεί ομαλά πάνω στην ζώνη χαλικιού (Gravel_2B). Αυτό συνέβη εξαιτίας του μεγάλου ύψους του φράγματος και της περίπλοκης γεωμετρίας μετά την καθίζηση κατασκευής. Έτσι για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε απλά μία μεμβράνη αποτροπής της εισροής του νερού.

3.3 Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης

Σε αυτό το υποκεφάλαιο λαμβάνει χώρα η σταδιακή κατασκευή του προσομοιόματος του φράγματος της Μεσοχώρας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του FLAC 2D. Πραγματοποιήθηκε σε 40 βήματα και παρατίθενται παρακάτω ενδεικτικά αποτελέσματα από 5 αντιπροσωπευτικές στατικές αναλύσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε 1, 10, 20, 30 και 40 κατασκευαστικές στρώσεις. Εκτός από την αλλαγή της γεωμετρίας, απεικονίζεται η κατανομή της καθίζησης και των ορθών κατακόρυφων τάσεων του φράγματος στα αντίστοιχα στάδια κατασκευής.

Υπό ιδανικές συνθήκες, τα όρια του προβλήματος κυρίως για το επόμενο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης θα έπρεπε να είναι αρκετά μακριά ή στο άπειρο. Κάτι τέτοιο όμως, όπως είναι κατανοητό, είναι πρακτικά δύσκολο να συμβεί. Για το συγκεκριμένο μοντέλο στατικής και δυναμικής ανάλυσης του φράγματος της Μεσοχώρας, τα όρια καθορίζονται σε ένα επαρκές βάθος 20 μέτρων κάτω από τον πόδα του φράγματος και πλάτος περίπου 38 μέτρων στην ανάντη πλευρά και 28 στην κατόντη.

Η στατική μελέτη πραγματοποιήθηκε δεσμεύονται τα αριστερά και δεξιά σύνορα στην διεύθυνση x, επιτρέποντας στο έδαφος θεμελίωσης να δεχθεί καθιζήσεις. Επίσης, το κάτω όριο βράχου δεσμεύτηκε κατά διευθύνσεις x και y για να θεωρείται ακλόνητο.

User-defined Groups
 foundation
 rockfill_3C
 rockfill_3B
 rip_rap
 Gravel_2B



Σχήμα 3.7: Στάδιο 1 – 1^ο βήμα κατασκευής

Step:897
 Y-displacement contours
 -1.00E-02
 -7.50E-03
 -5.00E-03
 -2.50E-03
 0.00E+00
 Contour interval= 2.50E-03

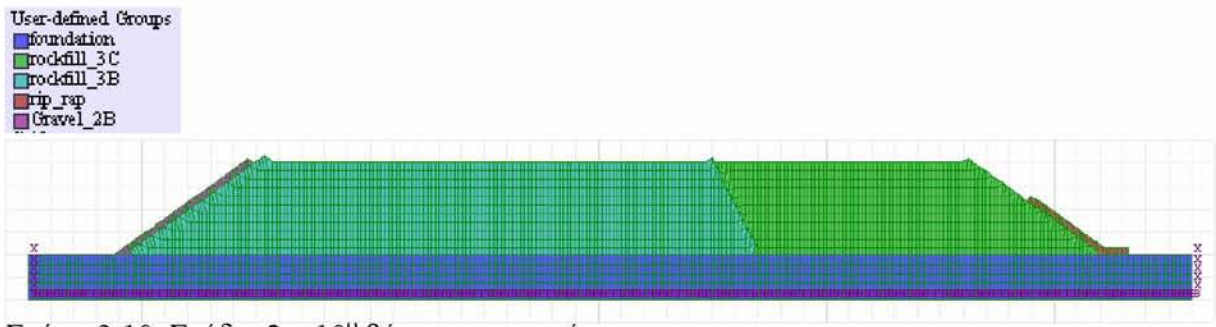


Σχήμα 3.8: Στάδιο 1 – Καθίζηση φράγματος για το 1^ο βήμα κατασκευής

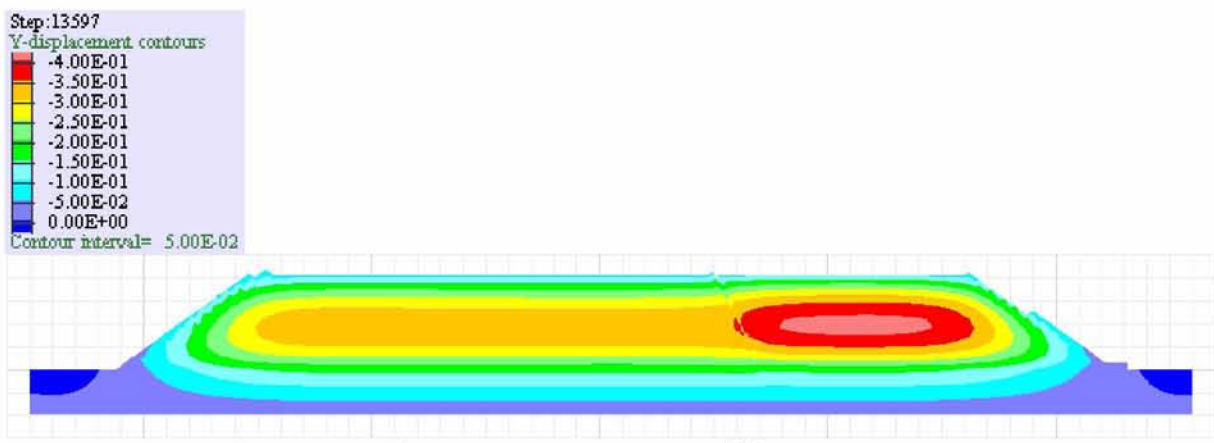
Step:897
 YY-stress contours
 -5.00E+05
 -4.50E+05
 -4.00E+05
 -3.50E+05
 -3.00E+05
 -2.50E+05
 -2.00E+05
 -1.50E+05
 -1.00E+05
 -5.00E+04
 0.00E+00
 Contour interval= 5.00E+04



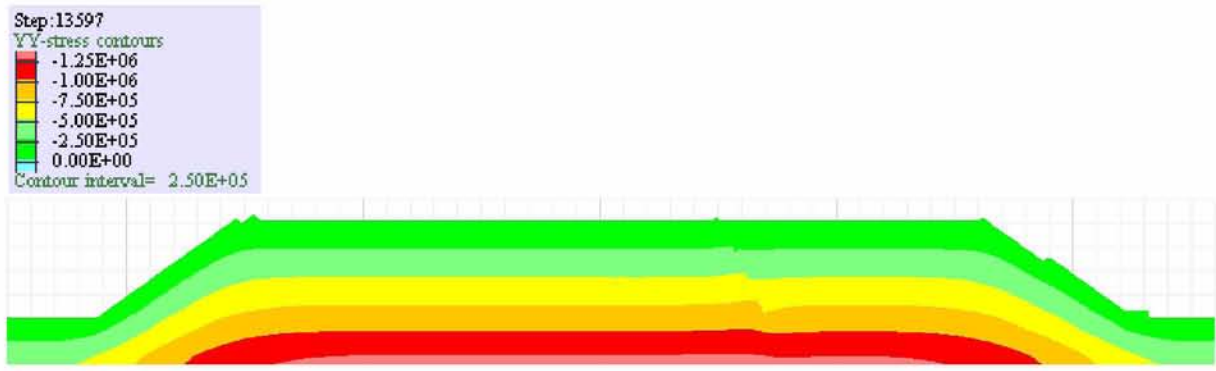
Σχήμα 3.9: Στάδιο 1 – Κατανομή ορθών κατακόρυφων τάσεων για το 1^ο βήμα κατασκευής



Σχήμα 3.10: Στάδιο 2 – 10° βήμα κατασκευής



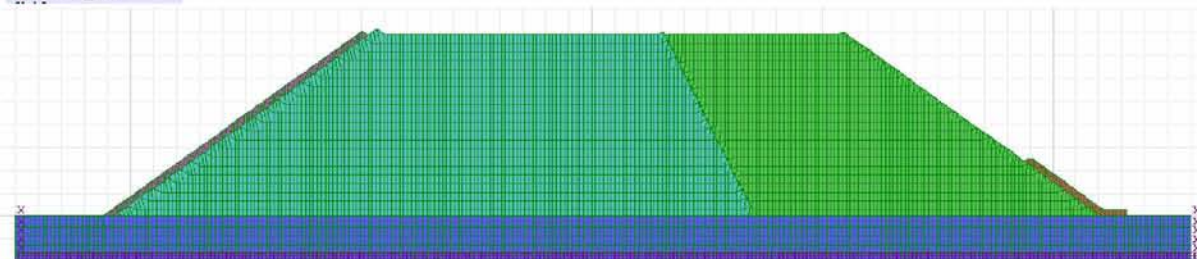
Σχήμα 3.11: Στάδιο 2 – Καθίζηση φράγματος για το 10° βήμα κατασκευής



Σχήμα 3.12: Στάδιο 2 – Κατανομή ορθών κατακόρυφων τάσεων για το 10° βήμα κατασκευής

User-defined Groups

- foundation
- rockfill_3C
- rockfill_3B
- rip_rip
- Gravel_2B

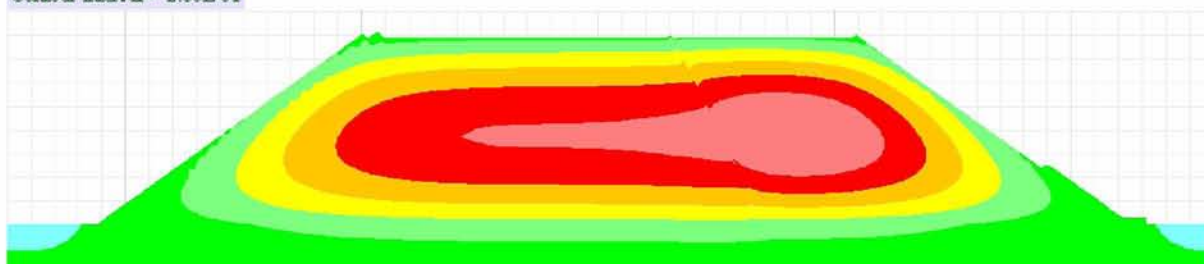


Σχήμα 3.13: Στάδιο 3 – 20° βήμα κατασκευής

Step:47304
Y-displacement contours

- 1.00E+00
- 8.00E-01
- 6.00E-01
- 4.00E-01
- 2.00E-01
- 0.00E+00

Contour interval= 2.00E-01

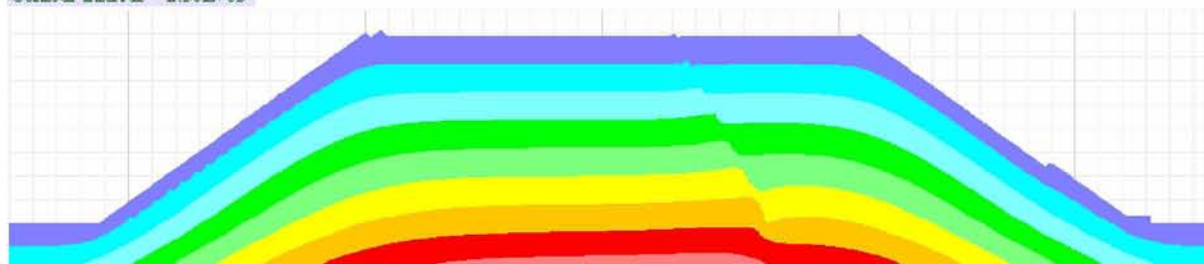


Σχήμα 3.14: Στάδιο 3 – Καθίζηση φράγματος για το 20° βήμα κατασκευής

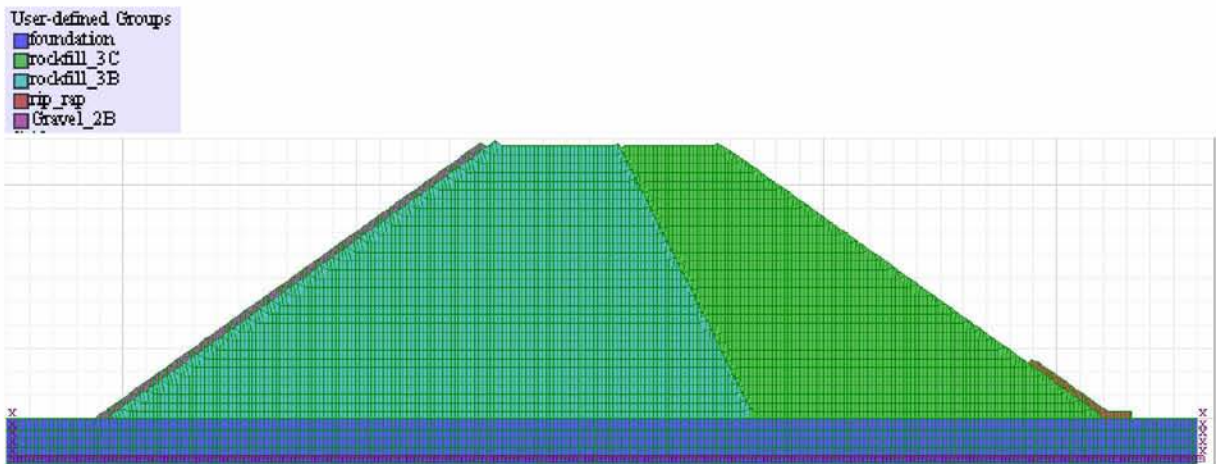
Step:47304
YY-stress contours

- 2.00E+06
- 1.75E+06
- 1.50E+06
- 1.25E+06
- 1.00E+06
- 7.50E+05
- 5.00E+05
- 2.50E+05
- 0.00E+00

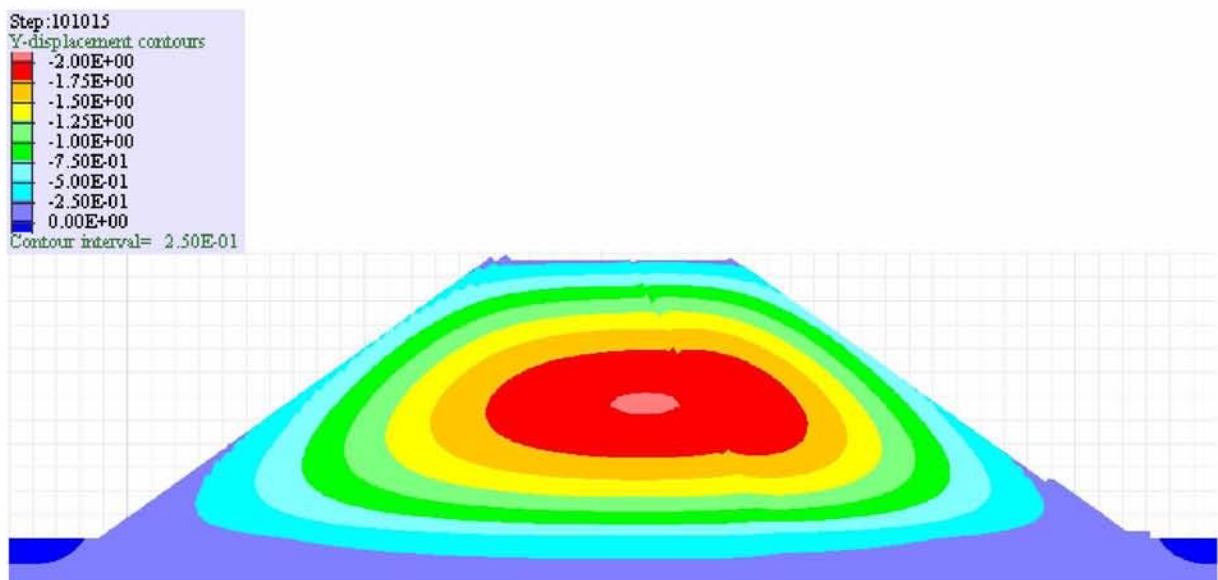
Contour interval= 2.50E+05



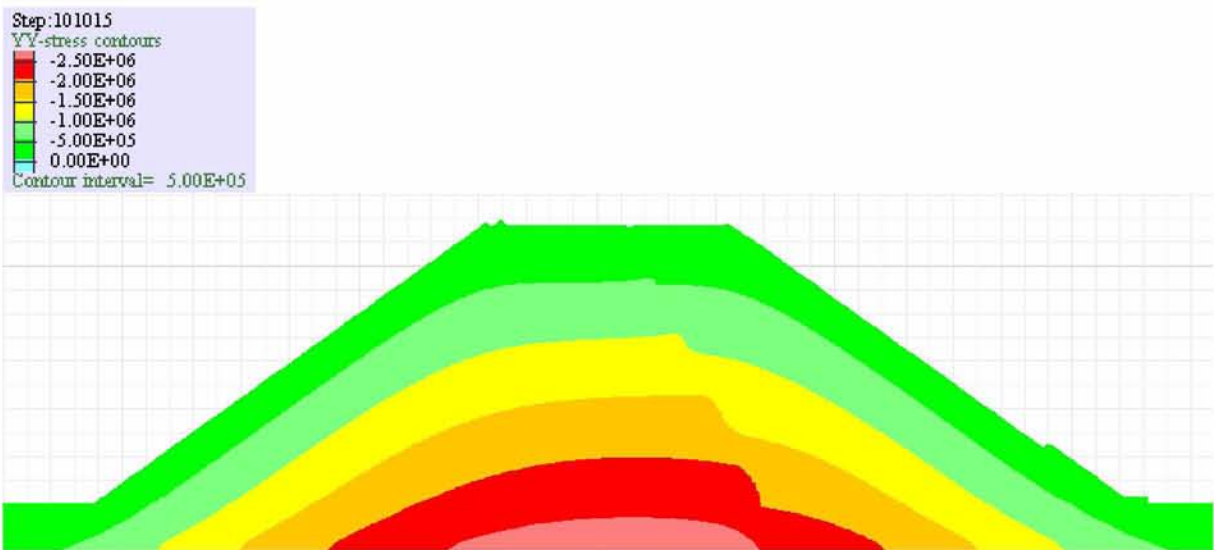
Σχήμα 3.15: Στάδιο 3 – Κατανομή ορθών κατακόρυφων τάσεων για το 20° βήμα κατασκευής



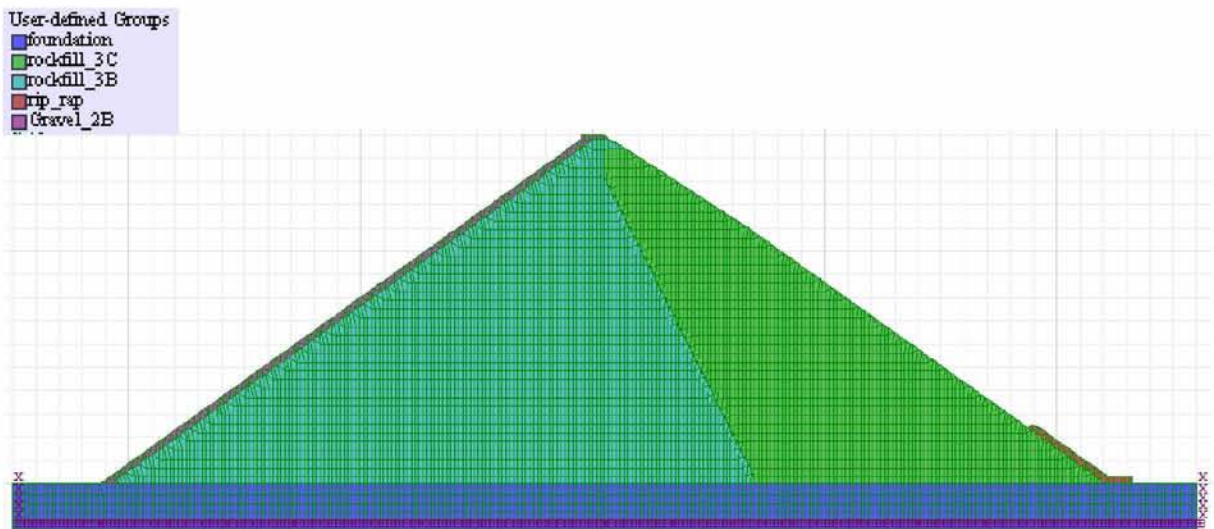
Σχήμα 3.16: Στάδιο 4 – 30° βήμα κατασκευής



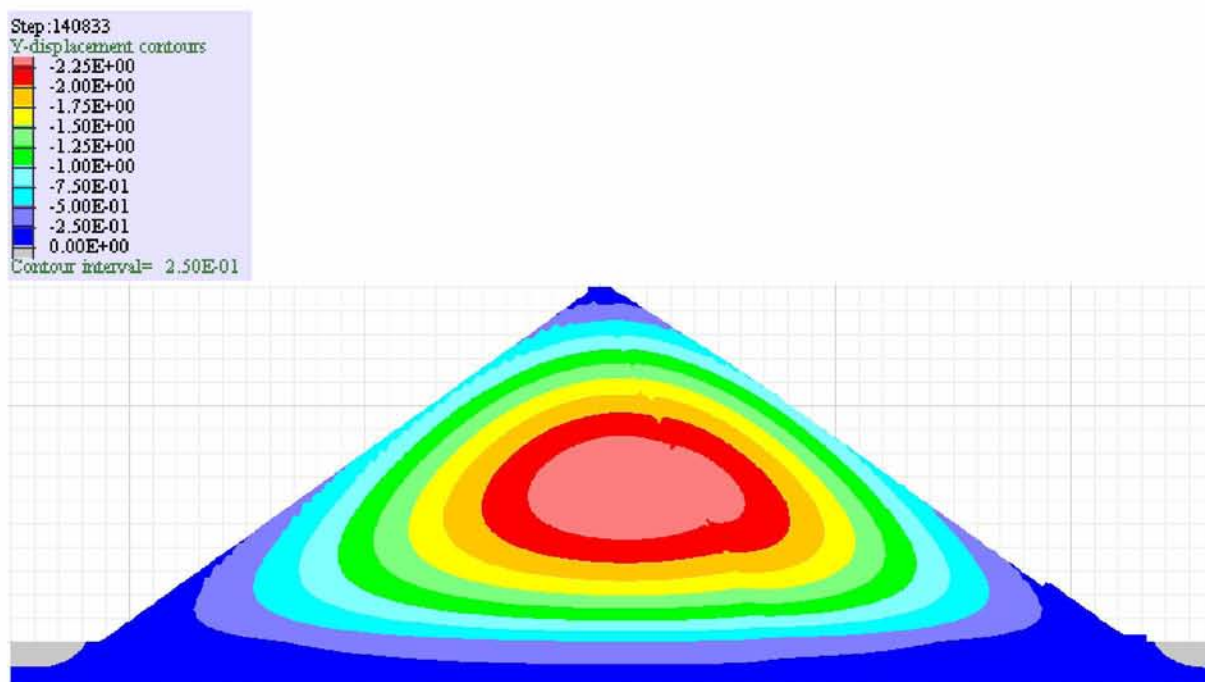
Σχήμα 3.17: Στάδιο 4 – Καθίζηση φράγματος για το 30° βήμα κατασκευής



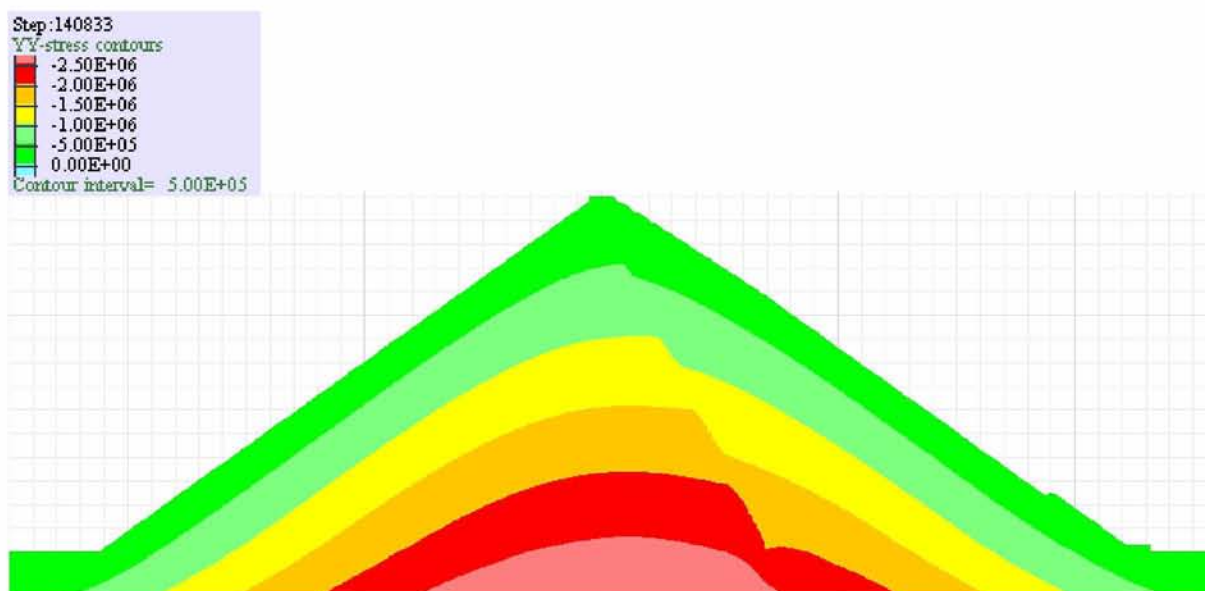
Σχήμα 3.18: Στάδιο 4 – Κατανομή ορθών κατακόρυφων τάσεων για το 30° βήμα κατασκευής



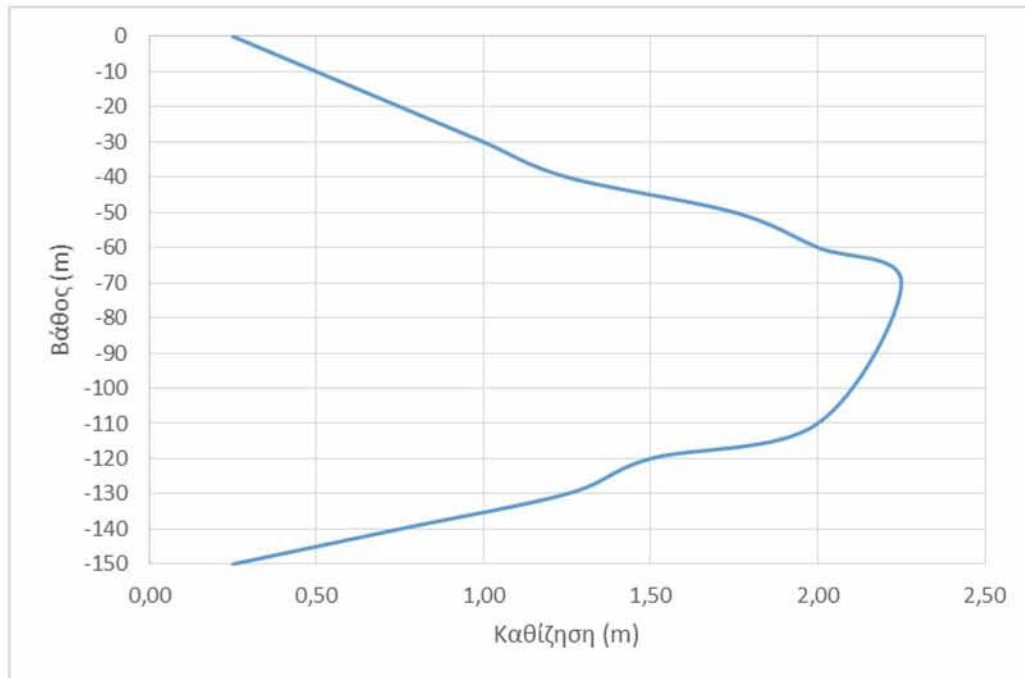
Σχήμα 3.19: Στάδιο 5 – 40° βήμα κατασκευής



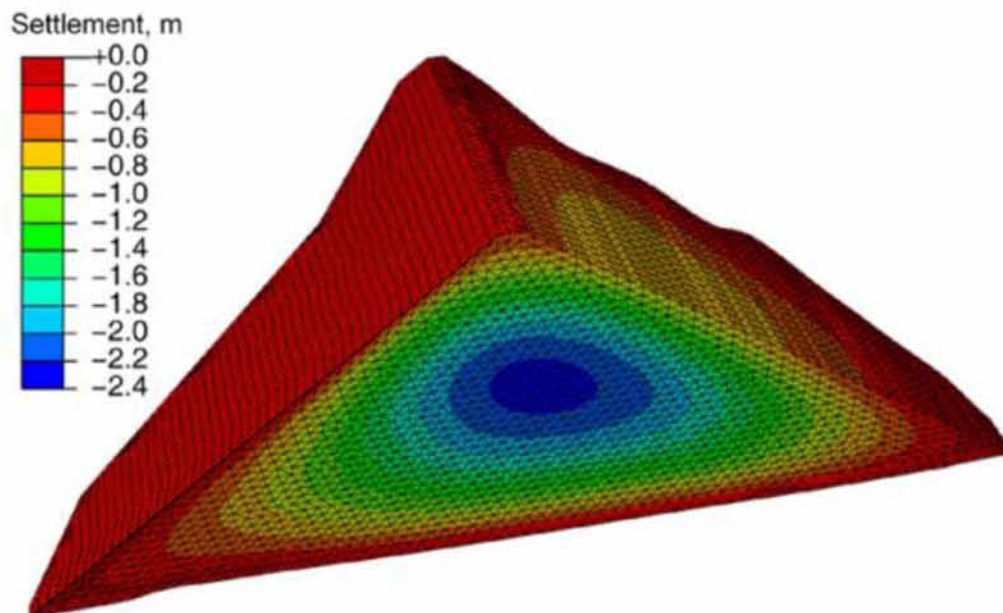
Σχήμα 3.20: Στάδιο 5 – Καθίζηση φράγματος για το 40° βήμα κατασκευής



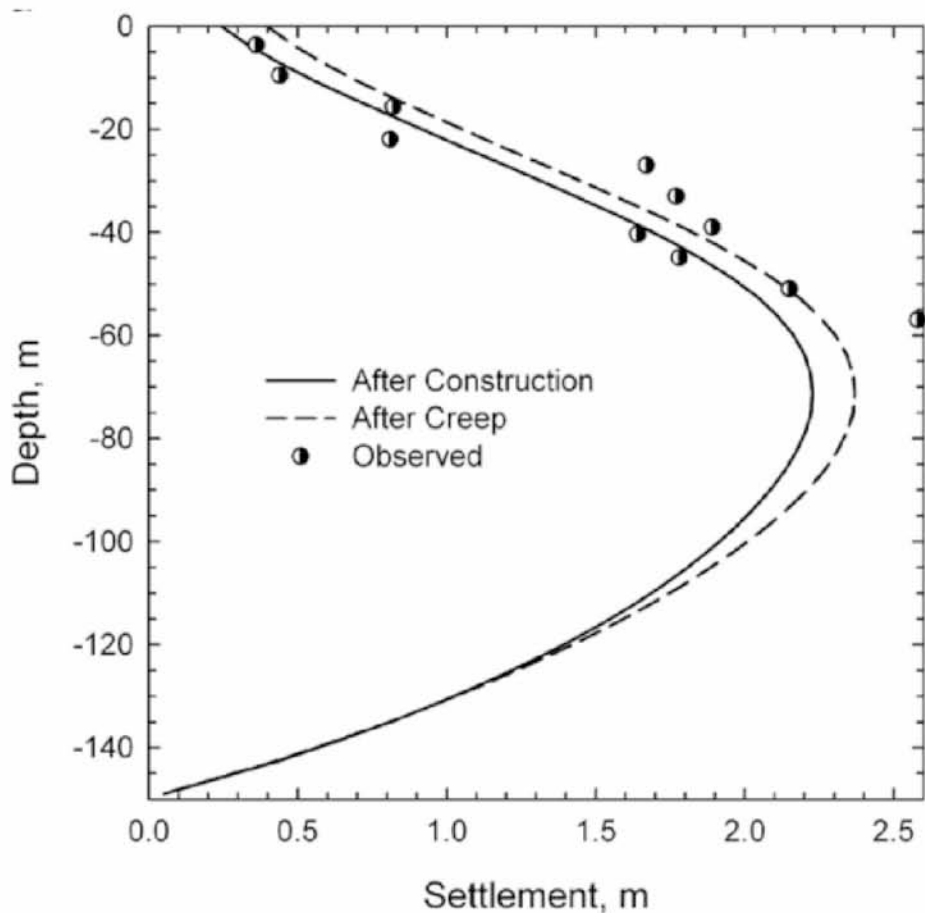
Σχήμα 3.21: Στάδιο 5 – Κατανομή ορθών κατακόρυφων τάσεων για το 40° βήμα κατασκευής



Σχήμα 3.22: Καθίζηση του φράγματος στο τέλος κατασκευής σε σχέση με το βάθος στον κεντρικό άξονα.



Σχήμα 3.23: Καθίζηση φράγματος στο τελικό στάδιο προσομοίωσης σε 3Δ ανάλυση (Dakoulas, 2007) [1].



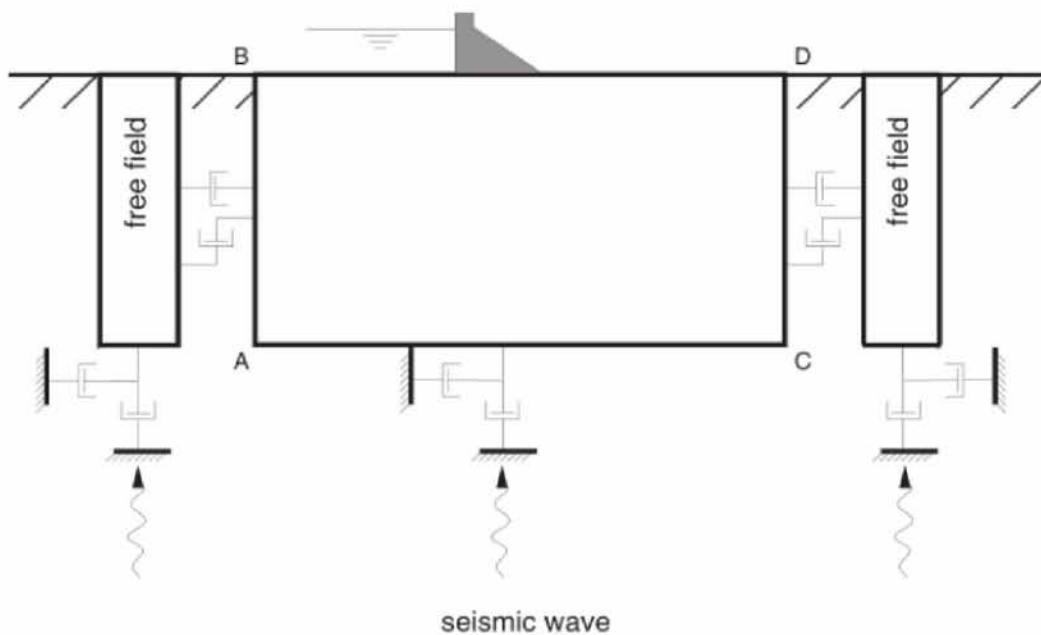
Σχήμα 3.24: Κατανομή της καθίζησης ως προς το βάθος μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και μετά τον ερπυσμό στον κεντρικό άξονα με βάση 3Δ ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS (Dakoulas, 2011).

Σύμφωνα με τα σχήματα 3.20 και 3.22, η μέγιστη καθίζηση κατά τη σταδιακή κατασκευή (2D ανάλυση) προκύπτει 2,25m, και παρουσιάζεται περίπου στο μέσο του ύψους του φράγματος. Στην 3D ανάλυση (Dakoulas, 2011) [1] παρατηρείται σύμφωνα με τα σχήματα 3.23 και 3.24, ότι η μέγιστη καθίζηση σταδιακής κατασκευής στο μέσο του κεντρικού άξονα φτάνει τα 2,22 m. Συμπερασματικά, οι δύο αναλύσεις παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά την σταδιακή κατασκευή (στατική επίλυση).

3.4 Δυναμική ανάλυση φράγματος Μεσοχώρας

Κατά την δυναμική ανάλυση, ο υπολογισμός βασίζεται στο σύστημα πεπερασμένων διαφορών (explicit formulation) για την επίλυση των πλήρων εξισώσεων κίνησης, χρησιμοποιώντας συγκεντρώσεις μάζας που προέρχονται από την πραγματική πυκνότητα των γύρω περιοχών (και όχι από πλασματικές μάζες που χρησιμοποιούνται για στατική λύση).

Η εισαγωγή σεισμικής διέγερσης αντιπροσωπεύεται από επίπεδα κύματα που διαχέονται από την βάση προς τα πάνω μέσω του υποκείμενου υλικού. Οι οριακές συνθήκες στις κατακόρυφες πλευρές του μοντέλου πρέπει να αντιπροσωπεύουν την κίνηση «ελεύθερου πεδίου» (Free-Field), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.25. Μια τεχνική που να ανταποκρίνεται σε τέτοιου είδους προβλήματα αναπτύχθηκε για το FLAC, που περιλαμβάνει την εκτέλεση ενός μονοδιάστατου υπολογισμού «ελεύθερου πεδίου» παράλληλα με την ανάλυση του συστήματος. Τέλος, η σεισμική διέγερση επιβάλλεται υπό μορφή χρονοϊστορίας ταχύτητας σε όλους τους κόμβους της βάσης της θεμελίωσης.



Σχήμα 3.25: Μοντέλο για σεισμική ανάλυση επιφανειακών κατασκευών σε ελεύθερο πεδίο (Itasca,2005) [15].

3.4.1 Σεισμική διέγερση: Σεισμός Λευκάδας (2003)

Σε αυτή την υποενότητα αναφέρεται ο σεισμός που σημειώθηκε στη Λευκάδα το έτος 2003 (8:15π.μ., 14/08/2003) καθώς τα δεδομένα του χρησιμοποιήθηκαν ως σεισμική διέγερση σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Ο σεισμός είχε μέγεθος $M_w = 6,4$. Η Λευκάδα είναι μία από τις περιοχές με τη μεγαλύτερη σεισμικότητα της Ευρώπης, καθόσον στον 20^ο αιώνα έχει υποστεί αρκετούς σεισμούς μεγέθους 6 και δύο 6,5 της κλίμακας Richter [20].

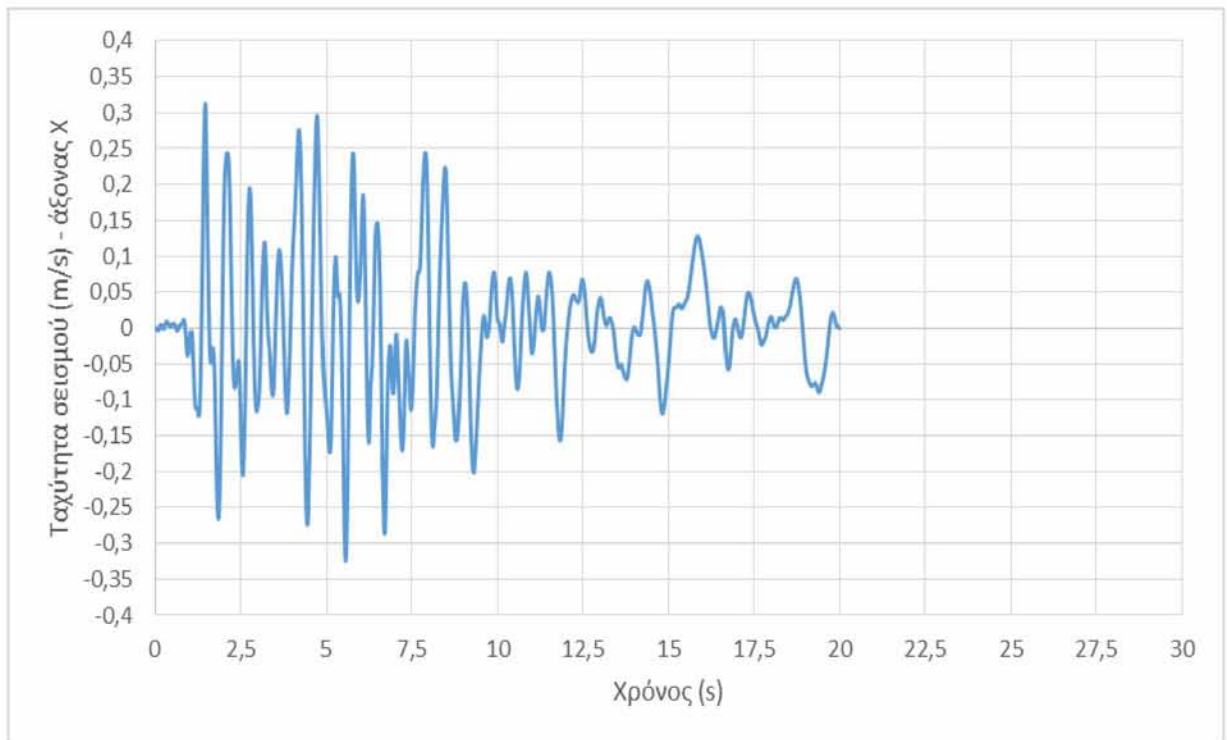
Τα χαρακτηριστικά του σεισμού δίνονται από το επιταχυνσιογράφημα που καταγράφηκε, το οποίο, εμφανίζει μια δόνηση με ενεργό μέγιστη επιτάχυνση 0,58g, δεσπόζουσα περίοδο $T_p = 0,3 - 0,6s$ και οκτώ κύκλους φόρτισης πλάτους περίπου 0,3g. Τέλος

η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα είναι μεγαλύτερη με φάσμα απόκρισης $S_A = 2,2g$ για περίοδο $T \approx 1s$.

Στην παρούσα εργασία το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Λευκάδας τροποποιήθηκε (με το πρόγραμμα SeismoMatch) έτσι ώστε το φάσμα επιτάχυνσης να πλησιάζει το φάσμα σχεδιασμού για σκληρά εδάφη ή βράχο (κατηγορία A). Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του φάσματος επιτάχυνσης του σεισμού της Λευκάδας και της οριζόντιας ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για την διπλωματική εργασία.



Σχήμα 3.26: Τροποποιημένη διέγερση Λευκάδας: Διάγραμμα φασματικής επιτάχυνσης σε σχέση με ιδιοπερίοδο κατασκευής.



Σχήμα 3.27: Τροποποιημένη διέγερση Λευκάδας: Διάγραμμα ταχύτητας της σεισμικής δόνησης ως προς τον χρόνο

3.4.2 Απόσβεση Rayleigh και χρήση υστερετικού μοντέλου

Στις αριθμητικές αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου, είναι πολύ συχνή η χρήση της απόσβεσης τύπου Rayleigh, όπου το μητρώο απόσβεσης $[C]$ δίνεται ως γραμμικός συνδυασμός των μητρώων μάζας $[M]$ και δυσκαμψίας $[K]$ (Chopra, 1995[31], Malkus[32], 1988). Το μητρώο απόσβεσης αυτό, C , εκφράζεται με εξίσωση που εμπεριέχει συντελεστές ανάλογους της μάζας, M και της ακαμψίας, K .

$$C = \alpha \times M + \beta \times K \quad (3.3)$$

Όπου α : μάζα – αναλογική σταθερά απόσβεσης

β : δυσκαμψία – αναλογική σταθερά απόσβεσης

Για ένα σύστημα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, ο κρίσιμος βαθμός απόσβεσης ξ_i , για οποιαδήποτε συχνότητα μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω εξίσωση (των Bathe – Wilson, 1976):

$$\alpha + \beta \times \omega_i^2 = 2 \times \omega_i \times \xi_i \quad (3.4)$$

ή

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \times \omega_i \right) \quad (3.5)$$

Ο κρίσιμος βαθμός απόσβεσης ξ_i , είναι επίσης γνωστός ως το κλάσμα της κρίσιμης απόσβεσης προς τη γωνιακή ταχύτητα ω_i .

Στο Σχήμα 3.29 που παρατίθεται παρακάτω απεικονίζεται η μεταβολή του κανονικοποιημένου κρίσιμου βαθμού απόσβεσης προς τη γωνιακή ταχύτητα. Δίδονται τρεις καμπύλες:

- Απόσβεση μόνο λόγω μητρώου μάζας ($\beta=0$)

- Απόσβεση μόνο λόγω μητρώου δυσκαμψίας ($\alpha=0$)
- Απόσβεση λόγω αθροίσματος συντελεστών μάζας και δυσκαμψίας

Είναι φανερό ότι, ο αναλογικός συντελεστής απόσβεσης μάζας της απόσβεσης κυριαρχεί στις χαμηλότερες γωνιακές συχνότητες ενώ, ο αναλογικός συντελεστής δυσκαμψίας στις υψηλότερες. Η καμπύλη που αντιπροσωπεύει το άθροισμα των δύο αυτών συντελεστών για τις ακόλουθες τιμές:

$$\xi_{\min} = (a \times \beta)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

$$\omega_{\min} = (a / \beta)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

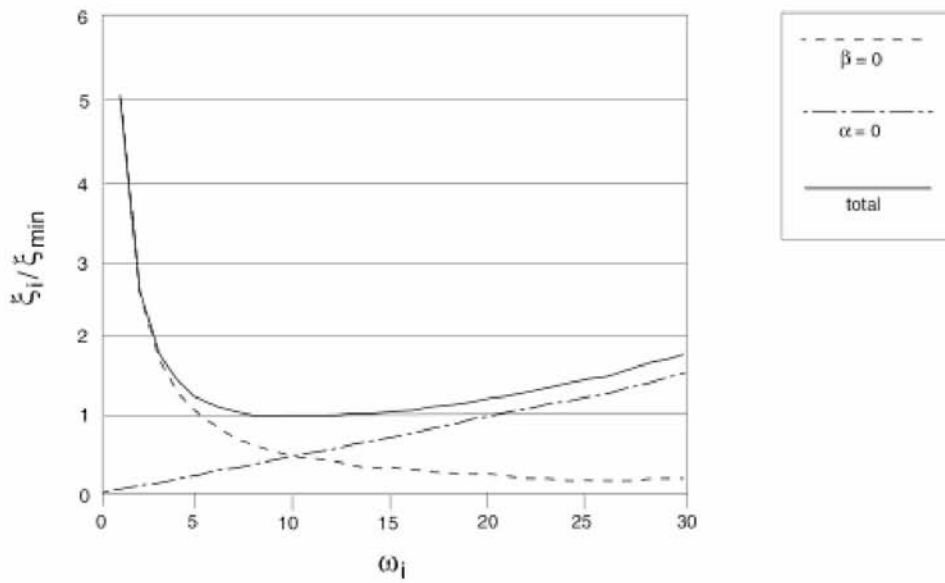
ή

$$\alpha = \xi_{\min} \times \omega_{\min} \quad (3.8)$$

$$\beta = \xi_{\min} / \omega_{\min} \quad (3.9)$$

Έτσι η κεντρική συχνότητα είναι η εξής:

$$f_{\min} = \omega_{\min} / 2\pi \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.29: Μεταβολή κανονικοποιημένου λόγου κρίσιμης απόσβεσης με την συχνότητα ω .

Σε πολύ μικρές παραμορφώσεις το μέτρο διάτμησης στη δυναμική ανάλυση μπορεί να ληφθεί από τους παρακάτω τύπους [1]:

$$G_0 = 1000A \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} (p'_0)^r \quad (3.11)$$

Όπου:

- p'_0 : μέση ενεργός τάση
- e : λόγος κενών
- A, r : σταθερές των υλικών

(G_0 , p'_0 σε kPa)

Για μονοτονική φόρτιση το υστερητικό μοντέλο sig3 (του προγράμματος FLAC) υποθέτει ότι το τέμνον μέτρο διάτμησης δίνεται από τον τύπο:

$$G_s / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c) / b)} \quad (3.12)$$

όπου a, b, c είναι σταθερές υλικών.

Η ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 3(\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2) / 2} \quad (3.13)$$

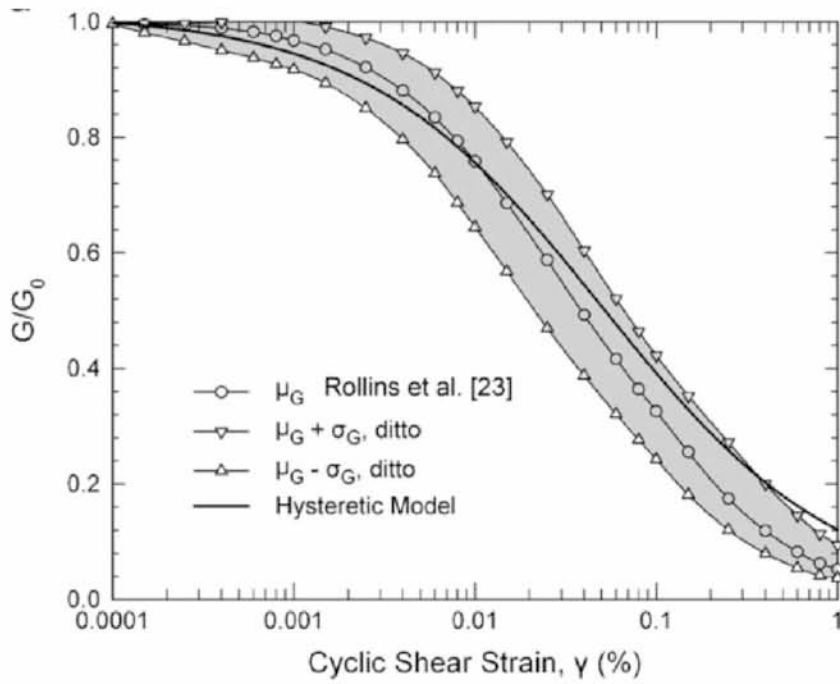
Για την ειδική περίπτωση $\gamma_e = \gamma_{12}$, οι σταθερές των υλικών a,b,c μπορούν να υπολογισθούν από τα πειραματικά αποτελέσματα απλής διάτμησης ώστε συμφωνεί η προβλεπόμενη μεταβολή του λόγου διάτμησης G_t / G_0 και του λόγου απόσβεσης για κάθε τιμή της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης. Το εφαπτομενικό μέτρο διατμήσεως σε μονοτονική φόρτιση είναι:

$$G_t / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c) / b)} + \frac{a \exp(-(\log \gamma_e - c) / b)}{b(1 + \exp(-(\log \gamma_e - c) / b))^2 \ln 10} \quad (3.14)$$

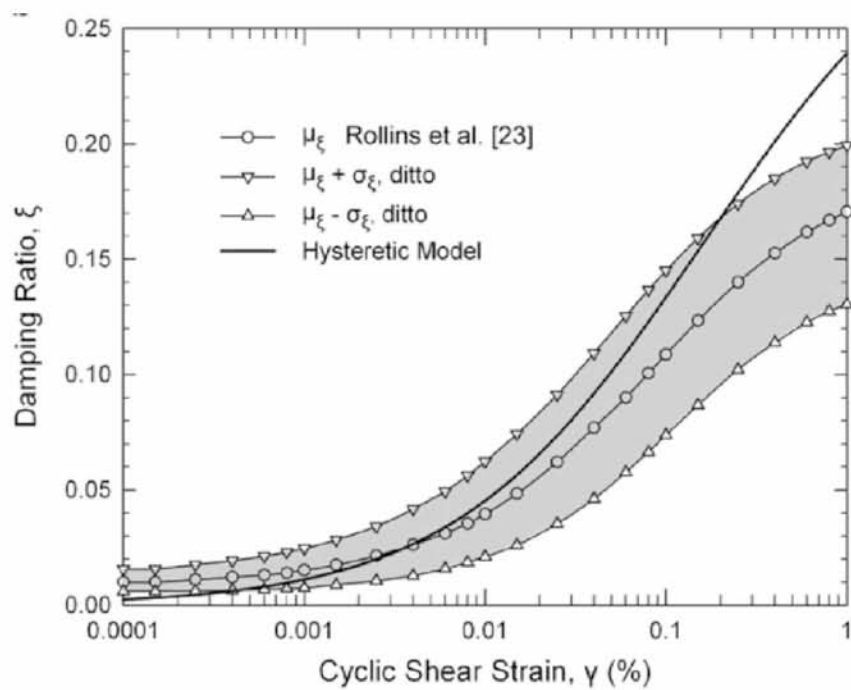
ενώ για φόρτιση και επαναφόρτιση ο λόγος G_t / G_0 γίνεται

$$G_t / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log |\gamma - \gamma_{ref}| / 2 - c) / b)} + \frac{a \exp(-(\log |\gamma - \gamma_{ref}| / 2 - c) / b)}{b(1 + \exp(-(\log |\gamma - \gamma_{ref}| / 2 - c) / b))^2 \ln 10} \quad (3.15)$$

όπου γ είναι το διάνυσμα παραμόρφωσης και γ_{ref} το διάνυσμα παραμόρφωσης κατά την έναρξη της αποφόρτισης ή επαναφόρτισης.



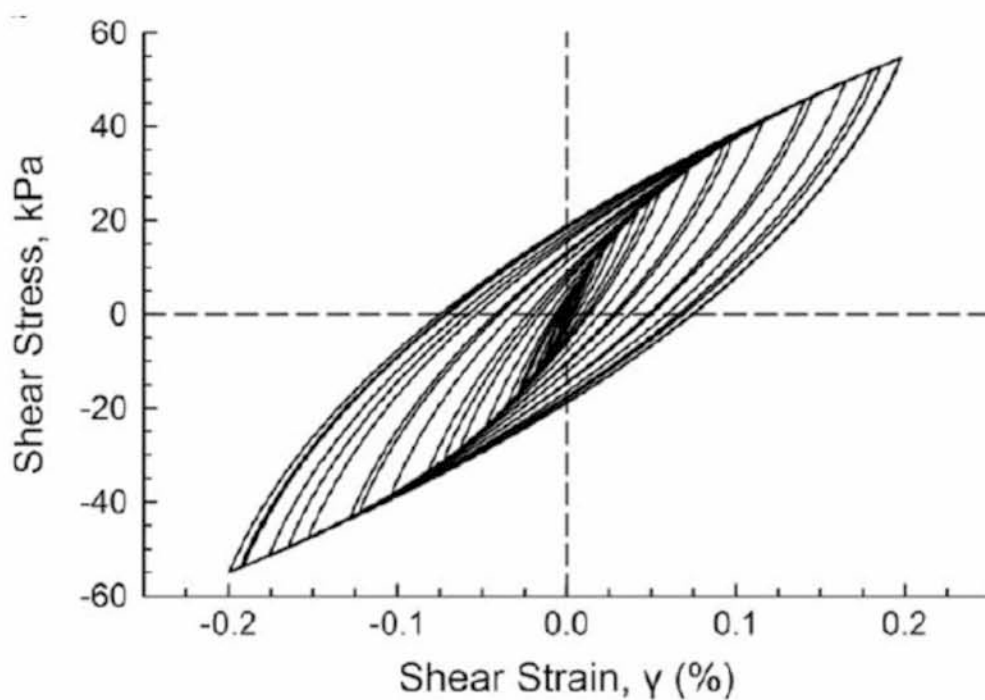
Σχήμα 3.30: Λόγος τέμνοντος μέτρου διάτμησης, G_s / G_0 σε σχέση με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ (%) (Dakoulas, 2011) [1].



Σχήμα 3.31: Λόγος υστερετικής απόσβεσης ξ σε σχέση με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ (%) (Dakoulas, 2011) [1].

Στα Σχήματα 3.31, 3.32 απεικονίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του συντελεστή του λόγου διάτμησης G_s / G_0 και του λόγου απόσβεσης ξ σε σχέση με τη κυκλική διατμητική παραμόρφωση για χαλικώδη υλικά, με βάση αποτελέσματα εκτεταμένης μελέτης από 15 αυτόνομες πειραματικές έρευνες. Για το υστερητικό μοντέλο sig3 του FLAC το $a = 1,014$, $b = -0,65$, $c = -1,3$, προβλέφθηκαν οι τιμές των G_s / G_0 και ξ .

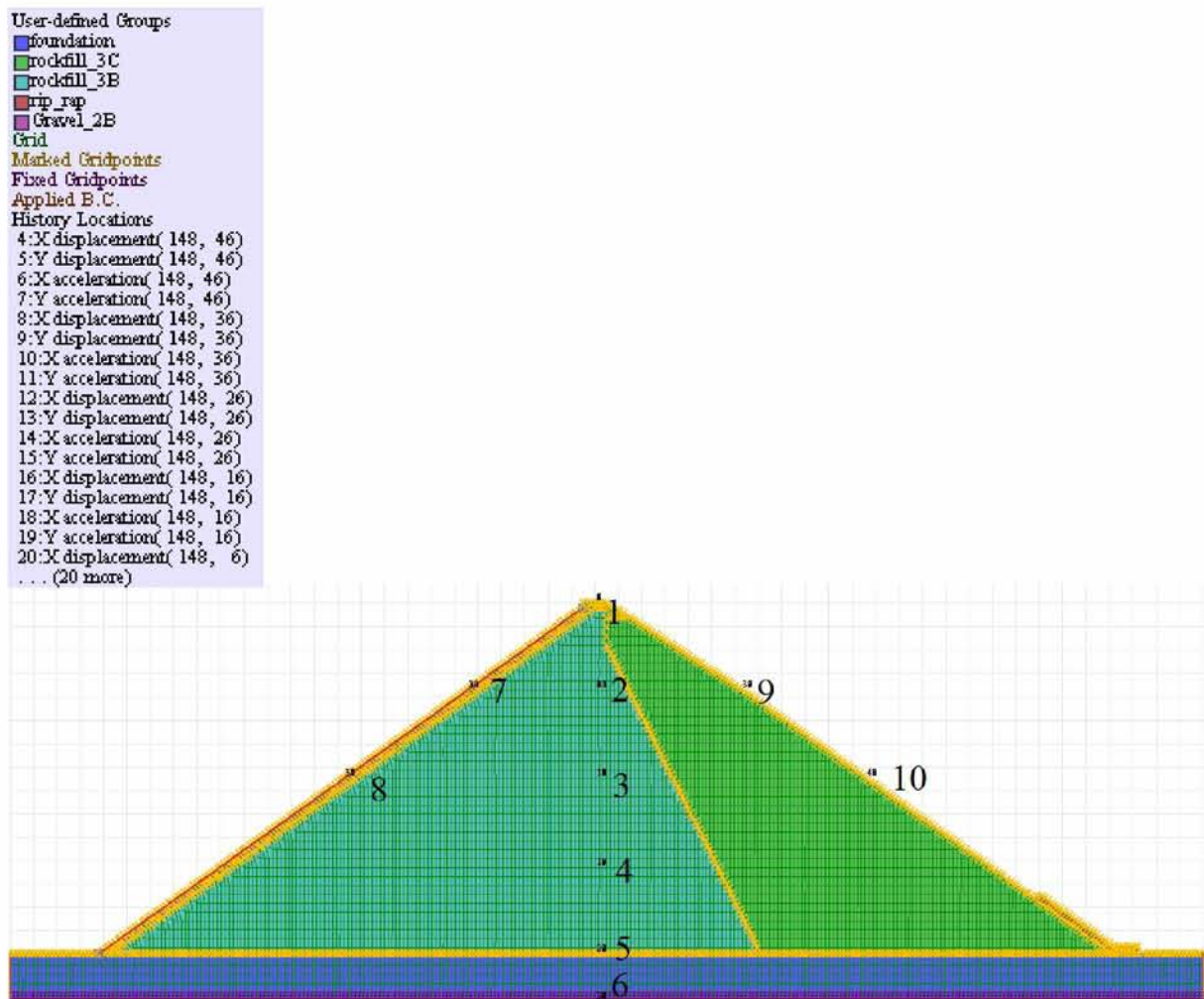
Σημαντικό επίσης είναι να αναφερθεί, ότι για την εγκυρότητα της προσομοίωσης μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές προσομοίωσης, οι οποίες έδωσαν αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης που προέρχονται από το υστερητικό μοντέλο.



Σχήμα 3.32: Σχέση τάσης- παραμόρφωσης από υστερητικό μοντέλο (Dakoulas, 2011) [1].

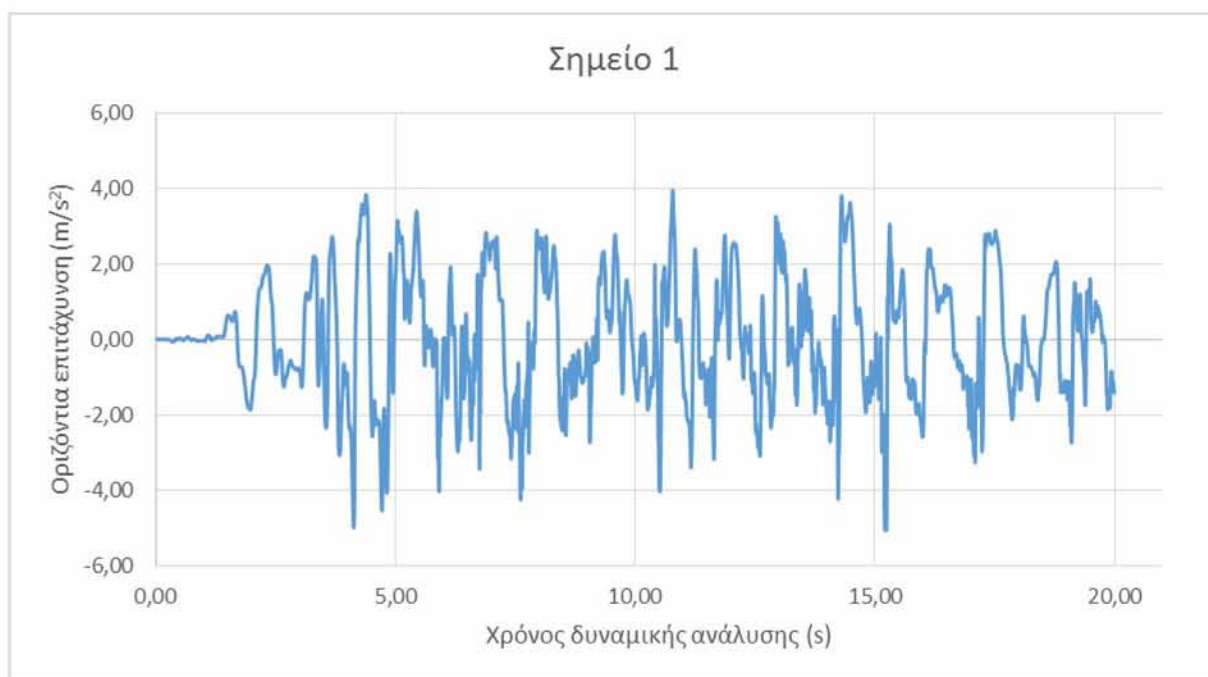
3.4.3 Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης φράγματος Μεσοχώρας

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με σεισμική διέγερση μέγιστης επιτάχυνσης 0,35g στο πρόγραμμα Flac 2D. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της 3D ανάλυσης από το άρθρο «Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons» (Dakoulas,2007).

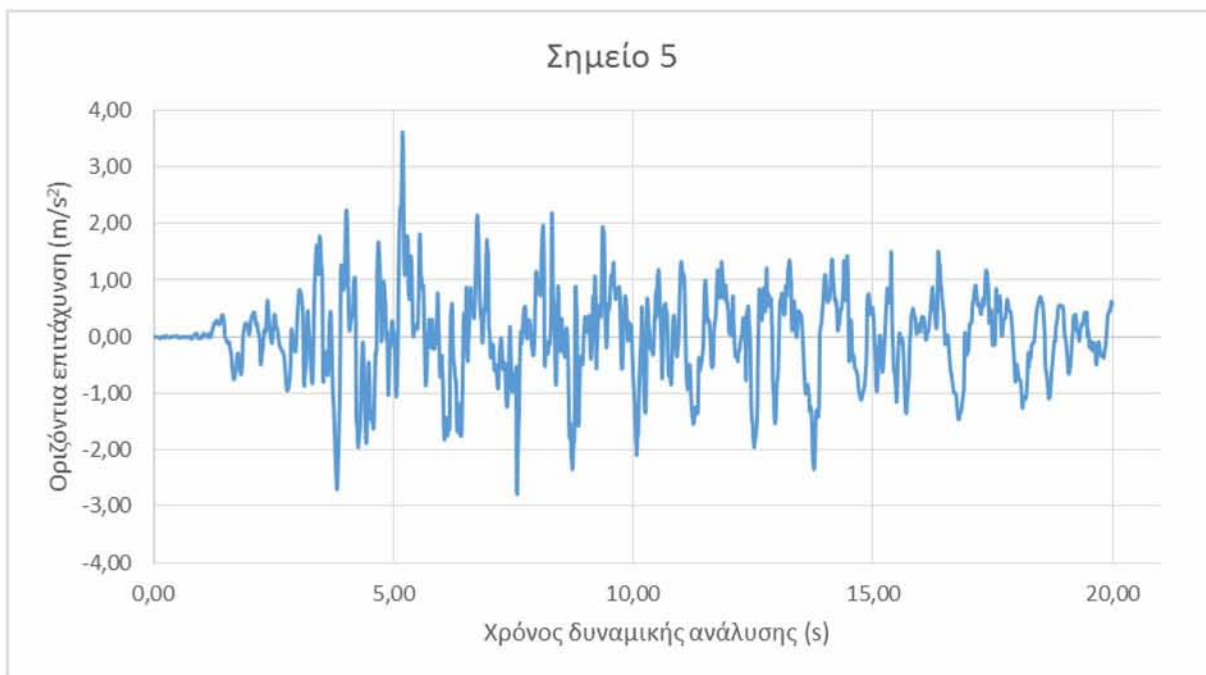


Σχήμα 3.33: Απεικόνιση της γεωμετρίας του καννάβου και των χαρακτηριστικών σημείων μελέτης επιτάχυνσης και μετατόπισης.

Μετά από δοκιμές αποδείχθηκε ότι τα τελευταία 10 δευτερόλεπτα δεν απέφεραν σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματα των μετατοπίσεων και επιταχύνσεων. Για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα που παρατίθενται παρακάτω φτάνουν μέχρι το 20^ο δευτερόλεπτο ανάλυσης.

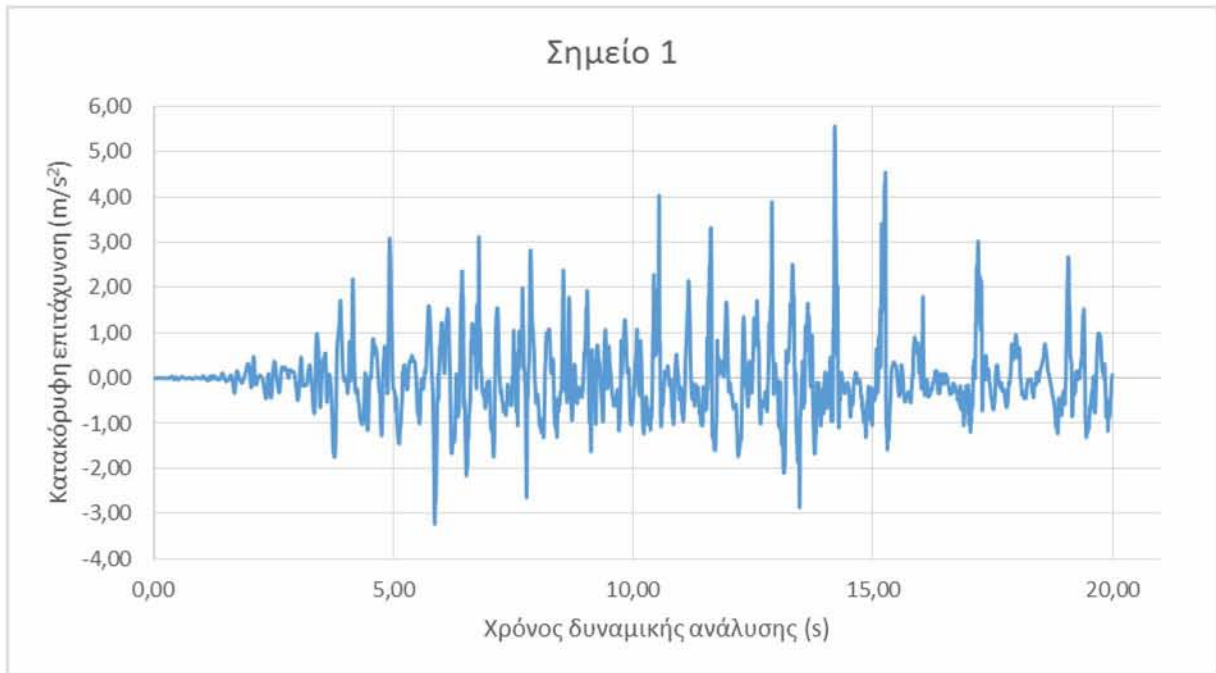


Σχήμα 3.34: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο στην στέψη του φράγματος (Σημείο 1)



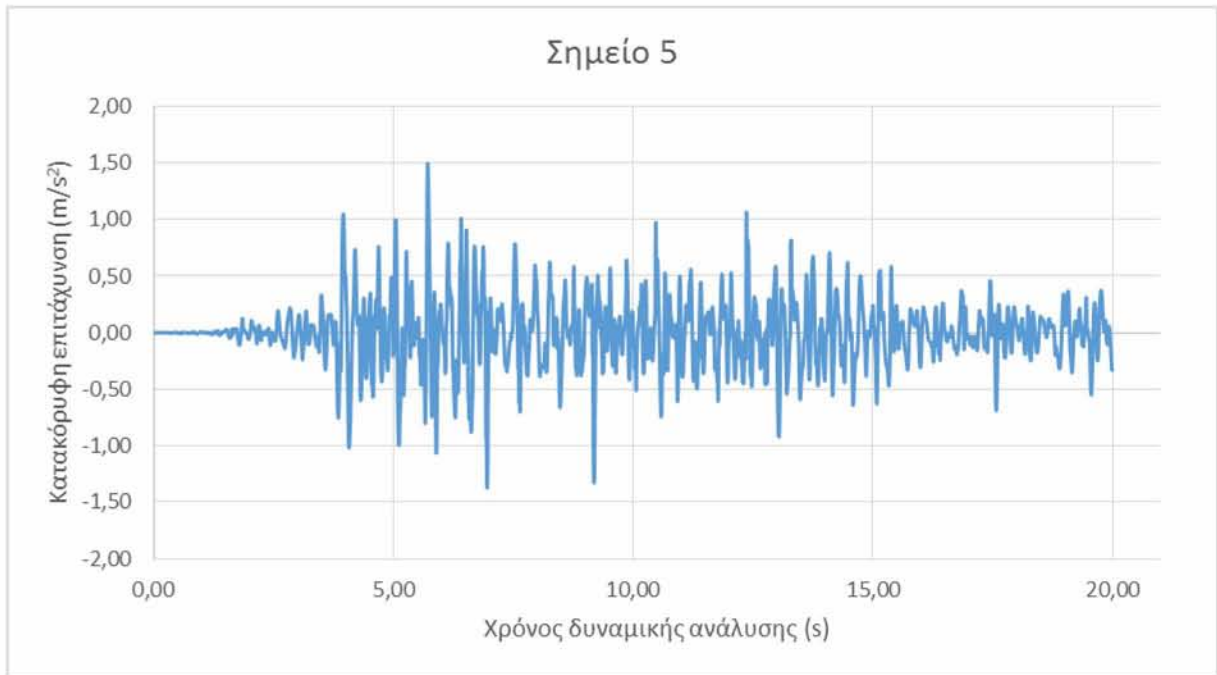
Σχήμα 3.35: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο στην βάση του φράγματος (Σημείο 5)

Σύμφωνα με τα σχήματα 3.34 και 3.35, το μέγιστο της οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο είναι $5,06 \text{ m/s}^2$ στη στέψη και $3,5 \text{ m/s}^2$ στη βάση. Συγκρίνοντάς τις προηγούμενες τιμές με τη μέγιστη επιτάχυνση του σχήματος 3.45 από την 3Δ ανάλυση [1] παρατηρείται αισθητά μεγάλη απόκλιση περίπου 9 m/s^2 στη στέψη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση αυτή είναι, ομολογουμένως, περισσότερο ποιοτική καθόσον οι σεισμικές διεγέρσεις στις δύο περιπτώσεις είναι διαφορετικές.

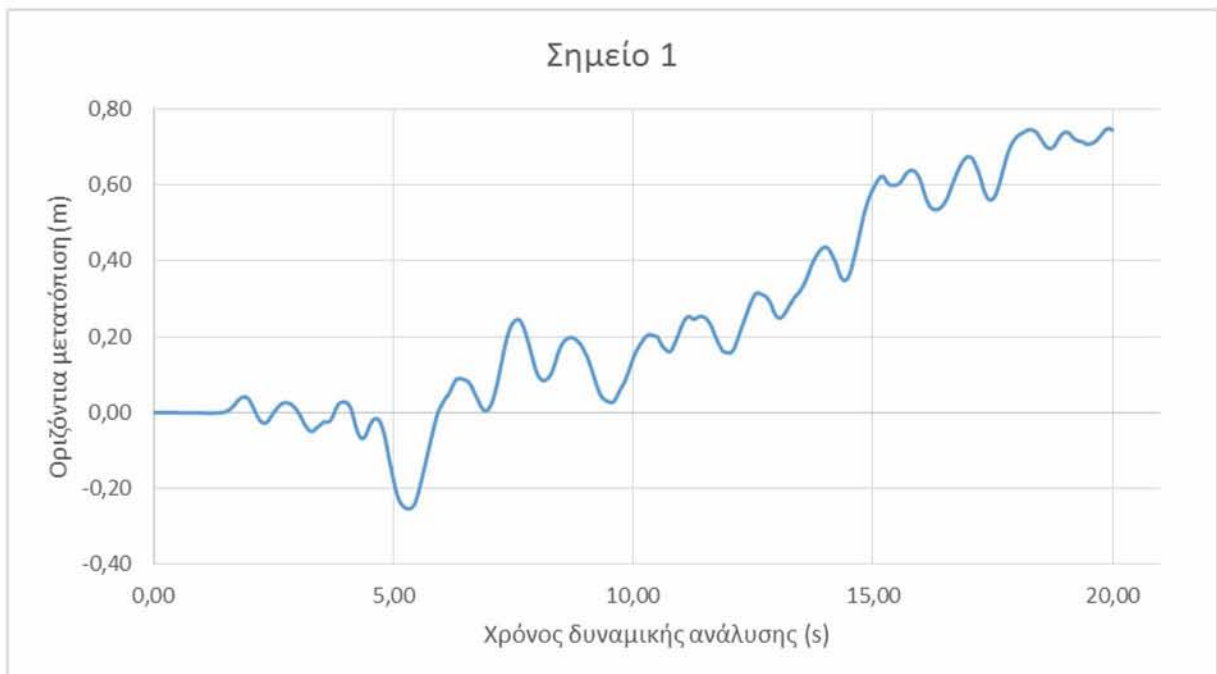


Σχήμα 3.36: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1

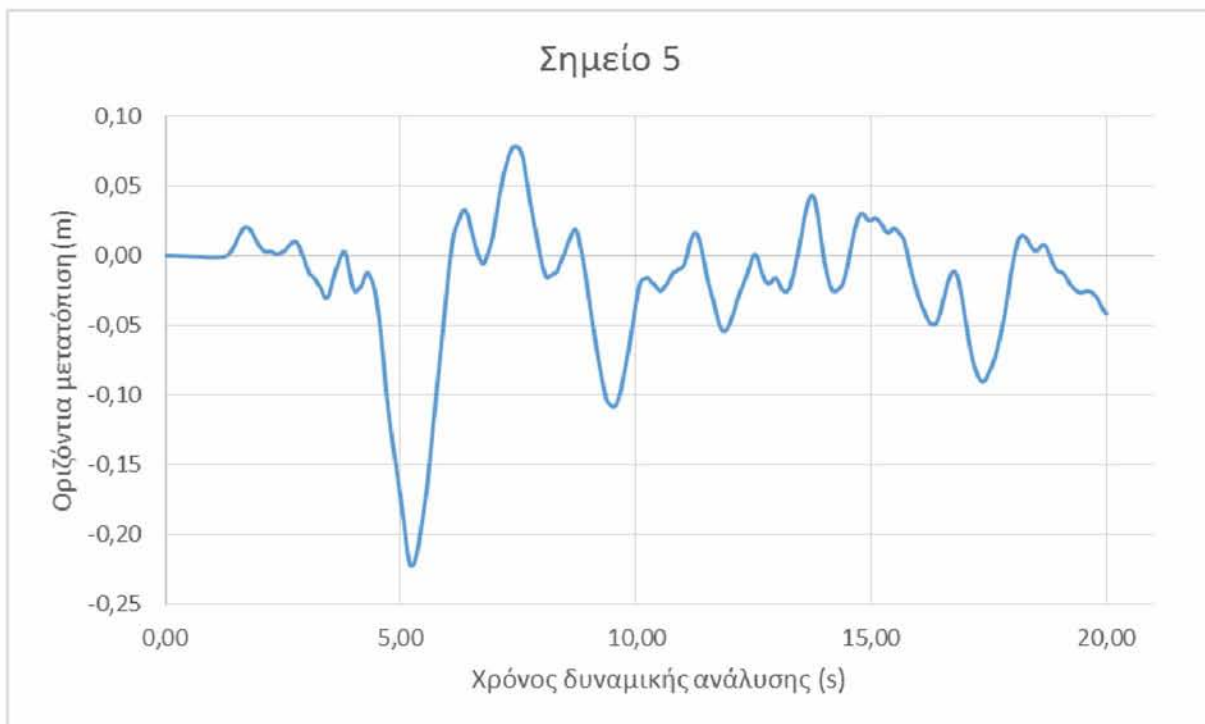
Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 3.36-3.37 οι μέγιστες τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης είναι $5,47 \text{ m/s}^2$ για την στέψη και $1,48 \text{ m/s}^2$ για την βάση του φράγματος. Σε σύγκριση με το σχήμα 3.46 υπάρχει απόκλιση $3,5 \text{ m/s}^2$ στη στέψη όσον αφορά τη μέγιστη τιμή κατακόρυφης επιτάχυνσης.



Σχήμα 3.37: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



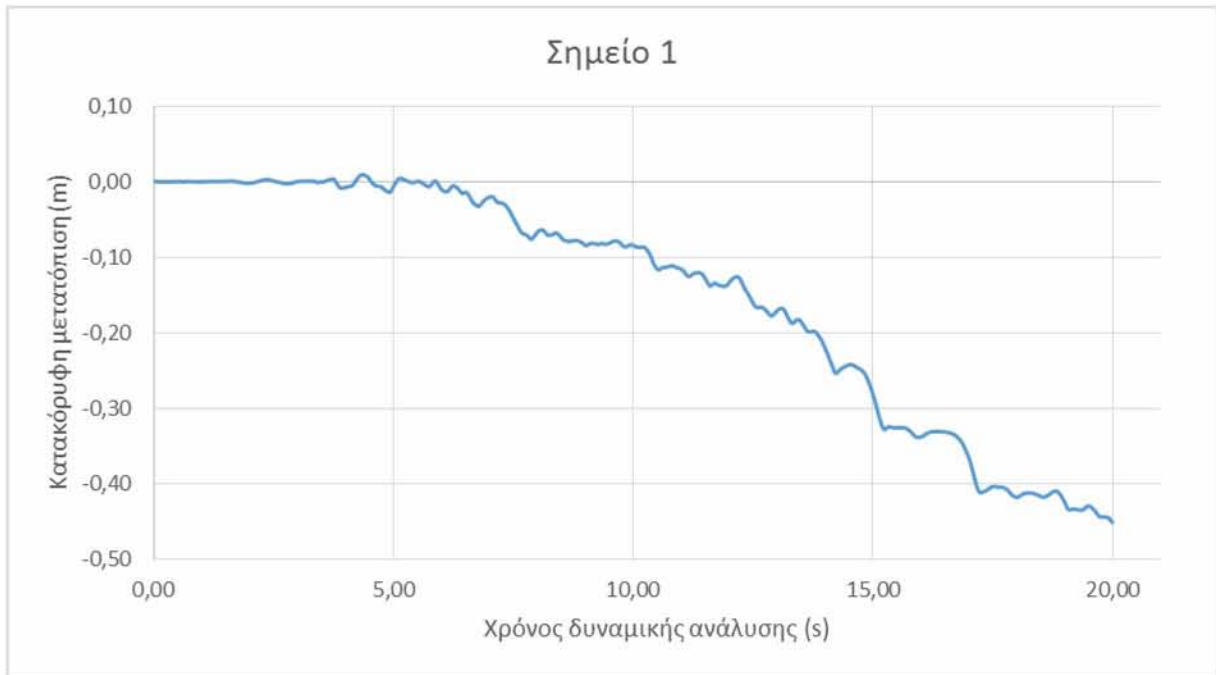
Σχήμα 3.38: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο στην στέψη του φράγματος (Σημείο 1)



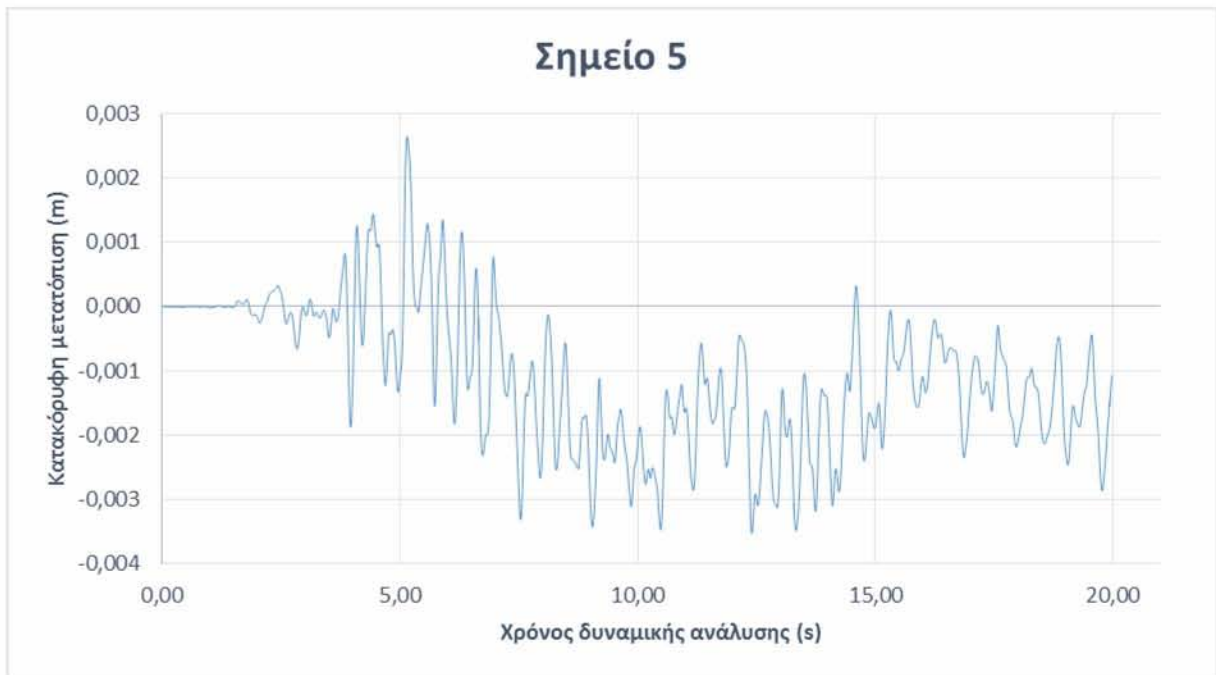
Σχήμα 3.39: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο στην βάση του φράγματος (Σημείο 5)

Σύμφωνα με το σχήμα 3.38 η οριζόντια μετατόπιση στη στέψη λαμβάνει την τιμή των 75 cm ως μέγιστη τιμή και παρατηρείται μόνιμη σημαντική παραμόρφωση. Από το Σχήμα 3.39 λαμβάνεται ως μέγιστη οριζόντια μετατόπιση της βάσης του φράγματος κατά την διάρκεια της δόνησης 22 cm. Τέλος, η μόνιμη οριζόντια μετατόπιση στην στέψη στο τέλος του σεισμού είναι 79 cm, μία τιμή η οποία είναι σημαντική.

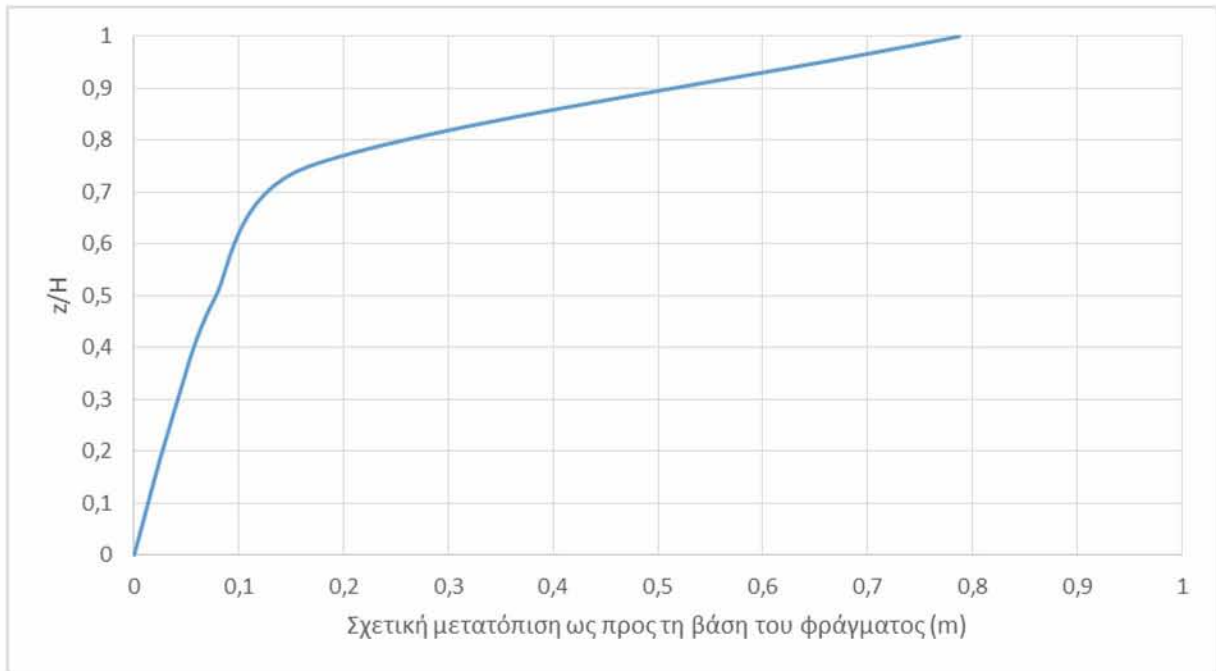
Στο Σχήμα 3.40 εμφανίζεται καθίζηση για την στέψη του φράγματος 45 cm. Στην βάση του φράγματος, η καθίζηση είναι αμελητέα.



Σχήμα 3.40: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1

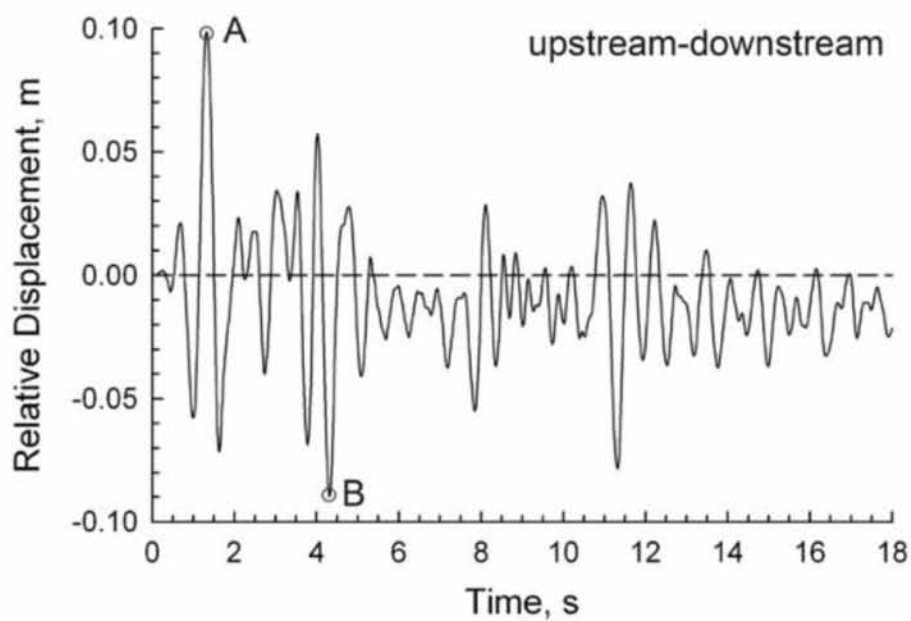


Σχήμα 3.41: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5

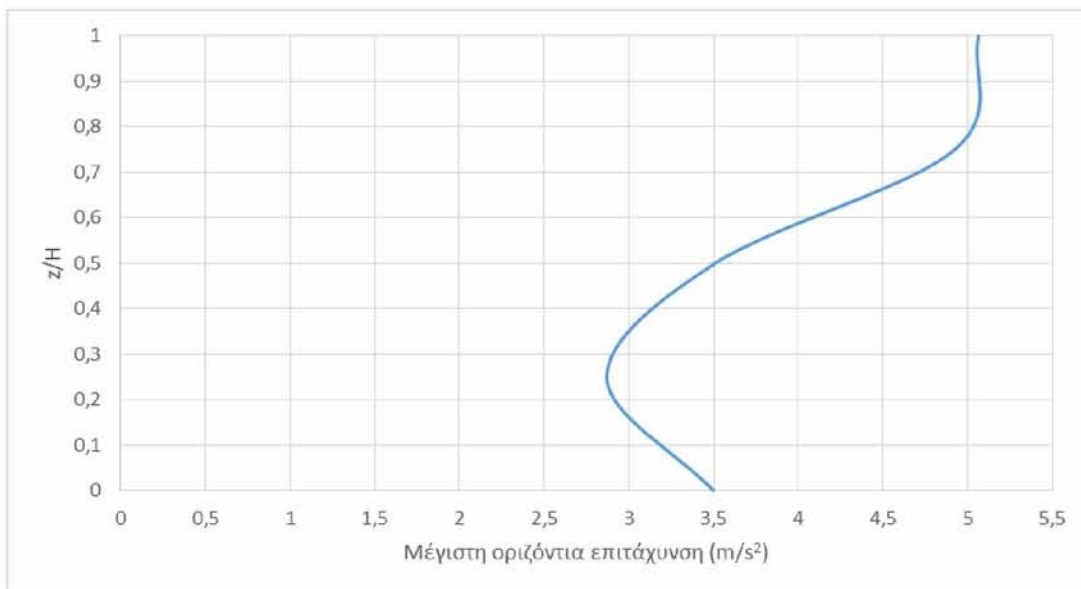


Σχήμα 3.42: Διάγραμμα σχετικής μετατόπισης ως προς τον λόγο z/H

Στην αντίστοιχη ανάλυση σε 3D (Abaqus) , η μέγιστη σχετική μετατόπιση φτάνει την τιμή του 10cm όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.43, σε αντίθεση με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία σε Flac 2D, η τιμή είναι 79 cm. Η δισδιάστατη ανάλυση οδηγεί σε μία αυξημένη ευκαμψία του φράγματος, διότι αγνοεί την ακαμψία που δημιουργούν τα κοντινά πραγματικά όρια της κοιλάδας και αυτός είναι ο λόγος που είναι αρκετά μεγαλύτερες οι μετατοπίσεις σε σχέση με αυτές της τρισδιάστατης ανάλυσης.

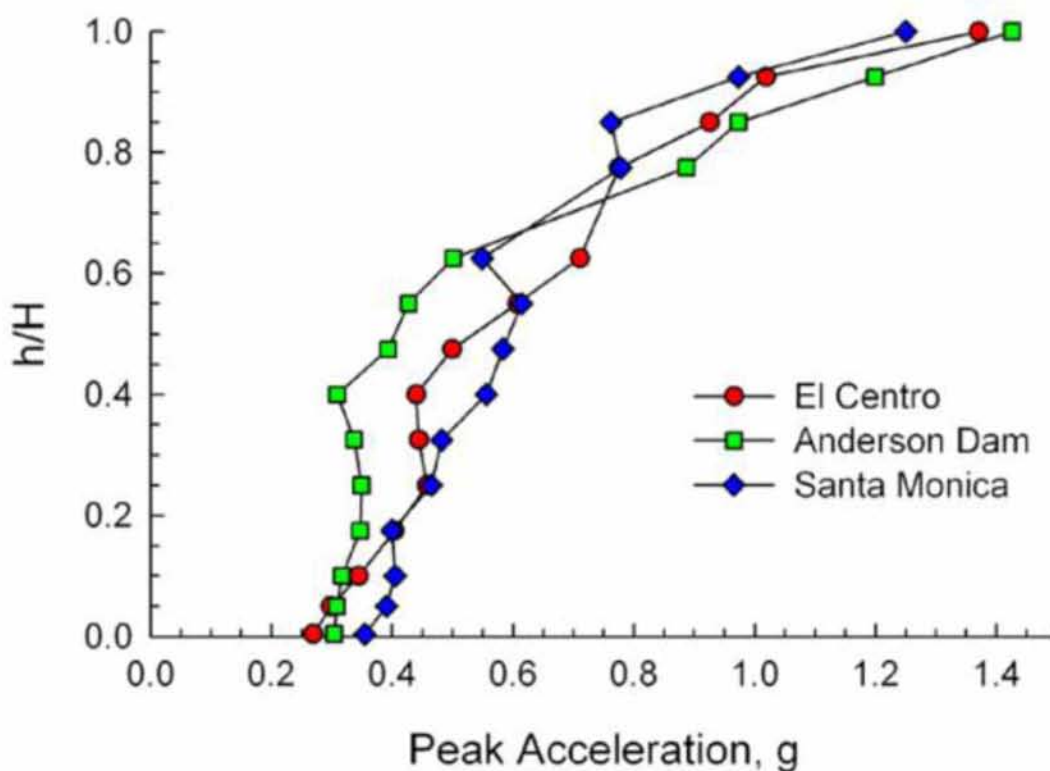


Σχήμα 3.43: Σχετική μετατόπιση στον κεντρικό άξονα του φράγματος σε σχέση με το χρόνο (Dakoulas, 2011) [1].

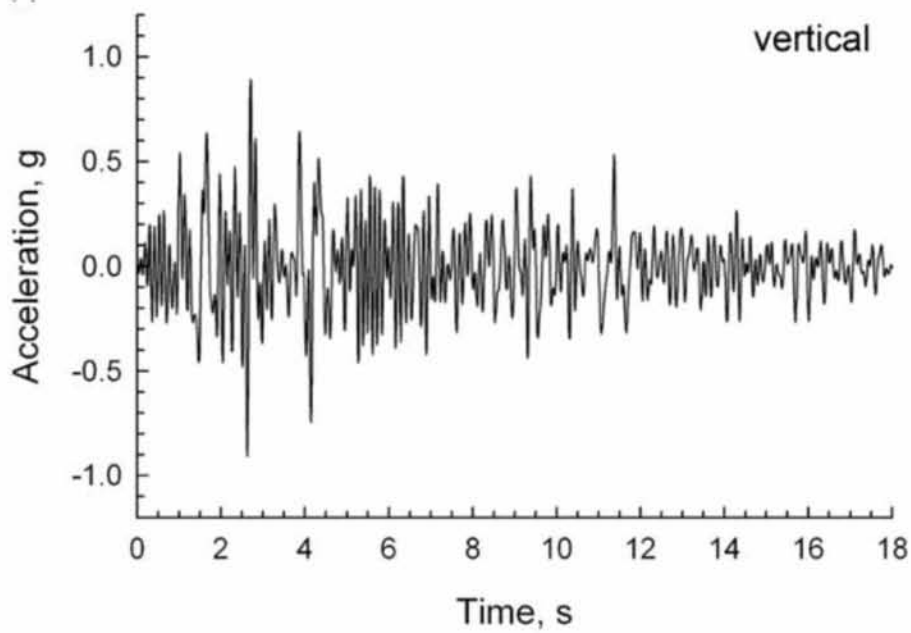


Σχήμα 3.44: Διάγραμμα μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τον λόγο z/H

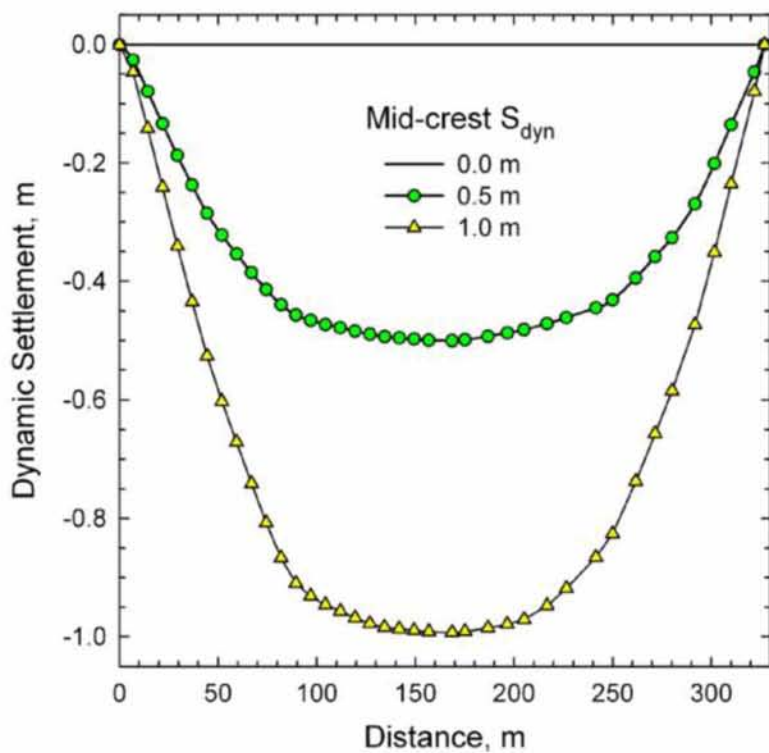
Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη βάση του φράγματος λαμβάνεται σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα (Σχ. 3.44) ίση με 0,35g και η αντίστοιχη μέγιστη στην στέψη ίση με 0,51g. Σε αντίθεση στην τρισδιάστατη ανάλυση είναι 0,35g και 1,4g αντίστοιχα, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.45



Σχήμα 3.45: Διάγραμμα μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τον λόγο z/H (Dakoulas, 2011) [1].



Σχήμα 3.46: Διάγραμμα μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης φράγματος El Centro ως προς το χρόνο (Dakoulas, 2011) [1].



Σχήμα 3.47: Καθίζηση κατά μήκος της στέψης μετά την επιβολή της δυναμικής διέγερσης από τρισδιάστατη ανάλυση (Dakoulas, 2011) [1].

Ένας προσεγγιστικός δείκτης δυναμικής μεγέθυνσης σε δυναμική διέγερση θα ήταν ο λόγος των μέγιστων επιταχύνσεων της στέψης ως προς αυτών της βάσης με τιμές 1,46 και 4 για δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση, αντίστοιχα. Αυτός ο λόγος θα ήταν ακριβής και αντιπροσωπευτικός, αν ο σεισμός είχε την μορφή αρμονικής ταλάντωσης. Από την μεγάλη αυτή διαφορά συμπεραίνεται, ότι η τρισδιάστατη ανάλυση δίνει σχεδόν τριπλάσιες επιταχύνσεις από την δισδιάστατη και αυτό αιτιολογείται ως εξής: στην περίπτωση της τρισδιάστατης ανάλυσης τα προσπίπτουσα κύματα SH στη βάση της κοιλάδας εστιάζουν στο μέσο της ζώνης της στέψης με αποτέλεσμα την συγκέντρωση κινητικής ενέργειας στην περιοχή της στέψης. (Στην δισδιάστατη ανάλυση η εστίαση αυτή των σεισμικών κυμάτων δεν λαμβάνει χώρα).

3.5 Σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης και παρατηρήσεις

Στην περίπτωση στατικής ανάλυσης και τα δυο προγραμματιστικά περιβάλλοντα συμπεριφέρονται ικανοποιητικά από άποψη ακρίβειας, ταχύτητας και δυνατοτήτων. Όμως στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης εκτιμάται ότι ο κώδικας ABAQUS πλεονεκτεί ως προς τον χρόνο επίλυσης. Επίσης, ο κώδικας ABAQUS παρέχει ακριβέστερο υπολογισμό επιταχύνσεων και αυτό, διότι στον κώδικα FLAC ο υπολογισμός των επιταχύνσεων νοθεύεται από μέγιστα που δημιουργούνται λόγω του τύπου της αριθμητικής επίλυσης (explicit formulation), όπου δεν ικανοποιείται πλήρως η δυναμική ισορροπία. Το μειονέκτημα του ABAQUS είναι η δύσκολη εισαγωγή σεισμικής διέγερσης, όταν επιδιώκεται υψηλός βαθμός ακρίβειας σχετικά με την διάδοση των κυμάτων στον περιβάλλοντα χώρο σε αντίθεση με το FLAC, όπου η είσοδος σεισμικής διέγερσης είναι σχετικά εύκολη μέσω της ενσωματωμένης εντολής «ελεύθερου πεδίου».

Κάποιες από τις παραμέτρους που συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη είναι:

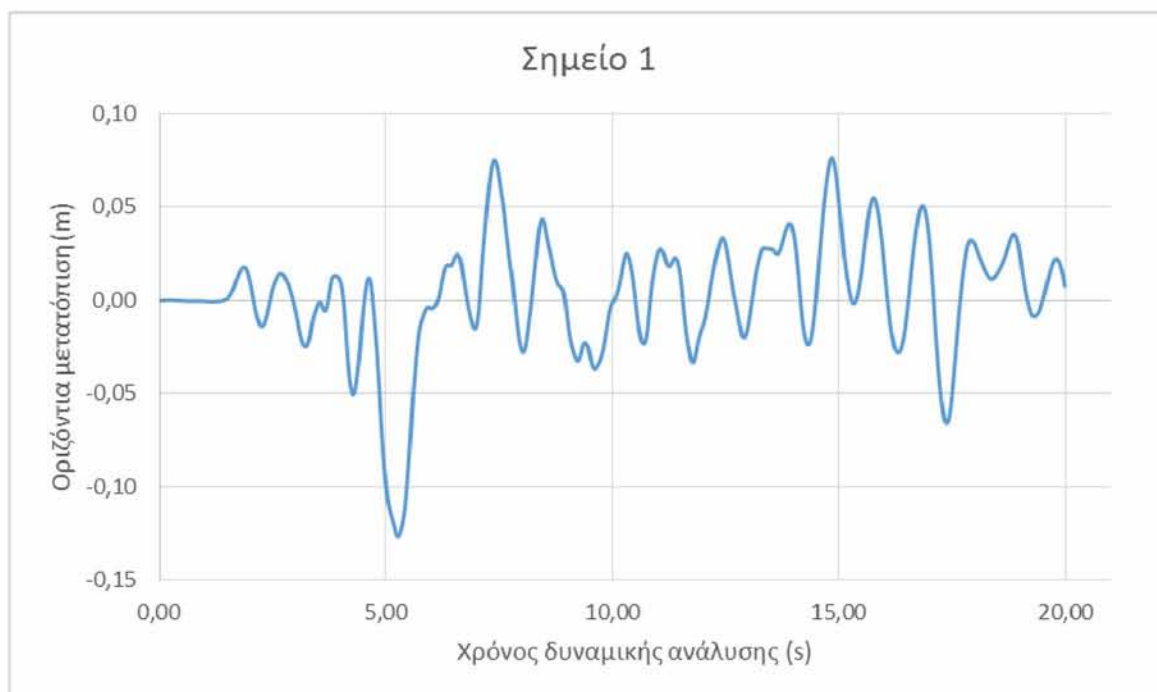
- Τα φαινόμενα ερπυσμού που ακολουθούν μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής δεν λαμβάνονται υπόψη συνήθως στις αναλύσεις και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα πραγματικά αποτελέσματα.
- Η προσομοίωση της λιθορριπής σε λεπτότερες στρώσεις μειώνει το σφάλμα στον υπολογισμό των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Μεγαλύτερο πάχος στρώσης, δίνει μικρότερες τιμές του K , με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η βύθιση της πλάκας και των τάσεων κατά τη λειτουργία (Dakoulas, 2011).

- Σύμφωνα με τους Nobari et al. (1972) [30] όσο περισσότερο μαλακώνουν οι κόκκοι της λιθορριπής με τη διαβροχή τους, τόσο αυξάνει η συμπιεστότητα. Κατά την εισροή του νερού στη λιθορριπή λαμβάνουν χώρα δύο βασικά φαινόμενα: μείωση της τριβής ανάμεσα στους κόκκους και απομάκρυνση των λεπτόκοκκων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συμπιεστότητα.

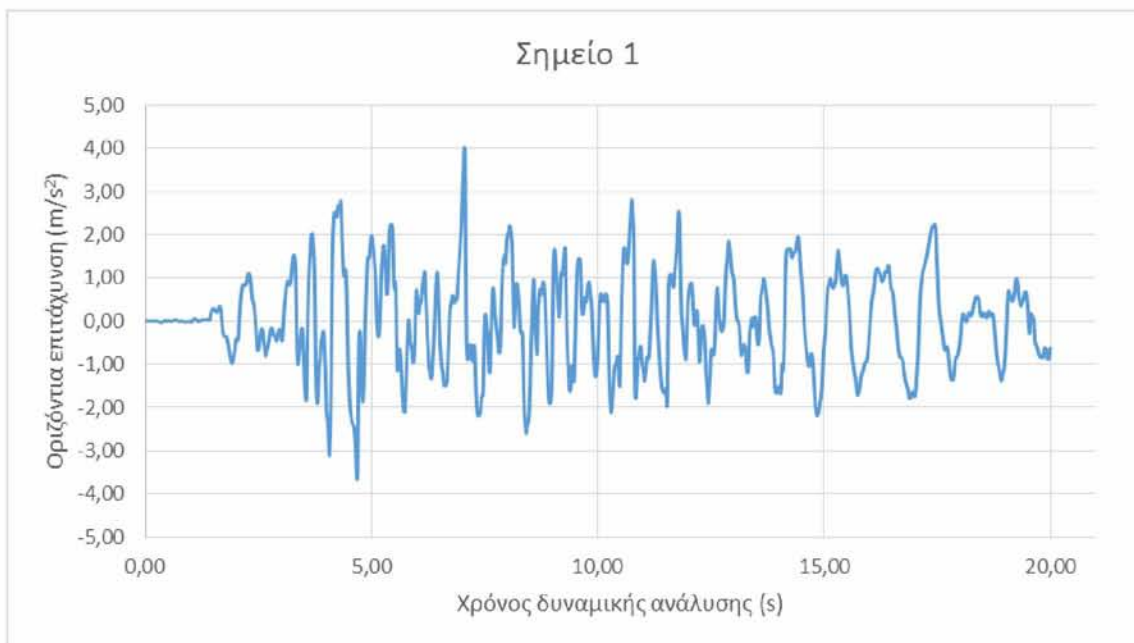
Κεφάλαιο 4 Επίδραση της σεισμικής έντασης

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους της επιτάχυνσης της διέγερσης στην σεισμική συμπεριφορά του φράγματος, χρησιμοποιώντας την ίδια διέγερση (σεισμός Λευκάδας, 2003) βαθμονομημένη σε διαφορετικές τιμές μέγιστης επιτάχυνσης. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι περιπτώσεις μέγιστης επιτάχυνσης διέγερσης ίσης προς 0.15g, 0.25g, 0.35g και 0,45g. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται συνοπτικά κατωτέρω.

Σεισμική Ανάλυση για $a_g = 0,15g$



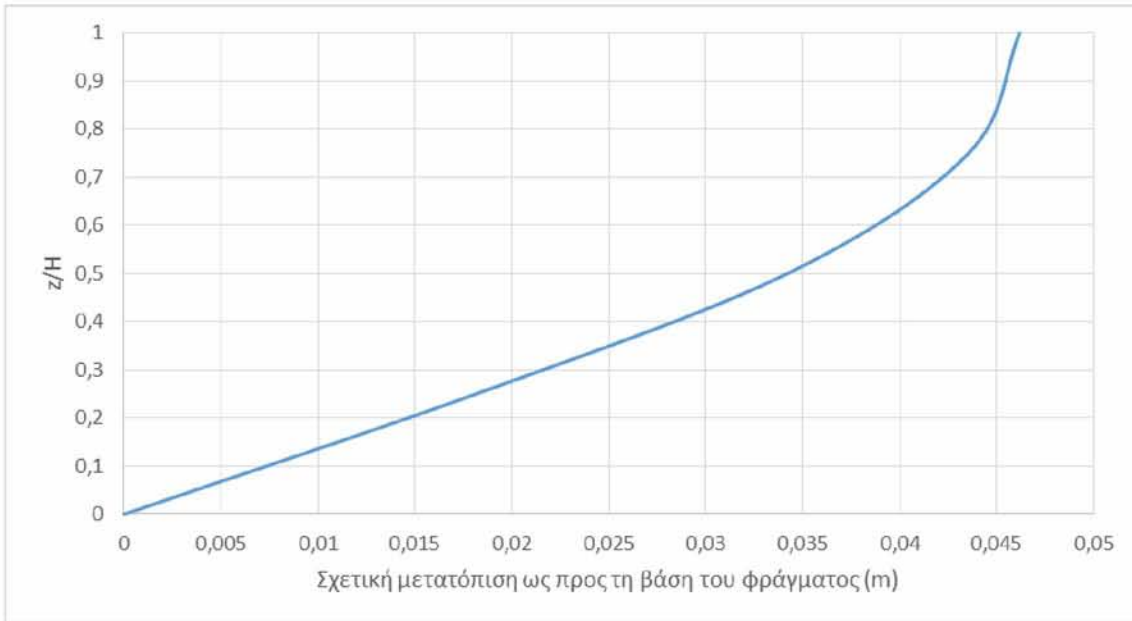
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1.



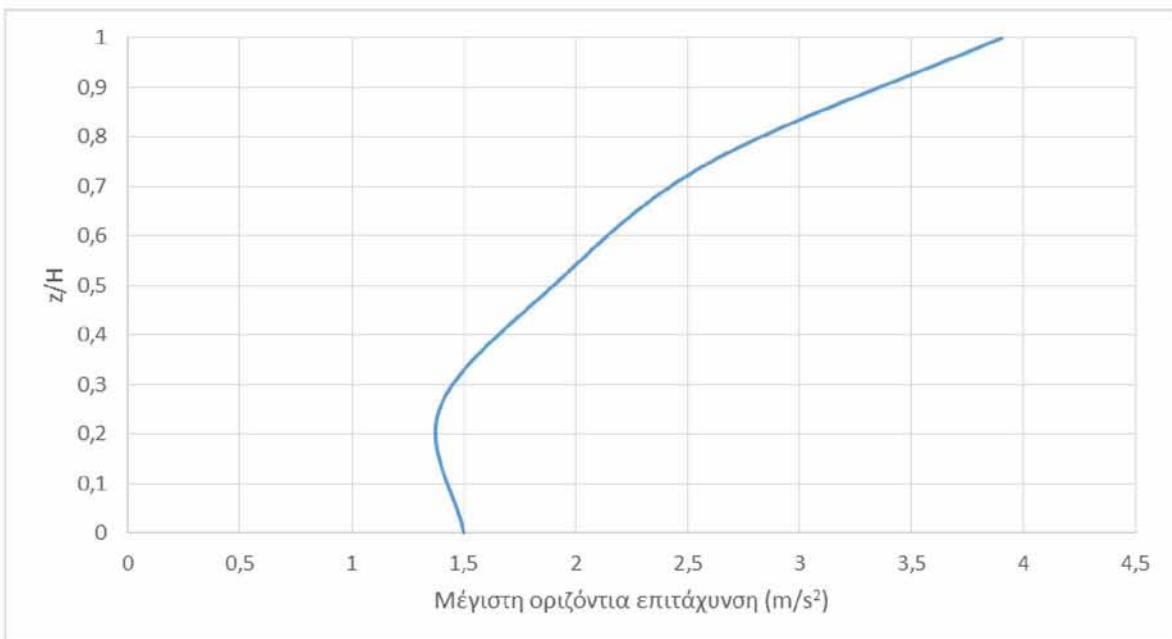
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα σχετικής μετατόπισης για τις αναλύσεις των 0,15g (Σχ. 4.3) και 0,35g (Σχ.3.42) παρατηρείται ότι στην 1^η περίπτωση η μέγιστη σχετική μετατόπιση είναι 4,6cm, ενώ στη 2^η είναι 78,7cm. Παρατηρείται απόκλιση της τάξεως των 74cm.

Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη στέψη του φράγματος λαμβάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 3.44 ίση με 0,51g για την περίπτωση 0,35g σεισμικής διέγερσης. Στην περίπτωση σεισμικής διέγερσης 0,15g, η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση σύμφωνα με το Σχήμα 4.4 είναι ίση με 0,39g. Υπάρχει δηλαδή μείωση 0,12g.

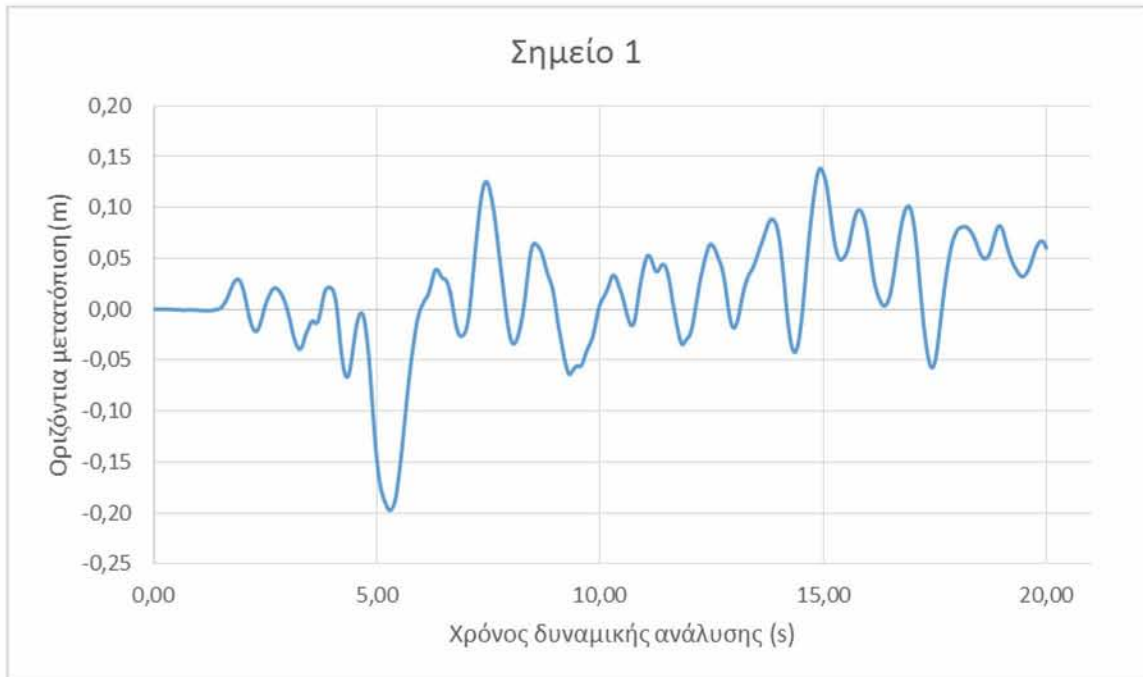


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα σχετικής μετατόπισης ως προς τον λόγο z/H

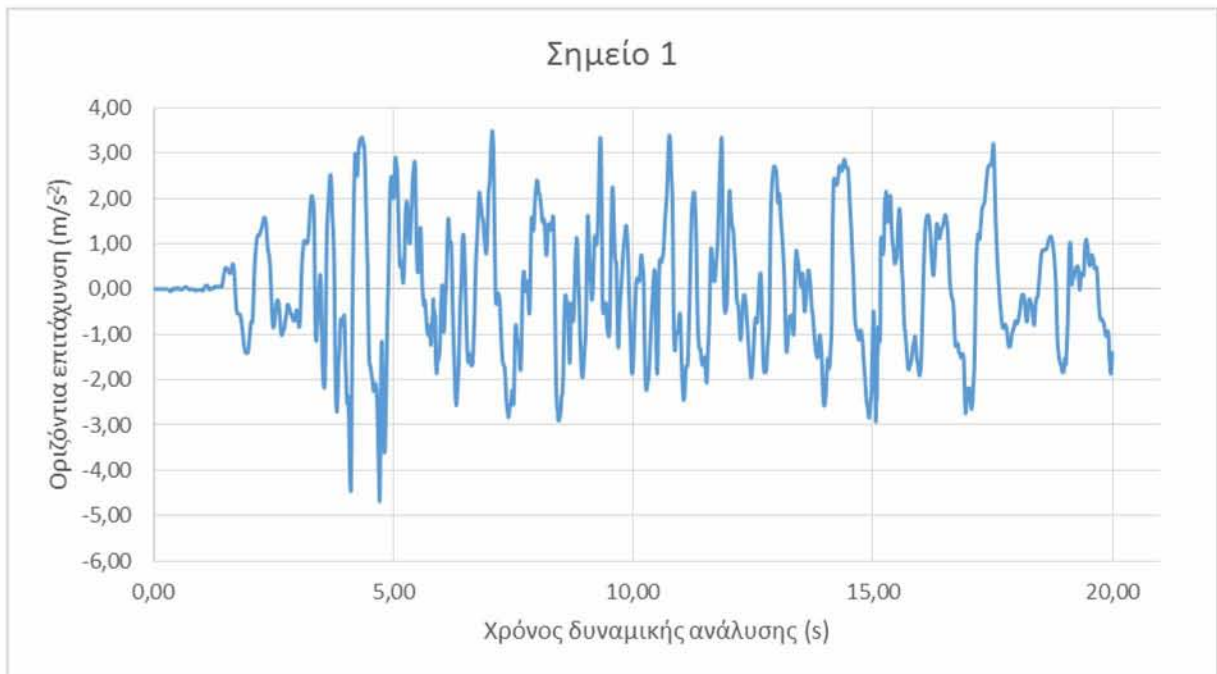


Σχήμα 4.4: Διάγραμμα μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τον λόγο z/H

Σεισμική Ανάλυση για $a_g = 0,25g$



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1.

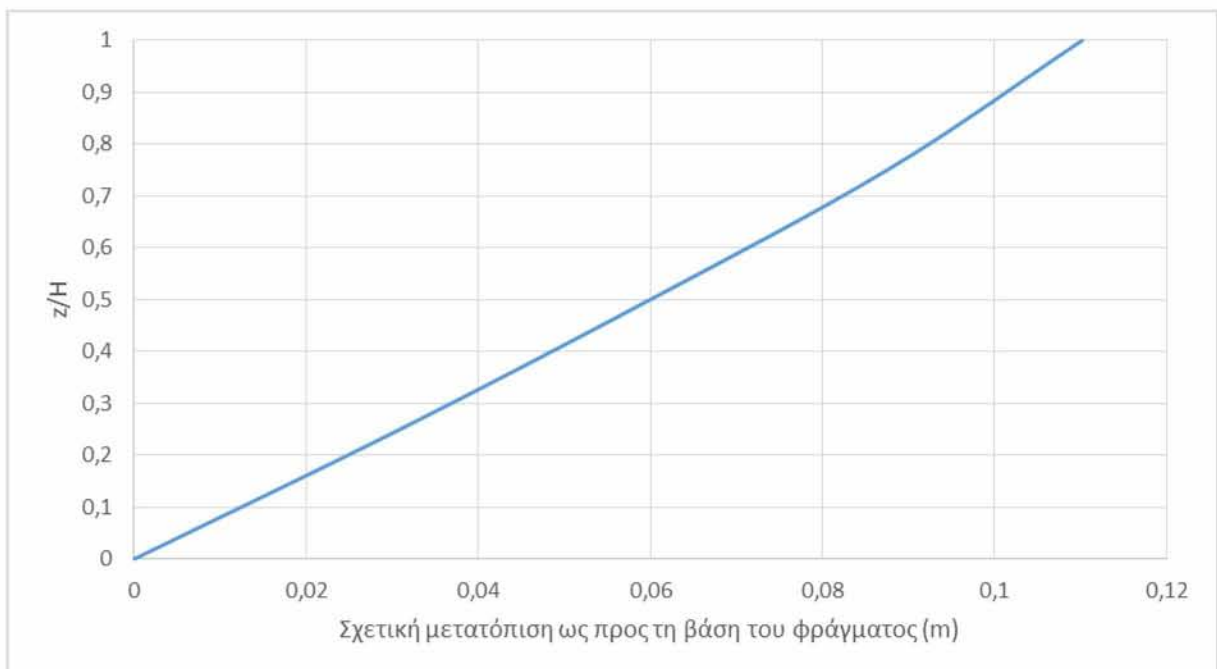


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1.

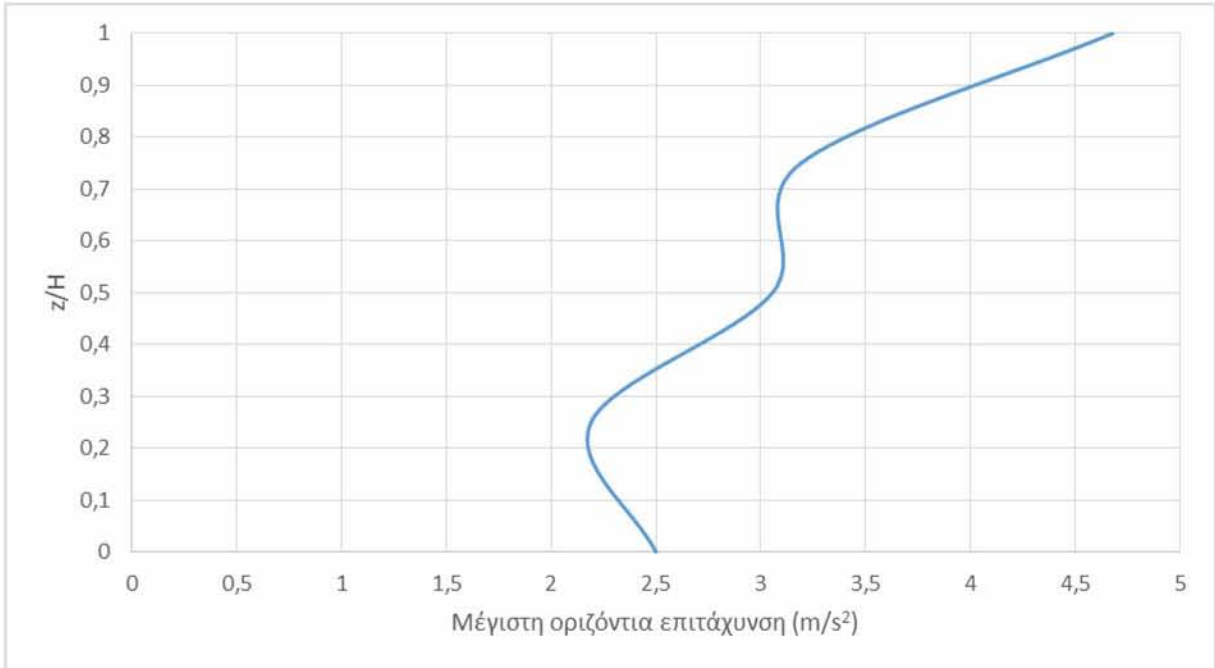
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα σχετικής μετατόπισης για τις αναλύσεις των 0,25g και 0,35g παρατηρείται ότι στην 1^η περίπτωση η μέγιστη σχετική μετατόπιση είναι 11cm, ενώ στη 2^η είναι 78,7cm. Παρατηρείται απόκλιση της τάξεως των 67,7cm.

Οι μέγιστες σχετικές μετατοπίσεις των παραμετρικών αναλύσεων των 0,15g και 0,25g, για απόσβεση Rayleigh 1%, έχουν σχετικά μικρή απόκλιση μεταξύ τους, το οποίο είναι αναμενόμενο. Σε αντίθεση με την ανάλυση για 0,35g υπάρχει σημαντικά μεγάλη απόκλιση.

Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη στέψη του φράγματος λαμβάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 3.44 ίση με 0,51g για την περίπτωση 0,35g σεισμικής διέγερσης. Στην περίπτωση σεισμικής διέγερσης 0,25g, η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση σύμφωνα με το Σχήμα 4.8 είναι ίση με 0,47g. Υπάρχει δηλαδή μείωση 0,04g.

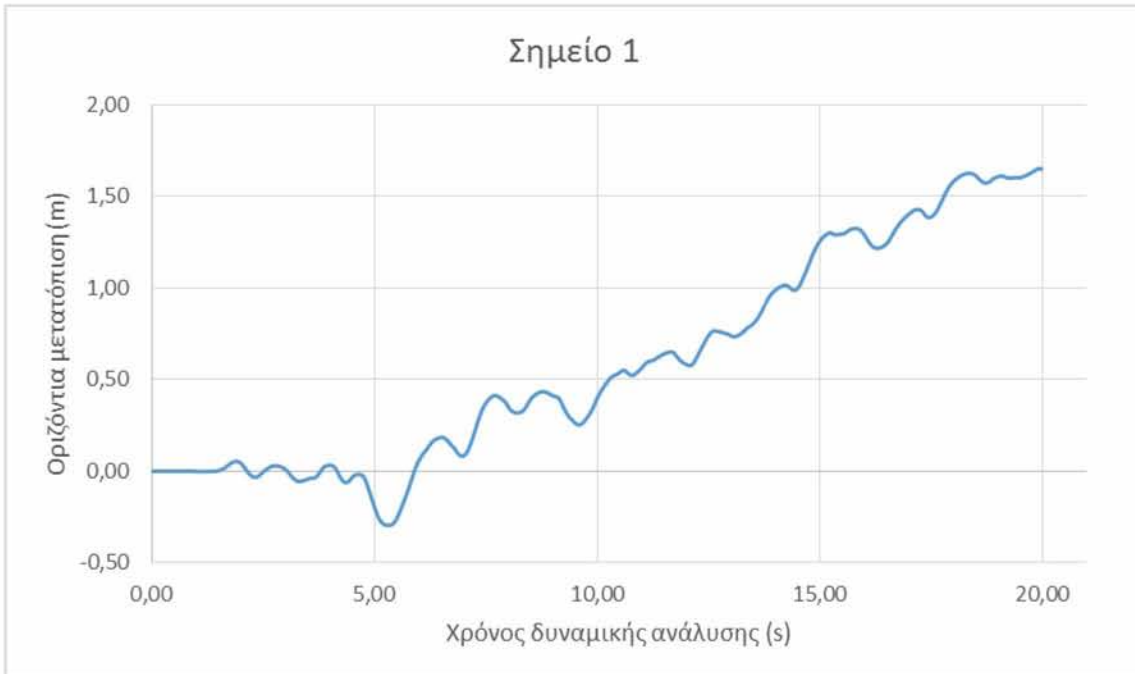


Σχήμα 4.7: Διάγραμμα σχετικής μετατόπισης ως προς τον λόγο z/H

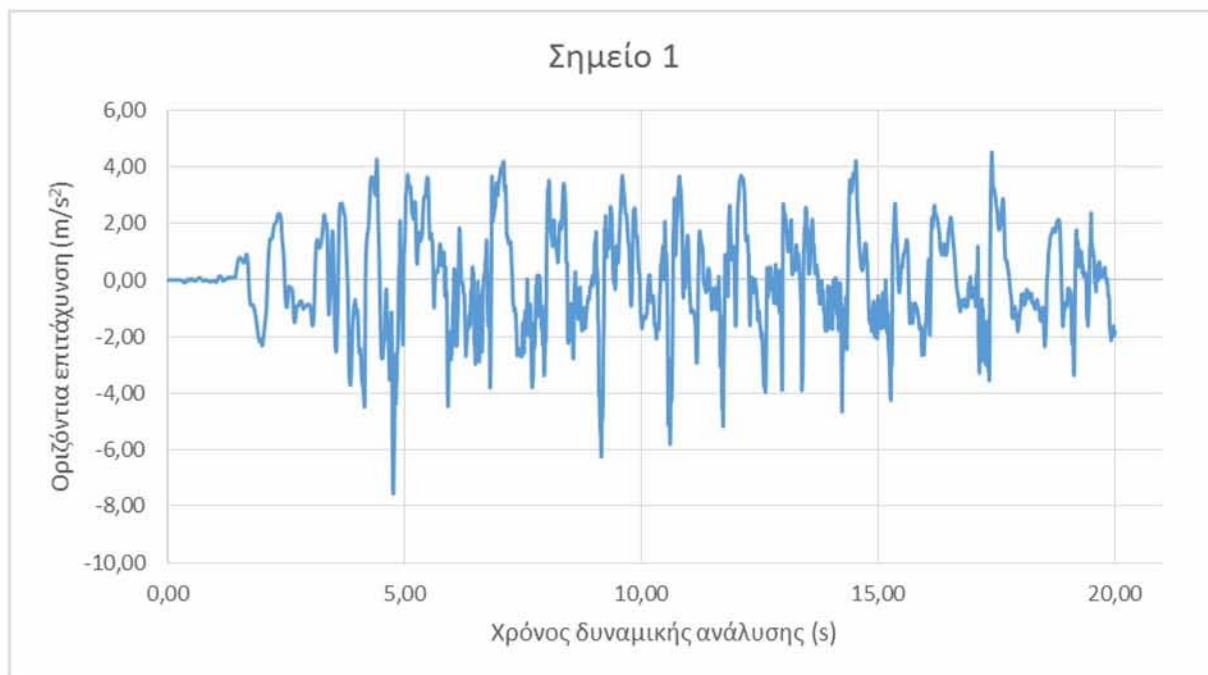


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τον λόγο z/H

Σεισμική Ανάλυση για $a_g = 0,45g$



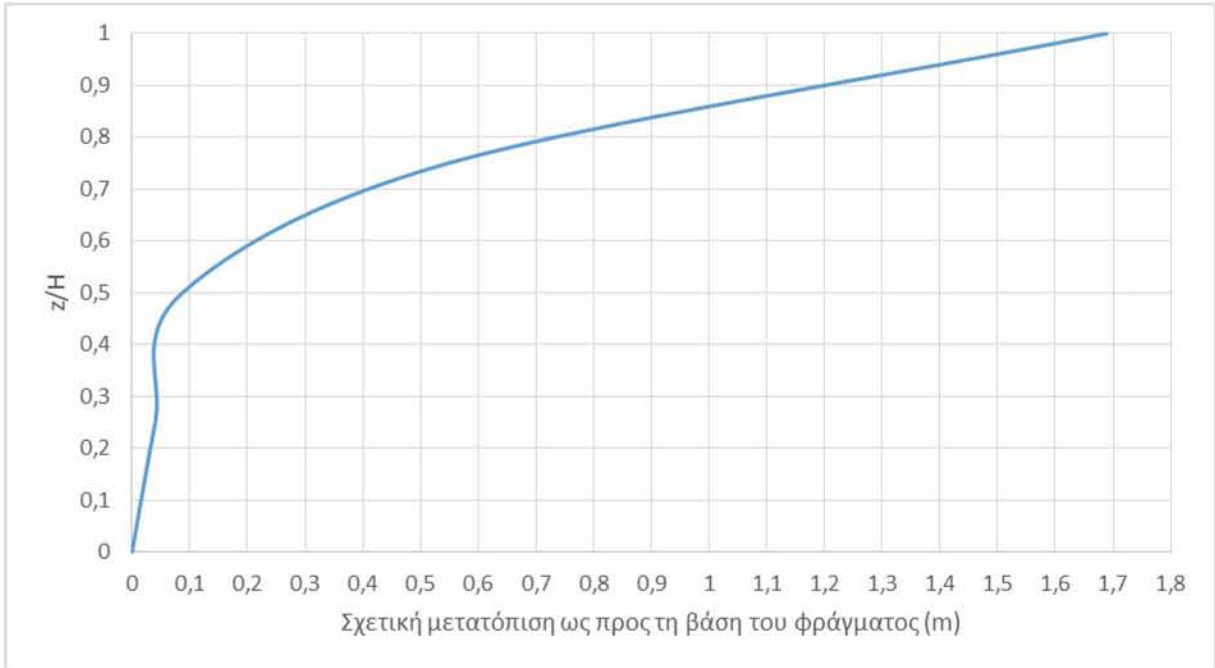
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1.



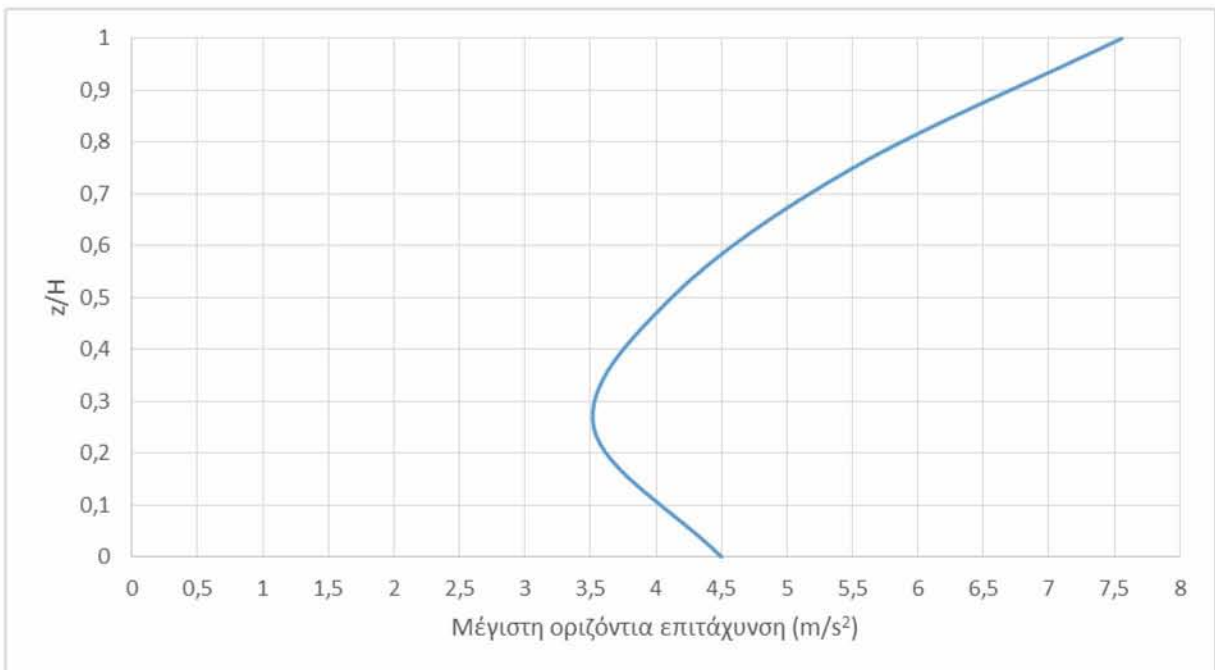
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα σχετικής μετατόπισης για τις αναλύσεις των 0,45g και 0,35g παρατηρείται ότι στην 1^η περίπτωση η μέγιστη σχετική μετατόπιση είναι 169cm, ενώ στη 2^η είναι 78,7cm. Παρατηρείται απόκλιση της τάξεως των 90,3cm. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι στο Flac 2D για επιταχύνσεις μεγαλύτερες των 0,25g με απόσβεση Rayleigh 1%, οι μέγιστες σχετικές μετατοπίσεις αυξάνονται σημαντικά.

Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη στέψη του φράγματος λαμβάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 3.44 ίση με 0,51g για την περίπτωση 0,35g σεισμικής διέγερσης. Στην περίπτωση σεισμικής διέγερσης 0,45g, η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση σύμφωνα με το Σχήμα 4.12 είναι ίση με 0,76g. Υπάρχει δηλαδή αύξηση 0,25g.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα σχετικής μετατόπισης ως προς τον λόγο z/H



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς τον λόγο z/H

Από τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης συμπεραίνουμε πως το Flac 2D για σεισμό διέγερσης 0,25g πλησιάζουν τις τιμές της 3D ανάλυσης των 0,35g όσον αφορά τις σχετικές μετατοπίσεις (11cm – 2D, 10cm – 3D). Παρατηρείται όμως μεγάλη απόκλιση στην μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση τάξης των 0,93g.

Η δυναμική ανάλυση για 0,45g, επέφερε τα πιο κοντινά αποτελέσματα σε σχέση με την μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συγκριτικά με την ανάλυση 3D (0,76g - 2D, 1,4g - 3D) , στην οποία επενήργησε σεισμική διέγερση 0,35g. Αντιθέτως παρατηρείται πολύ μεγάλο σφάλμα μόνιμης και σχετικής μετατόπισης τάξης 1,59m.

Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών έχει δείξει ότι ασφάλεια ενός φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος εξασφαλίζεται από την αποτροπή εισροής νερού στο ανάχωμα. Εισροή νερού μπορεί να προκληθεί από ρήγματα στην πλάκα ή από το άνοιγμα των αρμών. Συνηθέστερη αιτία ρηγμάτωσης της πλάκας αποτελούν οι μεγάλες παραμορφώσεις της λιθορριπής και η μη ευνοϊκή μορφολογία της θεμελίωσης της πλίνθου. Με την ορθή αντιμετώπιση αυτών των δυο παραγόντων, είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη αξιοπιστία στα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Ο περιορισμός των παραμορφώσεων του αναχώματος και κατ' επέκταση των παραμορφώσεων της πλάκας και των μετακινήσεων των αρμών, αποτελούν τον κυριότερο κατασκευαστικό στόχο σε ένα CFRD. Η δυσκαμψία της λιθορριπής, η μορφολογία της κοιλάδας και το έδαφος θεμελίωσης καθορίζουν κατά κύριο λόγο τη συμπεριφορά του φράγματος. Όπως προκύπτει από την κατασκευή και παρακολούθηση της συμπεριφοράς πολλών φραγμάτων, για την επίτευξη ικανοποιητικής δυσκαμψίας της λιθορριπής απαιτείται συνδυασμός πολλών παραμέτρων, με κύριους αυτούς της επαρκούς συμπύκνωσης, της καλής κοκκομετρίας του υλικού, του μεγέθους των κόκκων και λιγότερο αυτών της αντοχής και του είδους του βράχου προέλευσης.

Η σωστή αλληλουχία των φάσεων κατασκευής του αναχώματος και της πλάκας, η σταδιακή κατασκευή της πλάκας, η κατάλληλη προετοιμασία και ενίσχυση του εδάφους θεμελίωσης είναι παράγοντες που καθορίζουν την συμπεριφορά του φράγματος. Η σωστή

λειτουργία της πλάκας επιτυγχάνεται με την τήρηση όλων των κατασκευαστικών προδιαγραφών, την επιπλέον ενίσχυση σε κρίσιμα σημεία (πόδας φράγματος και περιοχή που ενώνεται με το τοιχίο στέψης) και την λήψη ειδικών προστατευτικών μέτρων για την περιμετρική δοκό σκυροδέματος. Η προετοιμασία του εδάφους γίνεται με εκσκαφές, εξομάλυνση και ενίσχυση του σε περίπτωση που παρουσιάζει μικρή αντοχή. Το πιο κρίσιμο στάδιο για την πλάκα είναι αυτό της πρώτης πλήρωσης της λεκάνης, καθώς σύμφωνα με τις καταγραφές κατά το στάδιο αυτό εμφανίζονται οι περισσότερες ρωγμές.

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στην προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, της πλήρωσης λεκάνης και της ανάλυσης της σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος Μεσοχώρας, ύψους 150 m. Η αριθμητική προσομοίωση έγινε με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC σε δύο διαστάσεις. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Duncan, το οποίο περιγράφει καλύτερα τα υλικά του επιχώματος ως προς την εξάρτηση της δυσκαμψίας και αντοχής από την τάση, όμως παρουσίασε αριθμητικά προβλήματα λόγω κυρίως των απότομων κλίσεων. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το ελαστο-πλαστικό καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, το οποίο στο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης συνδυάζεται με ένα υστερητικό προσομοίωμα για την δημιουργία των βρόγχων υστέρησης. Τα αποτελέσματα των δισδιάστατων αναλύσεων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα τρισδιάστατων αναλύσεων με το πρόγραμμα Abaqus (Dakoulas, 2011).

Τα συμπεράσματα των αναλύσεων της διπλωματικής είναι τα εξής:

1. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταδεικνύουν ότι ένα φράγμα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος κατασκευασμένο σε στενή κοιλάδα παρουσιάζει σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά από ένα αντίστοιχο φράγμα σε ευρεία κοιλάδα. Συγκεκριμένα, η δισδιάστατη ανάλυση οδηγεί σε μία σημαντική μείωση

της συνολικής δυσκαμψίας του φράγματος λόγω της απουσίας των πραγματικών περισσότερο δύσκαμπτων αντερεισμάτων της στενής κοιλάδας. Το αποτέλεσμα είναι σημαντικά μεγαλύτερη οριζόντια μετατόπιση του φράγματος κατάντη κατά την πρώτη πλήρωση της λεκάνης. Επίσης, συνέπεια αυτού θα είναι η πλασματική δημιουργία μεγάλων εφελκυστικών τάσεων στην πλάκα λόγω επιμήκυνσης, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει (ή συμβαίνει ελάχιστα) σε μία πιο ρεαλιστική τρισδιάστατη ανάλυση.

2. Κατά την σεισμική συμπεριφορά, η δισδιάστατη ανάλυση οδηγεί επίσης σε σημαντικά μεγαλύτερες οριζόντιες μόνιμες μετατοπίσεις στο τέλος του σεισμού συγκριτικά με την τρισδιάστατη ανάλυση, λόγω της μειωμένης δυσκαμψίας.
3. Οι σεισμικές επιταχύνσεις στην περιοχή της στέψης είναι σημαντικά μικρότερες σε δισδιάστατη ανάλυση από τις αντίστοιχες τρισδιάστατης ανάλυσης, διότι η πρώτη αγνοεί την συγκέντρωση ενέργειας από την εστίαση των προσπιπτόντων κυμάτων από διάφορα σημεία της κοιλάδας στην εν λόγω περιοχή.

Τέλος σημειώνεται ότι η συνεχής ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς του φράγματος είναι απαραίτητη για τη λήψη των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης και ενίσχυσης των τμημάτων του φράγματος όταν το απαιτήσουν οι ενδείξεις. Η σύγκριση των καταγραφών με τις εκτιμώμενες από τις αναλύσεις τιμές βοηθά πολύ στη βελτίωση των μεθόδων ανάλυσης με στόχο τη βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών τεχνικών.

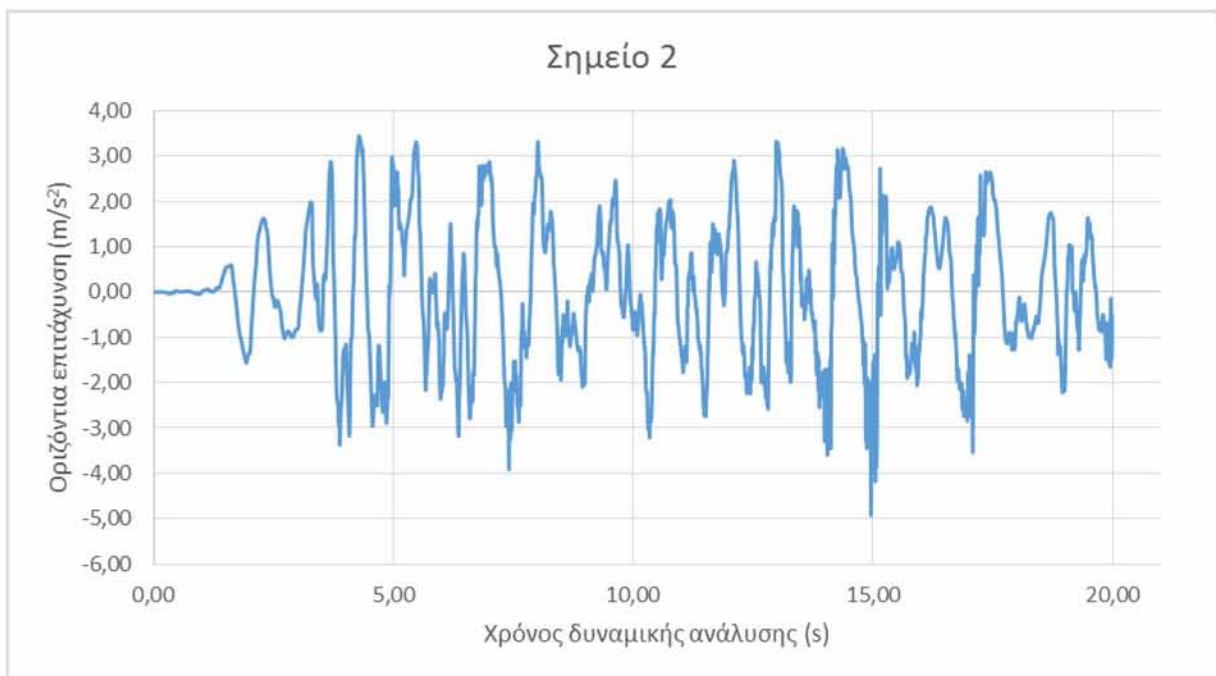
Βιβλιογραφία

- [1] Dakoulas P., 2011. “Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons”, Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Elsevier Ltd publication, Volos
- [2] ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams), (1991), Guidelines on Concrete-Faced Rockfill Dams.
- [3] Cooke, J. B., 1984. “Progress in Rockfill Dams”, (18 th Terzaghi Lecture). J. Geotech. Engrg., ASCE, 110, 10, 1381-1414.
- [4] Barton, N., and Kjaernsli, B.,1981. “Shear Strength of Rockfill”, J. Geotech. Engrg., ASCE, 107, GT7, 873-891.
- [5] Cooke, J. B., and Sherard, J.L., 1987. Concrete-Face Rockfill Dam: II. Design”, J. Geotech. Engrg., ASCE, 113,10,1113-1132.
- [6] Cooke , J.B. and Sherard, J.L., 1985, Concrete Faced Rockfill Dams-Design, Construction and Performance ASCE Geotechnical Symposium, ASCE publication, Detroit.
- [7] Cooke, J.B., (1991), The concrete-faced rockfill dam, Water Power & Dam Construction, 11-14.
- [8] Hunter G., and Fell R.,2003. “Rockfill Modulus an Settlement of Concrete Face Rockfill Dams”, J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 129, 10, 909-917.
- [9] Johannesson P.. “Assessing the performance of high CFRDs: rockfill properties creep” , Palmi Associates, USA . Hydropower&Dams, Issue Five, 2007.
- [10] Kondner, R.L.,1963. “Hyperbolic Stress-Strain Response. Cohesive Soils”, J.of Soil Mech. And Found. Div., ASCE, 89, SMI, 115-143.
- [11] Massiera M., Szostak-Chrzanowski A., Vautour J., Hammamji Y.. “Deformations of CFRDs, resting on soil foundations” TECHNICAL SCIENCES, Abbrev : Techn. Sc.,No 8 , Y.2005
- [12] OZKUZUKIRAN R. S. , 2005. “Settlement behaviour of Concrete Faced Rockfill Dams” A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of Middle East Technical University
- [13] Water Power & DAM CONSTRUCTION στο: www.waterpowermagazine.com (επίσκεψη 20/3/2018)
- [14] Θανόπουλος Ι., (2002), Σημειώσεις του μαθήματος “Φράγματα- Χωμάτινες κατασκευές”, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας.
- [15] Itasca, (2004). FLAC User’s Guide, Version 7.0, Itasca Consulting Group. Inc, Minnesota, USA.

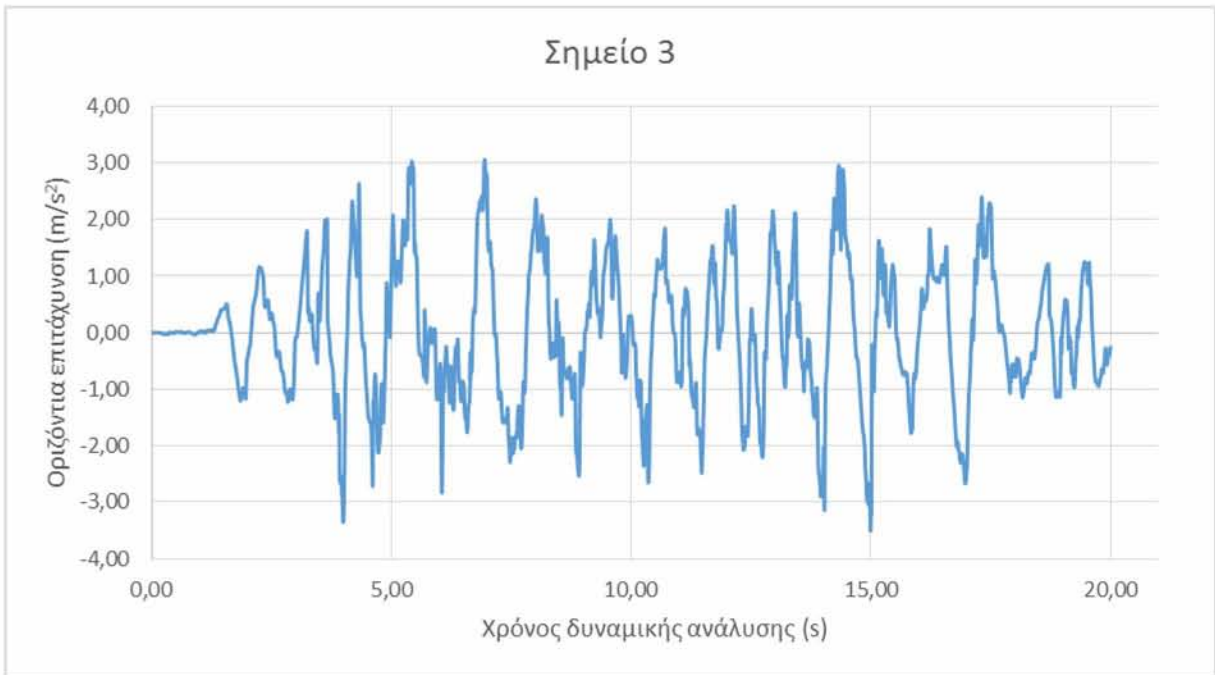
- [16] Γκαζέτας Γ., Ντακούλα Π. και Αναστασόπουλος Ι.,(2006), “Αστοχία λιμενικών κρηπιδοτοίχων στο σεισμό της Λευκάδας 14-08-2003” , 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη.
- [17] Φώτης Π. Μάρης, “Ελεύθερο ύψος φράγματος”, Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου.
- [18] ICOLD COMMITTEE ON MATERIALS FOR FILL DAMS, (2004), “CONCRETE FACE ROCKFILL DAMS CONCEPTS FOR DESIGN AND CONSTRUCTION”.
- [19] Πουλάκη Αναστασία, (2008) “Επίδραση της δυσκαμψίας στη συμπεριφορά λιθόρριπτων φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs)”, Διπλωματική εργασία, Βόλος
- [20] ΚΛΕΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΛΙΑΠΗ, (2015) “Σεισμική Απόκριση Κρηπιδότοιχου Βαρύτητας Λιμένος Πειραιά”, Διπλωματική εργασία, Βόλος
- [21] Dam, Wikipedia στο: <https://en.wikipedia.org/wiki/Dam> (επίσκεψη 19/3/2018)
- [22] διαΝΕΟσις στο: <https://www.dianeosis.org/2017/02/mesochora> (επίσκεψη 19/3/2018)
- [23] Leps, T. M., (1970) “Review of Shearing Strength of Rockfill”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v. 96, SM4, p.1159-1170
- [24] Barton, N., Kjaernsli, B., “Shear Strength of Rockfill”, Journal Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 107 N. 7
- [25] Marsal, (1976), R. J., “Mechanical Properties of Rockfill, in Embankment Dam Engineering – Casagrande Volume”, John Wiley
- [26] Charles, (1980), J. A., Watts, K. S., “The Influence of Confining Pressure on the Shear Strength of Compacted Rockfill Dams”, Geotechnique, Vol. 29, No. 4.
- [27] ICOLD, (1993) “Rock Materials of Rockfill Dams”, International Commission on Large Dams, Bulletin 92.
- [28] Fell R., Mac Gregor P., Stapledon, D. & Bell , G. (2005). “Geotechnical engineering of dams” A.A.BALKEMA PUBLISHERS
- [29] Hunter G., and Fell R.,(2003), “Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams”, J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 129, 10, 909-917.
- [30] Nobari, E. S., and Duncan, J. M.,(1972). “Movements in Dams due to Reservoir Filling”, ASCE: Specialty Conf. On Performance On Earth and Earth Supported Structures,”, ASCE, 797-815.
- [31] Chopra, A.K. (1995) “Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”. Prentice-Hall, New Jersey.
- [32] David S. Malkus, Xiangjun Qiu, (1988), “Divisor structure of finite element eigenproblems arising from negative and zero masses”, Elsevier B.V.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

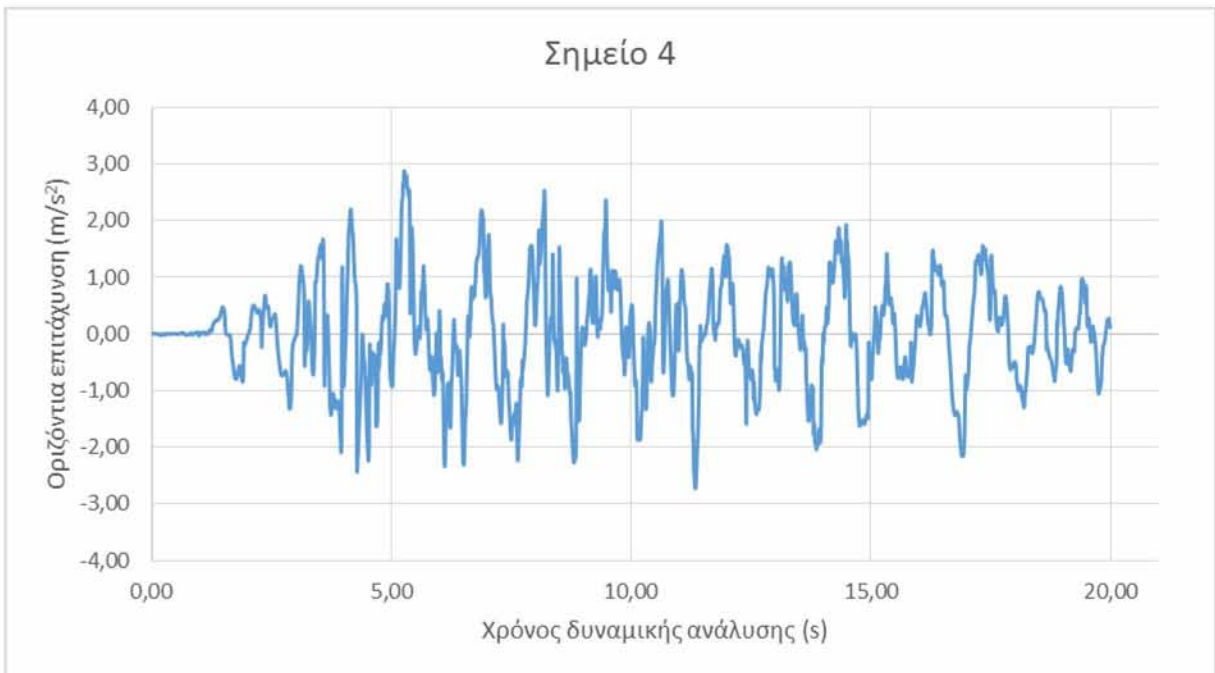
Ανάλυση 0,35g



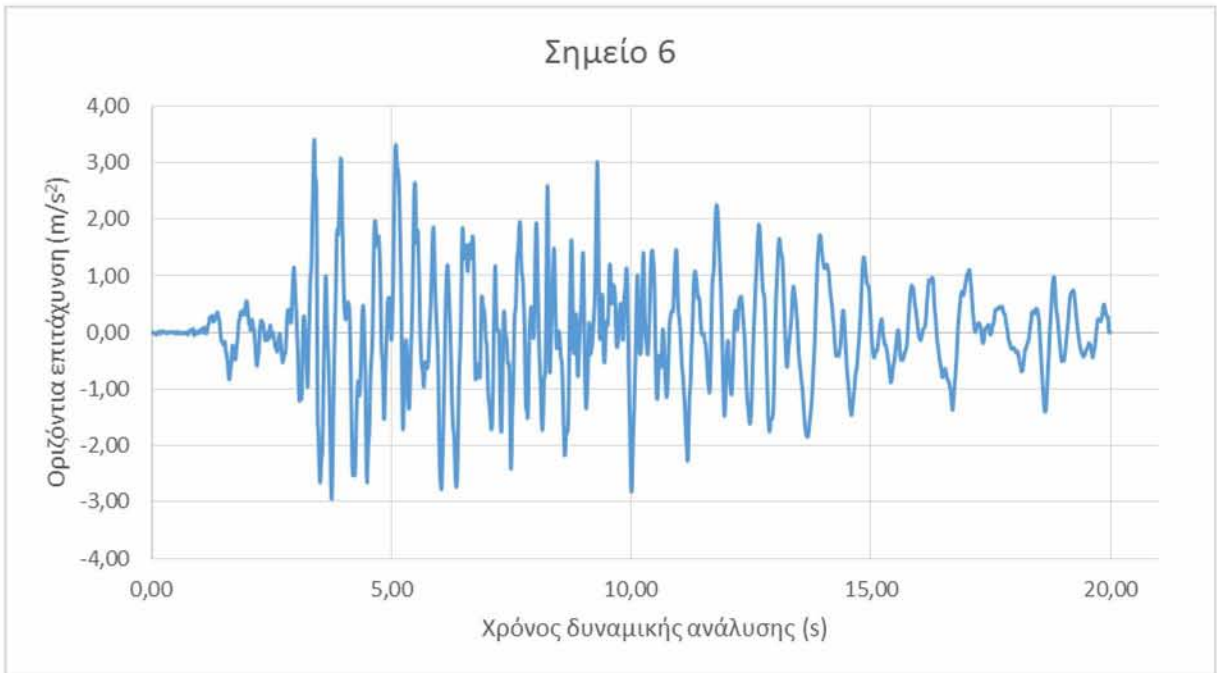
Σχήμα 1: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 2



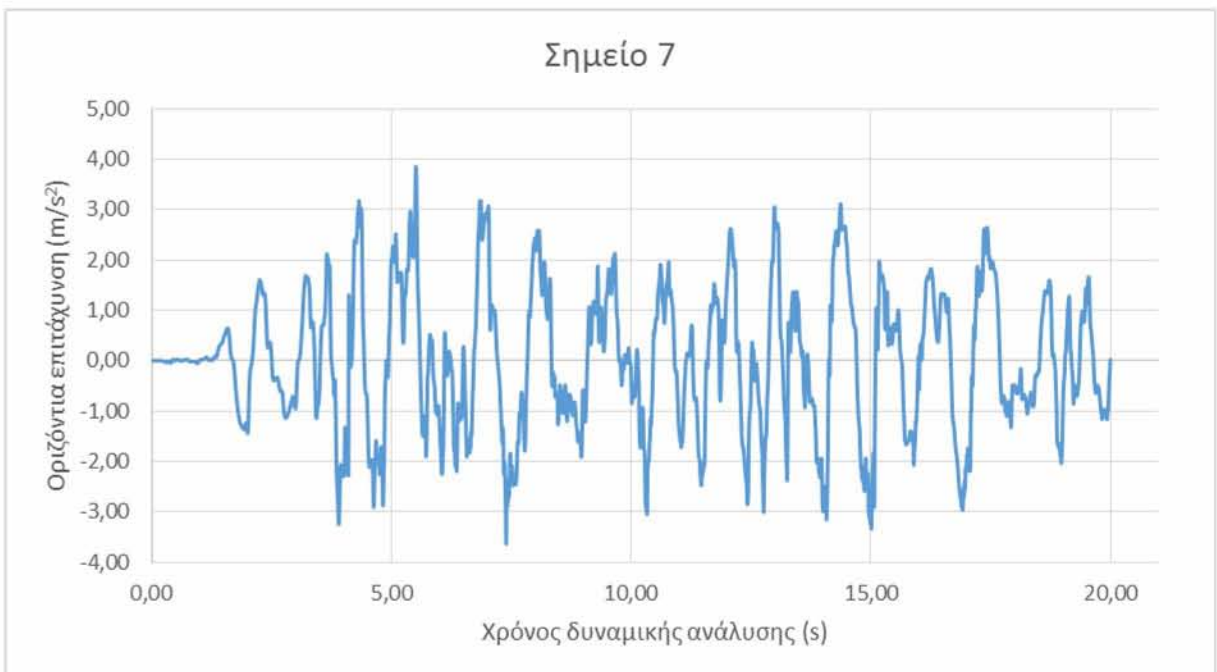
Σχήμα 2: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 3



Σχήμα 3: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 4



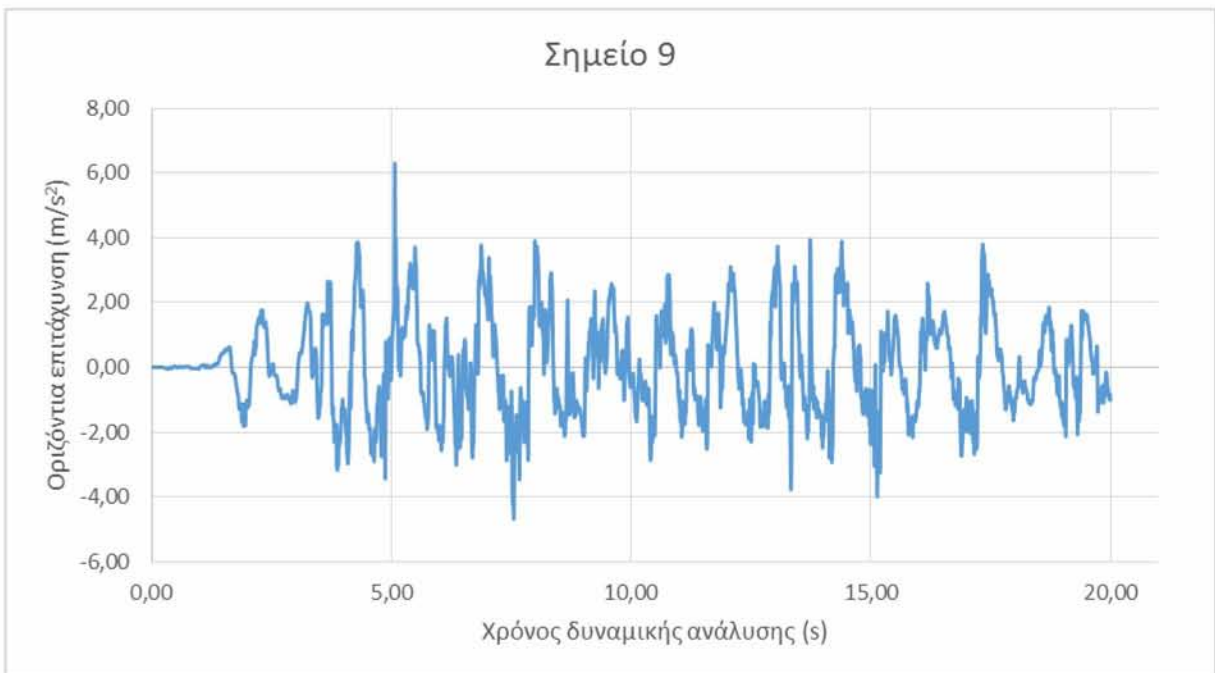
Σχήμα 4: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 6



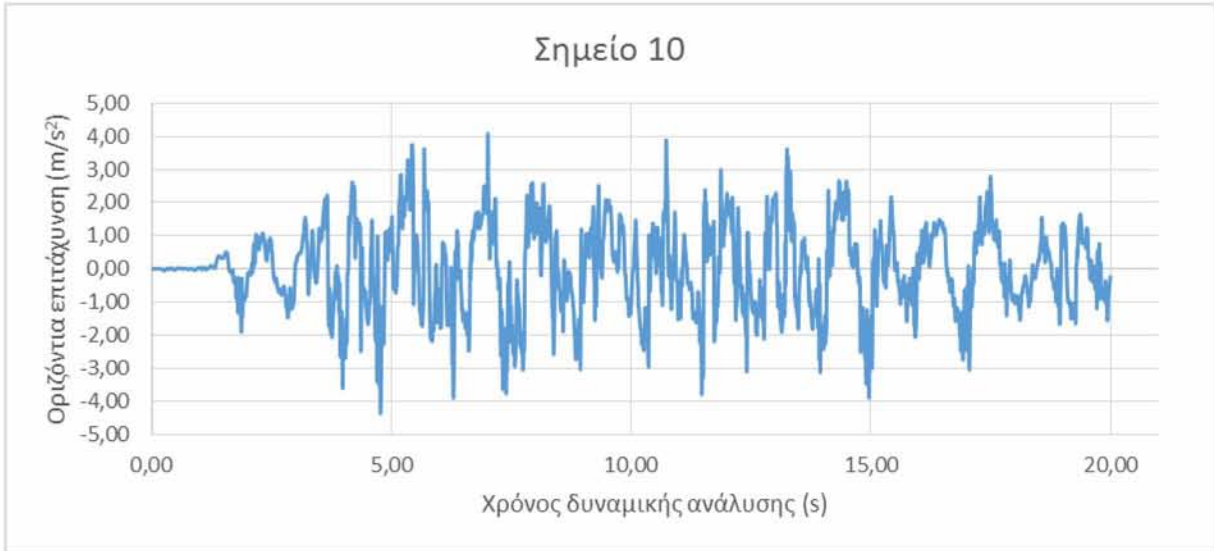
Σχήμα 5: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 7



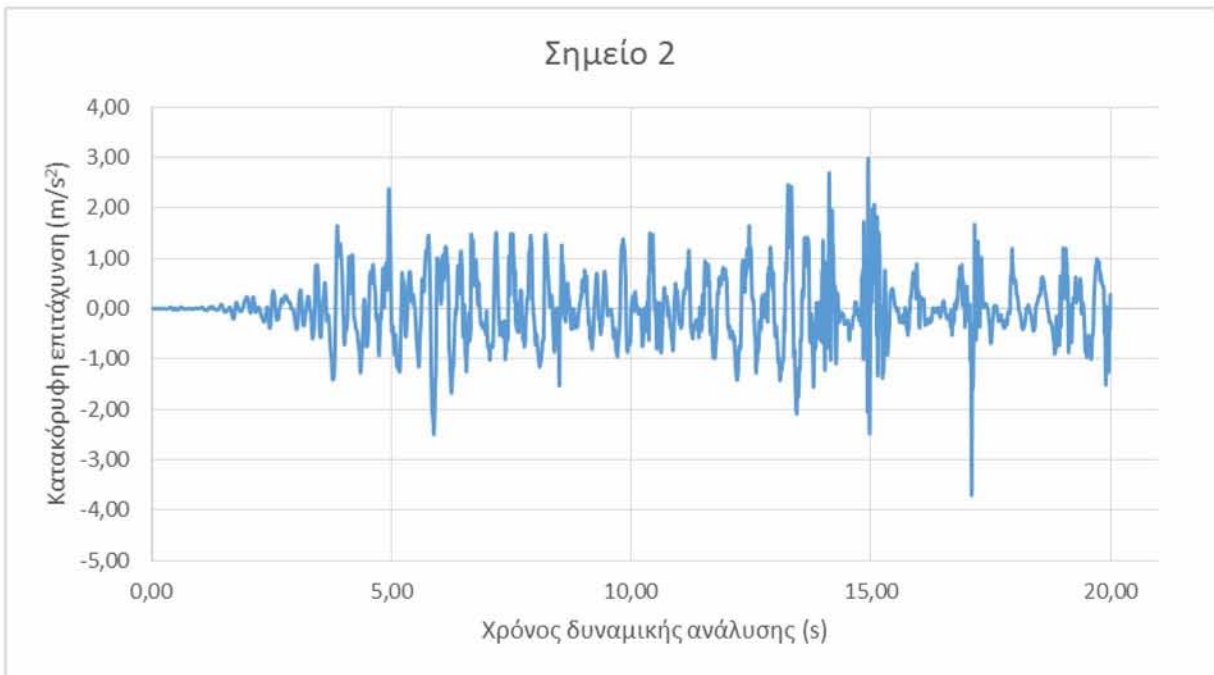
Σχήμα 6: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 8



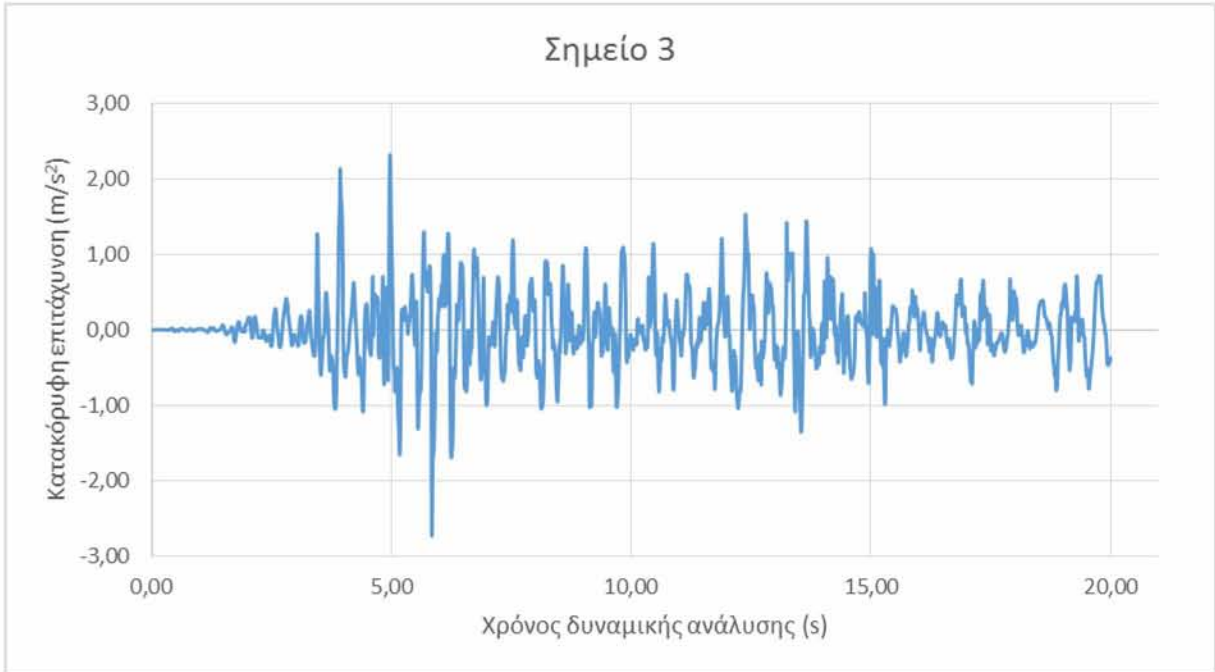
Σχήμα 7: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 9



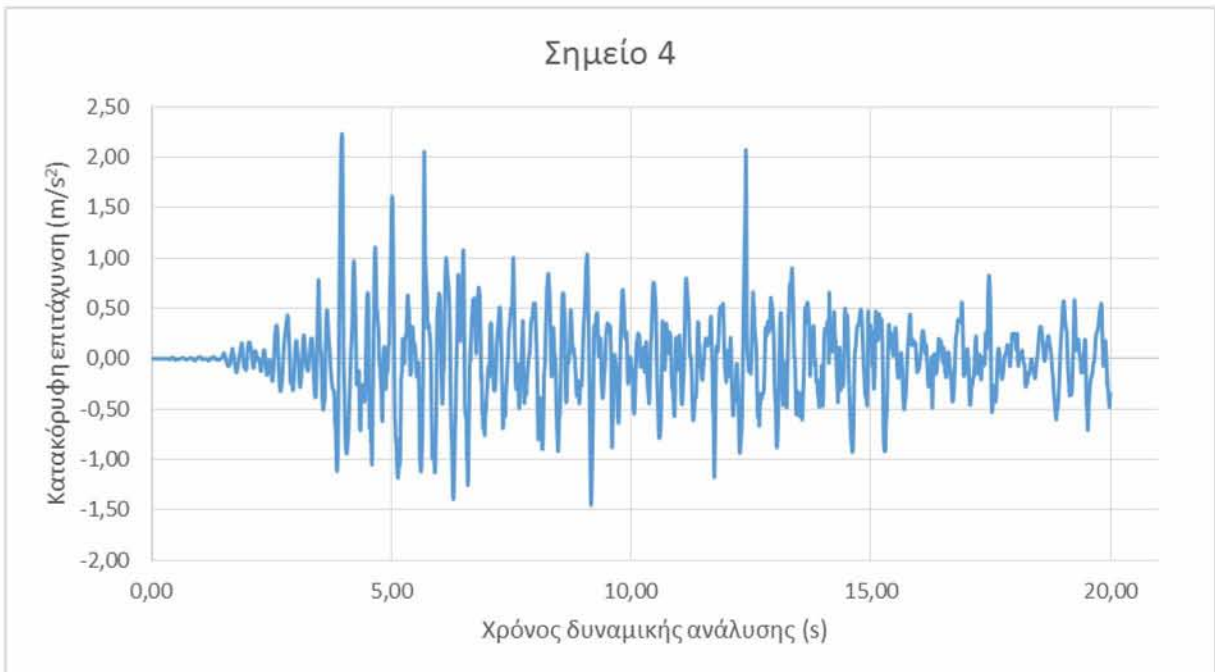
Σχήμα 8: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 10



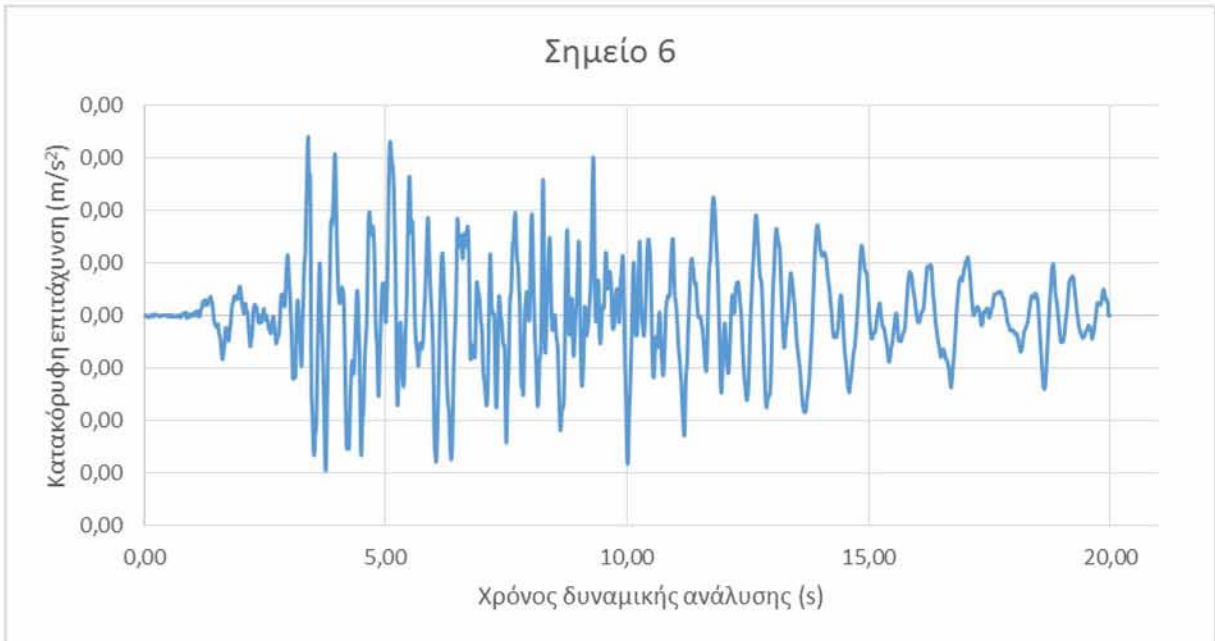
Σχήμα 9: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 2



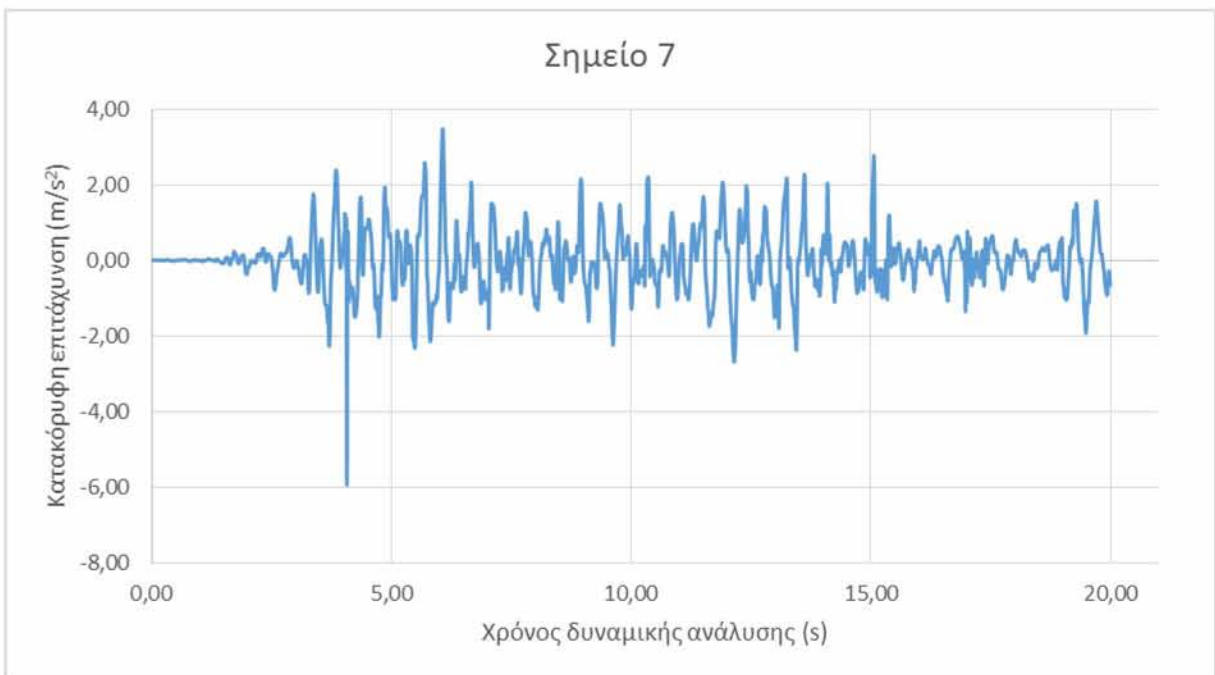
Σχήμα 10: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 3



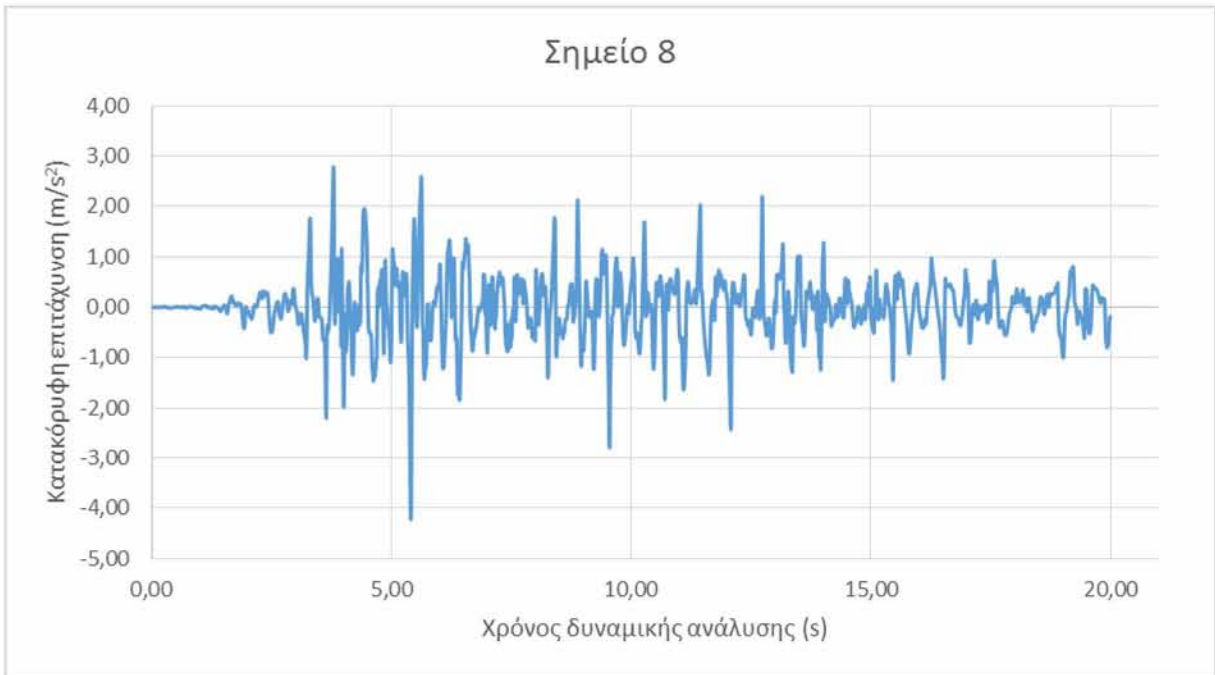
Σχήμα 11: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 4



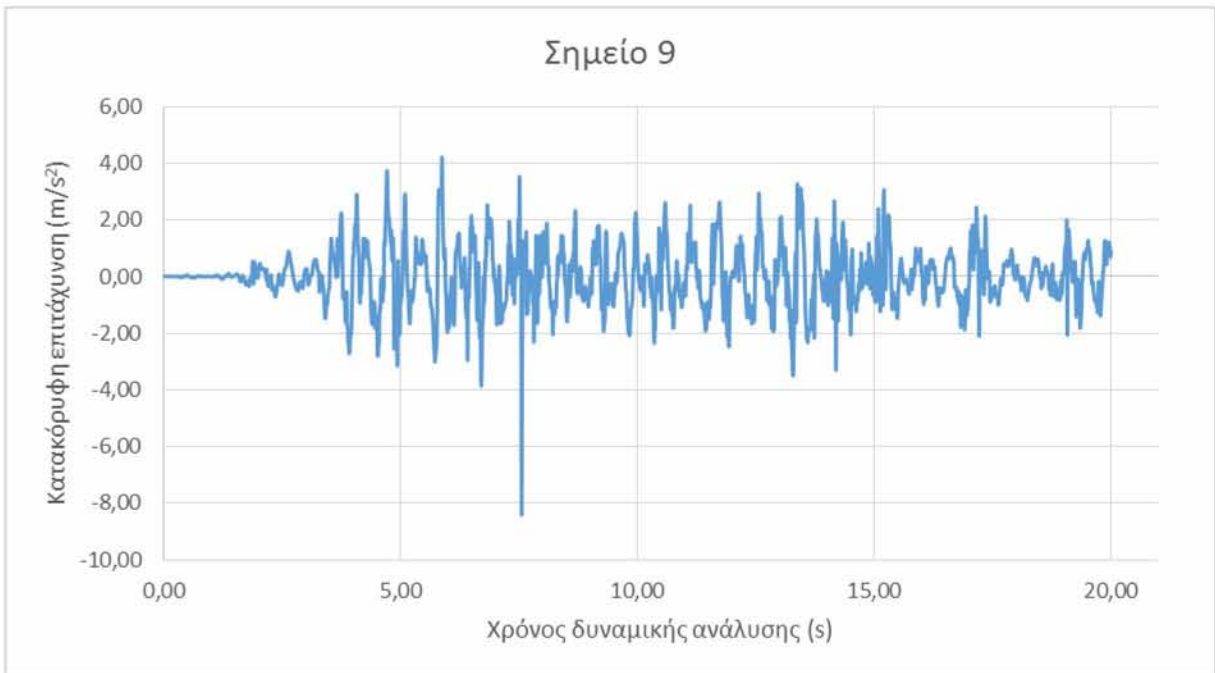
Σχήμα 12: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 6



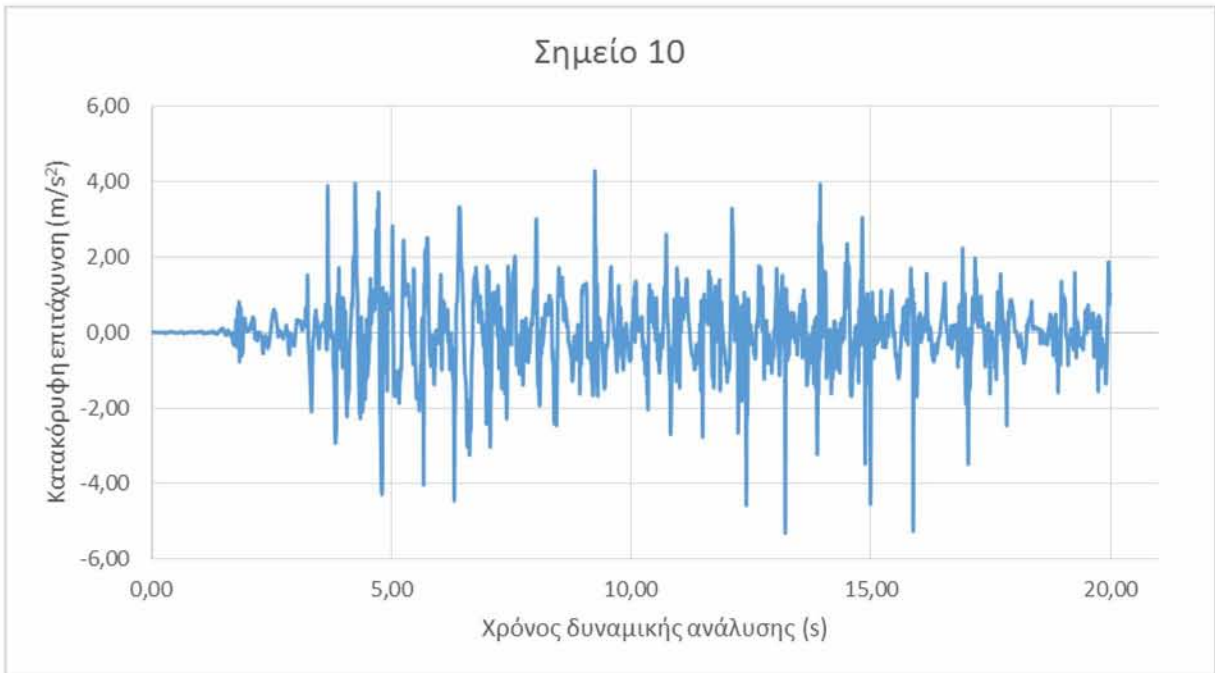
Σχήμα 13: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 7



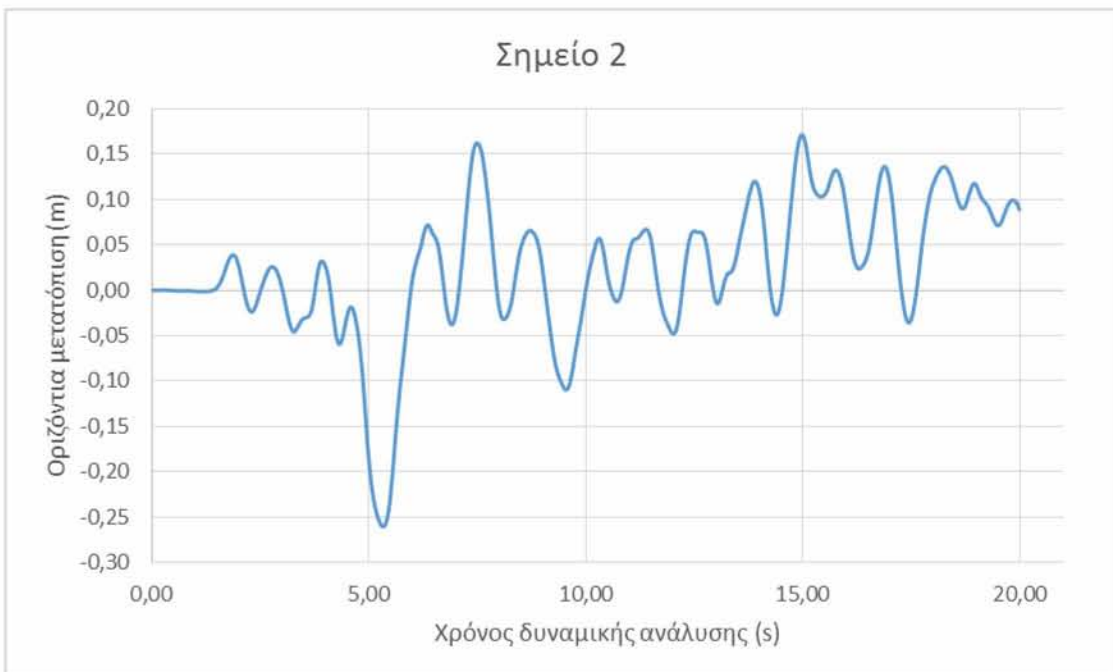
Σχήμα 14: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 8



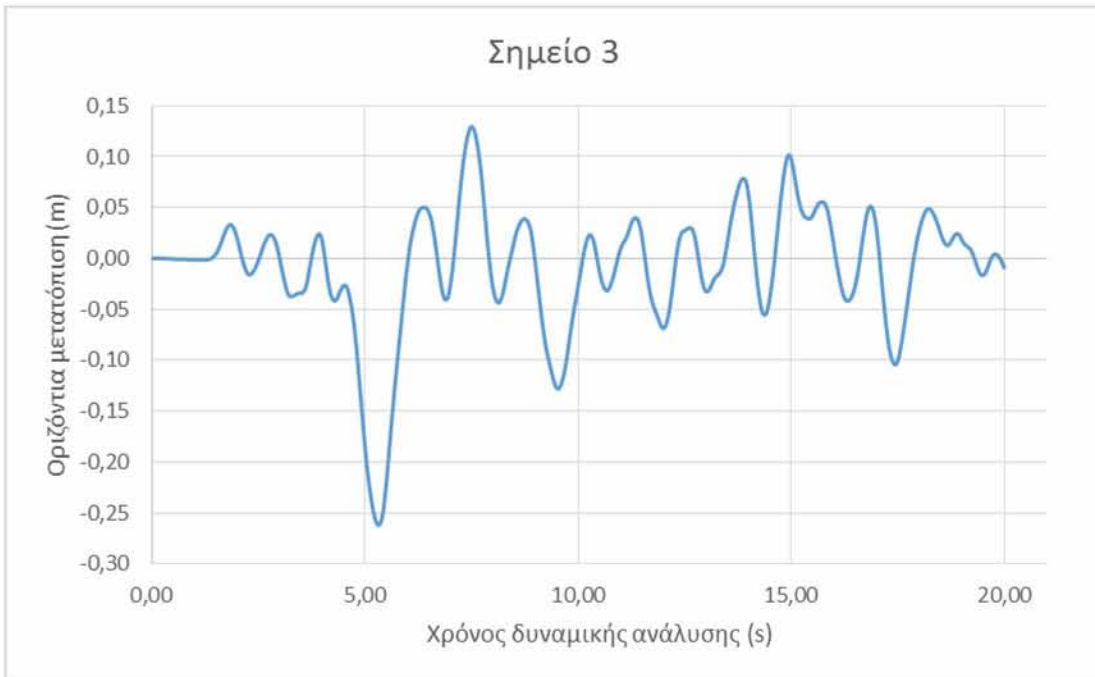
Σχήμα 15: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 9



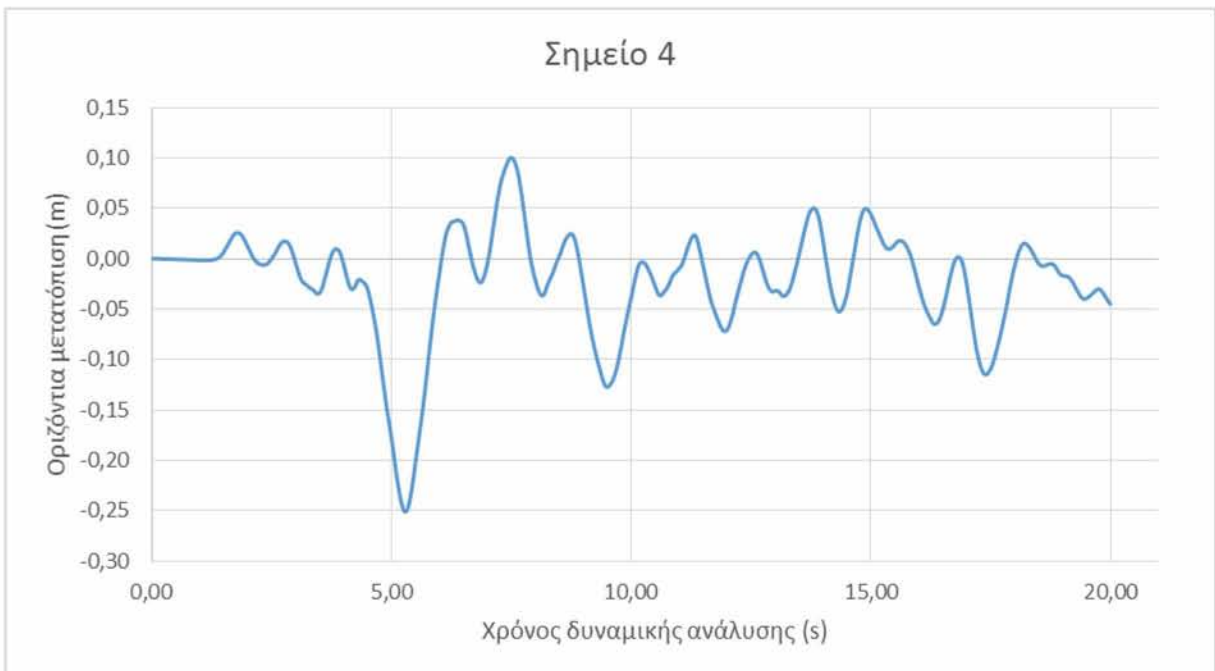
Σχήμα 16: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 10



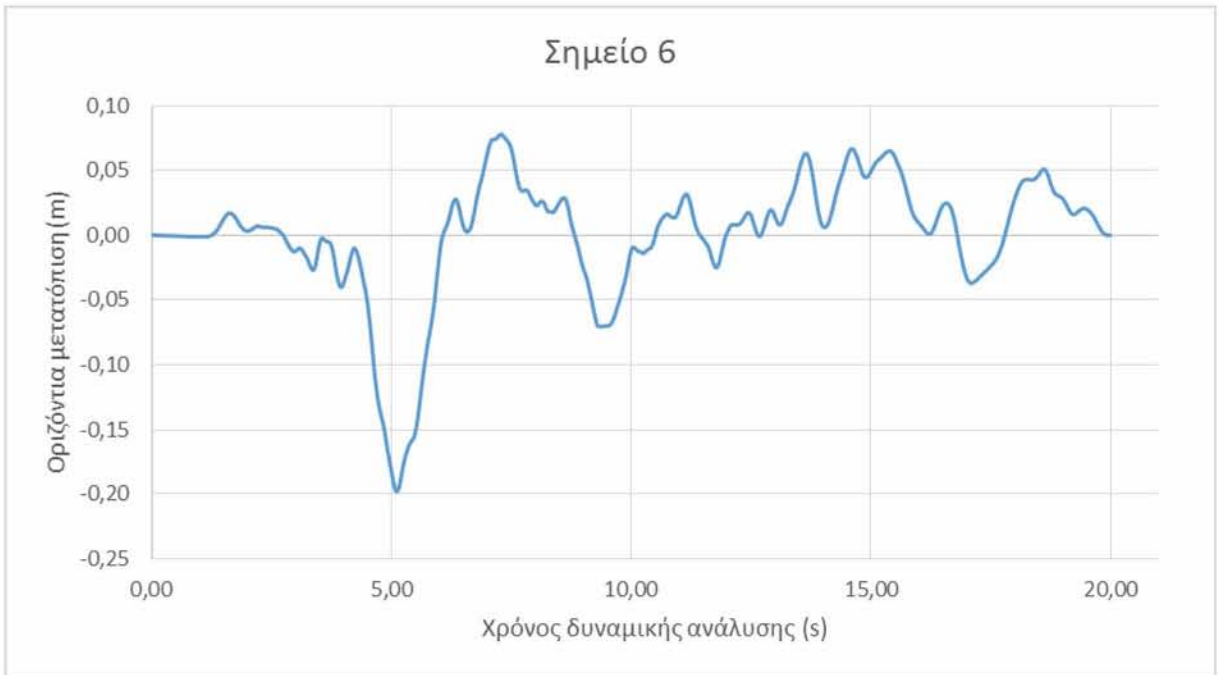
Σχήμα 17: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 2



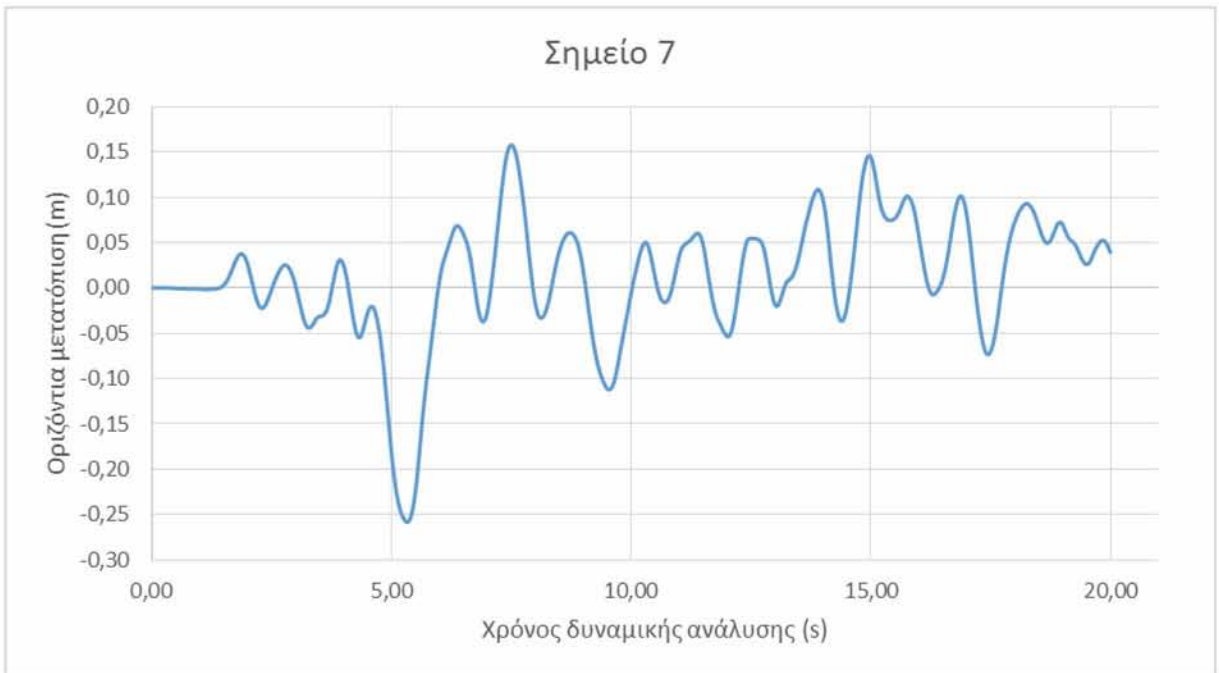
Σχήμα 18: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 3



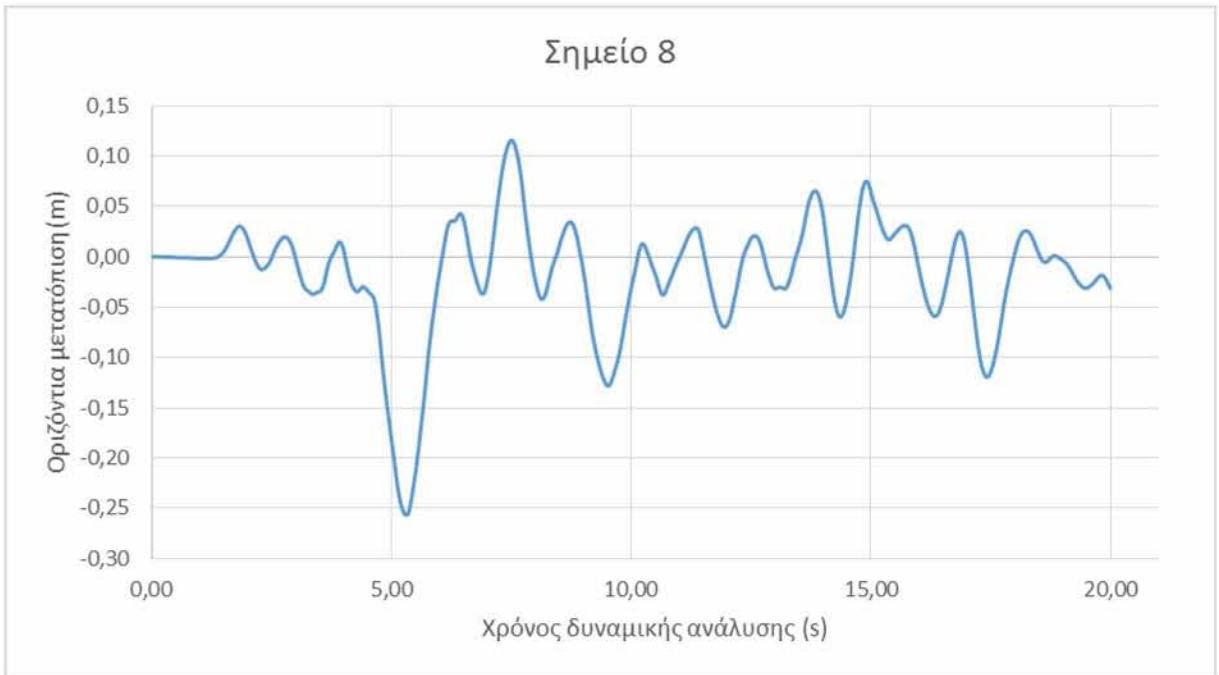
Σχήμα 19: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 4



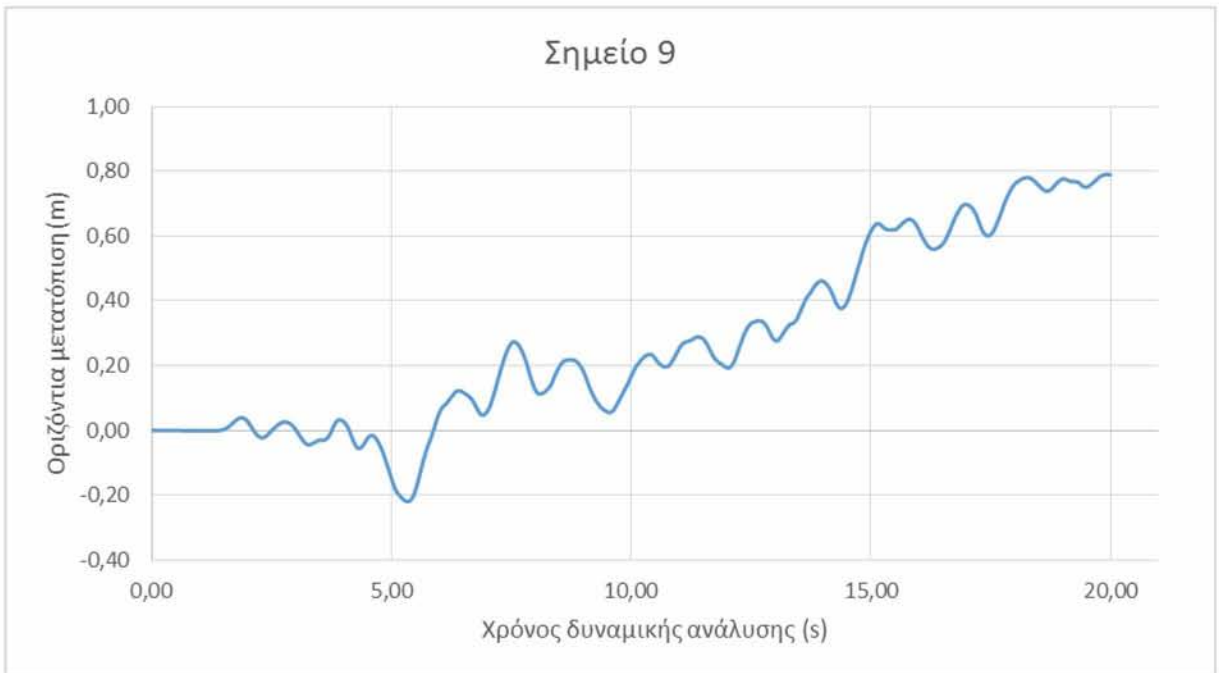
Σχήμα 20: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 6



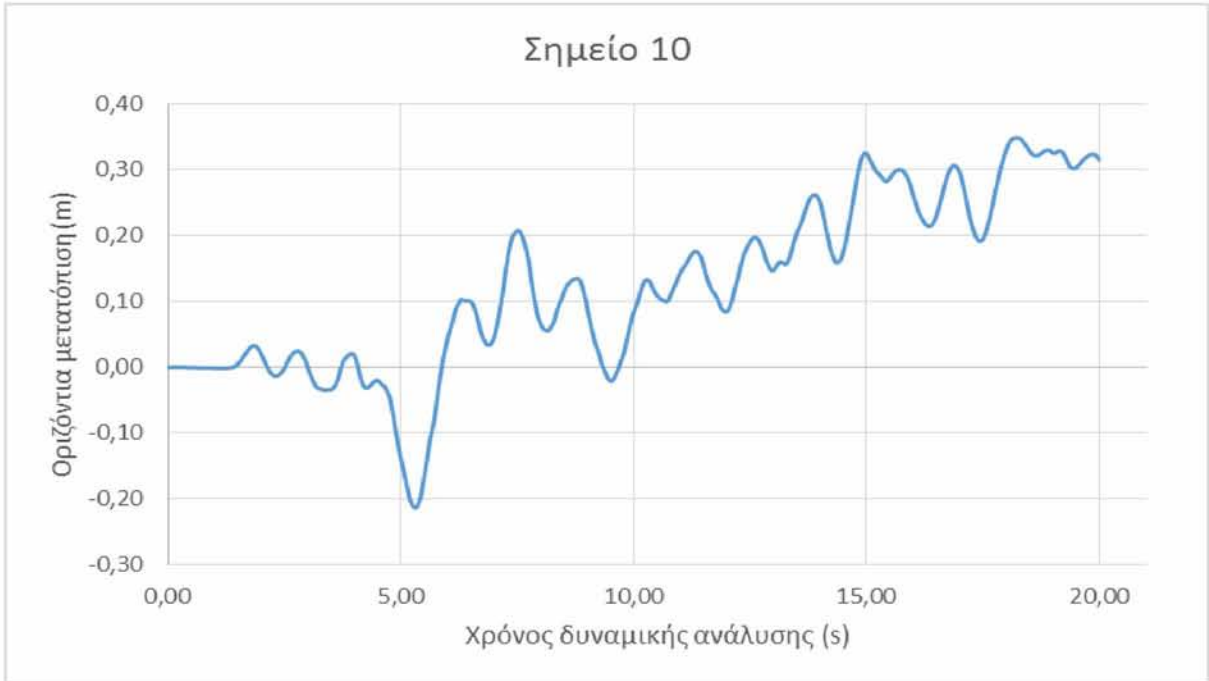
Σχήμα 21: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 7



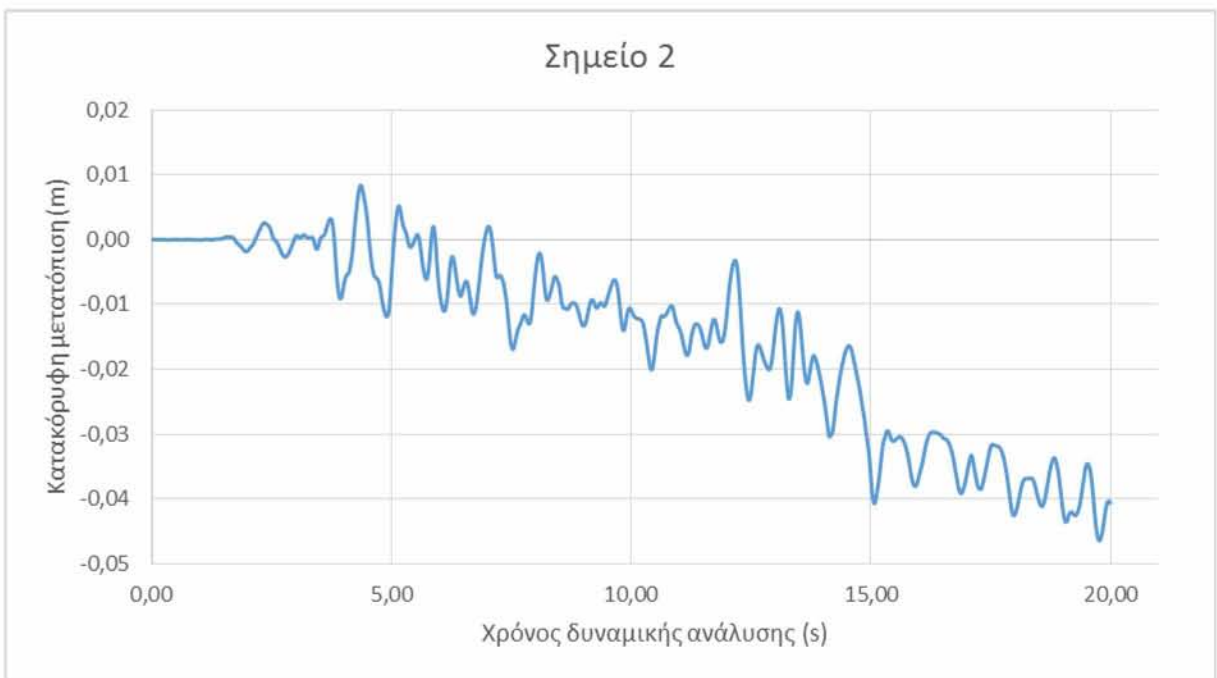
Σχήμα 22: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 8



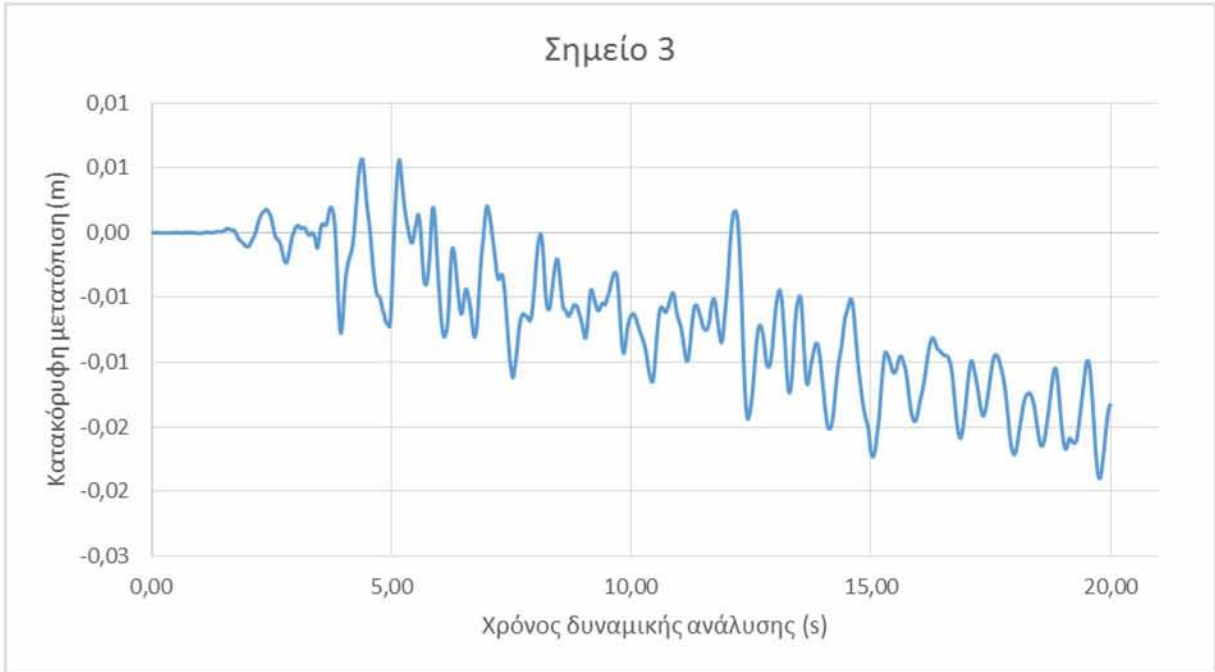
Σχήμα 23: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 9



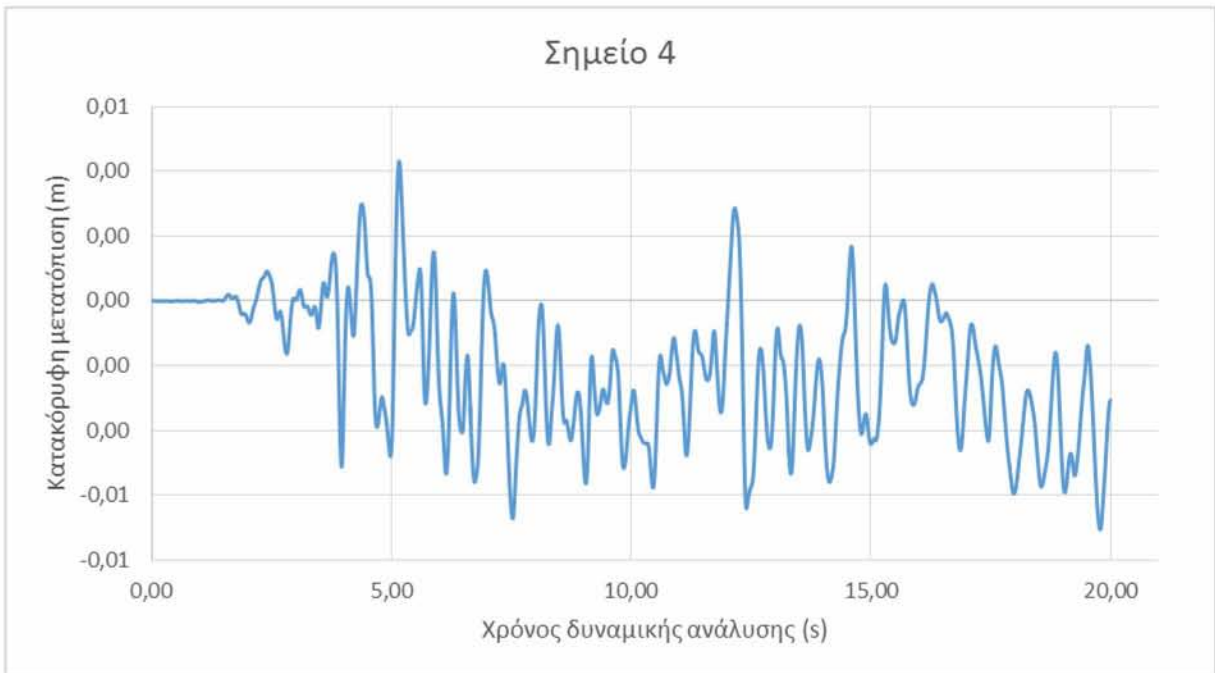
Σχήμα 24: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 10



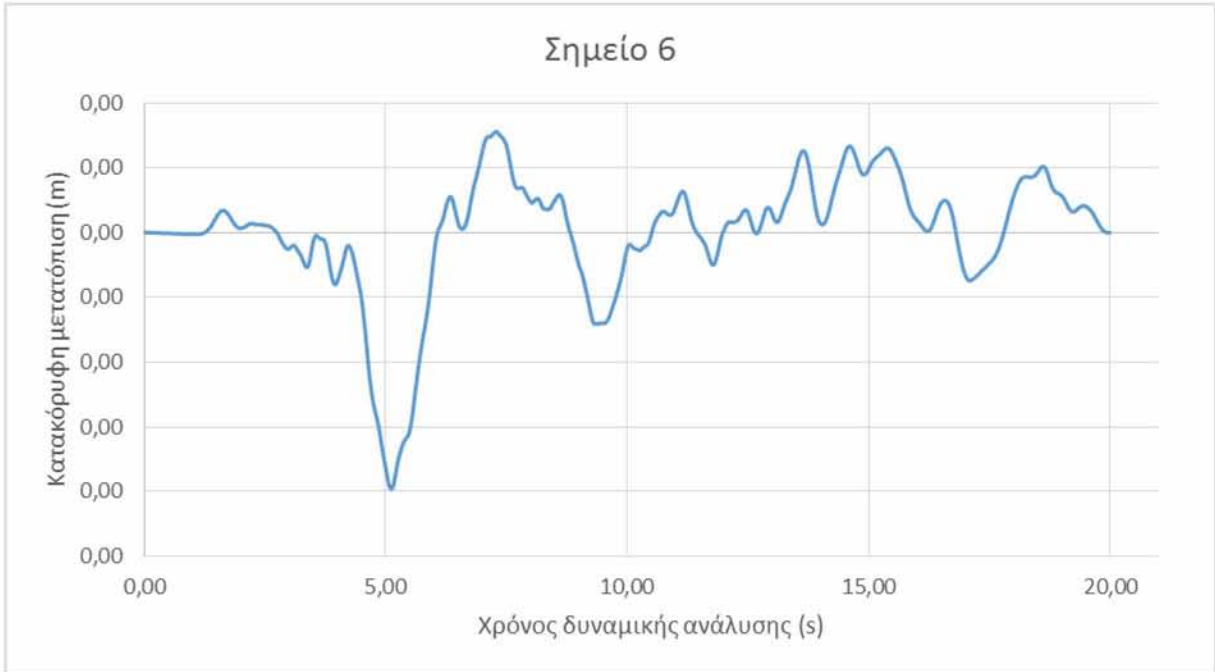
Σχήμα 25: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 2



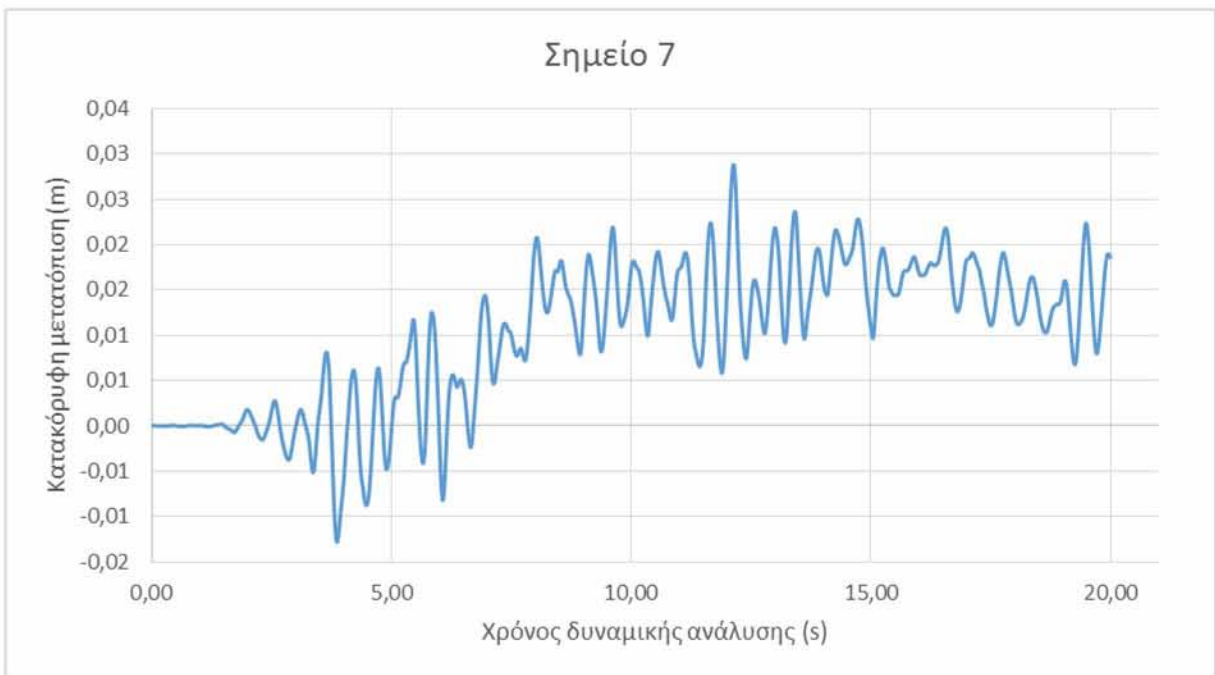
Σχήμα 26: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 3



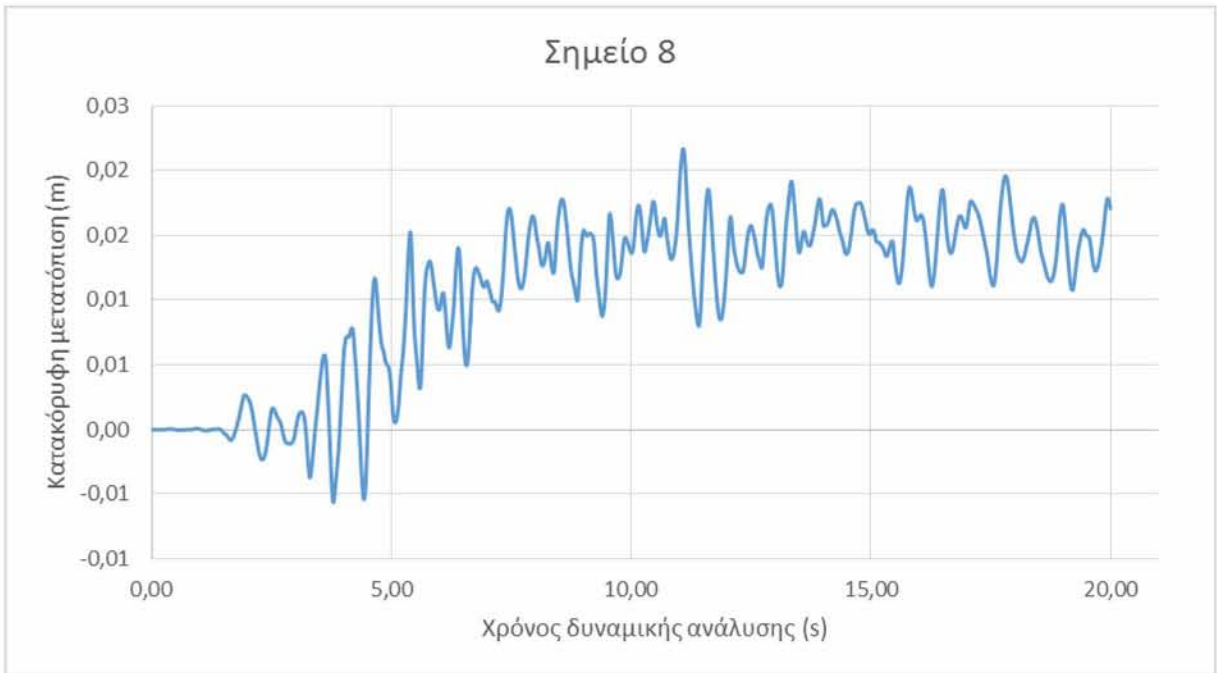
Σχήμα 27: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 4



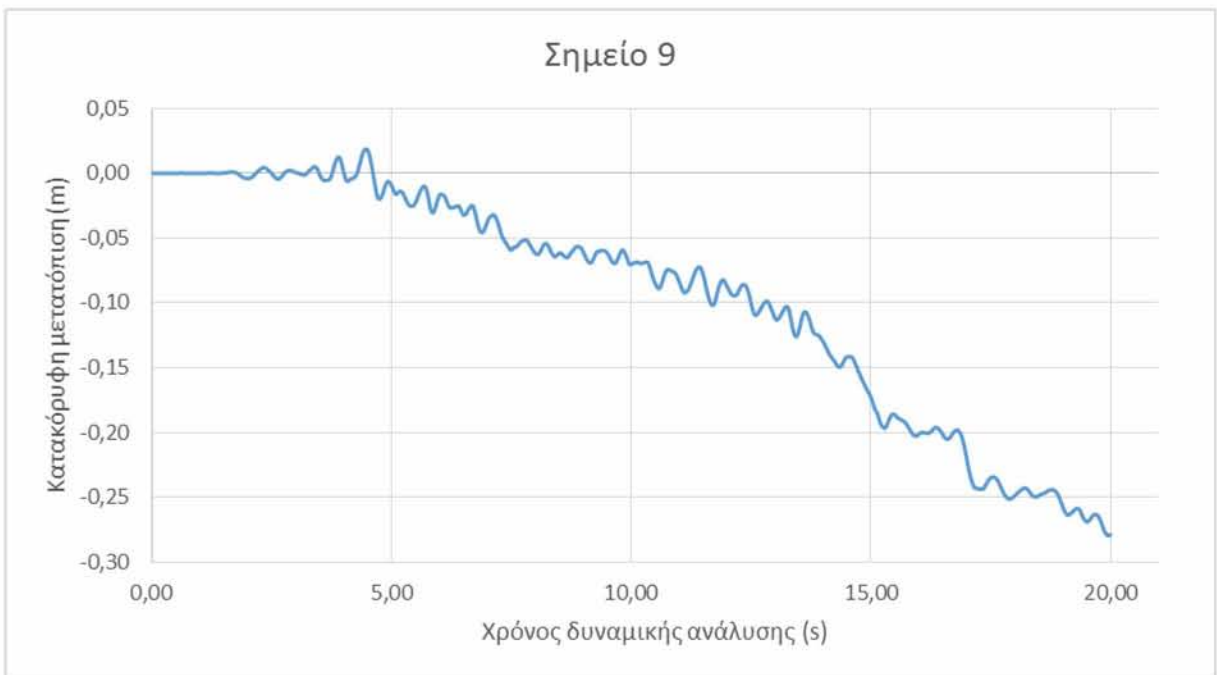
Σχήμα 28: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 6



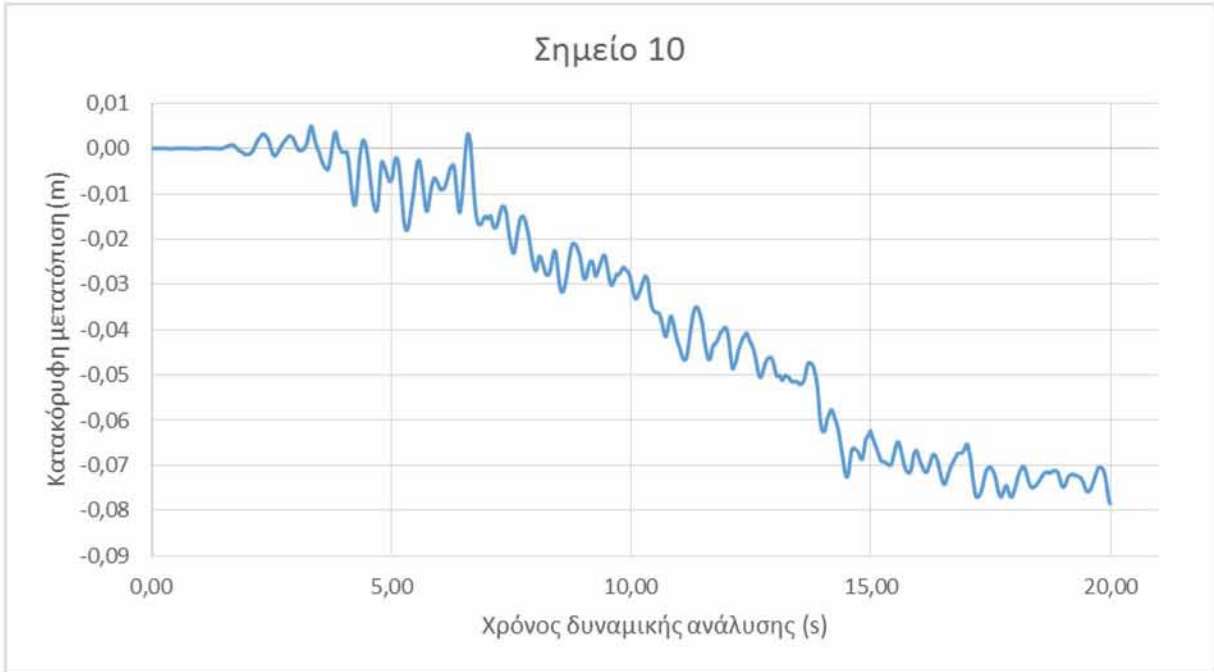
Σχήμα 29: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 7



Σχήμα 30: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 8

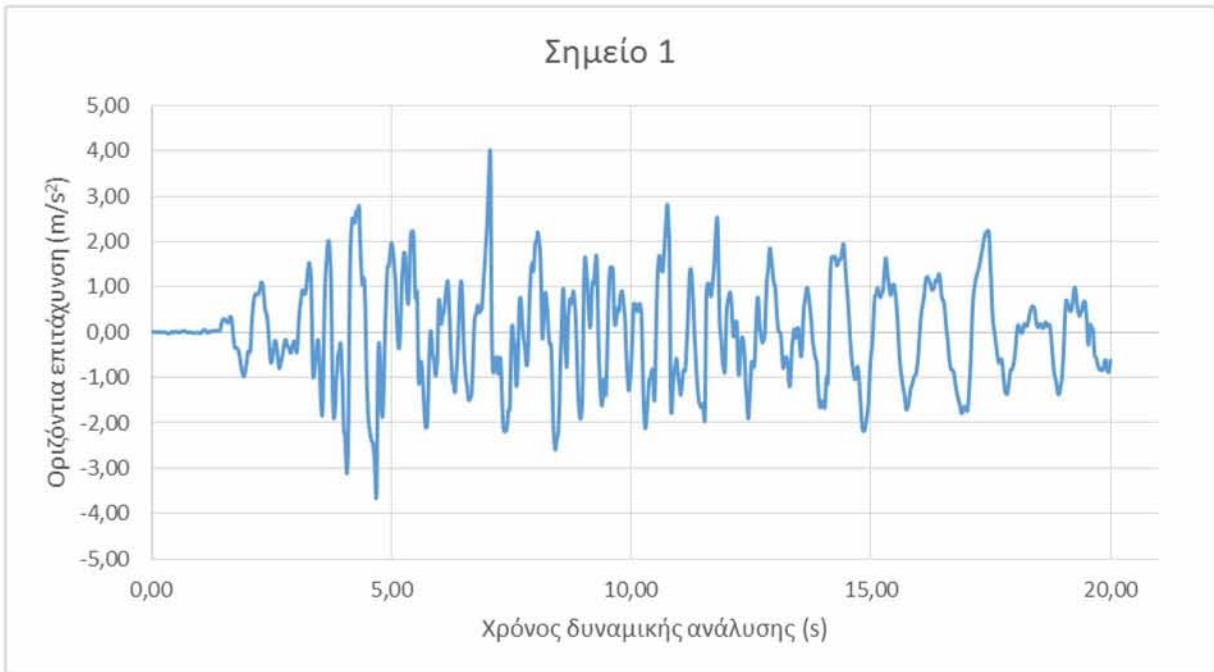


Σχήμα 31: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 9

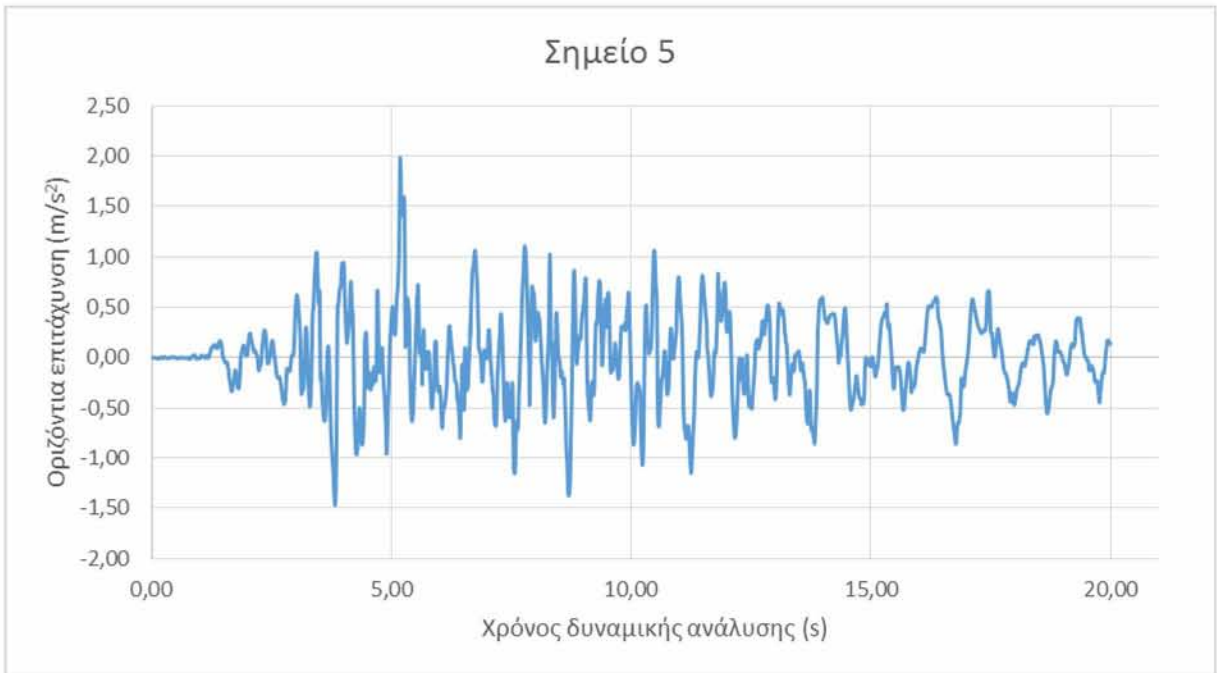


Σχήμα 32: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 10

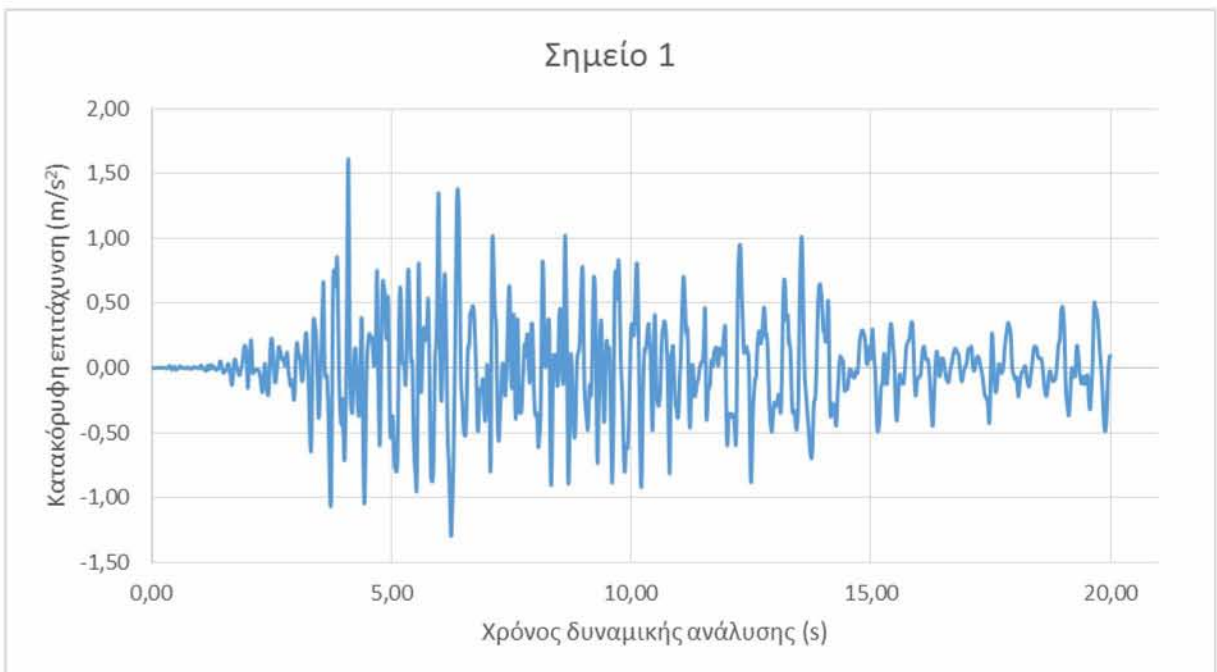
Ανάλυση 0,15g



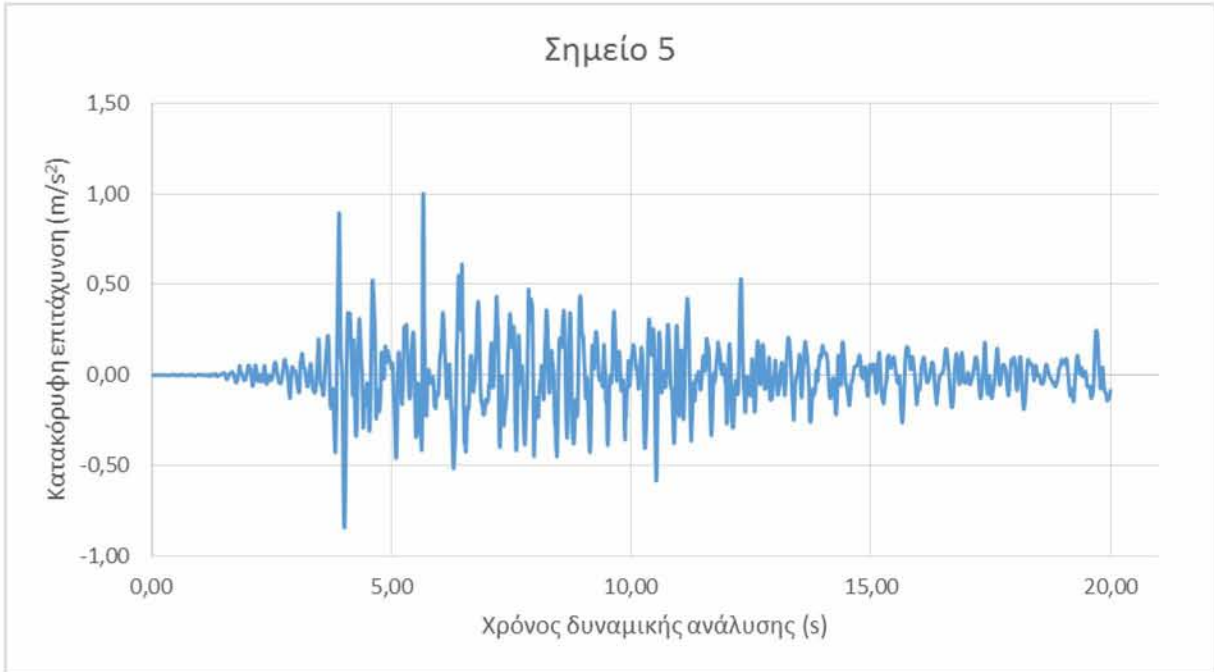
Σχήμα 33: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



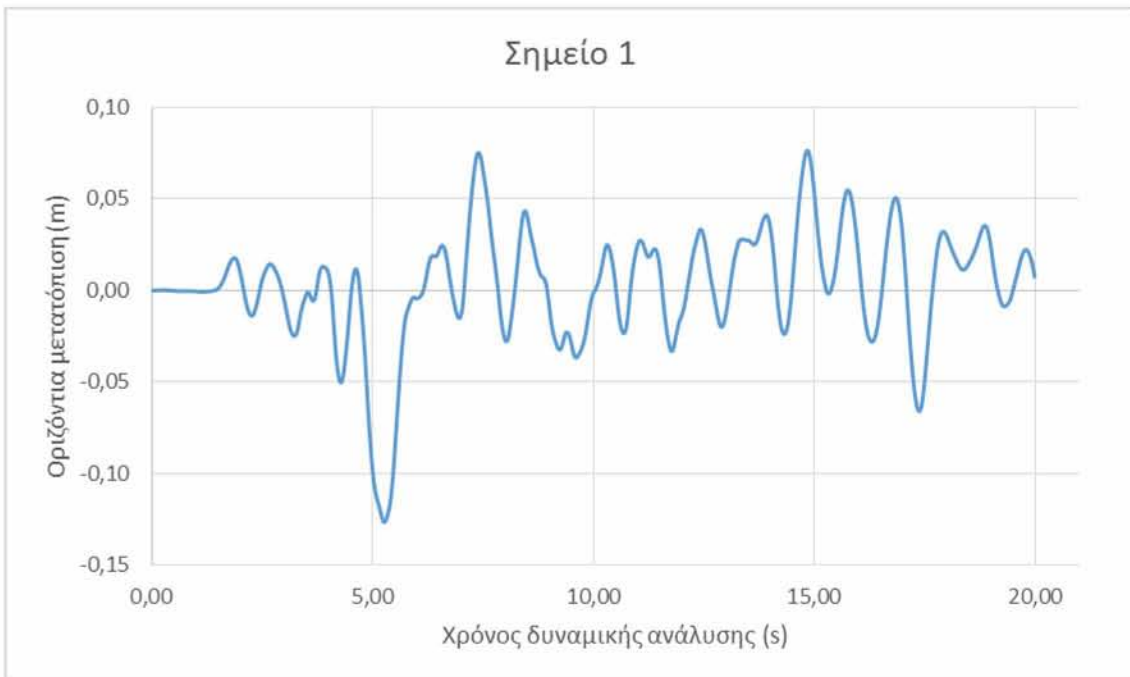
Σχήμα 34: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



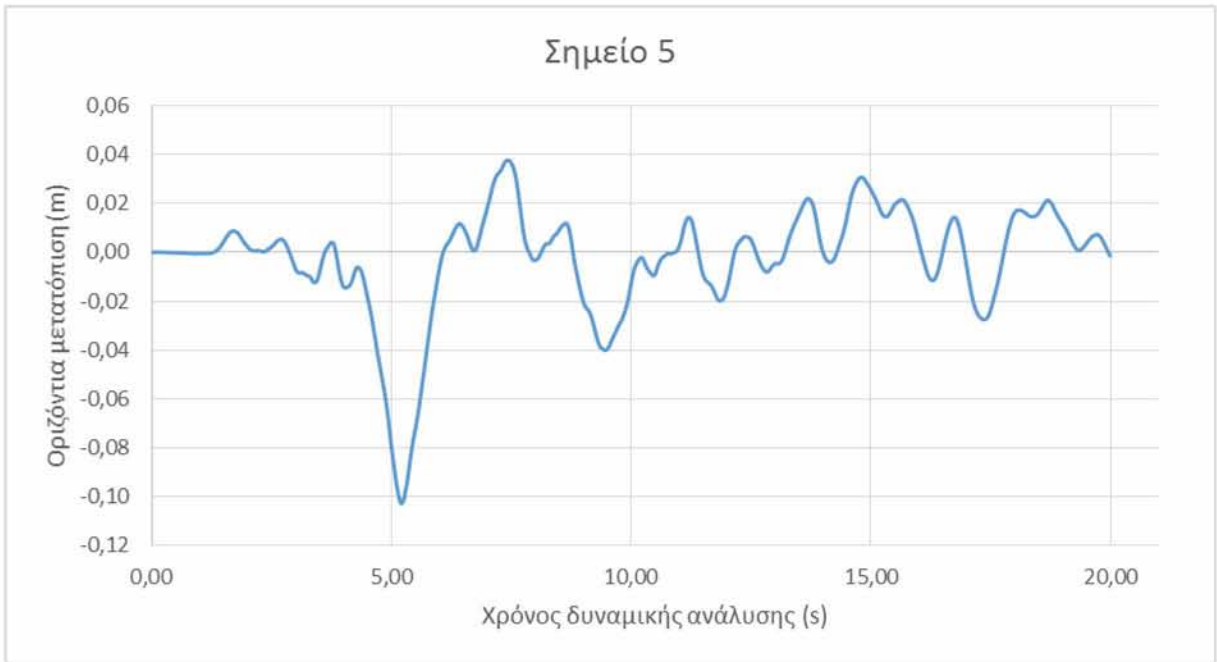
Σχήμα 35: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



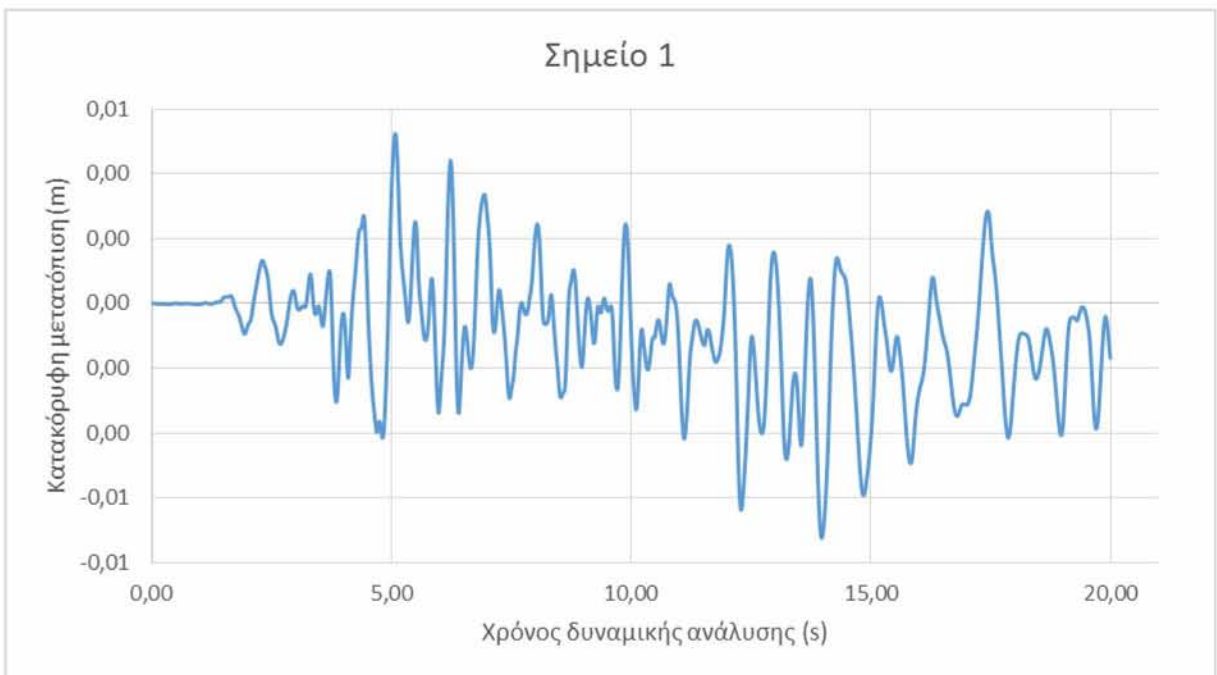
Σχήμα 36: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



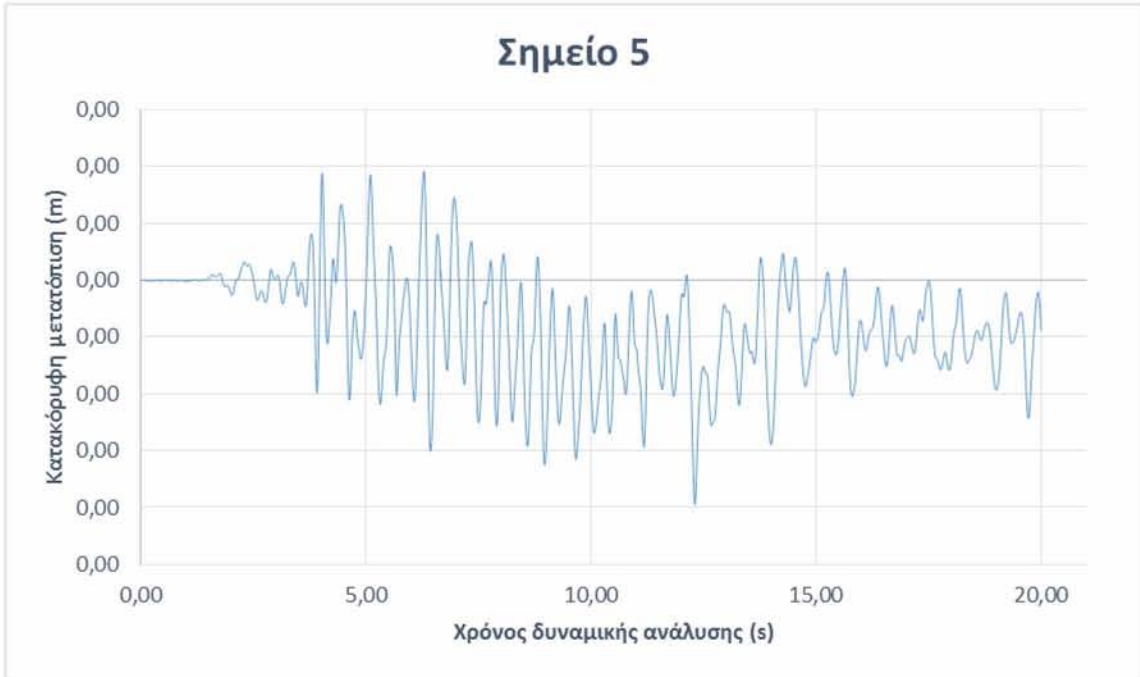
Σχήμα 37: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



Σχήμα 38: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5

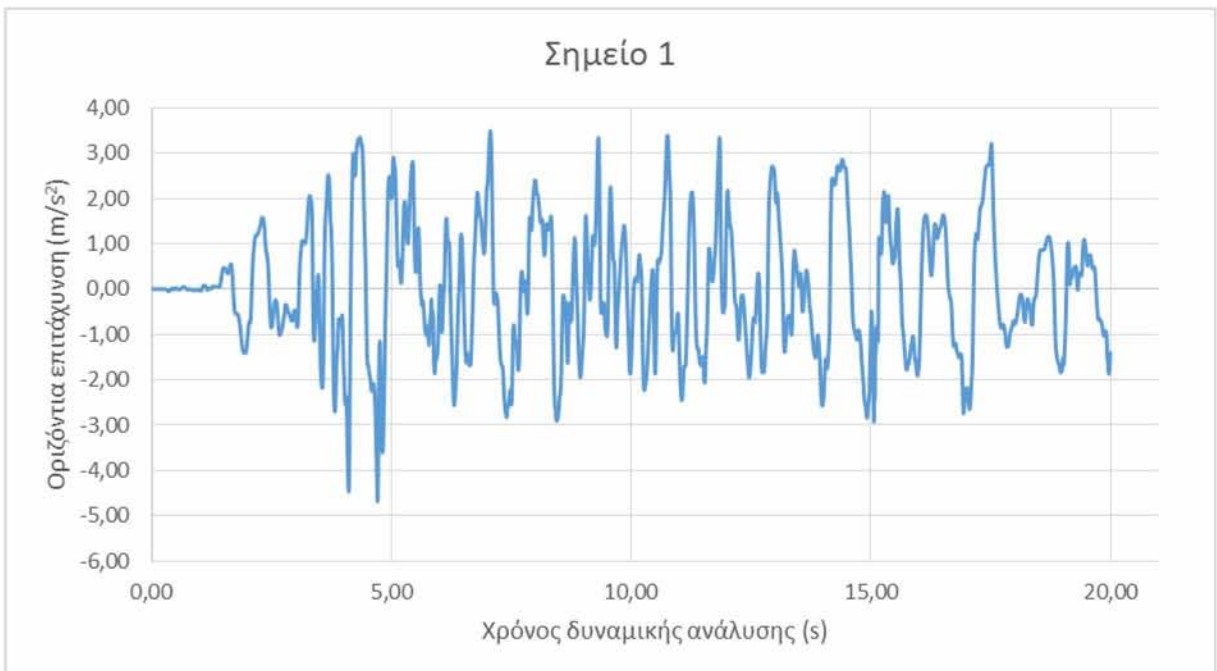


Σχήμα 39: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1

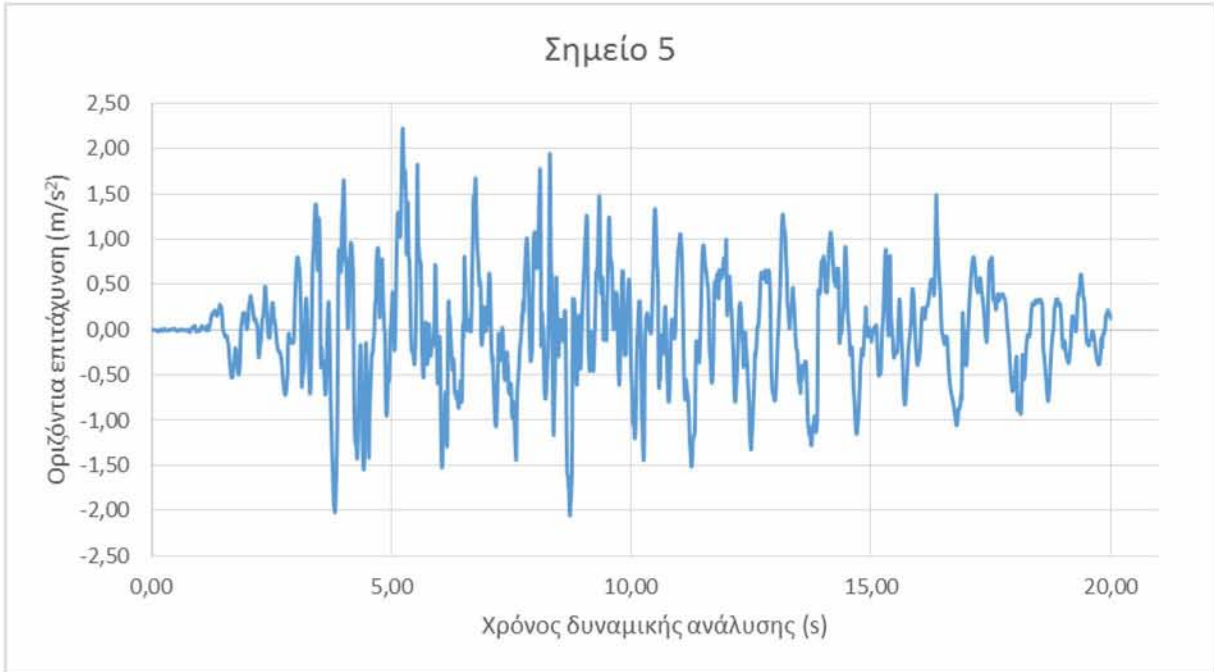


Σχήμα 40: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5

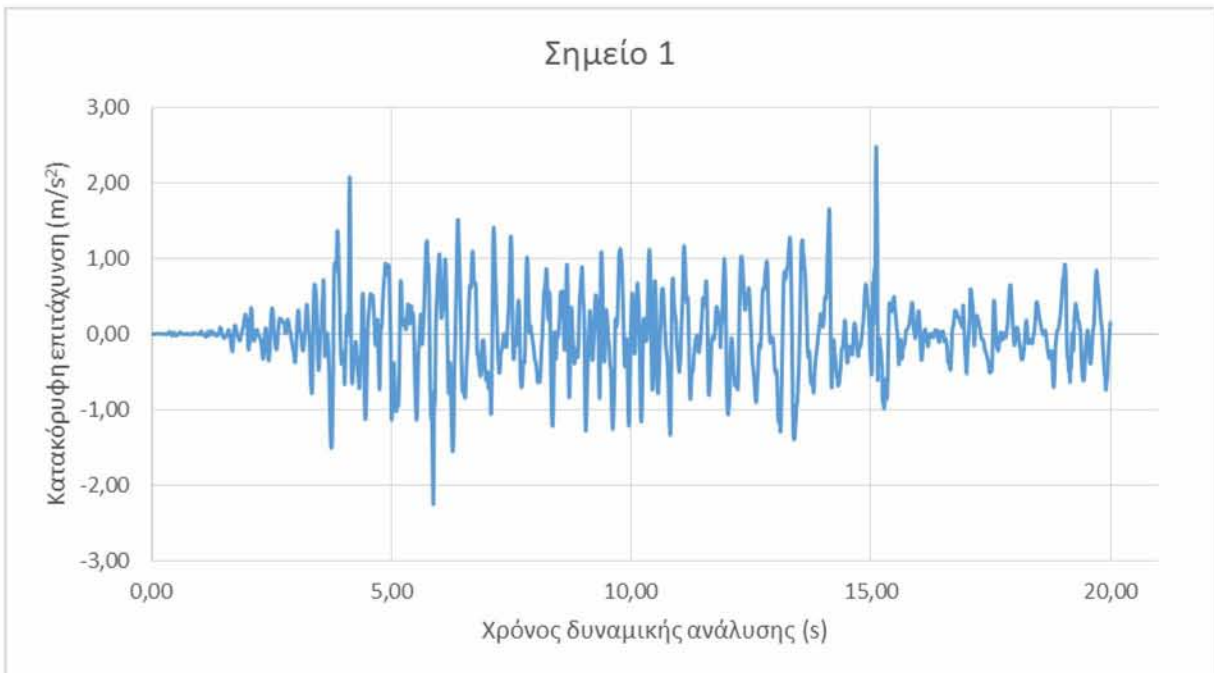
Ανάλυση 0,25g



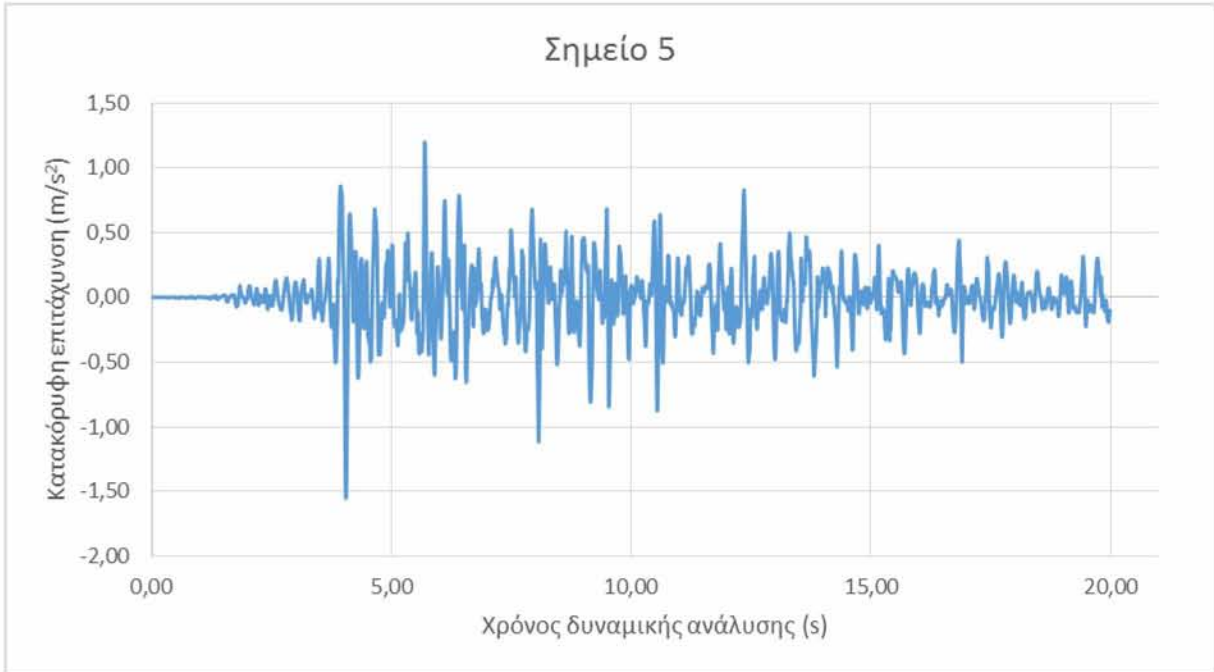
Σχήμα 41: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



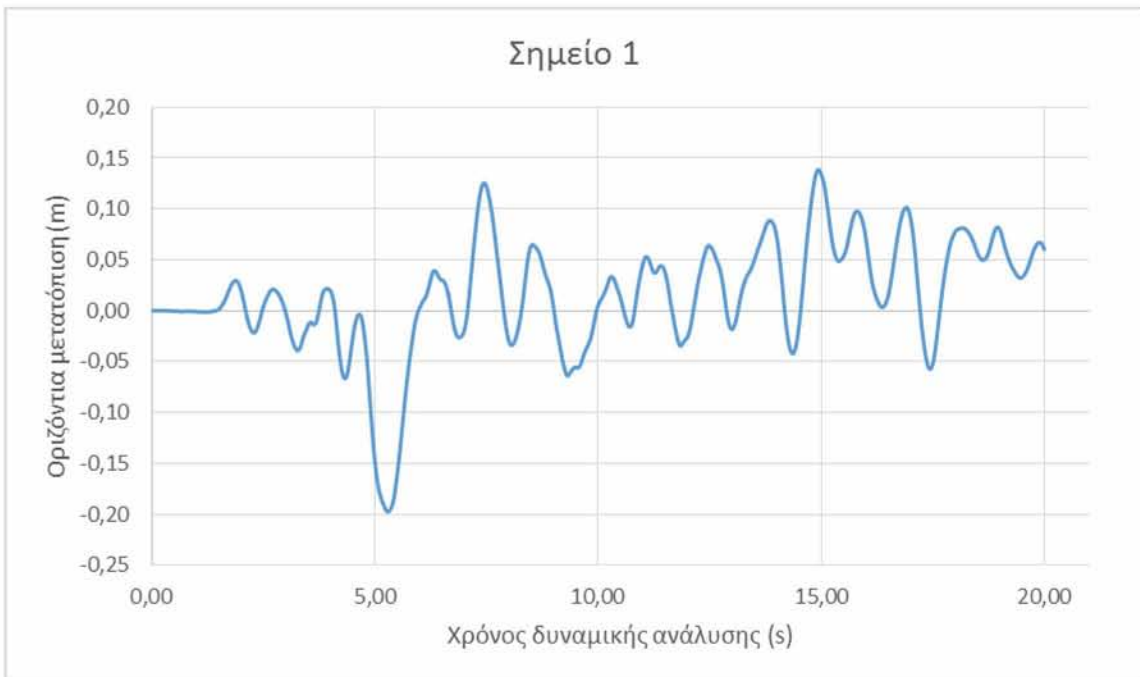
Σχήμα 42: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



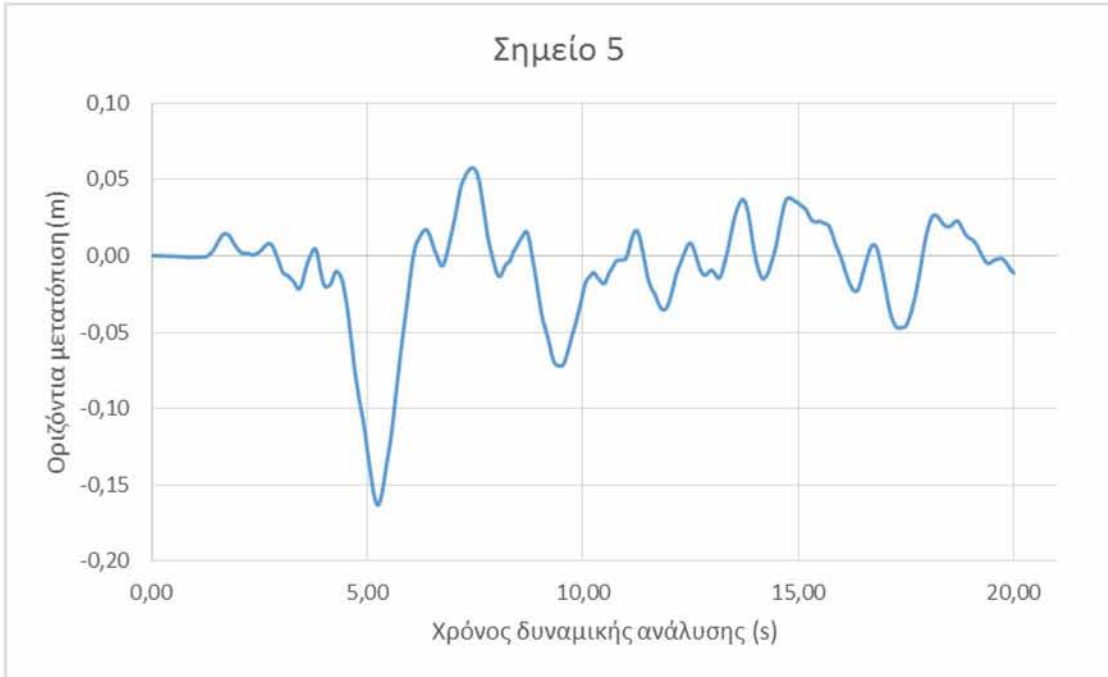
Σχήμα 43: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



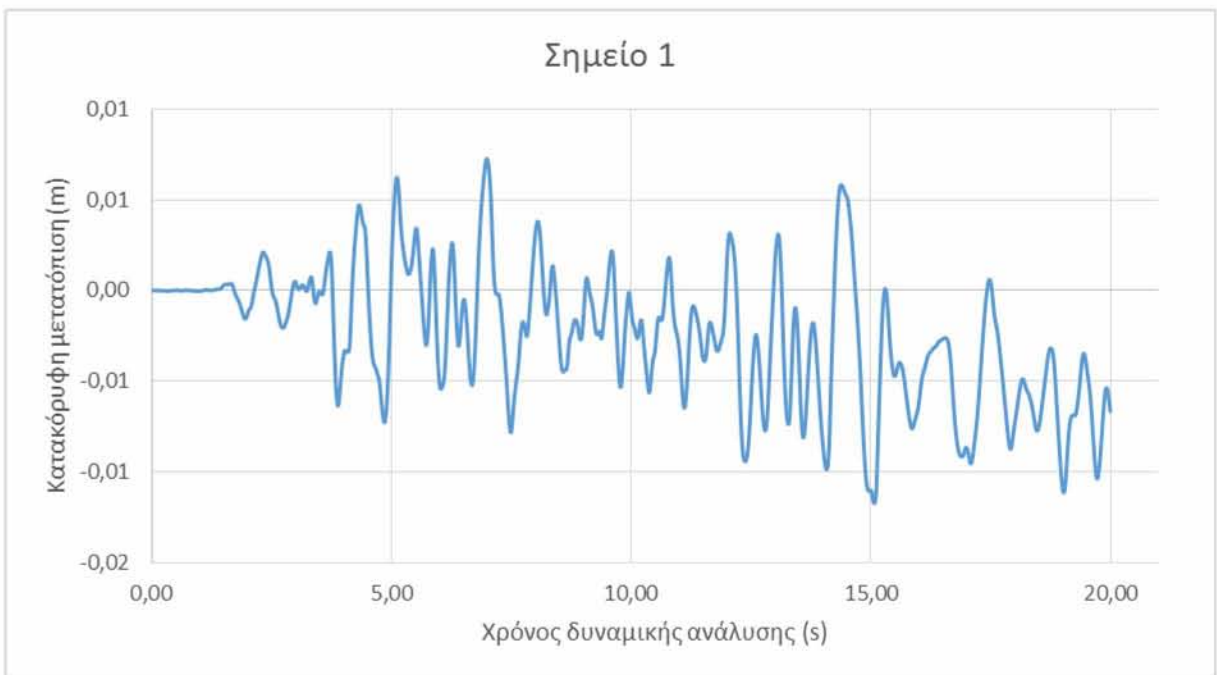
Σχήμα 44: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



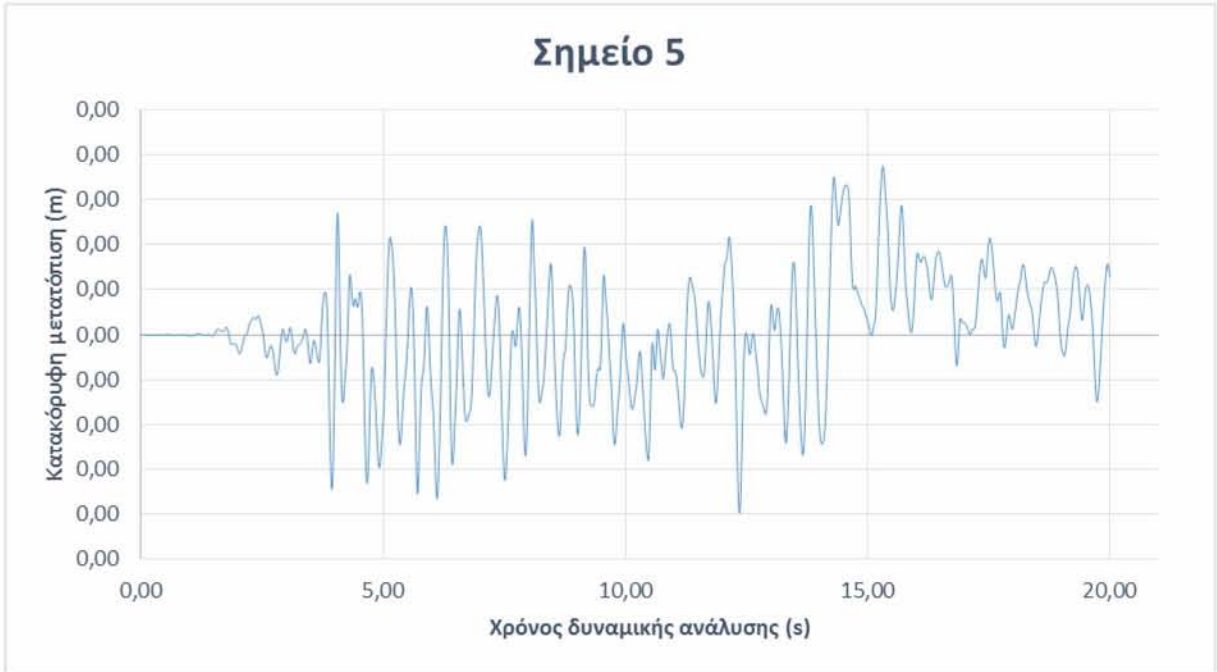
Σχήμα 45: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



Σχήμα 46: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5

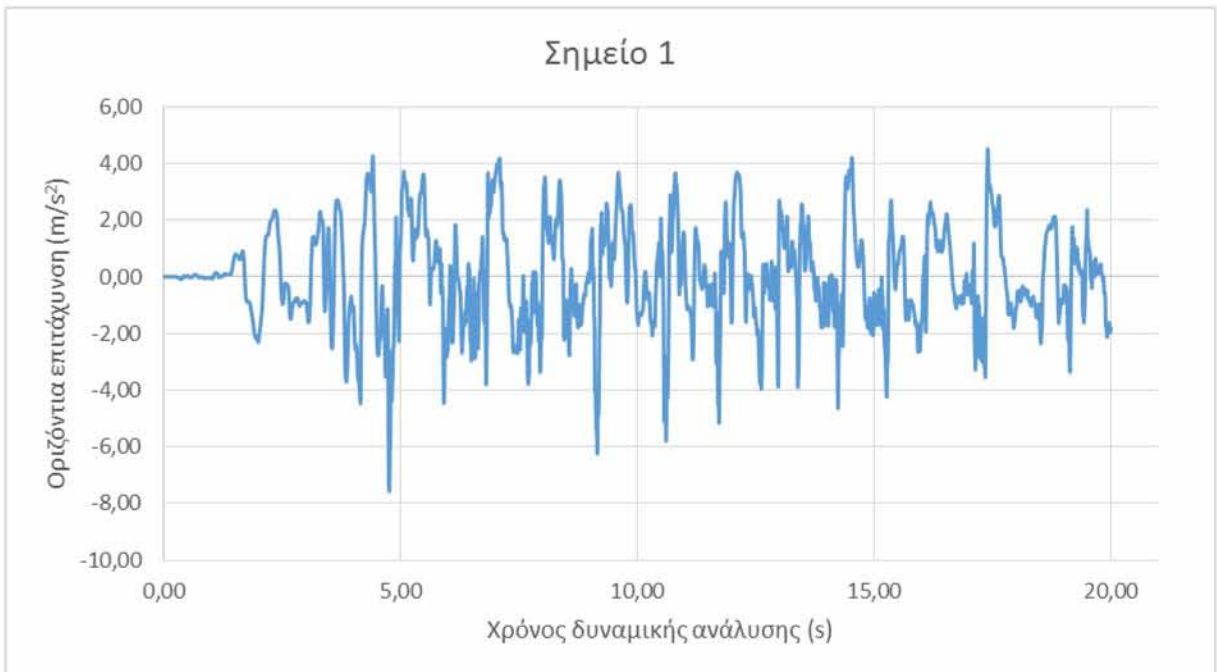


Σχήμα 47: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1

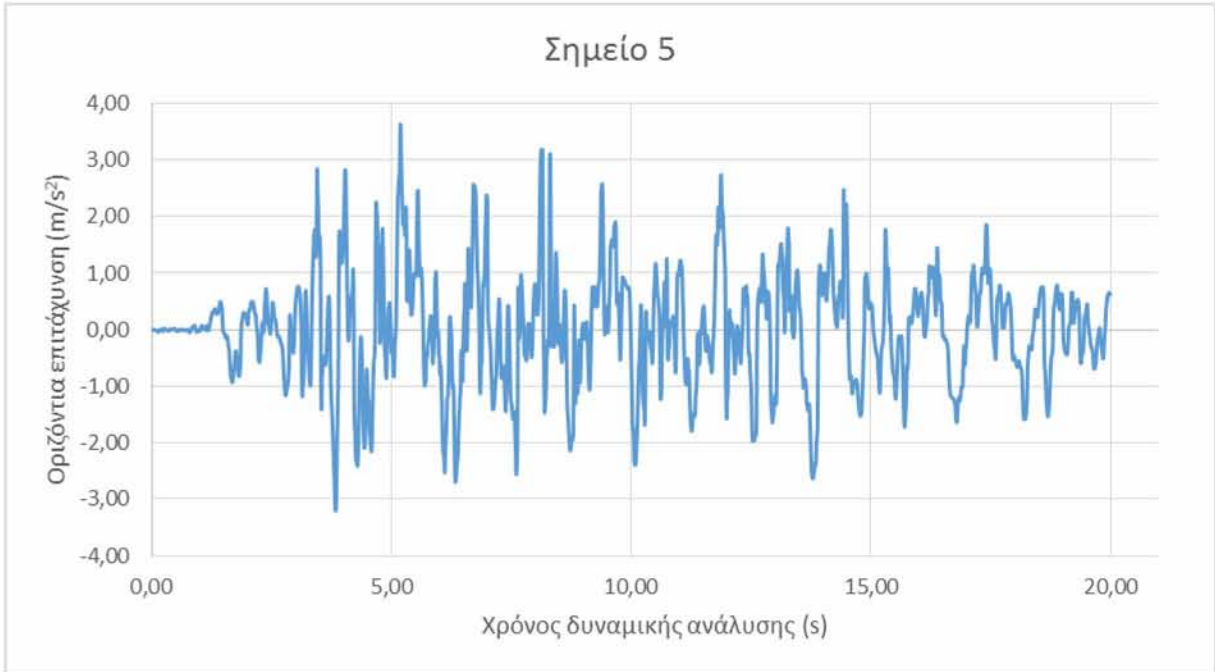


Σχήμα 48: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5

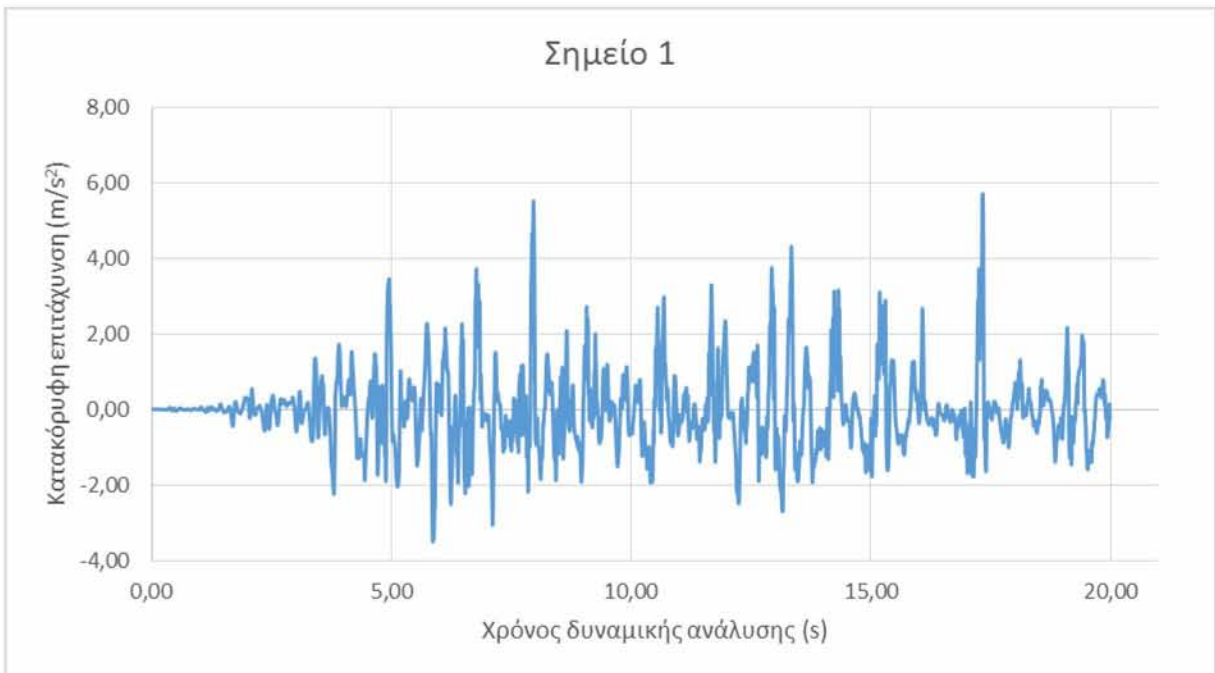
Ανάλυση 0,45g



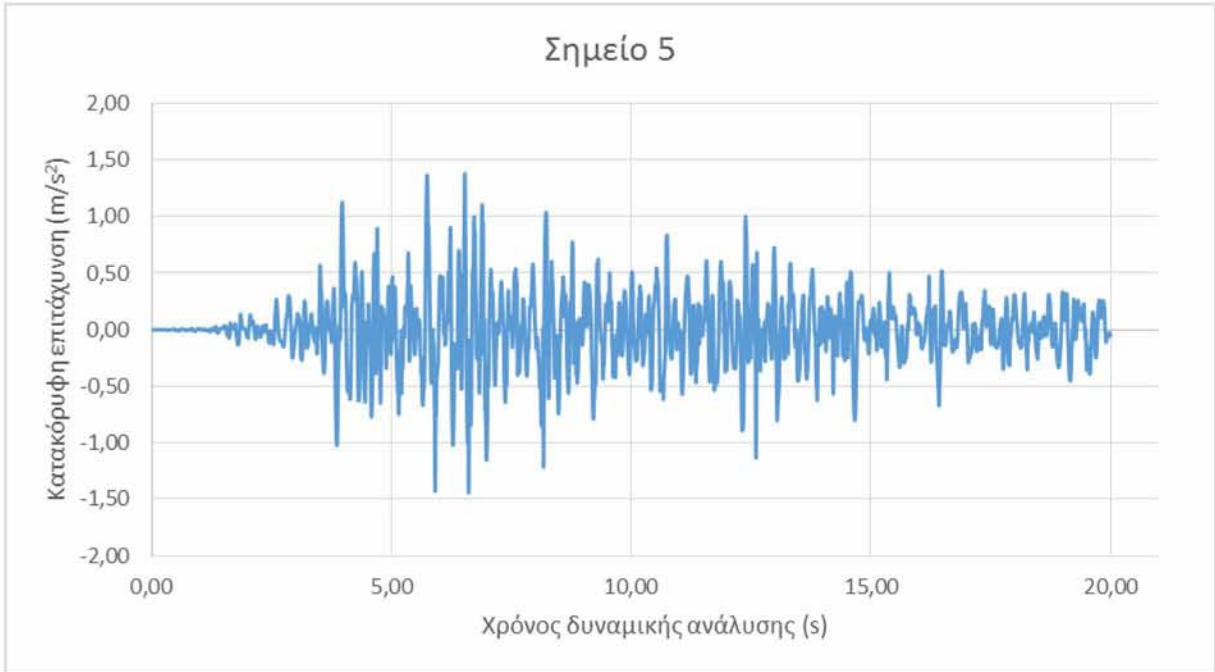
Σχήμα 49: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



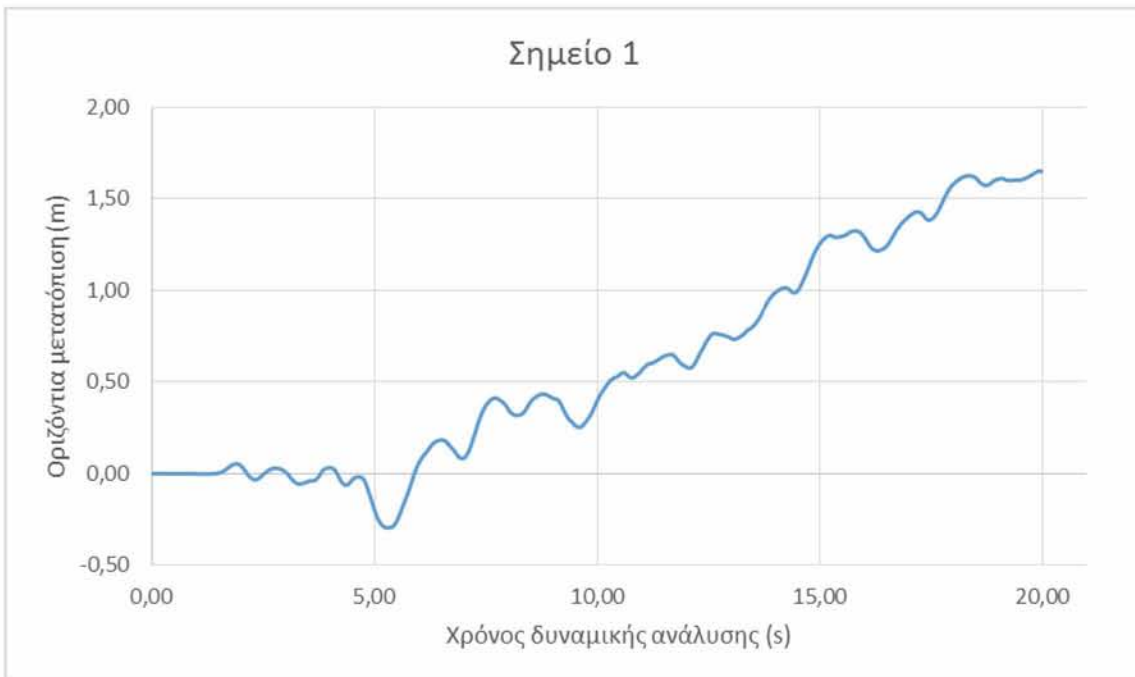
Σχήμα 50: Διάγραμμα οριζόντιας επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



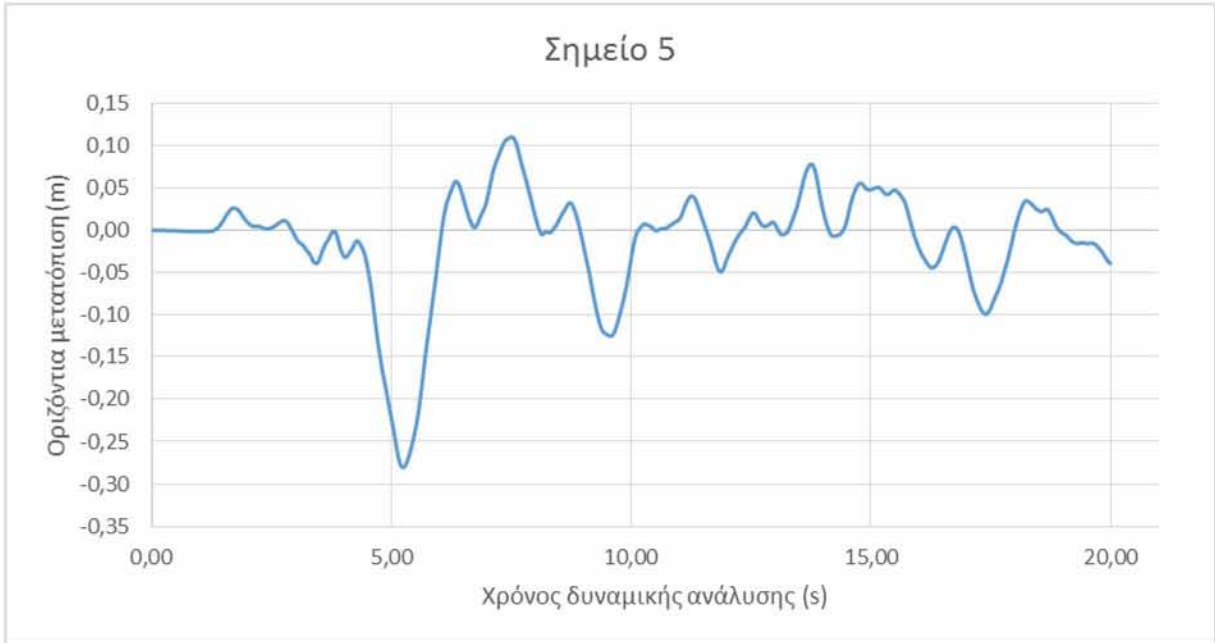
Σχήμα 51: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



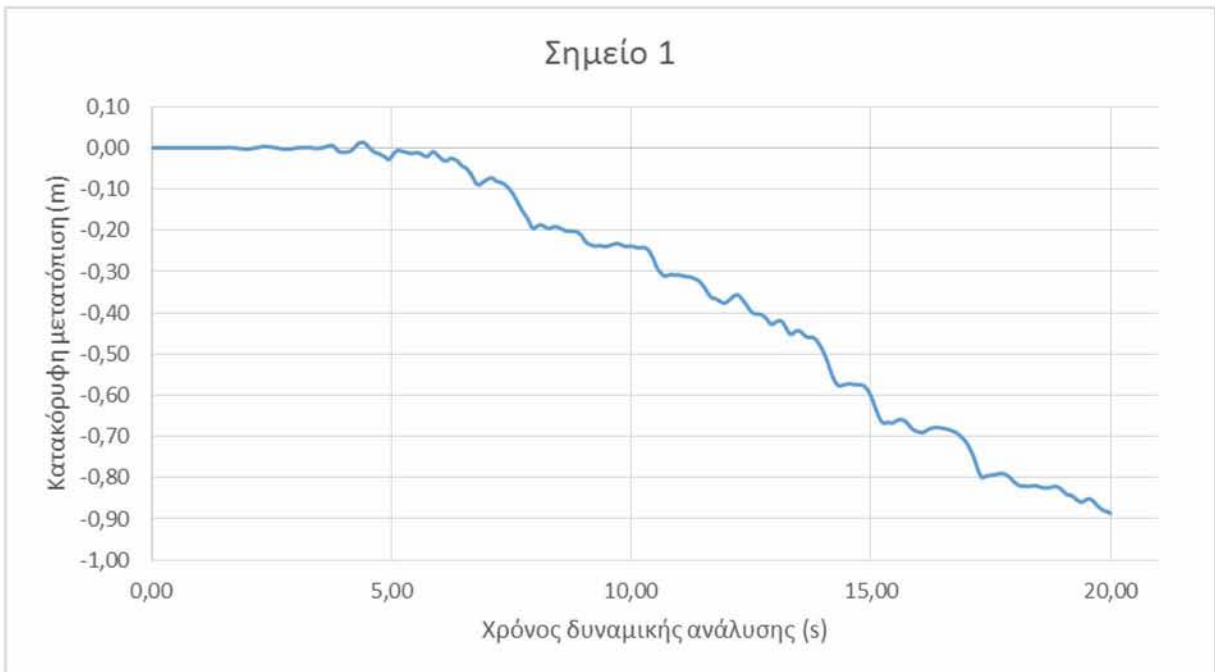
Σχήμα 52: Διάγραμμα κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



Σχήμα 53: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



Σχήμα 54: Διάγραμμα οριζόντιας μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5



Σχήμα 55: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 1



Σχήμα 56: Διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ως προς το χρόνο για το Σημείο 5

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Στο παράρτημα 2 παρατίθεται ο κώδικας που δημιουργήθηκε για την πραγμάτωση της στατικής και δυναμικής ανάλυσης της προσομοίωσης του φράγματος της Μεσοχώρας. Αρχικά δημιουργήθηκε ένα αρχείο μοντέλου και μετά ακολούθησε η σταδιακή κατασκευή και στατική ανάλυση του φράγματος με τελικό στάδιο την δυναμική ανάλυση.

- **Μοντέλο φράγματος**

new

config dynamic

grid 300 50

m m

sys cd C:\Users\user******

gen -250 -20 -250 170 260 170 260 -20 ratio 1 1

gen line 14.3 144 5 144

gen line 5 144 5 132

gen line 5 132 71 0

gen line 14.3 144 67 110

gen line 67 110 221 0

gen line 221 0 -212.2 0

gen line 14.3 144 8.1 148

gen line 8.1 148 0 148

gen line -212.2 0 -5 148

gen line -5 148 -2.5 148

gen line -5 148 -5 150

gen line -5 150 5 150

gen line 5 150 8.1 148

gen line 186 25 191 25

gen line 191 25 221.8 3

gen line 221.8 3 232 3

gen line 232 3 232 0

gen line 232 0 221 0

gen line 0 148 -22.4 132

gen line -22.4 132 -163.92 30.92

gen line -163.92 30.92 -185.655 15.389

gen line -185.655 15.389 -205 0

gen line -250 0 -212.2 0

gen line 232 0 260 0

gen line -214.29736 2.7883 -11 148

gen line -11 148 -5 148

;gen line -214.29736 2.7883 -212.2 0

ini x -23.76 y 131 i=135 j=40

ini x -165.2 y 30.19 i=51 j=14

ini x -163.8 y 31.13 i=52 j=14

ini x -162.1 y 32.15 i=53 j=14

ini x -185.6 y 15.23 i=39 j=10

ini x 6 y 149 i=152 j=46

ini x 189.1 y 25 i=260 j=13

ini x 232 y 3 i 285 j 7

ini x 232 y 0 i 285 j 6

ini x -212.2 y 0 i 24 j 6

ini x -187 y 14.50 i 38 j 10

ini x -188.4 y 13.5 i 37 j 10

ini x -189.8 y 12.28 i 37 j 9

ini x -191.2 y 11.34 i 36 j 9

ini x -192.6 y 10.81 i 35 j 9

ini x -194 y 9.676 i 34 j 9

ini x -195.4 y 8.488 i 34 j 8

ini x -196.8 y 7.57 i 33 j 8

ini x -198.2 y 6.922 i 32 j 8

ini x -199.6 y 5.734 i 31 j 8

ini x -201 y 4.491 i 31 j 7

ini x -202.4 y 3.573 i 30 j 7

ini x -203.8 y 2.871 i 29 j 7

ini x -205.2 y 1.845 i 28 j 7

ini x -5 y 150 i 145 j 46

ini x -5 y 148 i 145 j 45

ini x 0 y 148 i 148 j 45

ini x -213 y 0 i 23 j 6

mark i=51,53 j=14

mark i 135 j 40

mark i 39 j 10

mark i 260 j 13

mark i 285 j 6

mark i 153 j 45

mark i 145 j 45

mark i 148 j 45

mark i 145 j 46

mark i 24 j 7

mark i 25 j 7

mark i 27 j 8

mark i 28 j 8

mark i 142,144 j 46

group foundation reg 30 5

group rockfill_3C reg 187 23

group rockfill_3B reg 145 22

group rip_rap reg 271 8

group Gravel_2B reg 24 6

group 'rockfill_3B' i 30 j 6

group 'rockfill_3B' i 29 j 6

group 'rockfill_3B' i 28 j 6

group 'rockfill_3C' i 274 j 6

group 'rockfill_3C' i 275 j 6

group 'rockfill_3C' i 276 j 6

group 'rockfill_3B' i 152 j 44

group 'rockfill_3B' i 153 j 44

group 'rockfill_3B' i 154 j 44

group 'rockfill_3B' i 155 j 44

group 'rockfill_3B' i 151 j 44

group 'rockfill_3C' i 188 j 6

;το ακόλουθο στάδιο με το group 'beam' μπορεί να παραληφθεί

group 'beam' i 22 j 6

group 'beam' i 23 j 6

group 'beam' i 23,26 j 7

group 'beam' i 26,29 j 8

group 'beam' i 29,32 j 9

group 'beam' i 32,35 j 10

group 'beam' i 35,39 j 11

group 'beam' i 39,42 j 12

group 'beam' i 42,45 j 13

group 'beam' i 45,48 j 14

group 'beam' i 48,51 j 15

group 'beam' i 51,54 j 16

group 'beam' i 54,57 j 17

group 'beam' i 57,61 j 18

group 'beam' i 61,64 j 19

group 'beam' i 64,67 j 20

group 'beam' i 67,70 j 21

group 'beam' i 70,73 j 22

group 'beam' i 73,76 j 23

group 'beam' i 76,79 j 24

group 'beam' i 79,82 j 25

group 'beam' i 82,86 j 26

group 'beam' i 86,89 j 27

group 'beam' i 89,92 j 28

group 'beam' i 92,95 j 29

group 'beam' i 95,98 j 30

group 'beam' i 98,101 j 31

group 'beam' i 101,104 j 32

group 'beam' i 104,107 j 33

group 'beam' i 107,111 j 34

group 'beam' i 111,114 j 35

group 'beam' i 114,117 j 36

group 'beam' i 117,120 j 37

group 'beam' i 120,123 j 38

group 'beam' i 123,126 j 39

group 'beam' i 126,129 j 40

group 'beam' i 129,133 j 41

group 'beam' i 133,136 j 42

group 'beam' i 136,139 j 43

group 'beam' i 139,142 j 44

group 'beam' i 142,144 j 45

model n group 'beam'

ini x -212.18973 y 0.047026634 i 22 j 7

ini x -212.20479 y 8.457303E-4 i 22 j 7

ini x -210.15323 y 1.4606824 i 23 j 7

ini x -208.91167 y 2.347507 i 23 j 8

ini x -207.72923 y 3.17521 i 24 j 8

ini x -206.48769 y 4.1211567 i 25 j 8
ini x -205.06876 y 5.1262245 i 26 j 8
ini x -203.70897 y 6.0721707 i 26 j 9
ini x -202.61902 y 6.853277 i 27 j 9
ini x -201.28412 y 7.7877107 i 28 j 9
ini x -199.90927 y 8.77606 i 29 j 9
ini x -198.53633 y 9.785582 i 29 j 10
ini x -197.40565 y 10.552817 i 30 j 10
ini x -196.07309 y 11.521956 i 31 j 10
ini x -194.70015 y 12.4910965 i 32 j 10
ini x -193.40207 y 13.440683 i 32 j 11
ini x -192.22736 y 14.248299 i 33 j 11
ini x -190.9058 y 15.202754 i 34 j 11
ini x -189.54755 y 16.193918 i 35 j 11
ini x -188.18929 y 17.148375 i 35 j 12
ini x -187.08798 y 17.95599 i 36 j 12
ini x -185.94028 y 18.759712 i 37 j 12
ini x -184.62103 y 19.736927 i 38 j 12
ini x -183.20407 y 20.714142 i 39 j 12
ini x -181.93369 y 21.642498 i 39 j 13

ini x -180.76103 y 22.47313 i 40 j 13

ini x -179.41548 y 23.429192 i 41 j 13

ini x -178.06403 y 24.366932 i 42 j 13

ini x -176.74016 y 25.332254 i 42 j 14

ini x -175.58514 y 26.177963 i 43 j 14

ini x -174.25626 y 27.105675 i 44 j 14

ini x -172.9023 y 28.083534 i 45 j 14

ini x -171.56119 y 29.047392 i 45 j 15

ini x -170.45073 y 29.846931 i 46 j 15

ini x -169.11816 y 30.779728 i 47 j 15

ini x -167.7183 y 31.77815 i 48 j 15

ini x -166.35823 y 32.73465 i 48 j 16

ini x -165.2622 y 33.539543 i 49 j 16

ini x -163.89218 y 34.498566 i 50 j 16

ini x -162.5528 y 35.45458 i 51 j 16

ini x -161.1847 y 36.431793 i 51 j 17

ini x -160.07591 y 37.255062 i 52 j 17

ini x -158.741 y 38.19556 i 53 j 17

ini x -157.34543 y 39.19674 i 54 j 17

ini x -158.741 y 42.533993 i 54 j 18

ini x -156.04086 y 40.1069 i 54 j 18
ini x -154.89693 y 40.95192 i 55 j 18
ini x -153.53088 y 41.888817 i 56 j 18
ini x -152.16261 y 42.889996 i 57 j 18
ini x -150.86108 y 43.824425 i 57 j 19
ini x -149.69304 y 44.64205 i 58 j 19
ini x -148.59714 y 45.433167 i 59 j 19
ini x -147.29257 y 46.37367 i 60 j 19
ini x -145.8705 y 47.354084 i 61 j 19
ini x -144.60011 y 48.28244 i 61 j 20
ini x -143.40341 y 49.16254 i 62 j 20
ini x -142.06734 y 50.092346 i 63 j 20
ini x -140.71101 y 51.07192 i 64 j 20
ini x -139.43358 y 51.989677 i 64 j 21
ini x -138.21207 y 52.82031 i 65 j 21
ini x -136.9417 y 53.797523 i 66 j 21
ini x -135.5736 y 54.725876 i 67 j 21
ini x -134.20549 y 55.751953 i 67 j 22
ini x -133.0817 y 56.484863 i 68 j 22
ini x -131.71928 y 57.47161 i 69 j 22

ini x -130.33922 y 58.462666 i 70 j 22
ini x -129.0037 y 59.461582 i 70 j 23
ini x -127.83309 y 60.241985 i 71 j 23
ini x -126.57402 y 61.172287 i 72 j 23
ini x -125.230064 y 62.093105 i 73 j 23
ini x -123.87126 y 63.053722 i 73 j 24
ini x -122.688835 y 63.91367 i 74 j 24
ini x -121.39891 y 64.88111 i 75 j 24
ini x -120.001495 y 65.84856 i 76 j 24
ini x -118.65783 y 66.86974 i 76 j 25
ini x -117.58289 y 67.56845 i 77 j 25
ini x -118.87281 y 70.90075 i 78 j 25
ini x -116.18548 y 68.58964 i 78 j 25
ini x -114.841805 y 69.503334 i 79 j 25
ini x -113.44439 y 70.52452 i 79 j 26
ini x -112.36945 y 71.33072 i 80 j 26
ini x -111.02579 y 72.298164 i 81 j 26
ini x -109.704506 y 73.2332 i 82 j 26
ini x -108.38527 y 74.16155 i 82 j 27
ini x -107.16375 y 74.99218 i 83 j 27

ini x -106.13768 y 75.77396 i 84 j 27

ini x -104.67186 y 76.800026 i 85 j 27

ini x -103.42988 y 77.70968 i 86 j 27

ini x -104.78017 y 80.9627 i 86 j 28

ini x -104.78017 y 80.9627 i 86 j 28

ini x -102.06058 y 78.65697 i 86 j 28

ini x -100.94152 y 79.50454 i 87 j 28

ini x -99.56857 y 80.47368 i 88 j 28

ini x -98.195625 y 81.44282 i 89 j 28

ini x -96.822685 y 82.41196 i 89 j 29

ini x -95.692024 y 83.21957 i 90 j 29

ini x -94.36682 y 84.15628 i 91 j 29

ini x -95.7288 y 87.46998 i 92 j 29

ini x -93.03912 y 85.12221 i 92 j 29

ini x -91.67149 y 86.10234 i 92 j 30

ini x -90.55205 y 86.88252 i 93 j 30

ini x -89.214554 y 87.86209 i 94 j 30

ini x -87.84763 y 88.836266 i 95 j 30

ini x -86.51273 y 89.80406 i 95 j 31

ini x -85.37807 y 90.57163 i 96 j 31

ini x -84.07654 y 91.53944 i 97 j 31

ini x -82.635765 y 92.562935 i 98 j 31

ini x -81.33509 y 93.44975 i 98 j 32

ini x -80.211784 y 94.33657 i 99 j 32

ini x -78.85199 y 95.2234 i 100 j 32

ini x -77.433075 y 96.22846 i 101 j 32

ini x -76.13241 y 97.1744 i 101 j 33

ini x -75.0091 y 98.002106 i 102 j 33

ini x -73.70843 y 98.948044 i 103 j 33

ini x -72.28889 y 99.9178 i 104 j 33

ini x -70.96734 y 100.87225 i 104 j 34

ini x -69.82934 y 101.67986 i 105 j 34

ini x -68.544495 y 102.634315 i 106 j 34

ini x -67.14953 y 103.58877 i 107 j 34

ini x -65.84781 y 104.58041 i 107 j 35

ini x -64.67721 y 105.36081 i 108 j 35

ini x -63.57164 y 106.141205 i 109 j 35

ini x -62.205933 y 107.18175 i 110 j 35

ini x -60.833427 y 108.10027 i 111 j 35

ini x -59.541245 y 109.06941 i 111 j 36

ini x -58.329823 y 109.87702 i 112 j 36

ini x -57.068615 y 110.814384 i 113 j 36

ini x -55.63711 y 111.84035 i 114 j 36

ini x -54.366734 y 112.71984 i 114 j 37

ini x -53.19408 y 113.599335 i 115 j 37

ini x -51.874844 y 114.52769 i 116 j 37

ini x -50.555607 y 115.45604 i 117 j 37

ini x -49.187508 y 116.43325 i 117 j 38

ini x -48.063713 y 117.26388 i 118 j 38

ini x -46.639977 y 118.24727 i 119 j 38

ini x -45.274277 y 119.22277 i 120 j 38

ini x -43.908573 y 120.19827 i 120 j 39

ini x -42.868034 y 120.978676 i 121 j 39

ini x -41.437298 y 121.95418 i 122 j 39

ini x -40.13663 y 122.92968 i 123 j 39

ini x -38.790035 y 123.85509 i 123 j 40

ini x -37.68078 y 124.64362 i 124 j 40

ini x -36.32445 y 125.64203 i 125 j 40

ini x -34.98696 y 126.58392 i 126 j 40

ini x -33.603645 y 127.57416 i 126 j 41

ini x -32.493176 y 128.38177 i 127 j 41
ini x -31.15219 y 129.31824 i 128 j 41
ini x -29.806248 y 130.26863 i 129 j 41
ini x -28.44992 y 131.2482 i 129 j 42
ini x -29.806248 y 134.54483 i 130 j 42
ini x -27.319649 y 132.05823 i 130 j 42
ini x -26.230957 y 132.83678 i 131 j 42
ini x -27.550194 y 136.20816 i 132 j 42
ini x -24.86286 y 133.81398 i 132 j 42
ini x -23.543623 y 134.7912 i 133 j 42
ini x -22.175526 y 135.71954 i 133 j 43
ini x -21.00287 y 136.55019 i 134 j 43
ini x -19.683634 y 137.47853 i 135 j 43
ini x -18.315536 y 138.50461 i 136 j 43
ini x -16.996302 y 139.43295 i 136 j 44
ini x -15.823647 y 140.26358 i 137 j 44
ini x -14.504543 y 141.2073 i 138 j 44
ini x -13.129765 y 142.2043 i 139 j 44
ini x -11.771506 y 143.15875 i 139 j 45
ini x -10.706924 y 143.92966 i 140 j 45

ini x -9.348666 y 144.88411 i 141 j 45

ini x -8.7125 y 145.34778 i 142 j 45

ini x -8.008687 y 145.87753 i 142 j 46

ini x -6.6761174 y 146.81033 i 143 j 46

ini x -5.0326147 y 148.00964 i 144 j 46

mark i=145 j=47, 51

mark i=152 j=47, 51

mark i=22,23 j=7

model n reg i 1 j 33

model n i 145 151 j 46

model n i 152 300 j 46,50

model n i 152 300 j 45

model n i 156 300 j 44

model n reg i 150 j 50

model n i 285 300 j 6

model n i 278 300 j 7

model n i 275 300 j 8

model n i 272 300 j 9

model n i 269 300 j 10

model n i 266 300 j 11

model n i 263 300 j 12

model n i 255 300 j 13

model n reg i 200 j 40

save model.sav

call stagedconstruction.dat

ret

- **Στατική Ανάλυση**

new

restore model.sav

model n group 'rockfill_3C'

model n group 'rockfill_3B'

model n group 'Gravel_2B'

model n group 'rip_rap'

```
model mo group 'foundation'
```

```
prop density=2500 bulk=66.e6 shear=30.e6 coh=200000 fric=35.0 dil=0.0 group 'foundation'
```

```
not null
```

```
;... set the boundary conditions for static analysis
```

```
fix x i 1
```

```
fix x i 301
```

```
fix x y j 1
```

```
set grav 9.81
```

```
set dyn=off
```

```
ini syy -539550 from 22,6 to 23,6
```

```
solve
```

```
ini xvel=0.0 yvel=0.0 xdisp=0.0 ydisp=0.0
```

```
model n group 'beam'
```

model mo group 'rockfill_3C' not null

prop density=2150 bulk=16e6 shear=12e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group 'rockfill_3C'
not null

model mo group 'rockfill_3B' not null

prop density=2150 bulk=21.33333e6 shear=16e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
'rockfill_3B' not null

model mo group 'Gravel_2B' not null

prop density=2150 bulk=42.66667e6 shear=32e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
'Gravel_2B' not null

model mo group 'rip_rap' not null

prop density=2150 bulk=16e6 shear=12e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group 'rip_rap' not
null

model n j=7,50

ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 group 'Gravel_2B' not null

ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 group 'rockfill_3B' not null

ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 group 'rockfill_3C' not null

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 group 'rip_rap' not null
```

```
solve
```

```
save damdiplv1.sav
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=8,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=7
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=9,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=8
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=10,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=9
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=11,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=10
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=12,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=11
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```



```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=13,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=12
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=14,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=13
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=15,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=14
```

```
;ini_duncan
```

solve

call modelduncan.dat

model n j=16,50

ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=15

;ini_duncan

solve

call modelduncan.dat

model n j=17,50

ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=16

;ini_duncan

solve

; save *****

save damdipl2v.sav

call modelduncan.dat

```
model n j=18,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=17
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=19,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=18
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=20,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=19
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=21,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=20
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=22,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=21
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=23,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=22
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=24,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=23
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=25,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=24
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=26,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=25
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=27,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=26
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
; save *****
```

```
save damdipl3v.sav
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=28,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=27
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=29,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=28
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=30,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=29
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=31,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=30
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=32,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=31
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=33,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=32
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=34,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=33
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```



```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=35,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=34
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=36,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=35
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=37,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=36
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
; save *****
```

```
save damdipl4v.sav
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=38,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=37
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=39,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=38
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=40,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=39
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=41,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=40
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=42,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=41
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=43,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=42
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=44,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=43
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=45,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=44
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=46,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=45
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
call modelduncan.dat
```

```
model n j=47,50
```

```
ini sxx -50000 syy -50000 szz -50000 j=46
```

```
;ini_duncan
```

```
solve
```

```
; save *****
```

```
save stagedconstruction.sav
```

```
call dynamicanalysis.dat
```

```
ret
```

- Αρχείο `modelmohr.dat` με ιδιότητες υλικών (Mohr-Coulomb) για την σταδιακή ανάλυση-κατασκευή φράγματος.

```
model mo group 'foundation'
```

```
prop density=2500 bulk=66.e6 shear=30.e6 coh=200000 fric=35.0 dil=0.0 group 'foundation'
```

```
not null
```

```
model n group 'beam'
```

```
model mo group 'rockfill_3C' not null
```

```
prop density=2150 bulk=16e6 shear=12e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group 'rockfill_3C'
```

```
not null
```

```
model mo group 'rockfill_3B' not null
```

```
prop density=2150 bulk=21.33333e6 shear=16e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
```

```
'rockfill_3B' not null
```

```
model mo group 'Gravel_2B' not null
```

```
prop density=2150 bulk=42.66667e6 shear=32e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
```

```
'Gravel_2B' not null
```

```
model mo group 'rip_rap' not null
```

```
prop density=2150 bulk=16e6 shear=12e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group 'rip_rap' not  
null
```

- **Δυναμική Ανάλυση**

```
new
```

```
restore stagedconstruction.sav
```

```
unmark
```

```
; apply water pressure *****
```

```
apply pressure 0.0 var 0.0 1451880 from 145, 45 to 24, 6
```

```
set step 20000000
```

```
solve
```

```
save pressure.sav
```

```
; Dynamic Analysis *****
```

```
set mech on
```

```
set dyn on
```

set mu on

set overwrite on

set geometry 0.2

set large

set step 20000000

set dytime = 0

set ncwrite 100

set dy_damp=rayleigh 0.01 1.97

ini dy_damp hyst sig3 1.014 -0.65 -1.3 group rockfill_3C

ini dy_damp hyst sig3 1.014 -0.65 -1.3 group rockfill_3B

ini dy_damp hyst sig3 1.014 -0.65 -1.3 group Gravel_2B

ini dy_damp hyst sig3 1.014 -0.65 -1.3 group rip_rap

ini dy_damp hyst sig3 1.014 -0.65 -1.3 group foundation

; set dynamic stiffness

model mo group 'foundation'

prop density=2500 bulk=1800.e6 shear=600.e6 coh=200000 fric=35.0 dil=0.0 group

'foundation' not null

model mo group 'rockfill_3C' not null

prop density=2150 bulk 2160.e6 shear=720.e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
'rockfill_3C' not null

model mo group 'rockfill_3B' not null

prop density=2150 bulk=2880.e6 shear=960.e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
'rockfill_3B' not null

model mo group 'Gravel_2B' not null

prop density=2150 bulk=5760.e6 shear=1920.e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group
'Gravel_2B' not null

model mo group 'rip_rap' not null

prop density=2150 bulk=960.e6 shear=720.e6 coh=20000 fric=51.0 dil=0.0 group 'rip_rap'
not null

apply ff

fix x y j=1

```

def io1

    float tim1 w11 w22

    array tim1(2000) w11(2000) w22(2000)

    status = open('tim1.dat', 0, 1)

    status = read(tim1, 1998)

    status = close

    status = open('lef_xvel.dat',0, 1)

    status = read(w11, 1998)

    status = close

    loop n (1, 1998)

        xtable(3,n)=parse(tim1(n),1)

        ytable(3,n)=parse(w11(n),1)

    end_loop

end

io1

```

```

def ww11

ww11=table(3,dytime)

end

ww11

ini xvel=0.0 yvel=0.0 xdisp=0.0 ydisp=0.0

apply xvel=1.00      hist=ww11      i=1,301 j=1

apply yvel=0.001    hist=ww11    i=1,301 j=1

his reset

his nstep 1000 dytime ;1

his nstep 1000 unbal

his nstep 1000 ww11

;1

his nstep 1000 xdis i 148 j 46

his nstep 1000 ydis i 148 j 46

his nstep 1000 xacc i 148 j 46

his nstep 1000 yacc i 148 j 46

```

;2

his nstep 1000 xdis i 148 j 36

his nstep 1000 ydis i 148 j 36

his nstep 1000 xacc i 148 j 36

his nstep 1000 yacc i 148 j 36

;3

his nstep 1000 xdis i 148 j 26

his nstep 1000 ydis i 148 j 26

his nstep 1000 xacc i 148 j 26

his nstep 1000 yacc i 148 j 26

;4

his nstep 1000 xdis i 148 j 16

his nstep 1000 ydis i 148 j 16

his nstep 1000 xacc i 148 j 16

his nstep 1000 yacc i 148 j 16

;5

his nstep 1000 xdis i 148 j 6

his nstep 1000 ydis i 148 j 6

his nstep 1000 xacc i 148 j 6

his nstep 1000 yacc i 148 j 6

;6

his nstep 1000 xdis i 148 j 1

his nstep 1000 ydis i 148 j 1

his nstep 1000 xacc i 148 j 1

his nstep 1000 yacc i 148 j 1

;7

his nstep 1000 xdis i 116 j 36

his nstep 1000 ydis i 116 j 36

his nstep 1000 xacc i 116 j 36

his nstep 1000 yacc i 116 j 36

;8

his nstep 1000 xdis i 85 j 26

his nstep 1000 ydis i 85 j 26

his nstep 1000 xacc i 85 j 26

```
his nstep 1000 yacc i 85 j 26
```

```
;9
```

```
his nstep 1000 xdis i 185 j 36
```

```
his nstep 1000 ydis i 185 j 36
```

```
his nstep 1000 xacc i 185 j 36
```

```
his nstep 1000 yacc i 185 j 36
```

```
;1
```

```
his nstep 1000 xdis i 216 j 26
```

```
his nstep 1000 ydis i 216 j 26
```

```
his nstep 1000 xacc i 216 j 26
```

```
his nstep 1000 yacc i 216 j 26
```

```
set dydt=0.00001
```

```
solve dyt=10.
```

```
save dynamic10.sav
```

```
solve dyt=20.
```

```
save dynamic20.sav
```

