



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**



**ΜΑΡΚΟΣ Γ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΤΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:**

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

**ΔΡ. ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.Δ.Ι.Π/ Ε.Μ.Π**

**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019**

Εικόνα Εξωφύλλου

**Εικόνα 1:** Φράγμα Sirikit- Ταϊλάνδη  
(Πηγή: <https://www.egat.co>)



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ**  
**ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

**ΜΑΡΚΟΣ Γ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΤΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:**

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

**ΔΡ. ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.Δ.Ι.Π/ Ε.Μ.Π**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 7<sup>η</sup> Μαρτίου 2019.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Μαρίνος Καττής

Πρόδρομος Ψαρρόπουλος

Ιωάννης Τσομπανάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ε.Δ.Ι.Π/ Ε.Μ.Π

Αν. Καθηγητής  
Πολυτεχνείου Κρήτης

**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019**

(Υπογραφή)

.....

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΤΟΣ ΜΑΡΚΟΣ**

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π

© 2019 – All rights reserved

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

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

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, που μέσα από τις παραδόσεις του στο μάθημα της Εδαφομηχανικής, μου κέντρισε το ενδιαφέρον για το αντικείμενο της Εδαφομηχανικής και της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση, την άμεση και ουσιαστική βοήθεια, την υποστήριξη που μου παρείχε και το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που διαμόρφωσε, συμβάλλοντας τα μέγιστα στην κατάρτιση της εργασίας αυτής.

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

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές για τις ανταλλαγές απόψεων, το ειλικρινές ενδιαφέρον και για την σημαντική βοήθεια τους σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την διαχρονική συμπαράσταση της σε κάθε μου βήμα, τη στήριξη και την κατανόηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, με αποκορύφωμα την περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, που με την υπομονή και το κουράγιο που έδειξε, μου έδωσε την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

# Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	ix
ABSTRACT.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΓΕΝΙΚΑ .....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Σκοπός της διπλωματικής .....	2
1.3. Δομή της διπλωματικής .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ.....	4
2.1. Τύποι φραγμάτων.....	4
2.1.1. Άκαμπτα φράγματα- Σκυροδέματος.....	5
2.1.2. Εύκαμπτα φράγματα- Χωμάτινα .....	10
2.2. Οφέλη από την κατασκευή φραγμάτων.....	15
2.3. Αρνητικά από την κατασκευή των φραγμάτων .....	19
2.4. Βλάβες και ευπάθεια φραγμάτων .....	21
2.4.1. Αίτια αστοχίας φραγμάτων .....	21
2.4.2. Περιστατικά αστοχίας φραγμάτων .....	29
2.4.3. Μηχανισμοί αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων .....	35
2.4.4. Επιπτώσεις σεισμού στα χωμάτινα φράγματα.....	38
2.4.5. Περιστατικά αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων λόγω σεισμού .....	39
2.5. Παρακολούθηση φραγμάτων.....	47
2.5.1. Γεωτεχνικές μέθοδοι.....	49
2.5.2. Γεωδαιτικές μέθοδοι.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ .....	56
3.1. Μεθοδολογίες Σχεδιασμού .....	56
3.1.1. Ψευδοστατική Μέθοδος.....	57
3.1.2. Μέθοδος ολίσθησης πρανούς .....	60
3.1.3. Μέθοδος τάσεων- παραμορφώσεων .....	65
3.2. Κανονισμοί για το σχεδιασμό χωμάτινων φραγμάτων.....	67
3.2.1. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός.....	68
3.2.2. Ευρωπαϊκός Αντισεισμικός Κανονισμός.....	70
3.2.3. Ομοσπονδιακές οδηγίες ΗΠΑ .....	72

3.2.4. Οδηγίες της Διεθνούς Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων .....	76
3.3. Παραδείγματα αντισεισμικού σχεδιασμού φραγμάτων .....	81
3.3.1. Φράγμα Μόρνου .....	81
3.2.3. Φράγμα Τριανταφυλλιάς .....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΧΩΜΑΤΙΝΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ .....	94
4.1. Γενικά.....	94
4.2. Χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος.....	96
4.2.1. Γενική περιγραφή της ευρύτερης περιοχής του έργου .....	96
4.2.2. Μορφολογία της περιοχής- Κλίμα.....	99
4.2.3. Γεωλογία περιοχής.....	101
4.2.4. Εδαφολογία περιοχής.....	101
4.2.5. Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής.....	101
4.2.6. Διατομή φράγματος Τριανταφυλλιάς .....	102
4.3. Λογισμικό .....	104
4.3.1. Περιεχόμενα προγράμματος .....	104
4.3.2. Γενικές Ρυθμίσεις.....	104
4.3.3. Σχεδιασμός Γεωμετρίας Προσομοιώματος.....	106
4.3.4. Συνοριακές Συνθήκες.....	107
4.3.5. Εισαγωγή Ιδιοτήτων Υλικών .....	108
4.3.6. Δημιουργία Δικτύου Πεπερασμένων Στοιχείων .....	110
4.3.7. Αρχικές Συνθήκες .....	110
4.3.8. Επίλυση-Υπολογισμοί .....	111
4.3.9. Σχεδιασμός Καμπυλών .....	114
4.4. Παραμετρικές Αναλύσεις .....	116
4.4.1. Εισαγωγή .....	116
4.4.2. Δημιουργία Γεωμετρικού Μοντέλου .....	117
4.4.3. Εδαφικές Συνθήκες.....	117
4.4.4. Υλικά του φράγματος .....	118
4.4.5. Σεισμικές Διεγέρσεις .....	119
4.4.6. Ελαστικές και Ανελαστικές Αναλύσεις.....	133
4.4.7. Χαρακτηριστικά Σημεία στο φράγμα .....	134
4.4.8. Προκαλούμενες μόνιμες μετατοπίσεις.....	135
4.4.9. Ενίσχυση.....	136

4.4.10. Σύνοψη.....	136
4.4.11. Αποτελέσματα.....	137
4.4.12. Σχολιασμός Πινάκων .....	142
4.4.13. Σύγκριση πινάκων μετατοπίσεων με Μ. Αυγερινού.....	152
4.4.14. Συμπεράσματα .....	155
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	159
5.1. Γενικά Συμπεράσματα .....	159
5.2. Προοπτικές.....	162
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	163
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	166



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της σεισμικής απόκρισης των χωμάτινων φραγμάτων. Συγκεκριμένα, διερευνάται το πρόβλημα των μόνιμων μετατοπίσεων, αλλά και των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος, κατά τη διάρκεια μίας σεισμικής διέγερσης, με απώτερο στόχο τον προσδιορισμό και την πλήρη κατανόηση, των παραμέτρων που επηρεάζουν την σεισμική συμπεριφορά των χωμάτινων φραγμάτων.

Αρχικά, γίνεται μια εκτενής ανάλυση όσον αφορά το θεωρητικό κομμάτι των φραγμάτων, χωμάτινων και μη, ενώ στην συνέχεια, ως προέκταση των θεωρητικών στοιχείων που έχουν αναφερθεί, πραγματοποιούνται κάποιες παραμετρικές αναλύσεις σε μια υπαρκτή κατασκευή και συγκεκριμένα στο φράγμα Τριανταφυλλιάς, του νομού Φλωρίνης. Στην κατασκευή αυτή λαμβάνονται διάφορα υποθετικά σενάρια, όσον αφορά το έδαφος θεμελίωσης, τα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος και τη μηχανική συμπεριφορά τους, αλλά και την κορυφαία επιτάχυνση που αναπτύσσεται σε αυτό κατά τον σεισμό και επιβάλλονται έντεκα διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις, προερχόμενες από τον διεθνή χώρο. Ωστόσο, στις αναλύσεις αυτές αγνοείται η επίδραση του νερού, καθώς αυτό εισάγει υδροστατικές και υδροδυναμικές ωθήσεις στο φράγμα και η μελέτη του γίνεται ιδιαίτερα δύσκολη. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο τάσεων-παραμορφώσεων, με την βοήθεια του λογισμικού PLAXIS-2D, το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων σε δύο διαστάσεις.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχολιάστηκαν και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα μιας άλλης προγενέστερης μελέτης που έχει πραγματοποιηθεί για τη συγκεκριμένη κατασκευή, ωστόσο με διαφορετική μεθοδολογία, συγκεκριμένα το συνδυασμό ισοδύναμα-γραμμικών αναλύσεων με το λογισμικό QUAD-4M και τη μέθοδο του ολισθαίνοντος σώματος Newmark. Εν τέλει, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τους στόχους της εργασίας αυτής, τα οποία και παρουσιάζονται.

## ABSTRACT

The subject of this diploma thesis is the study of the seismic response of the earth-filled dams. Particularly, the problem of permanent displacements and accelerations that are developed in some specific points of the dam during a seismic excitation is being investigated, with the ultimate aim of determining and fully understanding, of the parameters that affect the seismic behavior of the earth-filled dams.

Initially, an extensive analysis is made on the theoretical part of the dams (earth-filled and concrete) and then, as an extension of the theoretical elements mentioned, some parametric analyses are made in a real structure, which is named Triantafyllia dam, in the prefecture of Florina. In this structure several hypothetical scenarios are made regarding the foundation soil, the geomaterials in the dam body and their mechanical behavior, as well as the peak acceleration that is being developed during the earthquake and eleven different seismic excitations are applied, coming from the international literature. However, in these analyses the effect of water is ignored, as it introduces hydrostatic and hydrodynamic impulses to the dam, so its study becomes particularly difficult. These analyses were carried out with the stress-strain method, by means of PLAXIS-2D software, which uses the finite element method to solve geotechnical problems in two dimensions.

The obtained results were commented and compared with the results of another previous study which was carried out about this structure, but with a different methodology, which is based on the combination of equivalent-linear analyses with the QUAD-4M software and the Newmark sliding body method. Finally, useful conclusions were drawn about the targets of this work, which are presented.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΓΕΝΙΚΑ

## 1.1. Γενικά

Τα φράγματα αποτελούν από τα πρώτα τεχνικά επιτεύγματα του ανθρώπου, αφού η κατασκευή των πρώτων από αυτά, υπολογίζεται περίπου 6000 χρόνια πριν, και είχαν σαν αρχικό σκοπό την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου σε νερό. Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 16 εκατομμύρια φράγματα στον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων 70.000 μεγάλων φραγμάτων. Ένα φράγμα είναι ένα τεχνικό έργο, που κατασκευάζεται στην κοίτη ενός ποταμού για να ανακόψει την ροή, με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρησιμοποίησή του. Η έκταση γης στην οποία αποθηκεύεται το νερό και βρίσκεται στα ανάντη του φράγματος, ονομάζεται ταμιευτήρας. Έτσι, τα φράγματα μπορούσαν από τα παλιά χρόνια να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες του ανθρώπου σε ύδρευση και άρδευση, ενώ πια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από το νερό που αποθηκεύεται σε αυτά.

Πολλές φορές βέβαια, σε μια τέτοια κατασκευή είναι πιθανό να υπάρξουν προβλήματα, που μπορεί να προέρχονται από λάθη στη μελέτη ή την κατασκευή, αλλά και από φυσικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα κάποιον σεισμό. Έτσι, αυτοί οι παράγοντες, μπορεί να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στο φράγμα, και στην χειρότερη περίπτωση, να το οδηγήσουν στην αστοχία. Μια αστοχία σε μια τέτοια κατασκευή θα ήταν καταστροφική, καταρχάς για τον άνθρωπο, όπου μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή, στην συνέχεια για το περιβάλλον, αφού πιθανόν θα καταστραφεί ολοκληρωτικά μια πολύ μεγάλη έκταση γης αν συμβεί κάτι τέτοιο, ενώ αναπόφευκτη θα είναι και η καταστροφή κινητής και ακίνητης περιουσίας του ανθρώπου.

Για τον λόγο αυτό σημαντικό ζήτημα για την ασφάλεια των κατασκευών αυτών, αποτελεί ο σωστός αντισεισμικός σχεδιασμός τους, όπως και η συχνή παρακολούθηση της σεισμικής συμπεριφοράς τους. Σημαντικό ρόλο στο ζήτημα αυτό συμβάλλει ο τοπογράφος μηχανικός, ο οποίος είναι αυτός που θα παρακολουθήσει τις μετατοπίσεις στο φράγμα, και θα κρίνει, με την βοήθεια και άλλων ειδικοτήτων, αν η κατασκευή είναι ασφαλής ή όχι.

## 1.2. Σκοπός της διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη της απόκρισης των φραγμάτων κάτω από σεισμικές συνθήκες, η σεισμική αξιολόγηση της ευστάθειάς τους και η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόκριση αυτή. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, αρχικά αναφέρονται ορισμένα βασικά θεωρητικά στοιχεία περί φραγμάτων, ώστε να επιτευχθεί η γενικότερη κατανόηση των κατασκευών αυτών. Επίσης, γίνεται μια εκτενής ανάλυση των διαδικασιών που ακολουθούνται κατά τον σχεδιασμό των φραγμάτων. Ύστερα, περνώντας από την θεωρία στην πράξη, πραγματοποιούνται ορισμένες παραμετρικές αναλύσεις, σε μια πραγματική κατασκευή, το φράγμα της Τριανταφυλλιάς, του νομού Φλωρίνης. Στις αναλύσεις αυτές λαμβάνονται αρκετοί συνδυασμοί των παραμέτρων που επιδρούν στην σεισμική συμπεριφορά του φράγματος, και υπολογίζονται οι μετατοπίσεις και επιταχύνσεις, που αναπτύσσονται σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος, ύστερα από την επιβολή σεισμικών διεγέρσεων σε αυτά, διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου κάθε φορά. Έτσι, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το πως η κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζει το φράγμα κάτω από μια σεισμική διέγερση και για το αν κάθε συνδυασμός των παραμέτρων που λήφθηκαν είναι ασφαλής για την ευστάθεια του φράγματος.

## 1.3. Δομή της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική, αποτελείται από 5 κεφάλαια και ένα παράρτημα.

Το **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιλαμβάνει κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τα φράγματα, αναλύεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται η δομή της.

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αρχικά αναφέρονται οι τύποι φραγμάτων που υπάρχουν, ενώ στην συνέχεια επισημαίνονται τα οφέλη, αλλά και τα αρνητικά, που προκύπτουν από την δημιουργία των κατασκευών αυτών. Επιπλέον, υπογραμμίζονται οι βλάβες που μπορούν να δημιουργηθούν στα φράγματα, οι αιτίες που μπορούν να οδηγήσουν ένα φράγμα στην αστοχία, και δίνονται κάποια περιστατικά αστοχίας που έχουν συμβεί από την βιβλιογραφία. Στην συνέχεια, αναλύεται περισσότερο ο παράγοντας του σεισμού και πως αυτός μπορεί να επηρεάσει τα

χωμάτινα φράγματα, ενώ παρουσιάζονται κάποια περιστατικά αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων λόγω σεισμού από την βιβλιογραφία. Τέλος, γίνεται αναφορά στην σημασία της παρακολούθησης των φραγμάτων πριν, κατά την διάρκεια, αλλά και μετά τον σεισμό, και προσδιορίζονται κάποιες βασικές μέθοδοι με τις οποίες αυτή επιτυγχάνεται.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** καθορίζονται οι μεθοδολογίες που υπάρχουν για τον αντισεισμικό σχεδιασμό φραγμάτων, ενώ επισημαίνονται οι κανονισμοί που πρέπει να τηρούνται κατά τη μελέτη των φραγμάτων, με έμφαση στα χωμάτινα. Τέλος, παρουσιάζονται κάποιες μελέτες σχεδιασμού χωμάτινων φραγμάτων, ως προς τον αντισεισμικό τους σχεδιασμό.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** πραγματοποιούνται ορισμένες παραμετρικές αναλύσεις για το φράγμα της Τριανταφυλλιάς του νομού Φλωρίνης. Αρχικά, περιγράφονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής στην οποία υπάγεται το φράγμα της Τριανταφυλλιάς, ενώ στη συνέχεια γίνεται μια εκτενής ανάλυση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις, του PLAXIS-2D, περιγράφοντας αναλυτικά τις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πραγματοποίηση των αναλύσεων. Ύστερα, αναλύονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, ενώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, τα οποία και σχολιάζονται. Επιπλέον, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, με αυτά που είχαν προκύψει από μια προγενέστερη εργασία που είχε πραγματοποιηθεί στο θέμα αυτό, χρησιμοποιώντας διαφορετική μεθοδολογία και διαφορετικό λογισμικό. Τέλος, αναφέρονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν, μέσω της μελέτης των αποτελεσμάτων.

Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται κάποια γενικά συμπεράσματα και προοπτικές που προέκυψαν από την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Στο **Παράρτημα** περιλαμβάνονται τα διαγράμματα των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων και των χρονοϊστοριών των μετατοπίσεων για τις ανελαστικές αναλύσεις και τα διαγράμματα των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων για όλες τις ελαστικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν στην παρούσα εργασία.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

## 2.1. Τύποι φραγμάτων

Τα φράγματα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες ως εξής:

### 1. Ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετούν:

- Φράγματα συγκέντρωσης νερού: Το νερό συγκεντρώνεται σε επιφανειακούς ταμιευτήρες, δημιουργούνται δηλαδή τεχνητές λίμνες που αποδίδονται και με τον όρο λεκάνη κατάκλισης.
- Φράγματα εκτροπής: Η ροή του νερού εκτρέπεται είτε για παροχέτευση του σε προκαθορισμένο χώρο, είτε για εκτέλεση εργασιών εν ξηρώ. Διακρίνονται σε μόνιμα και προσωρινά.
- Φράγματα ανάσχεσης: Γίνεται ανάσχεση της ταχύτητας ροής, δηλαδή επιβράδυνση αυτής με σκοπό τον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων και την αποφυγή ή μείωση της διάβρωσης, λόγω εκδήλωσης χειμαρρικών φαινομένων.
- Φράγματα ρύθμισης: Είναι ρυθμιστικά, για τον έλεγχο και την πρόληψη των πλημμύρων, καθώς και την ελεγχόμενη παροχέτευση νερού.

### 2. Ανάλογα με την χρήση τους:

- Υδροηλεκτρικά: Έχουν κυρίως ενεργειακή χρήση.
- Αρδευτικά: Χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των ενεργών άρδευσης.
- Υδρευτικά: Χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης.
- Πολλαπλής σκοπιμότητας: Έχουν παραπάνω από μία χρήσεις (π.χ. Υδροηλεκτρικά + Αρδευτικά).

### 3. Ανάλογα με το ύψος τους:

- Μικρά φράγματα: Το ύψος τους δεν ξεπερνάει τα 15 μέτρα.
- Μεγάλα φράγματα: Έχουν ύψος μεγαλύτερο από 15 μέτρα και μικρότερο από 150 μέτρα.
- Πολύ μεγάλα φράγματα: Έχουν ύψος μεγαλύτερο από 150 μέτρα.

#### **4. Ανάλογα με την γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής τους:**

- i. Άκαμπτα- Σκυροδέματος
  - Φράγματα βαρύτητας
  - Τοξωτά φράγματα
  - Αντηριδωτά φράγματα
  
- ii. Εύκαμπτα- Χωμάτινα
  - Χωμάτινα με αργλικό πυρήνα
  - Χωμάτινα- λιθόρριπτα με αργλικό πυρήνα

Θα πραγματοποιηθεί εκτενής ανάλυση της τελευταίας κατηγορίας, δηλαδή των κατηγοριών φραγμάτων που υπάρχουν, ανάλογα με την γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής τους.

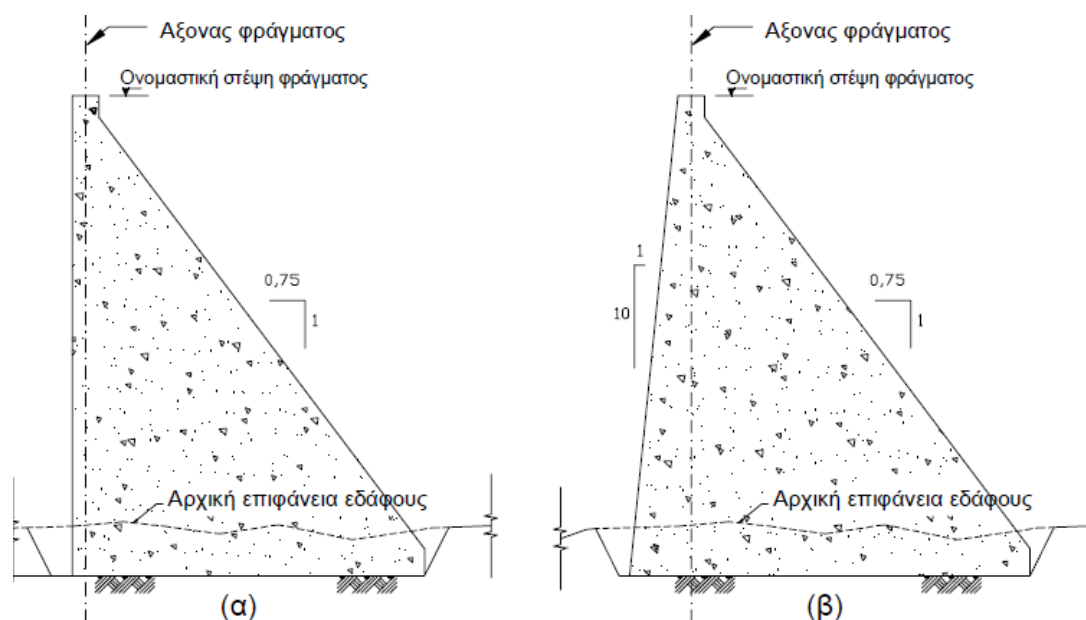
#### **2.1.1. Άκαμπτα φράγματα- Σκυροδέματος**

- **Φράγματα βαρύτητας**

Τα φράγματα βαρύτητας κατασκευάζονται από σκυρόδεμα. Ως προς την κατασκευή τους είναι απαραίτητες οι καλές συνθήκες θεμελίωσης, με ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα (0,80-1,10 MPa) και ελάχιστες καθιζήσεις. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι το ότι δεν ανατρέπονται και δεν ολισθαίνουν, λόγω του ιδίου βάρους τους, το οποίο παραλαμβάνει τις δυνάμεις ολίσθησης και ανατροπής που ασκεί σε αυτά το νερό.

Αναλυτικά οι δυνάμεις ανατροπής που αναπτύσσονται σε αυτά είναι, η υδροστατική πίεση (κυρίως στην ανάντη πλευρά), η δύναμη της άνωσης, οι ωθήσεις γαιών λόγω συσσώρευσης φερτών στον πυθμένα, καθώς και τα οριζόντια σεισμικά φορτία. Αντίθετα, οι δυνάμεις ευστάθειας που ασκούνται σε αυτά είναι: το ίδιο το βάρος του φράγματος, καθώς και το υπερκείμενο βάρος του νερού στην ανάντη παρειά.

Τα φράγματα βαρύτητας σχεδιάζονται με κατακόρυφη (Εικόνα 2.1α) ή παρακατακόρυφη (Εικόνα 2.1β) την ανάντη παρειά, ενώ η κατάντη παρειά σχεδιάζεται με κλίση 0.75:1.



**Εικόνα 2.1:** Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα

(Πηγή : Μουτάφης, 2009)

Πλεονεκτικές θέσεις κατασκευής για αυτούς τους τύπους φραγμάτων, αποτελούν περιοχές με στένωμα κοιλάδας, όπου το υγιές πέτρωμα είναι κοντά στην επιφάνεια, τόσο στην θεμελίωση, όσο και στα αντερείσματα, επειδή σε κοιλάδες μεγάλου εύρους, αυτά δεν αποτελούν οικονομική λύση. Ακόμα, καλό είναι να κατασκευάζονται σε λογική απόσταση (8-15 km) από δανειοθαλάμους με κατάλληλα αδρανή υλικά για το σκυρόδεμα.





**Εικόνα 2.2:** Φράγμα βαρύτητας- Grande dixence dam/Switzerland

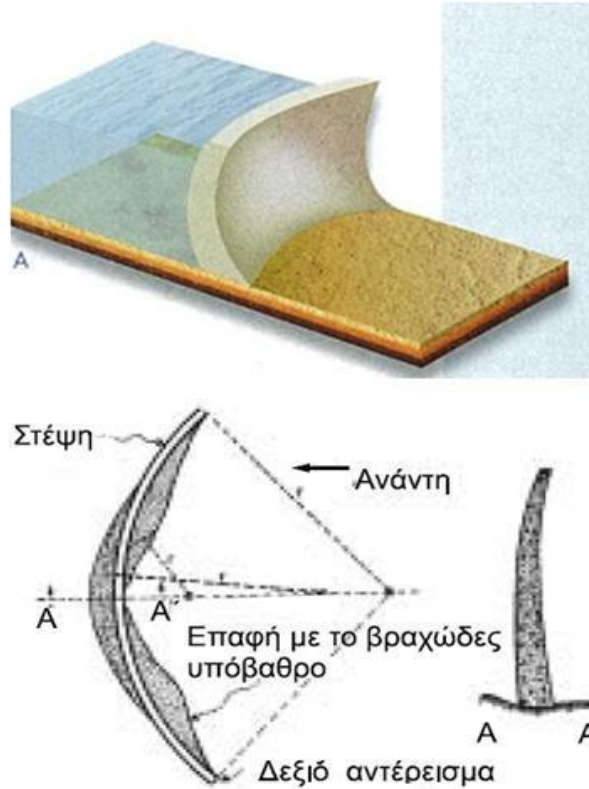
**Πηγή:** <https://www.myswitzerland.com>

- **Τοξωτά φράγματα**

Τα φράγματα αυτά, κατασκευάζονται συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας, ενώ είναι καμπύλα στον σχεδιασμό, με την κυρτή επιφάνεια προς τα ανάντη. Τα τοξωτά φράγματα μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα, επιβάλλοντας τους πολύ μεγάλες φορτίσεις, ενώ σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας, επιτυγχάνεται οικονομία στον όγκο σκυροδέματος έως και 70%.

Απαραίτητες προϋποθέσεις για την κατασκευή αυτού του τύπου φραγμάτων, αποτελούν καταρχάς οι εξαιρετικές συνθήκες θεμελίωσης στη βάση και στα αντερείσματα, με πολύ ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα (5,50-7,50 MPa), ενώ θα πρέπει τα αντερείσματα να έχουν και ένα αρκετά υψηλό μέτρο παραμόρφωσης, για να διασφαλιστεί η παραμόρφωση της βραχομάζας, κάτω από την ώθηση του τόξου. Πλεονεκτικές θέσεις κατασκευής αποτελούν τα φαράγγια, όπου τα αντερείσματα είναι ικανά να δεχθούν την ώθηση που προκαλείται από την λειτουργία του τόξου, το οποίο τόξο θα πρέπει να πακτώνεται καλά στα αντερείσματα. Μια ακόμα καλή θέση κατασκευής, αποτελούν οι στενές απότομες κοιλάδες τύπου V με αντερείσματα από βραχώδη

υλικά υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, ώστε οι μετακινήσεις της έδρασης του φράγματος στα αντερείσματα να είναι πολύ μικρές.



**Εικόνα 2.3:** Τομή ΑΑ τοξωτού φράγματος

(Πηγή: Σαμπατάκης, Δεπούνη)

Συνήθως έχουν μεγάλο ύψος (άνω των 150 μέτρων και συχνά άνω των 200 μέτρων), επειδή στα ύψη αυτά είναι οικονομικά συμφέρουσα η λύση τοξωτού φράγματος και επιπλέον στις στενές κοιλάδες οι ταμιευτήρες απαιτούν μεγάλα ύψη φράγματος για να έχουν αξιόλογη χωρητικότητα.

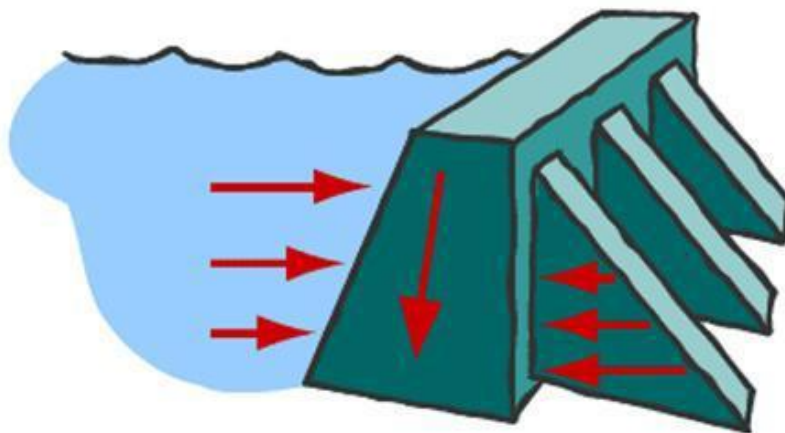


**Εικόνα 2.4:** Τοξωτό φράγμα- Gordon dam/Tasmania

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

- **Αντηριδωτά φράγματα**

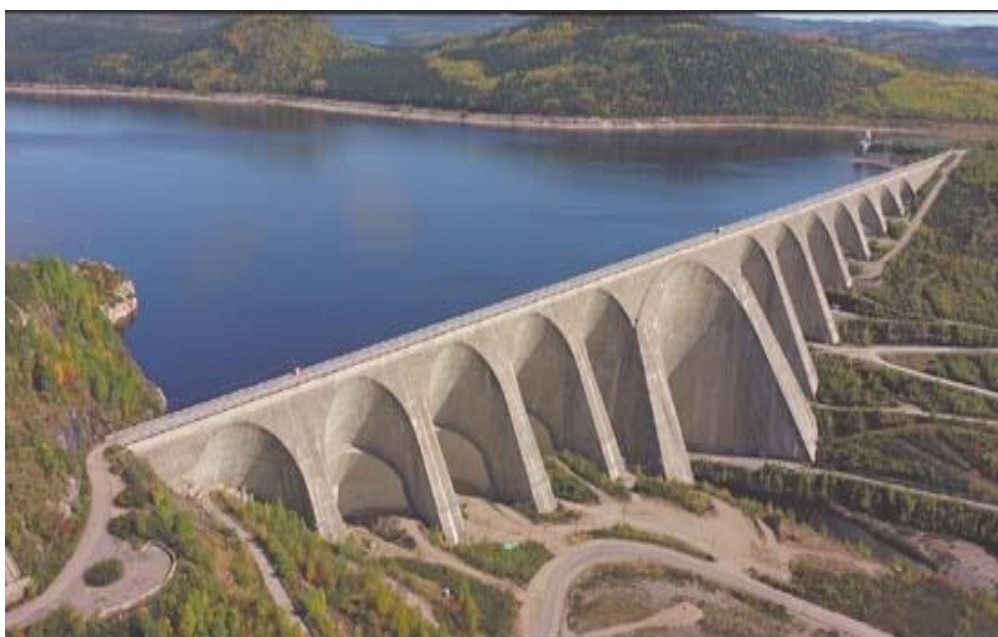
Τα αντηριδωτά φράγματα είναι διάκενα φράγματα βαρύτητας με αυξημένα κενά και αποτελούν στην πραγματικότητα κούφια φράγματα βαρύτητας στα οποία όπως είναι λογικό, μειώνεται ο όγκος του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος, ενώ αυξάνεται το πλάτος θεμελίωσης. Αυτά μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις κυρίως στην επιφάνεια θεμελίωσης και λιγότερο στα αντερείσματα, ενώ σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας επιτυγχάνουν σημαντική οικονομία στον όγκο του απαιτούμενου σκυροδέματος.



**Εικόνα 2.5:** Υδροστατικές πιέσεις στα αντηριδωτά φράγματα

(Πηγή: Σαμπατάκης, Δεπούνης)

Βασική απαίτηση των κατασκευών αυτών αποτελεί η ύπαρξη πολύ καλών συνθηκών θεμελίωσης, με πολύ ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα (2,20-3,20 MPa) και ελάχιστες καθιζήσεις. Πλεονεκτικές θέσεις κατασκευής των φραγμάτων αυτών αποτελούν το στένωμα κοιλάδας όπου το υγιές πέτρωμα είναι κοντά στην επιφάνεια, τόσο στη θεμελίωση όσο και στα αντερείσματα, ενώ σημαντικό είναι να υπάρχουν σε λογική απόσταση επαρκείς δανειοθάλαμοι με κατάλληλα αδρανή υλικά για το σκυρόδεμα.



**Εικόνα 2.6:** Αντηριδωτό φράγμα- Daniel Johnson dam/Canada

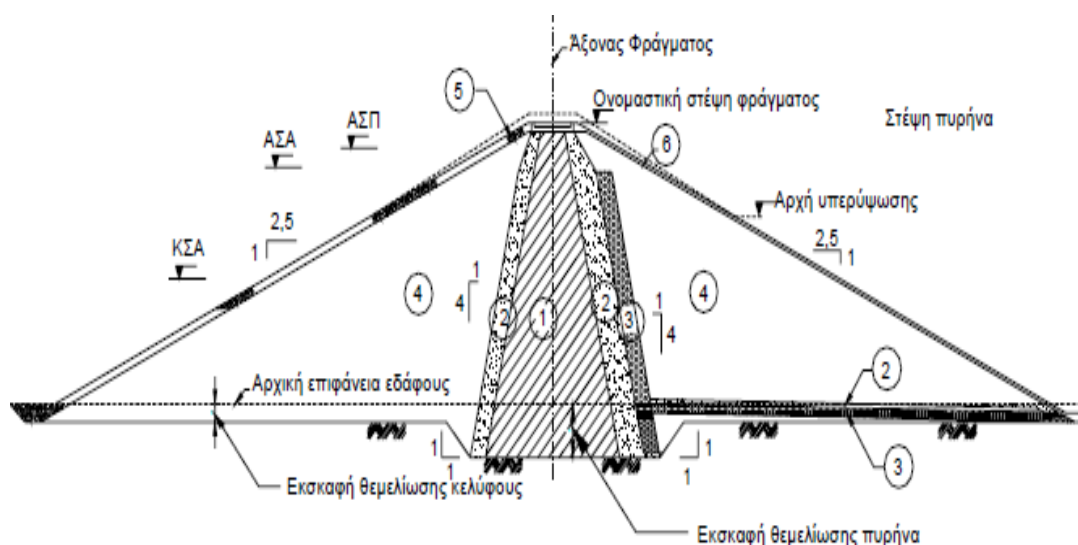
(Πηγή: <https://kids.britannica.com>)

### **2.1.2. Εύκαμπτα φράγματα- Χωμάτινα**

Αυτού του είδους τα φράγματα κατασκευάζονται όταν το έδαφος θεμελίωσης, δεν προσφέρεται για την κατασκευή τσιμεντένιου φράγματος, οποιουδήποτε τύπου, λόγω χαμηλής αντοχής των πετρωμάτων στην θέση του φράγματος. Κατασκευάζονται δηλαδή, εκεί όπου οι γεωμηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι χαμηλές και μπορούν να δεχτούν καθιζήσεις ακόμα και

διαφορικές, κατά και μετά την κατασκευή, μιας και τα αντερείσματα μπορούν να προσαρμοστούν σε μικρές μετατοπίσεις χωρίς θραύση. Βασικό κριτήριο σχεδιασμού αποτελεί η βέλτιστη αξιοποίηση των υλικών που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή ή πλησίον του έργου. Αποτελούν τον πιο κοινό τύπο φραγμάτων, καθώς η κατασκευή τους αποτελείται από γαιώδη υλικά στην φυσική τους κατάσταση, κάτι που κάνει τον σχεδιασμό τους οικονομικό. Συνήθως, αυτού του τύπου τα φράγματα έχουν αργιλικό πυρήνα, ενώ διακρίνονται σε χωμάτινα ή λιθόρριπτα, ανάλογα με το υλικό που έχουν στο σώμα του φράγματος. Το μήκος τους μπορεί να φτάσει μέχρι και πολλά χιλιόμετρα.

Τα φράγματα αυτά συνήθως αποτελούνται από τα μέρη που φαίνονται στην Εικόνα 2.7 και αναλύονται παρακάτω:



**Εικόνα 2.7:** Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεντρικό πυρήνα

(Πηγή: Μουτάφης, 2009)

- **Ζώνη1-Πυρήνας:** Ο πυρήνας αποτελείται από υλικό χαμηλής διαπερατότητας και υψηλού ποσοστού λεπτόκοκκου κλάσματος, ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα του φράγματος. Συνήθως, χρησιμοποιείται αργιλικό υλικό για την συμπύκνωση του πυρήνα, υλικό που συμπυκνώνεται δύσκολα. Λόγω του υψηλού κόστους του υλικού του

πυρήνα, επιδιώκεται η ζώνη αυτή να κατασκευάζεται όσο το δυνατόν πιο λεπτή.

- Ζώνη 2-Φίλτρα: Τα φίλτρα αποτελούνται από αμμώδη διαβαθμισμένα υλικά και σκοπό έχουν την αποφυγή της υδραυλικής διάβρωσης, από την κίνηση του διηθούμενου νερού διαμέσου του φράγματος (κατάντη φίλτρο). Ακόμα, τα φίλτρα εμφράσσουν τυχόν αναπτυσσόμενες ρωγμές του πυρήνα, ώστε να αποφευχθεί η ροή του νερού διαμέσω του πυρήνα (ανάντη φίλτρο).
- Ζώνη 3-Στραγγιστήρια ή μεταβατικές ζώνες: Τα στραγγιστήρια αποτελούνται από καθαρά χαλίκια και κροκάλες και έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν από το ανάχωμα του φράγματος τα διηθούμενα νερά μέσα από τον πυρήνα, τη θεμελίωση και το κατάντη κέλυφος, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος ανάπτυξης πιέσεων.
- Ζώνη 4-Κελύφη: Αποτελούνται από υλικά με αντοχή υψηλότερη από τα υλικά του πυρήνα (π.χ. αμμοχάλικα ποταμών, πλευρικά κορήματα, προϊόντα εκσκαφών, λιθορροπές) και στηρίζουν τον πυρήνα αποτελώντας το κυρίως σώμα του φράγματος.
- Ζώνη 5-Λιθορριπή προστασίας ανάντη πρανούς: Προστατεύει το ανάντη πρανές του αναχώματος από τη διαβρωτική καταπόνηση των κυματισμών που αναπτύσσονται στον ταμιευτήρα. Η ζώνη αυτή κατασκευάζεται από λίθους κατάλληλων διαστάσεων ώστε να μη μετακινούνται από τις ωθήσεις των κυματισμών.
- Ζώνη 6-Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς: Προστατεύει το κατάντη πρανές του αναχώματος από την διαβρωτική ενέργεια του νερού της βροχής και κυρίως των ρυακιών που σχηματίζονται. Χρησιμοποιούνται κροκάλες ή λίθοι, με απαιτήσεις μέγιστης, μέσης και ελάχιστης διάστασης.

Τέλος, δεν μπορεί να παραληφθεί η θεμελίωση που αν και δεν αποτελεί μέρος του φράγματος, πάνω σε αυτή στηρίζεται το φράγμα και είναι απαραίτητο να παρέχει ανθεκτική στήριξη στο επίχωμα για όλες τις συνθήκες διάβρωσης και φόρτισης, καθώς επίσης και επαρκή αντίσταση στην διήθηση του ύδατος για την αποφυγή απώλειας μεγάλης ποσότητας ύδατος. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 40% της αστοχίας όλων των χωμάτων φραγμάτων και το 12% όλων των θραύσεων οφείλονται στην αστοχία της θεμελίωσης.

Στην συνέχεια αναφέρονται κάποια στοιχεία για τα χωμάτινα φράγματα με αργιλικό πυρήνα και για τα χωμάτινα –λιθόρριπτα με αργιλικό πυρήνα.

- **Χωμάτινα με αργιλικό πυρήνα**

Τα φράγματα αυτά αποτελούνται από προϊόντα εκσκαφής εδαφικού υλικού, αμμοχάλικα ποταμών, ή ακόμα και πλευρικά κορήματα. Τα υλικά αυτά διατηρούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, ενώ αντλούν την αντοχή τους από την τοποθέτηση, τον συντελεστή εσωτερικής τριβής και την συνάφεια τους. Ωστόσο, παρά την συμπύκνωση τους, αφήνουν κενά ανάμεσα στους κόκκους, δημιουργώντας έτσι μια εύπλαστη και εύκαμπτη μάζα η οποία μπορεί να δημιουργήσει ελαφρές υποχωρήσεις στο έδαφος στο οποίο θεμελιώνεται, χωρίς όμως να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής. Ο πυρήνας, δηλαδή το εσωτερικό της διατομής του φράγματος, αποτελείται συνήθως από υψηλής πλαστιμότητας άργιλο, δημιουργώντας ένα αδιαπέρατο στρώμα στην θέση αυτή. Το σχήμα τους συνήθως είναι τραπεζοειδές, κάτι που σε συνδυασμό με το βάρος τους ισορροπεί την υδροστατική πίεση των υδάτων. Επιτυγχάνεται λοιπόν στατική λειτουργία παρόμοια με τα φράγματα βαρύτητας.



**Εικόνα 2.8:** Χωμάτινο φράγμα- Mica dam/Canada

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

- **Χωμάτινα- λιθόρριπτα με αργιλικό πυρήνα**

Τα φράγματα αυτά αποτελούν προϊόντα εκσκαφής λατομείου ή εκσκαφής/απόθεσης βράχου. Κατασκευάζονται ως ανάχωμα με λίθους διαφόρων μεγεθών στο σώμα τους, ώστε να επιτυγχάνεται η σταθερότητα της ανάντη αδιαπέρατης ζώνης. Οι λίθοι αυτοί θα πρέπει να έχουν ακανόνιστο σχήμα, ενώ ιδανικά θα πρέπει να είναι και ομοιόμορφου μεγέθους. Αυτό διότι με την ύπαρξη χαλικιών ή λεπτότερων κόκκων ανάμεσα στους λίθους, τα υλικά αυτά θα υποχωρήσουν μεταξύ των λίθων μεγαλύτερου μεγέθους, κάτι που θα έχει σαν αποτέλεσμα την αστάθεια όλης της κατασκευής. Η λιθορριπή συνήθως τοποθετείται κατά στρώσεις, κάθε μία πάχους της τάξεως του ενός μέτρου και κάθε μία συμπιέζεται με δονητή. Ο πυρήνας, όπως και στα χωμάτινα φράγματα, αποτελείται από συμπυκνωμένη υψηλής πλαστιμότητας άργιλο.





**Εικόνα 2.9:** Χωμάτινο-Λιθόρριπτο φράγμα Damghan Reservoir Dam/Iran

(Πηγή: <http://www.bamrahco.com>)

## 2.2. Οφέλη από την κατασκευή φραγμάτων

Το νερό αποτελεί το βασικό συστατικό για την επιβίωση του ανθρώπου, καθώς ο άνθρωπος στα  $\frac{3}{4}$  του αποτελείται από αυτό, κάτι που το καθιστά το πολυτιμότερο αγαθό για αυτόν. Επίσης, είναι γεγονός ότι η Γη στο 70% αποτελείται από νερό. Ωστόσο, αυτό είναι στην πλειονότητα του νερό των ωκεανών, κάτι που σημαίνει ότι δεν είναι πόσιμο και μόνο το 3% από αυτό είναι γλυκό νερό, το οποίο και αυτό δεν είναι όλο άμεσα αξιοποιήσιμο από τον άνθρωπο, γιατί είναι εγκλωβισμένο σε παγόβουνα ή πρόκειται για υπόγεια ύδατα. Έτσι περισσεύει μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό του παγκόσμιου νερού το οποίο ο άνθρωπος μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του (της τάξης του 0,3%). Επομένως, είναι εύκολα κατανοητό ότι υπάρχει αναγκαιότητα όσον το δυνατόν καλύτερης αξιοποίησης του νερού αυτού από τον άνθρωπο.

Για τον λόγο αυτό ήδη από τα προϊστορικά χρόνια, ο άνθρωπος, κατανοώντας το πρόβλημα, δημιούργησε τα πρώτα φράγματα ώστε να μπορέσει να αξιοποιήσει όσο το δυνατόν καλύτερα το διαθέσιμο νερό. Τα πρώτα φράγματα κατασκευάστηκαν με σκοπό την αποταμίευση του νερού για την ύδρευση των πόλεων, την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, καθώς και την

προστασία από πλημμύρες, μέσα από την ρύθμιση της παροχής του νερού. Αυτές τις ανάγκες τις εξυπηρετούν ακόμη και σήμερα, ενώ λόγω της ανάπτυξης της επιστήμης και της μεγαλύτερης τεχνολογίας που υπάρχει στις μέρες μας, προστέθηκαν και άλλα οφέλη από την χρήση των φραγμάτων, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

Αρχικά, τα φράγματα **εξυπηρετούν την ύδρευση μιας περιοχής**. Το νερό αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα αυτών, ο οποίος λειτουργεί σαν δεξαμενή που μπορεί να παρέχει νερό στον άνθρωπο όποτε το χρειάζεται στον προσωπικό του χώρο με το άνοιγμα μιας βρύσης. Αυτό συμβαίνει σε περιόδους χαμηλής ροής του νερού, όταν οι φυσικές ροές είναι ανεπαρκείς για να καλύψουν τις ανάγκες του ανθρώπου σε νερό.

Ύστερα **εξυπηρετούν την άρδευση μιας περιοχής**, καθώς σε περιοχές με ξηρό κλίμα για μεγάλο χρονικό διάστημα, το έδαφος γίνεται τόσο ξηρό ώστε να περιορίζει την ανάπτυξη της βλάστησης. Με τα φράγματα δημιουργείται ένα σύστημα σταθερής ροής του νερού που εξυπηρετεί το πότισμα της γης. Το νερό άρδευσης αποθηκεύεται σε δεξαμενές κατά την διάρκεια της εποχής των βροχών, ενώ σε εποχή ξηρασίας μπορεί να απελευθερωθεί από την δεξαμενή και να διανεμηθεί στην γη μέσω ενός συστήματος καναλιών.

Επιπλέον, στις μέρες μας έχουν κατασκευαστεί φράγματα που μπορούν να **παράγουν υδροηλεκτρική ενέργεια**. Η υδροηλεκτρική ενέργεια, είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση και τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής του στροβίλου, μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια, με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο μέσω της γεννήτριας επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αποθήκευση ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες για ένα υδροηλεκτρικό φράγμα ισοδυναμεί πρακτικά με αποταμίευση υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η προγραμματισμένη αποδέσμευση αυτών των ποσοτήτων ύδατος και η εκτόνωσή τους στους υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδάτινων πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις, η υδροηλεκτρική ενέργεια καθίσταται μια σημαντικότερη εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας με μηδενικό κόστος καυσίμου και μηδενικές εκπομπές ρύπων. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ώρες ανάγκης (π.χ. σε μια διακοπή ρεύματος), κλπ.

Ένα άλλο όφελος που προκύπτει από την κατασκευή των φραγμάτων, είναι η **αντιπλημμυρική προστασία** που αυτά παρέχουν. Το νερό από το χιόνι και τις βροχοπτώσεις, θα βρει το δρόμο του σε ρέματα και ποτάμια και τελικά στη θάλασσα. Μετά από έντονες καταιγίδες, έντονο χιόνι ή βροχή κατά τη διάρκεια αρκετών ημερών, η στάθμη του νερού στα ποτάμια μπορεί να αυξηθεί δραματικά. Αν το νερό φτάσει να ρέει πάνω από τις όχθες του ποταμού, μπορεί να προκληθούν ζημιές, όπως πλημμύρες της γεωργικής γης, της ιδιοκτησίας και στην χειρότερη περίπτωση απώλεια ζωής. Μια δεξαμενή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ποσότητας νερού που ρέει σε ένα ποτάμι μετά από έντονη βροχόπτωση. Η στάθμη του νερού στη δεξαμενή διατηρείται χαμηλή κατά τη διάρκεια των περιόδων βροχόπτωσης του έτους. Όταν συμβαίνει έντονη βροχή, μέρος του νερού καταλήγει στην δεξαμενή του φράγματος. Όταν η δεξαμενή είναι υπερβολικά γεμάτη, το νερό πλημμυρών μπορεί να περάσει κατάντη πάνω από έναν υπερχειλιστή.

Ακόμα, σημαντική είναι και η **ανάπτυξη νέων υγροτόπων και η ανάπτυξη του οικοτουρισμού**, μέσα από τη δημιουργία των φραγμάτων. Οι υγρότοποι έχουν τεράστια περιβαλλοντική σημασία, καθώς, μεταξύ άλλων, αποτελούν ενδιαιτήματα σπανίων ειδών χλωρίδας και πανίδας και συμβάλλουν στην αειφόρο ανάπτυξη και την περιβαλλοντική ισορροπία. Έτσι, μπορεί να αναπτυχθεί ο οικοτουρισμός, αφού μια περιοχή με περιβαλλοντικό ενδιαφέρον θα προσελκύσει τους τουρίστες.

Τέλος, ένα ακόμα όφελος από την κατασκευή των φραγμάτων, που αξίζει να αναφερθεί, είναι το γεγονός ότι οι συνθήκες που υπάρχουν μέσα στον ταμιευτήρα, ευνοούν την **ανάπτυξη πλαγκτόν**, κάτι που θα προσελκύσει τα

ψάρια, ευνοώντας έτσι την ανάπτυξη ιχθυοκαλλιεργειών, όπως και της αλιείας στην περιοχή.



**Εικόνα 2.10:** Σπάνιο είδος χλωρίδας σε υγρότοπο  
(Πηγή: <http://www.wwf.gr>)



**Εικόνα 2.11:** Σπάνιο είδος πανίδας σε υγρότοπο  
(Πηγή: <http://www.wwf.gr>)

## 2.3. Αρνητικά από την κατασκευή των φραγμάτων

Παρόλα τα οφέλη που προκύπτουν από την κατασκευή των φραγμάτων, υπάρχουν και πολύ αρνητικές συνέπειες από τη δημιουργία τους, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχικά, αρνητική συνέπεια από την κατασκευή φραγμάτων αποτελεί η **αλλοίωση του φυσικού τοπίου**, καθώς με ένα τέτοιο ογκώδες και μερικές φορές άκομψο οικοδόμημα και την ύπαρξη τσιμέντου στην φύση, αλλοιώνεται το φυσικό τοπίο και η φυσική ομορφιά του περιβάλλοντος.

Ακόμα, πολύ σοβαρή συνέπεια αποτελεί η **μεταβολή της χλωρίδας και της πανίδας της περιοχής**. Όσον αφορά την χλωρίδα, μεγάλο μέρος της χερσαίας βλάστησης της περιοχής του φράγματος συχνά καταστρέφεται, καθώς για την κατασκευή απαιτείται να χρησιμοποιηθεί μεγάλη έκταση γης, στην οποία μπορεί να υπάρχουν δάση, πράσινο και καλλιεργούμενες γεωργικές εκτάσεις. Όσον αφορά την υδρόβια βλάστηση, σε αυτή δημιουργούνται προβλήματα από την κατασκευή του φράγματος, καθώς οι αλλαγές στη θερμοκρασία, τη χημική σύνθεση, τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου και τις φυσικές ιδιότητες μιας δεξαμενής, συχνά δεν είναι κατάλληλες για τα υδρόβια φυτά και τα ζώα που εξελίχθηκαν με ένα δεδομένο σύστημα ποταμών. Ακόμα, φυτοφάρμακα και τοξικά μέταλλα απελευθερώνονται στους ποταμούς, τα οποία συμπυκνώνονται στους οργανισμούς και έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην τροφική αλυσίδα. Για την πανίδα, όσον αφορά τα ψάρια επηρεάζονται από την μεταβολή της χλωρίδας όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ η μεταβολή της κοίτης του ποταμού μειώνει τον οικότοπο για τα ψάρια που εκτρέφονται στον πυθμένα. Έτσι αυτά ή φεύγουν και πάνε αλλού, ή εξαφανίζονται λόγω των αλλαγών. Ακόμα έχουν σημειωθεί εξαφανίσεις πτηνών λόγω των κλιματικών αλλαγών, ενώ είναι γεγονός και ότι δημιουργούνται προβλήματα στην διέλευση των χερσαίων ζώων λόγω της μεγάλης κατασκευής που υπάρχει στον δρόμο τους.

Ακόμα, συχνή είναι η **συσσώρευση φερτών υλικών στον πυθμένα**, του οποίου το χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη χονδρόκοκκου υλικού. Οργανισμοί που είναι συνηθισμένοι να επιβιώνουν ανάμεσα στο χονδρόκοκκο υλικό,

κατακλύζονται από λάσπη και εξαφανίζονται. Ακόμα, η εισροή φερτών υλικών στον ταμιευτήρα περιλαμβάνει νερό, φορτίο σε αιώρηση και φορτίο κοίτης. Έτσι δημιουργούνται δύο βασικά προβλήματα, απώλεια ωφέλιμου όγκου και λειτουργικότητα της εξόδου του πυθμένα (φράξιμο του εκκενωτή πυθμένα).

Επίσης, επιφέρονται **αλλαγές στο μικροκλίμα της περιοχής**, αφού επηρεάζεται το ετήσιο βροχομετρικό ύψος, ενώ επιφέρονται αλλαγές στην ταχύτητα και στην διεύθυνση των ανέμων. Ακόμα, τοπικές κλιματολογικές αλλαγές έχουν σημειωθεί, με χαρακτηριστικά παραδείγματα την αύξηση της υγρασίας στην περιοχή, λόγω της αυξημένης εξάτμισης στην επιφάνεια της λίμνης και την έκλυση αερίων διοξειδίου του άνθρακα ή και μεθανίου από τη σήψη οργανικών υλών στους ταμιευτήρες.

Επιπλέον, ορατός είναι και ο **κίνδυνος τοπικών σεισμών** λόγω της κατασκευής ενός φράγματος, γιατί συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες νερού και υλικών εξαιτίας του φράγματος, κάτι το οποίο αυξάνει το φορτίο και ως επακόλουθο επιβαρύνεται ο πυθμένας του ποταμού σε μεγάλο βαθμό και αυξάνεται η μικροσεισμική δραστηριότητα.

Επίσης, πολλές φορές γίνονται **αναγκαστικές μετακινήσεις πληθυσμών** και εν συνεχεία καταστροφή οικισμών, αν η θέση στην οποία βρίσκονται είναι η κατάλληλη για την κατασκευή του φράγματος, σύμφωνα με τους μελετητές.

Επιπρόσθετα, το νερό που συγκεντρώνεται στον ταμιευτήρα, λόγω του ότι μπορεί να έχει μαζευτεί πολύ καιρό πριν την χρησιμοποίησή του, **συσσωρεύονται νιτρικά άλατα και ρυπογόνες ουσίες**, κάνοντάς το πολλές φορές επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία.

Τέλος, τρομακτικές θα είναι οι συνέπειες σε μια **πιθανή αστοχία** μιας τέτοιας κατασκευής, αφού μπορούν να προκληθούν απώλειες σε ανθρώπινες ζωές, ανεπανόρθωτα προβλήματα στο περιβάλλον, όπως και καταστροφή κινητής και ακίνητης περιουσίας.

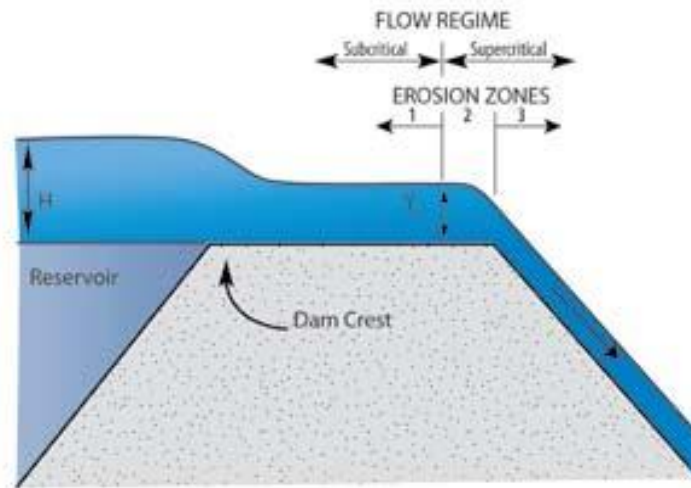
## 2.4. Βλάβες και ευπάθεια φραγμάτων

### 2.4.1. Αίτια αστοχίας φραγμάτων

Οι περισσότερες αστοχίες φραγμάτων λαμβάνουν χώρα μέσα στα 10 πρώτα χρόνια από την κατασκευή τους και κυρίως τον πρώτο. Στα φράγματα σκυροδέματος, συνηθισμένα είναι τα προβλήματα θεμελίωσης, με την εσωτερική διάβρωση να οφείλεται για την αστοχία αυτού του τύπου φραγμάτων σε ποσοστό 21%, ενώ η ανεπαρκής αντοχή οδηγεί και αυτή σε αστοχία αυτού του τύπου τα φράγματα σε ποσοστό 21%. Από την άλλη, όσον αφορά τα χωμάτινα φράγματα, οι κύριες αιτίες αστοχίας είναι αρχικά η υπερχειλίση του ταμιευτήρα σε ποσοστό 31%, στην συνέχεια η εσωτερική διάβρωση στο στόμιο σε ποσοστό 15% και η εσωτερική διάβρωση στην θεμελίωση σε ποσοστό 12% (ICOLD, 1995). Παρακάτω, παρουσιάζονται τα κυριότερα αίτια αστοχίας που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα φράγμα.

- **Υπερχειλίση του ταμιευτήρα**

Η υπερχειλίση του ταμιευτήρα συμβαίνει όταν το επίπεδο του νερού της δεξαμενής ξεπεράσει την χωρητικότητα του ταμιευτήρα ή το ύψος του φράγματος. Η υπερχειλίση του ταμιευτήρα οφείλεται σε ανεπαρκή σχεδιασμό του υπερχειλιστή, ο οποίος, εάν είναι μικρός, ειδικά σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης, μπορεί να ξεχειλίσει, αφού το νερό του ταμιευτήρα αυξάνεται γρήγορα και χωρίς επαρκή προειδοποίηση. Επίσης, μπορεί να συμβεί ύστερα από κατολίσθηση στην δεξαμενή ή στην περίπτωση που καταρρεύσει το φράγμα ανάντη. Με το φαινόμενο αυτό διακινδυνεύεται η δομική ακεραιότητα του φράγματος και μπορεί να διαβρωθεί η γη κατάντη του φράγματος. Για τον λόγο αυτό αποτελεί την πιο κοινή αιτία αστοχίας, ιδίως των χωμάτινων φραγμάτων.



**Εικόνα 2.12:** Υπερχείλιση του ταμιευτήρα σε ένα θεωρητικό φράγμα

(Πηγή: <https://www.conteches.com>)



**Εικόνα 2.13:** Υπερχείλιση του ταμιευτήρα σε ένα πραγματικό φράγμα

(Πηγή: <http://damfailures.org>)



- **Εσωτερική διάβρωση**

Πολύ επικίνδυνο για τα φράγματα είναι και το φαινόμενο της εσωτερικής διάβρωσης. Εσωτερική διάβρωση είναι ο σχηματισμός κενών μέσα σε ένα έδαφος, η οποία προκλήθηκε από την απομάκρυνση του υλικού του λόγω διαρροής. Η εσωτερική διάβρωση συμβαίνει όταν οι υδραυλικές δυνάμεις που ασκούνται από το νερό που ρέει στους πόρους και στις ρωγμές του υλικού στο φράγμα ή/και στο θεμέλιο, επαρκούν για να αποσπάσουν τα σωματίδια και να τα μετακινήσουν έξω από την δομή του φράγματος. Η εσωτερική διάβρωση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη διότι δεν υπάρχουν εξωτερικές ενδείξεις ότι λαμβάνει χώρα, εκτός από κάποιες περιπτώσεις που μπορεί να εμφανιστεί άμμος, που όμως στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να κρυφτεί κάτω από το νερό. Ένα φράγμα είναι πιθανόν να αστοχήσει λίγες ώρες μετά την εμφάνιση της εσωτερικής διάβρωσης, αφού είναι ένα φαινόμενο που διαδίδεται πολύ γρήγορα.



**Εικόνα 2.14:** Προβλήματα εσωτερικής διάβρωσης

(Πηγή: Χουσιαδάς, Αγγίσταλης)

- **Προβλήματα στην θεμελίωση**

Τα προβλήματα στην θεμελίωση αποτελούν άλλη μια σημαντική αιτία αστοχίας των φραγμάτων, ιδίως του σκυροδέματος. Αυτά συμβαίνουν όταν το βάρος του φράγματος, το οποίο ασκεί δύναμη πάνω στο έδαφος στο οποίο θεμελιώνεται, δεν λαμβάνεται σωστά υπόψη κατά την κατασκευή του φράγματος και έτσι είναι πιθανόν να μοιραστεί άνισα στο έδαφος και να υπονομεύσει το θεμέλιο. Επίσης, όταν ένα φράγμα είναι χτισμένο πάνω σε μια πλαγιά με κλίση, είναι απαραίτητο να είναι σωστά δομημένο, αλλιώς θα προκύψουν αστάθειες και κατολισθήσεις. Ακόμα, οποιοδήποτε φυσικό φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει την κίνηση της θεμελίωσης, όπως για παράδειγμα ο σεισμός, μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την κατασκευή. Η υψηλή πίεση ανύψωσης και η ανεξέλεγκτη διήθηση των θεμελίων μπορούν επίσης να οδηγήσουν το θεμέλιο του φράγματος στην αστοχία.

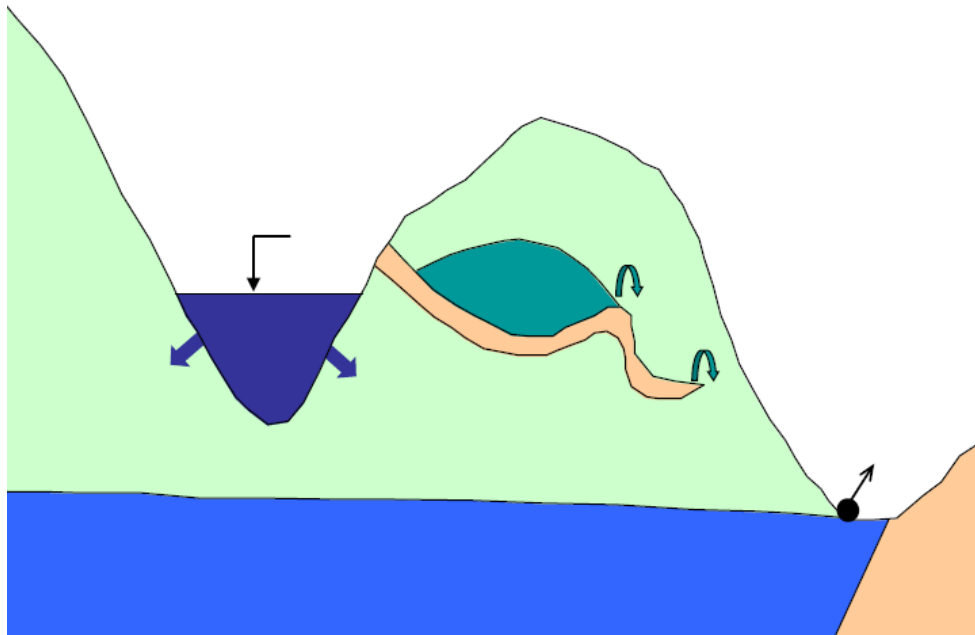


**Εικόνα 2.15:** Αστοχία λόγω προβλημάτων θεμελίωσης

(Πηγή: <http://www.theengineeringcommunity.org>)

- Διασωλήνωση και διαρροή

Ένα ακόμα σημαντικό πρόβλημα για τα φράγματα αποτελεί η διασωλήνωση του φράγματος. Αποτελεί το φαινόμενο που εμφανίζεται ως προοδευτική ανάπτυξη της εσωτερικής διάβρωσης με διαρροή και εμφανίζεται στα κατάντη του φράγματος, ως τρύπα που εκχέει νερό.



**Εικόνα 2.16:** Προοδευτική ανάπτυξη διασωλήνωσης και διαρροής σε φράγμα

(Πηγή: Μαρίνος)

Αυτό οφείλεται στην διάβρωση, που δημιουργείται στο φράγμα λόγω της παρουσίας του νερού. Έτσι η θεμελίωση ή/και το σώμα του φράγματος μπορεί να εξασθενίσουν, αν περάσει νερό και τα διαβρώσει, προκαλώντας ανεπανόρθωτα προβλήματα στο φράγμα. Διασωλήνωση είναι δυνατόν να προέλθει και από τις τρύπες που ανοίγουν τα ζώα κατά μήκος των υδραυλικών κατασκευών και την δημιουργία διαρροών σε αγωγούς και σε ρωγμές. Αυτού του τύπου η αστοχία αφορά περισσότερο τα χωμάτινα φράγματα.



**Εικόνα 2.17:** Διασωλήνωση λόγω διαρροής σε φράγμα

(Πηγή: <https://www.fs.fed.us>)

- **Σεισμός**

Σημαντικό πρόβλημα για τα φράγματα αποτελεί και ο σεισμός. Τα φράγματα είναι σχεδιασμένα να αντέχουν σε συγκεκριμένο μέγεθος σεισμού, ανάλογα και την σεισμικότητα της περιοχής που χωροθετείται το φράγμα, κάνοντας κατανοητό ότι αν ξεπεραστεί ο σεισμός αυτός, μπορεί να προκληθούν σοβαρά προβλήματα. Ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει σε ένα φράγμα ρηγματώσεις, καθιζήσεις, μετακινήσεις και ρευστοποιήσεις και να δημιουργήσει κάποια φαινόμενα τα οποία, αν δεν προληφθούν εγκαίρως, μπορεί να οδηγήσουν ακόμα και σε αστοχία του φράγματος.

- **Κατασκευαστικά λάθη**

Τα κατασκευαστικά λάθη είναι άλλη μια κοινή αιτία βλαβών στα φράγματα. Αυτά εμφανίζονται όταν δεν ενσωματώνονται βασικοί παράγοντες στον σχεδιασμό και στην κατασκευή των φραγμάτων. Για παράδειγμα, οι αυξημένες

καθιζήσεις, οι εσωτερικές διαβρώσεις και οι μεγάλες διαρροές, είναι αποτέλεσμα της ανεπαρκούς συμπίκνωσης των υλικών ή της χρήσης λανθασμένου τύπου υλικών κατά την κατασκευή του φράγματος.

- **Αστοχία πρανών**

Πολύ σοβαρή είναι και η αστοχία των πρανών που μπορεί να εμφανιστεί στα φράγματα. Προκαλείται όταν οι οριζόντιες δυνάμεις που επενεργούν στη βάση του φράγματος, ξεπεράσουν την αντίσταση της τριβής που παράγεται μεταξύ του σώματος του φράγματος και του θεμελίου. Αυτή συχνά οφείλεται στην ελλιπή συμπίκνωση των υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στο φράγμα και σε πολύ λεπτόκοκκα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή αυτή. Η αστοχία πρανούς στα κατάντη του φράγματος είναι ικανή να προκαλέσει αστοχία, κάτι που δεν συμβαίνει με την αστοχία πρανούς στα ανάντη τμήματα του φράγματος, αφού προκαλείται όταν το επίπεδο του νερού του ταμιευτήρα είναι πολύ χαμηλά.



**Εικόνα 2.18:** Φράγμα μετά από ολίσθηση πρανούς

(Πηγή: <http://interactives.dallasnews.com>)

- **Ρωγμές λόγω διαφορικών καθιζήσεων**

Σημαντικό πρόβλημα για τα φράγματα αποτελούν και οι ρωγμές στο εσωτερικό του σώματος τους. Συνήθως αυτές είναι αποτέλεσμα διαφορικών καθιζήσεων, ενώ μπορεί να υπάρχουν στο εσωτερικό του φράγματος, χωρίς αλλαγή στην συμπεριφορά αυτού. Ωστόσο, αν δεν εντοπιστούν έγκαιρα, μπορούν να δημιουργηθούν σοβαρά προβλήματα και το φράγμα να οδηγηθεί μέχρι και στην αστοχία.



**Εικόνα 2.19:** Ρωγμή σε φράγμα

(Πηγή: <http://www.ens-newswire.com>)

- **Ανεπαρκής συντήρηση**

Μια άλλη αιτία πρόκλησης προβλημάτων στα φράγματα είναι η κακή συντήρηση. Τα φράγματα απαιτούν τακτική συντήρηση ώστε να εξασφαλίζεται ότι είναι ασφαλή για τους πολίτες που ζουν στην περιοχή, αλλά και για το περιβάλλον. Οι διεθνείς κανονισμοί για την ασφάλεια και την συντήρηση των φραγμάτων απαιτούν οι τακτικές επιθεωρήσεις και διαδικασίες συντήρησης να διεξάγονται από ειδικευμένους επαγγελματίες. Η απουσία τέτοιων τακτικών

ελέγχων στα φράγματα μπορεί να οδηγήσει σε εξασθένηση των φραγμάτων και σε επακόλουθη αστοχία της κατασκευής.

## 2.4.2. Περιστατικά αστοχίας φραγμάτων

### **Φράγμα Malpasset (Γαλλία, 1959)**

Το φράγμα Malpasset, ήταν ένα τοξωτό φράγμα σκυροδέματος στην περιοχή Ριβιέρα των Καννών, στην Νότια Γαλλία. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1952 και ολοκληρώθηκε το 1954, ενώ σκοπός του ήταν να εξυπηρετήσει τις ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής. Αυτό είχε ύψος 60 μέτρων, πλάτος 222 μέτρα και πάχος 6,78 μέτρα στην βάση και 1,5 μέτρο στην στέψη. Το φράγμα αστόχησε στις 2 Δεκεμβρίου του 1959, ύστερα από αρκετές μέρες ισχυρών βροχοπτώσεων και ανέμων στην περιοχή. Λόγω των φαινομένων αυτών, η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα είχε φτάσει στο μέγιστο επίπεδο. Έτσι ο υπεύθυνος μηχανικός, αποφάσισε το άνοιγμα του εκκενωτή πυθμένα, για να αποφευχθεί η υπερχειλίση του ταμιευτήρα. Το φράγμα αστόχησε 3 ώρες μετά το άνοιγμα του εκκενωτή πυθμένα, κάτι που προκλήθηκε από την εκτίναξη της βραχοσφήνας στο αριστερό αντέρεισμα, η οποία κατέστρεψε άμεσα το μισό φράγμα, απελευθερώνοντας καταστροφικό πλημμυρικό κύμα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τον θάνατο 421 ανθρώπων, αφού οι προσπάθειες διάσωσης δεν είχαν αποτέλεσμα, λόγω της έλλειψης πρόσβασης στις πλημμυρισμένες οδούς της πόλης και στις οδούς πρόσβασης.



**Εικόνα 2.20:** Το φράγμα Malpasset πριν την αστοχία  
(Πηγή:<http://damfailures.org>)



**Εικόνα 2.21:** Το φράγμα Malpasset μετά την αστοχία  
(Πηγή:<https://en.wikipedia.org>)



Μια σειρά ελλείψεων θεμελίωσης και η ανθρώπινη αβλεψία οδήγησαν στα ζητήματα αστάθειας στο φράγμα Malpasset. Πριν την κατασκευή του φράγματος είναι γεγονός ότι δεν δόθηκε η πρέπουσα σημασία στην ανάλυση της γεωλογίας της θεμελίωσης, πάνω στην οποία θα κατασκευαζόταν το φράγμα. Οι γεωλογικές έρευνες που έγιναν μετά την αστοχία έδειξαν ότι είχε κατασκευαστεί πάνω σε σχηματισμό γνευσίου, με σχιστότητα διεύθυνσης προς τα κατάντη και προς το δεξιό αντέρεισμα, με γωνία κλίσης 30 με 50 μοίρες. Επιπλέον, βρέθηκε παρουσία ρήγματος που δεν είχε εντοπιστεί κατάντη του άξονα, που σε συνδυασμό με τις επιφάνειες σχιστότητας δημιουργούσε δίεδρο (βραχοσφήνα), στη μάζα του γνευσίου στο αριστερό αντέρεισμα στον άξονα του φράγματος. Επίσης, η απουσία αποστραγγιστικών έργων κάτω από το φράγμα για την ανακούφιση των υπόγειων υδροστατικών πιέσεων, οδήγησε στην αύξησή τους, εξαιτίας της μικρής διαπερατότητας του γνευσίου. Ακόμα, η ζώνη του ρήγματος περιείχε αργιλικό υλικό πλήρωσης. Η συμπίεση εξαιτίας του βάρους του φράγματος και του ταμιευτήρα, λόγω και της συμπίεστος του αργιλικού υλικού, δημιούργησε ρωγμές εφελκυσμού ανάντη του φράγματος. Έτσι, προέκυψε άμεση υδραυλική σύνδεση του ταμιευτήρα με τον υπόγειο χώρο θεμελίωσης και αύξηση των υπόγειων υδροστατικών πιέσεων, λόγω μείωσης της διαπερατότητας κατάντη του έργου.

### **Φράγμα Teton (ΗΠΑ, 1978)**

Το φράγμα Teton ήταν ένα χωμάτινο φράγμα στον ποταμό Teton, στο Idaho των ΗΠΑ. Ήταν ένα φράγμα πολλαπλών χρήσεων, το οποίο εξυπηρετούσε τις ανάγκες της περιοχής σε άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία και ηλεκτρική ενέργεια, με μέγιστη χωρητικότητα του ταμιευτήρα 356.000.000 κυβικά μέτρα. Η κατασκευή του φράγματος ξεκίνησε το 1972 και ολοκληρώθηκε το 1976.

Στις 5 Ιουνίου του 1976 το φράγμα αστόχησε. Στις 7:30 π.μ. εκείνης της μέρας, εμφανίστηκε μια λασπώδης διαρροή που είχε δημιουργηθεί στην κατάντη όψη του φράγματος, υποδηλώνοντας ότι βρίσκονται ιζήματα στο νερό, ωστόσο οι μηχανικοί θεώρησαν ότι δεν υπάρχει πρόβλημα. Μέχρι τις 9:30 π.μ., η κατάντη όψη του φράγματος είχε αναπτύξει ένα υγρό σημείο, που άρχισε να εκκενώνει

νερό στα 20 έως 30 κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο και το υλικό του σώματος του φράγματος άρχισε να διαβρώνεται. Έτσι, στάλθηκαν πληρώματα με μπουλντόζες για να συνδέσουν την διαρροή. Τα πληρώματα αναγκάστηκαν να φύγουν, παρατώντας μάλιστα τον εξοπλισμό τους, γιατί η διαρροή είχε διευρυνθεί και δεν μπορούσαν να κάνουν τίποτα. Στις 11:15 π.μ., αποφασίστηκε να εκκενωθεί η ευρύτερη περιοχή. Στις 11:55 π.μ. η κορυφή του φράγματος χαλάρωσε και κατέρρευσε στην δεξαμενή. Δύο λεπτά αργότερα το υπόλοιπο του δεξιού αναχώματος του σώματος του φράγματος αποδιοργανώθηκε. Πάνω από 2000000 κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο, ύδατος γεμάτο ίζημα εκκενώθηκε μέσω της διαρροής. Μέχρι τις 8:00 μ.μ., η δεξαμενή είχε αδειάσει, αν και εκτός της διαρροής που είχε ανοίξει στο σώμα του φράγματος, το υπόλοιπο φράγμα παρέμενε στάσιμο. Η αστοχία του φράγματος αυτού είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 11 ανθρώπων, ενώ προκλήθηκαν τεράστιες ζημιές στο περιβάλλον και στην κινητή και ακίνητη περιουσία των κατοίκων της περιοχής.

Ύστερα από εκτεταμένες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν για τα αίτια της αστοχίας, το βασικό αίτιο της αστοχίας, θεωρήθηκε η προοδευτική διάβρωση του υλικού του πυρήνα και των τάφρων του φράγματος. Αυτό ήρθε σαν αποτέλεσμα γεωλογικών παραγόντων και σχεδιαστικών αποφάσεων. Οι γεωλογικοί παράγοντες ήταν κυρίως το είδος των σχηματισμών και οι πολλαπλές ανοιχτές ασυνέχειες στη βραχομάζα των αντερεισμάτων, όπως και η μη διαθεσιμότητα καταλληλότερου υλικού για την κατασκευή του αδιαπέρατου πυρήνα. Οι σχεδιαστικές αποφάσεις ήταν η κακή σχεδίαση των διαφραγματικών τάφρων, καθώς και η απουσία μέτρων εκτόνωσης πιθανών διαρροών και αποτελεσματικής στεγανοποίησης των ασυνεχειών.

Στις εικόνες 2.22, 2.23, 2.24, 2.25, φαίνεται η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης που οδήγησε στην αστοχία το φράγμα Teton.



**Εικόνα 2.22:** Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης  
(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



**Εικόνα 2.23:** Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης  
(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



**Εικόνα 2.24:** Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης  
(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



**Εικόνα 2.25:** Η εξέλιξη του φαινομένου της διασωλήνωσης  
(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

### 2.4.3. Μηχανισμοί αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έμφαση δίνεται στα χωμάτινα φράγματα και κυρίως στην καταπόνηση τους από σεισμό. Στην ενότητα αυτήν παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αστοχίας και καταστροφών, που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα χωμάτινο φράγμα.

#### **α. Υπερχειλίση πάνω από το φράγμα και απόπλυση του υλικού (overtopping leading)**

Στην πρώτη περίπτωση της εικόνας 2.26 φαίνεται μια περίπτωση υπερπήδησης του νερού πάνω από την στέψη του φράγματος, από τα ανάντη προς τα κατόντη πρανή, με ταυτόχρονη ολίσθηση του κατόντη πρανούς, μέρος του πυρήνα, καθώς και μέρος του ανάντη πρανούς. Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διάβρωση των υλικών του φράγματος, λόγω του νερού και την αποκόλληση τους από το φράγμα. Αποτελεί την πιο κοινή αιτία αστοχίας ενός χωμάτινου φράγματος. Η υπερχειλίση του ταμιευτήρα μπορεί να προκληθεί αρχικά λόγω πλημμύρας, κατά την οποία ο υπερχειλιστής είναι μικρός και το νερό μπορεί να ξεπεράσει την στέψη του φράγματος. Ακόμα, αυτή μπορεί να προκληθεί λόγω σεισμού, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει ένα κύμα στον ταμιευτήρα και έτσι να προκληθούν κατολισθήσεις σε αυτόν.

#### **β. Διασωλήνωση και εσωτερική διάβρωση στο σώμα του φράγματος, ή το έδαφος θεμελίωσης (internal erosion and piping)**

Στην δεύτερη περίπτωση της εικόνας 2.26 φαίνεται το φαινόμενο της διασωλήνωσης, το οποίο μπορεί να συμβεί στο σώμα του φράγματος ή/και στην θεμελίωση και κατά το οποίο η παρουσία του νερού μπορεί να προκαλέσει εσωτερική διάβρωση, δημιουργώντας μια διαμήκη τομή στην μεγαλύτερη πλευρά του φράγματος, με την βοήθεια της οποίας θα περάσει νερό διαμέσω του επιχώματος, το οποίο θα βγει από έξοδο η οποία δεν είναι αποδεκτή, μαζί με εδαφικό υλικό, προκαλώντας έτσι την διαρροή του φράγματος. Αποτελεί την δεύτερη συχνότερη αιτία αστοχίας των χωμάτινων φραγμάτων, και οφείλεται στην εσωτερική διάβρωση που προκαλείται λόγω διήθησης. Η διάβρωση αυτή, ξεκινά από το κατόντη τμήμα του φράγματος και συνεχίζει προς τον

ταμιευτήρα, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτόν κανάλια ή αγωγούς κάτω από το φράγμα. Η αντίσταση του αναχώματος στο φαινόμενο της διασωλήνωσης, εξαρτάται από την πλαστιμότητα του εδαφικού υλικού, από την διαβάθμιση και από τον βαθμό συμπύκνωσης.

### **γ. Καθίζηση θεμελίωσης και εσωτερική ρηγμάτωση στον πυρήνα (embankment and foundation settlement)**

Στην τρίτη περίπτωση της εικόνας 2.26 φαίνεται το φαινόμενο της δημιουργίας ρωγμών στο εσωτερικό του φράγματος λόγω διαφορικών καθιζήσεων. Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται στο εσωτερικό του φράγματος και μπορεί να προκαλέσουν καθίζηση της θεμελίωσης λόγω της απώλειας εδαφικού υλικού. Πολλές φορές οι ρωγμές αυτές, αποτελούν την αφετηρία για την εμφάνιση φαινομένων διασωλήνωσης. Τέλος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φράγματος, δημιουργούνται διαφορετικές ρωγμές σε κάθε περίπτωση, ωστόσο τις περισσότερες φορές παρουσιάζονται παράλληλα ή εγκάρσια στον άξονα του φράγματος, ενώ μπορεί να είναι τοπικές ή να εκτείνονται σε μεγάλη απόσταση στον αδιαπέρατο πυρήνα του φράγματος.

### **δ. Αστάθεια στο κατάντη κέλυφος (instability downstream slope)**

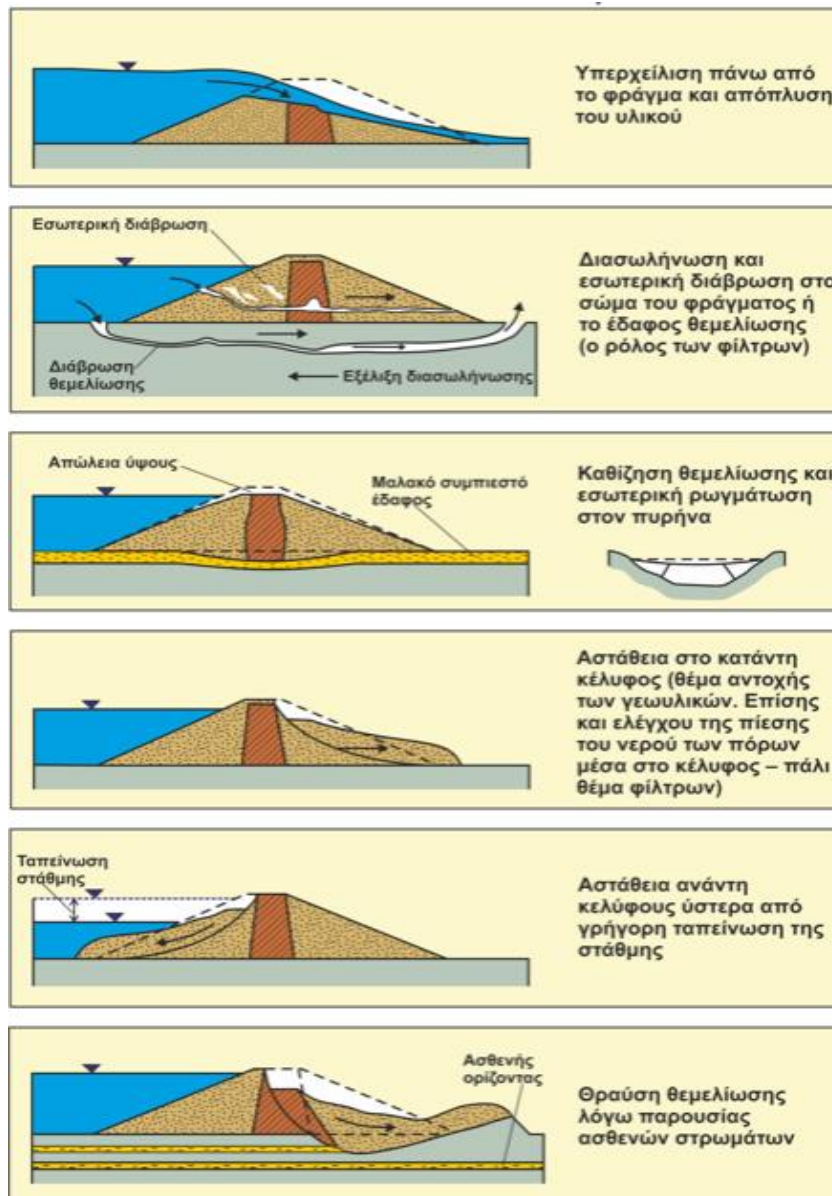
Στην τέταρτη περίπτωση της εικόνας 2.26 φαίνεται η περίπτωση της αστάθειας στα κατάντη τμήματα του φράγματος, κάτι το οποίο οφείλεται κυρίως στην χαμηλή αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται στο σώμα του φράγματος. Ακόμα, κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της πίεσης των πόρων του νερού στο σώμα του φράγματος. Η ολίσθηση στα κατάντη τμήματα του φράγματος είναι ικανή να προκαλέσει αστοχία ολόκληρης της κατασκευής.

### **ε. Αστάθεια ανάντη κελύφους (instability upstream slope)**

Στην πέμπτη περίπτωση της εικόνας 2.26 φαίνεται η περίπτωση της αστάθειας στα ανάντη τμήματα του φράγματος, που προκαλείται ύστερα από γρήγορη ταπεινωση της στάθμης του νερού. Η ολίσθηση στα ανάντη τμήματα του φράγματος δεν μπορεί να οδηγήσει στην πλήρη αστοχία του φράγματος, αφού το νερό του ταμιευτήρα είναι πολύ χαμηλό όταν προκαλείται η ολίσθηση.

**στ.Θραύση θεμελίωσης, λόγω παρουσίας ασθενών στρωμάτων  
(instability failure of downstream foundation)**

Στην έκτη περίπτωση της εικόνας 2.26 παρουσιάζεται η περίπτωση θραύσης της θεμελίωσης, λόγω της παρουσίας ασθενών στρωμάτων στο εσωτερικό αυτής, στα οποία μπορεί να προκληθεί καθίζηση και να οδηγηθεί ολόκληρο το φράγμα στην αστοχία. Αυτή συμβαίνει όταν ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή του εδάφους, ενώ μπορεί να προκαλέσει μεγάλες κατακόρυφες και εκτεταμένες παραμορφώσεις.



**Εικόνα 2.26 :** Μηχανισμοί και τύποι καταστροφών σε χωμάτινο φράγμα

(Πηγή: Χρηστάρας, Μαρίνος)

#### 2.4.4. Επιπτώσεις σεισμού στα χωμάτινα φράγματα

Ένας σεισμός μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα σε ένα χωμάτινο φράγμα, ιδιαίτερα αν το μέγεθος του δεν έχει προληφθεί από την κατασκευή του φράγματος, δηλαδή το φράγμα δεν έχει σχεδιαστεί να αντέχει σε αυτό το μέγεθος σεισμού. Τα βασικά προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει ο σεισμός στα χωμάτινα φράγματα είναι:

- **Συνίζηση στο σώμα του φράγματος:** Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει σε περίπτωση που τα υλικά στο σώμα του φράγματος δεν έχουν συμπτυκνωθεί καλά, και σαν επακόλουθο αυτού μπορεί να συμβεί ακόμα και ρευστοποίηση. Κάτι τέτοιο οφείλεται στη μείωση της αντοχής του εδαφικού υλικού που επιφέρει ένας σεισμός.
- **Συνίζηση ή ρευστοποίηση της θεμελίωσης:** Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί στην περίπτωση που η βάση πάνω στην οποία θεμελιώνεται το φράγμα αποτελείται από μαλακά και λεπτόκοκκα υλικά, λόγω της μείωσης της αντοχής του εδαφικού υλικού που επιφέρει ένας σεισμός.
- **Παραμορφώσεις στην στέψη του φράγματος:** Κάτι τέτοιο μπορεί να προκληθεί από ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού και αύξηση των αδρανειακών επιταχύνσεων στην περιοχή της στέψης του φράγματος, κάτι που σχετίζεται με την αρχή της ολίσθησης του δυσμενέστερου πρानούς και μπορεί να δημιουργήσει διαμήκεις ρωγμές στην στέψη του φράγματος. Ακόμα, προβλήματα μπορεί να δημιουργήσουν και τα σεισμικά κύματα που κινούνται εγκάρσια στον επιμήκη άξονα του φράγματος, κατά τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν εγκάρσιες ρωγμές στην στέψη του φράγματος.
- **Ρηγματώσεις στον αδιαπέρατο πυρήνα:** Ένας σεισμός μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές στον πυρήνα του φράγματος. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι οι ρηγματώσεις που προκαλούνται είναι μεγαλύτερες για φράγματα με αργιλικό πυρήνα, καθώς αυτός δεν ταλαντώνεται μαζί με



το σώμα του φράγματος, σε αντίθεση με φράγματα στα οποία το σώμα του φράγματος ταλαντώνεται μαζί με τον πυρήνα λειτουργώντας σαν ενιαία κατασκευή. Είναι γεγονός ότι οι μεγαλύτερες μετακινήσεις συμβαίνουν μεταξύ διαφορετικών υλικών, καθώς και λόγω απότομων αλλαγών στις διατομές.

- **Αύξηση των πιέσεων του νερού των πόρων:** Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των ενεργών τάσεων στα υλικά του φράγματος, όπως και την μείωση του συντελεστή ασφαλείας της κατασκευής. Έτσι, δημιουργούνται ευρύτερα προβλήματα στην κατασκευή. Για παράδειγμα, μπορεί να προκληθεί ρευστοποίηση, λόγω της οποίας μειώνεται η αντοχή των υλικών και μπορεί να προκληθεί αστοχία στα ανάντη του φράγματος, κάτι το οποίο μπορεί να προκαλέσει την αστοχία ολόκληρης της κατασκευής.
- **Υπερχείλιση του ταμιευτήρα:** Ένας σεισμός μπορεί να δημιουργήσει κυματισμούς στον ταμιευτήρα, και σε συνδυασμό με την μείωση του ύψους στέψης λόγω καθίζησης, μπορεί να περάσει το νερό στα κατάντη του φράγματος, κάτι το οποίο είναι πολύ επικίνδυνο για την κατασκευή.

#### 2.4.5. Περιστατικά αστοχίας χωμάτων φραγμάτων λόγω σεισμού

##### **Φράγμα Fujinuma (Ιαπωνία, 2011)**

Το φράγμα Fujinuma ήταν ένα χωμάτινο φράγμα στην πόλη Sukagawa της Ιαπωνίας. Η κατασκευή του φράγματος ξεκίνησε το 1937 και ολοκληρώθηκε το 1949, διότι διακόπηκε από τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο και συνεχίστηκε μετά το πέρας αυτού. Ο κύριος σκοπός του φράγματος ήταν η άρδευση της ευρύτερης περιοχής. Το φράγμα είχε ύψος 18,5 μέτρα και μήκος 133 μέτρα, με δομικό όγκο 99000 κυβικά μέτρα και πλάτος στέψης 6 μέτρα. Περίπου 300 μέτρα προς τα νότια υπήρχε ένα βοηθητικό φράγμα με ύψος περίπου 6 μέτρα και μήκος

περίπου 60 μέτρων. Το βοηθητικό φράγμα βοηθούσε την δεξαμενή να διατηρεί τα σχεδιασμένα επίπεδα δεδομένου ότι η τοπογραφία δεν θα επέτρεπε στο ενιαίο κύριο φράγμα να το κάνει. Η λεκάνη απορροής της περιοχής του φράγματος είχε έκταση 8,8 τετραγωνικά χιλιόμετρα, ενώ η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα ήταν 1504000 κυβικά μέτρα και η έκταση του 49 στρέμματα.



**Εικόνα 2.27** : Φράγμα Fujinuma

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)

Το φράγμα αστόχησε τον Μάρτιο του 2011, 20 με 25 λεπτά ύστερα από τον σεισμό Tohoku, ο οποίος ήταν μεγέθους 9 ρίχτερ, με επίκεντρο περίπου 70 χιλιόμετρα ανατολικά της χερσονήσου Oshika της Tohoku και σε υποβρύχιο βάθος περίπου 30km. Όταν έγινε ο σεισμός, ο ταμιευτήρας ήταν σχεδόν γεμάτος και το νερό άρχισε να ξεχειλίζει υπερβαίνοντας την στέψη του φράγματος. Οι ντόπιοι ανέφεραν ότι άκουσαν μια δυνατή έκρηξη πριν δουν την πλημμύρα. Η πλημμύρα είχε σαν συνέπεια την καταστροφή του χωριού Naganuma, κατάντη του φράγματος, ενώ 8 άνθρωποι έχασαν την ζωή τους.

Σύμφωνα με μελέτη που ακολούθησε, αποδείχθηκε ότι η υπερχειλίση του ταμιευτήρα οφειλόταν σε πτώση του σημείου στέψης. Ακόμη, προσδιορίστηκαν κάποιες πιθανές αιτίες για να προσδιορίσουν το περιστατικό αυτό:

- α. Αστάθεια στο ανάντη πρανές.
- β. Αστάθεια στο κατόντη πρανές, λόγω χρήσης οργανικών γεωυλικών, που δεν ενδείκνυνται για αντοχή σε σεισμικά γεγονότα.
- γ. Αστάθεια στο κατόντη πρανές και κατολίσθηση αυτού, λόγω κακής συμπύκνωσης των υλικών κατά την διάρκεια της πλήρωσης του ταμιευτήρα.
- δ. Διάβρωση μέσα από την είσοδο του νερού στις ρωγμές του σώματος του φράγματος και εσωτερική διαρροή.

Στις εικόνες 2.28, 2.29, 2.30, 2.31, φαίνονται ορισμένες από τις καταστροφές που προκλήθηκαν ύστερα από τον σεισμό αυτό.



**Εικόνα 2.28:** Άδειος ταμιευτήρας φράγματος, μετά την αστοχία

(Πηγή: <https://en.wikipedia.org>)



**Εικόνα 2.29:** Αστοχία που προκλήθηκε στον ταμιευτήρα του φράγματος  
(Πηγή: <http://www.vncold.vn>)



**Εικόνα 2.30 :** Αστοχία στο σώμα του φράγματος (πάνω) και στο δεξιό του αντέρεισμα (κάτω)  
(Πηγή: <http://www.vncold.vn>)



**Εικόνα 2.31** : Το χωριό Naganuma, μετά την πλημμύρα που προήλθε από την κατάρρευση του φράγματος Fujinuma

(Πηγή: <http://www.vncold.vn>)

### **Φράγμα San Fernando (ΗΠΑ, 1971)**

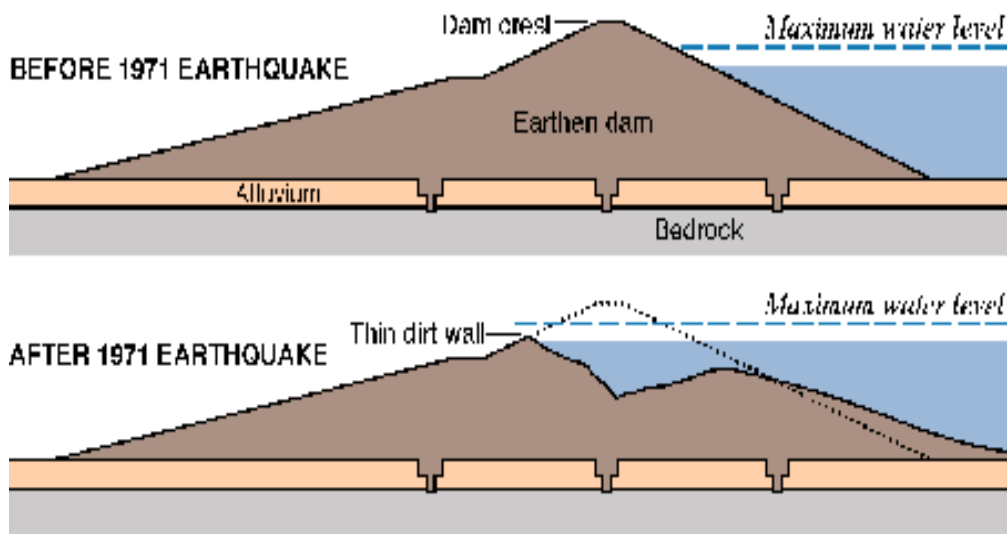
Το φράγμα San Fernando ήταν ένα χωμάτινο φράγμα στην περιοχή της California των ΗΠΑ. Κατασκευάστηκε μεταξύ 1912 και 1915, χρησιμοποιώντας μεθόδους κατασκευής που παρείχαν μικρή αντίσταση σε σεισμική φόρτιση. Το φράγμα διέθετε ταμιευτήρα με χωρητικότητα 25000000 κυβικά μέτρα, με σκοπό να παρέχει νερό στην πόλη του Los Angeles.



**Εικόνα 2.32** : Πανοραμική όψη του φράγματος San Fernando, το οποίο βρίσκεται στην αριστερή γωνία της εικόνας

(Πηγή: <https://research.engineering.ucdavis.edu>)

Στις 9 Φεβρουαρίου του 1971 συνέβη ένα από τα σημαντικότερα σεισμικά γεγονότα της περιοχής του San Fernando, ένας σεισμός μεγέθους 6,6 της κλίμακας ρίχτερ και δημιούργησε το φαινόμενο της ρευστοποίησης στο φράγμα αυτό. Κατά την διάρκεια του σεισμού, η στάθμη του νερού του ταμιευτήρα ήταν περίπου 11 μέτρα κάτω από την στέψη του φράγματος. Η σεισμική φόρτιση, προκάλεσε μεγάλες ολισθήσεις στην ανάντη πλευρά του φράγματος, οι οποίες προκλήθηκαν 30 δευτερόλεπτα ύστερα από το τέλος της σεισμικής δόνησης. Έτσι, αποδεικνύεται ότι η ολίσθηση ήταν αποτέλεσμα της απώλειας της αντοχής στα ρευστοποιημένα εδάφη και όχι αποτέλεσμα των αδρανειακών δυνάμεων από την διάδοση των κυμάτων κατά την διάρκεια του σεισμού. Η στέψη του φράγματος μειώθηκε περίπου 10 μέτρα, με αποτέλεσμα να παρασυρθεί μεγάλο μέρος της.



**Εικόνα 2.33 :** Το φράγμα του San Fernando πριν και μετά τον σεισμό του 1971 σε θεωρητικό μοντέλο, στο οποίο φαίνεται το φαινόμενο της ρευστοποίησης

(Πηγή: <https://pubs.usgs.gov>)

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για πολύ λίγο δεν συνέβη μια υπερχειλίση του ταμιευτήρα, η οποία θα διάβρωνε το κατάντη πρανές του φράγματος και θα προκαλούσε μια καταστροφική πλημμύρα στην περιοχή, αφού 15000000 τόνοι νερού ήταν έτοιμοι να υπερχειλίσουν το φράγμα, θέτοντας σε κίνδυνο την ζωή 80000 ανθρώπων που ζούσαν στο χωριό κατάντη του φράγματος. Έτσι, το φράγμα ήταν κοντά στην ολική αστοχία και ανά πάσα στιγμή ένας μετασεισμός θα μπορούσε να προκαλέσει την ολική κατάρρευσή του. Για τον λόγο αυτό το χωριό κατάντη του φράγματος εκκενώθηκε, μέχρι η στάθμη του νερού να φτάσει σε ασφαλές σημείο, διαδικασία που διήρκεσε τρεις μέρες. Τελικά δεν συνέβη κάποιος μετασεισμός, ωστόσο οι ζημιές που είχαν προκληθεί από τον σεισμό δεν μπορούσαν να επισκευαστούν αποτελεσματικά, ώστε το φράγμα να αντέξει σε έναν νέο ισχυρό σεισμό.



**Εικόνα 2.34 :** Γενική όψη του φράγματος San Fernando, στην οποία φαίνεται η ολίσθηση στο ανάκτιο πρανές

(Πηγή: <https://research.engineering.ucdavis.edu>)



**Εικόνα 2.35 :** Αστοχία στο ανάκτιο πρανές του φράγματος San Fernando, με άδειο ταμιευτήρα

(Πηγή: <https://research.engineering.ucdavis.edu>)



Για τον λόγο αυτό προτάθηκε ένα καινούργιο φράγμα, με υψηλότερα επίπεδα ασφαλείας σε περίπτωση εμφάνισης σεισμού. Έτσι, το 1994 που συνέβη ένας ισχυρός σεισμός, ο Northridge, μεγέθους 6,7 ρίχτερ, οι επιπτώσεις ήταν αποδεκτές και αναμενόμενες και δεν δημιούργησαν ουσιαστικό πρόβλημα στην ακεραιότητα του φράγματος.



**Εικόνα 2.36 :** Μικρής έκτασης αστοχία από τον σεισμό Northridge στο νέο φράγμα San Fernando το 1994

(Πηγή: <https://pubs.usgs.gov>)

## 2.5. Παρακολούθηση φραγμάτων

Είναι γεγονός, ότι όσο καλός και αν είναι ο σχεδιασμός ενός φράγματος και οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για αυτό, πάντα ελλοχεύει ο κίνδυνος μιας πιθανής αστοχίας. Οι πιο συχνές αστοχίες σε φράγματα αφορούν τα χωμάτινα, σε αντίθεση με του σκυροδέματος των οποίων πολύ μικρό ποσοστό αστοχεί. Συνήθως, μια αστοχία προέρχεται από συσσώρευση διάφορων φαινομένων, τα οποία εάν εντοπιστούν εγκαίρως μπορούν να προληφθούν και να αντιμετωπιστούν, αποφεύγοντας έτσι μια πιθανή αστοχία. Ο κίνδυνος που υπάρχει από την αστοχία μιας τέτοιας κατασκευής είναι πολλαπλός. Αρχικά για

την ζωή των ανθρώπων, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι κατασκευασμένο σε κατοικημένη περιοχή και στην συνέχεια για το περιβάλλον και την κινητή και ακίνητη περιουσία των ανθρώπων. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει η ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης των μετακινήσεων που μπορεί να δημιουργηθούν, οριζόντιων και κατακόρυφων, από τους αρμόδιους μηχανικούς, γενικά αλλά και σε περίπτωση σεισμού.

Η παρακολούθηση των φραγμάτων θα πρέπει να ξεκινάει από την περίοδο της κατασκευής, ώστε να επιβεβαιωθούν οι παραδοχές που έγιναν κατά τον σχεδιασμό και το φράγμα να κριθεί ασφαλές. Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή είναι ανάγκη η παρακολούθηση να συνεχίζεται, ώστε να ελέγχεται η σταθερότητα του φράγματος, ιδιαίτερα κατά την φάση της πρώτης πλήρωσης όπου έχουν παρατηρηθεί διάφορα φαινόμενα, λόγω της αλλαγής των συνθηκών που επικρατούν στο φράγμα. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η συστηματική παρακολούθηση και μετά το πέρας της κατασκευής, για να εντοπιστούν διάφορα φαινόμενα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν το φράγμα σε αστάθεια σε πρώιμο στάδιο, και να αντιμετωπιστούν. Ακόμα, ιδιαίτερα σημαντική είναι η παρακολούθηση των μετατοπίσεων που πιθανόν θα σημειωθούν στο φράγμα μετά από σεισμό, ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που πιθανόν θα δημιουργηθούν και να προληφθεί μια πιθανή αστοχία.

Για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των φραγμάτων και την μέτρηση των μετακινήσεων που πιθανόν θα σημειωθούν σε αυτά, χρησιμοποιούνται γεωτεχνικές, αλλά και γεωδαιτικές μέθοδοι και όργανα.

\*Η ανάλυση των γεωτεχνικών, όπως και των γεωδαιτικών μεθόδων, έγινε σύμφωνα με την διπλωματική εργασία του Β. Στουρνάρα (2012) "Μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με δορυφορικές μεθόδους".

### 2.5.1. Γεωτεχνικές μέθοδοι

Οι γεωτεχνικές μέθοδοι χρησιμοποιούν μετρήσεις με διάφορα γεωτεχνικά όργανα, με βάση τις οποίες βγαίνουν συμπεράσματα για την συμπεριφορά του φράγματος. Τα γεωτεχνικά όργανα τοποθετούνται στο φράγμα και καταγράφουν συνεχώς πληροφορίες για την συμπεριφορά του, ώστε να μπορεί να εντοπιστεί άμεσα κάποια περίεργη συμπεριφορά. Τέτοια όργανα είναι:

- Πιεσόμετρα νερού πόρων: Τα όργανα αυτά παρακολουθούν τις πιέσεις του νερού των πόρων, ιδιαίτερα μέσα στον αργιλικό πυρήνα. Κατά την διάρκεια ενός σεισμού είναι πιθανό να τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια του φράγματος, λόγω της αύξησης των πιέσεων του νερού των πόρων. Έτσι, τα πιεσόμετρα νερού πόρων μπορούν να καταγράψουν και να προειδοποιήσουν για αυτό που συμβαίνει. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να χρησιμοποιούνται τα όργανα αυτά κατά την φάση της πρώτης πλήρωσης, ώστε να ελέγχεται ο ρυθμός γεμίσματος του φράγματος, μέσω της παρατήρησης των αλλαγών των τιμών των πιέσεων του νερού των πόρων μέσα στον αργιλικό πυρήνα του φράγματος.
- Κύτταρα μέτρησης των ολικών πιέσεων: Τα όργανα αυτά μετρούν τις ολικές πιέσεις σε πέντε διαφορετικές κατευθύνσεις και μαζί με την μέτρηση του πιεσόμετρου, επιτρέπουν τον υπολογισμό των ενεργών τάσεων στο σημείο τοποθέτησης τους. Τοποθετούνται σε συμπλέγματα των πέντε, μαζί με ένα πιεσόμετρο. Από αυτά, ένα όργανο είναι εγκατεστημένο να μετρά τη κάθετη πίεση, δύο την οριζόντια στην ανάντη-κατάντη και στην κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα και δύο σε κλίση 45 μοιρών. Με τις μετρήσεις υπολογίζεται ο βαθμός τυχόν στροφής των κυρίων τάσεων, όπως και το ποσοστό από το συνολικό μέγεθος της φόρτισης, που μεταφέρεται στο σημείο των οργάνων. Έτσι, φαίνεται αν έχουν προκληθεί φαινόμενα “κρεμάσματος” σε πιο ψηλά σημεία του φράγματος, τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν συνθήκες υδραυλικών ρηγματώσεων που μπορεί να είναι επικίνδυνες.

- **Κλισιόμετρα:** Τα όργανα αυτά μετρούν τις οριζόντιες μετακινήσεις σε δύο κατευθύνσεις. Τοποθετούνται είτε σε γεωτρήσεις, είτε δια μέσου των διαφόρων υλικών, κατά την διάρκεια της τοποθέτησής τους. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με το κατέβασμα ειδικής τορπίλης σε όλο το μήκος του σωλήνα και την καταγραφή της απόκλισης κάθε μισό μέτρο. Έτσι διαγράφεται το ολικό προφίλ του σωλήνα. Με τα όργανα αυτά λοιπόν, μπορούν να μετρηθούν και να αξιολογηθούν οι μετακινήσεις που έχουν δημιουργηθεί σε κάποιο σημείο ελέγχου. Ακόμα, μπορούν να τοποθετηθούν μαγνήτες στο εξωτερικό του σωλήνα, οι οποίοι θα ακολουθούν κάθετες μετακινήσεις και έτσι θα καταγράφεται ταυτόχρονα και η καθίζηση στην περιοχή. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση του οργάνου αυτού στους αργιλικούς πυρήνες, όπου τέτοιες παραμορφώσεις είναι πιο συχνές και μπορεί να επηρεάσουν την σωστή λειτουργία τους.
- **Καθιζήμετρα:** Τα όργανα αυτά μπορεί να είναι υδραυλικά ή υδραργυρικά και μετρούν τοπικές καθιζήσεις. Τοποθετούνται σε διάφορα υψόμετρα και τομές, στην ανάντη/κατάντη κατεύθυνση και δίνουν την δυνατότητα σχεδιασμού τομών, από τις οποίες φαίνεται ο βαθμός των καθιζήσεων των διάφορων υλικών, ενώ μπορούν να υπολογιστούν και ορισμένες από τις παραμέτρους του μέτρου ελαστικότητας.
- **Όργανα μέτρησης επιφανειακών μετακινήσεων:** Τα όργανα αυτά είναι τοπογραφικά όργανα μεγάλης ακρίβειας για τον υπολογισμό επιφανειακών μετρήσεων σε δύο κατευθύνσεις, όπως και των καθιζήσεων. Τοποθετούνται σε τοπογραφικά σημεία, που έχουν εισαχθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, για την εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού.
- **Επιταχυνσιογράφοι:** Τα όργανα αυτά παρέχουν ανά πάσα στιγμή πληροφορίες σχετικά με τις μετακινήσεις των σημείων ελέγχου. Τοποθετούνται σε δύο ή τρία σημεία του φράγματος. Ένας στη βάση, ένας στη στέψη και ένας συνήθως σε μια από τις σήραγγες του έργου. Με αυτό τον τρόπο, φαίνεται η κλιμάκωση στο μέγεθος της επιτάχυνσης,

από την βάση μέχρι την στέψη του φράγματος. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρησιμοποίηση των συγκεκριμένων οργάνων κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

Οι πιο συνηθισμένες γεωτεχνικές μέθοδοι για την μέτρηση των μετατοπίσεων στα φράγματα είναι η ανίχνευση των μετακινήσεων με σύρματα από χάλυβα και εκκρεμή, καθώς και η εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων με οπτικές ίνες.

### 1. Ανίχνευση Μετακινήσεων με Σύρματα από Χάλυβα και Εκκρεμή

Τα σύρματα από χάλυβα τοποθετούνται κατά μήκος των οριζόντιων σηράγγων στο σώμα του φράγματος ή στη στέψη του. Με βάση την ευθυγραμμία που υλοποιείται με αυτά, προσδιορίζονται οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις. Μια βασική μέθοδος παρακολούθησης οριζόντιων μετατοπίσεων φραγμάτων, ως προς τη βάση τους, είναι μέσω της εγκατάστασης σε κατακόρυφα τμήματα του φράγματος, εκκρεμών αριθμού ανάλογου με το μήκος της στέψης. Συνήθως το κάθε εκκρεμές αποτελείται από ένα νήμα από ανοξείδωτο χάλυβα, ένα βαρίδιο τάσης, μία συσκευή εξάρτησης του νήματος και ένα δοχείο απόσβεσης των ταλαντώσεων. Τα σημεία εξάρτησης των εκκρεμών επιλέγονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη στάθμη της στέψης, ενώ τα κατώτατα άκρα όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη βάση του φράγματος. Τα νήματα διέρχονται από κατακόρυφους σωλήνες, εντοιχισμένους στο σώμα του φράγματος, διαμέτρου 30-40 cm, ενώ μόνο τα άκρα του εκκρεμούς και τα γειτονικά τμήματα των σταθμών ανάγνωσης είναι προσιτά. Σταθμοί ανάγνωσης τοποθετούνται στη στάθμη των οριζόντιων στοών που διατρέχουν το σώμα του φράγματος, σε διάφορα ύψη. Τα κατώτατα άκρα των εκκρεμών, που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη της χαμηλότερης στοάς επισκέψεως, καταλήγουν σε φρεάτια διαμέτρου 1 m, ώστε να δίνεται η δυνατότητα να λαμβάνεται μέτρηση στα κατώτατα άκρα των εκκρεμών. Εκεί τα βαρίδια τάσης είναι εμβαπτισμένα σε δοχείο με υγρό (νερό, έλαιο, ή γλυκερίνη) για την απόσβεση των ταλαντώσεων. Τα όργανα μετρήσεων είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπουν τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων σε δύο διευθύνσεις (συνήθως κατά τη

διεύθυνση ανάντη-κατάντη και κατά την κάθετη στην πρώτη διεύθυνση), ενώ χρησιμοποιείται μια συσκευή ανάγνωσης που μεταφέρεται από σταθμό σε σταθμό ανάγνωσης όπου τοποθετείται κατάλληλα. Η διάταξη των εκκρεμών πρέπει να είναι τέτοια, ώστε σε περίπτωση που χρειαστεί αντικατάσταση ενός νήματος να τοποθετείται ακριβώς στην ίδια με την προηγούμενη θέση. Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων του φράγματος με τη χρήση εκκρεμών, άρα και την τοποθέτηση αυτών, πρέπει να αρχίσουν πριν την αποπεράτωση της κατασκευής του και να συνεχίζονται πάντα σε ίσα χρονικά διαστήματα. Παράλληλα, με τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα, του νερού και του σκυροδέματος είναι δυνατός ο έλεγχος της συμπεριφοράς του φράγματος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

## 2. Εγκατάσταση Δικτύου Αισθητήρων με Οπτικές Ίνες

Μια άλλη σύγχρονη μέθοδος είναι η εγκατάσταση κατάλληλου δικτύου αισθητήρων με οπτικές ίνες, με δύο πιθανές περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση, αφορά την εγκατάσταση ενός εκτεταμένου με χωρικές οπτικές ίνες, δικτύου αισθητήρων για την ανίχνευση της σχετικής μετακίνησης ολόκληρου του σώματος του φράγματος. Η δεύτερη περίπτωση αφορά την εγκατάσταση δύο μακρινών αισθητήρων οπτικών ινών (30 m και 40 m), αγκυρωμένων σε βράχο, με σκοπό την παρακολούθηση των μετακινήσεων του φράγματος, σε σχέση με το υπέδαφος του.

### 2.5.2. Γεωδαιτικές μέθοδοι

Η γεωδαισία αποτελεί την επιστήμη που ασχολείται με τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς, με σκοπό να προσδιορίσει το σχήμα, το μέγεθος και το πεδίο βαρύτητας της γης και τις μεταβολές τους με τον χρόνο. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, ότι ένα από τα πεδία της λοιπόν αποτελούν τα φράγματα και η μέτρηση των μετατοπίσεων σε αυτά, με διάφορες μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί διακρίνονται σε επίγειες και δορυφορικές.

## Επίγειες μέθοδοι

1. Ίδρυση τρισδιάστατων δικτύων και δικτύων οριζόντιου και κατακόρυφου ελέγχου στο σώμα του φράγματος ή και στην ευρύτερη περιοχή:

Με τα δίκτυα αυτά, παρακολουθείται η κινηματική συμπεριφορά του φράγματος, σε δύο ή και σε τρεις διαστάσεις. Πραγματοποιούνται μετρήσεις μηκών, γωνιών ή διευθύνσεων με σύγχρονους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς, καθώς και υψομετρικών διαφορών με ψηφιακούς χωροβάτες. Μετά από συνόρθωση των παρατηρήσεων και επίλυση των δικτύων, εκτιμώνται οι συντεταγμένες των κορυφών τους και οι αβεβαιότητες τους. Τέλος, μετά από στατιστική επεξεργασία, προσδιορίζονται οι μετακινήσεις των κορυφών για επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης (συνήθως 95%).

2. Παρακολούθηση, σε τακτά χρονικά διαστήματα με σύγχρονους ρομποτικούς γεωδαιτικούς σταθμούς, μόνιμα τοποθετημένων στόχων στο σώμα του φράγματος:

Οι σταθμοί αυτοί παρέχουν τη δυνατότητα προγραμματισμού, ώστε να ανιχνεύουν, να σκοπεύουν αυτούς τους στόχους και να μετρούν μήκη και γωνίες σε συγκεκριμένες προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται, με εκ των προτέρων προγραμματισμό της συχνότητας μέτρησης ή με εντολή μέσω Η/Υ από το γραφείο. Έτσι προκύπτουν γωνιακά και γραμμικά μεγέθη από άμεσες μετρήσεις, που συσχετίζονται με αντίστοιχα προγενέστερα στοιχεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό απρόβλεπτων μετακινήσεων μεγάλης κλίμακας, τα οποία μπορούν να συμβούν στο πλαίσιο έκτακτων περιστατικών της (π.χ. εκτεταμένες κατολισθήσεις πρανών του φράγματος κλπ).

3. Σάρωση της επιφάνειας του φράγματος με χρήση εικονο-γεωδαιτικών σταθμών που μετρούν μήκη και γωνίες χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα (reflectorless) ή με χρήση επίγειων σαρωτών (laser scanners):

Η μέτρηση των μηκών με εικονο-γεωδαιτικούς σταθμούς, χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα, με ακρίβεια που φθάνει τα  $\pm 2\text{mm}$ , δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου του φράγματος. Όμοια και οι μετρήσεις με σαρωτές, η ακρίβεια των οποίων είναι της τάξης των  $\pm 5\text{mm}$ , οδηγούν σε μοντελοποίηση του σώματος του φράγματος σε τρεις διαστάσεις. Από την διαχρονική σύγκριση των χωρικών μοντέλων του φράγματος, είναι προς διερεύνηση η δυνατότητα προσδιορισμού των μετακινήσεων του.

### Δορυφορικές Μέθοδοι

Οι δορυφορικές γεωδαιτικές μετρήσεις χρησιμοποιούν δέκτες του συστήματος δορυφορικού εντοπισμού θέσης, έχοντας ως σκοπό τον προσδιορισμό των βάσεων στον χώρο, μεταξύ των κορυφών του τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου. Στις μετρήσεις αυτές δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα μεταξύ των κορυφών του δικτύου, ενώ ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιλογή της θέσης των κορυφών των δικτύων αυτών, ώστε να βρίσκονται σε χώρο με όσο το δυνατόν ανοικτό ορίζοντα, για να φαίνεται μεγαλύτερο τμήμα της ουράνιας σφαίρας. Για αυτό τον λόγο δεν πρέπει να επιλέγονται οι θέσεις των κορυφών του δικτύου κοντά σε φυσικά εμπόδια, κατασκευές, δέντρα, κλπ. Στις δορυφορικές μεθόδους, ιδιαίτερη σημασία έχει ο σωστός προγραμματισμός των μετρήσεων από την άποψη τόσο της ορατότητας, όσο και της κατάλληλης γεωμετρίας των δορυφόρων στον ουράνιο θόλο. Για τις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας (παρακολούθηση μετακινήσεων), ενδείκνυται η μέθοδος του στατικού εντοπισμού. Στη μέθοδο αυτή, λαμβάνουν ταυτόχρονα δεδομένα δυο δέκτες από τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους, για τον προσδιορισμό μιας βάσης (διάνυσμα στο χώρο), με ακρίβεια της τάξης των  $\pm 5\text{mm}$  οριζοντιογραφικά. Οι μετρήσεις διαρκούν από μερικά λεπτά έως και αρκετές ώρες, ανάλογα με το μήκος της βάσης και το σκοπό της εργασίας. Οι συνιστώσες των διανυσμάτων, που μετρώνται στο χώρο, δίνουν τη θέση μιας άγνωστης κορυφής σε σχέση με τη γνωστή, που θεωρείται από το χρήστη. Έτσι προσδιορίζονται μετά από επίλυση με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων κάθε φάσης μέτρησης, η θέση των κορυφών του δικτύου (X,Y,Z) με ακρίβεια της



τάξης των μερικών mm. Σαν τελικό προϊόν, υπολογίζονται οι διαφορές  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U_p$ , μεταξύ των κορυφών του δικτύου, ενώ τέλος προσδιορίζονται οι μετακινήσεις των κορυφών του δικτύου, οι οποίες αξιολογούνται για τη σημαντικότητά τους μέσω στατιστικών ελέγχων.

Συμπερασματικά, και οι γεωτεχνικές και οι γεωδαιτικές μέθοδοι έχουν τα θετικά τους και τα αρνητικά τους. Ως προς τις γεωτεχνικές μεθόδους, οι ακρίβειες είναι αυξημένες, της τάξεως του 0,1mm, ακρίβειες που δεν μπορούν να φτάσουν οι γεωδαιτικές. Ακόμα, μπορούν να παρέχουν αποτελέσματα σε συνεχή βάση και ανά πάσα στιγμή.

Οι γεωδαιτικές μέθοδοι μπορούν να παρέχουν στατιστικό έλεγχο των παρατηρήσεων, έλεγχο της ποιότητας των τελικών αποτελεσμάτων (τα οποία θα είναι οι συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου, όπως και ο προσδιορισμός των στατιστικά σημαντικών μετακινήσεων τους κατά την φάση της μέτρησης), σε ενιαίο σύστημα αναφοράς, με συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης και τη δυνατότητα συσχέτισης τους, κατά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των φάσεων μέτρησης, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό με την εφαρμογή των γεωτεχνικών μεθόδων, λόγω του γεγονότος ότι οι μετρήσεις είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, δηλαδή δεν ανήκουν στο ίδιο σύστημα αναφοράς.

Έτσι είναι κατανοητό ότι αποτελεί αναγκαιότητα αυτές οι μέθοδοι να συνδυάζονται, όποτε είναι δυνατό, καθώς με την ένταξη των θέσεων που έχουν τοποθετηθεί τα γεωτεχνικά όργανα, στο γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου, μπορεί να δοθεί πιο ολοκληρωμένος προσδιορισμός του πεδίου των μετακινήσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

### 3.1. Μεθοδολογίες Σχεδιασμού

Βασικό κομμάτι του αντισεισμικού σχεδιασμού των χωμάτινων φραγμάτων, αποτελεί η διασφάλιση της σεισμικής ευστάθειας τους. Με την διασφάλιση της σεισμικής ευστάθειας μιας κατασκευής όπως τα χωμάτινα φράγματα, επιτυγχάνεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα του έργου. Αντίθετα, σε μια περίπτωση εσφαλμένου υπολογισμού της ευστάθειας, εγκυμονεί ο κίνδυνος αστοχίας της κατασκευής, πράγμα που μπορεί να είναι καταστροφικό. Η ανάλυση της σεισμικής ευστάθειας φραγμάτων γίνεται με την ανάλυση των πρανών τους.

Η σεισμική ευστάθεια των πρανών επηρεάζεται από τις κυκλικές τάσεις που θα προκληθούν κατά την διάρκεια ενός σεισμού και από την κυκλική συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών, που βρίσκονται στο σώμα του φράγματος, όπως και στην θεμελίωση. Πιθανή αστοχία ενός χωμάτινου φράγματος, κατά την διάρκεια ενός σεισμού, μπορεί να οφείλεται στις αδρανειακές δυνάμεις ή στην ανακυκλική απομείωση της αντοχής των υλικών. Τεχνικές που κυμαίνονται από πολύ προσεγγιστικές έως πολύ λεπτομερείς, είναι διαθέσιμες για τον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας ενός χωμάτινου φράγματος. Με σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας, αυτές οι μέθοδοι είναι οι εξής:

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

Η ανάλυση της σεισμικής ευστάθειας των πρανών, συχνά ξεκινά από μια σταδιακή προσέγγιση, η οποία συνήθως περιλαμβάνει την εκκίνηση με μια απλουστευμένη μέθοδο (ψευδοστατική ανάλυση) και προχωρά σε ακριβέστερες

αναλύσεις (μέθοδος ολίσθησης πρανούς) και στην μέθοδο τάσεων-παραμορφώσεων, αν αυτό είναι απαραίτητο.

Ένα χωμάτινο φράγμα θεωρείται συνήθως ασφαλές αν βρεθεί ασφαλές από τη ψευδοστατική μέθοδο ή τη μέθοδο ολίσθησης πρανούς. Αν αυτό αποδειχθεί, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πιο πολύπλοκες μέθοδοι. Από την άλλη πλευρά, αν η μέθοδος ολίσθησης πρανούς υποδηλώνει πιθανότητα αστοχίας, τότε θα πρέπει να εφαρμοστεί η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων για να εκτιμηθεί η σταθερότητα του φράγματος. Ο κατασκευαστής μπορεί επίσης να προσπεράσει την ψευδοστατική μέθοδο και την μέθοδο ολίσθησης πρανούς και να εφαρμόσει κατευθείαν την μέθοδο τάσεων-παραμορφώσεων, με την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμα υλικά υψηλής ποιότητας και συγκεκριμένα δεδομένα.

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι η υιοθέτηση μιας πιο πολύπλοκης μεθόδου κατά τον σχεδιασμό, θα πρέπει να απαιτεί λεπτομερή και κατάλληλο χαρακτηρισμό της αστράγγιστης παραμορφωμένης συμπεριφοράς των εδαφών στο σώμα του φράγματος και της θεμελίωσης πριν την αστοχία, καθώς και μια σειρά των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων, τις οποίες ο εδαφικός σχηματισμός, μπορεί να συναντήσει κατά την διάρκεια ζωής.

Στην συνέχεια, γίνεται εκτενής ανάλυση των μεθόδων ευστάθειας πρανών, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω.

### **3.1.1. Ψευδοστατική Μέθοδος**

Στην ψευδοστατική προσέγγιση, η επίδραση του σεισμού αντικαθίσταται από οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις και το πρόβλημα της σεισμικής αστάθειας αντιμετωπίζεται ως ισοδύναμο στατικό. Στις αναλύσεις αυτές, οι επιδράσεις του σεισμού αντιπροσωπεύονται με ψευδοστατικές επιταχύνσεις, που παράγουν αδρανειακές δυνάμεις  $F_h$  (οριζόντια δύναμη) και  $F_v$  (κατακόρυφη δύναμη), οι οποίες δρουν στο κέντρο βάρους της μάζας αστοχίας του πρανούς. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται ως εξής:

- $F_h = \frac{a_h * W}{g} = k_h * W$  [3.1]

- $F_v = \frac{a_v * W}{g} = k_v * W$  [3.2]

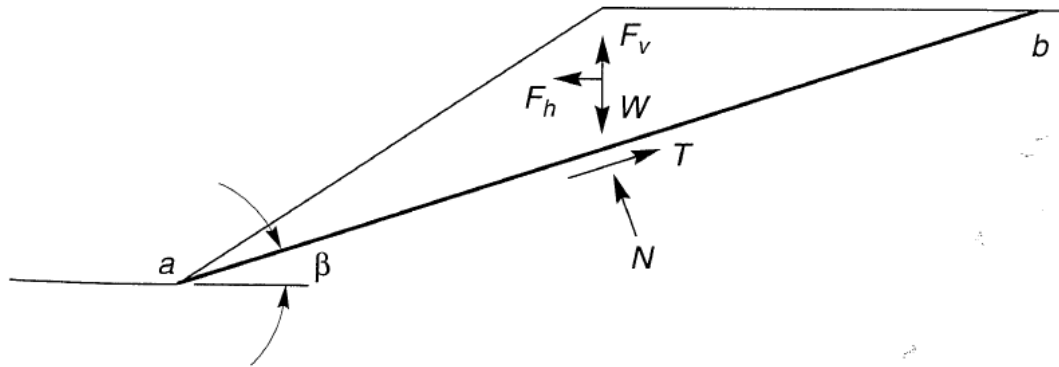
Όπου,

$a_h$ : οριζόντια ψευδοστατική επιτάχυνση

$a_v$ : κατακόρυφη ψευδοστατική επιτάχυνση

$k_h$ : αδιάστατος σεισμικός συντελεστής της οριζόντιας κίνησης

$k_v$ : αδιάστατος σεισμικός συντελεστής της κατακόρυφης κίνησης



**Εικόνα 3.1:** Δυνάμεις της ψευδοστατικής μεθόδου

Πηγή: Kramer, 1996

Αναλύοντας τις δυνάμεις που δρουν στην μάζα ολίσθησης σε μια διεύθυνση παράλληλη της επιφάνειας αστοχίας, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας της μεθόδου ως εξής:

- $FS = \frac{\text{αντιστεκόμενη δύναμη}}{\text{κινητήρια δύναμη}} = \frac{c * l_{ab} + [(W - F_v) * \cos\beta - F_h * \sin\beta] * \tan\varphi}{(W - F_v) * \sin\beta + F_v * \cos\beta}$  [3.3]

Όπου:

- $c, \varphi$ : παράμετροι αντοχής Mohr- Coulomb, που περιγράφουν την διατμητική δύναμη της επιφάνειας αστοχίας
- $l_{ab}$ : το μήκος της επιφάνειας αστοχίας

Από την σχέση 3.3, φαίνεται ότι η οριζόντια ψευδοστατική δύναμη  $F_h$ , μειώνει τον συντελεστή ασφαλείας για  $\varphi > 0$  (αυξάνει την κινητήρια δύναμη και μειώνει την αντιστεκόμενη), ενώ η κατακόρυφη ψευδοστατική δύναμη  $F_v$ , έχει μικρότερη επίδραση στον συντελεστή ασφαλείας και έτσι η επίδραση της συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη (ανάλογα με την κατεύθυνση, αυξάνει ή μειώνει και τις δύο δυνάμεις).

Η ψευδοστατική προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ψευδοστατικών συντελεστών ασφαλείας για επίπεδες, κυκλικές και μη κυκλικές επιφάνειες αστοχίας. Για τιμές του συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερες του 1 η κατασκευή είναι ευσταθής, για τιμές ίσες με 1 η κατασκευή βρίσκεται σε μια οριακή κατάσταση αστοχίας, ενώ για τιμές μικρότερες του 1 η κατασκευή αστοχεί, σύμφωνα με την μέθοδο αυτή.

Τα αποτελέσματα της ψευδοστατικής μεθόδου εξαρτώνται πολύ από την τιμή του σεισμικού συντελεστή  $k_h$ . Η επιλογή του είναι το πιο σημαντικό και δύσκολο κομμάτι της ανάλυσης. Ο συντελεστής αυτός καθορίζει τη ψευδοστατική δύναμη που επιδρά στην ολισθαίνουσα μάζα και συνεπώς αντικαθιστά ένα μέρος της αδρανειακής δύναμης που ασκείται στο επίχωμα. Εάν το υλικό του πρανούς είναι άκαμπτο, η αδρανειακή δύναμη που ασκείται στο επίχωμα, θα είναι ίση με την πραγματική οριζόντια επιτάχυνση και την μάζα του ασταθούς υλικού. Αυτή η αδρανειακή δύναμη φτάνει την μέγιστη τιμή της, όταν η οριζόντια επιτάχυνση πάρει την μέγιστη τιμή της. Αναγνωρίζοντας ότι τα πραγματικά πρανή δεν είναι άκαμπτα και ότι η μέγιστη επιτάχυνση τους λαμβάνει χώρα για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, οι ψευδοστατικοί συντελεστές χρησιμοποιούνται στην πράξη.

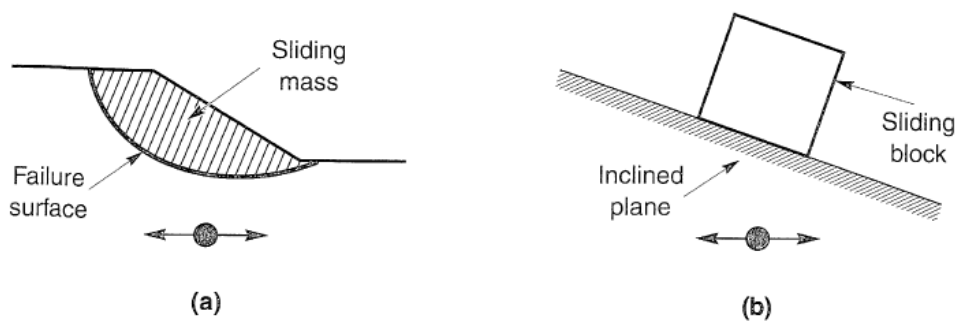
Συμπερασματικά, η ψευδοστατική είναι μια εύχρηστη μέθοδος για τον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας των πρανών, αφού οι αναλύσεις της είναι απλές, ενώ η ομοιότητά της με τις απλές στατικές αναλύσεις, καθιστά τους υπολογισμούς της εύκολους στην κατανόηση και στην εκτέλεση. Ακόμα, παράγει έναν βαθμιαίο δείκτη σταθερότητας, τον συντελεστή ασφαλείας, που είναι ανάλογος με αυτόν που παράγεται από τις στατικές αναλύσεις. Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετοί περιορισμοί και αρνητικά από την εφαρμογή της μεθόδου

αυτής στην πράξη. Αρχικά, απλές αδρανειακές δυνάμεις, αντιπροσωπεύουν την πολύπλοκη εδαφική κίνηση που παράγεται κατά τον σεισμό. Επίσης, υπάρχει πιθανότητα ένα πρανός να αστοχήσει στην πράξη, ακόμα και όταν  $FS > 1$ . Ακόμα, οι ψευδοστατικές αναλύσεις για εδάφη με υψηλές πιέσεις πόρων ή με πάνω από 15% απομείωση της αντοχής του εδάφους, λόγω σεισμικής φόρτισης, είναι αναληθείς. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη πιο ρεαλιστικών μεθόδων ανάλυσης για τον υπολογισμό της σεισμικής ευστάθειας των πρανών, έχουν οδηγήσει στην μειωμένη χρήση της μεθόδου.

### 3.1.2. Μέθοδος ολίσθησης πρανούς

Είναι γεγονός ότι η ψευδοστατική μέθοδος παρέχει συντελεστές ασφαλείας, όμως όχι πληροφορίες για τις παραμορφώσεις που σχετίζονται με την αστοχία ενός πρανούς. Αυτό δεν είναι αξιόπιστο, διότι για παράδειγμα στην περίπτωση που οι αδρανειακές δυνάμεις γίνουν πολύ μεγάλες σε μια εδαφική μάζα και οι κινητήριες δυνάμεις ξεπεράσουν αυτές της αντίστασης, προκύπτει συντελεστής ασφαλείας μικρότερος από 1 και η κατασκευή δεν είναι ευσταθής.

Έτσι ο Newmark το 1965, δημιούργησε μια προσέγγιση για την συμπεριφορά ενός πρανούς κάτω από αυτές τις συνθήκες, δηλαδή για την περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος από 1 και η ολισθαίνουσα μάζα δεν ισορροπεί πλέον και επιταχύνεται από μια ανισόρροπη δύναμη. Η κατάσταση είναι παρόμοια με ένα προσομοίωμα στο οποίο η ανάπτυξη των σεισμικών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας (Εικόνα 3.2a), είναι ανάλογη των μετακινήσεων που προκαλούνται, καθώς ένα άκαμπτο σώμα ολισθαίνει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο (Εικόνα 3.2b), κατόπιν σεισμικής διέγερσης.



**Εικόνα 3.2.** : Αναλογία ανάμεσα σε α) προσομοίωμα εδαφικής μάζας που αστοχεί και β) σώμα που ολισθαίνει σε κεκλιμένο επίπεδο

(Πηγή: Kramer, 1996)

Ο Newmark χρησιμοποίησε την μέθοδο αυτή για τον υπολογισμό της μόνιμης μετατόπισης σε ένα πρηνές, υπό οποιαδήποτε εδαφική κίνηση. Οι σεισμικές μετακινήσεις αναπτύσσονται όταν οι αδρανειακές δυνάμεις του άκαμπτου σώματος υπερβούν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι μετακινήσεις αυτές υπολογίζονται με διπλή ολοκλήρωση της σχετικής επιτάχυνσης, δηλαδή της διαφοράς της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης του σεισμικού κραδασμού από την κρίσιμη ψευδοστατική επιτάχυνση. Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας στην μέθοδο αυτή υπολογίζονται ως εξής:

Θεωρώντας ότι το σώμα ισορροπεί υπό στατικές συνθήκες προκύπτει:

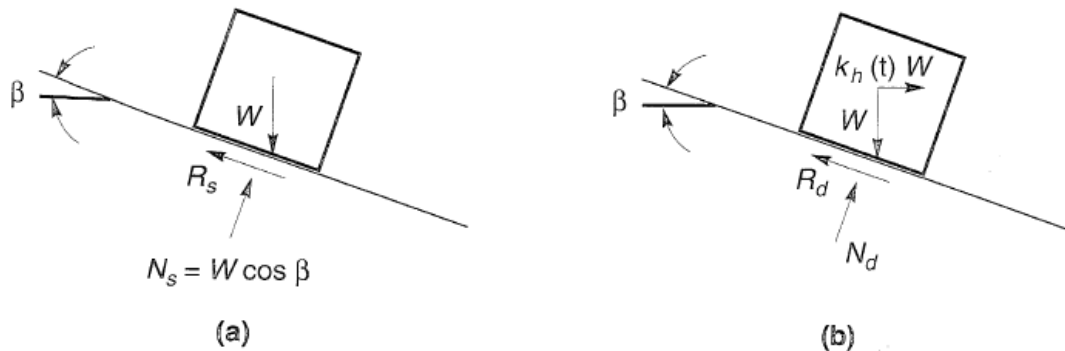
$$FS = \frac{\text{δυνάμεις που αντιστέκονται}}{\text{στατική κινητήρια δύναμη}} = \frac{R_s}{D_s} = \frac{W \cdot \cos\beta \cdot \tan\varphi}{W \cdot \sin\beta} = \frac{\tan\varphi}{\tan\beta} \quad [3.4]$$

όπου,

$\varphi$ : η γωνία τριβής σώματος και εδάφους

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

$$FS_d(t) = \frac{\text{διαθέσιμη δύναμη αντίστασης}}{\text{ψευδοστατική κινητήρια δύναμη}} = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{[\cos\beta - k_h(t) \cdot \sin\beta] \cdot \tan\varphi}{\sin\beta + k_h(t) \cdot \cos\beta} \quad [3.5]$$



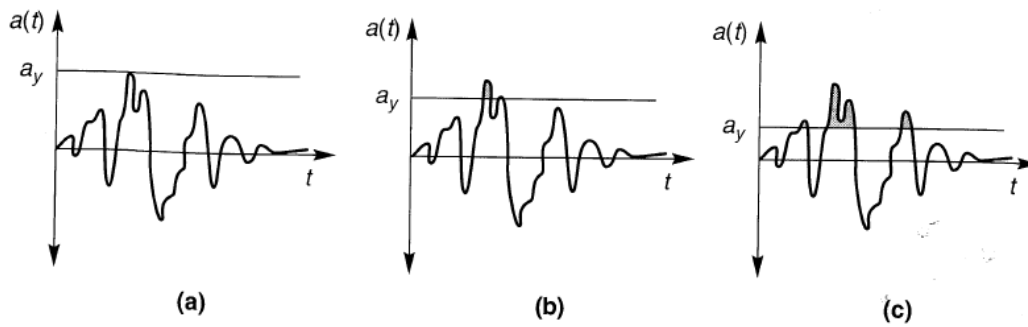
**Εικόνα 3.3:** Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα εδαφικό ακίνητο σώμα υπό α) στατικές συνθήκες, β) δυναμικές συνθήκες.

(Πηγή: Kramer, 1996)

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

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





**Εικόνα 3.4:** Μόνιμες μετατοπίσεις πρανούς εξαρτώμενες από την σχέση κρίσιμης και μέγιστης επιτάχυνσης: α) δεν υπάρχουν μετατοπίσεις γιατί η μέγιστη επιτάχυνση δεν ξεπερνά την τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης, β), γ) υπάρχουν μόνιμες μετατοπίσεις γιατί η μέγιστη επιτάχυνση ξεπερνάει σε κάποια σημεία την τιμή της κρίσιμης.

**Πηγή:** Kramer, 1996

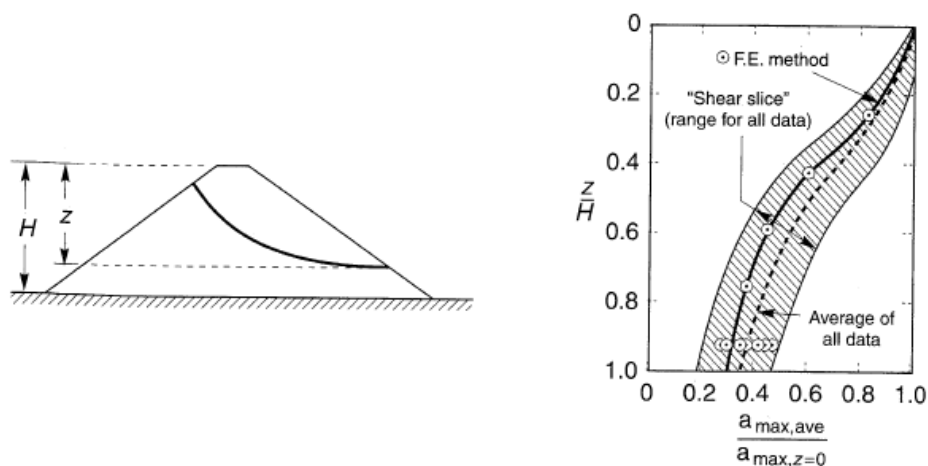
Ωστόσο η μέθοδος αυτή κάνει κάποιες παραδοχές κατά την εφαρμογή της, οι οποίες είναι:

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

Συμπερασματικά, είναι μια εύχρηστη μέθοδος, μέσω της οποίας μπορούν να υπολογιστούν οι μόνιμες μετατοπίσεις μετά τον σεισμό, στην οποία η πιθανή ολισθαίνουσα μάζα αντιμετωπίζεται ως άκαμπτο σώμα πάνω σε μια άκαμπτη βάση. Ωστόσο, αυτή υπόκειται σε πολλές παραδοχές, οι οποίες επηρεάζουν την ακρίβεια της ανάλυσης, ενώ θεωρεί ότι η ολισθαίνουσα μάζα κινείται σαν στερεό σώμα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, κάτι που δεν συμβαίνει στην πράξη αφού τα εδαφικά πρανά παραμορφώνονται. Ακόμα, οι αδρανειακές δυνάμεις στην ολισθαίνουσα μάζα δεν κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, οπότε γίνεται κατανοητό ότι η αδρανειακή δύναμη που υπολογίζεται δεν είναι ίδια με αυτή που ασκείται στην πράξη. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή βασίζεται σε απολύτως πλαστική συμπεριφορά του εδάφους στην επιφάνεια ολίσθησης. Τα επιχώματα όμως απέχουν πολύ από την παραδοχή αυτή. Τέλος, δεν υπολογίζονται κατακόρυφες μετακινήσεις.

Πρακτικά, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται αυστηρά μόνο σε φράγματα που δεν υποβάλλονται σε αστοχία λόγω ρευστοποίησης, αν και μπορούν να ληφθούν συντηρητικές εκτιμήσεις παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας διατμητικές αντοχές μετά την ρευστοποίηση, για υλικά που μπορούν να ρευστοποιηθούν στο σώμα ή στο θεμέλιο του φράγματος στην ανάλυση.

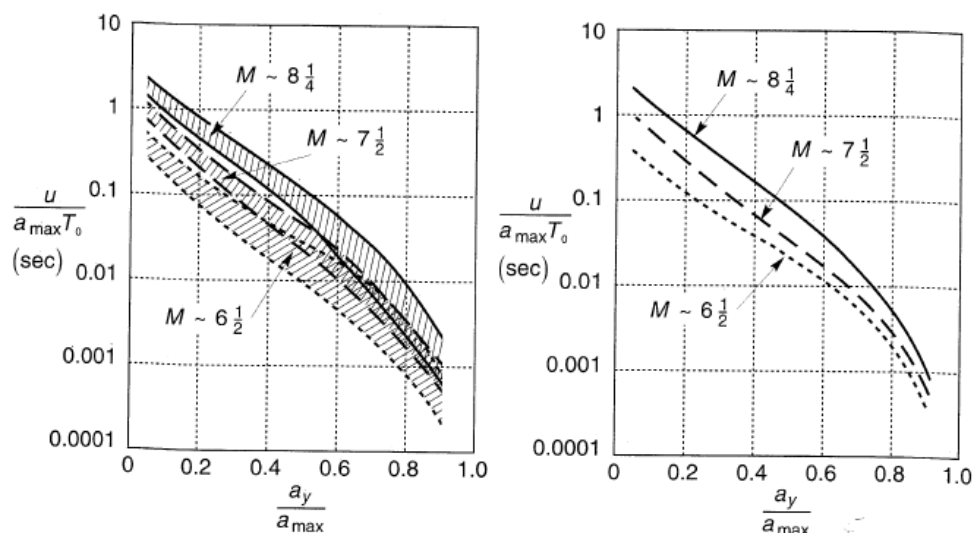
Μια βελτιωμένη προσέγγιση του Newmark, υλοποίησαν οι Makdisi και Seed το 1978, οι οποίοι χρησιμοποίησαν μέσες επιταχύνσεις υπολογισμένες από την προσέγγιση του Chopra το 1966 και αναλύσεις κεκλιμένου σώματος για να υπολογίσουν τις μόνιμες μετατοπίσεις από σεισμό σε κατασκευές, όπως τα χωμάτινα φράγματα, λαμβάνοντας έτσι υπόψη και την ευκαμψία της ολισθαίνουσας μάζας, σε αντίθεση με την μεθοδολογία του Newmark. Κάνοντας απλές υποθέσεις όσον αφορά τα αποτελέσματα των δυναμικών πεπερασμένων στοιχείων και τις αναλύσεις διατμητικής δοκού αυτής της κατασκευής, αναπτύχθηκε μια απλή προσέγγιση για την πρόβλεψη των μόνιμων μετατοπίσεων. Σε αυτή την προσέγγιση, η κρίσιμη επιτάχυνση για μια επιφάνεια αστοχίας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την κρίσιμη δύναμη, η οποία είναι ίση με το 80% της αστράγγιστης αντοχής του εδάφους. Η δυναμική απόκριση του φράγματος, υπολογίζεται από έναν λόγο επιτάχυνσης, που διαφέρει με το βάθος της επιφάνειας αστοχίας κοντά στο ύψος του φράγματος.



**Εικόνα 3.5:** Ποικιλία των μέγιστων επιταχύνσεων, σε σχέση με το βάθος της επιφάνειας αστοχίας για φράγματα

(Πηγή: Kramer, 1996)

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



**Εικόνα 3.6:** Ποικιλία των κανονικοποιημένων μόνιμων μετατοπίσεων, σε σχέση με την κρίσιμη επιτάχυνση για σεισμούς διαφορετικών μεγεθών: α) σύνοψη για αρκετούς σεισμούς και φράγματα, β) μέσες τιμές

(Πηγή: Kramer, 1996)

### 3.1.3. Μέθοδος τάσεων- παραμορφώσεων

Αποτελεί την πιο ακριβή προσέγγιση προσομοίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς ενός χωμάτινου φράγματος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας δυναμικές μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών, με τις οποίες υπολογίζονται οι αδρανειακές επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στο φράγμα, όπως και οι μόνιμες παραμορφώσεις σε αυτό, κατά την διάρκεια του σεισμού.

Μια ολοκληρωμένη και λεπτομερής ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων απαιτεί εκτενείς βάσεις δεδομένων, καθώς και εξειδικευμένες δεξιότητες. Η μεγαλύτερη δυσκολία στη χρήση αυτής της μεθόδου είναι η κατάστρωση προσομοιωμάτων

που να είναι αντιπροσωπευτικά του εδάφους που πρόκειται να εξεταστεί. Ακόμα, απαιτείται ακριβής χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών στο σώμα του φράγματος, όπως και της θεμελίωσης, καθώς και κατάλληλο ιστορικό σεισμών που να αντιπροσωπεύουν τον σεισμό σχεδιασμού της περιοχής του φράγματος. Επιπλέον, για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των φραγμάτων, χρησιμοποιείται ένα μεγάλο φάσμα προσεγγίσεων, πράγμα που κάνει την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων πολύ δαπανηρή και έτσι επιλέγεται να ακολουθηθεί μόνο για μεγάλα φράγματα που η αστοχία τους θα οδηγήσει σε υψηλά επίπεδα κινδύνου ή φράγματα που βρίσκονται πάνω σε ενεργά ρήγματα.

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

1. Προσδιορισμός της στατικής τάσης από τον σεισμό, χρησιμοποιώντας ένα στατικό αριθμητικό προσομοίωμα του αναχώματος για αρχική αποτελεσματική ορθή και διατμητική τάση και τάση διάτμησης, κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Είναι σύνηθες η πρακτική να χρησιμοποιεί ένα δισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο του μέγιστου τμήματος του φράγματος στην ανάλυση. Τα αριθμητικά προσομοιώματα συνήθως βασίζονται σε προσεγγίσεις πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών.
2. Αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του εδάφους, από επιτόπιες και κυκλικές εργαστηριακές δοκιμές για τις ιδιότητες εδάφους εισόδου, που απαιτούνται στις δυναμικές αναλύσεις.
3. Για το αριθμητικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο Βήμα 1, προσδιορισμός της δυναμικής απόκρισης του φράγματος και της θεμελίωσης χρησιμοποιώντας ικανοποιητικό αριθμό σεισμικών διεγέρσεων. Οι σεισμικές διεγέρσεις πρέπει να περιλαμβάνουν κατάλληλα επιταχυνσιογραφήματα, που αντιπροσωπεύουν σεισμούς μεγέθους και μέγιστης επιτάχυνσης, παρόμοια με εκείνα του σεισμικού σχεδιασμού από τους σεισμούς που καταγράφηκαν σε παρόμοιο γεωλογικό

περιβάλλον. Η απόκριση του φράγματος προσδιορίζεται από δυναμική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή προσομοιωμάτων πεπερασμένων διαφορών, χρησιμοποιώντας είτε ισοδύναμες γραμμικές, είτε μη γραμμικές διαδικασίες.

4. Τα προσομοιώματα τάσεων-παραμορφώσεων που χρησιμοποιούνται στη δυναμική ανάλυση θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις ακόλουθες πτυχές της συμπεριφοράς των υλικών: α) μη γραμμικότητα υλικού, β) εξάρτηση τάσεων-παραμορφώσεων, γ) εξάρτηση από τις τάσεις, δ) εγγενή ανισοτροπία, ε) εξάρτηση από τον βαθμό των παραμορφώσεων. Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος τάσεων-παραμορφώσεων θα πρέπει ιδανικά να βασίζεται σε δοκιμές αδιατάρακτων δειγμάτων.
5. Αξιολόγηση των παραμορφώσεων του αναχώματος, με βάση τις πιθανές παραμορφώσεις για μεμονωμένα στοιχεία.
6. Υπολογισμός συνολικής παραμόρφωσης, με βάση τα φορτία βαρύτητας και τις ιδιότητες του υλικού, για να καθοριστεί αν βρίσκονται στα αποδεκτά όρια.

### **3.2. Κανονισμοί για το σχεδιασμό χωμάτων φραγμάτων**

Ο σωστός σχεδιασμός και η ασφάλεια μεγάλων γεωκατασκευών, όπως είναι τα χωμάτινα φράγματα, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας σε περίπτωση σεισμού. Οι διάφοροι αντισεισμικοί κανονισμοί που υπάρχουν, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε χώρας, είναι το βασικό εργαλείο για την δημιουργία κατασκευών, ανθεκτικών στις ισχυρές καταπονήσεις που προκαλεί ο σεισμός, στο έδαφος και κατ' επέκταση στις κατασκευές. Οι αντισεισμικοί κανονισμοί που ισχύουν σε κάθε χώρα θα πρέπει να ακολουθούνται κατά γράμμα, ιδιαίτερα όταν η σεισμική

επικινδυνότητα της περιοχής του έργου είναι αυξημένη, σε χώρες δηλαδή όπως η Ελλάδα, στις οποίες ο αντισεισμικός σχεδιασμός των γεωκατασκευών είναι μείζονος σημασίας. Έτσι λοιπόν, οι ανάγκες βελτίωσης της κατασκευής των χωμάτινων φραγμάτων, όσον αφορά την σεισμική τους απόκριση, όπως και η τεχνολογική πρόοδος οδήγησε στην ραγδαία εξέλιξη των αντισεισμικών κανονισμών παγκοσμίως. Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούν οι αντισεισμικοί κανονισμοί για τις κατασκευές των φραγμάτων που ισχύουν στην Ελλάδα, αλλά και παγκοσμίως.

### 3.2.1. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός

Στον ελληνικό αντισεισμικό κανονισμό (ΕΑΚ 2000) δεν γίνεται αναφορά στα φράγματα ξεχωριστά, ενώ δίνεται έμφαση στις κτιριακές κατασκευές. Ωστόσο, αυτός αναφέρεται σε πρανή και αναχώματα, που σύμφωνα με αυτά σχεδιάζονται και τα φράγματα, ενώ βασίζεται στην ψευδοστατική μέθοδο. Όσον αφορά τα πρανή, ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός αναφέρει ότι η ευστάθεια των εδαφικών ή τεχνητών πρανών κατά τον σεισμικό κραδασμό θα ελέγχεται με θεώρηση των πρόσθετων επιταχύνσεων, που δρουν στην εδαφική μάζα.

- $\alpha_h = \alpha_\pi$
- $\alpha_v = \pm 0,50 * \alpha_\pi$

Όπου,

$\alpha_h$ : η οριζόντια επιτάχυνση

$\alpha_v$ : η κατακόρυφη επιτάχυνση

$\alpha_\pi$ : η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του πρανούς, που λαμβάνεται ίση με  $0,5 * \alpha$ , για φυσικά πρανή

$\alpha$ : η ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

Παρακάτω φαίνονται οι ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος, καθώς και οι μέγιστες επιταχύνσεις που μπορούν να υπάρξουν σε κάθε μία από αυτές τις ζώνες, σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2000.



**Εικόνα 3.7:** Χάρτες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος

(Πηγή: ΕΑΚ 2000)

**Πίνακας 3.1:** Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος

(Πηγή: ΕΑΚ 2000)

Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
α	0.16	0.24	0.36

Όσον αφορά τα αναχώματα με ύψος μέχρι και 15 μέτρα, η ευστάθεια τους ελέγχεται με θεώρηση πρόσθετων οριζοντίων ενεργών επιταχύνσεων της μάζας τους, που μεταβάλλονται από:

$$\alpha_{\beta}=0,50*\alpha$$

$$\alpha_{\kappa}=\alpha_{\beta}*\beta(T)$$

όπου,

$\alpha$ : η ανηγμένη επιτάχυνση του εδάφους

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

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

όπου,

$V_s$ : η μέση τιμή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων στο ανάχωμα.

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

### 3.2.2. Ευρωπαϊκός Αντισεισμικός Κανονισμός

Στον Ευρωπαϊκό Αντισεισμικό Κανονισμό (EC8, 2004) (όπως και στον Ελληνικό), δεν γίνεται αναφορά στις κατασκευές των φραγμάτων. Ωστόσο γίνεται λόγος για πρανή (όπως και στον ελληνικό), ενώ αποτελεί ουσιαστικά έναν συμπληρωματικό κανονισμό του εθνικού, ιδιαίτερα για σειсмоγενείς χώρες όπως η Ελλάδα. Ο κανονισμός αυτός αναφέρει ότι σε περίπτωση σεισμού θα πρέπει να προστατεύεται η ανθρώπινη ζωή, να περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό οι ζημιές και οι αστοχίες και να εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα των σημαντικών υποδομών. Ως προς τα πρανή, επισημαίνει ότι για αυτά ο σεισμός σχεδιασμού θα υπολογίζεται μέσω απλοποιημένων μεθόδων δυναμικής ανάλυσης, όπως μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ή μέσω μιας ψευδοστατικής μεθόδου. Έτσι, μέσω της ψευδοστατικής ανάλυσης, υπολογίζονται οι πρόσθετες σεισμικές δυνάμεις αδρανείας, που δρουν στο πρανές:



Για την οριζόντια διεύθυνση ισχύει:

$$F_h = \frac{0,5 \cdot \alpha_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S \cdot W}{g}$$

Για την κατακόρυφη διεύθυνση ισχύει:

$$F_v = \pm 0,5 \cdot F_h, \text{ για } \frac{\alpha_{vg}}{\alpha_{gR}} > 0,6$$

$$F_v = \pm 0,33 F_h, \text{ για } \frac{\alpha_{vg}}{\alpha_{gR}} \leq 0,6$$

όπου,

$\alpha_{gR}$ : η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους,

$\alpha_{vg}$ : η επιτάχυνση σχεδιασμού κατά την κατακόρυφη διεύθυνση,

$\gamma_I$ : ένας σημαντικός συντελεστής της κατασκευής,

$S$ : παράμετρος για τον τύπο του εδάφους,

$W$ : το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας,

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας.

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

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο Ευρωπαϊκός Αντισεισμικός Κανονισμός δεν κάνει ειδική αναφορά στην κατασκευή των φραγμάτων, και λόγω της πολυπλοκότητας των φραγμάτων, θα πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένες οδηγίες κατά την κατασκευή τους. Έτσι, για την αντισεισμική σχεδίαση των φραγμάτων, χρησιμοποιούνται ευρέως οι ομοσπονδιακές οδηγίες των ΗΠΑ (FEMA) και οι οδηγίες της διεθνής επιτροπής μεγάλων φραγμάτων (ICOLD) οι οποίες κάνουν εκτενή ανάλυση των κανόνων που πρέπει να ακολουθούνται κατά τον σχεδιασμό των φραγμάτων, όπως και της χωμάτινης κατηγορίας αυτών.

### 3.2.3. Ομοσπονδιακές οδηγίες ΗΠΑ

Οι κατευθυντήριες οδηγίες των ΗΠΑ, που αναλύονται στο FEMA (Federal Guidelines for Dam Safety), παρέχουν ένα βασικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των φραγμάτων, υπό την επίδραση του σεισμού. Η γενική φιλοσοφία και οι αρχές για κάθε τμήμα του πλαισίου περιγράφονται αρκετά λεπτομερώς, ώστε να επιτευχθεί ένας λογικός βαθμός ομοιομορφίας στην εφαρμογή μεταξύ των ομοσπονδιακών υπηρεσιών που εμπλέκονται στο σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη ρύθμιση των φραγμάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η αντοχή των φραγμάτων στις σεισμικές καταπονήσεις.

Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης του σεισμικού κινδύνου σε μια τοποθεσία, εξαρτάται από τη σεισμικότητα μιας περιοχής, τον τύπο του υπεδάφους της και τις συνέπειες που θα υπάρξουν σε περίπτωση αστοχίας της κατασκευής. Ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση των φραγμάτων υπό σεισμική φόρτιση θα πρέπει να βασίζεται σε συγκρίσιμο επίπεδο μελέτης και ανάλυσης για κάθε φάση της μελέτης (σεισμοτεκτονικές, γεωλογικές, γεωτεχνικές και γεωτεχνικές έρευνες). Τα φράγματα σε περιοχές με χαμηλή σεισμικότητα δεν απαιτούν εκτεταμένες σεισμικές έρευνες και αναλύσεις, εκτός αν μια πιθανή αστοχία συνεπάγεται απειλή για την ανθρώπινη ζωή. Απαιτούνται εκτεταμένες έρευνες και αναλύσεις για φράγματα που πρόκειται να σχεδιαστούν σε ζώνες υψηλής επικινδυνότητας, όπου ο κίνδυνος αστοχίας είναι μεγάλος.

Ο σεισμός ή οι σεισμοί που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ή την αξιολόγηση ενός φράγματος έχουν καθοριστεί από διάφορους όρους όπως:

- **ο μέγιστος πιθανός σεισμός (MCE)** : Είναι ο μεγαλύτερος σεισμός που μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος ενός ρήγματος ή μέσα σε μια συγκεκριμένη σεισμοτεκτονική επαρχία ή περιοχή, κάτω από το σημερινό τεκτονικό πλαίσιο.
- **ο μέγιστος σεισμός σχεδιασμού (MDE) ή σεισμός αξιολόγησης ασφάλειας (SEE)**: Αυτός είναι ο μέγιστος σεισμός που παράγεται από

την σεισμική κίνηση, σύμφωνα με τον οποίο έχει σχεδιαστεί ή αξιολογηθεί η κατασκευή. Ο σεισμός αυτός, μπορεί να ρυθμιστεί ίσος ή λίγο μικρότερος, από τον μέγιστο πιθανό σεισμό, ανάλογα τις περιστάσεις. Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον προσδιορισμό του μεγέθους του MDE ή SEE, είναι η ταξινόμηση των κινδύνων του φράγματος (FEMA 1998), η κρισιμότητα της λειτουργίας του έργου (παροχή νερού, αναψυχή, έλεγχος πλημμυρών κλπ), όπως και ο χρόνος για την αποκατάσταση της λειτουργικότητας της εγκατάστασης. Γενικά, η σχετική απαίτηση απόδοσης του MDE ή SEE, είναι η συνέχεια λειτουργίας της κατασκευής, ύστερα από τον σεισμό, χωρίς καταστροφική αποτυχία, όπως η ανεξέλεγκτη απελευθέρωση μιας δεξαμενής, ενώ μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεκτή σημαντική ζημία ή οικονομική απώλεια.

- **ο λειτουργικός σεισμός βάσης (OBE):** Ο OBE είναι ένας σεισμός που εύλογα αναμένεται να συμβεί μέσα στη διάρκεια ζωής του έργου. Η σχετική απαίτηση απόδοσης, είναι το έργο να συνεχίσει να λειτουργεί με ελάχιστες ή καθόλου ζημιές και χωρίς διακοπή της λειτουργίας του. Σκοπός του OBE είναι η προστασία από οικονομικές απώλειες, από ζημιές ή απώλειες υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, η περίοδος επιστροφής για το OBE, μπορεί να βασίζεται σε οικονομικούς λόγους.

Όσον αφορά τα χωμάτινα φράγματα ο Αμερικάνικος Αντισεισμικός Κανονισμός, αναφέρεται συγκεκριμένα σε αυτά, σε αντίθεση με τους προηγούμενους. Συγκεκριμένα, αναφέρει ότι το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό ή την αξιολόγηση κάθε φράγματος είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το φράγμα μπορεί να αστοχήσει. Οι κυριότερες βλάβες που μπορούν να προκληθούν από έναν σεισμό και να οδηγήσουν ένα χωμάτινο φράγμα στην αστοχία, είναι η υπερχείλιση του ταμιευτήρα και οι ρωγμές και εν συνεχεία η εσωτερική διάβρωση, προβλήματα που έχουν αναλυθεί εκτενώς στις προηγούμενες ενότητες.

Πολλές καταστάσεις που θα μπορούσαν να εξελιχθούν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή φθοράς του φράγματος, εάν αυτό δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά, δεν απαιτούν πάντα εκτεταμένη αναλυτική αξιολόγηση. Η απλή εφαρμογή αμυντικών μέτρων μπορεί πολλές φορές να διορθώσει κάποιο πρόβλημα που έχει προκύψει στην κατασκευή. Ωστόσο, λάθος σχεδιασμένα αμυντικά μέτρα ενδέχεται να επεκτείνουν το πρόβλημα. Τέτοια αμυντικά μέτρα μπορεί να είναι:

- Αφαίρεση των υλικών θεμελίωσης που ενδέχεται να παρουσιάζουν προβλήματα.
- Χρησιμοποίηση μεγάλων ζωνών πυρήνα από πλαστικά υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση.
- Χρησιμοποίηση ζωνών ευρέως διαβαθμισμένου φίλτρου ανάντη του πυρήνα, ώστε να αποφευχθούν τυχόν ρωγμές που μπορεί να ανοίξουν, όπως και κατάντη, για να αποτραπεί η κίνηση σωματιδίων που διαβρώνονται από τον πυρήνα.
- Χρησιμοποίηση λεπτομερειών στέψης και προστασία κατάντη κλίσης, που θα αποτρέψει ή θα εμποδίσει σε μεγάλο βαθμό διάβρωση σε περίπτωση μέτριας υπερπλήρωσης.
- Ψέκαση του πυρήνα του αναχώματος στις επαφές στήριξης.
- Εντοπισμός του πυρήνα, ώστε να επιτευχθεί η χαμηλότερη δυνατή φρεατική γραμμή μέσα στο ανάχωμα.
- Σταθεροποίηση των πλαγιών γύρω από τη δεξαμενή, για να αποφευχθούν οι ολισθήσεις μέσα στη δεξαμενή.
- Παροχή ειδικών λεπτομερειών για τη διεπαφή βάσης-θεμελίωσης, εάν υπάρχει η πιθανότητα μετακίνησης της βάσης στην θεμελίωση.
- Παροχή μεγάλου ελεύθερου περιθωρίου, ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα σε περίπτωση καθιζήσεων, ή πτώσεων υλικών στον ταμιευτήρα.
- Συμπαγή υλικά γεμίσματος αναχώματος, κατάλληλα για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση της δημιουργίας υπερβολικών πιέσεων πόρων.
- Παροχή φίλτρων ή άλλων μέτρων για την αποτροπή της διάβρωσης, κατά μήκος του εξωτερικού μέρους των αγωγών.

Για ένα φράγμα και μια θεμελίωση που δεν υπόκεινται σε ρευστοποίηση, μπορεί να σημειωθούν δευτερεύουσες παραμορφώσεις, που δεν θα οδηγήσουν σε αστοχία εάν πληρούνται όλες οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Τα υλικά του φράγματος και της θεμελίωσης δεν περιλαμβάνουν χαλαρά εδάφη ή ευαίσθητους αργίλους.
- Το φράγμα είναι καλά κατασκευασμένο και συμπυκνωμένο, τουλάχιστον στο 95% του μέγιστου βαθμού ξηρότητας από το εργαστήριο ή σε σχετική πυκνότητα μεγαλύτερη από 80%.
- Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στη βάση του φράγματος, να μην είναι μεγαλύτερη από 0,2g.
- Οι στατικοί συντελεστές ασφαλείας σε όλες τις πιθανές επιφάνειες αστοχίας να έχουν τιμή μεγαλύτερη από 1,5, υπό συνθήκες φόρτισης και πίεσης των πόρων που αναμένονται, αμέσως πριν από το σεισμό.
- Οι κυματισμοί κατά τη διάρκεια του σεισμού να είναι τουλάχιστον το 3%-5% του ύψους του φράγματος και όχι μικρότερο από 0,9 μέτρα.
- Δεν θα πρέπει να υπάρχουν κρίσιμα στοιχεία που θα εμφανίσουν βλάβες από μικρές κινήσεις του φράγματος ή να προκαλέσουν ρωγμές οδηγώντας σε εσωτερική διάβρωση.

Εάν δεν πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, απαιτείται λεπτομερέστερη μελέτη. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης, της ανάλυσης σταθερότητας μετά το σεισμό και της ανάλυσης των παραμορφώσεων. Εάν δεν υπάρχουν υλικά που μπορούν να ρευστοποιηθούν, αυτό μπορεί να γίνει συνήθως με την απλή προσέγγιση της ολίσθησης πρανούς του Newmark. Σε καταστάσεις όπου μπορεί να αναπτυχθεί υπερβολική πίεση των πόρων, ίσως είναι απαραίτητο να διεξαχθούν πιο λεπτομερείς αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Ο στόχος των αναλύσεων αυτών είναι να προσδιοριστεί κατά πόσο οι πιθανές κινήσεις είναι ικανές να προκαλέσουν την υπερχειλίση του ταμιευτήρα ή εάν οι ρωγμές σε κρίσιμες θέσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχία, λόγω εσωτερικής διάβρωσης. Από αυτά τα αποτελέσματα και την ιστορική απόδοση των χωμάτινων φραγμάτων που

έχουν υποβληθεί σε σεισμική φόρτιση, πρέπει να γίνει μια εκτίμηση αν το φράγμα και η θεμελίωση μπορεί να είναι ασφαλή παρά την σεισμική φόρτιση.

### 3.2.4. Οδηγίες της Διεθνούς Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων

Η διεθνής επιτροπή μεγάλων φραγμάτων (ICOLD) δημιούργησε ορισμένες κατευθυντήριες οδηγίες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό μεγάλων και σημαντικών φραγμάτων. Ένα μεγάλο φράγμα, σύμφωνα με τον ορισμό του ICOLD, είναι υψηλότερο από 15 μέτρα ύψος ή έχει ύψος μεταξύ 10 και 15 μέτρων και ικανοποιεί ένα από τα ακόλουθα κριτήρια:

α) μήκος άνω των 500 μέτρων

β) χωρητικότητα δεξαμενής άνω του  $10^6 \text{ m}^3$

γ) ποσότητα υπερχείλισης άνω των  $2000 \text{ m}^3 / \text{sec}$

Η σημασία των φραγμάτων αυτών και οι πιθανές συνέπειες σε περίπτωση αστοχίας τους, οδήγησαν στην δημιουργία της επιτροπής αυτής και στην δημιουργία κατευθυντήριων οδηγιών για την προστασία τους σε περίπτωση σεισμού.

Η χρήση αποτελεσματικών σεισμικών παραμέτρων είναι απαραίτητη για την ικανοποιητική αξιολόγηση της σεισμικής ασφάλειας των φραγμάτων. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές έχουν σκοπό να βοηθήσουν τον υπεύθυνο του έργου να επιλέξει παραμέτρους σεισμικής αξιολόγησης για φράγματα, βάση των απαιτήσεων της τοποθεσίας του έργου και τον κίνδυνο που θα υπάρξει από μια πιθανή αστοχία του έργου. Η σεισμική μελέτη συμπληρώνεται από αποτελεσματικές διαδικασίες ελέγχου κατασκευών και συνεχή παρακολούθηση της απόδοσης του έργου μετά την ολοκλήρωσή του. Θα πρέπει να τονιστεί ότι ανεξάρτητα από τις σεισμικές παραμέτρους και τις μεθόδους ανάλυσης που επιλέχθηκαν, η τελική αξιολόγηση της σεισμικής ασφάλειας του φράγματος, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική κρίση των μηχανικών και την εμπειρία του σε παρόμοιες κατασκευές.

Οι κατευθυντήριες οδηγίες της διεθνούς επιτροπής μεγάλων φραγμάτων, περιλαμβάνουν γενικές οδηγίες για την επιλογή παραμέτρων σεισμικής αξιολόγησης, για την ανασκόπηση της ασφάλειας των υφιστάμενων μεγάλων φραγμάτων και για την παροχή αντισεισμικού σχεδιασμού για οποιαδήποτε νέα κατασκευή. Αυτές οι οδηγίες καλύπτουν τα ακόλουθα θέματα:

- Πρωτογενείς παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν στο αντισεισμικό σχεδιασμό.

Για την ανάπτυξη των σεισμικών παραμέτρων που απαιτούνται για τον σεισμικό σχεδιασμό ή την αξιολόγηση της απόδοσης των φραγμάτων απαιτούνται τυπικά εκτιμήσεις σεισμικού κινδύνου. Μια εκτίμηση σεισμικού κινδύνου απαιτεί τα εξής:

1. Εντοπισμός πιθανών πηγών σεισμών
2. Αξιολόγηση των χαρακτηριστικών κάθε πιθανής πηγής σεισμού, όπως τις γεωλογικές συνθήκες, τα μεγέθη και τους ρυθμούς δραστηριότητας
3. Εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του εύρους της εδαφικής κίνησης

- Επιλογή σεισμών σχεδιασμού για ανάλυση.

Ο σεισμικός σχεδιασμός νέων φραγμάτων ή η αξιολόγηση των σεισμικών επιδόσεων των υφιστάμενων φραγμάτων, απαιτεί ορισμό των “σεισμών σχεδιασμού”, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις κατάλληλες σεισμικές παραμέτρους που πρέπει να εφαρμόζονται στην εκτίμηση σχεδιασμού ή απόδοσης (π.χ. μέγεθος, επιτάχυνση, φασματικές συντεταγμένες, διάρκεια κλπ). Αυτές οι παράμετροι, συνήθως αναπτύσσονται με αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου. Γενικά είναι σκόπιμο να εκτιμηθεί η σεισμική απόδοση, σε μία ή περισσότερες συνθήκες σεισμικού σχεδιασμού. Στον συγκεκριμένο κανονισμό εξετάζονται οι ακόλουθοι σεισμικοί σχεδιασμοί:

1. **Μέγιστος πιθανός σεισμός (MCE):** αναλύεται όπως στην ενότητα 3.2.3
2. **Σεισμός Αξιολόγησης Ασφάλειας (SEE):** αναλύεται όπως στην ενότητα 3.2.3

3. **Λειτουργικός σεισμός (OBE):** αναλύεται όπως στην ενότητα 3.2.3
4. **Σεισμός που ενεργοποιείται από την δεξαμενή (RTE):**  
Αντιπροσωπεύει το μέγιστο επίπεδο εδαφικής κίνησης, που μπορεί να δημιουργηθεί στο φράγμα με την πλήρωση ή την εκκένωση του ταμιευτήρα. Η μελέτη του RTE έχει αναφερθεί ότι συνδέεται γενικά με φράγματα υψηλότερα των 100 m ή με μεγάλες δεξαμενές (χωρητικότητα άνω των  $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), καθώς και με νέα φράγματα μικρού μεγέθους ευρισκόμενα σε τεκτονικά ευαίσθητες περιοχές. Ανάλογα με τη θέση του φράγματος και τις επικρατούσες σεισμοτεκτονικές συνθήκες, ο RTE μπορεί να αντιπροσωπεύει κίνηση μικρότερη, ίση ή μεγαλύτερη από τον OBE. Ωστόσο, ο RTE δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι μεγαλύτερος από τον σεισμό αξιολόγησης της ασφάλειας (SEE) και οι παράγοντες που είναι πιθανόν να προκαλέσουν σεισμικότητα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία αξιολόγησης.

- Επιλογή σεισμικών παραμέτρων για αξιολόγηση

Οι σεισμικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των επιδόσεων του φράγματος σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά κίνησης του εδάφους, όπως είναι η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η μετατόπιση, τα φάσματα απόκρισης και οι χρονοϊστορίες των εδαφικών επιταχύνσεων που χαρακτηρίζουν τον SEE και τον OBE. Οι σεισμικές παράμετροι αξιολόγησης συχνά χρησιμεύουν για τα αρχικά δεδομένα ανάλυσης σε αριθμητικές αναλύσεις ενός φράγματος, με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των επιδόσεων και της ασφάλειας του φράγματος. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες για τον προσδιορισμό των σεισμικών παραμέτρων αξιολόγησης είναι:

1. Η κατάταξη της τοποθεσίας.
2. Οι φυσικές ιδιότητες και το πάχος των υλικών θεμελίωσης.
3. Η απόσταση από τη ζώνη απελευθέρωσης της ενέργειας.
4. Το είδος ρηγμάτων.



- Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των σεισμικών παραμέτρων

Οι στόχοι του σχεδιασμού και του ελέγχου των πιθανών τρόπων αστοχίας ενός φράγματος είναι η ανάλυση των απαιτήσεων του φράγματος και κατά συνέπεια ο τρόπος που επιλέγονται και καθορίζονται οι σεισμικές παράμετροι για την αξιολόγηση. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις προδιαγραφές των σεισμικών παραμέτρων είναι οι ακόλουθοι:

1. Οι πιθανές συνέπειες αστοχίας της κατασκευής.
2. Το είδος του φράγματος και των πιθανών τρόπων αστοχίας.

Όσον αφορά τα χωμάτινα φράγματα, η διεθνής επιτροπή μεγάλων φραγμάτων αναφέρει ότι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των χωμάτινων φραγμάτων που υποβάλλονται σε σεισμό έχουν να κάνουν, είτε με την απώλεια της σταθερότητας τους, εξαιτίας της απώλειας της αντοχής του επιχωματικού υλικού ή των υλικών θεμελίωσης, είτε λόγω υπερβολικής μόνιμης παραμόρφωσης. Οι αναλύσεις στα φράγματα αυτά μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση της μεθόδου Newmark ή λεπτομερών γραμμικών ή μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, όπως έχει αναλυθεί. Θα πρέπει πάντα να επιχειρούνται απλοποιημένες διαδικασίες προτού χρησιμοποιηθούν πιο λεπτομερείς και πολύπλοκες μέθοδοι, για την έγκαιρη ενημέρωση σχετικά με τις συνέπειες των επιλεγμένων σεισμικών παραμέτρων. Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ότι οι ψευδοστατικές αναλύσεις δεν μπορούν να οδηγήσουν σε ασφαλή αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, εάν τα υλικά του φράγματος δεν είναι ευαίσθητα σε απώλεια ακαμψίας και αντοχής και οι εκτιμήσεις κινδύνου και επικινδυνότητας είναι χαμηλές, οι απλουστευμένες διαδικασίες και η εξαγωγή παραγόντων σεισμικών φορτίσεων από συγκεκριμένες παραμέτρους της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους, μπορεί να δώσουν μια χρήσιμη πρώτη ένδειξη σταθερότητας.

Για την εκτίμηση της απόδοσης των χωμάτινων φραγμάτων σε τάξεις υψηλού κινδύνου, συχνά εκτελούνται λεπτομερείς διαδικασίες (όπως αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων) και απαιτούνται ιστορικά δεδομένα επιτάχυνσης, ως

παράμετροι σεισμικής αξιολόγησης. Τα φράγματα αυτά έχουν θεμελιώδεις περιόδους δονήσεων που συχνά κυμαίνονται μεταξύ 0,5 και 1,5 sec και για χρήση σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται χρονικά βήματα της τάξεως των 0,05 sec. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιηθούν αναλύσεις μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται εξαιρετικά μικρό χρονικό βήμα της τάξης του 0,001 sec ή και μικρότερο.

Εάν η θεμελίωση και τα υλικά του φράγματος δεν είναι ευαίσθητα σε απώλεια ακαμψίας και αντοχής ή εάν το ανάχωμα δεν είναι κορεσμένο, η δυναμική ανάλυση του φράγματος, θα χρησιμεύσει ως βάση για την εκτίμηση των μόνιμων μετατοπίσεων που προκαλούνται από σεισμό, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους του Newmark ή άλλες μεθόδους. Εάν η θεμελίωση ή τα υλικά του φράγματος χάσουν την ακαμψία και την αντοχή τους, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια δυναμική ανάλυση του φράγματος, για τον υπολογισμό των τάσεων που προκαλούνται και να υπολογιστεί εάν οι προκαλούμενες από σεισμό καταπονήσεις, είναι επαρκείς για να προκαλέσουν αστάθεια. Για τη λεπτομερή ανάλυση ενός χωμάτινου φράγματος, οι σεισμικοί παράμετροι αξιολόγησης δεν μπορούν να προσδιοριστούν άμεσα από τα φάσματα απόκρισης, καθώς η ανάπτυξη αυξημένων πιέσεων πόρων ή οι υπερβολικές παραμορφώσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού. Ωστόσο, μια καθορισμένη φασματική μορφή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός, για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των επιλεγμένων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης.

Συχνά θεωρείται ότι η δυναμική απόκριση των χωμάτινων φραγμάτων δεν απαιτεί τη συνεκτίμηση της κατακόρυφης συνιστώσας του εδάφους ή των υδροδυναμικών επιδράσεων του νερού δεξαμενής. Ωστόσο, αυτοί οι παράγοντες μπορεί να χρειαστεί να ληφθούν υπόψη για χωμάτινα φράγματα με απότομες κλίσεις. Τέλος, η απόσβεση για φράγματα αναχώρησης κυμαίνεται μεταξύ 5% και 20%. Για ισχυρή σεισμική διέγερση είναι πιθανό να υπερβεί το 15%.

### 3.3. Παραδείγματα αντισεισμικού σχεδιασμού φραγμάτων

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται κάποια παραδείγματα σχεδιασμού χωμάτινων φραγμάτων, ως προς τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους. Επισημαίνεται ότι, οι μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν στην ενότητα αυτή έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν από άλλους ερευνητές και σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται ότι πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

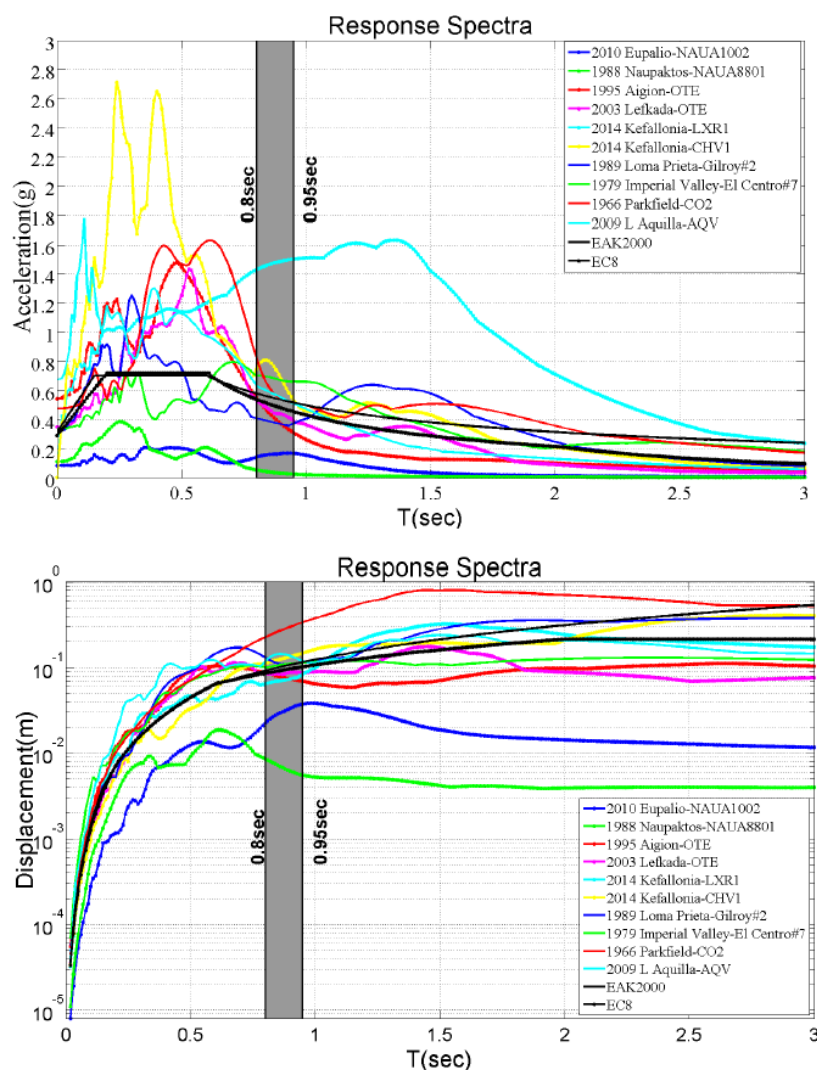
#### 3.3.1. Φράγμα Μόρνου

Σύμφωνα με την διδακτορική διατριβή της Ελένης Κατσαούνου, με θέμα “Σεισμική Απόκριση και Αποτίμηση της Οριακής Αντοχής Χωμάτινων φραγμάτων”, που έγινε στο Πολυτεχνείο της Πάτρας το 2016, λήφθηκαν τα δεδομένα της υποενότητας αυτής, για την εξυπηρέτηση της παρούσας εργασίας.

Στην συγκεκριμένη εργασία, διερευνάται η σεισμική απόκριση του χωμάτινου φράγματος του Μόρνου, ύψους 139 μέτρων, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή της Φωκίδας, στην Δυτική Ελλάδα, σε δύο στάδια που περιλαμβάνουν α) τη ρεαλιστική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής με την επιλογή δέκα σεισμικών διεγέρσεων σύμφωνα και με τα φάσματα σχεδιασμού (EAK2000 και EC8) και β) την εφαρμογή της ισοδύναμης γραμμικής δυναμικής ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό ANSYS (ANSYS 14.0). Ουσιαστικά, η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση αφορά στον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας  $[K]$  και του μητρώου απόσβεσης  $[C]$ , μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας σύμφωνα με τις αντιπροσωπευτικές τιμές των διατμητικών παραμορφώσεων, που αναπτύσσονται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο, σε κάθε χρονικό βήμα της ανάλυσης.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της ευρύτερης περιοχής του φράγματος του Μόρνου με μια ρεαλιστική επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα φάσματα σχεδιασμού EAK2000

και EC8. Λόγω της έλλειψης επαρκούς αριθμού ισχυρών ιστορικών καταγραφών στην ευρύτερη περιοχή του χωμάτινου φράγματος του Μόρνου, η επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων βασίζεται στο φάσμα σχεδιασμού που προτείνεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ2000) και τον Ευρωκώδικα (EC8) για τις σχετικές ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, σε συνδυασμό με την ύπαρξη γνωστών ρηγμάτων στο εγγύς πεδίο. Στην Εικόνα 3.8 φαίνονται τα φάσματα των επιταχύνσεων και των μετακινήσεων που επιλέχθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία.



**Εικόνα 3.8:** Φάσματα επιτάχυνσης (άνω) και μετακίνησης (κάτω) σχεδιασμού του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000) και του Ευρωκώδικα 8 (EC8), όπως ορίζονται για τη σεισμική ζώνη του φράγματος Μόρνου μαζί με τα 5% ελαστικά φάσματα απόκρισης των δέκα ιστορικών καταγραφών που πληρούν τις φασματικές απαιτήσεις στη γειτονιά της πρώτης ιδιοπεριόδου του φράγματος  $0.8\text{sec} \leq T_1 \leq 0.95\text{sec}$

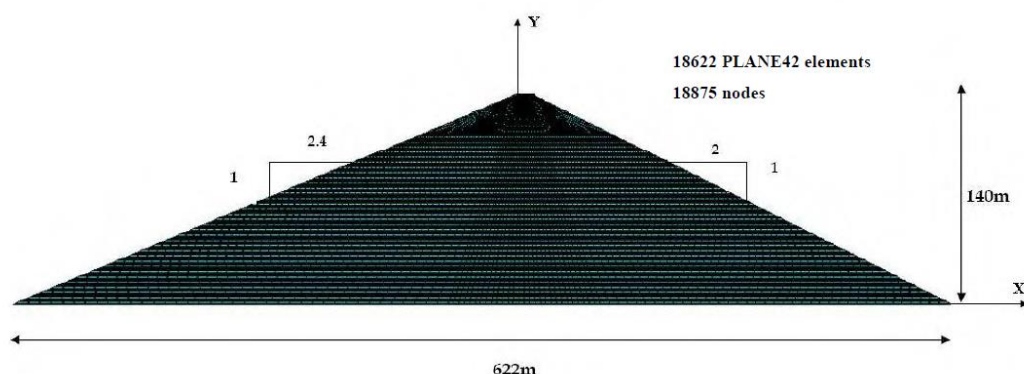
(Πηγή: Κατσαούνου, 2016)

Στη συνέχεια, επιλέγονται κατάλληλα οι τιμές του μέτρου διάτμησης  $G$  και του λόγου ιδιοαπόσβεσης  $\xi_n$ , με μία επαναληπτική διαδικασία, εφόσον εξαρτώνται από το επίπεδο των διατμητικών παραμορφώσεων, που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης.

Η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση λαμβάνει 2 χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

α. ακόρεστου φράγματος με άδειο ταμιευτήρα

Η σεισμική ανάλυση με τη χρήση του λογισμικού ANSYS πραγματοποιείται στην μέγιστη διατομή του χωμάτινου φράγματος του Μόρνου με άδειο ταμιευτήρα, με την παραδοχή ότι το φράγμα εδράζεται σε άκαμπτη βάση. Για τη διακριτοποίηση του φορέα χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης PLANE42, τα οποία ορίζονται με τέσσερις κόμβους, όπου δύο βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο και αφορούν στις μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9.

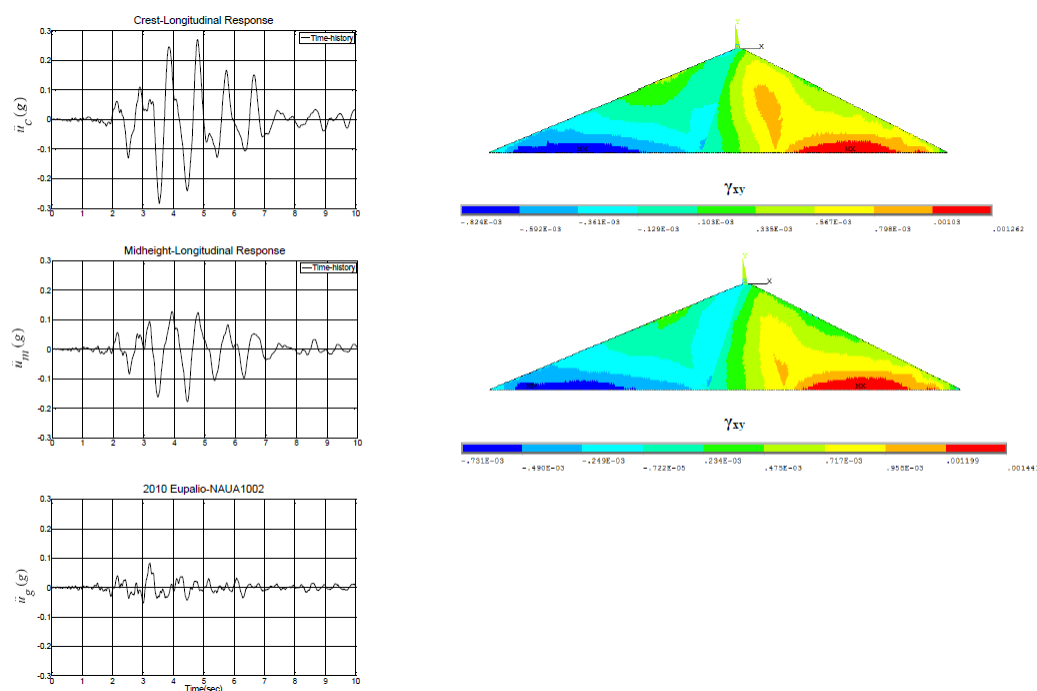


**Εικόνα 3.9:** Κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στη στατική ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης της μέγιστης διατομής του χωμάτινου φράγματος του Μόρνου.

(Πηγή: Κατσαούνου, 2016)

Επιλύεται μια εξίσωση κίνησης, με ισοδύναμη γραμμική ανάλυση, με εν χρόνο ολοκλήρωση (time-history analysis) για το μητρώο ακαμψίας  $[K]$  και το μητρώο της απόσβεσης  $[C]$ , του χωμάτινου φράγματος, εφαρμόζοντας Full Transient Analysis. Μια από τις περιπτώσεις της απόκρισης του ακόρεστου φράγματος, με άδειο ταμιευτήρα που προέκυψαν στην μελέτη αυτή, παρουσιάζεται στην

Εικόνα 3.10, με τη μορφή χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης στη στέψη και στο μέσο ύψος του φράγματος, μαζί με το αντίστοιχο πεδίο παραμορφώσεων, που αντιστοιχεί στη στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση απόκρισης, όταν το φράγμα διεγείρεται από την σεισμική καταγραφή.

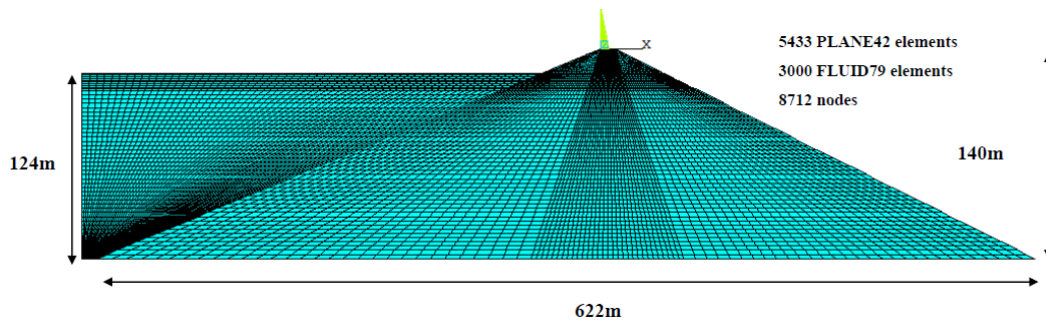


**Εικόνα 3.10:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης (g) στη στέψη (επάνω-αριστερά) και στο μέσο ύψος (κέντρο-αριστερά) και το αντίστοιχο πεδίο παραμορφώσεων του φράγματος Μόρνου με άδειο ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στη στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση όταν διεγείρεται από την καταγραφή NAUA1002 κατά το σεισμό του Ευπαλίου 2010.

(Πηγή: Κατσαούνου, 2016)

β. φράγματος με κορεσμένο το ανάντη κέλυφος και πλήρη ταμιευτήρα.

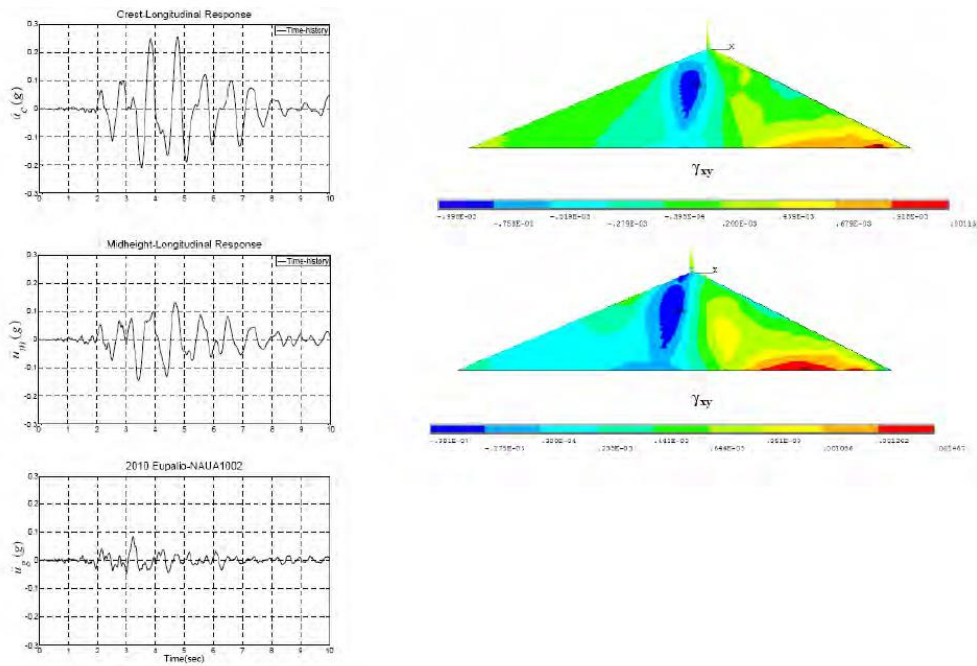
Η σεισμική ανάλυση με τη χρήση του λογισμικού ANSYS, πραγματοποιείται στην μέγιστη διατομή του χωμάτινου φράγματος του Μόρνου με κορεσμένο το ανάντη κέλυφος και πλήρη ταμιευτήρα, θεωρώντας οριακές συνθήκες πάκτωσης στη βάση του συστήματος και αλληλεπίδραση φράγματος-ταμιευτήρα. Η διακριτοποίηση του φράγματος, υλοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης PLANE42 και η διακριτοποίηση του ταμιευτήρα με τα στοιχεία FLUID79, σύμφωνα με την εικόνα 3.11.



**Εικόνα 3.11:** Κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στη στατική ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης της μέγιστης διατομής του χωμάτινου φράγματος Μόρνου με πλήρη ταμιευτήρα

(Πηγή: Κατσαούνου, 2016)

Όλα τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν, ορίζονται με τέσσερις κόμβους, όπου δύο βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο και αφορούν στις μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Προκειμένου να ικανοποιηθεί η συμβατότητα των μετατοπίσεων στις δύο διευθύνσεις, οι κόμβοι των στοιχείων κατά μήκος της διεπιφάνειας φράγματος- ταμιευτήρα αποτελούν ζεύγη. Το νερό θεωρείται ότι είναι συμπιεστό, ενώ το ιξώδες του νερού θεωρείται αμελητέο. Επιλύονται οι εξισώσεις της κίνησης, για την αλληλεπίδραση φράγματος-ταμιευτήρα, με ισοδύναμη γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, εφαρμόζοντας Full Transient Analysis. Μια περίπτωση από την μελέτη, που έγινε για τη δυναμική απόκριση του φράγματος με κορεσμένο το ανάντη κέλυφος και πλήρη ταμιευτήρα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12 με τη μορφή χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης στη στέψη και στο μέσο ύψος του φράγματος, μαζί με το αντίστοιχο πεδίο παραμορφώσεων, που αντιστοιχεί στη στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση απόκρισης, όταν διεγείρεται από την σεισμική καταγραφή.



**Εικόνα 3.12:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης (g) στη στέψη (επάνω- αριστερά) και στο μέσο ύψος (κέντρο- αριστερά) και το αντίστοιχο πεδίο παραμορφώσεων του φράγματος Μόρνου με κορεσμένο το ανάντη κέλυφος και πλήρη ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στη στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση όταν διεγείρεται από την καταγραφή NAUA1002 κατά το σεισμό του Ευπαλίου 2010.

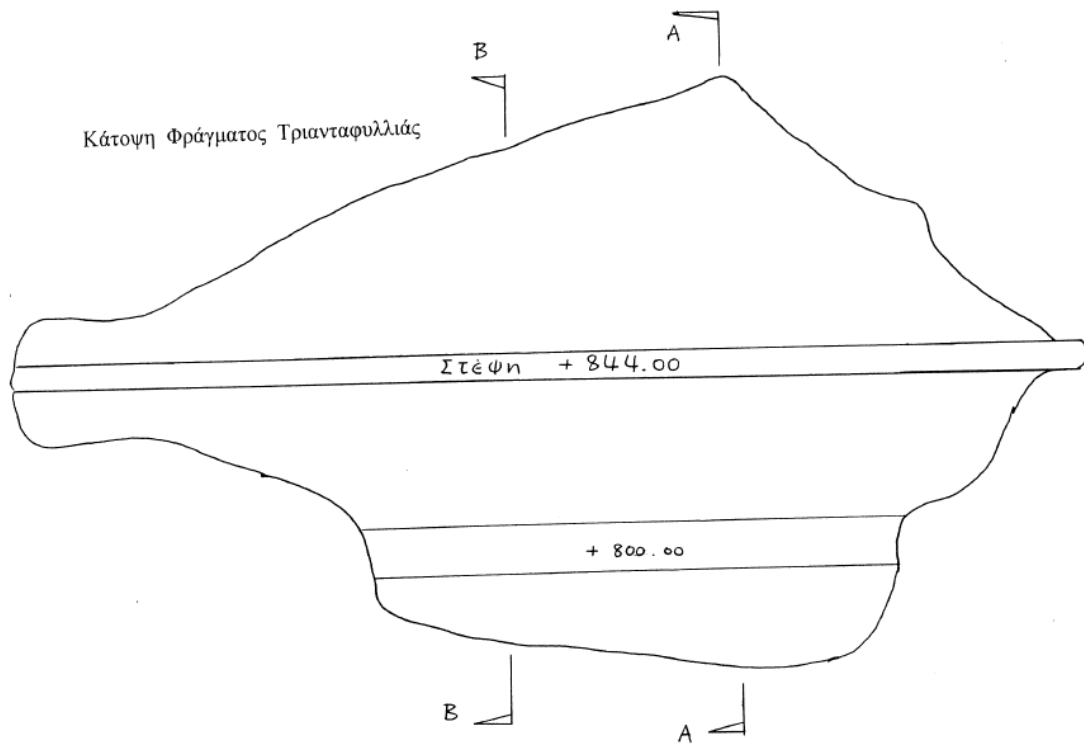
(Πηγή: Κατσαούνου, 2016)

### 3.2.3. Φράγμα Τριανταφυλλιάς

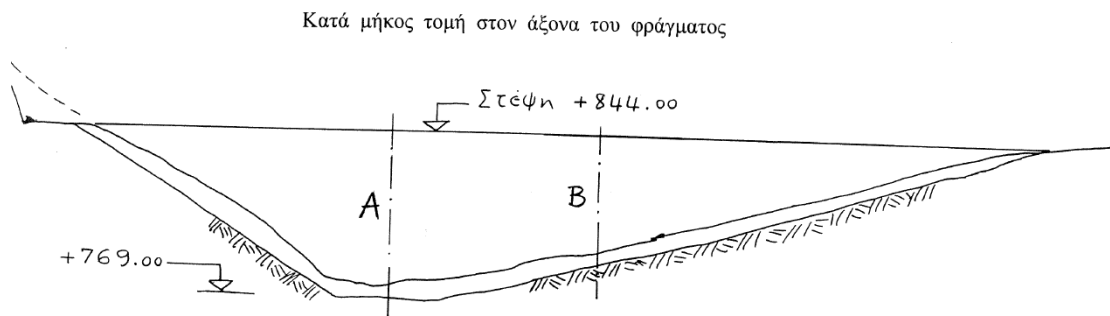
Σύμφωνα με την οριστική μελέτη του φράγματος της Τριανταφυλλιάς του Νομού Φλωρίνης, του ΥΠΕΧΩΔΕ/ ΓΓΔΕ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (Δ7)- ΤΜΗΜΑ ΜΕΛΕΤΩΝ (Δ7/β) που πραγματοποιήθηκε από τον Γ. Γκαζέτα το 1998, παρουσιάζεται η μελέτη για τον αντισεισμικό σχεδιασμό του φράγματος αυτού.

Το φράγμα της Τριανταφυλλιάς, είναι ύψους 75 μέτρων, με λιθορριπή στο σώμα του και κεντρικό αργιλικό πυρήνα. Στις Εικόνες 3.13, 3.14, 3.15, παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία όσον αφορά την γεωμετρία και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο φράγμα, όπως προέκυψαν από την συγκεκριμένη μελέτη.

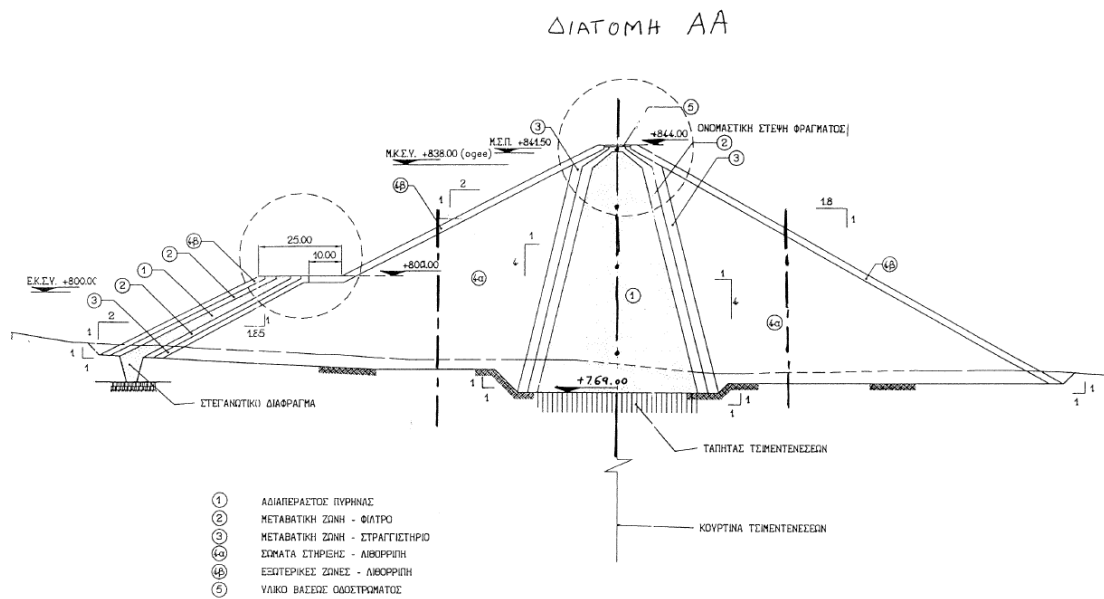




**Εικόνα 3.13:** Κάτοψη φράγματος Τριανταφυλλιάς  
(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)



**Εικόνα 3.14:** Κατά μήκος τομές στον άξονα του φράγματος  
(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)

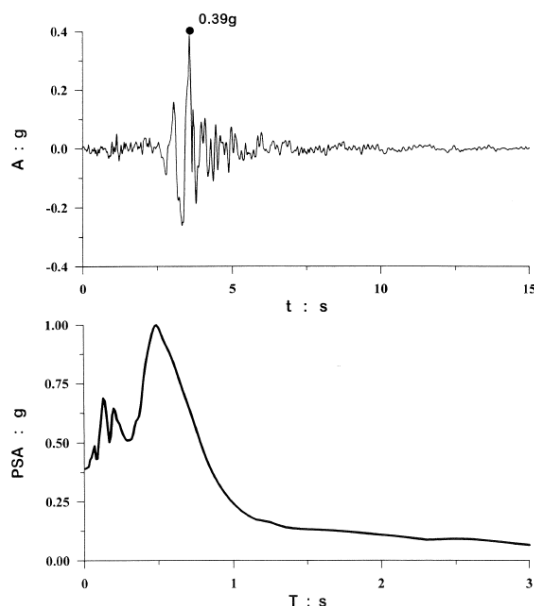


**Εικόνα 3.15:** Διατομή ΑΑ του φράγματος

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)

Ύστερα από λεπτομερή εξέταση του σεισμοτεκτονικού πλαισίου της ευρύτερης περιοχής και της ιστορικής σεισμικότητας της, η ερευνητική ομάδα, κατέληξε σε ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για τα μεγέθη των σεισμών που έχουν εμφανιστεί, όπως και για αυτά που θα μπορούσαν να εμφανιστούν στην συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, για το φράγμα αυτό λήφθηκαν 3 ιστορικά επιταχυνσιογραφήματα στη βάση του φράγματος, μετά από υποκλιμάκια αναγωγή τους, ώστε η κορυφαία τιμή της επιτάχυνσης να είναι  $A = 0,20g$ , όπως προέκυψε μετά από ολοκληρωμένη θεώρηση του προβλήματος, με βάση τις μελέτες της σεισμολογίας και σεισμοτεκτονικής.

ΑΙΓΙΟ 1995 (κτ. ΟΤΕ)  
ΔΙΕΓΕΙΡΩΝ ΚΡΑΔΑΣΜΟΣ στο ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟ



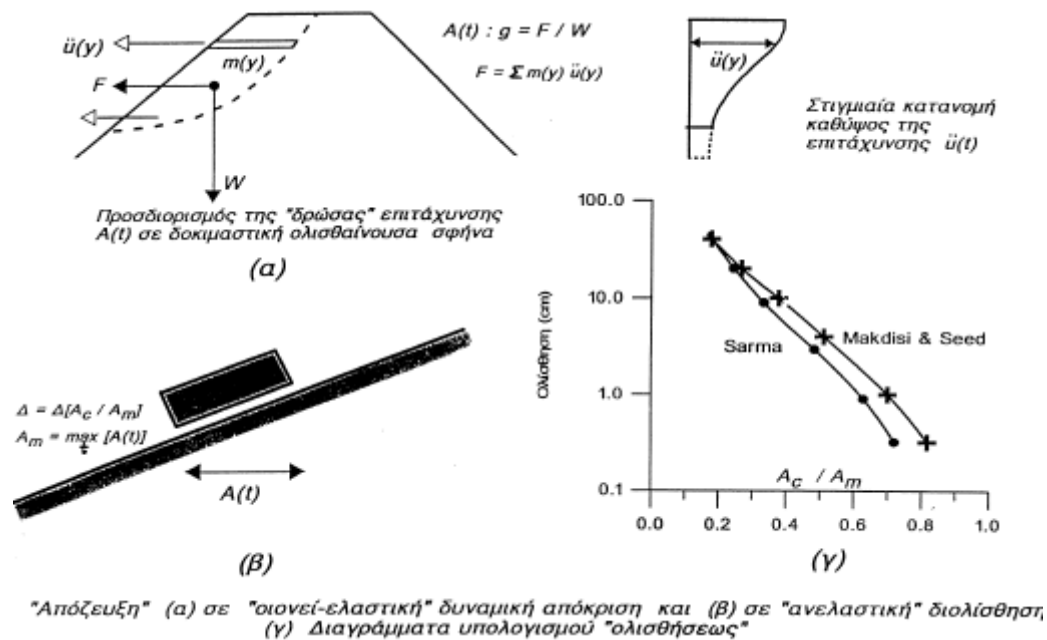
**Εικόνα 3.16:** Ένα από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα που λήφθηκαν για την βάση του φράγματος, μαζί με το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)

Η όλη φιλοσοφία της ανάλυσης της σεισμικής συμπεριφοράς και του έλεγχου της σεισμικής επάρκειας του φράγματος, στηρίζεται στον ρεαλιστικό υπολογισμό της μη γραμμικής απόκρισης του φράγματος, θεωρούμενου ως συνεχούς μέσου και διεγειρομένου με ρεαλιστικά επιταχυνσιογραφήματα. Για την υλοποίηση της ανωτέρω μεθοδολογίας, χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατες αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης της συμπεριφοράς δύο τυπικών εγκάρσιων διατομών, της τομής Α'Α και Β'Β. Δεδομένου ότι ο λόγος ύψους προς μήκος του φράγματος είναι μικρότερος του 5, η δισδιάστατη προσομοίωση των διατομών του φράγματος κρίνεται ικανοποιητική. Η δισδιάστατη προσομοίωση των διατομών, γίνεται μέσω πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων κίνησης, γίνεται με την χρήση του λογισμικού QUAD4M. Το λογισμικό αυτό, θεωρεί το εδαφικό υλικό του φράγματος ως ισοδύναμο γραμμικό με απόσβεση υστερητικής μορφής και κάνει χρήση επαναληπτικής διαδικασίας δοκιμασίας-ελέγχου-διόρθωσης, όπου μετά από κάθε δοκιμαστική ανάλυση, επαναπροσδιορίζεται το τέμνον μέτρο διατμήσεως

$G$  και ο βαθμός αποσβέσεως  $\xi$ , ώστε αυτά να είναι συμβιβαστά με την υπολογισθείσα διατμητική παραμόρφωση  $\gamma$ . Με αυτόν τον τρόπο το πρόγραμμα, συγκλίνει σε συμβιβαστά μεγέθη  $G$ ,  $\xi$ ,  $\gamma$ , σε κάθε εδαφικό στοιχείο.

Για τον υπολογισμό των μόνιμων μετατοπίσεων που προκαλούνται από στιγμιαίες ολισθήσεις ενός πρίσματος (σφήνας), ακολουθείται η γνωστή απόζευξη της οινει-ελαστικής απόκρισης της εν λόγω σφήνας από την ολίσθηση μιας ισοδύναμης μάζας, στηριγμένης επί κεκλιμένου επιπέδου, με έναν ισοδύναμο συντελεστή τριβής (μέθοδος Newmark 1965).

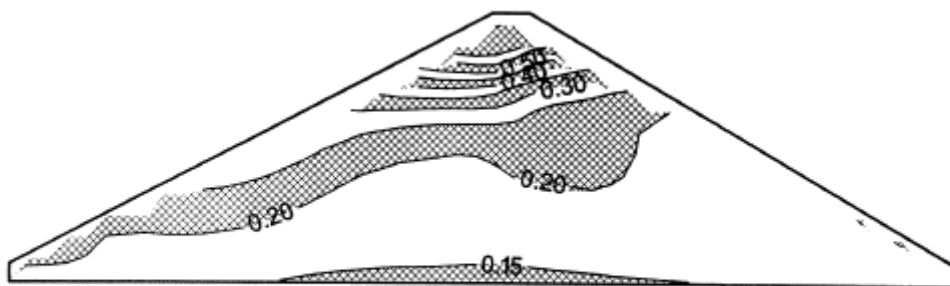


Εικόνα 3.17: Περιγραφή μεθόδου υπολογισμού ολισθήσεως σφήνας

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)

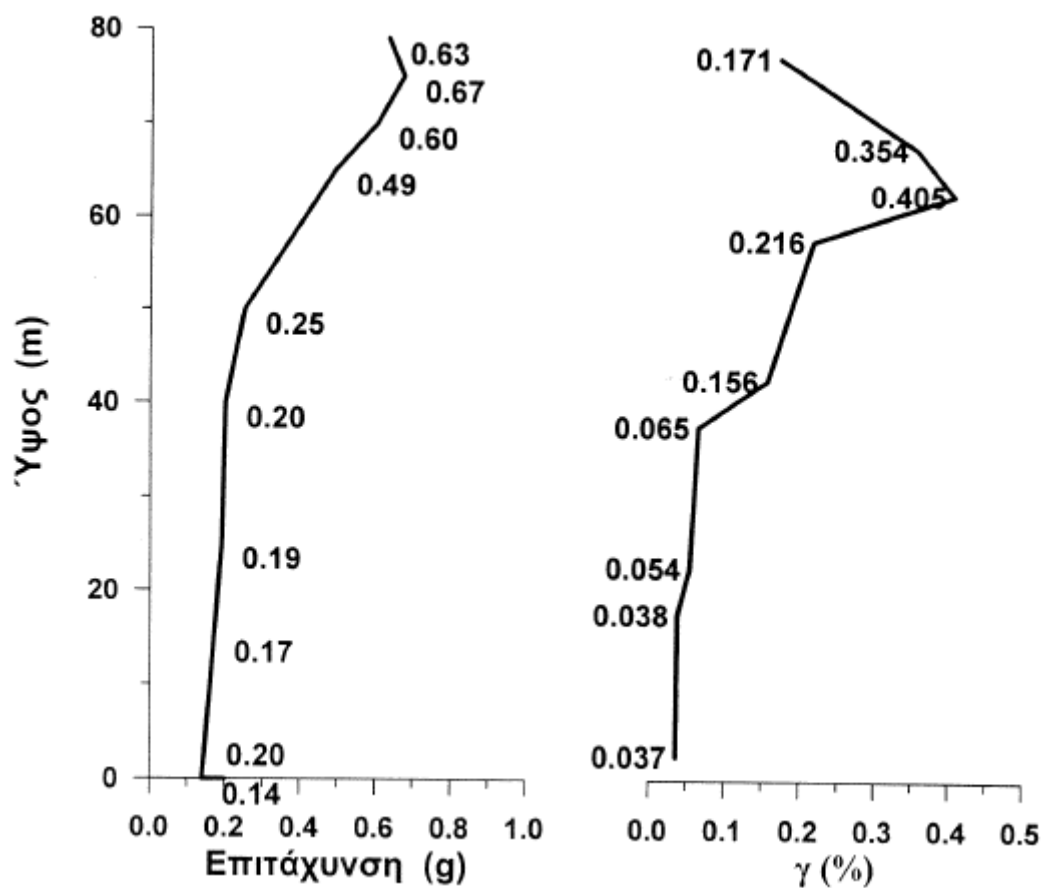
Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 18 αναλύσεις, με παραμέτρους, 2 διατομές του φράγματος (AA και Β'Β), 3 σενάρια ως προς την ταχύτητα στην στέψη του πυρήνα ( $V_s=200$  m/s,  $V_s=150$  m/s,  $V_s=250$  m/s) και 3 διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις (Αίγιο 1995, Καλαμάτα 1986 και Pacoima-Northridge 1994) ( $2 \cdot 3 \cdot 3=18$ ).

Τα αποτελέσματα μιας από αυτές τις αναλύσεις, παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.18- 3.22. Συγκεκριμένα πρόκειται για την διατομή AA, τον σεισμό Αίγιο 1995 και ταχύτητα  $V_s=200$ m/s, στην στέψη του πυρήνα.



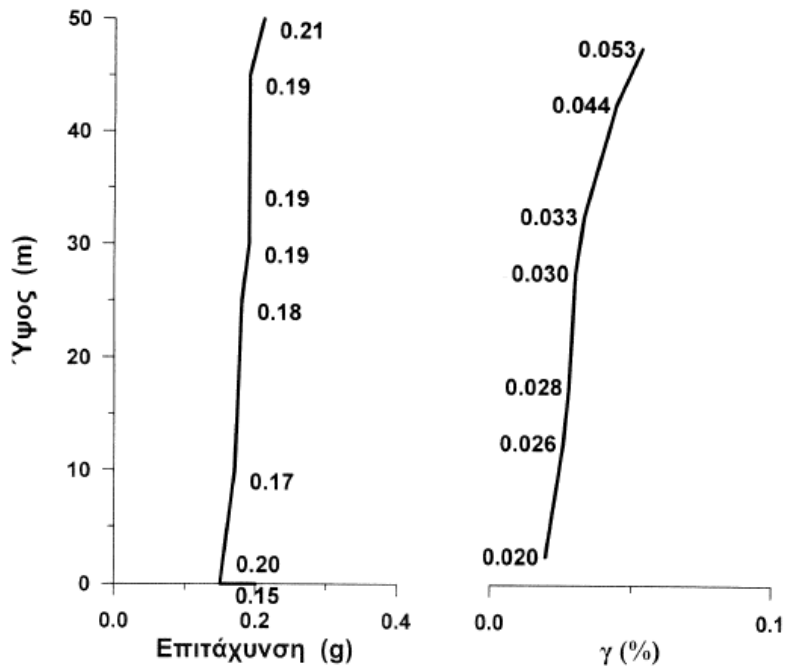
**Εικόνα 3.18:** Μέγιστες επιταχύνσεις g

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)



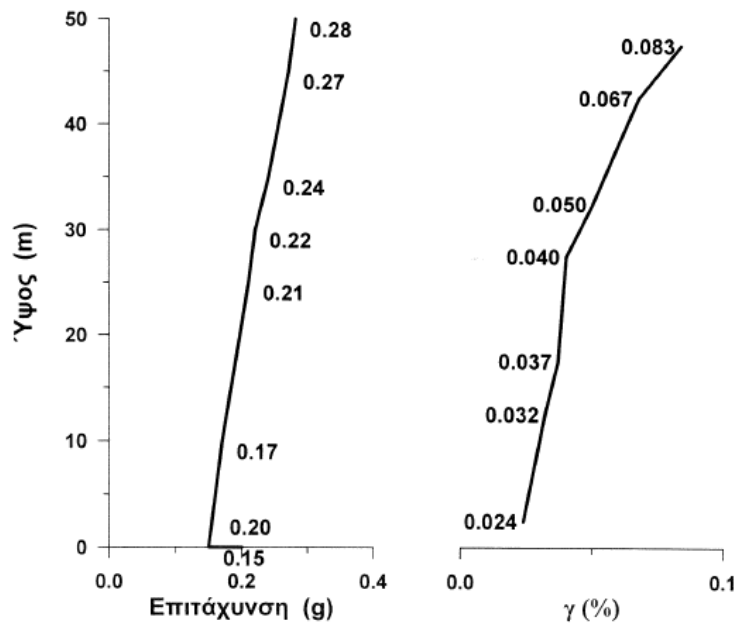
**Εικόνα 3.19:** Μέγιστες επιταχύνσεις και παραμορφώσεις καθ' ύψος του πυρήνα

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)



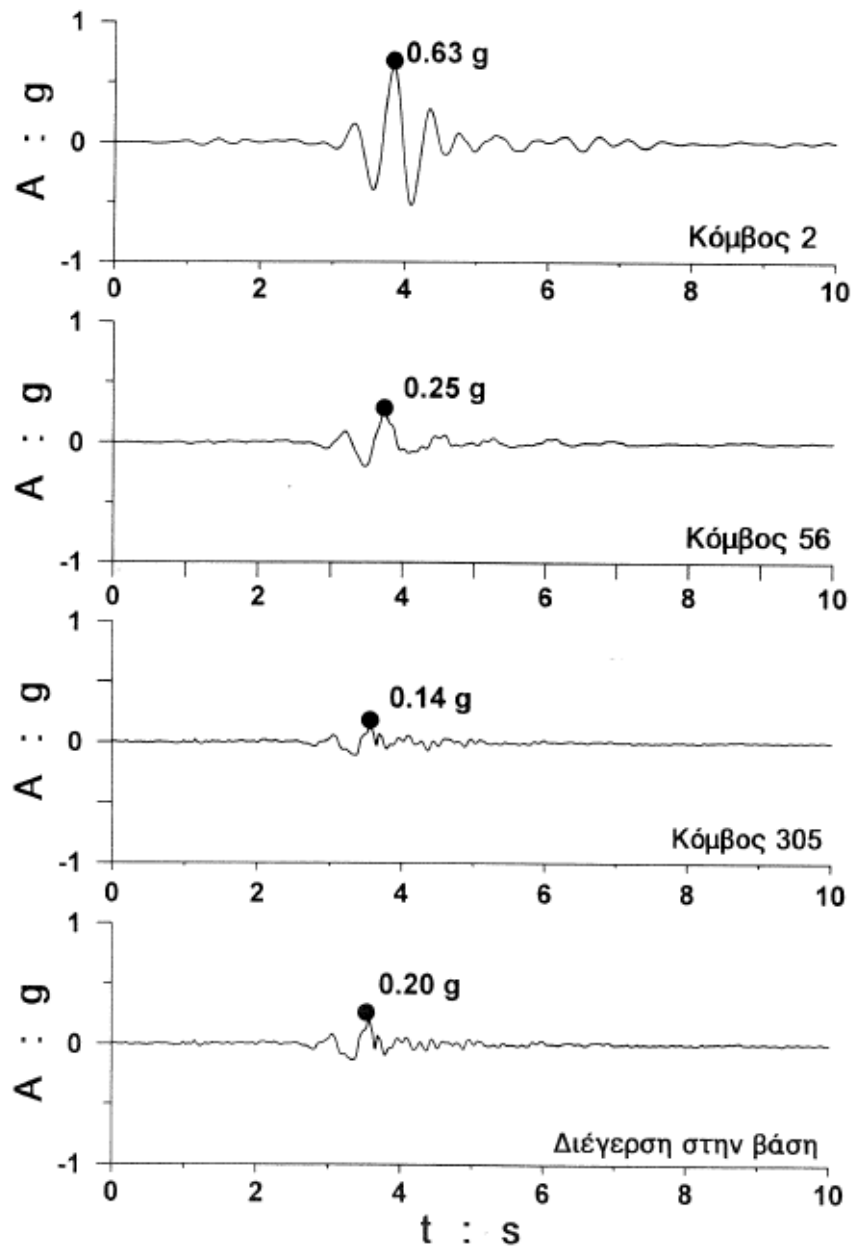
**Εικόνα 3.20:** Μέγιστες επιταχύνσεις και παραμορφώσεις τομή (ύψους 50m) στο μέσον της κατάντη παρειάς

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)



**Εικόνα 3.21:** Μέγιστες επιταχύνσεις και παραμορφώσεις τομή (ύψους 50m) στο μέσον της ανάντη παρειάς

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)



**Εικόνα 3.22:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης καθ' ύψος του πυρήνα

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΧΩΜΑΤΙΝΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ

### 4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το υπολογιστικό κομμάτι που πραγματοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Για τον σκοπό αυτό, κρίθηκε σκόπιμο τα θεωρητικά στοιχεία που αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια, να εφαρμοστούν σε μια πραγματική κατασκευή, ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα ως προς την δυναμική απόκριση των φραγμάτων και συγκεκριμένα των χωμάτων. Έτσι επιλέχθηκε το χωμάτινο φράγμα της Τριανταφυλλιάς, στο νομό Φλωρίνης, για το οποίο γνωρίζαμε επακριβώς τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, από την μελέτη που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Για την κατασκευή αυτή λοιπόν, αποφασίστηκε να εκτελεστούν ορισμένες παραμετρικές αναλύσεις, όπου θα ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την δυναμική απόκριση του παρόντος φράγματος. Με τις αναλύσεις αυτές θα αξιολογηθεί η σεισμική ευστάθεια της κατασκευής, ενώ θα υπολογιστούν οι μόνιμες μετατοπίσεις που θα εμφανιστούν στο φράγμα, μετά τον σεισμό, όπως και κάποια άλλα ενδιαφέροντα στοιχεία, τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των μόνιμων μετατοπίσεων, είναι αυτή των τάσεων-παραμορφώσεων, μέσω γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, ενώ το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το Plaxis.

Για την εκτέλεση των αναλύσεων αυτών, λήφθηκαν υπόψη κάποια δεδομένα σχετικά με τις ιδιότητες των εδαφικών υλικών, όπως και για το συχνοτικό περιεχόμενο των σεισμών, από την εργασία της Αυγερινού (2014), στην οποία χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ιδιότητες υλικών και τα ίδια συχνοτικά περιεχόμενα για τους σεισμούς, στο φράγμα της Τριανταφυλλιάς και υπολογίστηκαν οι μόνιμες μετατοπίσεις. Ωστόσο, η διπλωματική εργασία αυτή, χρησιμοποίησε μια διαφορετική μεθοδολογία, κατά τον υπολογισμό των μόνιμων μετατοπίσεων και



συγκεκριμένα την μέθοδο ολίσθησης πρανούς με την μεθοδολογία του Newmark, όπως και διαφορετικό πρόγραμμα στην φάση των υπολογισμών, το Quad4m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την πραγματοποίηση των αναλύσεων αυτών δεν υπήρξε ο σκοπός αντικατάστασης του αντισεισμικού σχεδιασμού της περιοχής του έργου, διότι αυτό είναι κάτι που έχει ήδη γίνει κατά την φάση μελέτης του έργου, από τους αρμόδιους μηχανικούς. Για τον λόγο αυτό, δεν λήφθηκαν καθόλου υπόψη οι σεισμολογικές συνθήκες της περιοχής και επιλέχθηκαν σεισμοί από τον διεθνή χώρο. Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι η εργασία αυτή έχει καθαρά ερευνητικούς σκοπούς και το φράγμα της Τριανταφυλλιάς επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, απλά και μόνο για να μην διεξαχθούν οι αναλύσεις σε ένα τυχαίο γεωμετρικό μοντέλο.

Έτσι, μετά το πέρας του κεφαλαίου αυτού, αρχικά θα μπορέσουν να κατανοηθούν καλύτερα οι παράγοντες που επηρεάζουν την δυναμική απόκριση ενός χωμάτινου φράγματος. Ακόμα, θα φανεί το πώς συμπεριφέρονται κάποια χαρακτηριστικά σημεία σε ένα φράγμα, κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Τέλος, θα υπολογιστούν οι μόνιμες μετατοπίσεις, όπως και οι επιταχύνσεις που παρατηρούνται στα σημεία αυτά, ύστερα από μια δυναμική καταπόνηση του φράγματος και θα αξιολογηθεί η ευστάθεια της κατασκευής.

Ως προς την δομή του, το παρόν κεφάλαιο, αρχικά, επισημαίνει κάποια στοιχεία για την περιοχή της Φλώρινας, στην οποία βρίσκεται το φράγμα της Τριανταφυλλιάς. Στην συνέχεια, γίνεται μια εκτενής ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των αναλύσεων, μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, του Plaxis. Ακόμα, παρουσιάζεται το πώς υπεισέρχονται όλες οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη κατά την φάση των αναλύσεων στο φράγμα, σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενώ γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, ως προς της μετατοπίσεις, με αυτά που είχε υπολογίσει η Αυγερινού στην εργασία της. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν από το παρόν κεφάλαιο.

## 4.2. Χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος

### 4.2.1. Γενική περιγραφή της ευρύτερης περιοχής του έργου

Ο Νομός Φλωρίνης βρίσκεται στο Βορειοδυτικό άκρο της Ελλάδος και διοικητικά ανήκει στην Περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας. Συνορεύει δυτικά με την Αλβανία, ανατολικά με το Νομό Πέλλας, βόρεια με τα Σκόπια, νοτιοανατολικά με το Νομό Κοζάνης και νοτιοδυτικά με το Νομό Καστοριάς. Ο Νομός καταλαμβάνει έκταση 1924 τετραγωνικά χιλιόμετρα από τα οποία το 74% περίπου καλύπτεται από ορεινές και ημιορεινές εκτάσεις ενώ μόνο το 26% καλύπτεται από πεδινές.

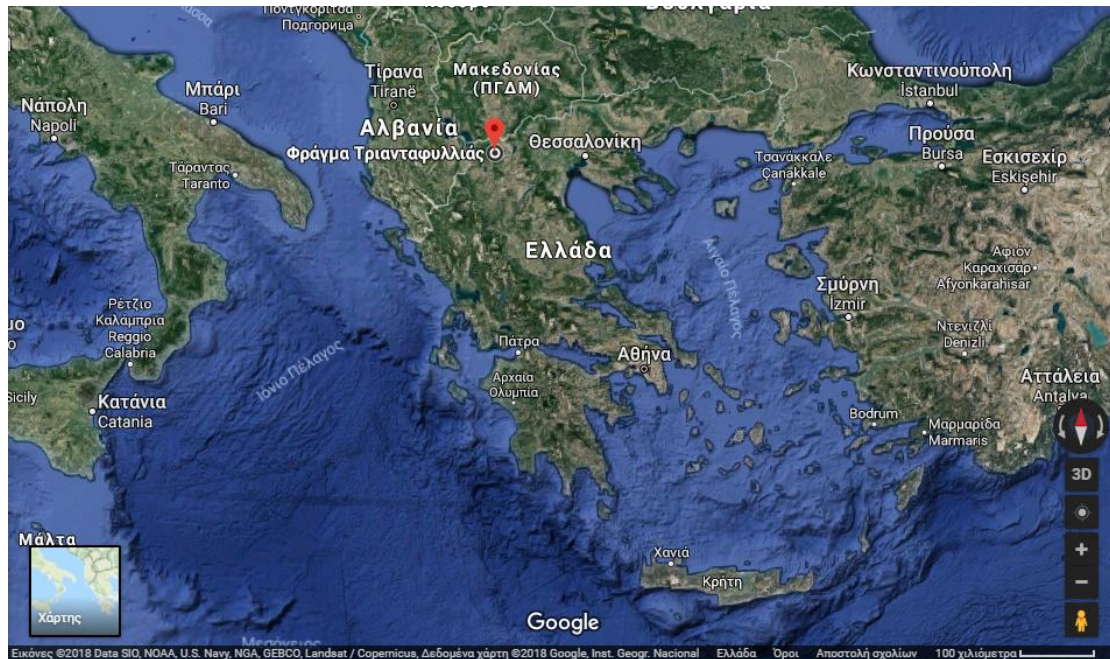
Ο Νομός Φλωρίνης αποτελεί περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, ως προς το περιβάλλον. Σε αυτόν συνυπάρχουν οικοσυστήματα (6 περιοχές NATURA), που αποτελούν βασικούς παράγοντες της ποιότητας ζωής της περιοχής. Πλούσιο είναι το φυσικό περιβάλλον του νομού και περιλαμβάνει:

- Ορεινούς όγκους του Βαρνούντα, του Βιτσίου και του Βόρα.
- Έξι λίμνες, προστατευόμενες, τεράστιου οικολογικού ενδιαφέροντος.
- Τον Εθνικό Δρυμό στην περιοχή των Πρεσπών.
- Σημαντικότετη χλωρίδα και πανίδα, ενώ το τοπίο της περιοχής παρουσιάζει εναλλαγές.

Εκτός όμως από τα παραπάνω, δεν μπορούμε να αγνοήσουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά του Νομού όπως:

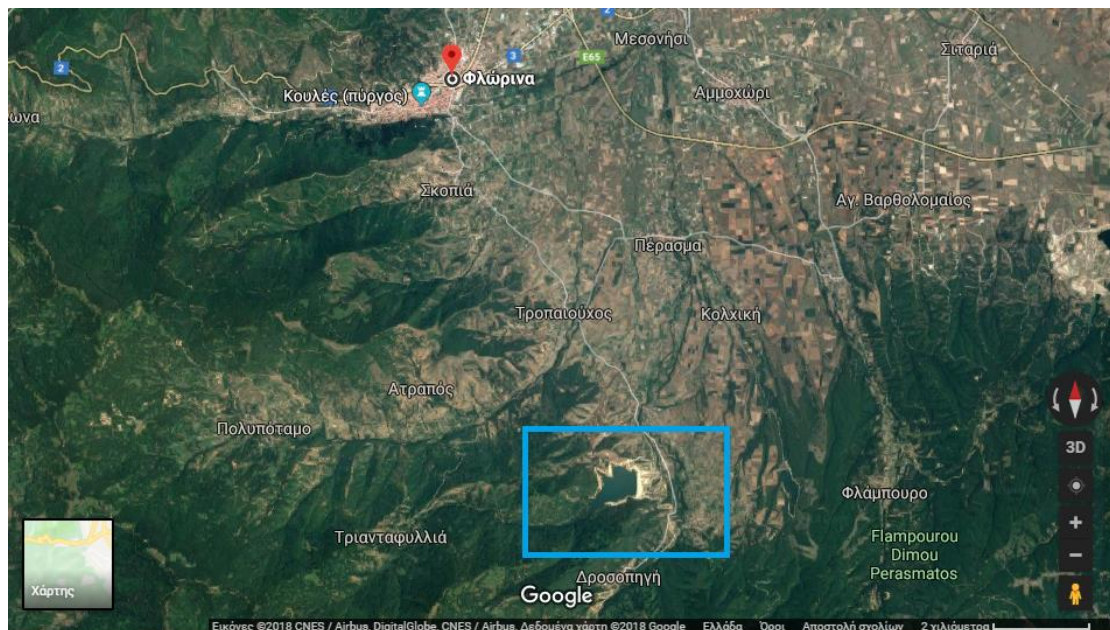
- Τους αρχαιολογικούς χώρους, με πιο αξιόλογους αυτούς των Πετρών και του Αγίου Παντελεήμονα.
- Τις Κοινότητες Νυμφαίου και Λεχόβου, καθώς και τα Δημοτικά διαμερίσματα, Αγίου Γερμανού, Ψαράδων, Ακρίτα, Κρατερού, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερη παραδοσιακή αρχιτεκτονική.
- Τους οικισμούς της Κοινότητας Νυμφαίου και του Δημοτικού διαμερίσματος Ψαράδων, οι οποίοι έχουν ανακηρυχθεί διατηρητέοι παραδοσιακοί οικισμοί.

Ακολουθούν δορυφορικές φωτογραφίες από το Google Maps (Εικόνες 4.1-4.4), που δείχνουν την θέση, καθώς και την περιοχή στην οποία εντάσσεται το έργο, όπως και μια πραγματική φωτογραφία του φράγματος (Εικόνα 4.5).



**Εικόνα 4.1:** Δορυφορική φωτογραφία της Ελλάδας, που δείχνει την θέση του φράγματος της Τριανταφυλλιάς (κόκκινο σημάδι), ως προς τον χάρτη της Ελλάδος

(Πηγή: Google Maps)



**Εικόνα 4.2:** Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής της Φλώρινας, που δείχνει την θέση του φράγματος της Τριανταφυλλιάς, ως προς την Φλώρινα (μπλε ορθογώνιο)

(Πηγή: Google Maps)



**Εικόνα 4.3:** Δορυφορική φωτογραφία που δείχνει το φράγμα της Τριανταφυλλιάς σε κάτοψη  
(Πηγή: Google Maps)



**Εικόνα 4.4:** Δορυφορική εικόνα που δείχνει την γεωμορφολογία του φράγματος της Τριανταφυλλιάς  
(Πηγή: Google Maps)



**Εικόνα 4.5:** Φωτογραφία του φράγματος της Τριανταφυλλιάς

(Πηγή: <http://www.eeft.gr>)

#### **4.2.2. Μορφολογία της περιοχής- Κλίμα**

Όπως προαναφέρθηκε, ο νομός έχει έκταση 1924 τετραγωνικά χιλιόμετρα, με πλούσιες εναλλαγές τοπίων. Ως προς τα υψόμετρα η περιοχή βρίσκεται από +585, μέχρι και +740 μέτρα. Μορφολογικά έχει ορεινό, ημιορεινό (λεκανοπέδιο Φλώρινας- Μοναστηρίου) και πεδινό χαρακτήρα (περιοχή Πρεσπών).

Στο νομό ορθώνονται τα όρη Τρικλάριο στα δυτικά, Βέρνο στα νότια, Βόρας στα ανατολικά και Βαρνούντας στα βόρεια. Ο Βαρνούντας αποτελεί το φυσικό όριο μεταξύ της λεκάνης της Φλώρινας και των Πρεσπών και εκτείνεται από την περιοχή της πόλης της Φλώρινας βόρεια, μέχρι και πέρα από τα σύνορα με τα Σκόπια. Το Βέρνο αποτελεί κατά κάποιο τρόπο συνέχεια του Βαρνούντα και φυσικό σύνορο των νομών Φλώρινας και Καστοριάς. Ο Βόρας που είναι το τρίτο ψηλότερο βουνό της Ελλάδας, λειτουργεί ως το φυσικό σύνορο των νομών Φλώρινας και Πέλλας.

Ο νομός διαθέτει επιπλέον συνολικά έξι φυσικές λίμνες, οι περισσότερες από τις οποίες αποτελούν σημαντικούς βιότοπους για σπάνια είδη χλωρίδας και πανίδας, ενώ έχουν αναγνωρισθεί διεθνώς και προστατεύονται από την ελληνική και διεθνή νομοθεσία και συμπεριλαμβάνονται στις προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000. Η Μικρή Πρέσπα βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νομού, στα σύνορα με την Αλβανία. Η Μεγάλη Πρέσπα αποτελεί τον μεγαλύτερο εθνικό δρυμό στην Ελλάδα, και το σημείο επαφής τριών κρατών: Ελλάδα, Αλβανία, Σκόπια. Στην περιοχή του Αμυνταίου έχουν σχηματισθεί οι λίμνες Πετρών και Βεγορίτιδας. Η Βεγορίτιδα είναι από τις βαθύτερες λίμνες της Ελλάδας, με το μέγεθός της ωστόσο να μεταβάλλεται σημαντικά, κυρίως λόγω της υπερβολικής άντλησης για τις ανάγκες του Υδροηλεκτρικού Σταθμού Άγρα, του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Αμυνταίου-Φιλώτα και της άρδευσης των γειτονικών γεωργικών εκτάσεων. Τέλος, η λίμνη Ζάζαρη τροφοδοτεί τη λίμνη Χειμαδίτιδα η οποία είναι μεγαλύτερη, με έντονο ευτροφισμό.

Το κλίμα του νομού Φλώρινας είναι ηπειρωτικό, με πολλές βροχοπτώσεις, ήπια καλοκαίρια και ιδιαίτερα ψυχρούς χειμώνες για τα ελληνικά δεδομένα, με αρκετές χιονοπτώσεις. Οι παραπάνω συνθήκες διαμορφώνονται λόγω της γεωγραφικής και υψομετρικής θέσης της περιοχής, σε συνδυασμό με τους μεγάλους ορεινούς όγκους και την παρουσία των λιμνών στις Πρέσπες και στην περιοχή του Αμυνταίου. Οι λίμνες αυτές ωστόσο, επηρεάζουν θετικά το μικροκλίμα των γειτονικών τους περιοχών, προσφέροντας ηπιότερες συνθήκες κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού, με αποτέλεσμα μια αισθητή διαφορά μεταξύ των τριών υψιπέδων Αμυνταίου, Πρεσπών και Φλώρινας αν και κατά παρατεταμένες περιόδους ολικού παγετού, οι μικρότερες λίμνες δεν είναι ασυνηθιστο να παγώσουν.

### 4.2.3. Γεωλογία περιοχής

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής του έργου αποτελείται από τα Παλαιοζωικής ηλικίας κρυσταλοσχιστώδη πετρώματα της Πελαγονικής ζώνης, με τους γνευσιωμένους γρανίτες και τις Περμοτριάδικές μετακλαστικές ακολουθίες, από το ανθρακικό κάλυμμα του Τριαδικού – Ιουρασικού, από τους οφειόλιθους με τα σύννοδά τους ιζήματα, επωθημένους στην Πελαγονική και από τα Μέσο-Άνω Κρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα.

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής περιλαμβάνει χείμαρρους εξαιρετικά επιμήκεις, που διαβρώνουν κατά βάθος τα πετρώματα του υποβάθρου και αποστραγγίζουν τα ψηλότερα τμήματα των ορεινών όγκων. Πρόκειται για τη λεκάνη απορροής του φράγματος Παπαδιάς, του φράγματος Υδρούσας και Τροπαιούχου και του χείμαρρου Στάρα. Στις λεκάνες αυτές συναντώνται κυρίως αποθέσεις γνευσίου, όξινα πλουτώνια (διορίτες, γρανίτες) και μιγματίτες. Επίσης, βρίσκονται σχιστόλιθοι, χαλαζίτες και μάρμαρα.

### 4.2.4. Εδαφολογία περιοχής

Τα περισσότερα εδάφη στην περιοχή του έργου αποτελούν λιμναίες αποθέσεις, έχουν μικρή κλίση και διασχίζονται από χείμαρρους. Λόγω των μικρών κλίσεων, τα νερά δεν μπορούν να οδηγηθούν προς τις κατώτερες στάθμες και παραμένουν επιτόπου, δίνοντας την εικόνα βαλτωδών εκτάσεων. Επίσης, στις επικλινείς προσβάσεις και λοφώδεις εκτάσεις, εκεί όπου παρατηρείται έντονο ανάγλυφο και μεγαλύτερες κλίσεις, παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της διάβρωσης. Άλλα εδάφη που συναντώνται στην περιοχή μελέτης, είναι τα αμμώδη, τα αργιλώδη, τα πηλώδη, όπως και τα ιλυώδη εδάφη.

### 4.2.5. Σεισμική επικινδυνότητα περιοχής

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μικρή έως μέτρια σεισμικότητα, αφού σύμφωνα με τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς της Ελλάδας ΕΑΚ2000 και τον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (Εικόνα 3.7, Πίνακας 3.1), η περιοχή

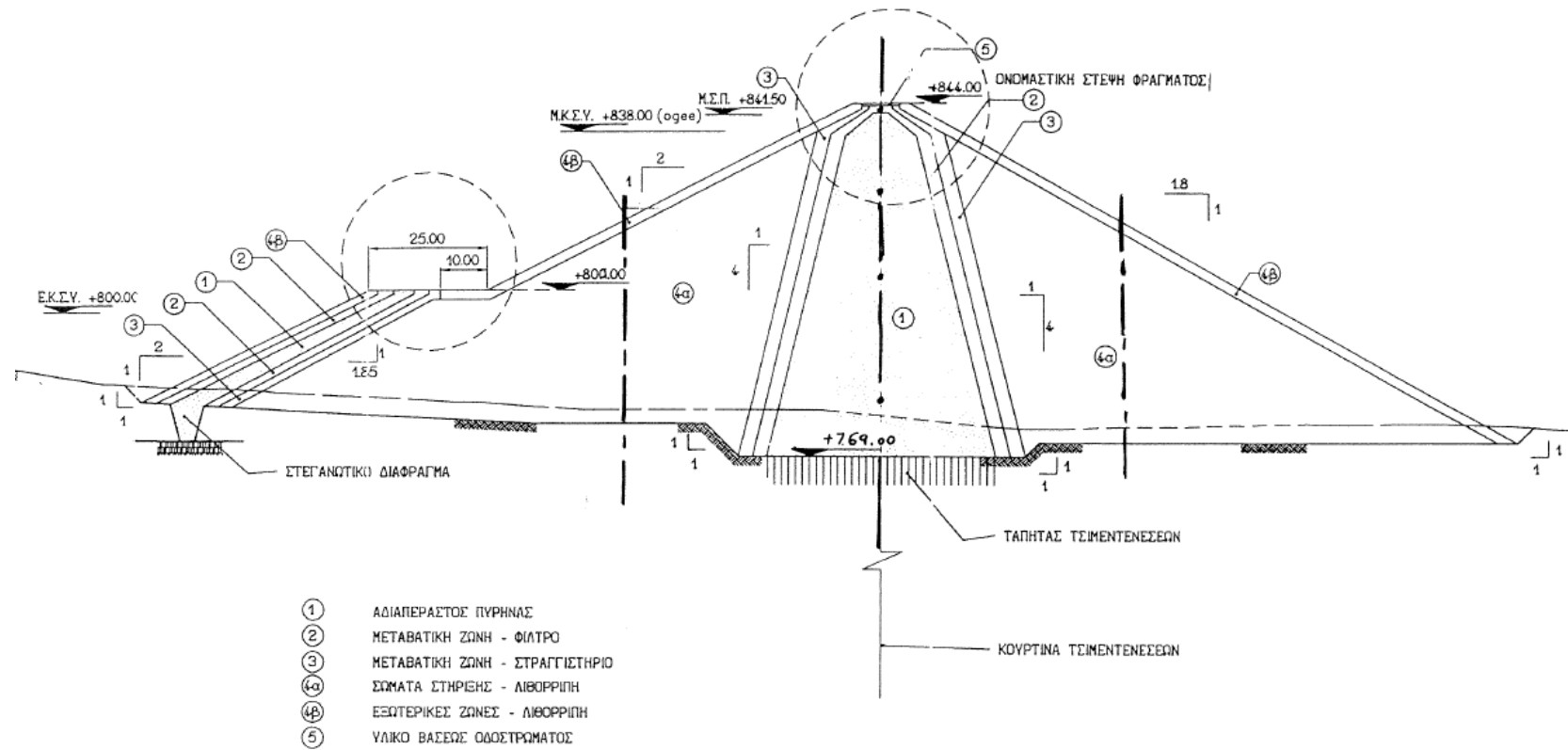
της Φλώρινας και κατ' επέκταση το φράγμα της Τριανταφυλλιάς, βρίσκεται στην ζώνη I, με κορυφαία επιτάχυνση 0,16g. Ωστόσο σημειώνεται, ότι παρόλο που η ζώνη αυτή είναι εκείνη με την μικρότερη επικινδυνότητα στην Ελλάδα, μια επιτάχυνση αυτής της τάξεως, μπορεί να είναι σημαντική για μεγάλα τεχνικά έργα και να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα.

#### 4.2.6. Διατομή φράγματος Τριανταφυλλιάς

Είναι αναγκαίο να καθοριστεί και η μέγιστη διατομή του φράγματος της Τριανταφυλλιάς, που χρησιμοποιείται στην φάση των αναλύσεων, όπως αυτή προκύπτει από τα σχέδια της τελικής μελέτης. Έτσι, από τα λεπτομερή σχέδια του φράγματος, προκύπτει η εφαπτομένη στο ανάντη πρανές 1:2 και στο κατόντη πρανές 1:1,8 (ελαφρώς πιο απότομη). Ακόμα, το υψόμετρο στην θεμελίωση είναι στα 769 μέτρα και στην στέψη στα 844 μέτρα, εκεί που ορίζεται δηλαδή και η μέγιστη στάθμη πλημμύρας. Στο κέντρο του φράγματος [Εικόνα 4.6 (1)], βρίσκεται ο αδιαπέρατος πυρήνας, ενώ εκατέρωθεν του πυρήνα, βρίσκονται τα φίλτρα και τα στραγγιστήρια [Εικόνα 4.6 (2), (3)]. Στην συνέχεια, στις ζώνες εκατέρωθεν των στραγγιστηρίων, βρίσκονται τα σώματα στήριξης, αποτελούμενα από υλικό λιθορριπής [Εικόνα 4.6 (4α), (4β)]. Τέλος, φαίνεται το υλικό βάσεως του οδοστρώματος, στην ονομαστική στέψη του φράγματος [Εικόνα 4.6 (5)]. Ωστόσο, όπως θα φανεί παρακάτω στην φάση των υπολογισμών, η τελική γεωμετρία του φράγματος είναι αρκετά απλουστευμένη.



## ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΑ



Εικόνα 4.6: Μέγιστη διατομή φράγματος Τριανταφυλλιάς

(Πηγή: Γκαζέτας, 1998)

## 4.3. Λογισμικό

### 4.3.1. Περιεχόμενα προγράμματος

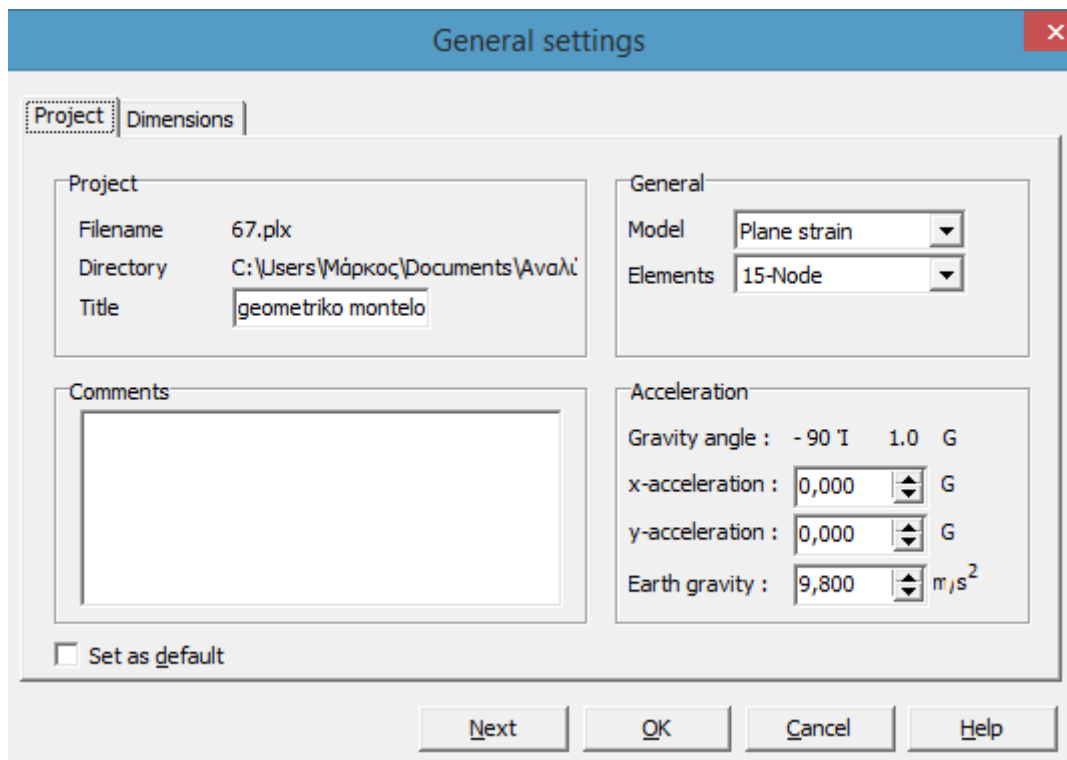
Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, έγιναν με την βοήθεια του λογισμικού Plaxis-2D. Το Plaxis είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων παραμόρφωσης σε εδάφη και πετρώματα. Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα:

- Υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων (input)
- Υποπρόγραμμα υπολογισμών (calculations)
- Υποπρόγραμμα αποτελεσμάτων (output)
- Υποπρόγραμμα σχεδιασμού των καμπυλών (curves)

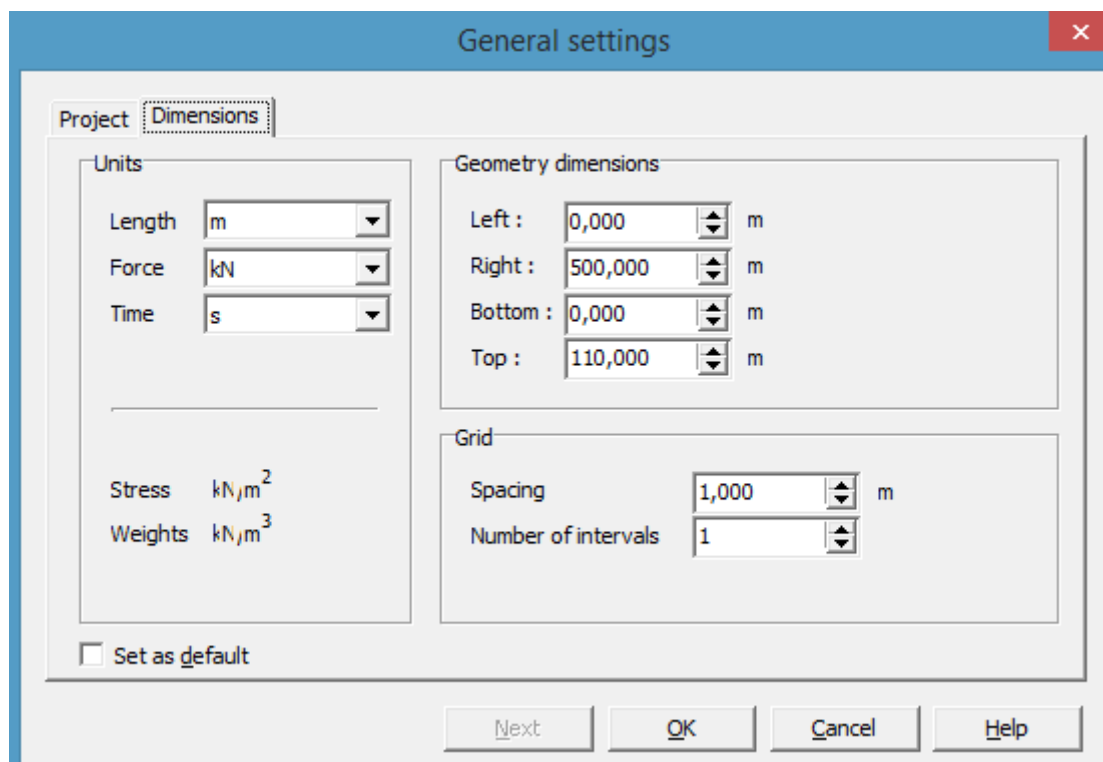
Παρακάτω αναφέρονται κάποια ενδεικτικά στοιχεία για κάθε ένα από τα υποπρογράμματα αυτά, ενώ αναλύεται η διαδικασία και οι εντολές που ακολουθήθηκαν με το λογισμικό αυτό, για την ολοκλήρωση της φάσης των αναλύσεων.

### 4.3.2. Γενικές Ρυθμίσεις

Αρχικά για την επίλυση ενός προβλήματος με την χρήση του λογισμικού Plaxis, εισάγονται οι γενικές ρυθμίσεις του προσομοιώματος, οι οποίες αφορούν την εισαγωγή του ονόματος του αρχείου, τον τύπο του προτύπου, καθώς και τον τύπο των στοιχείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ακόμα, καθορίζονται οι μονάδες μήκους, δύναμης, χρόνου, οι διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης και του κανάβου, όπως και η πυκνότητα του (Εικόνες 4.7, 4.8).



Εικόνα 4.7: Εισαγωγή γενικών ρυθμίσεων στο Plaxis

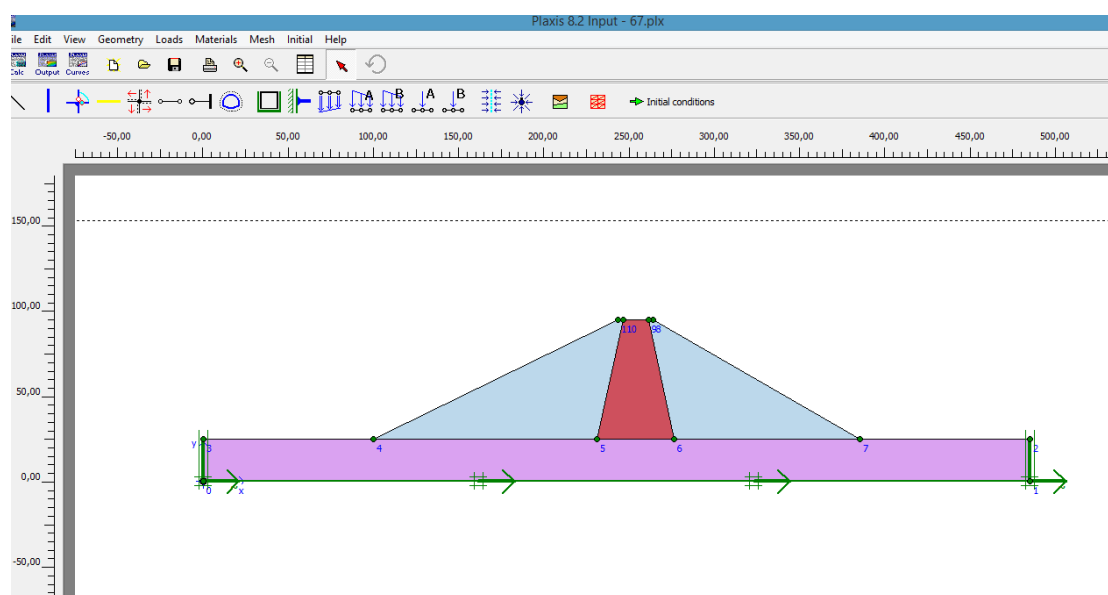


Εικόνα 4.8: Εισαγωγή γενικών ρυθμίσεων στο Plaxis

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης, εφόσον η μοντελοποίηση γίνεται σε 2 διαστάσεις και οι παραμορφώσεις που αναμένονται στο κάθετο, στην επιφάνεια του προτύπου επίπεδο είναι αμελητέες. Για την διακριτοποίηση του προτύπου, χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά 15-κομβικά στοιχεία.

### 4.3.3. Σχεδιασμός Γεωμετρίας Προσομιώματος

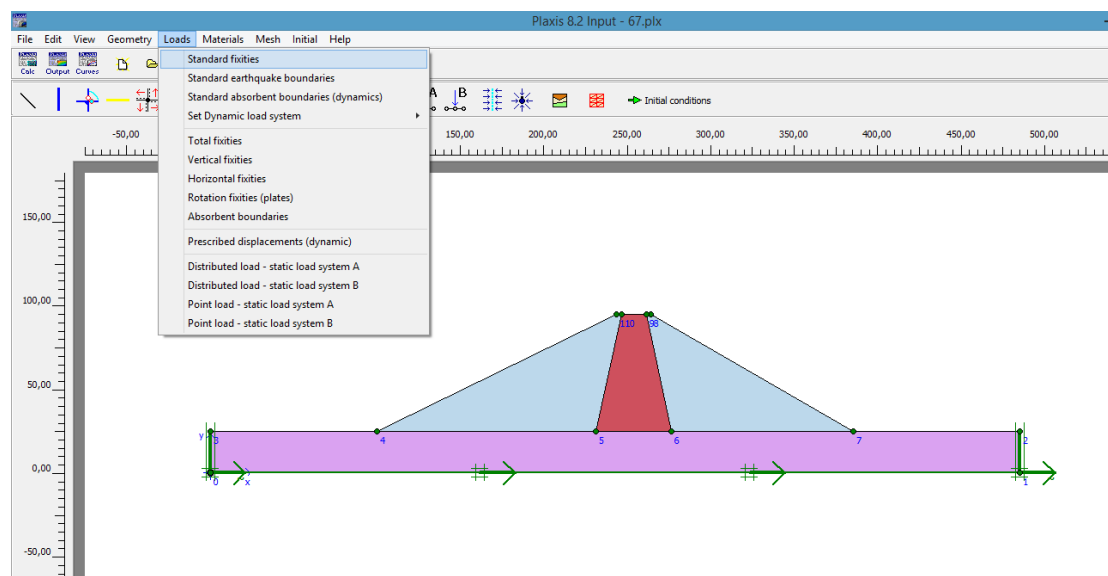
Στην συνέχεια, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός του γεωμετρικού προτύπου, το οποίο αποτελεί την απεικόνιση του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Ένα γεωμετρικό πρότυπο αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Τα σημεία και οι γραμμές εισάγονται από τον χρήστη, ενώ οι επιφάνειες προκύπτουν ως κλειστά σχήματα από το ίδιο το πρόγραμμα. Οι διαστάσεις του γεωμετρικού προτύπου που σχεδιάστηκε στην παρούσα εργασία φαίνονται στην Εικόνα 4.9.



**Εικόνα 4.9:** Γεωμετρικό πρότυπο φράγματος Τριανταφυλλιάς στο Plaxis

#### 4.3.4. Συνοριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες έχουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς όταν εφαρμόζεται σε ένα γεωμετρικό στοιχείο του προτύπου μηδενική μετατόπιση, η συνθήκη αυτή είναι πιο ισχυρή, όσον αφορά τους υπολογισμούς από όλους τους άλλους τύπους συνθηκών φόρτισης. Στην παρούσα εργασία, οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν σε 2 επίπεδα. Αρχικά, ως προς την στατική κατάσταση του μοντέλου, στα κατακόρυφα όρια του προτύπου, εφαρμόστηκε μηδενική οριζόντια μετατόπιση ( $u_x=0$ ), που σημαίνει ότι στα σημεία των γραμμών αυτών, επιτρέπεται μόνο η κύλιση ως προς τον άξονα των x. Στο κάτω όριο του προτύπου, εφαρμόστηκε μηδενική μετατόπιση και ως προς τους 2 άξονες ( $u_x=u_y=0$ ), που σημαίνει ότι η βάση είναι πακτωμένη. Όλα αυτά έγιναν αυτόματα από το πρόγραμμα με την εντολή standard fixities, από το μενού loads. Ως προς την δυναμική κατάσταση του προτύπου, εισάχθηκαν συνθήκες σεισμού με την εντολή standard earthquake boundaries, από το μενού loads (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών στο Plaxis

### 4.3.5. Εισαγωγή Ιδιοτήτων Υλικών

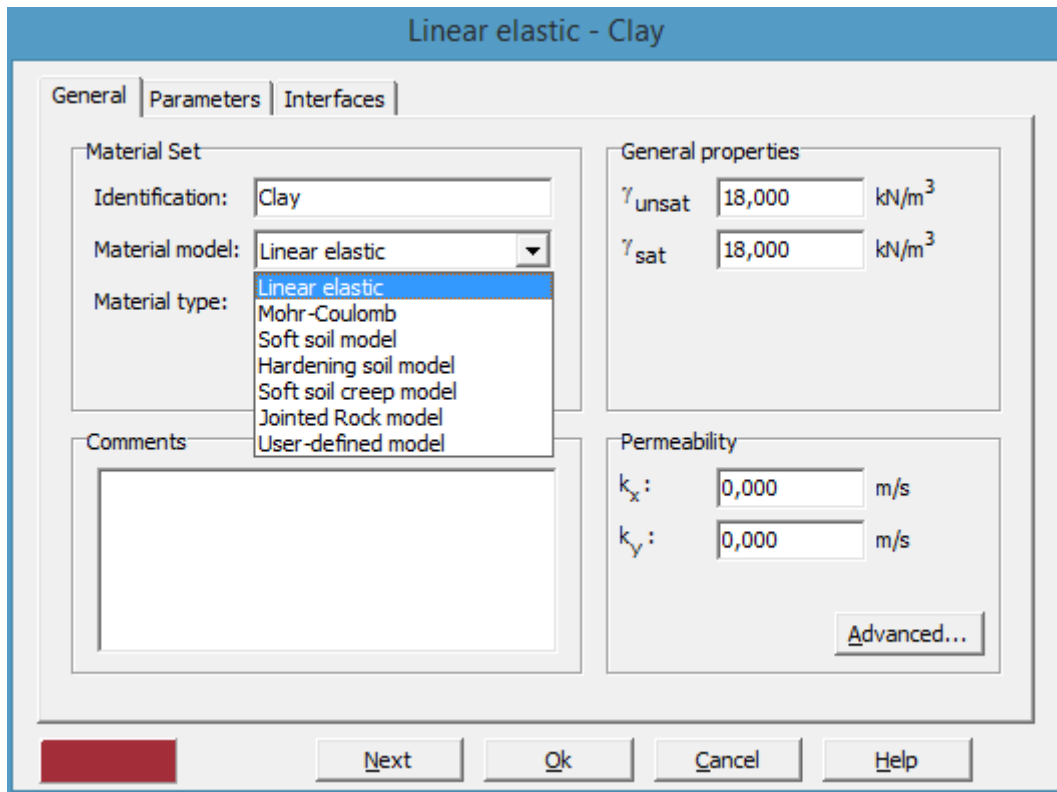
Για τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, με την εντολή material sets, εισάγονται οι παράμετροι τους σε μια βάση δεδομένων που διαθέτει το πρόγραμμα. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι το Mohr-Coulomb, καθώς δίνει μια καλή προσέγγιση της πραγματικότητας, ενώ σε αυτό το μοντέλο οι παράμετροι που χρειάζεται να εισαχθούν για κάθε υλικό, είναι:

- Το μέτρο ελαστικότητας του Young ( $E$ )
- Ο λόγος του Poisson ( $\nu$ )
- Η συνοχή ( $c$ )
- Η γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi$ )
- Η γωνία διασταλτικότητας ( $\psi$ )

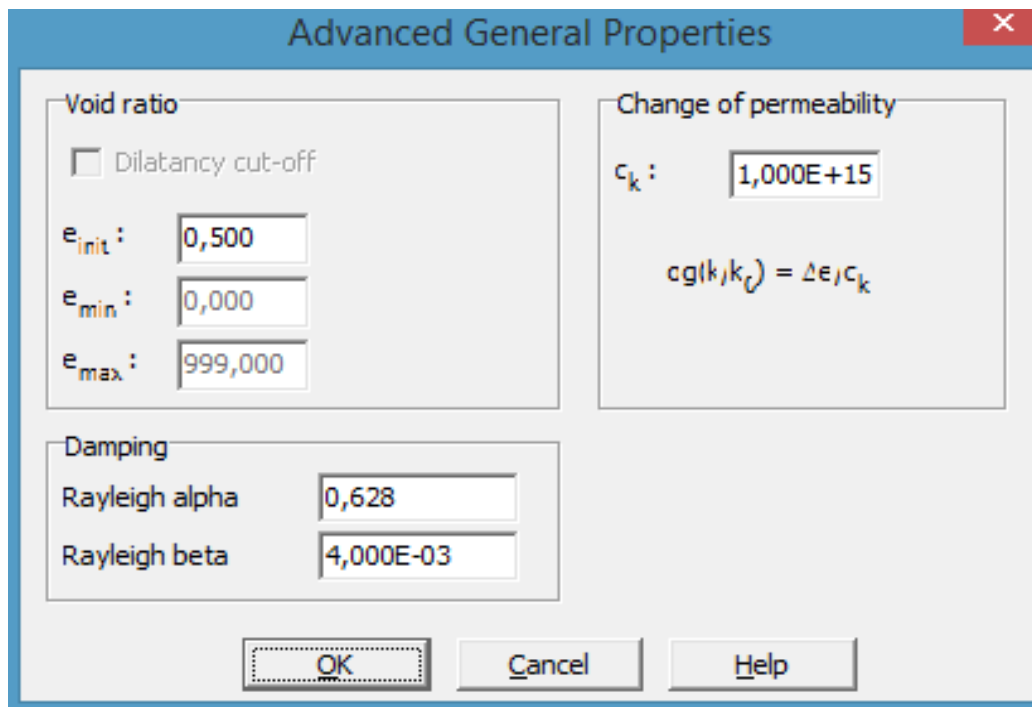
Ωστόσο, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται και η περίπτωση του γραμμικά ελαστικού μοντέλου (linear elastic), το οποίο αντιπροσωπεύει τον νόμο του Hooke για ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Στο μοντέλο αυτό, χρειάζεται να οριστούν το μέτρο ελαστικότητας Young ( $E$ ) και ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ), από τις παραπάνω παραμέτρους.

Ακόμα, για κάθε υλικό εισάγονται και στις δύο περιπτώσεις που είδαμε παραπάνω, το ξηρό και το υγρό φαινομενικό βάρος ( $\gamma_{\text{unsat}}$  και  $\gamma_{\text{sat}}$ ), όπως και η διαπερατότητα ( $k_x$  και  $k_y$ ). Στην παρούσα εργασία, θεωρείται πως δεν υπάρχει νερό, άρα δεν εισάγονται τιμές για την διαπερατότητα, ούτε για το υγρό φαινομενικό βάρος και εισάγονται τιμές μόνο για το ξηρό φαινομενικό βάρος  $\gamma_{\text{unsat}}$  (Εικόνα 4.11).

Τέλος, ως προς τα υλικά, αξίζει να αναφερθεί ότι εισάχθηκαν σε κάθε υλικό και δύο συντελεστές  $\alpha$  (Rayleigh alpha) και  $\beta$  (Rayleigh beta), οι οποίοι έχουν να κάνουν με την απόσβεση του κάθε υλικού και υπολογίστηκαν με την εισαγωγή κάποιων δεδομένων σχετικά με την διέγερση, στο υπολογιστικό πρόγραμμα Excel και την εκτέλεση ορισμένων πράξεων σε αυτό (Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.11: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών στο Plaxis



Εικόνα 4.12: Εισαγωγή συντελεστών απόσβεσης για τα υλικά στο Plaxis

#### 4.3.6. Δημιουργία Δικτύου Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην συνέχεια, σειρά έχει η δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται η διαίρεση του γεωμετρικού μοντέλου σε επιμέρους στοιχεία (Mesh Generation). Μια σύνθεση πεπερασμένων στοιχείων, ονομάζεται δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (mesh), ενώ τα βασικά στοιχεία για μοντέλα δύο διαστάσεων είναι τα τριγωνικά. Στο Plaxis η δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία, που βασίζεται στην τριγωνοποίηση της επιφάνειας του προτύπου. Ακόμα, ορίζεται η ολική πυκνότητα του δικτυώματος των στοιχείων. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί πέντε επίπεδα ολικής πυκνότητας δικτυώματος στοιχείων:

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

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται πολύ πυκνό δίκτυο στοιχείων και η μορφή του φαίνεται στην Εικόνα 4.13.

#### 4.3.7. Αρχικές Συνθήκες

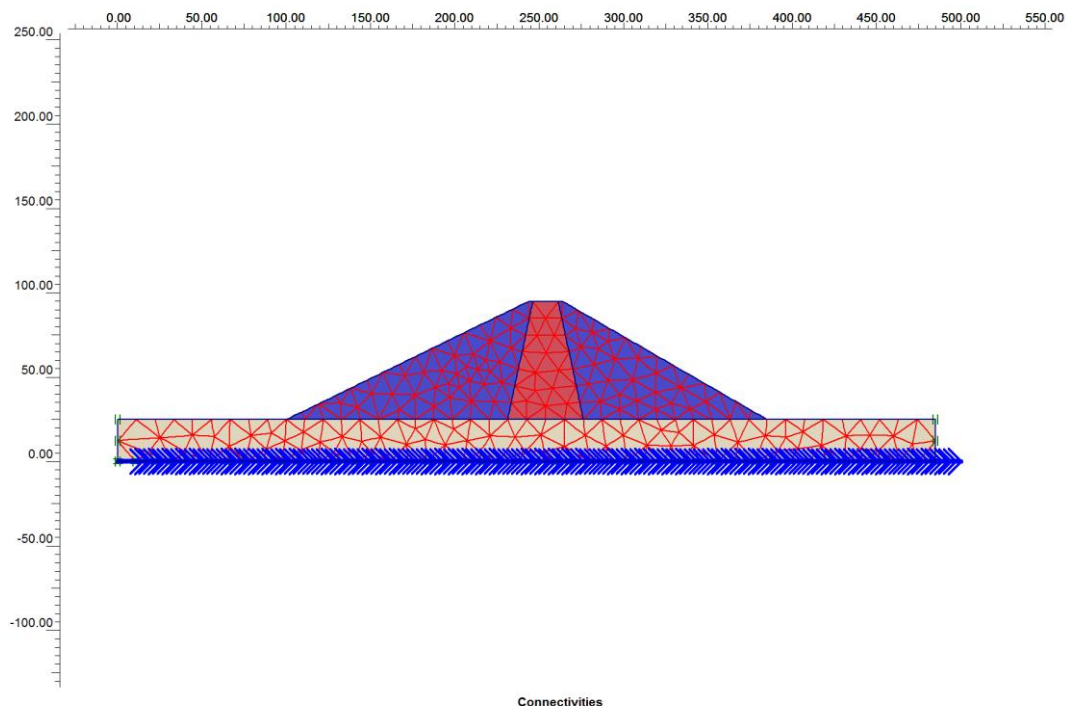
Μετά την δημιουργία του γεωμετρικού προτύπου και του κατάλληλου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, σειρά έχει ο ορισμός των αρχικών τασικών συνθηκών και η αρχική κατάσταση (Initial Conditions). Αυτό γίνεται στο τμήμα ορισμού των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων. Υπάρχουν δύο τύποι αρχικών συνθηκών:

- α. Η δημιουργία των αρχικών πιέσεων του νερού των πόρων.



β. Ο προσδιορισμός της αρχικής γεωμετρίας του προτύπου και της δημιουργίας του πεδίου των αρχικών και των ενεργών τάσεων.

Στην παρούσα εργασία θεωρούνται και τα δύο μηδενικά, λόγω πολυπλοκότητας στην πραγματοποίηση των υπολογισμών.



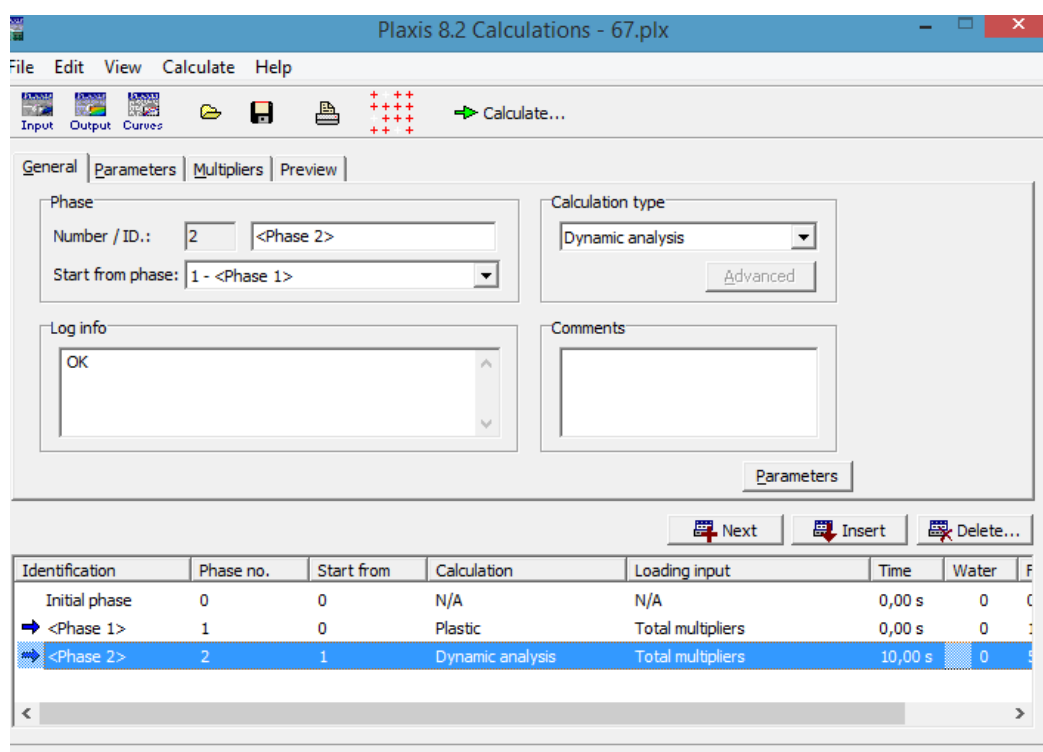
**Εικόνα 4.13:** Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων στο Plaxis

#### 4.3.8. Επίλυση-Υπολογισμοί

Μετά την δημιουργία του προτύπου των πεπερασμένων στοιχείων, μπορούν να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί (Calculations). Πρέπει να οριστούν οι τύποι των υπολογισμών, όπως και οι τύποι των φορτίσεων που θα ενεργοποιηθούν κατά την διάρκεια τους. Το Plaxis έχει την δυνατότητα διαφόρων τύπων υπολογισμών. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται η ανάλυση της πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου (Plastic) και η δυναμική ανάλυση (Dynamic analysis).

Στην συνέχεια, ορίζονται οι διάφορες φάσεις υπολογισμών. Η αρχική φάση (Initial Phase), αντιπροσωπεύει την κατάσταση του προβλήματος, όπως αυτή ορίστηκε στον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του προγράμματος εισαγωγής δεδομένων και αποτελεί το σημείο έναρξης των περαιτέρω υπολογισμών. Για την επιλογή της πρώτης φάσης υπολογισμών (Phase 1), δίνεται η επιλογή Next πάνω από την λίστα των φάσεων υπολογισμού και εμφανίζεται μια νέα γραμμή.

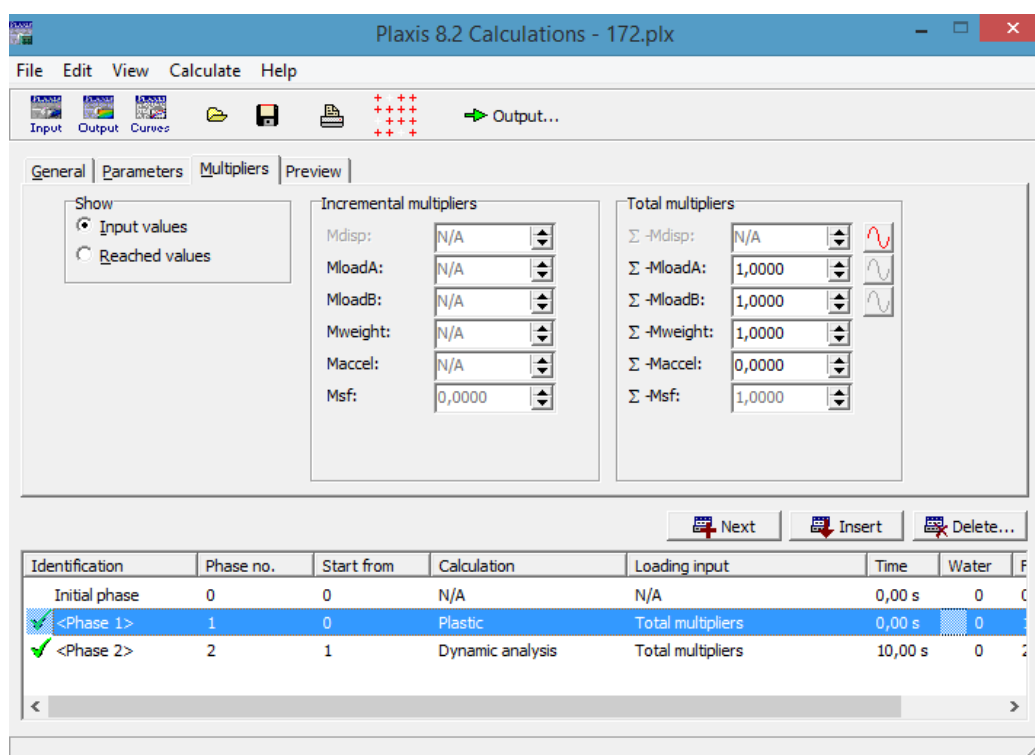
Μετά την εισαγωγή της φάσης, η φάση αυτή πρέπει να οριστεί. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια τριών διαφορετικών “φύλλων” επιλογών, που περιέχει το παράθυρο διαλόγου και αναφέρονται στα γενικά χαρακτηριστικά της φάσης (General), στις παραμέτρους (Parameters) και στους πολλαπλασιαστές (Multipliers).



**Εικόνα 4.14:** Η καρτέλα της διαδικασίας των υπολογισμών στο Plaxis

Από την καρτέλα General, ορίζεται ο τύπος της κάθε φάσης όπως και το όνομα αυτής. Στην καρτέλα Parameters, εισάγεται ο αριθμός των βημάτων υπολογισμού της κάθε φάσης υπολογισμών (Additional steps), ενώ είναι δυνατόν να μηδενιστούν οι παραμορφώσεις που προέκυψαν από τις

προηγούμενες φάσεις υπολογισμών (Reset displacements to zero), όπως και το να διαγραφούν τα ενδιάμεσα στάδια (Delete intermediate steps). Εν συνεχεία, από την καρτέλα Multipliers, μπορούν να οριστούν οι μέγιστες τιμές των εξωτερικών φορτίων, από την ρύθμιση των συνολικών πολλαπλασιαστών (Total multipliers). Στην παρούσα εργασία, η μόνη αλλαγή που θα πραγματοποιηθεί, θα είναι το ΣMweight που θα οριστεί ίσο με ένα, ενώ από το κόκκινο σύμβολο (καμπύλη) δεξιά του ΣMdisp (Εικόνα 4.15), εισάγονται οι σεισμοί που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις, κατά την φάση της δυναμικής ανάλυσης.

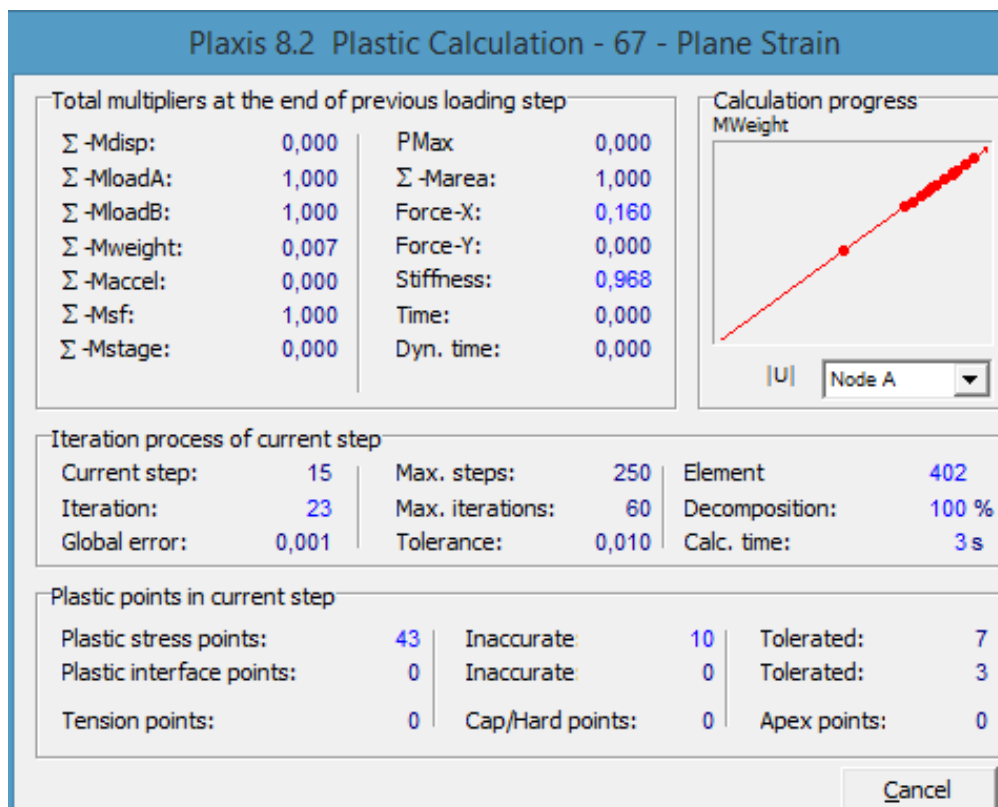


**Εικόνα 4.15:** Καρτέλα Multipliers της φάσης των υπολογισμών

Στην συνέχεια, μετά τον ορισμό των φάσεων υπολογισμού και πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης, επιλέγονται κάποια σημεία στο επίπεδο του προτύπου, στα οποία θα υπολογιστούν οι μετατοπίσεις και οι επιταχύνσεις κατά την διαδικασία των υπολογισμών. Αυτό γίνεται με το κόκκινο σύμβολο αριστερά του output ( με τους σταυρούς), που φαίνεται στην Εικόνα 4.15.

Ακολουθεί η εκτέλεση της διαδικασίας των υπολογισμών, με το Calculate, που βρίσκεται πάνω και δεξιά, στην Εικόνα 4.14. Με την έναρξη της διαδικασίας

αυτής, για κάθε φάση επίλυσης εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου, στο οποίο αναγράφονται κάποιες βασικές πληροφορίες σχετικές με την διαδικασία επίλυσης (Εικόνα 4.16).



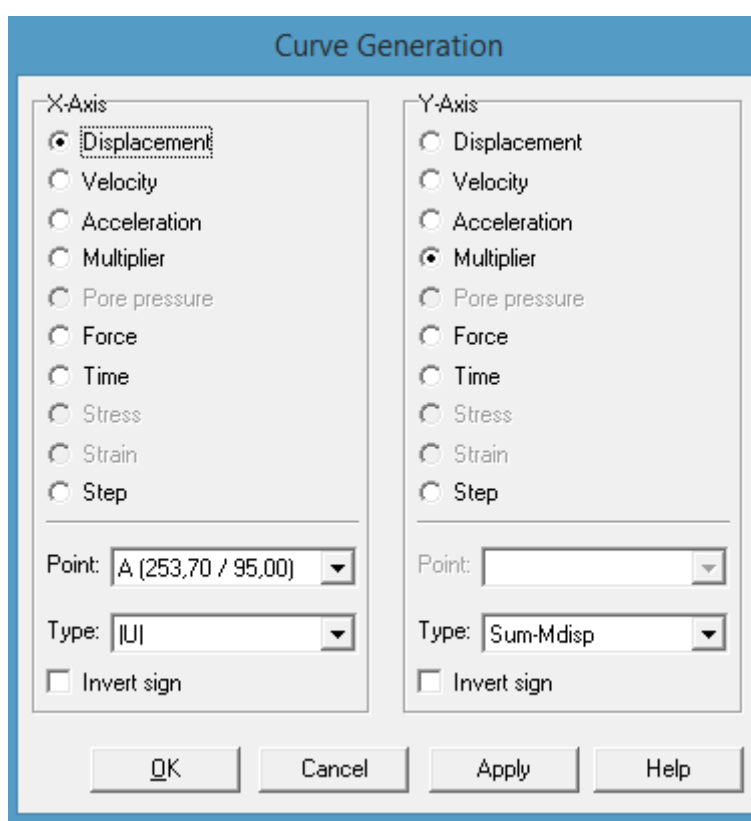
**Εικόνα 4.16:** Παράθυρο διαλόγου κατά την φάση της επίλυσης

Στην συνέχεια μετά το πέρας της διαδικασίας του υπολογισμού, πατώντας το Output (που βρίσκεται πάνω δεξιά στην Εικόνα 4.15), φαίνεται το παραμορφωμένο μοντέλο (Deformed mesh), μετά την εκτέλεση των φάσεων που ορίστηκαν στο πρόγραμμα.

#### 4.3.9. Σχεδιασμός Καμπυλών

Πατώντας το curves (που φαίνεται πάνω και αριστερά στην Εικόνα 4.15), ζητείται από τον χρήστη να επιλέξει από ποιο αρχείο επιθυμεί να χρησιμοποιήσει στοιχεία, για να σχεδιάσει κάποιο διάγραμμα. Μετά την επιλογή του project, εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου, στο οποίο γίνονται οι επιλογές

του γραφήματος το οποίο πρόκειται να σχεδιαστεί. Στο παράθυρο διαλόγου αυτό, υπάρχουν δύο πλαίσια με διάφορες τιμές για τον οριζόντιο άξονα x, όπως και για τον κατακόρυφο y. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται διαγράμματα Displacement-Time ( $U_x-t$ ) και Acceleration-Time ( $a_x-t$ ). Εισάγονται ένα ένα τα σημεία που έχουν ληφθεί προηγουμένως και φαίνονται οι διαφορές που υπάρχουν στην καμπύλη καθενός από αυτά.



**Εικόνα 4.17:** Εισαγωγή δεδομένων για τον σχεδιασμό των καμπυλών

## 4.4. Παραμετρικές Αναλύσεις

### 4.4.1. Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό, θα αναλυθούν οι παράγοντες που επιδρούν στην σεισμική συμπεριφορά του φράγματος της Τριανταφυλλιάς. Αυτοί μπορεί να είναι όπως αναλύθηκε στην εργασία αυτή:

- α. Το έδαφος θεμελίωσης
- β. Οι ιδιότητες των υλικών στο σώμα του φράγματος
- γ. Η ανελαστική συμπεριφορά
- δ. Η σεισμική διέγερση
- ε. Η καταπόνηση από το νερό

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι κατά την εφαρμογή των δυναμικών αναλύσεων, έγινε η παραδοχή ότι το φράγμα δεν καταπονείται από την επίδραση του νερού, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την αδρανειακή καταπόνηση, αντιμετωπίζοντας δηλαδή το σεισμικό πρόβλημα εν ξηρώ, ώστε να δοθεί έμφαση στην δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής, στην αστάθεια των πρηνών και στις προκαλούμενες μόνιμες μετατοπίσεις. Ακόμα, είναι γεγονός ότι η παρουσία του νερού εισάγει υδροστατικές και υδροδυναμικές ωθήσεις και θα ήταν αρκετά δύσκολο να μελετηθεί και αυτή η παράμετρος στην παρούσα εργασία.

Έτσι, για τον έλεγχο αυτό πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με την βοήθεια του λογισμικού Plaxis, λαμβάνοντας υπόψη αρκετά σενάρια για καθένα από τους παράγοντες που αναφέρονται παραπάνω και μπορούν να επηρεάσουν την συμπεριφορά ενός φράγματος.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενώ γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων, με αυτά που έχουν υπολογιστεί από την Μ. Αυγερινού. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη του παρόντος κεφαλαίου.

#### 4.4.2. Δημιουργία Γεωμετρικού Μοντέλου

Αρχικά, δημιουργήθηκε το γεωμετρικό μοντέλο του φράγματος της Τριανταφυλλιάς σε δισδιάστατη προβολή στο πρόγραμμα Plaxis. Σε αυτό λήφθηκαν υπόψη οι πραγματικές διαστάσεις του, όπως αυτές φαίνονται στις μελέτες που είχαν γίνει κατά την φάση της δημιουργίας του, ωστόσο αυτές παρουσιάζονται σε απλουστευμένη μορφή. Οι διαστάσεις που λήφθηκαν στο Plaxis, φαίνονται στην Εικόνα 4.18, που δημιουργήθηκε με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD.

#### 4.4.3. Εδαφικές Συνθήκες

Πολύ σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του φράγματος παίζει το έδαφος πάνω στο οποίο θεμελιώνεται. Αυτό συμβαίνει αρχικά διότι όλη η κατασκευή στηρίζεται εκεί και επιπλέον γιατί τα φορτία που δημιουργούνται κατά τον σεισμό, υπεισέρχονται αρχικά στην θεμελίωση και στην συνέχεια διαδίδονται στην υπόλοιπη κατασκευή. Οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι σε περίπτωση σεισμού το έδαφος πάνω στο οποίο θεμελιώνεται το φράγμα, παίζει καθοριστικό ρόλο για την κατασκευή, καθώς αν αυτό έχει καλή αντοχή στα σεισμικά φορτία θα απορροφήσει μέρος του κραδασμού και δεν θα τον αφήσει να διαδοθεί στο υπόλοιπο φράγμα. Στην αντίθετη περίπτωση, τα σεισμικά φορτία που θα περάσουν στο φράγμα θα είναι περισσότερα και ίσως δημιουργήσουν προβλήματα στην κατασκευή. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του εδάφους θεμελίωσης, έχει και η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής στην οποία θεμελιώνεται το φράγμα και με βάση αυτή, μπορεί να επιλεγεί το κατάλληλο έδαφος για ένα φράγμα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, στις αναλύσεις που έγιναν, λαμβάνονται 3 σενάρια για το έδαφος θεμελίωσης του φράγματος της Τριανταφυλλιάς:

- α. Βραχώδες υπόβαθρο
- β. Ημιβραχώδες υπόβαθρο
- γ. Μαλακά εδαφικά υλικά

Στο βραχώδες υπόβαθρο, τα διατμητικά κύματα διαδίδονται με ταχύτητα  $V_s=2000$  m/s, στο ημιβραχώδες διαδίδονται με ταχύτητα  $V_s=500$  m/s, ενώ στα μαλακά εδαφικά υλικά με ταχύτητα  $V_s=200$  m/s.

#### 4.4.4. Υλικά του φράγματος

Μεγάλη σημασία για την κατασκευή, έχουν και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στο σώμα του φράγματος. Η σωστή επιλογή των υλικών είναι σημαντική, γιατί έτσι θα μπορέσει να προσομοιωθεί καλύτερα η συμπεριφορά του εδάφους και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις αναλύσεις, θα είναι πιο ακριβή. Στην μελέτη αυτή λοιπόν, στον πυρήνα του φράγματος χρησιμοποιείται αργιλικό υλικό, ενώ στο σώμα του φράγματος, δηλαδή στις ζώνες εκατέρωθεν του πυρήνα, χρησιμοποιήθηκε λιθορριπή, η οποία από τον πυρήνα προς τις εξωτερικές ζώνες είναι από λεπτόκοκκη προς χονδρόκοκκη. Για το υλικό της λιθορριπής που θα χρησιμοποιηθεί, λαμβάνονται κάποιες περιπτώσεις για τις ιδιότητες του, ώστε να διαπιστωθεί πως αυτό επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Οι ιδιότητες του υλικού αυτού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4.1:** Σενάρια για το υλικό της λιθορριπής στο σώμα του φράγματος

Υλικό χαμηλής διατμητικής αντοχής ( $V_s=350$ m/s)		Υλικό υψηλής διατμητικής αντοχής ( $V_s=500$ m/s)	
Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
c=0 kpa	c=0 kpa	c=20 kpa	c=20 kpa
$\phi=35^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=25^\circ$	$\phi=30^\circ$

Για το αργιλικό υλικό λαμβάνεται ταχύτητα  $V_s=350$  m/s, ενώ δεν χρειάζονται να υπολογιστούν τιμές για τα c,φ για αυτό το υλικό, αφού συμπεριφέρεται ελαστικά. Επιπλέον, λαμβάνονται έξι σενάρια για τον συνδυασμό των υλικών του φράγματος και του υποβάθρου. Αυτά είναι :



- α. Σενάριο 1°: Μαλακά συνεκτικά υλικά στο υπόβαθρο, ομοιογένεια στα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος
- β. Σενάριο 2°: Μαλακά συνεκτικά υλικά στο υπόβαθρο, ανομοιογένεια στα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος
- γ. Σενάριο 3°: Ημιβραχώδες υπόβαθρο, ομοιογένεια στα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος
- δ. Σενάριο 4°: Ημιβραχώδες υπόβαθρο, ανομοιογένεια στα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος
- ε. Σενάριο 5°: Βραχώδες υπόβαθρο, ομοιογένεια στα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος
- στ. Σενάριο 6°: Βραχώδες υπόβαθρο, ανομοιογένεια στα γεωυλικά στο σώμα του φράγματος

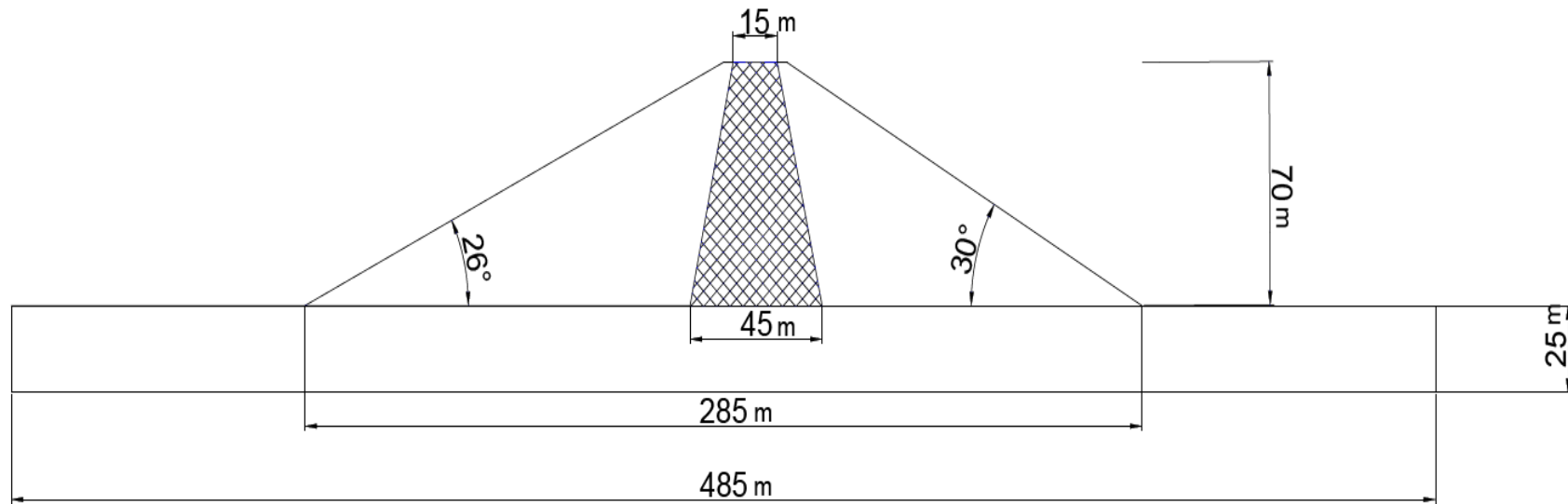
Ομοιογένεια σημαίνει ότι η ταχύτητα του αργιλικού υλικού, ταυτίζεται με αυτή του υλικού στο σώμα του φράγματος, ενώ ανομοιογένεια ότι η ταχύτητα του αργιλικού υλικού είναι διαφορετική με την ταχύτητα στο σώμα του φράγματος.

Οπότε, γίνεται κατανοητό ότι για την εφαρμογή των παραπάνω έξι σεναρίων, θα χρειαστεί ένα υλικό χαμηλής και ένα υλικό υψηλής διατμητικής αντοχής για το σώμα του φράγματος, τα οποία λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.1. Έτσι, θα χρησιμοποιηθούν ο συνδυασμός των σεναρίων 1 και 4 του Πίνακα 4.1 για την εφαρμογή των έξι σεναρίων, ενώ στην συνέχεια ομοίως θα εκτελεστεί ο συνδυασμός των σεναρίων 2 και 3. Για να μην υπάρξει σύγχυση, ο συνδυασμός των σεναρίων 1 και 4 της λιθορριπής, θα ονομαστεί Λιθορριπή 1, ενώ ο συνδυασμός των σεναρίων 2 και 3 της λιθορριπής, θα ονομαστεί Λιθορριπή 2.

#### 4.4.5. Σεισμικές Διεγέρσεις

Ως προς τις σεισμικές διεγέρσεις που επιβλήθηκαν στο φράγμα μέσω του προγράμματος Plaxis, αυτές δεν σχετίζονται με την περιοχή μελέτης, γιατί κάτι τέτοιο θα ταυτιζόταν με την αντισεισμική μελέτη της περιοχής του φράγματος, κάτι το οποίο έχει ήδη γίνει από τους μηχανικούς που ασχολήθηκαν με την

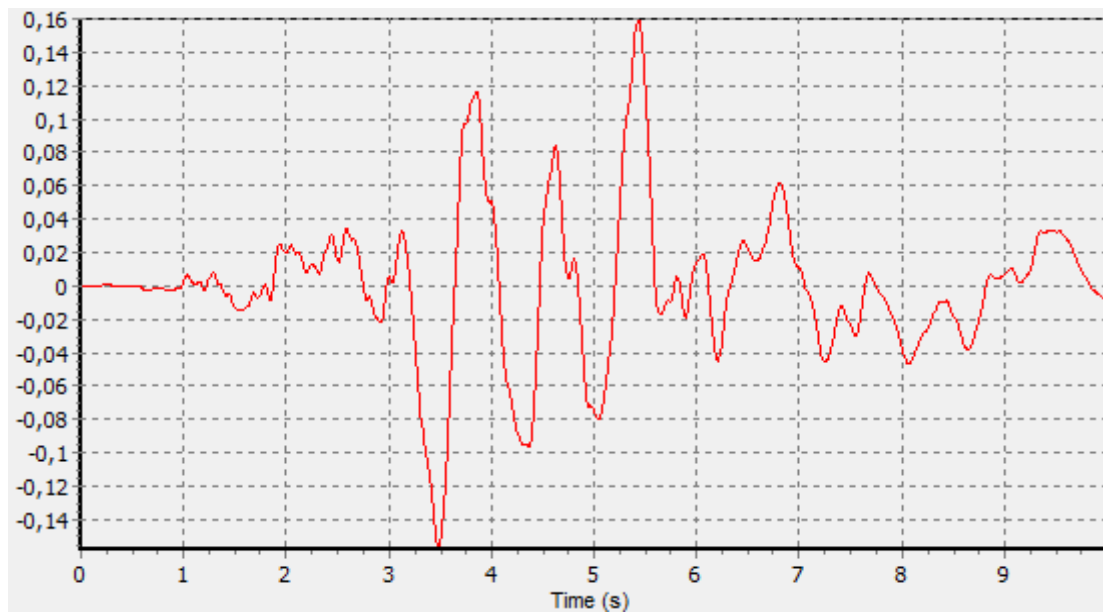
κατασκευή του φράγματος της Τριανταφυλλιάς. Σκοπός της μελέτης αυτής, είναι η κατανόηση του σεισμικού προβλήματος, δηλαδή πως ο σεισμός ανάλογα με το μέγεθος του επηρεάζει μια μεγάλη κατασκευή, όπως ένα φράγμα και για τον λόγο αυτό οι σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους η μία από την άλλη, για να αξιολογηθεί πως η κάθε σεισμική διέγερση καταπονεί το φράγμα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της. Έτσι επιλέχθηκαν έντεκα σεισμικές διεγέρσεις από τον διεθνή χώρο, οι οποίες εισάχθηκαν στο Plaxis και εφαρμόστηκαν σε κάθε ένα από τα σενάρια που προέκυψαν, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι σεισμικές διεγέρσεις εφαρμόστηκαν στο φράγμα της Τριανταφυλλιάς, για χρόνο δέκα δευτερολέπτων, ενώ σε κάθε ανάλυση έγιναν τουλάχιστον διακόσιες πενήντα σεισμικές καταγραφές. Στις Εικόνες 4.19-4.29, φαίνονται οι χρονοϊστορίες των έντεκα σεισμικών διεγέρσεων που εισάχθηκαν στο πρόγραμμα, για τα δύο επίπεδα κορυφαίας επιτάχυνσης 0,16g και 0,24g.



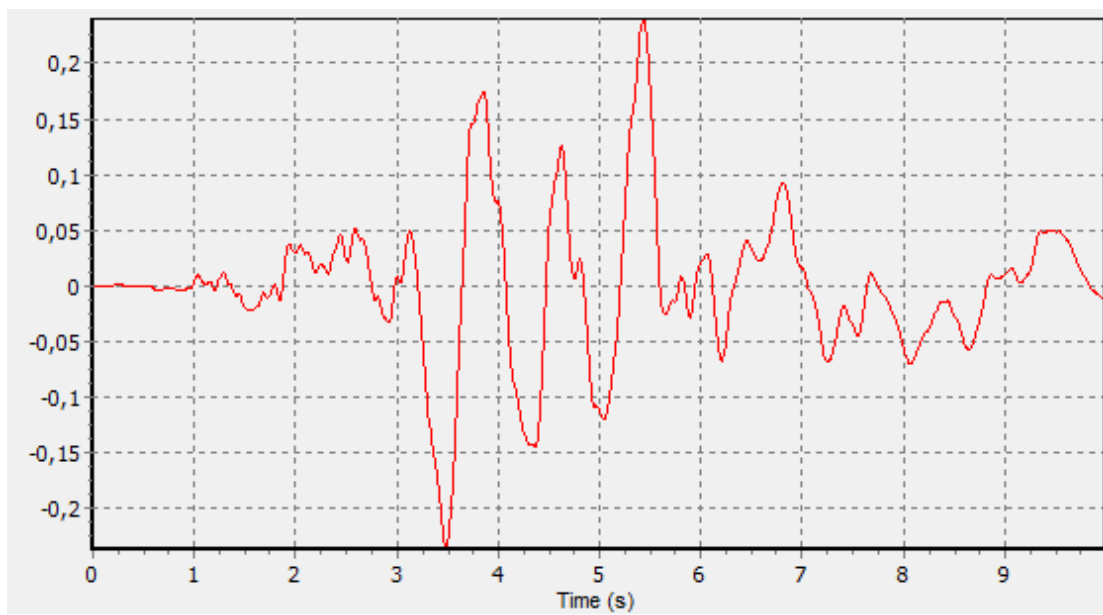
**Εικόνα 4.18:** Εισαγωγή διαστάσεων φράγματος Τριανταφυλλιάς στο AutoCAD

**Πηγή:** Λογισμικό AutoCAD

Chalfant 0,16g

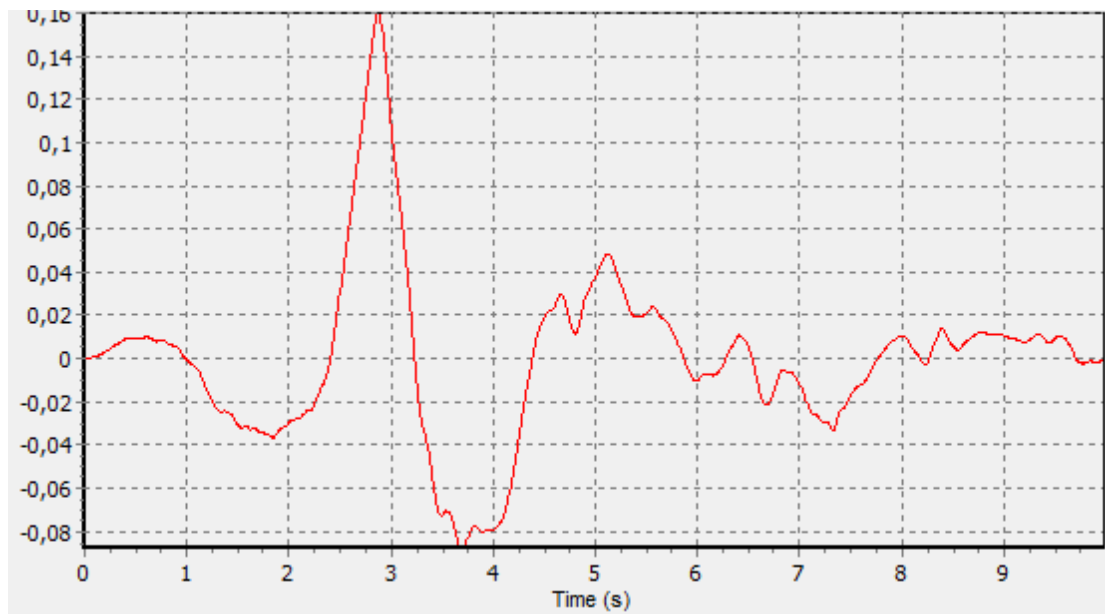


Chalfant 0,24g

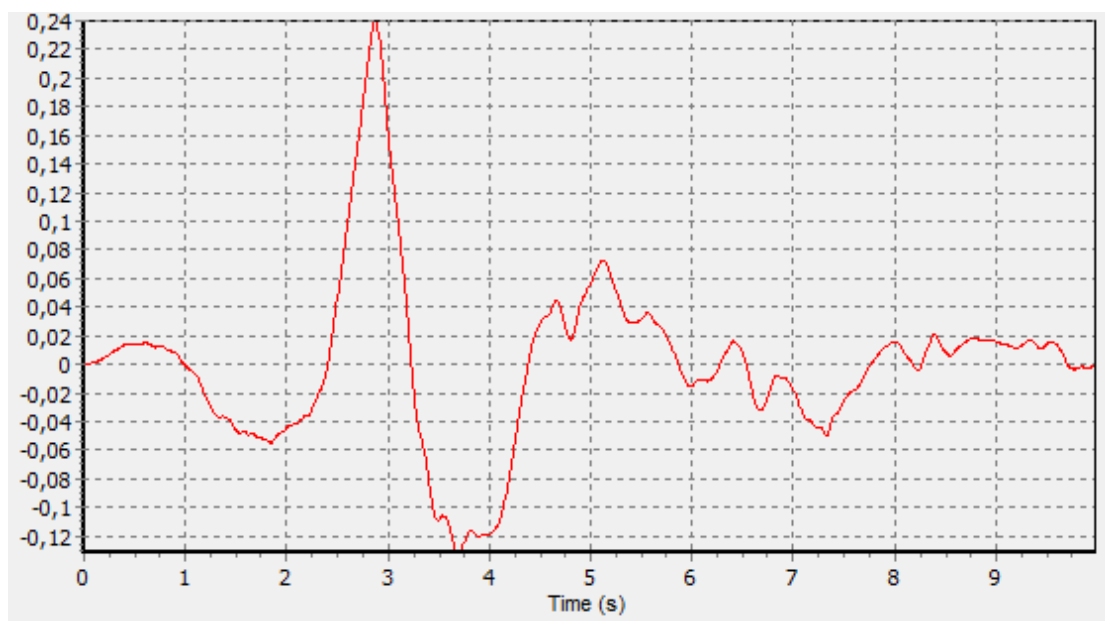


**Εικόνα 4.19:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Chalfant για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Erzincan 0,16g

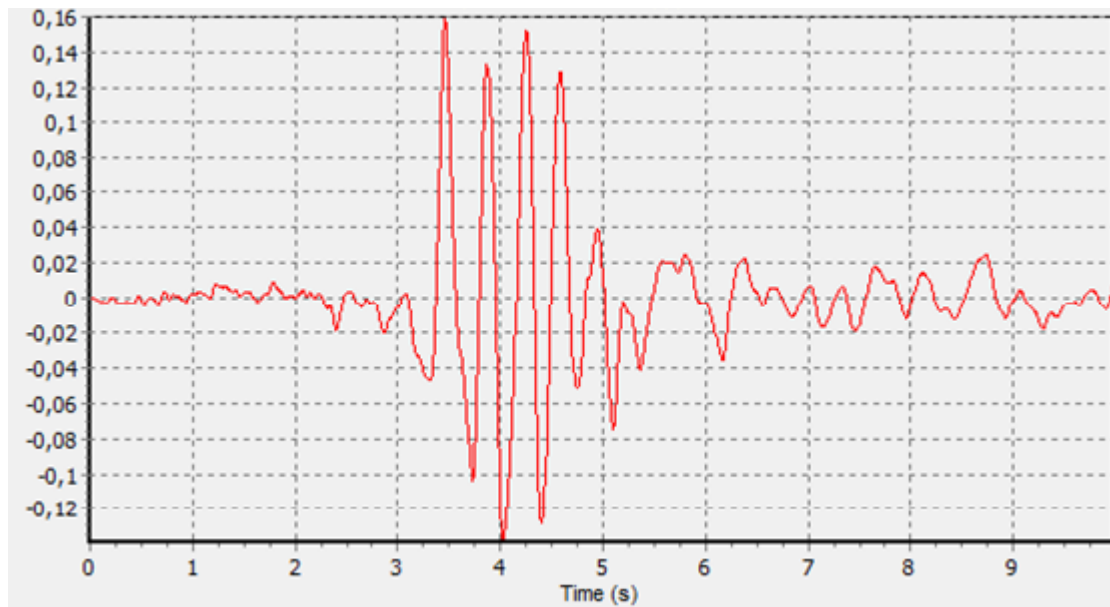


Erzincan 0,24 g

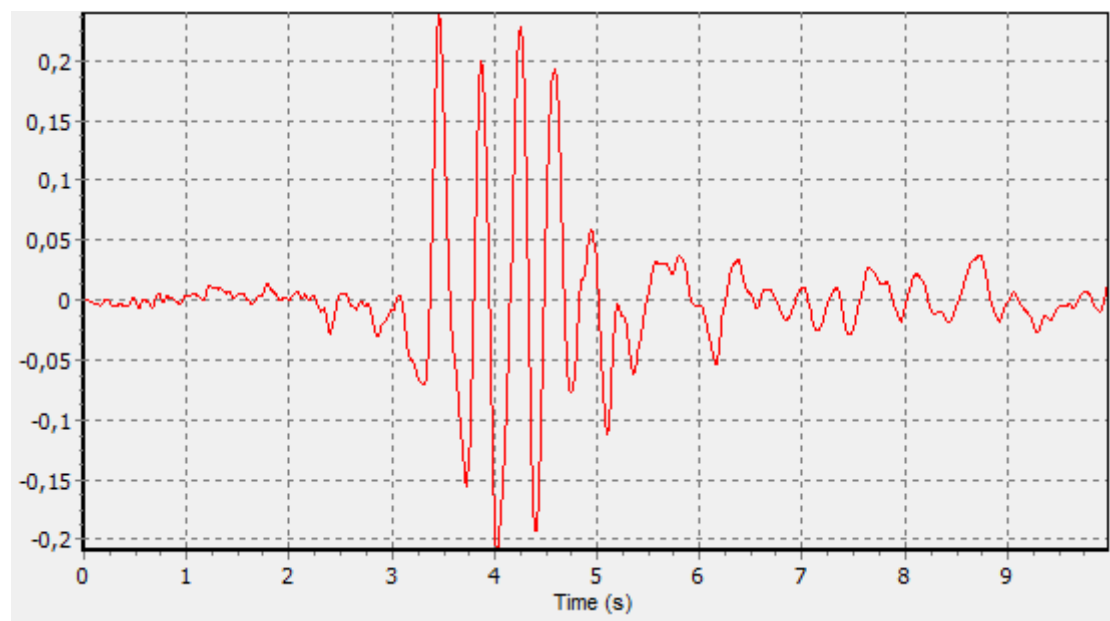


**Εικόνα 4.20:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Erzincan για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Friuli 0,16g

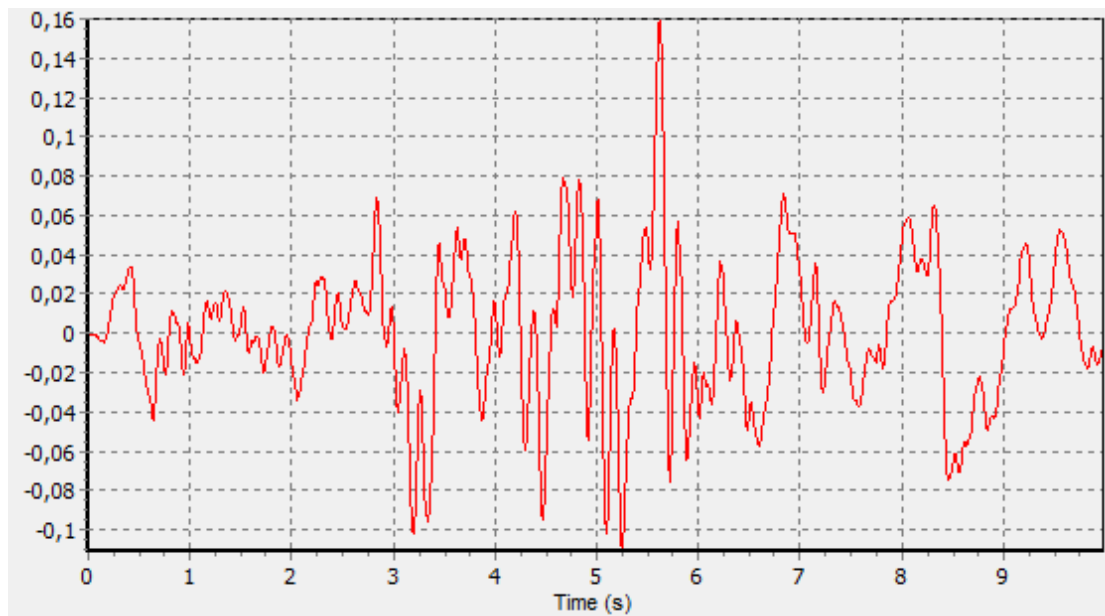


Friuli 0,24 g

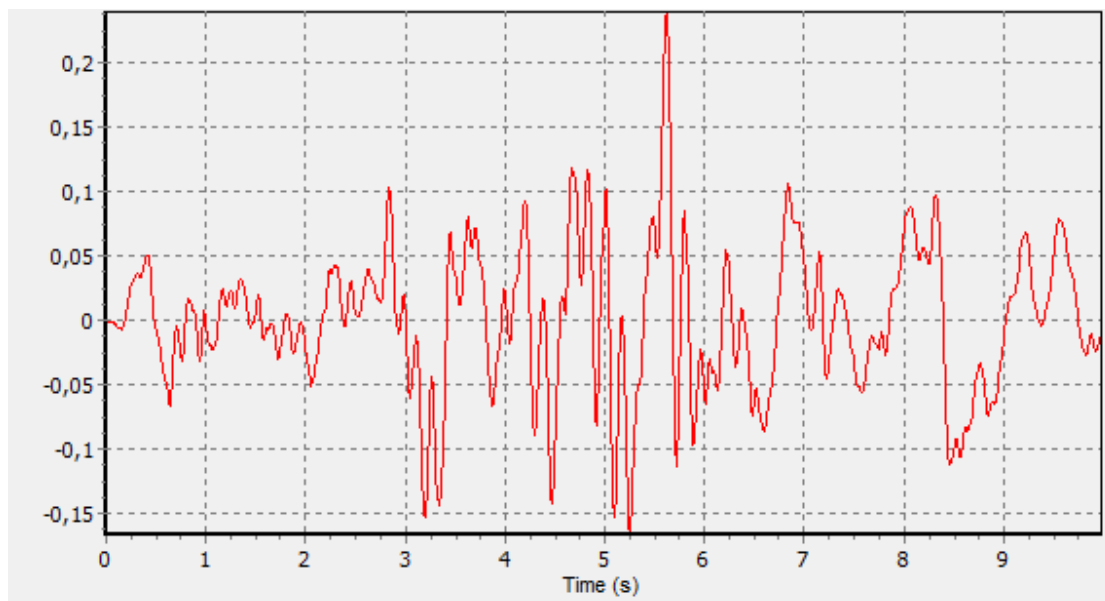


**Εικόνα 4.21:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Friuli για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Ionian 0,16g

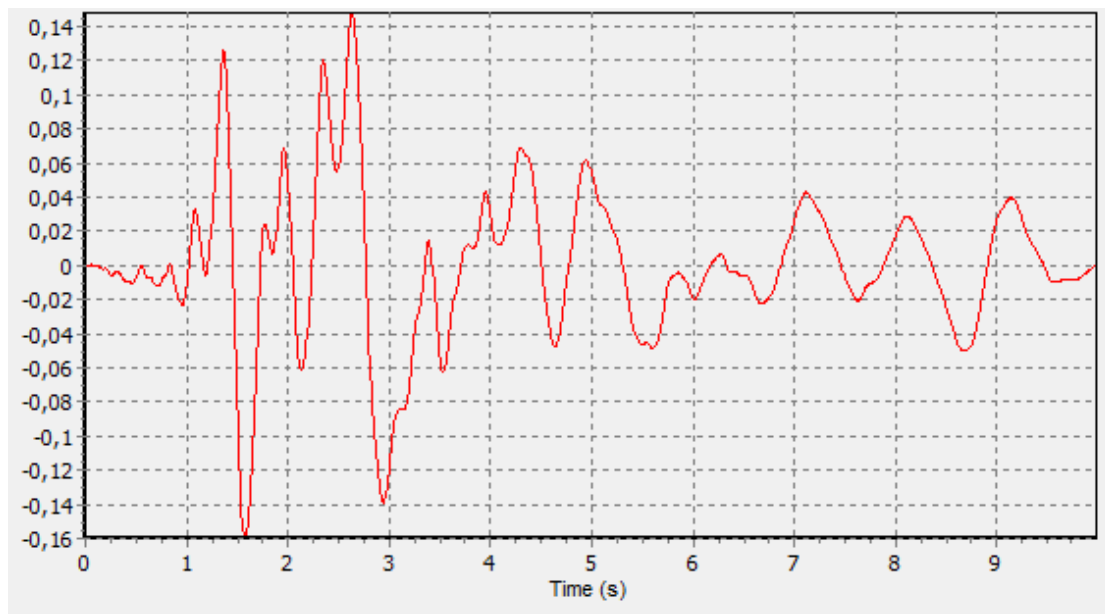


Ionian 0,24g

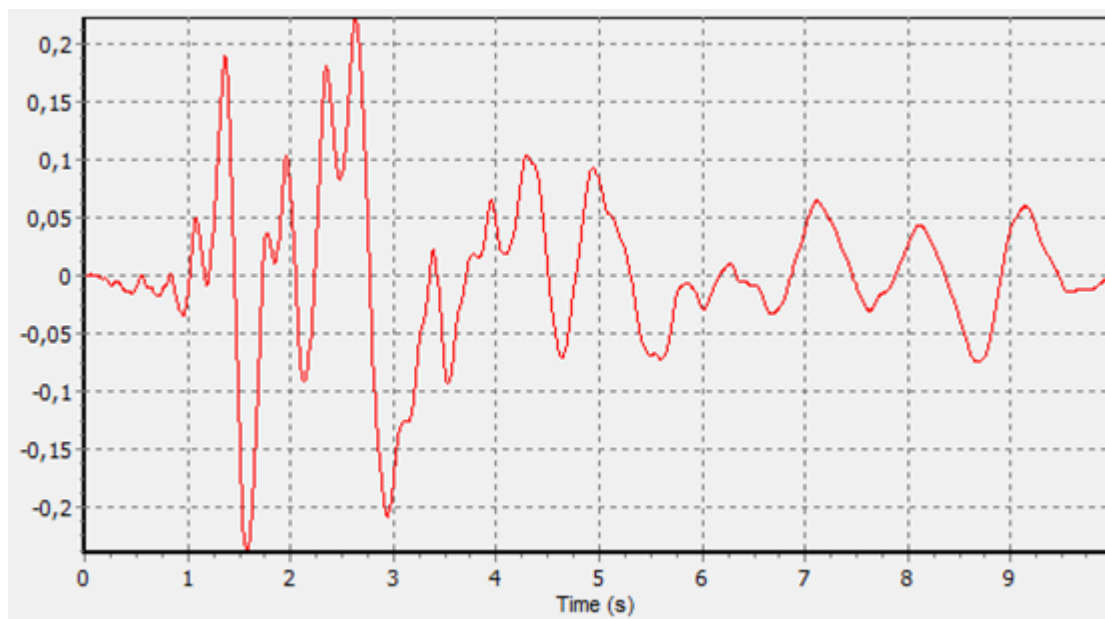


**Εικόνα 4.22:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Ιονίου για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Κalamata 0,16g



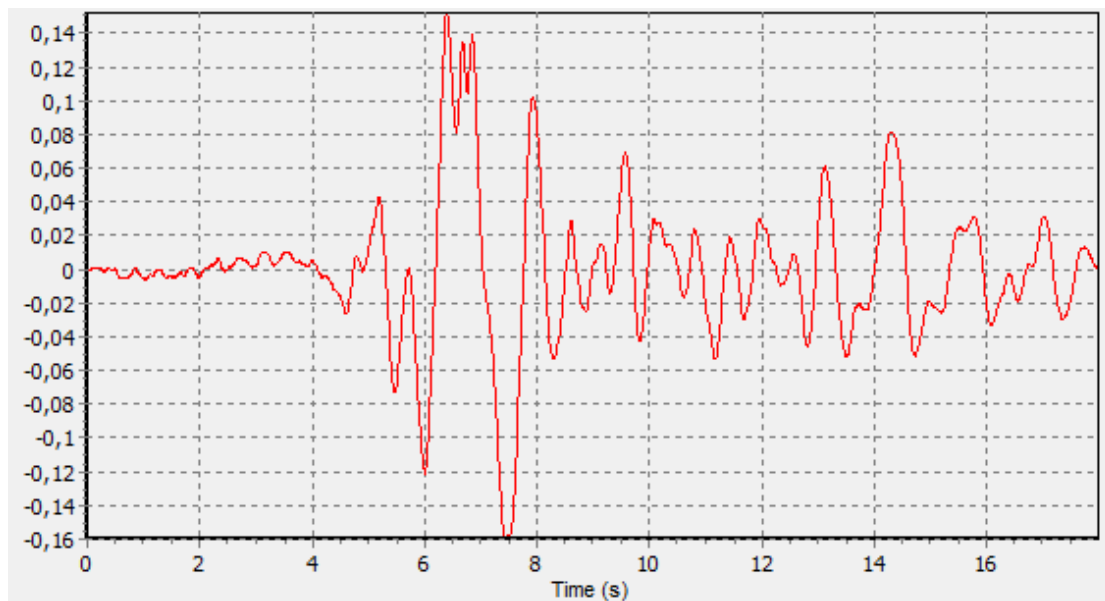
Κalamata 0,24g



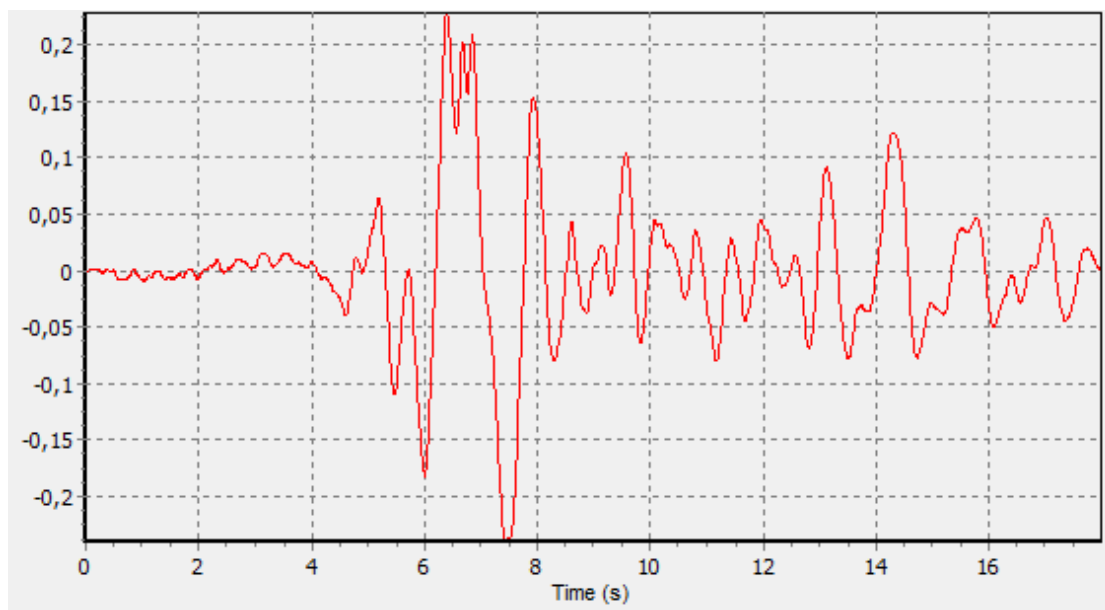
**Εικόνα 4.23:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Κalamata για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g



Montenegro 0,16g

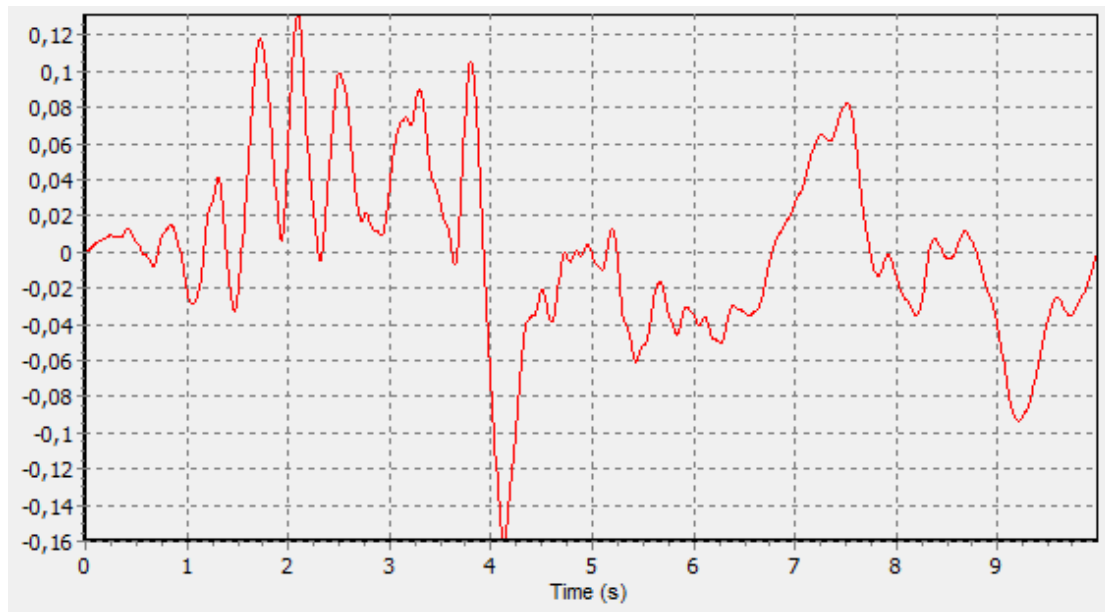


Montenegro 0,24g

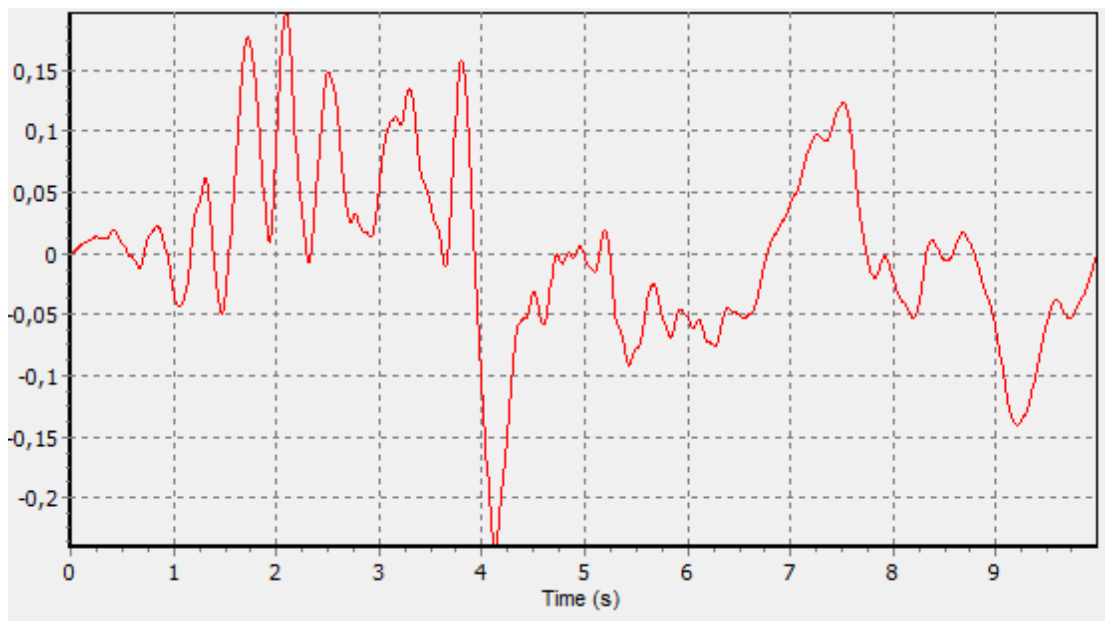


**Εικόνα 4.24:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Montenegro για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Nsps 0,16g

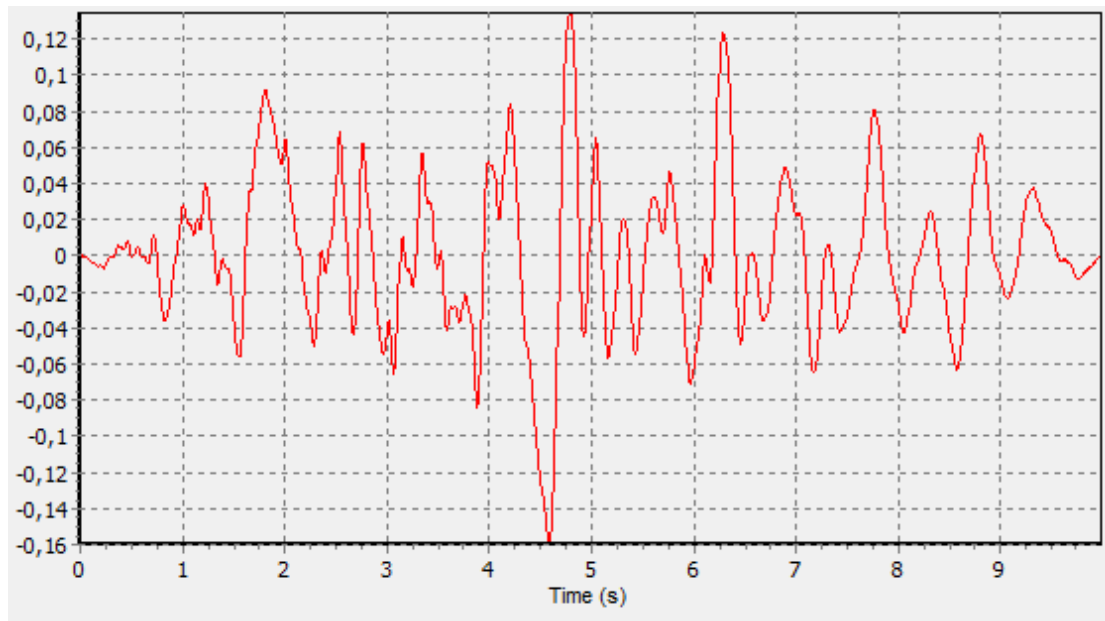


Nsps 0,24g

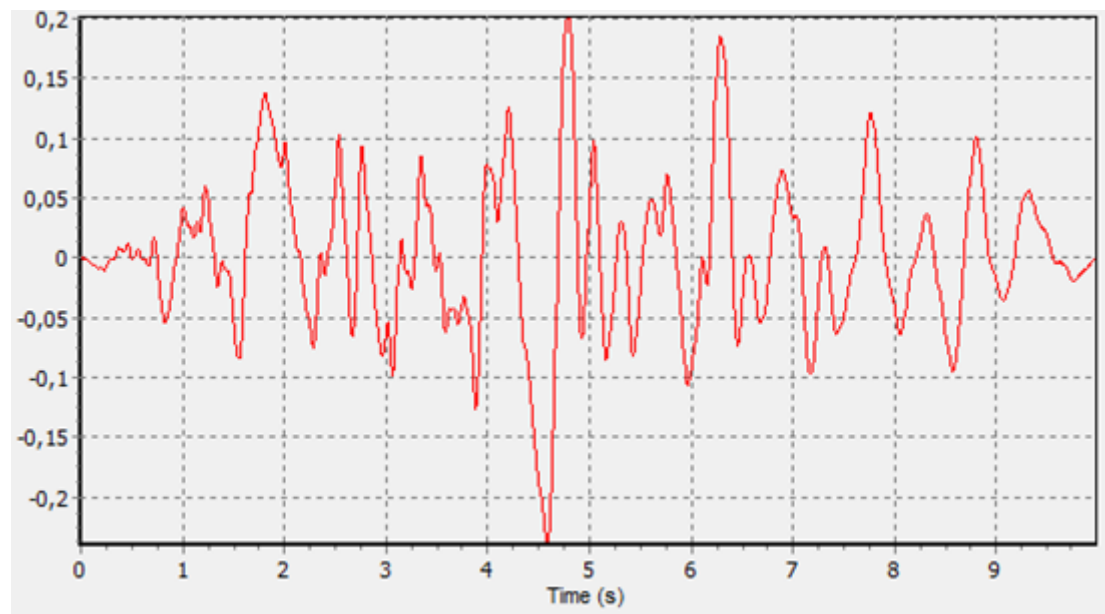


**Εικόνα 4.25:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Nsps για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Parkfield 11 km 0,16g

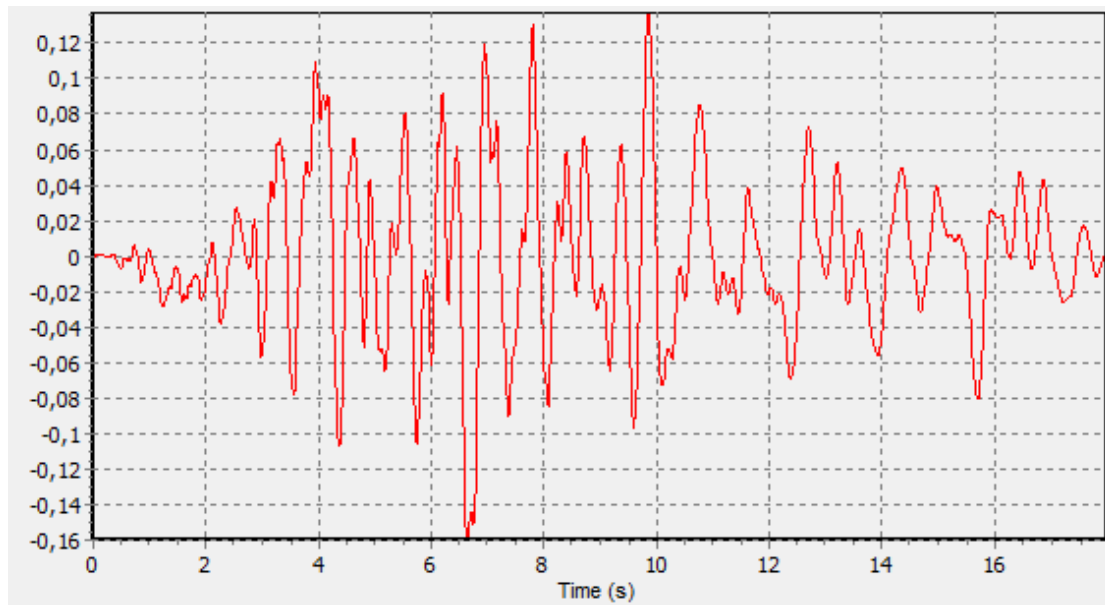


Parkfield 11 km 0,24g

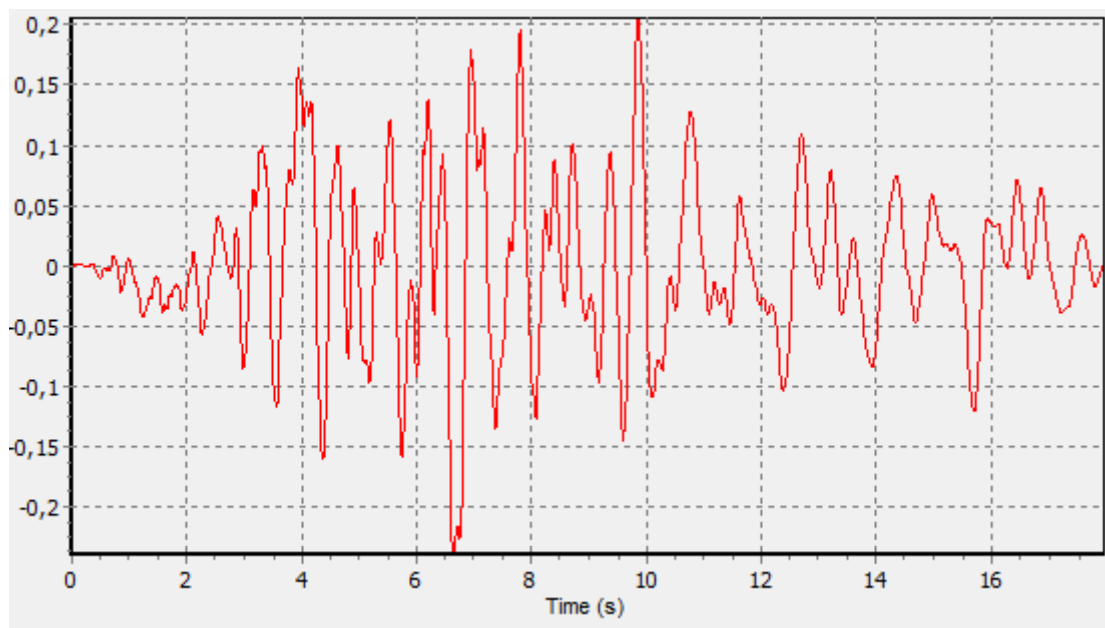


**Εικόνα 4.26:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Parkfield 11km για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Parkfield 14 km 0,16g

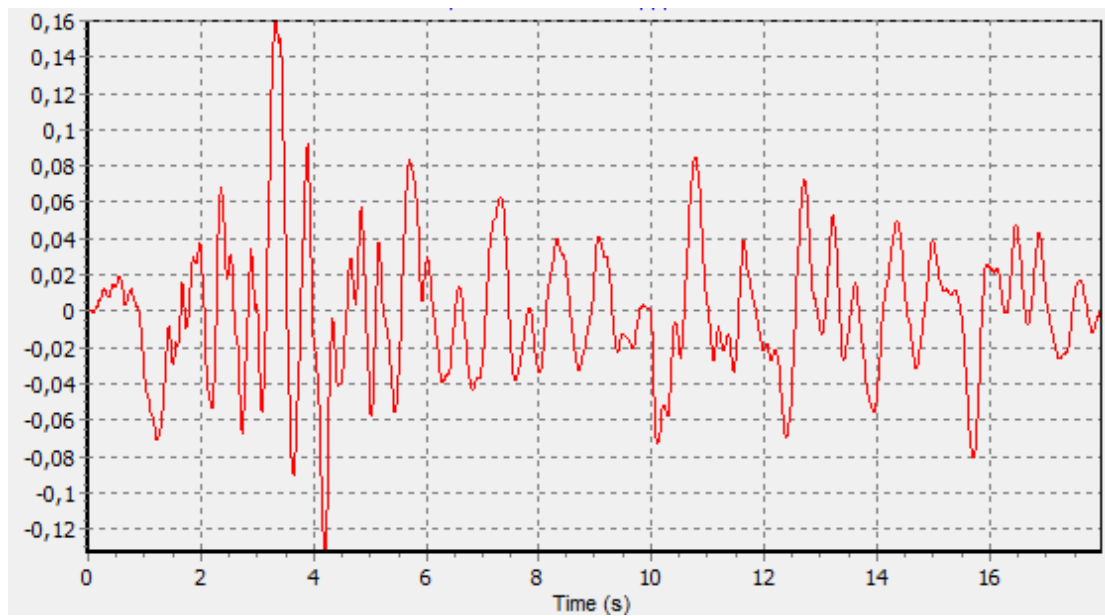


Parkfield 14 km 0,24g

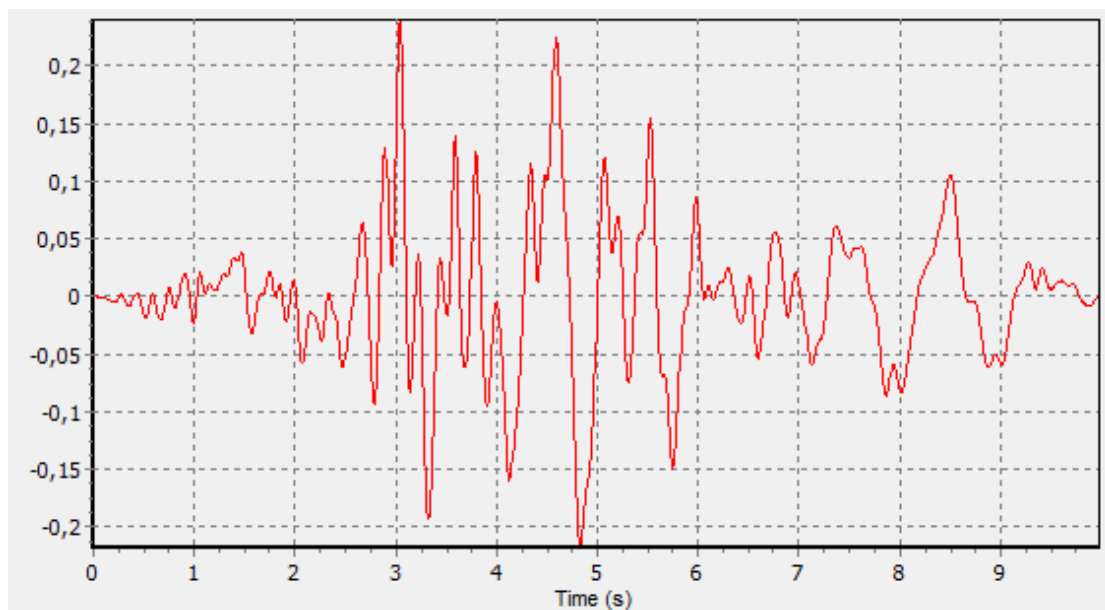


**Εικόνα 4.27:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Parkfield 14km για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Parkfield 20 km 0,16g

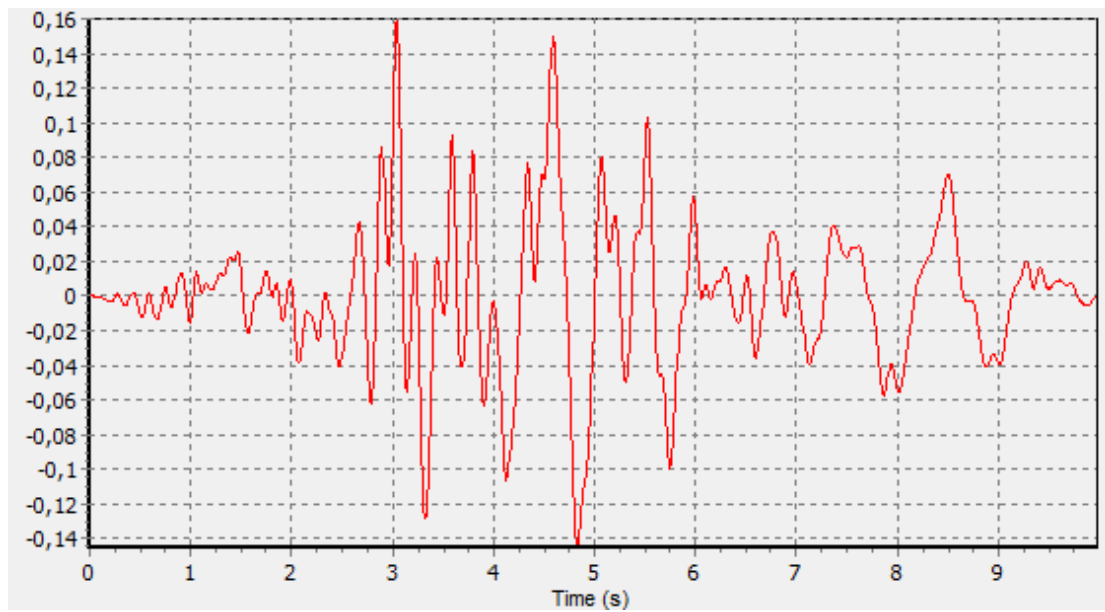


Parkfield 20 km 0,24g

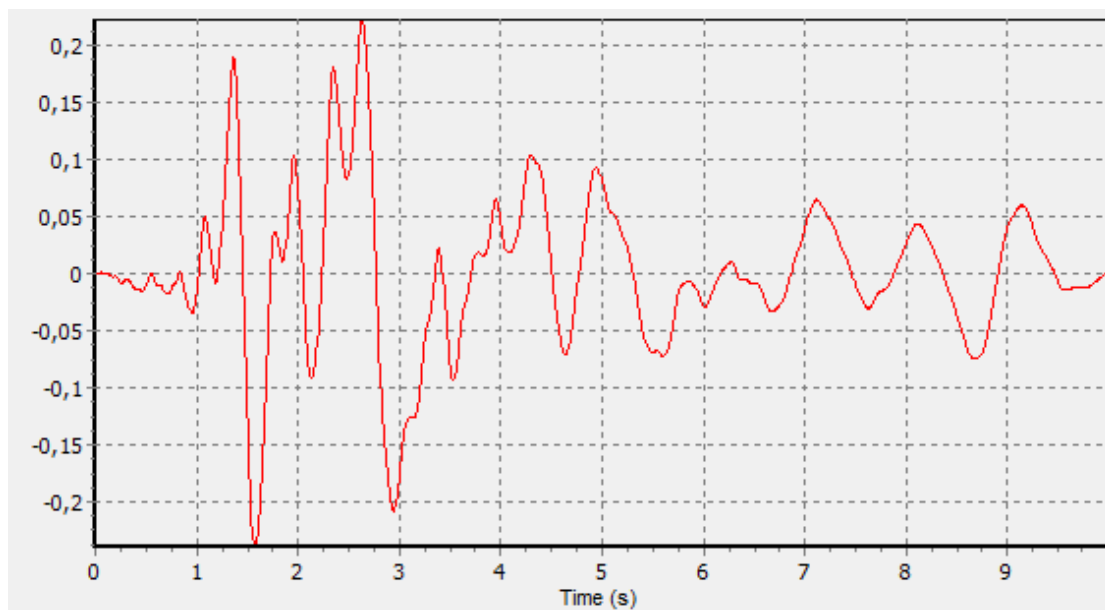


**Εικόνα 4.28:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Parkfield 20km για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Whittier 0,16g

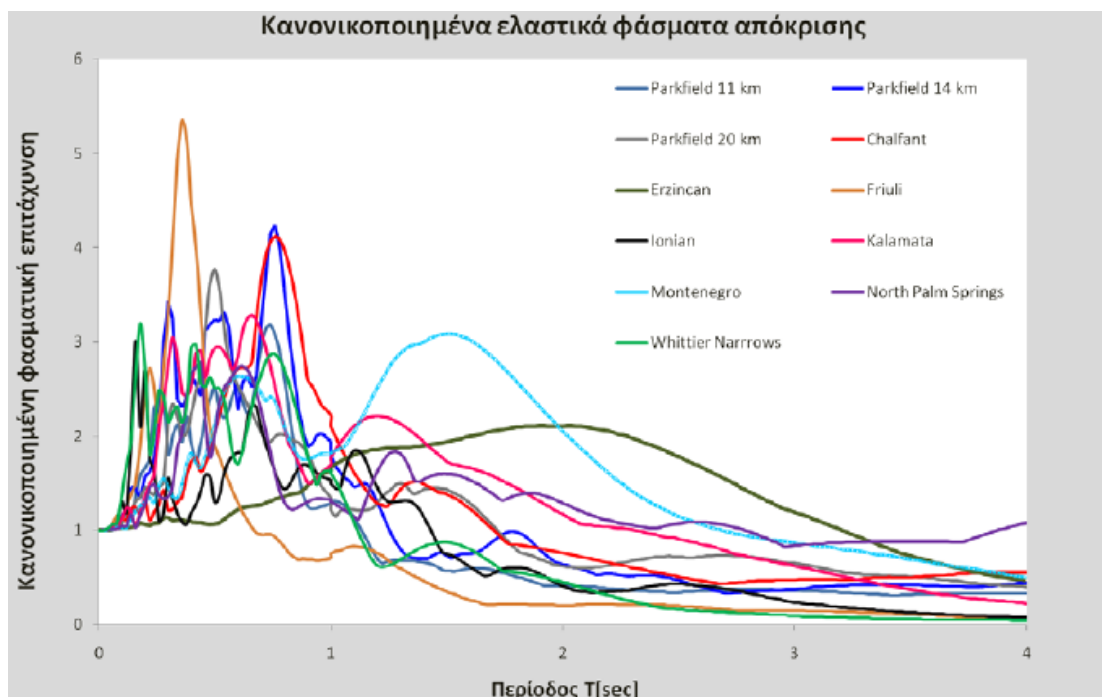


Whittier 0,24g



**Εικόνα 4.29:** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης του σεισμού Whittier για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g

Ακόμα, στην Εικόνα 4.30 φαίνονται τα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα απόκρισης απόκρισης των έντεκα σεισμών, όπως αυτά υπολογίστηκαν στην εργασία της Αυγερινού (2014). Στα φάσματα αυτά οι σεισμοί διαφοροποιούνται ως προς το φασματικό τους περιεχόμενο.



**Εικόνα 4.30:** Κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα απόκρισης

(Πηγή: Αυγερινού, 2014)

#### 4.4.6. Ελαστικές και Ανελαστικές Αναλύσεις

Ως προς την συμπεριφορά των υλικών της λιθορριπής, πραγματοποιήθηκαν κάποιες ελαστικές και κάποιες ανελαστικές αναλύσεις.

Είναι γεγονός ότι οι ελαστικές αναλύσεις δεν αποτελούν ρεαλιστική προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του φράγματος, διότι σε αυτές τις αναλύσεις, το μέτρο διάτμησης, όπως και η απόσβεση των υλικών παραμένουν σταθερά και έτσι οι μετακινήσεις που θα δημιουργηθούν μετά την σεισμική

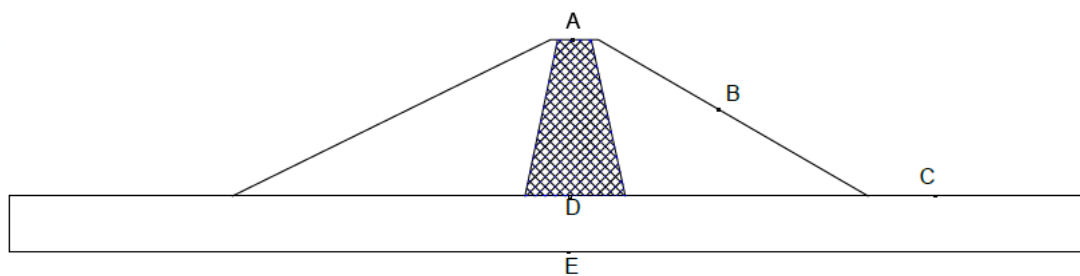
διέγερση, θα είναι μόνο ως προς τον άξονα των  $\chi$ , ενώ δεν θα υπάρξουν παραμορφώσεις στο φράγμα κατά την εφαρμογή τους. Το ενδιαφέρον σε αυτές τις αναλύσεις δεν είναι οι μετατοπίσεις που θα προκύψουν, αφού αυτές δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, αλλά οι επιταχύνσεις που θα αναπτυχθούν σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος. Οι αναλύσεις αυτές υλοποιήθηκαν για ένα επίπεδο κορυφαίας επιτάχυνσης, για 0,16g.

Στην συνέχεια υλοποιήθηκαν οι ανελαστικές αναλύσεις, οι οποίες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και από τις οποίες μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για το φράγμα. Οι αναλύσεις αυτές ανταποκρίνονται σε πιο ρεαλιστική συμπεριφορά του φράγματος, κατά την διάρκεια του σεισμού και μέσα από αυτές μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά οι μετατοπίσεις που θα προκύψουν σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος, όπως και οι επιταχύνσεις που θα αναπτυχθούν σε αυτά. Για τις ανελαστικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν 2 επίπεδα κορυφαίας επιτάχυνσης 0,16g και 0,24g.

#### **4.4.7. Χαρακτηριστικά Σημεία στο φράγμα**

Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων, επιλέχθηκαν πέντε χαρακτηριστικά σημεία στο φράγμα, στα οποία στο τέλος της κάθε ανάλυσης φαίνονται οι μετατοπίσεις που προέκυψαν μετά από κάθε σεισμό, όπως και οι επιταχύνσεις που αναπτύχθηκαν σε αυτά. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν ως εξής: Το A βρίσκεται στην στέψη του φράγματος, το B βρίσκεται στο σώμα του φράγματος, το C βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, το D βρίσκεται στην βάση του φράγματος, ενώ το E βρίσκεται στο υπόβαθρο του φράγματος. Τα σημεία αυτά φαίνονται πως έχουν τοποθετηθεί στο φράγμα στην Εικόνα 4.31, με την βοήθεια του λογισμικού AutoCAD.





**Εικόνα 4.31:** Χαρακτηριστικά σημεία που λήφθηκαν στο φράγμα

#### 4.4.8. Προκαλούμενες μόνιμες μετατοπίσεις

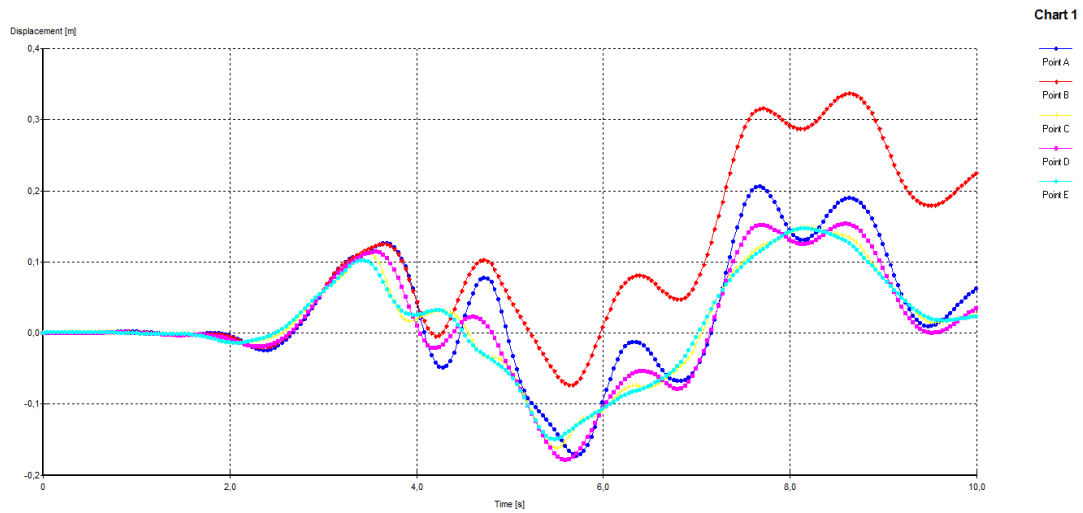
Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των μόνιμων μετατοπίσεων, που προέκυψαν στο φράγμα ύστερα από τον συνδυασμό σεισμού και παραμέτρων, που εισάχθηκε σε κάθε περίπτωση. Στην εργασία αυτή, οι μόνιμες μετατοπίσεις προέκυψαν με την πραγματοποίηση γραμμικών αναλύσεων, μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Από τις αναλύσεις αυτές βρέθηκαν οι μετατοπίσεις σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του φράγματος. Οι μόνιμες μετατοπίσεις υπολογίστηκαν από την διαφορά του σημείου B, δηλαδή του σημείου στο σώμα του φράγματος, και του σημείου D, δηλαδή του σημείου στην βάση του φράγματος (Εικόνα 4.31), στο τέλος των δέκα δευτερολέπτων για τα οποία εισάχθηκε η σεισμική διέγερση. Οι μετατοπίσεις που προέκυψαν, αναφέρονται μόνο στις ανελαστικές αναλύσεις, όπως έχει επεξηγηθεί και παραπάνω. Έτσι, προέκυψαν τέσσερις πίνακες (Πίνακας 4.2, 4.3, 4.4, 4.5) για τις μετατοπίσεις, οι οποίοι παρουσιάζονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων. Στην Εικόνα 4.32, παρουσιάζεται μια ενδεικτική χρονοϊστορία των μετατοπίσεων, όπως αυτή προέκυψε από το λογισμικό Plaxis, στην οποία για τον υπολογισμό της μόνιμης μετατόπισης του σεναρίου, υπολογίζεται η διαφορά της τελικής μετατόπισης της κόκκινης καμπύλης, δηλαδή της καμπύλης του σημείου B, και της ροζ καμπύλης, δηλαδή της καμπύλης του σημείου D.

#### 4.4.9. Ενίσχυση

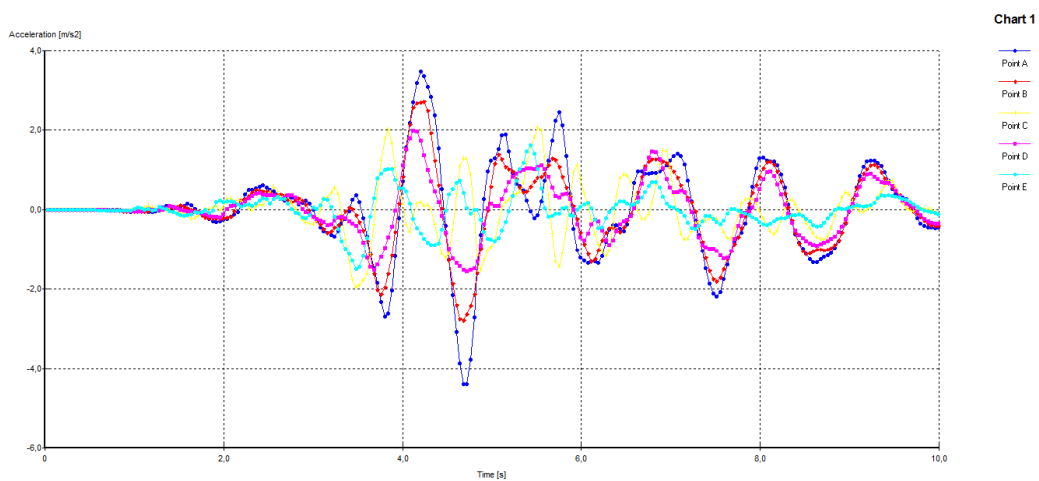
Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί το πώς θα αξιοποιηθούν οι ελαστικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, αφού δεν μπορούν να βγουν από αυτές συμπεράσματα όσον αφορά τις μετατοπίσεις. Μέσω της ενίσχυσης, φαίνεται πως μια σεισμική διέγερση μεταβάλλεται στο σώμα του φράγματος, ενώ αυτή εκφράζεται ως ο λόγος μεταφοράς της σεισμικής κίνησης, από το σεισμικό υπόβαθρο στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Για τον σκοπό αυτό, λήφθηκαν με την βοήθεια των διαγραμμάτων χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων που προέκυψαν από τις ελαστικές αναλύσεις, ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης στο σημείο A, προς την μέγιστη επιτάχυνση στο σημείο E (που σε όλες τις περιπτώσεις θα είναι  $a_{\max E}=1,6 \text{ m/s}^2$ , αφού στις ελαστικές αναλύσεις λήφθηκε μόνο το σενάριο για κορυφαία επιτάχυνση 0,16g, στο οποίο στην βάση του φράγματος η μέγιστη επιτάχυνση θα είναι 1,6  $\text{m/s}^2$ ). Ακόμα, λήφθηκε και η περίπτωση της μέγιστης επιτάχυνσης στο σημείο A, προς την μέγιστη επιτάχυνση στο σημείου D. Η θέση των σημείων, φαίνεται στην Εικόνα 4.31. Έτσι προέκυψαν δύο πίνακες από τις ελαστικές αναλύσεις, που αφορούν την εδαφική ενίσχυση (Πίνακας 4.6, 4.7). Στην Εικόνα 4.33, παρουσιάζεται μια ενδεικτική χρονοϊστορία των επιταχύνσεων, όπως αυτή προέκυψε από το λογισμικό Plaxis, στην οποία η μπλε καμπύλη είναι του A, η ροζ καμπύλη είναι του D και η γαλάζια καμπύλη είναι του E και με βάση την οποία υπολογίζονται οι λόγοι της μέγιστης επιτάχυνσης που αναφέρθηκαν παραπάνω.

#### 4.4.10. Σύνοψη

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, λήφθηκαν έξι σενάρια για το σύστημα φράγμα-υπόβαθρο, δύο διαφορετικοί συνδυασμοί για τα υλικό στο σώμα του φράγματος (Λιθορριπή 1, Λιθορριπή 2), δύο τιμές για την κορυφαία επιτάχυνση για ανελαστική κατάσταση των υλικών (0,16g και 0,24g), μία τιμή για κορυφαία επιτάχυνση για ελαστική κατάσταση των υλικών (0,16g), ενώ επιβλήθηκαν έντεκα σεισμικές διεγέρσεις. Έτσι προέκυψαν τρακόσια τριάντα σενάρια λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, όσες δηλαδή και οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού Plaxis.



**Εικόνα 4.32:** Ενδεικτική χρονοϊστορία των μετατοπίσεων



**Εικόνα 4.33:** Ενδεικτική χρονοϊστορία των επιταχύνσεων

#### 4.4.11. Αποτελέσματα

Στους Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 που ακολουθούν, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, το περιεχόμενο των οποίων αναλύθηκε κατά την διάρκεια αυτού του

κεφαλαίου. Στους Πίνακες 4.2 και 4.3 φαίνονται οι μετατοπίσεις που προέκυψαν για την περίπτωση του υλικού Λιθορριπή 1, για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g αντίστοιχα και ανελαστική συμπεριφορά, ενώ στους Πίνακες 4.4 και 4.5 φαίνονται οι μετατοπίσεις που προέκυψαν για την περίπτωση του υλικού Λιθορριπή 2, για κορυφαίες επιταχύνσεις 0,16g και 0,24g και ανελαστική συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα είναι σε μιλιμέτρ (mm). Στον Πίνακα 4.6 φαίνεται η ενίσχυση που προκύπτει από την διαίρεση της μέγιστης επιτάχυνσης στο σημείο A, με τη μέγιστη επιτάχυνση στο σημείο E, για ελαστική συμπεριφορά, ενώ στον Πίνακα 4.7 φαίνεται η ενίσχυση που προκύπτει από την διαίρεση της μέγιστης επιτάχυνσης στο σημείο A, με τη μέγιστη επιτάχυνση στο σημείο D για ελαστική συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα τις ενίσχυσης είναι καθαροί αριθμοί.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στους Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, όσον αφορά τις μετατοπίσεις, σχολιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία επισημαίνει ότι:

- α) Μετατοπίσεις της τάξης των 100mm θεωρούνται εν γένει μικρές και δεν μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη αστοχία του φράγματος.
- β) Μετατοπίσεις μεταξύ 100-1000mm είναι πιθανό να προκαλέσουν προβλήματα στο έργο, αλλά και πιθανή καθολική αστοχία του.
- γ) Μετατοπίσεις εκτιμώμενες άνω των 1000mm θεωρούνται μη αποδεκτές (ως ιδιαίτερα επιβλαβείς και επικίνδυνες για την ευστάθεια του φράγματος).

Στο τέλος της εργασίας αυτής (αμέσως μετά την Βιβλιογραφία), υπάρχει **Παράρτημα**, στο οποίο παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων ως προς τον άξονα x, για όλες τις ανελαστικές αναλύσεις, και οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης ως προς τον άξονα x, για όλες τις ελαστικές αναλύσεις, για τα πέντε χαρακτηριστικά σημεία που λήφθηκαν στο φράγμα.

## Λιθορριπή 1

**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για την πρώτη περίπτωση του υλικού της λιθορριπής και για κορυφαία επιτάχυνση 0,16g

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	191	158	59	187	285	348	156	84	124	219	86
2	70	65	12	75	127	166	25	29	42	43	15
3	284	46	85	171	224	208	100	335	421	195	260
4	133	3	28	87	124	106	51	110	165	116	79
5	195	29	46	175	171	162	94	203	248	185	129
6	52	3	40	32	67	67	27	75	93	83	65

**Πίνακας 4.3:** Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για την πρώτη περίπτωση του υλικού της λιθορριπής και για κορυφαία επιτάχυνση 0,24g

0,24g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	385	283	120	377	525	584	324	171	251	443	196
2	187	137	37	201	302	323	13	62	109	159	74
3	414	108	140	312	388	374	158	492	614	364	428
4	224	31	55	185	217	218	86	226	325	234	175
5	310	97	85	292	285	303	139	343	424	314	259
6	127	22	71	76	143	158	58	137	199	145	119

## Λιθορριπή 2

**Πίνακας 4.4:** Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για την δεύτερη περίπτωση του υλικού της λιθορριπής και για κορυφαία επιτάχυνση 0,16g

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	518	451	256	557	644	667	424	337	465	628	395
2	227	170	73	258	314	337	154	90	160	236	136
3	498	307	258	450	507	455	230	569	694	525	499
4	242	96	83	206	228	231	107	263	332	259	191
5	411	296	191	377	407	394	206	443	530	444	358
6	149	74	79	119	156	175	76	162	222	182	137

**Πίνακας 4.5:** Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για την δεύτερη περίπτωση του υλικού της λιθορριπής και για κορυφαία επιτάχυνση 0,24g

0,24g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	786	681	363	834	961	957	622	499	708	919	597
2	403	294	141	448	538	525	306	188	298	436	274
3	686	482	377	645	764	696	329	775	966	776	712
4	361	202	151	337	372	380	176	416	529	405	332
5	579	464	291	546	612	607	297	629	780	645	542
6	257	165	137	219	269	321	134	262	375	290	231

$a_{\max A}/a_{\max E}$ **Πίνακας 4.6:** Αποτελέσματα εδαφικής ενίσχυσης, που προκύπτει από τον λόγο της κορυφαίας επιτάχυνσης στο σημείο A, προς την κορυφαία επιτάχυνση στο σημείο E

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	2,2	2,3	1,6	2,2	3,5	3,3	1,9	2,2	2,4	2,0	1,8
2	2,5	2,1	1,4	2,1	2,8	2,6	1,6	2,1	2,4	1,4	1,4
3	6,0	1,5	3,1	3,8	5,2	3,9	3,9	6,4	6,0	3,9	5,1
4	4,1	1,3	2,8	2,9	3,9	3,6	3,9	4,6	3,7	4,4	3,1
5	4,2	1,4	3,1	3,6	4,3	3,8	4,3	4,7	4,0	4,5	3,6
6	2,3	1,2	4,3	2,9	3,9	2,4	2,9	3,4	4,6	4,6	4,0

 $a_{\max A}/a_{\max D}$ **Πίνακας 4.7:** Αποτελέσματα εδαφικής ενίσχυσης, που προκύπτει από τον λόγο της κορυφαίας επιτάχυνσης στο σημείο A, προς την κορυφαία επιτάχυνση στο σημείο D

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	1,8	1,4	1,3	1,6	1,6	1,7	1,6	2,4	2,1	1,6	2,3
2	1,7	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,8	1,5	1,4	1,3
3	3,0	1,3	2,2	2,7	4,0	2,9	4,7	4,2	3,3	2,9	3,8
4	2,6	1,1	2,5	1,9	2,2	2,0	2,5	3,1	2,2	3,3	2,6
5	4,2	1,4	3,1	3,6	4,3	3,8	4,3	4,7	4,0	4,5	3,6
6	2,3	1,2	4,3	2,9	3,9	2,4	2,9	3,4	4,6	4,6	4,0

#### 4.4.12. Σχολιασμός Πινάκων

Αρχικά, θα σχολιαστούν οι Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, που προέκυψαν από τις ανελαστικές αναλύσεις, σύμφωνα με τις μετατοπίσεις που προέκυψαν.

##### Πίνακας 4.2

Αρχικά, θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον Πίνακα 4.2 κατά στήλη, δηλαδή με βάση τις μετατοπίσεις που επήλθαν σε κάθε ένα από τα έξι σενάρια, για το σύστημα φράγμα-θεμελίωση, ύστερα από την εφαρμογή κάθε μεμονωμένου σεισμού. Έτσι θα προκύψουν έντεκα περιπτώσεις, οι οποίες και φαίνονται παρακάτω:

- Chalfant: Τα σενάρια 2 και 6 παρουσιάζουν τις μικρότερες μετατοπίσεις, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως ήπιες, δηλαδή δεν μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στο φράγμα, με μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 και ίση με 52 mm, ενώ οι υπόλοιπες μετατοπίσεις είναι σημαντικές, με μέγιστη αυτή του σεναρίου 3, η οποία είναι ίση με 284mm.
- Erzincan: Τα σενάρια 2,3,4,5,6, παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές των σεναρίων 4 και 6 και ίσες με 3mm, ενώ το σενάριο 1 παρουσιάζει την μεγαλύτερη μετατόπιση της τάξης των 158mm.
- Friuli: Όλα τα σενάρια παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη αυτή του σεναρίου 2 και ίση με 12mm και μεγαλύτερη του σεναρίου 3, που είναι ίση με 85mm.
- Ionian: Τα σενάρια 4,6 παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 και ίση με 32 mm, ενώ τα σενάρια 1,3,5 παρουσιάζουν μεγαλύτερες, με μέγιστη εκείνη του σεναρίου 1, που είναι ίση με 187mm.
- Kalamata: Τα σενάρια 2,4,6 παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη του σεναρίου 6 και ίση με 67 mm, ενώ τα σενάρια 1,3,5, παρουσιάζουν μεγαλύτερες μόνιμες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 1, η οποία είναι ίση με 285mm.
- Montenegro: Στο σενάριο 6, παρουσιάζονται ήπιες μετατοπίσεις και ίσες με 67 mm, που είναι και οι μικρότερες για τον σεισμό αυτό, ενώ τα



υπόλοιπα σενάρια παρουσιάζουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μέγιστη εκείνη του σεναρίου 1, η οποία είναι ίση με 348mm.

- Nsps: Τα σενάρια 2,4,5,6, παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, που δεν μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στο έργο, με μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 και ίση με 27 mm, ενώ η μεγαλύτερη μετατόπιση προκύπτει στο σενάριο 1 και είναι ίση με 156mm.
- Parkfield 11km: Τα σενάρια 1,2,6, παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη του σεναρίου 2 και ίση με 29 mm, ενώ τα σενάρια 3,4,5 παρουσιάζουν μεγαλύτερες, με μέγιστη αυτή του σεναρίου 3, που είναι ίση με 335mm.
- Parkfield 14km: Τα σενάρια 2 και 6 παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη αυτή του σεναρίου 2 και ίση με 42 mm, ενώ τα σενάρια 1,3,4,5 παρουσιάζουν μεγαλύτερες, με μέγιστη αυτή του σεναρίου 3, η οποία είναι ίση με 421mm.
- Parkfield 20 km: Τα σενάρια 2 και 6 παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη αυτή του σεναρίου 2 και ίση με 43 mm, ενώ τα υπόλοιπα παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερες, με μέγιστη αυτή του σεναρίου 1, που είναι ίση με 219 mm.
- Whittier: Τα σενάρια 1,2,4,6, παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερη του σεναρίου 2 και ίση με 15 mm, ενώ η μέγιστη μετατόπιση, εντοπίζεται στο σενάριο 3 και είναι ίση με 260mm.

Υστερα, θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2 κατά γραμμή, δηλαδή με βάση τις μετατοπίσεις που προέκυψαν για κάθε μεμονωμένο σενάριο του συστήματος φράγμα-θεμελίωση, μετά την εφαρμογή των έντεκα διαφορετικών σεισμών. Έτσι, θα προκύψουν έξι περιπτώσεις οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

- Σενάριο 1: Οι σεισμοί Friuli, Parkfield 11km και Whittier, επιφέρουν ήπιες μετατοπίσεις στο φράγμα, με μικρότερη αυτή του Friuli και ίση με 59 mm, ενώ οι υπόλοιποι δημιουργούν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με κορυφαία αυτή του Montenegro, η οποία είναι ίση με 348mm.

- Σενάριο 2: Στο σενάριο αυτό όλοι σχεδόν οι σεισμοί παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Friuli και ίσες με 12 mm, εκτός από τους Kalamata και Montenegro, που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες, με κορυφαία του Montenegro, στον οποίο προκύπτουν μετατοπίσεις της τάξεως των 166mm.
- Σενάριο 3: Οι σεισμοί Erzincan και Friuli, παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες του Erzincan και ίσες με 46 mm, ενώ οι υπόλοιποι παρουσιάζουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις με κορυφαία αυτή του Parkfield 14km, που είναι ίση με 421mm.
- Σενάριο 4: Οι σεισμοί Erzincan, Friuli, Ionian, Nsps και Whittier, παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 3 mm, ενώ τα υπόλοιπα σενάρια παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερη αυτή του Parkfield 14 km, ίση με 165mm.
- Σενάριο 5: Οι σεισμοί Erzincan, Friuli, Nsps παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 29 mm, ενώ οι υπόλοιποι παρουσιάζουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μέγιστη αυτή του Parkfield 14 km, ίση με 248mm.
- Σενάριο 6: Όλοι οι σεισμοί παρουσιάζουν ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 3mm, ενώ οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζονται στον σεισμό του Parkfield 14km και είναι ίσες με 93mm.

### Πίνακας 4.3

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχολιασμός του Πίνακα 4.3, αρχικά κατά στήλη, ομοίως με παραπάνω:

- Chalfant: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη του σεναρίου 3, η οποία είναι ίση με 414mm και μικρότερη του σεναρίου 6, η οποία είναι ίση με 127 mm
- Erzincan: Στα σενάρια 4,5,6 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, ενώ στα 1,2,3 παρατηρούνται μεγαλύτερες. Μεγαλύτερη μετατόπιση είναι αυτή του σεναρίου 1, ίση με 283 mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 ίση με 22 mm.

- Friuli: Στα σενάρια 2,4,5,6 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, ενώ στα 1,3 παρατηρούνται λίγο μεγαλύτερες. Μεγαλύτερη μετατόπιση είναι αυτή του σεναρίου 3 ίση με 140 mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 2 ίση με 37mm.
- Ionian: Στο σενάριο 6 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, οι οποίες είναι και οι μικρότερες του τρέχοντος σεισμού, ίσες με 76 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια σημειώνονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 1, ίση με 377mm.
- Kalamata: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 1 ίση με 525 mm, και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 ίση με 143mm.
- Montenegro: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 1 ίση με 584 mm, και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 ίση με 158 mm.
- Nsrps: Παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις στα σενάρια 2,4,6, ενώ στα σενάρια 1,3,5 παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Η κορυφαία μετατόπιση δίνεται από το σενάριο 1 και είναι ίση με 324 mm, ενώ η μικρότερη προκύπτει από το σενάριο 2 και είναι ίση με 13 mm.
- Parkfield 11km: Στο σενάριο 2 παρουσιάζονται ήπιες μετατοπίσεις, που είναι και οι μικρότερες, ίσες με 62 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια παρουσιάζονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μέγιστη του σεναρίου 3, ίση με 492mm.
- Parkfield 14km: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 3 και ίση με 614 mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 2 και ίση με 109 mm.
- Parkfield 20km: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 1 και ίση με 443 mm, και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 και ίση με 145 mm.
- Whittier: Στο σενάριο 2 παρουσιάζονται ήπιες μετατοπίσεις, που είναι και οι μικρότερες ίσες με 74 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια παρουσιάζονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μέγιστη του σεναρίου 3, ίση με 428mm.

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.3 κατά γραμμή, ομοίως με παραπάνω:

- Σενάριο 1: Σε όλους τους σεισμούς παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες αυτές του Montenegro και ίσες με 584mm και μικρότερες αυτές του Friuli και ίσες με 120mm.
- Σενάριο 2: Στους σεισμούς Friuli, Nsps, Parkfield 11km και Whittier, παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του σεισμού Nsps και ίσες με 13mm. Στους υπόλοιπους σεισμούς παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες του σεισμού Montenegro και ίσες με 323mm.
- Σενάριο 3: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις, σε όλους τους σεισμούς, με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 108mm και μεγαλύτερες αυτές του Parkfield 14km και ίσες με 614mm.
- Σενάριο 4: Στους σεισμούς Erzincan, Friuli και Nsps, παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 31 mm. Στους υπόλοιπους σεισμούς παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες του σεισμού Parkfield 14km και ίσες με 325mm.
- Σενάριο 5: Στους σεισμούς Erzincan και Friuli παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Friuli και ίσες με 85 mm. Στους υπόλοιπους σεισμούς παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες του σεισμού Parkfield 14km και ίσες με 424mm.
- Σενάριο 6: Στους σεισμούς Erzincan, Friuli, Ionian και Nsps, παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 22 mm. Στους υπόλοιπους σεισμούς παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες του σεισμού Parkfield 14km και ίσες με 199 mm.

#### **Πίνακας 4.4**

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.4 αρχικά κατά στήλη, ομοίως με παραπάνω:

- Chalfant: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 1 και ίσες με 518 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 149mm.
- Erzincan: Στα σενάρια 4 και 6 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις με μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 74 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις με μέγιστες αυτές του σεναρίου 1 και ίσες με 451 mm.
- Friuli: Στα σενάρια 2,4 και 6 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις με μικρότερες αυτές του σεναρίου 2 και ίσες με 73 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μέγιστες αυτές του σεναρίου 3 και ίσες με 258 mm.
- Ionian: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 1 και ίσες με 557 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 119 mm.
- Kalamata: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 1 και ίσες με 644 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 156 mm.
- Montenegro: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 1 και ίσες με 667 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 175 mm.
- Nsps: Στο σενάριο 6 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις και ίσες με 76 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με τις μεγαλύτερες να αποτελούν αυτές του σεναρίου 1, οι οποίες είναι ίσες με 424mm.
- Parkfield 11 km: : Στο σενάριο 2 παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, ίσες με 90 mm, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 3, οι οποίες είναι ίσες με 569 mm.
- Parkfield 14 km: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 5 και ίσες με 530 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 222 mm.

- Parkfield 20 km: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 1, ίσες με 628 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 6 και ίσες με 182 mm.
- Whittier: Παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερες αυτές του σεναρίου 3, ίσες με 499 mm και μικρότερες αυτές του σεναρίου 2 και ίσες με 136 mm.

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.4 κατά γραμμή, ομοίως με παραπάνω:

- Σενάριο 1: Σε όλους τους σεισμούς παρουσιάζονται μετατοπίσεις που μπορεί να είναι επιβλαβής για το φράγμα, με μεγαλύτερη του σεισμού Montenegro, ίση με 667 mm και μικρότερη του σεισμού Friuli, ίση με 256 mm.
- Σενάριο 2: Στους σεισμούς Friuli και Parkfield 11 km, παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις με μικρότερες αυτές του Friuli και ίσες με 73 mm. Οι υπόλοιποι σεισμοί, δίνουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες αυτές του σεισμού Ionian και ίσες με 258 mm.
- Σενάριο 3: Σε όλους τους σεισμούς παρουσιάζονται σημαντικές μετατοπίσεις, με μεγαλύτερη του σεισμού Parkfield 11 km, ίση με 569 mm και μικρότερη του σεισμού Nsps, ίση με 230 mm.
- Σενάριο 4: Στους σεισμούς Erzincan και Friuli, παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις, με μικρότερες αυτές του Friuli και ίσες με 83 mm. Οι υπόλοιποι σεισμοί, δίνουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με κορυφαία αυτή του σεισμού Parkfield 11 km και ίση με 263 mm.
- Σενάριο 5: Σε όλους τους σεισμούς παρουσιάζονται σημαντικές μετακινήσεις, με μεγαλύτερη του σεισμού Parkfield 14 km, ίση με 530 mm και μικρότερη του σεισμού Friuli, ίση με 191 mm.
- Σενάριο 6: Στους σεισμούς Erzincan, Friuli και Nsps, παρατηρούνται ήπιες μετατοπίσεις με μικρότερες αυτές του Erzincan και ίσες με 74 mm. Οι υπόλοιποι σεισμοί, δίνουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις, με μεγαλύτερες αυτές του σεισμού Parkfield 14 km και ίσες με 222 mm.

## Πίνακας 4.5

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.5 αρχικά κατά στήλη, ομοίως με παραπάνω:

- Chalfant: Παρουσιάζονται και στα έξι σενάρια μεγάλες μετατοπίσεις, που είναι πιθανόν να προκαλέσουν πρόβλημα στην ευστάθεια του φράγματος. Οι μεγαλύτερες εμφανίζονται στο σενάριο 1 και είναι ίσες με 786mm, ενώ οι μικρότερες εμφανίζονται στο σενάριο 6 και είναι ίσες με 257mm.
- Erzincan: Και στον σεισμό αυτό και τα έξι σενάρια παρουσιάζουν σημαντικές μετατοπίσεις, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 1, ίση με 681 mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6, ίση με 165mm.
- Friuli: Σημαντικές μετατοπίσεις εμφανίζονται και στα σενάρια αυτού του σεισμού, με μεγαλύτερη αυτή του σεναρίου 3, που παρουσιάζει μετατόπιση ίση με 377mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6 που παρουσιάζει μετατόπιση ίση με 137mm.
- Ionian: Ανάλογη συμπεριφορά με τα προηγούμενα έχει και αυτός ο σεισμός για τα έξι σενάρια, με μεγαλύτερη μετατόπιση αυτή του σεναρίου 1, ίση με 834mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 6, ίση με 219mm.
- Kalamata: Ομοίως και εδώ παρουσιάζονται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη του σεναρίου 1 ίση με 961 mm, και μικρότερη του σεναρίου 6, ίση με 269mm.
- Montenegro: Και στην περίπτωση αυτή μεγάλες είναι οι μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη του σεναρίου 1, ίση με 957mm και μικρότερη του σεναρίου 6 ίση με 321mm.
- Nsps: Σημαντικές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια και σε αυτή την περίπτωση, με μεγαλύτερη του σεναρίου 1, ίση με 622 mm και μικρότερη του σεναρίου 6, ίση με 134mm.
- Parkfield 11km: Ομοίως και εδώ μεγάλες είναι οι μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη του σεναρίου 3, ίση με 775mm και μικρότερη του σεναρίου 2, ίση με 188mm.

- Parkfield 14 km: Και στον σεισμό αυτό και τα έξι σενάρια παρουσιάζουν σημαντικές μετατοπίσεις, με μεγαλύτερη του σεναρίου 3 ίση με 966 mm και μικρότερη αυτή του σεναρίου 2 ίση με 298mm.
- Parkfield 20 km: Ομοίως με τα προηγούμενα οι μετατοπίσεις είναι σημαντικές σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη του σεναρίου 1, ίση με 919mm και μικρότερη του σεναρίου 6, ίση με 290mm.
- Whittier: Σημαντικές μετατοπίσεις και εδώ σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη του σεναρίου 3, ίση με 712 mm και μικρότερη του σεναρίου 6, ίση με 231 mm.

Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.5 κατά γραμμή, ομοίως με παραπάνω:

- Σενάριο 1: Σε όλους τους σεισμούς παρουσιάζονται μετατοπίσεις που μπορεί να είναι επιβλαβής για το φράγμα, με μεγαλύτερη του σεισμού Kalamata, ίση με 961mm και μικρότερη του σεισμού Friuli, ίση με 363 mm.
- Σενάριο 2: Σημαντικές μετατοπίσεις και εδώ σε όλες τις περιπτώσεις, με μεγαλύτερη μετατόπιση να προκύπτει από τον σεισμό Kalamata, ίση με 538mm και μικρότερη αυτή του σεισμού Friuli, ίση με 141 mm.
- Σενάριο 3: Ομοίως και εδώ παρουσιάζονται μεγάλες μετατοπίσεις από όλους τους σεισμούς, με μεγαλύτερη του σεισμού Parkfield 14km και ίση με 966 mm και μικρότερη του σεισμού Nsps, ίση με 329mm.
- Σενάριο 4: Και εδώ παρατηρούνται σημαντικές μετατοπίσεις σε όλες τις περιπτώσεις, με μεγαλύτερη αυτή του σεισμού Parkfield 14 km, ίση με 529mm και μικρότερη αυτή του σεισμού Friuli, ίση με 151 mm.
- Σενάριο 5: Ομοίως και εδώ παρουσιάζονται σοβαρές μετατοπίσεις σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη αυτή του σεισμού Parkfield 14 km, ίση με 780mm και μικρότερη του σεισμού Friuli, ίση με 291 mm.
- Σενάριο 6: Και εδώ παρουσιάζονται σημαντικές μετακινήσεις από τους έντεκα σεισμούς, που ωστόσο είναι οι μικρότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια που λήφθηκαν. Η μεγαλύτερη εμφανίζεται στον



σεισμό Parkfield 14km, ίση με 375 mm, ενώ η μικρότερη στον σεισμό Nsps, ίση με 134 mm.

Στην συνέχεια θα σχολιαστούν οι πίνακες 4.6 και 4.7, που προέκυψαν από τις ελαστικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και αντικείμενο τους είναι η εδαφική ενίσχυση, δηλαδή το πόσο μεταβάλλεται ο σεισμός στο σώμα του φράγματος.

#### **Πίνακας 4.6**

Στον πίνακα 4.6 φαίνεται ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης στο σημείο A, το οποίο βρίσκεται στην στέψη του φράγματος, προς την μέγιστη επιτάχυνση στο σημείο E, το οποίο βρίσκεται στην θεμελίωση. Με τον λόγο αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση, υπολογίζεται η επίδραση του εδάφους στο φράγμα, δηλαδή το ποσό της μεταφοράς της σεισμικής κίνησης από το έδαφος στην στέψη του φράγματος. Έτσι από τις αναλύσεις αυτές προέκυψαν τα εξής:

- Στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι μεγαλύτερες ενισχύσεις εμφανίζεται ως προς τα σενάρια στο σενάριο 3 και ως προς τους σεισμούς στον Parkfield 11 km και στην συνέχεια, κατά την εφαρμογή του σεισμού Parkfield 14 km.
- Ως προς τις μικρότερες ενισχύσεις, αυτές παρατηρούνται στην πλειονότητα τους, ως προς τους σεισμούς, κατά τον σεισμό Erzincan και ως προς τα σενάρια κατά το σενάριο 2.

#### **Πίνακας 4.7**

Στον πίνακα 4.7 φαίνεται ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης στην στέψη του φράγματος στο σημείο A, προς την μέγιστη επιτάχυνση στο σημείο D, δηλαδή στην βάση του φράγματος. Με τον υπολογισμό της ενίσχυσης, υπολογίζεται το πως η σεισμική κίνηση μεταφέρεται από την βάση του φράγματος, προς την στέψη αυτού. Με την εφαρμογή αυτών των αναλύσεων, προέκυψαν τα εξής:

- Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μεγαλύτερες ενισχύσεις, παρατηρούνται ως προς τα σενάρια, στα σενάρια 5 και 6 και ως προς

τους σεισμούς, κατά την εφαρμογή των σεισμών Parkfield 11 km και Parkfield 20 km.

- Ως προς τις μικρότερες ενισχύσεις, αυτές παρατηρούνται στην πλειονότητα τους κατά τον σεισμό Erzincan και ως προς τα σενάρια κατά το σενάριο 2.

#### 4.4.13. Σύγκριση πινάκων μετατοπίσεων με M. Αυγερινού

Στην συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα ως προς τις μετατοπίσεις, που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, όπως και αυτά που προέκυψαν από την εργασία της M. Αυγερινού, ώστε να φανεί αν οι δύο διαφορετικές μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν, δίνουν μια παρόμοια τάξη μεγέθους στα αποτελέσματα ή αν τα αποτελέσματα διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, συγκρίνονται οι Πίνακες 4.8 με 4.9 και στην συνέχεια οι Πίνακες 4.10 με 4.11.

Παρατηρώντας τους πίνακες αυτούς, οι οποίοι παραθέτονται στην συνέχεια, φαίνεται ότι κάποια αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα εργασία, είναι μέσα στα όρια που δίνονται στην εργασία της Αυγερινού για κάθε σενάριο. Ωστόσο αυτές οι περιπτώσεις αποτελούν μικρό αριθμό, σε σχέση με το σύνολο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Έτσι, φαίνεται ότι οι δύο μεθοδολογίες δίνουν αποτελέσματα τα οποία είναι εν γένει συγκρίσιμα (μέχρι 1000mm όλα τα αποτελέσματα και στις 2 εργασίες, πέρα από ορισμένες εξαιρέσεις), ωστόσο παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ανά σενάριο του συστήματος φράγμα-θεμελίωση και ανά σεισμικό γεγονός.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην εργασία της M. Αυγερινού, δηλαδή η μέθοδος ολίσθησης πρανούς με την προσέγγιση του Newmark, είναι πιο προσεγγιστική μέθοδος από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, δηλαδή τη μέθοδο τάσεων-παραμορφώσεων μέσω γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, όπως έχει αναλυθεί στις προηγούμενες ενότητες. Έτσι τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων που προέκυψαν στην παρούσα εργασία, θεωρούνται πιο αξιόπιστα και πιο κοντά στην πραγματικότητα.

## Κωνσταντάτος (Λιθορριπή 1)

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για την πρώτη περίπτωση του υλικού της λιθορριπής

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	191	158	59	187	285	348	156	84	124	219	86
2	70	65	12	75	127	166	25	29	42	43	15
3	284	46	85	171	224	208	100	335	421	195	260
4	133	3	28	87	124	106	51	110	165	116	79
5	195	29	46	175	171	162	94	203	248	185	129
6	52	3	40	32	67	67	27	75	93	83	65
0,24g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	385	283	120	377	525	584	324	171	251	443	196
2	187	137	37	201	302	323	13	62	109	159	74
3	414	108	140	312	388	374	158	492	614	364	428
4	224	31	55	185	217	218	86	226	325	234	175
5	310	97	85	292	285	303	139	343	424	314	259
6	127	22	71	76	143	158	58	137	199	145	119

## Αυγερινού 1 (Ac=0,30g)

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για κρίσιμη επιτάχυνση του υλικού της λιθορριπής 0,30g

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	0	0	0	0	0	0-8	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0-7	0	0	0	0	0
3	0-70	0	0-5	0-14	2-31	0	0	8-44	17-88	2-19	85-305
4	18-90	0	1-4	0-30	11-29	0	0-2,3	9-56	43-183	2-7	110-362
5	9-14	0	0	0	0	0	0	2-24	9-77	1-5	178-355
6	0	0	0	1-12	2-21	0	0	0	0-4	1-5	42-77
0,24g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	0	0-15	0	0	0	106-199	0-9	0	0	0	0
2	0	0-14	0	0	0	41-98	0	0	0	0	0
3	95-311	0	3,6-9,9	49-352	50-206	6-19	9-22	22-91	101-185	18-39	347-603
4	93-171	0	5,8-37,5	80-185	53-113	3-28	307-579	23-91	98-179	46-76	260-590
5	2-24	0	0,5-5,4	3-32	22-54	0	0-2	53-104	99-402	1-34	360-1211
6	23-199	0	3,4-15,7	14-132	39-188	0-3	10-51	33-179	73-367	18-39	360-1121

## Κωνσταντάτος( Λιθορριπή 2)

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για την δεύτερη περίπτωση του υλικού της λιθορριπής

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	518	451	256	557	644	667	424	337	465	628	395
2	227	170	73	258	314	337	154	90	160	236	136
3	498	307	258	450	507	455	230	569	694	525	499
4	242	96	83	206	228	231	107	263	332	259	191
5	411	296	191	377	407	394	206	443	530	444	358
6	149	74	79	119	156	175	76	162	222	182	137
0,24g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	786	681	363	834	961	957	622	499	708	919	597
2	403	294	141	448	538	525	306	188	298	436	274
3	686	482	377	645	764	696	329	775	966	776	712
4	361	202	151	337	372	380	176	416	529	405	332
5	579	464	291	546	612	607	297	629	780	645	542
6	257	165	137	219	269	321	134	262	375	290	231

## Αυγερινού 2 ( Ac=0,20g)

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μόνιμων μετατοπίσεων σε mm για κρίσιμη επιτάχυνση του υλικού της λιθορριπής 0,20g

0,16g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	0-2	0-9	0	0	11-83	73-225	5-123	0	0	2-32	0
2	0	0-9	0	0	4-55	7-219	11-167	0	0	0-2	0
3	118-410	0	5-28	14-125	70-253	4-27	21-38	44-178	170-490	34-120	304-950
4	107-386	0	9-27	77-266	60-210	4-17	21-38	70-270	183-530	90-220	362-993
5	60-200	0	2-4	4-55	15-67	0-6	1-6	35-130	165-320	13-43	608-954
6	15-50	0	2-4	30-80	42-73	0-12	6-31	3-69	17-57	13-43	77-241
0,24g	Chalfant	Erzincan	Friuli	Ionian	Kalamata	Montenegro	Nsps	Parkfield11km	Parkfield14km	Parkfield20km	Whittier
1	7-46	143-261	1-2	0-4	11-84	333-521	99-488	0	1-5	24-60	7-17
2	7-49	135-247	2-5	0	4-55	188-511	122-592	0	0	7-74	2-11
3	182-710	0-7	10-58	155-678	206-583	42-192	42-133	91-369	320-547	73-226	604-1026
4	230-684	0	37-74	184-779	211-576	33-165	51-160	90-365	70-260	76-301	578-1689
5	213-758	0-1	7-25	80-175	107-326	7-76	21-83	104-368	402-707	56-210	1210-1783
6	198-753	0	29-77	132-596	128-209	33-75	106-397	130-560	367-1112	73-226	1210-1783

#### 4.4.14. Συμπεράσματα

Υστερα από την μελέτη και την ερμηνεία των παραπάνω Πινάκων, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, σχετικά με την κατασκευή του φράγματος και τους παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική απόκριση του, τα οποία παραθέτονται παρακάτω:

- 1) Αρχικά, **όσον αφορά την επίδραση του εδάφους θεμελίωσης**, μελετώντας τους Πίνακες που αφορούν τις μετατοπίσεις (4.2, 4.3, 4.4, 4.5), συγκρίνονται τα σενάρια, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικό υλικό στην θεμελίωση και έχουν ίδιες όλες τις άλλες παραμέτρους (συχνοτικό περιεχόμενο σεισμού, υλικά στο σώμα του φράγματος). Έτσι, συγκρίνονται σε κάθε Πίνακα ξεχωριστά, οι μετατοπίσεις ως προς τα σενάρια 1, 3, 5, στα οποία χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά στην θεμελίωση, με ομοιογένεια των υλικών στο σώμα του φράγματος και στην συνέχεια οι μετατοπίσεις, ως προς τα σενάρια 2, 4, 6, στα οποία χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά, με ανομοιογένεια των υλικών στο σώμα του φράγματος.

Μελετώντας αρχικά τα σενάρια 1, 3, 5, φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην πλειονότητα των περιπτώσεων, προκύπτουν όταν χρησιμοποιούνται μαλακά εδαφικά υλικά στο υπόβαθρο του φράγματος, στην συνέχεια όταν χρησιμοποιείται ημιβράχος και τέλος, όταν χρησιμοποιείται βράχος. Έτσι, για ομοιογένεια των υλικών, προκύπτει ότι το φράγμα έχει την καλύτερη απόκριση στον σεισμό, με την χρησιμοποίηση βράχου στο υπόβαθρο του, στην συνέχεια με την χρησιμοποίηση ημιβράχου και τέλος με την χρησιμοποίηση μαλακών εδαφικών υλικών.

Ως προς τα σενάρια 2, 4, 6, φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις προκύπτουν για την σειρά ημιβράχος, βράχος, μαλακά εδαφικά υλικά, στην πλειονότητα των περιπτώσεων (20/44 φορές), ενώ πολλές είναι και

οι περιπτώσεις που προκύπτουν για την σειρά μαλακά εδαφικά υλικά, ημιβράχος, βράχος (16/44 φορές). Έτσι, δεν μπορεί να βγει κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα για το ποιο υλικό της θεμελίωσης έχει την καλύτερη απόκριση στον σεισμό, στην περίπτωση της ανομοιογένειας.

- 2) **Όσον αφορά την επίδραση των υλικών στο σώμα του φράγματος**, μελετώντας ξεχωριστά τους Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, αρχικά είναι ξεκάθαρο, ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις προκύπτουν για τα σενάρια ομοιογένειας του φράγματος (σενάρια 1, 3, 5) και οι μικρότερες για τα σενάρια ανομοιογένειας του φράγματος (σενάρια 2, 4, 6). Οπότε, το φράγμα έχει καλύτερη απόκριση στον σεισμό, για ανομοιογένεια των υλικών στο σώμα του.

Ακόμα, συγκρίνοντας τον Πίνακα 4.2 με τον Πίνακα 4.4 και αντίστοιχα συγκρίνοντας τους Πίνακες 4.3, 4.5, στους οποίους η μόνη διαφορά είναι οι ιδιότητες του υλικού της λιθορριπής στο σώμα του φράγματος, στο οποίο ουσιαστικά μειώνεται η γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  κατά  $5^\circ$ , φαίνεται ότι η αλλαγή αυτή, επέφερε πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Δηλαδή, συνάγεται ότι, μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  του υλικού της λιθορριπής, επιδρά αρνητικά στην σεισμική απόκριση του φράγματος.

- 3) **Όσον αφορά την επίδραση της κορυφαίας επιτάχυνσης**, συγκρίνοντας τους Πίνακες 4.2 με 4.3 και τους Πίνακες 4.4 με 4.5 αντίστοιχα, φαίνεται ότι η αύξηση της κορυφαίας επιτάχυνσης από 0,16g σε 0,24g, επιφέρει αύξηση των μετατοπίσεων. Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι η αύξηση της κορυφαίας επιτάχυνσης, επιδρά αρνητικά στην σεισμική απόκριση του φράγματος.

- 4) **Όσον αφορά την επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμού**, κοιτώντας ξεχωριστά τους Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, μελετώντας δηλαδή για κάθε σεισμό τις μετατοπίσεις που προέκυψαν σε κάθε σενάριο και συγκρίνοντάς τις ως προς το μέγεθός τους, φαίνεται

ότι οι μικρότερες μετατοπίσεις στην πλειονότητα των περιπτώσεων, προκύπτουν κατά τον σεισμό Friuli, ύστερα κατά τον σεισμό Erzincan και στην συνέχεια για τον σεισμό Nsps. Όπως φαίνεται και από το συχνοτικό τους περιεχόμενο (Εικόνες 4.18-4.28), οι σεισμοί αυτοί είναι σεισμοί με λίγους κύκλους φόρτισης, που δεν προσεγγίζουν συχνά την κορυφαία επιτάχυνση. Όσον αφορά τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις, αυτές προκύπτουν στην πλειονότητα τους, κατά τον σεισμό Parkfield 14 km, στην συνέχεια για τον σεισμό Montenegro και ύστερα για τον σεισμό Kalamata. Αυτοί, είναι σεισμοί με αυξημένες τιμές της επιτάχυνσης για πολλούς κύκλους φόρτισης, επιφέροντας έτσι σημαντική δόνηση στο φράγμα. Τέλος, οι σεισμοί Parkfield 11 km, Chalfant, Parkfield 20 km, Whittier και Ionian, δίνουν συγκριτικά μετατοπίσεις, που βρίσκονται συνήθως στη μέση, σε σχέση με αυτές που δίνουν οι άλλοι σεισμοί, στα περισσότερα σενάρια που εξετάστηκαν. Αυτό, οφείλεται στο ότι είναι σεισμοί με πολλούς κύκλους φόρτισης, που ωστόσο δεν προσεγγίζουν συχνά την μέγιστη επιτάχυνση. Έτσι, φαίνεται πως όσο πιο μεγάλο είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης και των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται κατά τον σεισμό, επηρεάζεται αρνητικά η σεισμική απόκριση του φράγματος.

- 5) **Όσον αφορά την εδαφική ενίσχυση**, από τον Πίνακα 4.6, στον οποίο δίνεται ο λόγος της κορυφαίας επιτάχυνσης στο σημείο A (το οποίο βρίσκεται στην στέψη του φράγματος), προς την κορυφαία επιτάχυνση στο σημείο E (το οποίο βρίσκεται στην θεμελίωση), φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες ενισχύσεις παρουσιάζονται κατά το σενάριο 3 (ημιβράχος, ομοιογένεια) και κατά τον σεισμό Parkfield 11 km. Αυτό σημαίνει ότι διαδίδονται οι μεγαλύτερες επιταχύνσεις από τη θεμελίωση στο φράγμα σε αυτές τις περιπτώσεις, κάτι που είναι αρνητικό για την κατασκευή. Ως προς τις μικρότερες ενισχύσεις, αναπτύσσονται κατά το σενάριο 2 (μαλακά εδαφικά υλικά, ανομοιογένεια) και κατά τον σεισμό Erzincan, πράγμα που σημαίνει ότι παρουσιάζονται οι μικρότερες επιταχύνσεις από την θεμελίωση στο φράγμα, κάτι που είναι θετικό για το φράγμα.

Από τον Πίνακα 4.7 για τις ενισχύσεις, στον οποίο δίνεται ο λόγος της κορυφαίας επιτάχυνσης στο σημείο A (το οποίο βρίσκεται στην στέψη του φράγματος), προς την κορυφαία επιτάχυνση στο σημείο D (δηλαδή στην βάση του φράγματος), οι μεγαλύτερες ενισχύσεις προκύπτουν στην πλειονότητα των περιπτώσεων, κατά τα σενάρια 5 (βράχος, ομοιογένεια) και 6 (βράχος, ανομοιογένεια) και ως προς τους σεισμούς, κατά τους Parkfield 11 km και Parkfield 20 km. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις, αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες επιταχύνσεις στο σώμα του φράγματος, πράγμα αρνητικό για την κατασκευή. Αντίθετα, οι μικρότερες ενισχύσεις δημιουργούνται στο σενάριο 2 (μαλακά εδαφικά υλικά, ανομοιογένεια) και κατά τον σεισμό Erzincan, δηλαδή στις περιπτώσεις αυτές, αναπτύσσονται οι μικρότερες επιταχύνσεις στο σώμα του φράγματος, κάτι που είναι θετικό για την κατασκευή.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 5.1. Γενικά Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- 1) Ένα φράγμα μπορεί να έχει οφέλη για τον άνθρωπο, ωστόσο μπορεί να προκαλέσει και αρνητικές συνέπειες, αν δεν γίνουν σοβαρές και λεπτομερείς μελέτες κατά την κατασκευή του.
- 2) Ο σχεδιασμός ενός φράγματος απαιτεί γνώσεις γεωτεχνικής μηχανικής, γεωλογίας, υδραυλικής, όπως και γνώση του σεισμικού ιστορικού και της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής.
- 3) Υπάρχουν διάφοροι τύποι φραγμάτων, που εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες, ενώ υπάρχουν διαφορετικές αιτίες που μπορούν να οδηγήσουν ένα φράγμα στην αστοχία. Οι περισσότερες αστοχίες λαμβάνουν χώρα μέσα στα δέκα πρώτα χρόνια από την κατασκευή του φράγματος και κυρίως τον πρώτο. Στα φράγματα σκυροδέματος, τα πλέον σύνηθες είναι τα προβλήματα θεμελίωσης, με την εσωτερική διάβρωση να οφείλεται για την αστοχία αυτού του τύπου των φραγμάτων σε ποσοστό 21%, ενώ η ανεπαρκής αντοχή, οδηγεί και αυτή σε αστοχία τα φράγματα σκυροδέματος, σε ποσοστό 21%. Από την άλλη, όσον αφορά τα χωμάτινα φράγματα, οι κύριες αιτίες αστοχίας, είναι αρχικά η υπερχείλιση του ταμιευτήρα σε ποσοστό 31%, στην συνέχεια η εσωτερική διάβρωση στο στόμιο σε ποσοστό 15% και η εσωτερική διάβρωση στην θεμελίωση σε ποσοστό 12% (Icold 1995).
- 4) Δεν μπορούν να παραληφθούν στις αιτίες αστοχίας των χωμάτινων φραγμάτων, τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσει μια ισχυρή σεισμική διέγερση σε αυτά, ιδιαίτερα σε σειсмоγενείς χώρες, όπως η Ελλάδα. Ο σεισμός μπορεί να είναι η αιτία δημιουργίας επιπρόσθετων

προβλημάτων για την ευστάθεια του φράγματος, όπως υπερχειλίση του ταμιευτήρα και εσωτερική διάβρωση, με τις οποίες το χωμάτινο φράγμα μπορεί να οδηγηθεί στην αστοχία.

- 5) Οι επιπτώσεις από την αστοχία ενός χωμάτινου φράγματος, μπορεί να είναι τεράστιες και να τεθεί σε κίνδυνο ακόμα και η ανθρώπινη ζωή, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση, που το νερό που είναι αποθηκευμένο στον ταμιευτήρα, απελευθερωθεί και κατευθυνθεί προς κατοικημένη περιοχή.
- 6) Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συχνή παρακολούθηση των χωμάτινων φραγμάτων και των μετατοπίσεων που πιθανόν να εμφανιστούν σε αυτά, από την περίοδο της κατασκευής κιόλας, ώστε να επιβεβαιωθούν οι παραδοχές που έγιναν κατά τον σχεδιασμό και το φράγμα να κριθεί ασφαλές. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η συστηματική παρακολούθηση και μετά το πέρας της κατασκευής, για να εντοπιστούν διάφορα φαινόμενα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν το φράγμα σε αστάθεια σε πρώιμο στάδιο και να αντιμετωπιστούν. Ακόμα, ιδιαίτερα σημαντική είναι η παρακολούθηση των μετατοπίσεων που πιθανόν θα σημειωθούν στο φράγμα μετά από σεισμό, ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που πιθανόν θα δημιουργηθούν και να προληφθεί μια πιθανή αστοχία.
- 7) Υπάρχουν διαφορετικοί μέθοδοι παρακολούθησης των μετακινήσεων που πιθανόν να παρατηρηθούν στα φράγματα, γεωδαιτικές και γεωτεχνικές, οι οποίες θα πρέπει να συνδυάζονται αν είναι δυνατόν, ώστε να δίνεται πιο ολοκληρωμένος προσδιορισμός του πεδίου των μετακινήσεων.
- 8) Ιδιαίτερη σημαντικό είναι να πραγματοποιείται σωστός αντισεισμικός σχεδιασμός σε μεγάλες κατασκευές όπως στα χωμάτινα φράγματα, στα οποία ο σεισμός μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, λόγω των αδρανειακών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην διάρκεια του. Οι

δυνάμεις αυτές, εξαρτώνται από τις μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες του φράγματος, όπως και από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Αν αυτές ξεπεράσουν την διατμητική αντοχή των γεωυλικών του σώματος του φράγματος ή/και της θεμελίωσης, η κατασκευή θα οδηγηθεί στην αστοχία.

- 9) Κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των φραγμάτων, θα πρέπει να ακολουθείται κατά γράμμα ο αντισεισμικός κανονισμός που ορίζεται για κάθε χώρα και να λαμβάνονται πληροφορίες και από πιο εξειδικευμένους αντισεισμικούς κανονισμούς (FEMA, ICOLD), στην περίπτωση που αυτό απαιτείται.
- 10) Ο αντισεισμικός σχεδιασμός μιας κατασκευής αποτελείται από 2 φάσεις, την δυναμική απόκριση της κατασκευής και εν συνεχεία την αξιολόγηση της σεισμικής της ευστάθειας.
- 11) Η δυναμική απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τα υλικά του φράγματος και της θεμελίωσης, την αλληλεπίδραση του συστήματος φράγμα-θεμελίωση, την ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής, την κορυφαία τιμή της επιτάχυνσης, το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμού που ασκείται στην κατασκευή, όπως και την καταπόνηση του φράγματος από το νερό.
- 12) Η σεισμική αξιολόγηση του φράγματος και ο υπολογισμός των μόνιμων μετατοπίσεων μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, άλλες πιο απλές και προσεγγιστικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρά φράγματα που η αστοχία τους δεν θα επιφέρει περαιτέρω προβλήματα και άλλες πιο σύνθετες και ακριβείς, που χρησιμοποιούνται στα μεγάλα φράγματα, η αστοχία των οποίων μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή.
- 13) Είναι γεγονός ότι ένας σωστός αντισεισμικός σχεδιασμός, θα πρέπει να μελετάει το κάθε φράγμα ξεχωριστά, ώστε να λαμβάνονται επακριβώς

υπόψη οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές και σεισμολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του, όπως και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

## 5.2. Προοπτικές

Σαν προέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα μπορούσαν να μελετηθούν τα ακόλουθα θέματα, για το φράγμα της Τριανταφυλλιάς και τις διάφορες παραμέτρους που επιλέχθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική:

- 1) Να χρησιμοποιηθεί νερό στον ταμιευτήρα, για να φανεί πως επηρεάζει στην πράξη η παρουσία του νερού την συμπεριφορά του φράγματος στην περίπτωση σεισμού. Ακόμα, η παρουσία του νερού στο χωμάτινο φράγμα, θα μπορούσε να προκαλέσει τον κίνδυνο ρευστοποίησης των υλικών του φράγματος, αλλά και της θεμελίωσης, κάτι που δεν εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική, λόγω της απουσίας του νερού. Έτσι, θα μπορούσαν να γίνουν και αυτοί οι έλεγχοι, για να φανεί κάτω από ποιες συνθήκες ρευστοποιούνται τα υλικά του φράγματος.
- 2) Να χρησιμοποιηθούν περισσότερες σεισμικές διεγέρσεις, με μεγαλύτερο εύρος συχνοτικών περιεχομένων, από τις έντεκα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε να μπορέσουν εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα, για την επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμού στο φράγμα.
- 3) Να ληφθεί υπόψη η επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας, των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων, οι οποίες υπάρχουν στην πράξη, ωστόσο δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα διπλωματική.
- 4) Να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με λογισμικό το οποίο έχει την δυνατότητα για τρισδιάστατες προσομοιώσεις, ώστε να δοθεί φυσική υπόσταση στο συγκεκριμένο θέμα, καθώς οι δισδιάστατες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, δεν λαμβάνουν υπόψη την τρίτη διάσταση του φράγματος, αντιμετωπίζοντάς το σαν άπειρου μήκους.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. St. L. Kramer (1996) "GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING", Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey 07458
2. R. Fell, P. MacGregor, D. Stapledon, G. Bell (2005) "GEOTECHNICAL ENGINEERING OF DAMS", Taylor & Francis Group, London, UK
3. J.A.R. Ortigao, A.S.F.J. Sayao (2004) "Handbook of Slope Stabilisation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg
4. Μ. Καββαδάς (2006) "ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ", Έκδοση Ε. Μ. Πολυτεχνείου, Έκδοση 13, Αθήνα
5. J. D. Craig (1995) "Instrumentation of Embankment Dams and Levees", U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000
6. P. N. Psarropoulos "The seismic risk of new and existing dams", National Technical University of Athens, Greece
7. K. D. Pilitakis, S. D. Fotopoulou (2015) "Vulnerability assessment of buildings exposed to co-seismic permanent slope displacements", Aristotle University, Thessaloniki, Greece
8. A. Anastasiadis, N. Klimis, K. Makra, B. Margaris (2004) "ON SEISMIC BEHAVIOR OF A 130M HIGH ROCKFILL DAM: AN INTEGRATED APPROACH", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2933
9. Ν. Ι. Μουτάφης (2009) "Τεχνολογία Γεωφραγμάτων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
10. Α. Γ. Παπαδημητρίου (2015) "Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
11. D. Roy (2007) "IITK-GSDMA GUIDELINES for SEISMIC DESIGN of EARTH DAMS AND EMBANKMENTS", Indian Institute of Technology Kanpur
12. Ελληνικός Αντισεισμικός Σχεδιασμός (ΕΑΚ 2000), ΟΑΣΠ, ΣΠΜΕ
13. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance (2004), EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels
14. Federan Guidelines for Dam Safety (FEMA65): Earthquake Analyses and Design of Dams (2005)

15. International commission on large dams (ICOLD): Selecting seismic parameters for large dams guidelines (2009), Committee on seismic aspects of dam design
16. Γ. Γκαζέτας (1998) “Δυναμική ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος της Τριανταφυλλιάς”, ΥΠΕΧΩΔΕ/ ΓΓΔΕ, ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (Δ7)- ΤΜΗΜΑ ΜΕΛΕΤΩΝ (Δ7/β)
17. Μ. Γ. Σακελλαρίου (2006) “Σχεδιασμός πρανών με κριτήριο των προκαλούμενων από τον σεισμό μόνιμων μετατοπίσεων”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη
18. T. Williamson “Historic dam failures and recent incidents”
19. Μ. Αυγερινού (2014) “ Διερεύνηση θεμάτων δυναμικής απόκρισης και ευστάθειας χωμάτινων φραγμάτων υπό σεισμική φόρτιση με έμφαση στις προκαλούμενες μόνιμες μετατοπίσεις”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
20. Γ. Σ. Αχιλλέως (2015) “Σεισμική ευστάθεια γεωφραγμάτων”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
21. Κ. Νταλούκα (2012) “Προσδιορισμός των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
22. Β. Στουρνάρας (2012) “Μελέτη της κινηματικής συμπεριφοράς του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με δορυφορικές μεθόδους”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
23. Ε. Καλογήρου (2003) “Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας εδαφικών πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
24. Ε. Α. Κατσαούνου (2016) “Σεισμική απόκριση και αποτίμηση οριακής αντοχής χωμάτινων φραγμάτων”, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών
25. Δ. Αντωνίου “Φράγματα και σειсмоί”, Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, Λευκωσία, Κύπρος
26. Β. Μαρίνος, 8ο-9ο Μάθημα: “Φράγματα”, Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

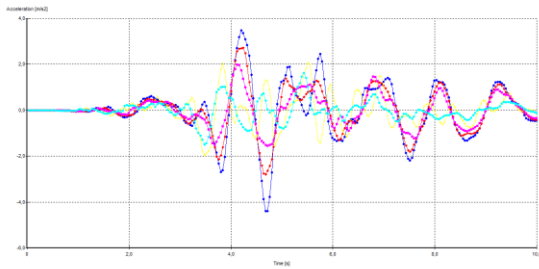
27. Β. Χρηστάρας, Β.Μαρίνος, 6<sup>η</sup> άσκηση τεχνικής γεωλογίας “ Επιλογή καταλληλότητας θέσης και τύπου φράγματος”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
28. Θ. Μακεδών “Φράγματα”, Π. Μ. Σ. Εφαρμοσμένη και περιβαλλοντική γεωλογία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
29. Φ. Π. Μάρης “Υλικά και τρόπος κατασκευής χωμάτινων φραγμάτων”, Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
30. Plaxis Version 8 Tutorial Manual
31. Ν. Σαμπατακάκης, Ν. Δεπούνη “Φράγματα: Ταξινόμηση-κατασκευαστικές απαιτήσεις”, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

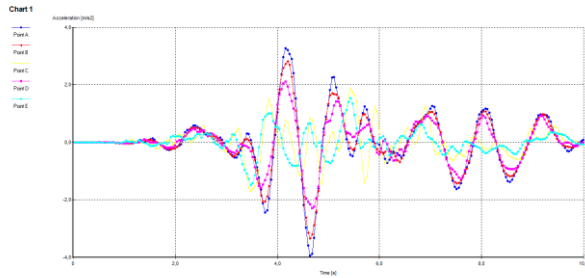
## Ελαστικές Αναλύσεις 0,16g ( Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης)

### Chalfant

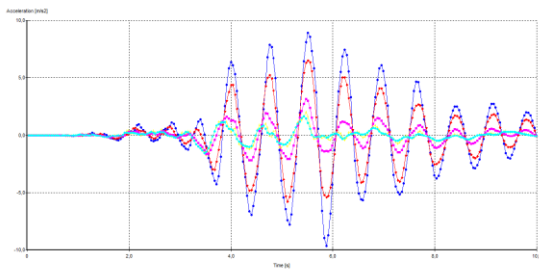
Σενάριο 1°



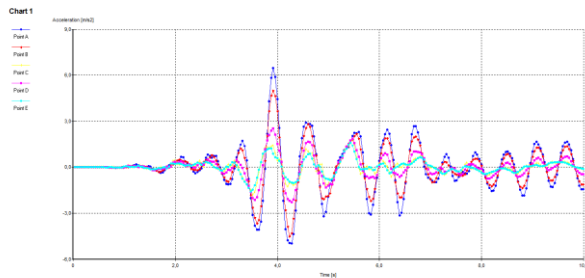
Σενάριο 2°



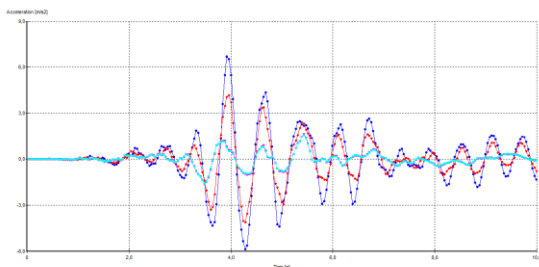
Σενάριο 3°



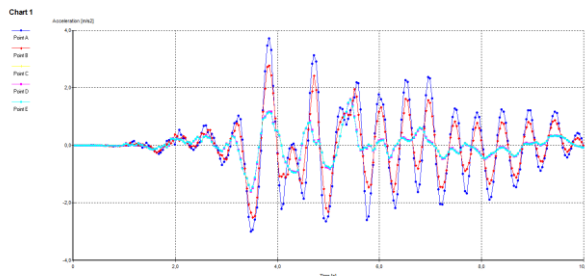
Σενάριο 4°



Σενάριο 5°



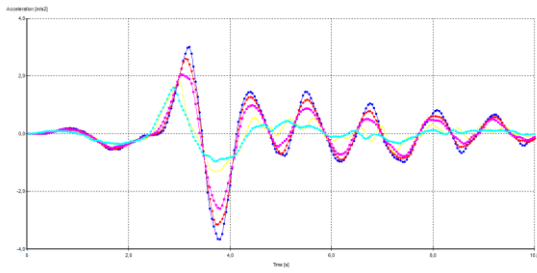
Σενάριο 6°



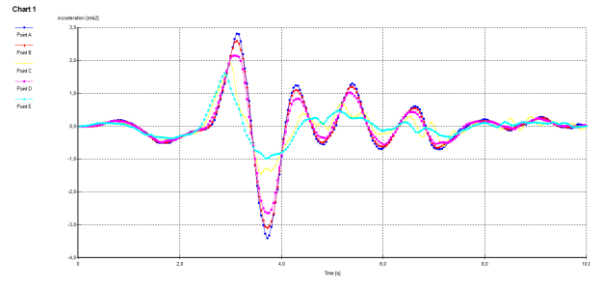


# Erzincan

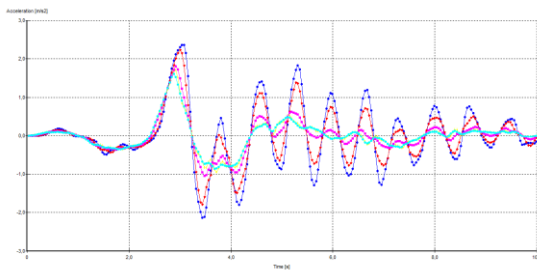
Σενάριο 1°



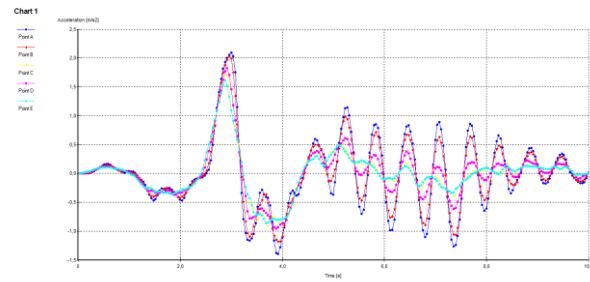
Σενάριο 2°



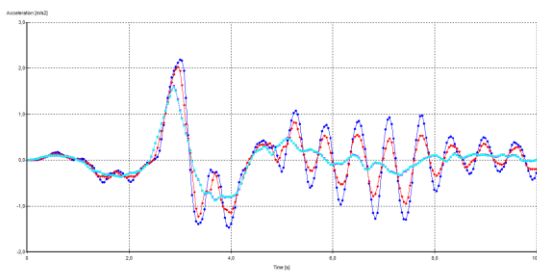
Σενάριο 3°



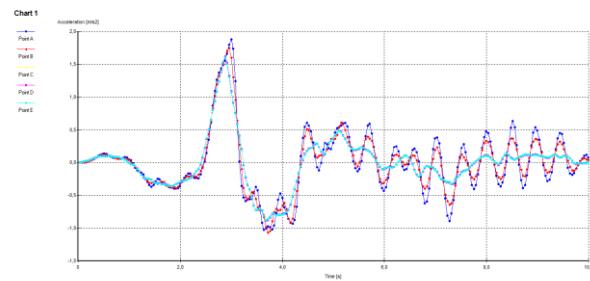
Σενάριο 4°



Σενάριο 5°

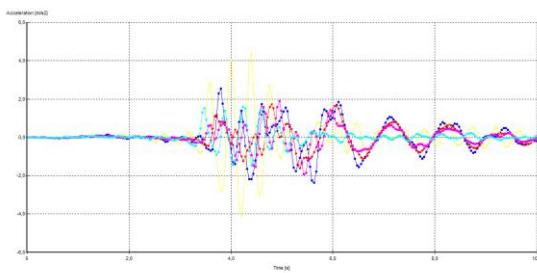


Σενάριο 6°

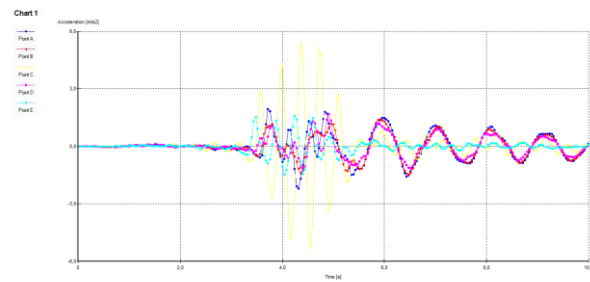


# Friuli

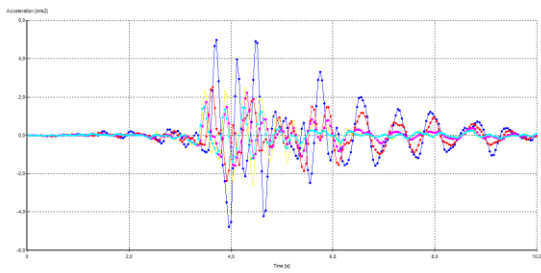
Σενάριο 1°



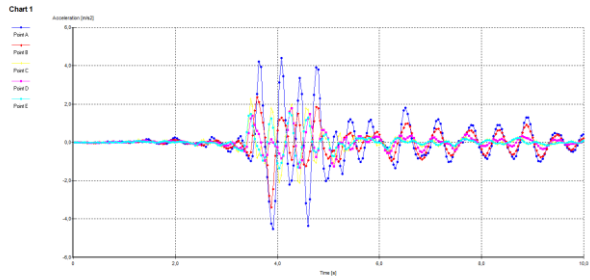
Σενάριο 2°



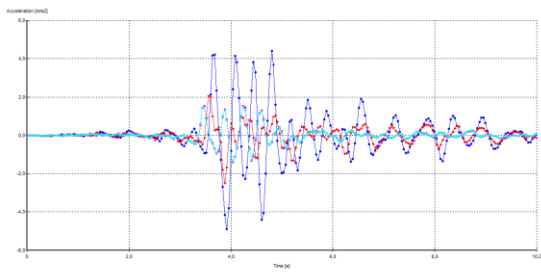
Σενάριο 3<sup>ο</sup>



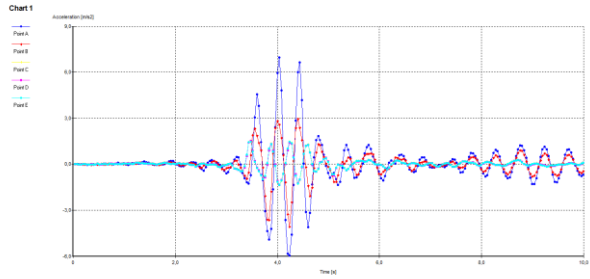
Σενάριο 4<sup>ο</sup>



Σενάριο 5<sup>ο</sup>

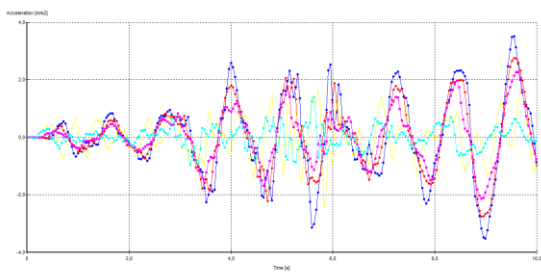


Σενάριο 6<sup>ο</sup>

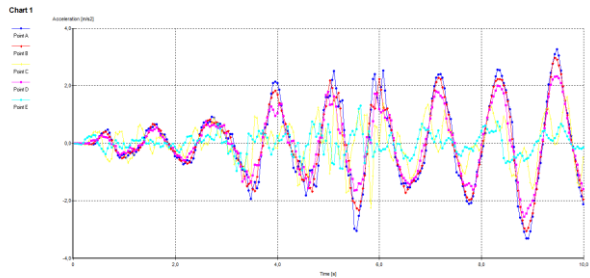


## Ionian

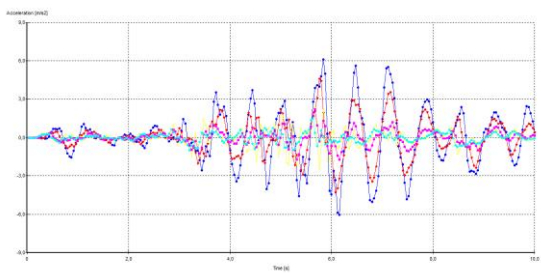
Σενάριο 1<sup>ο</sup>



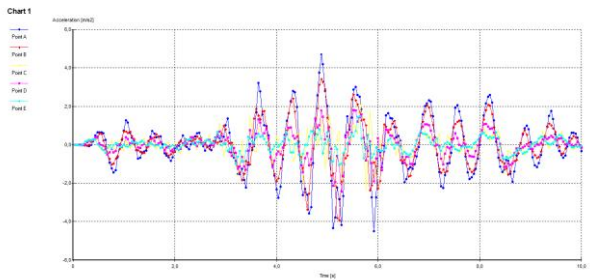
Σενάριο 2<sup>ο</sup>



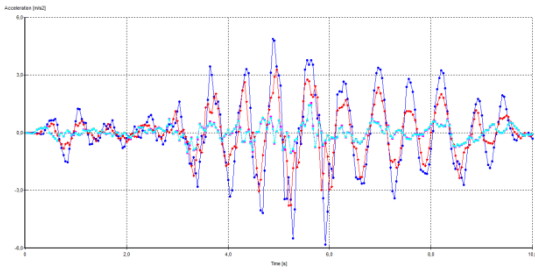
Σενάριο 3<sup>ο</sup>



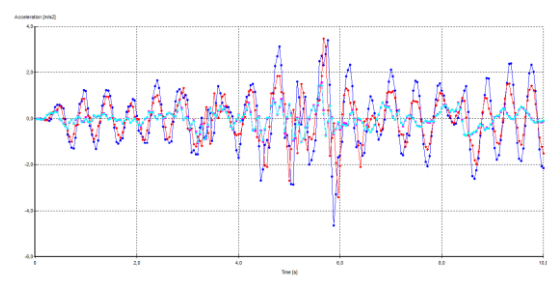
Σενάριο 4<sup>ο</sup>



Σενάριο 5<sup>ο</sup>

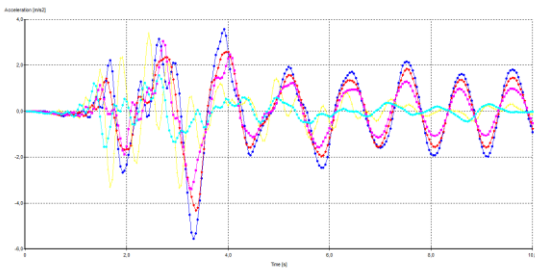


Σενάριο 6<sup>ο</sup>

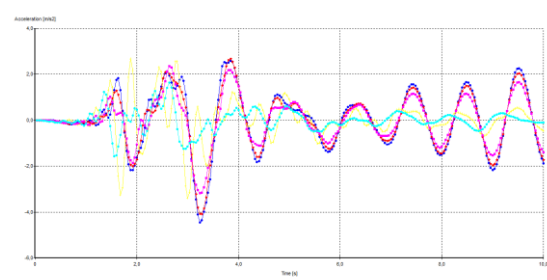


## Kalamata

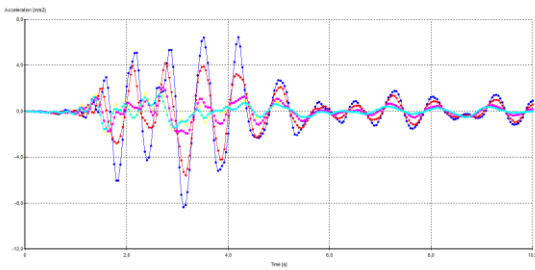
Σενάριο 1<sup>ο</sup>



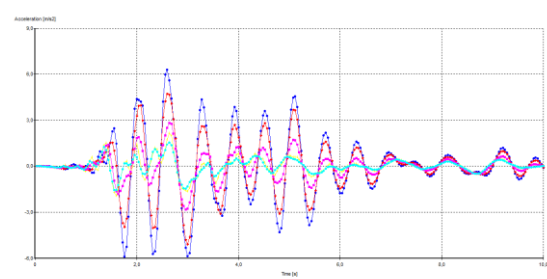
Σενάριο 2<sup>ο</sup>



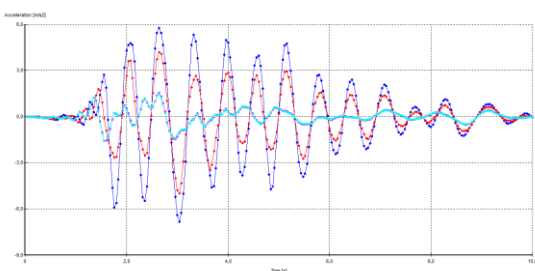
Σενάριο 3<sup>ο</sup>



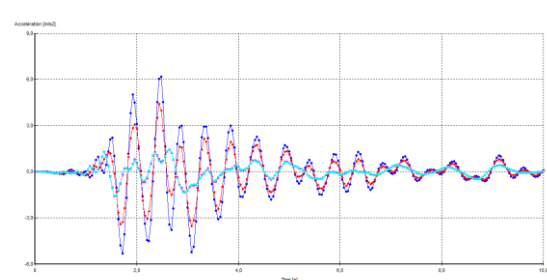
Σενάριο 4<sup>ο</sup>



Σενάριο 5<sup>ο</sup>

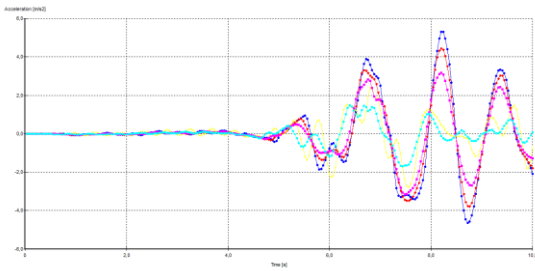


Σενάριο 6<sup>ο</sup>

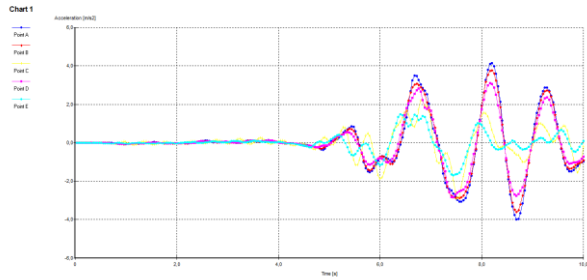


# Montenegro

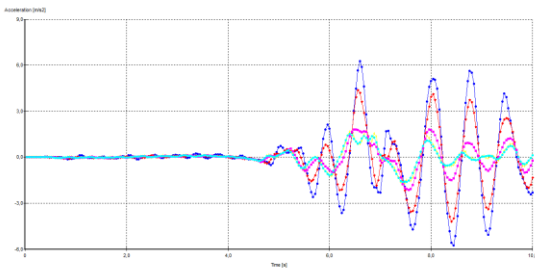
Σενάριο 1<sup>ο</sup>



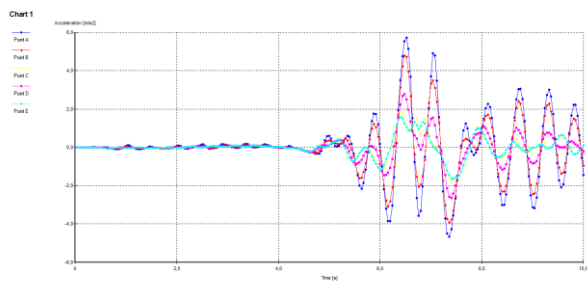
Σενάριο 2<sup>ο</sup>



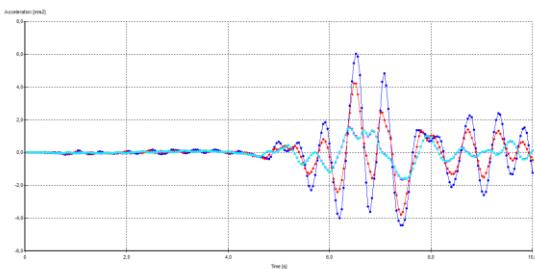
Σενάριο 3<sup>ο</sup>



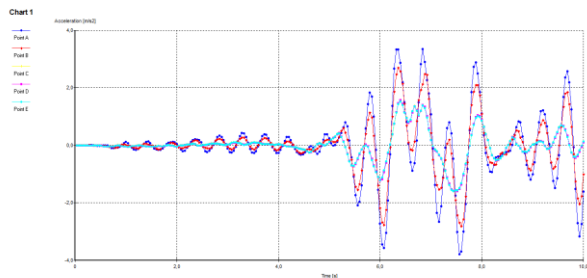
Σενάριο 4<sup>ο</sup>



Σενάριο 5<sup>ο</sup>

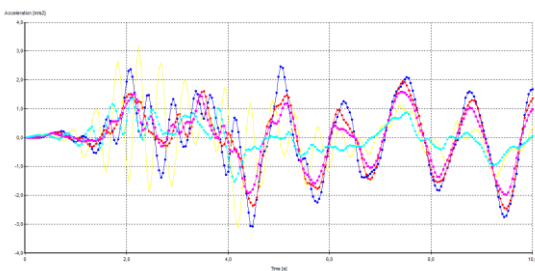


Σενάριο 6<sup>ο</sup>

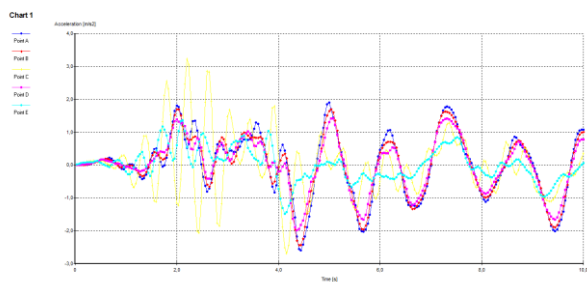


# Nsps

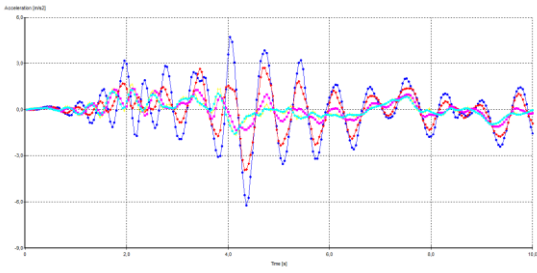
Σενάριο 1<sup>ο</sup>



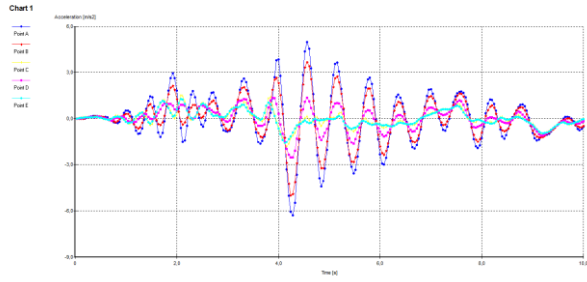
Σενάριο 2<sup>ο</sup>



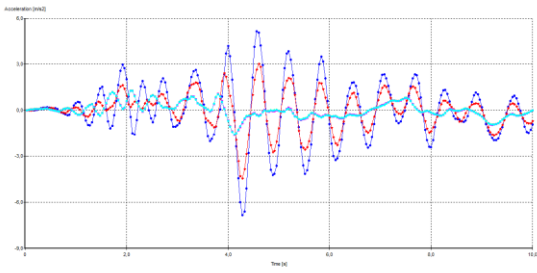
Σενάριο 3°



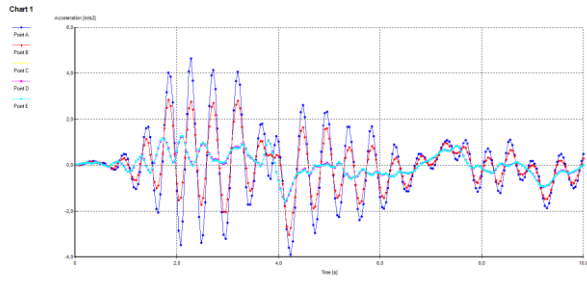
Σενάριο 4°



Σενάριο 5°

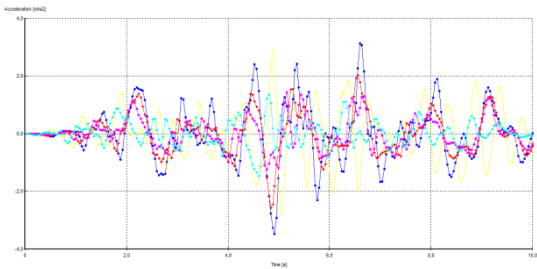


Σενάριο 6°

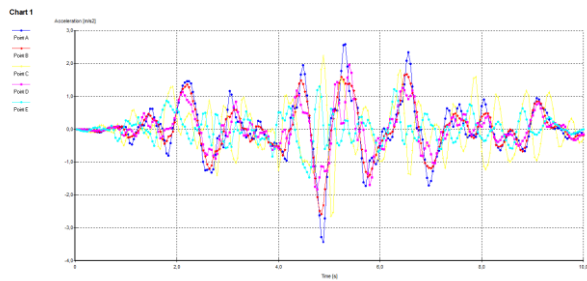


### Parkfield 11 km

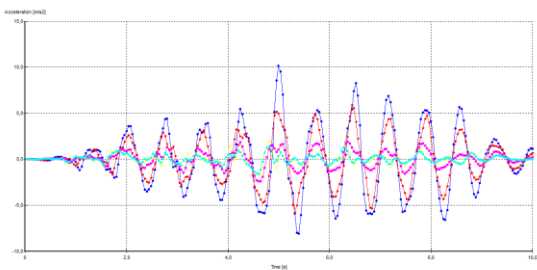
Σενάριο 1°



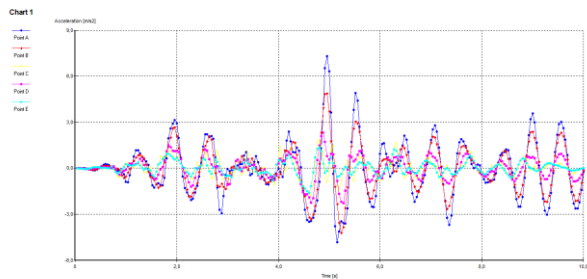
Σενάριο 2°



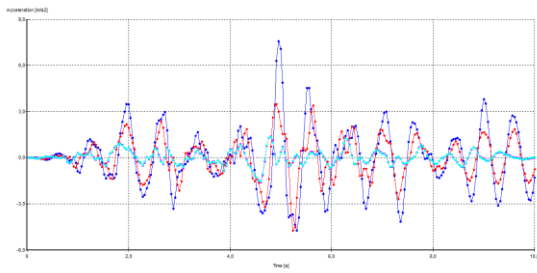
Σενάριο 3°



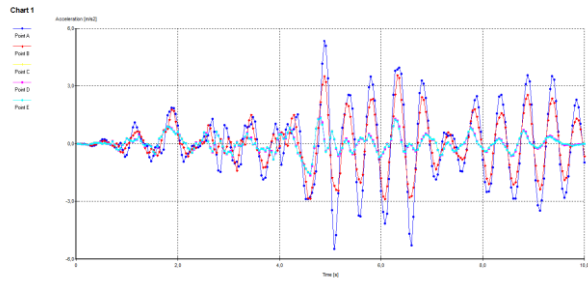
Σενάριο 4°



Σενάριο 5°

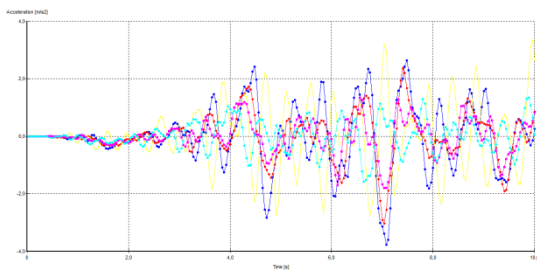


Σενάριο 6°

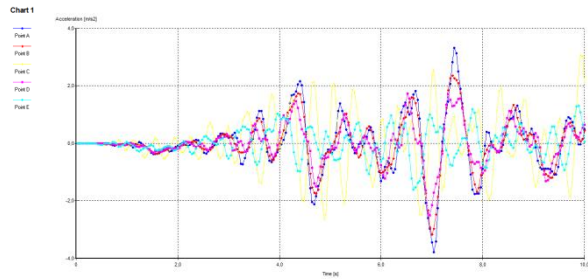


### Parkfield 14 km

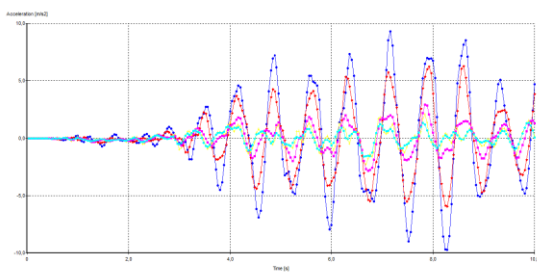
Σενάριο 1°



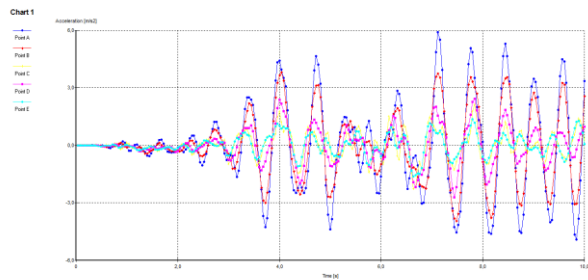
Σενάριο 2°



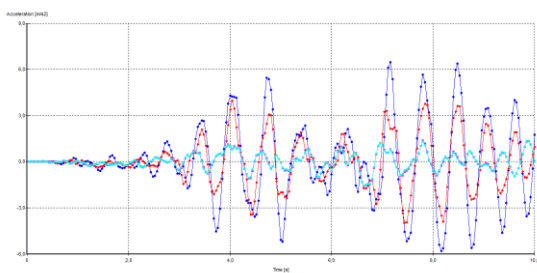
Σενάριο 3°



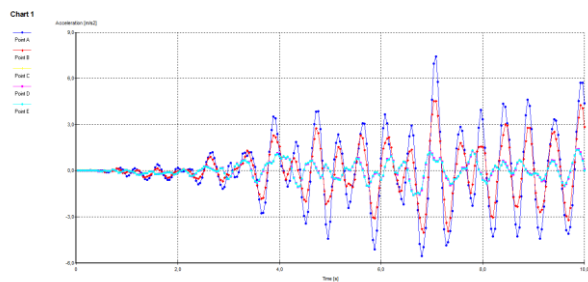
Σενάριο 4°



Σενάριο 5°

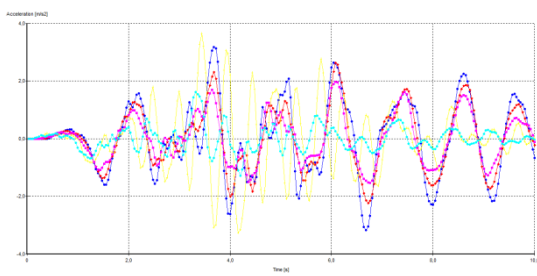


Σενάριο 6°

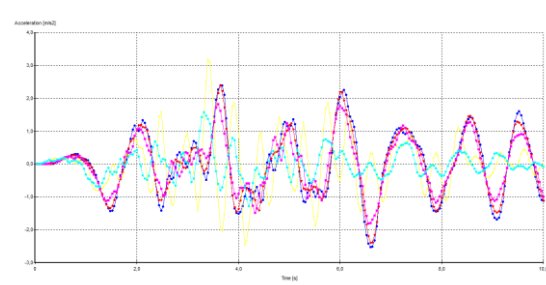


# Parkfield 20 km

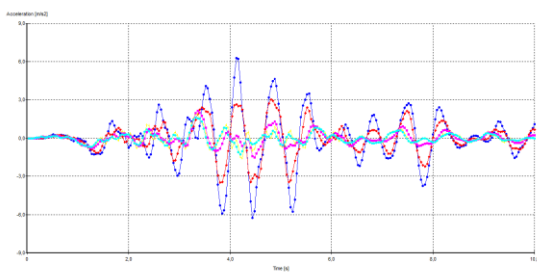
Σενάριο 1<sup>ο</sup>



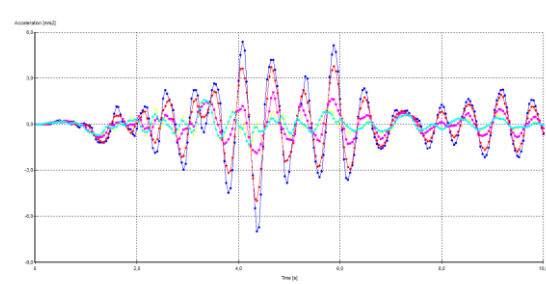
Σενάριο 2<sup>ο</sup>



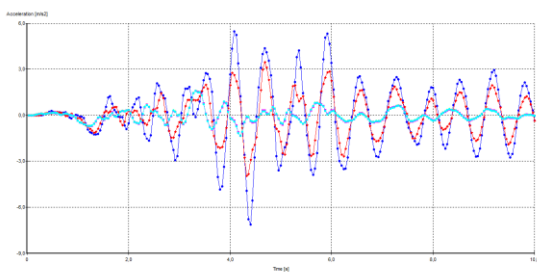
Σενάριο 3<sup>ο</sup>



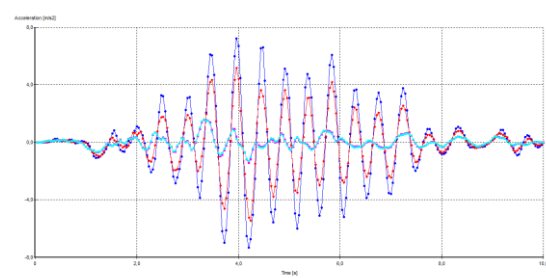
Σενάριο 4<sup>ο</sup>



Σενάριο 5<sup>ο</sup>

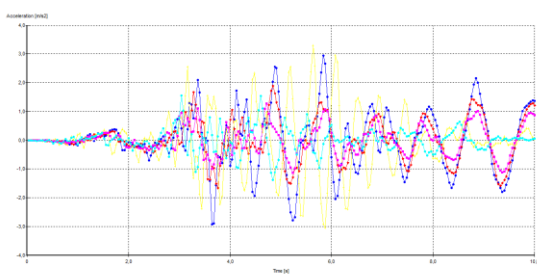


Σενάριο 6<sup>ο</sup>

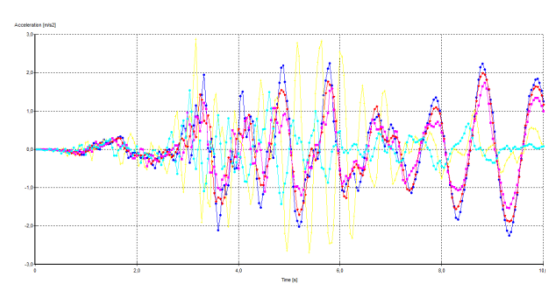


# Whittier

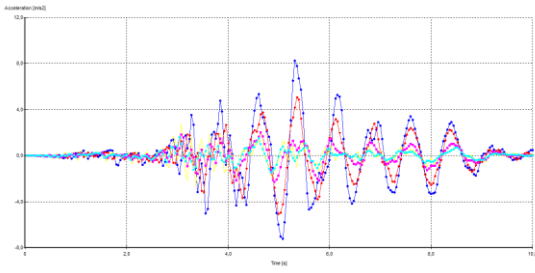
Σενάριο 1<sup>ο</sup>



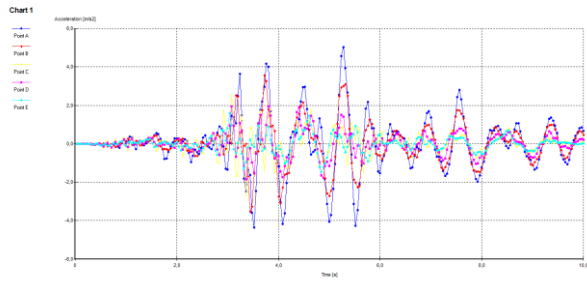
Σενάριο 2<sup>ο</sup>



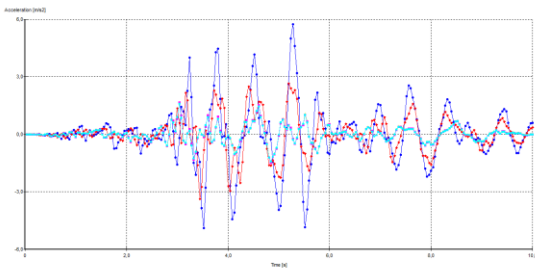
Σενάριο 3<sup>ο</sup>



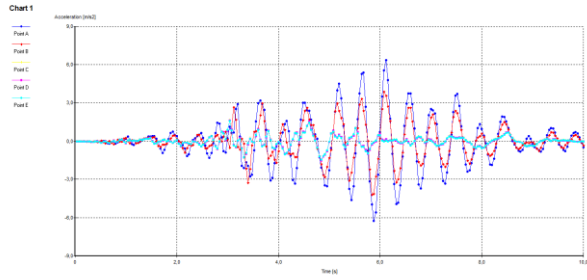
Σενάριο 4<sup>ο</sup>



Σενάριο 5<sup>ο</sup>



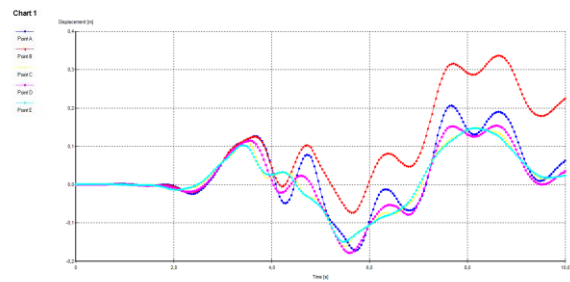
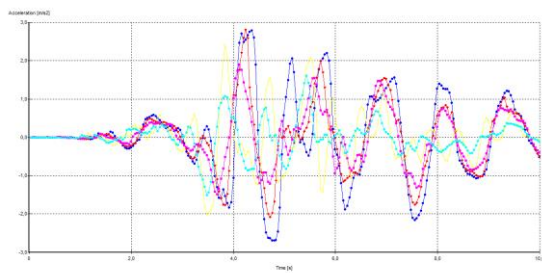
Σενάριο 6<sup>ο</sup>



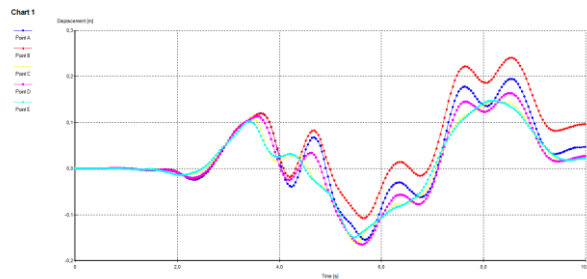
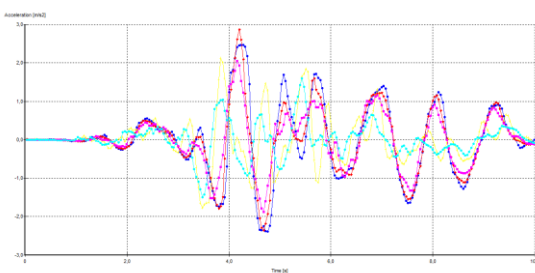
**Ανελαστικές Αναλύσεις 0,16g (Λιθορριπή 1) ( Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης- Χρονοϊστορίες μετατόπισης)**

**Chalfant**

Σενάριο 1<sup>ο</sup>

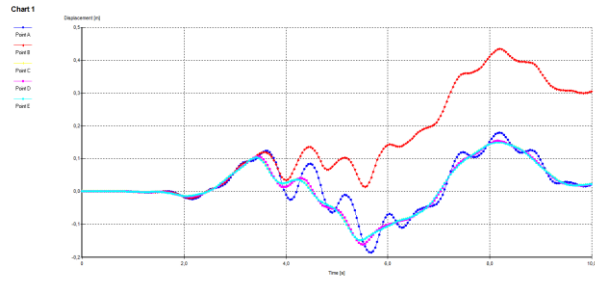
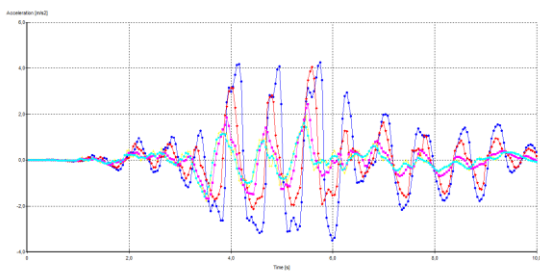


Σενάριο 2<sup>ο</sup>

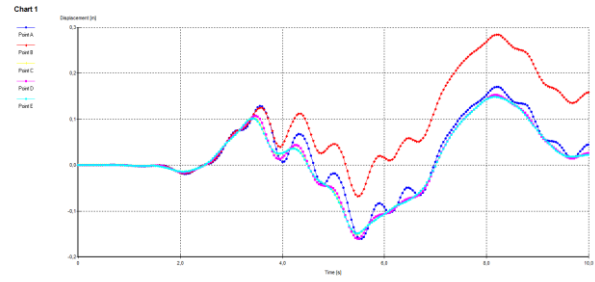
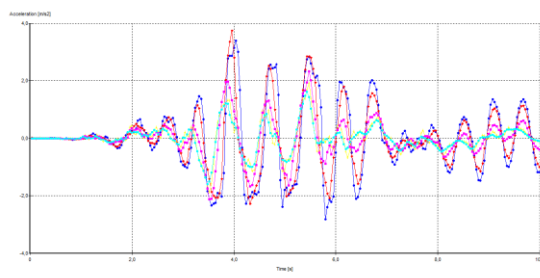




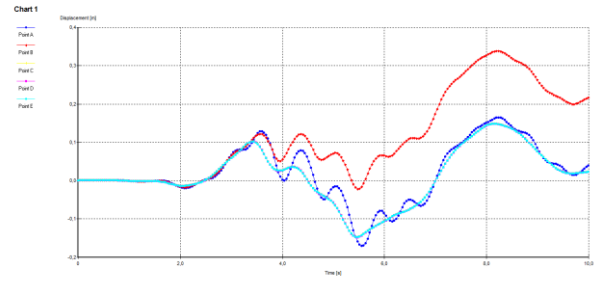
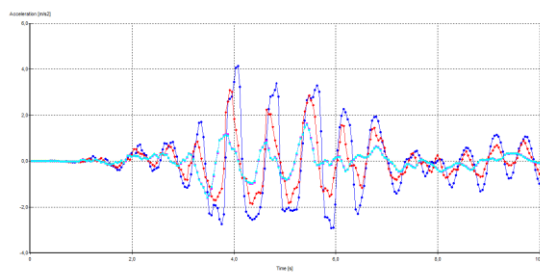
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



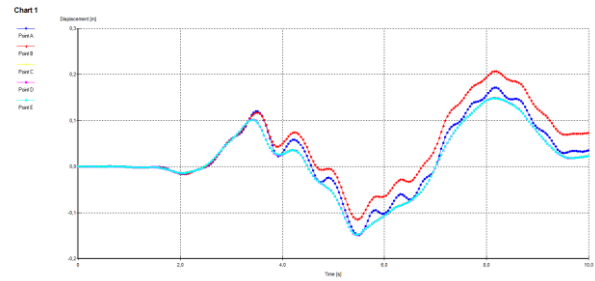
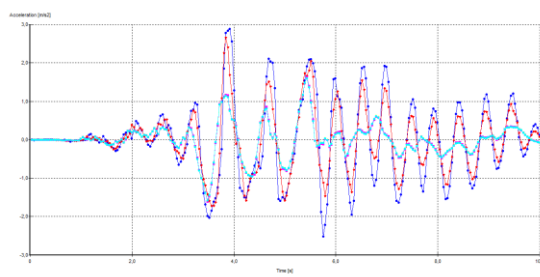
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>



### Σενάριο 6<sup>ο</sup>



# Erzincan

## Σενάριο 1<sup>ο</sup>

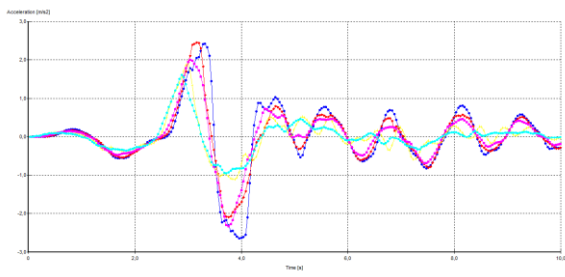


Chart 1

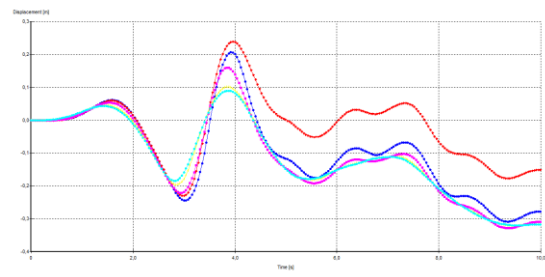


Chart 1

## Σενάριο 2<sup>ο</sup>

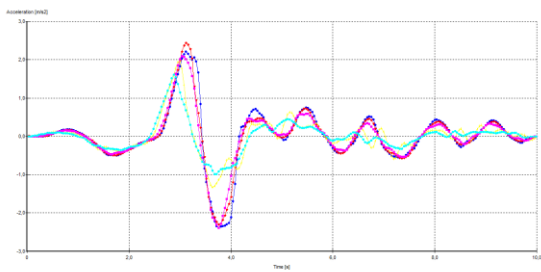


Chart 1

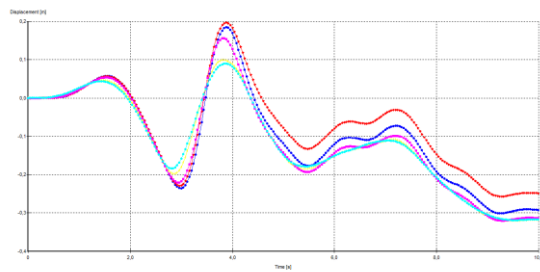


Chart 1

## Σενάριο 3<sup>ο</sup>

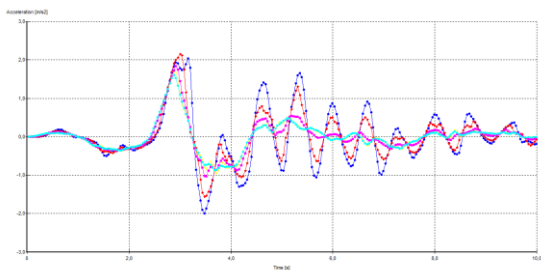


Chart 1

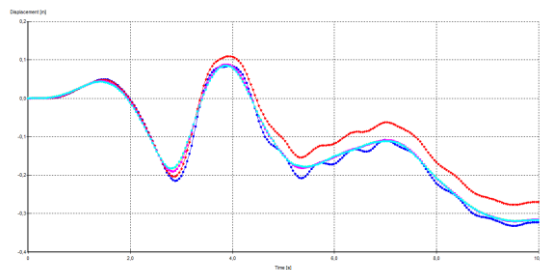


Chart 1

## Σενάριο 4<sup>ο</sup>

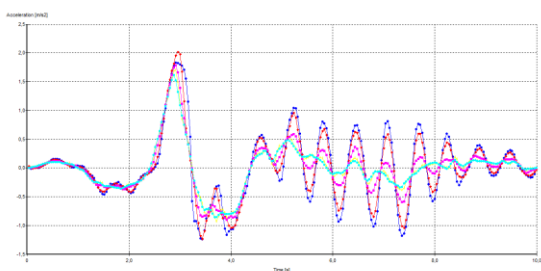


Chart 1

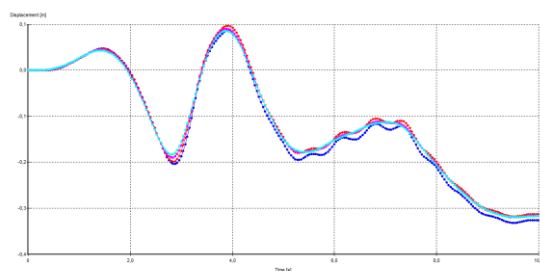
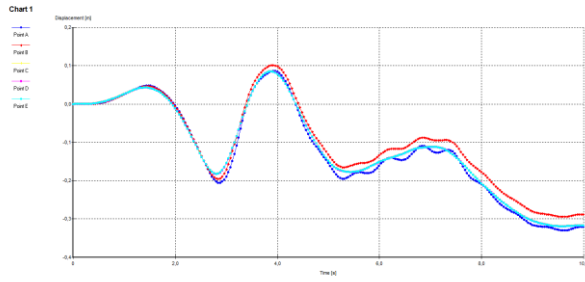
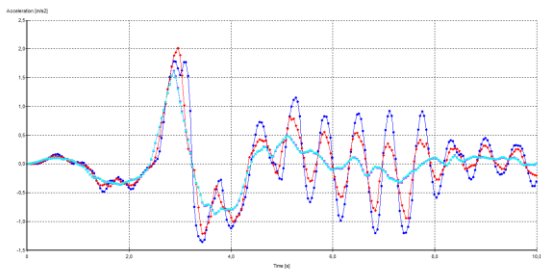
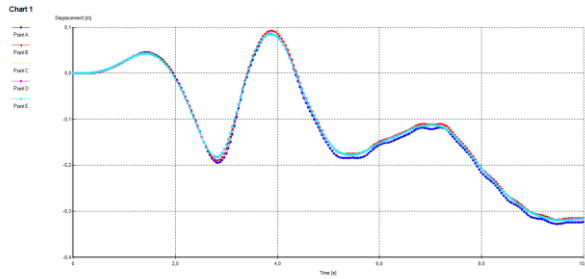
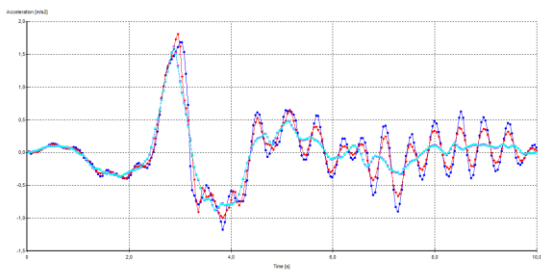


Chart 1

## Σενάριο 5°

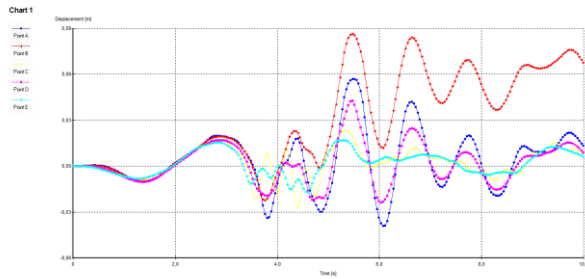
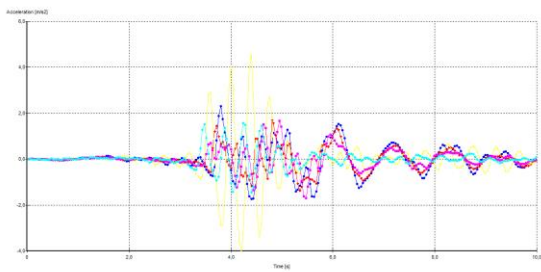


## Σενάριο 6°

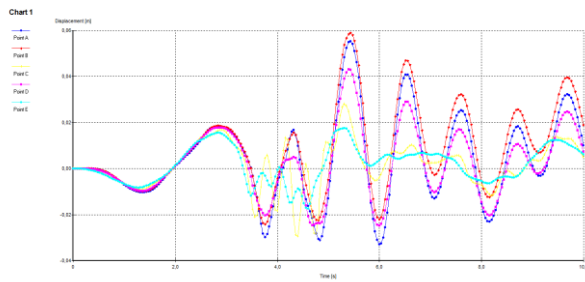
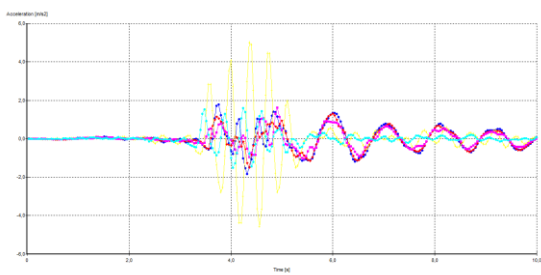


## Friuli

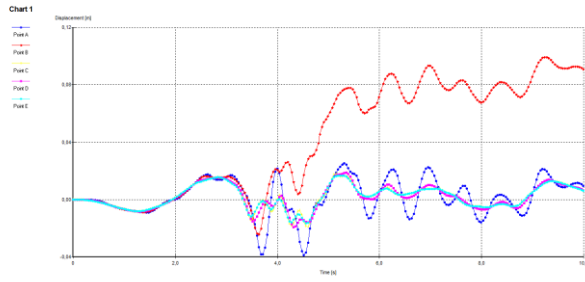
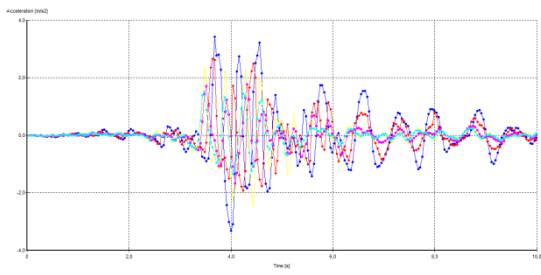
### Σενάριο 1°



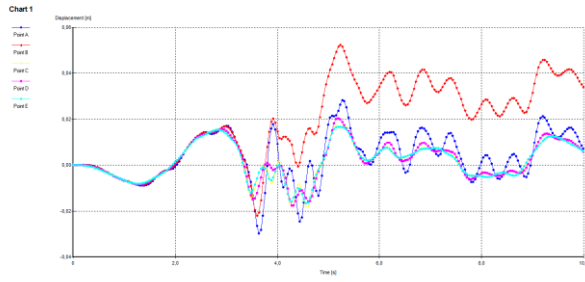
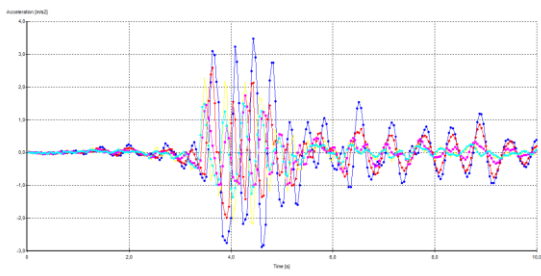
### Σενάριο 2°



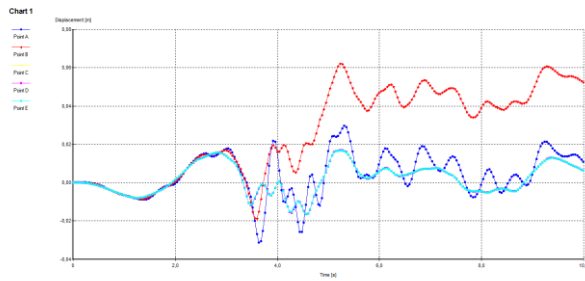
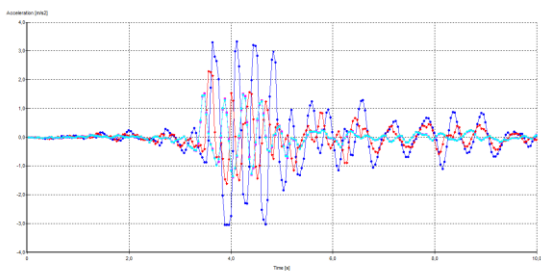
### Σενάριο 3°



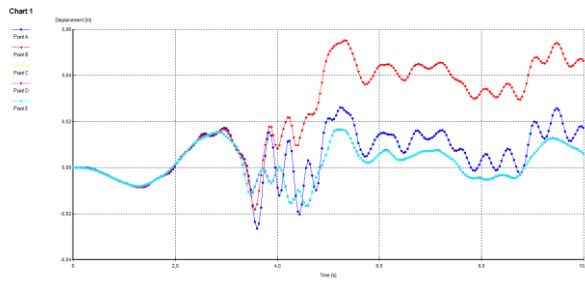
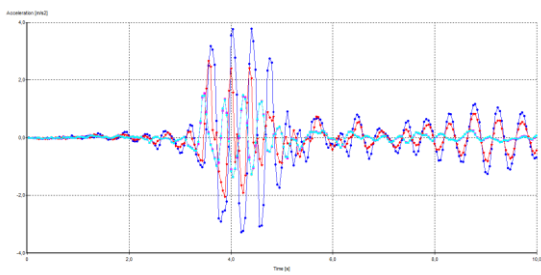
### Σενάριο 4°



### Σενάριο 5°

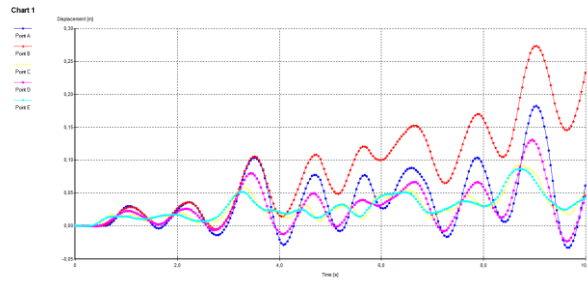
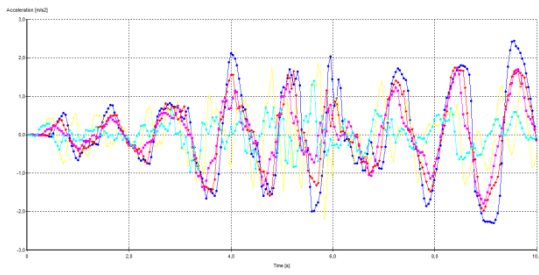


### Σενάριο 6°

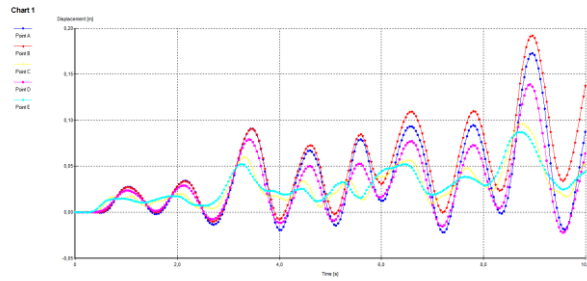
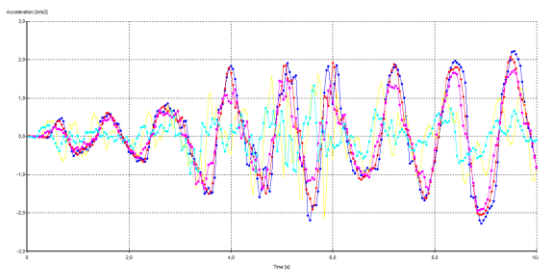


# Ionian

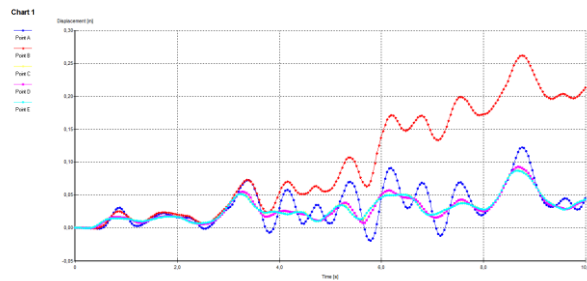
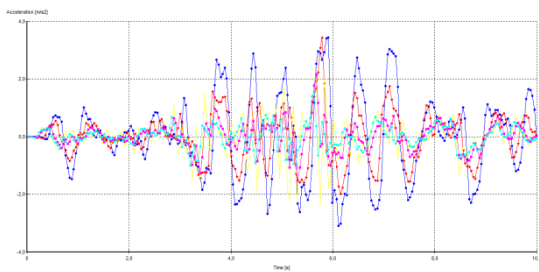
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



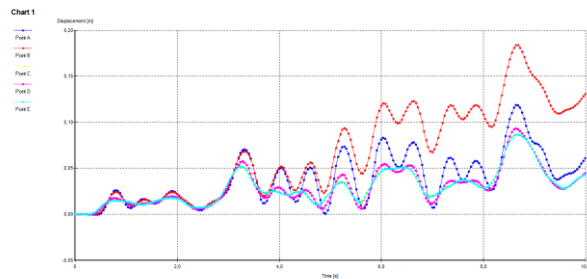
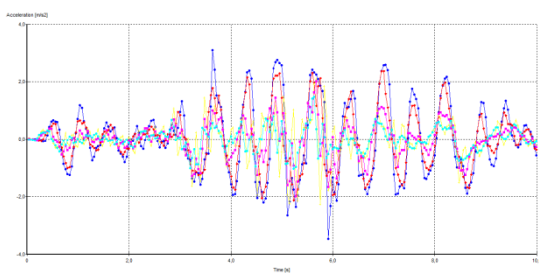
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



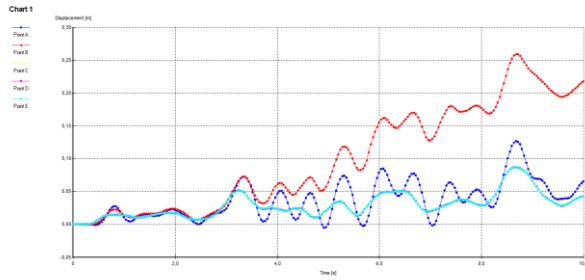
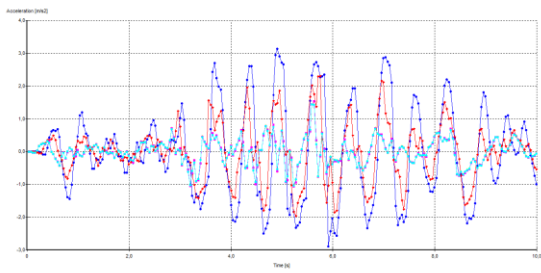
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



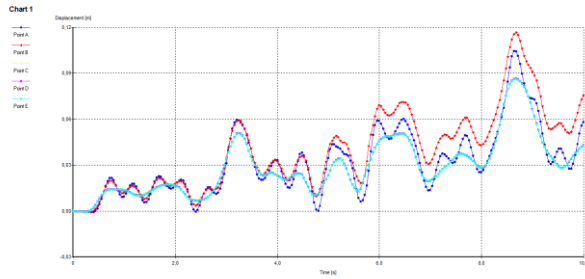
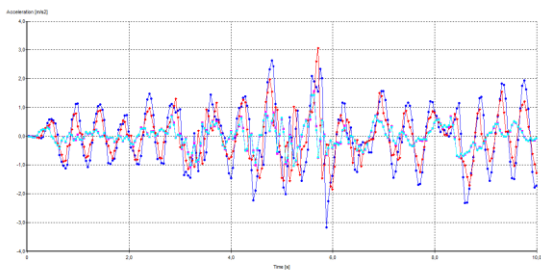
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

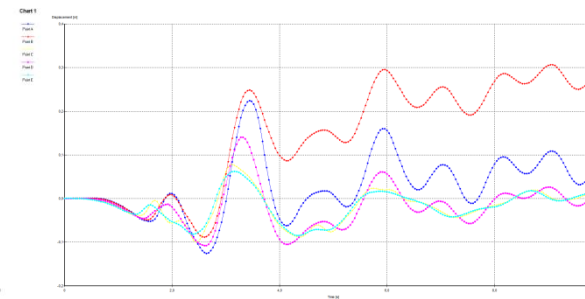
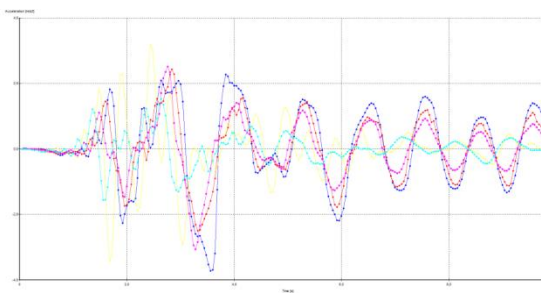


## Σενάριο 6°

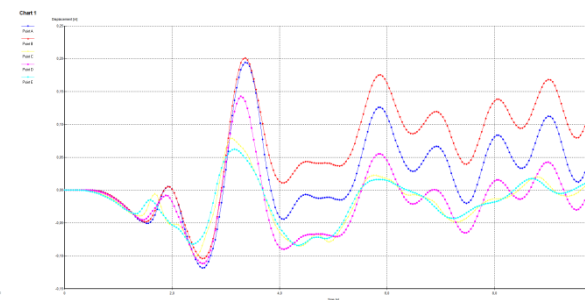
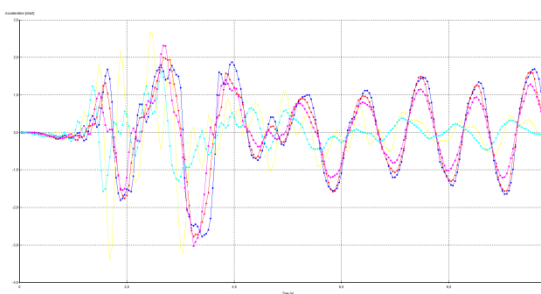


## Κalamata

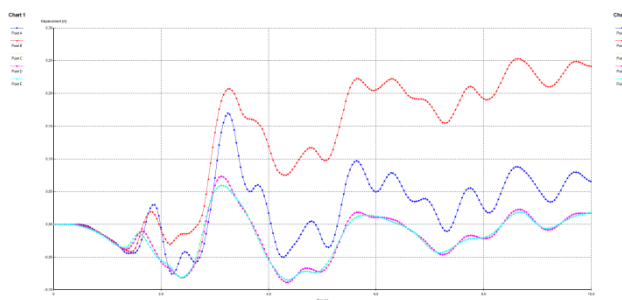
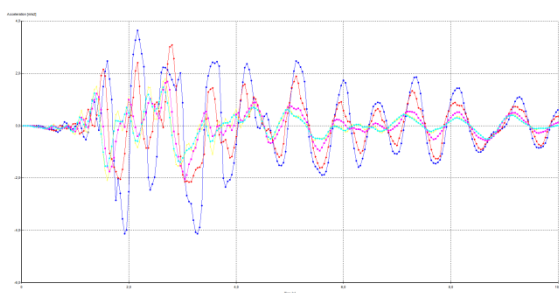
### Σενάριο 1°



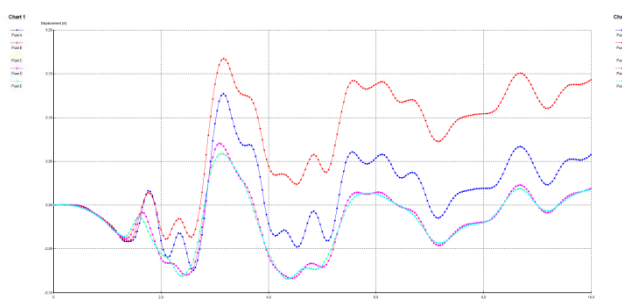
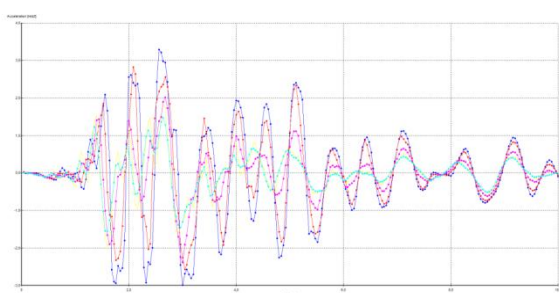
### Σενάριο 2°



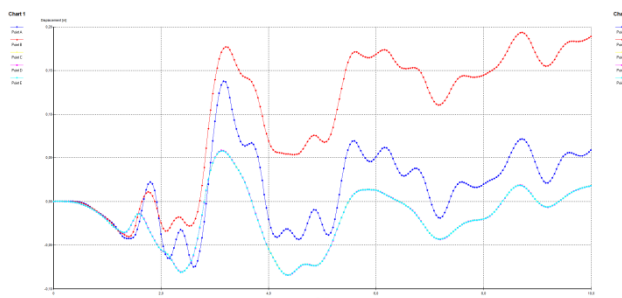
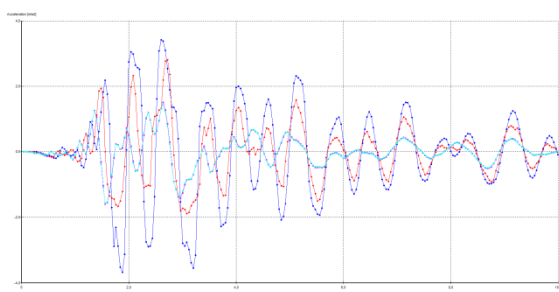
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



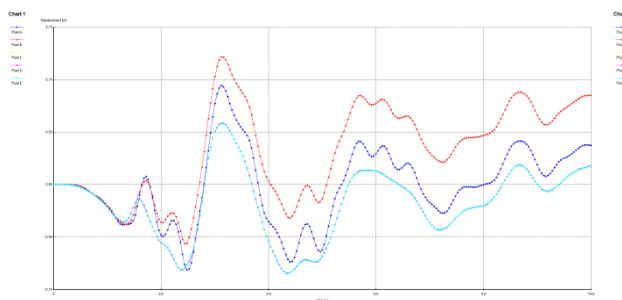
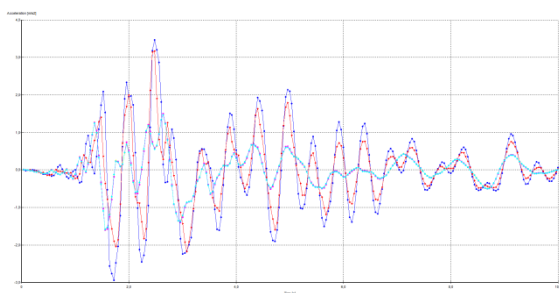
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

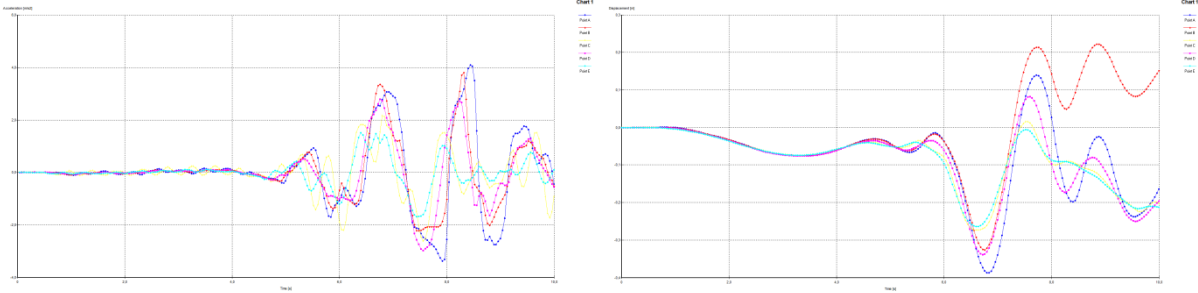


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

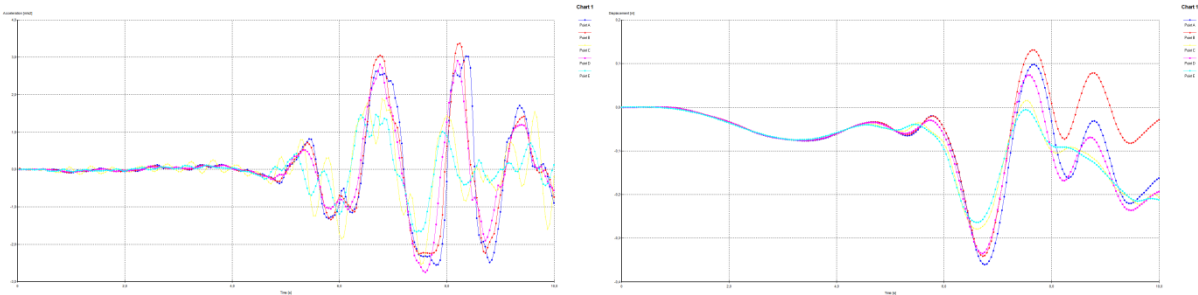


# Montenegro

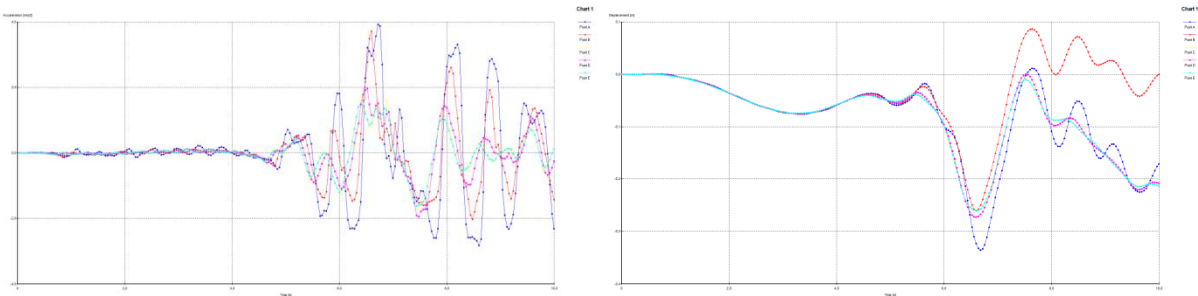
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



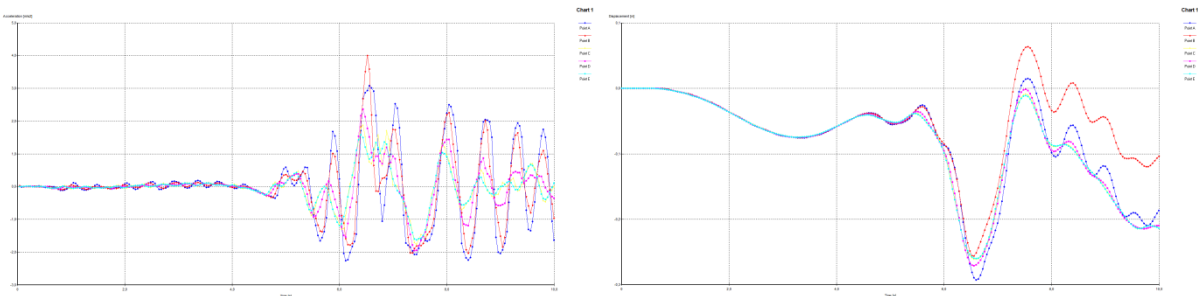
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



## Σενάριο 3<sup>ο</sup>

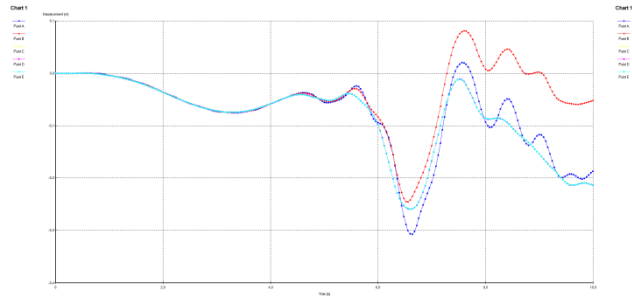
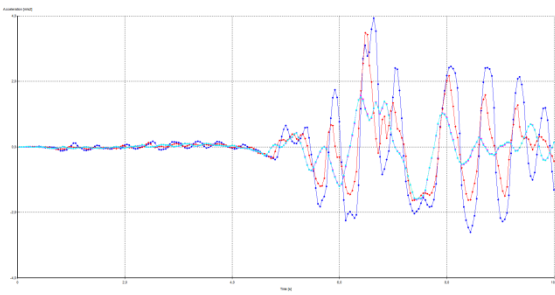


## Σενάριο 4<sup>ο</sup>

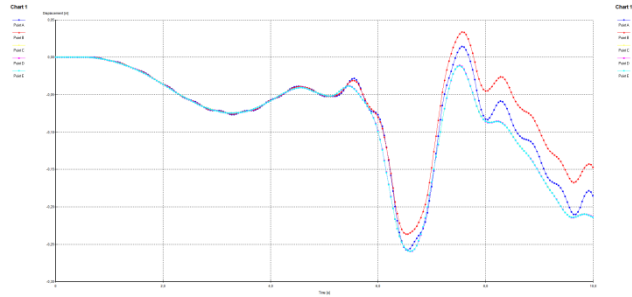
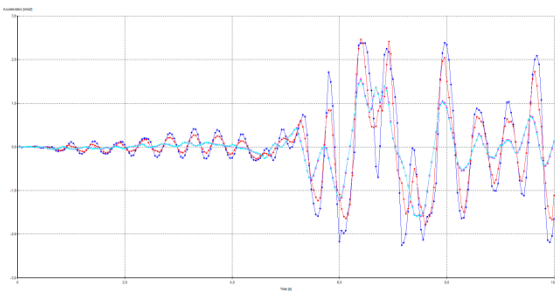




### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

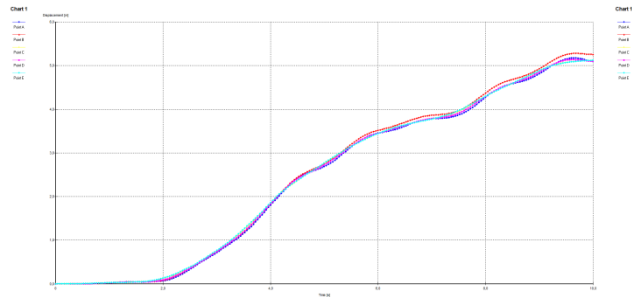
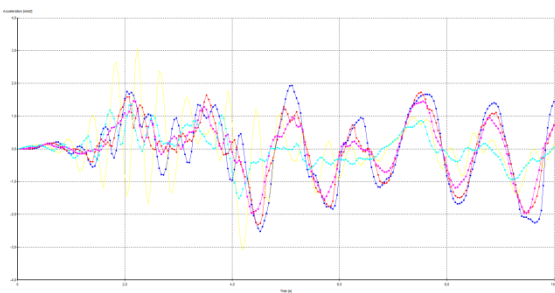


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

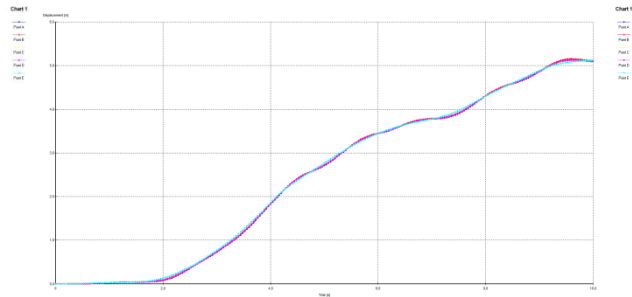
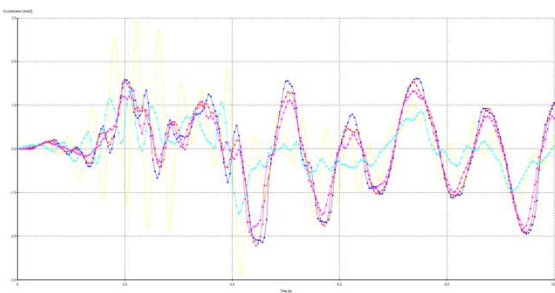


## Nsps

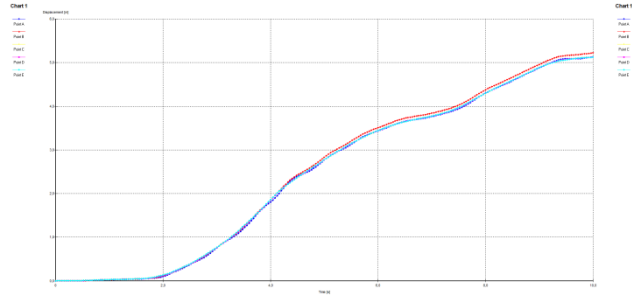
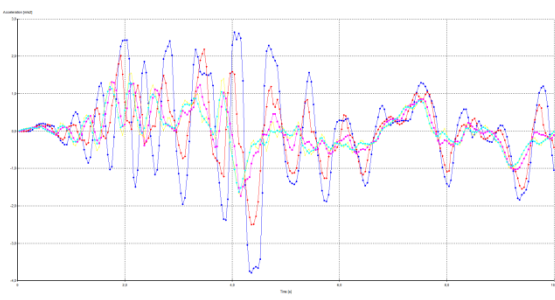
### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



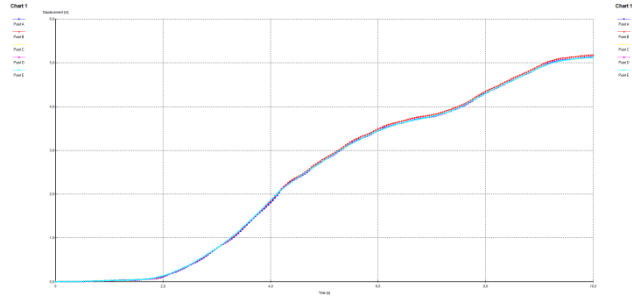
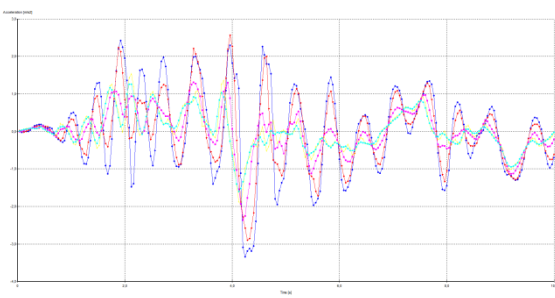
### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



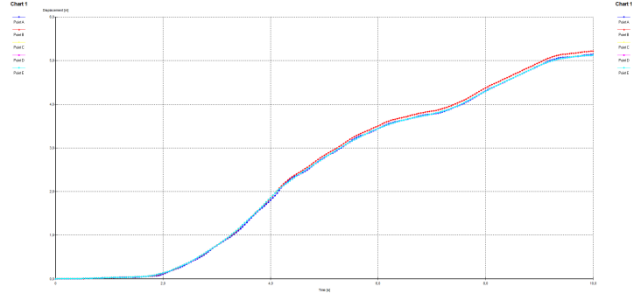
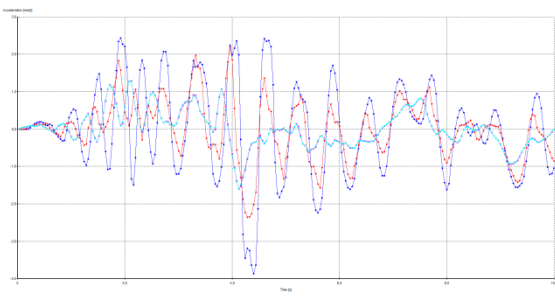
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



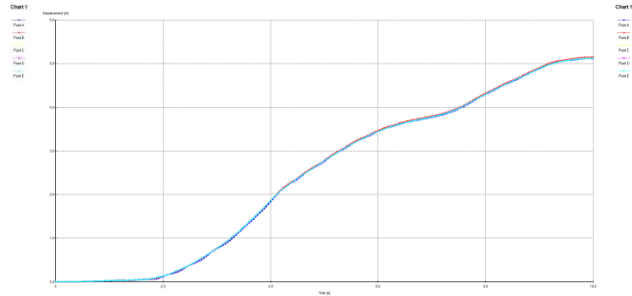
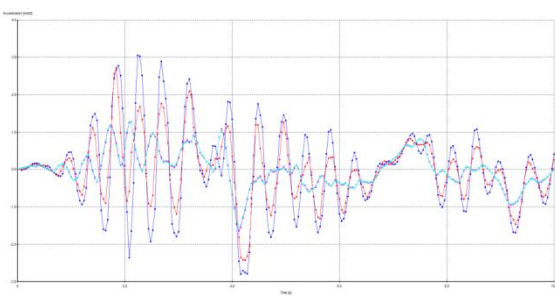
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

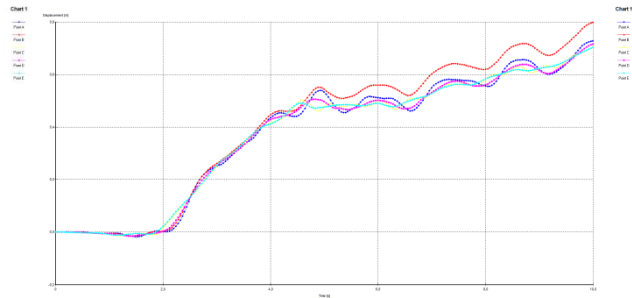
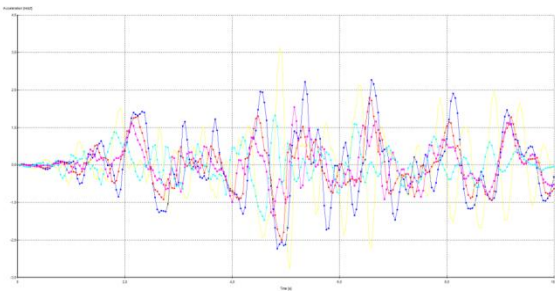


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

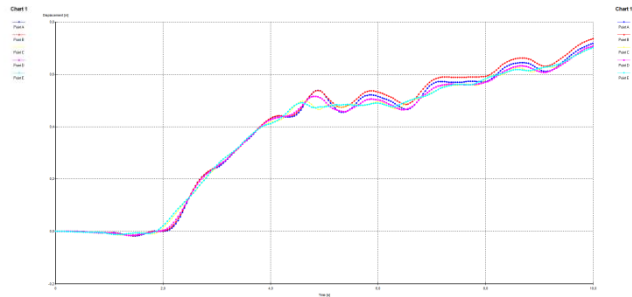
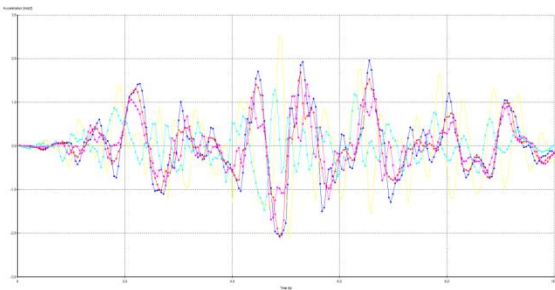


# Parkfield 11 km

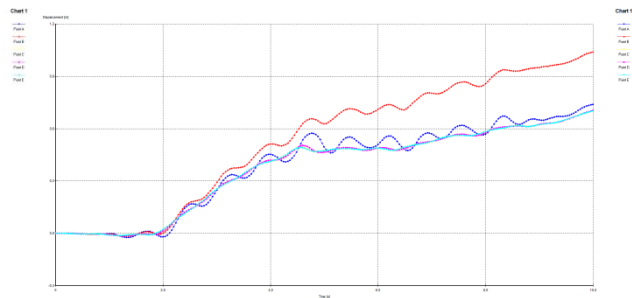
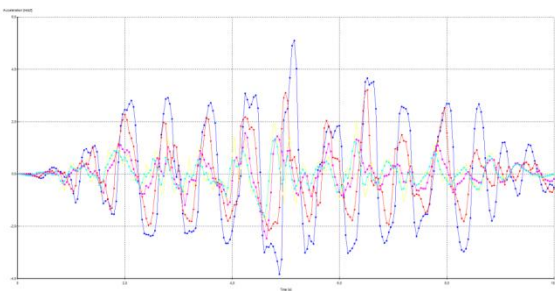
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



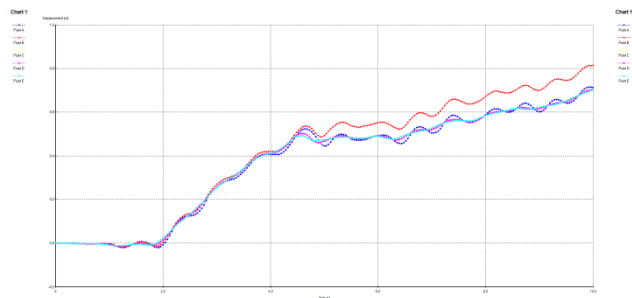
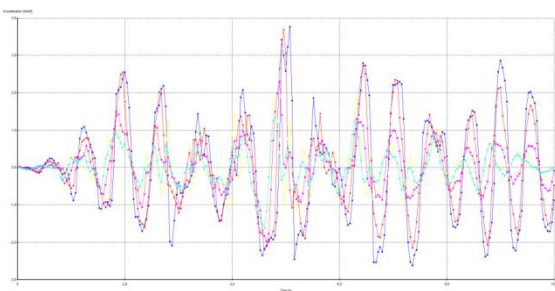
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



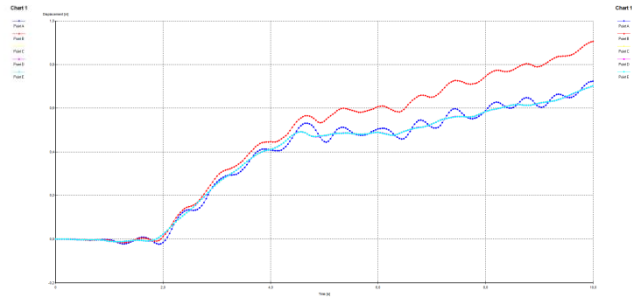
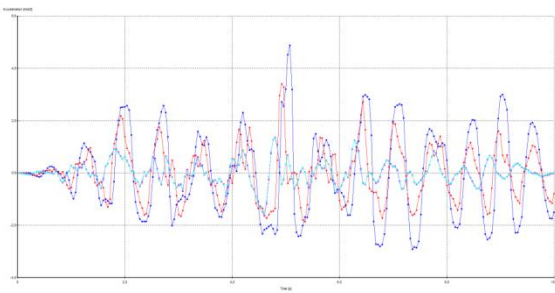
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



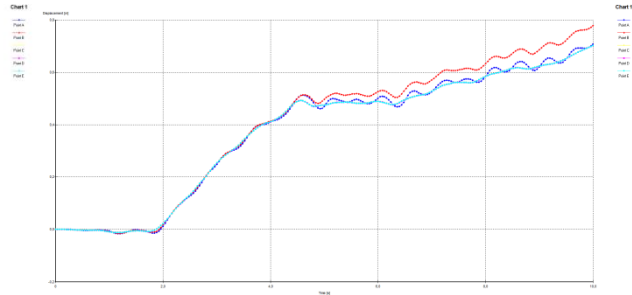
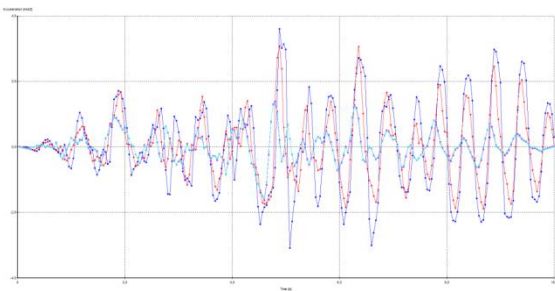
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

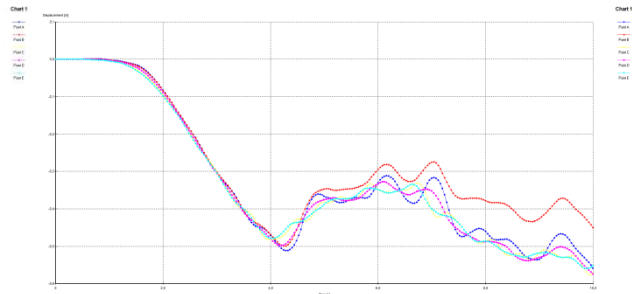
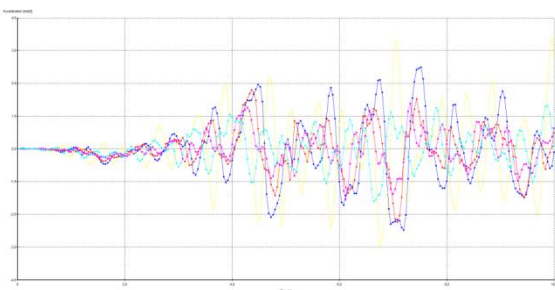


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

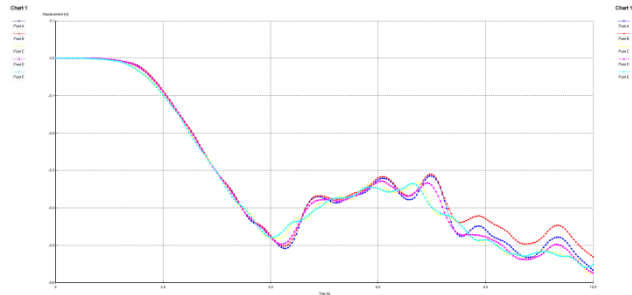
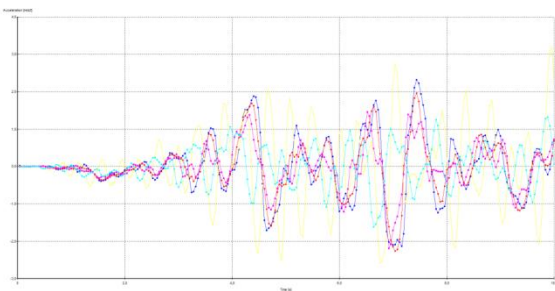


## Parkfield 14 km

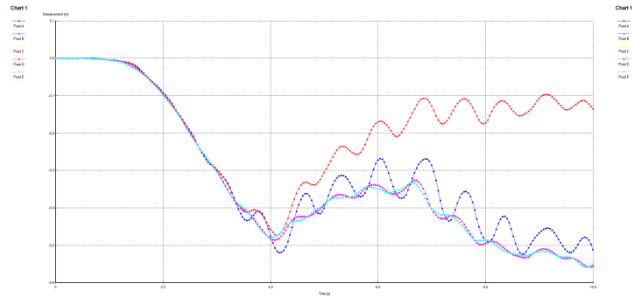
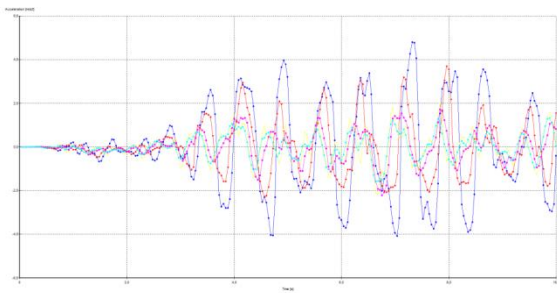
### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



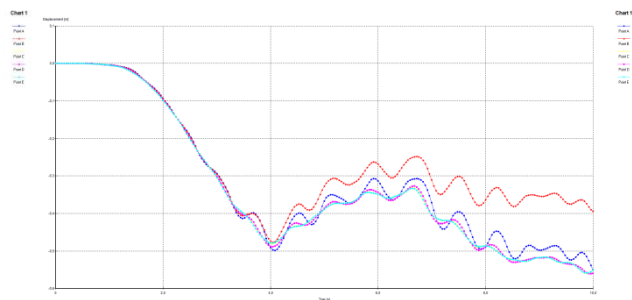
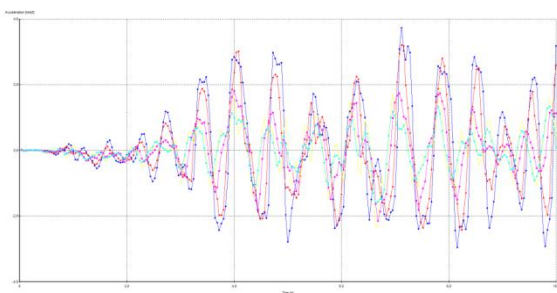
### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



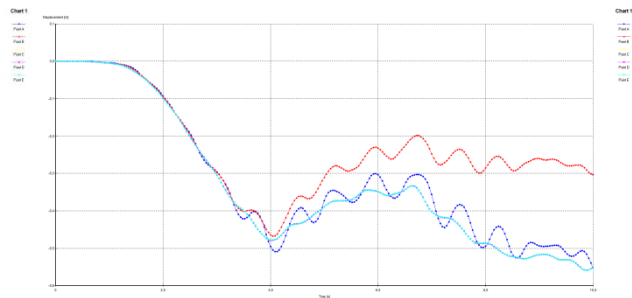
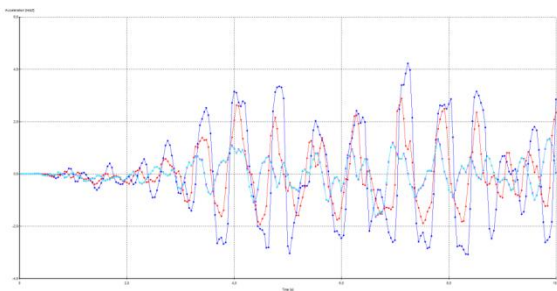
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



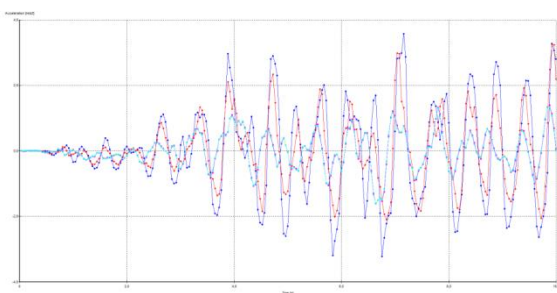
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

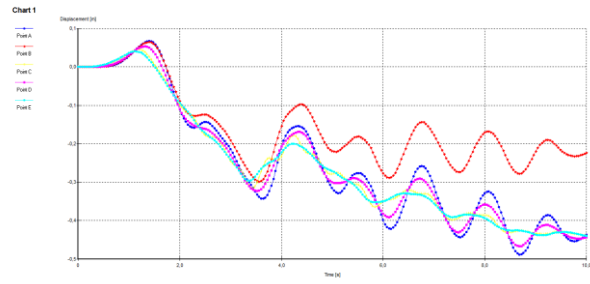
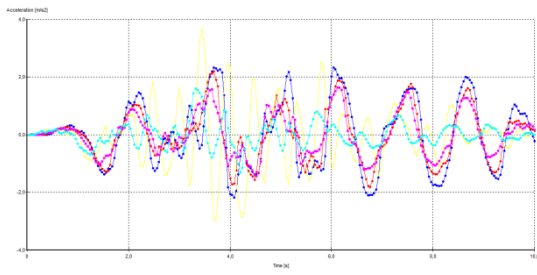


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

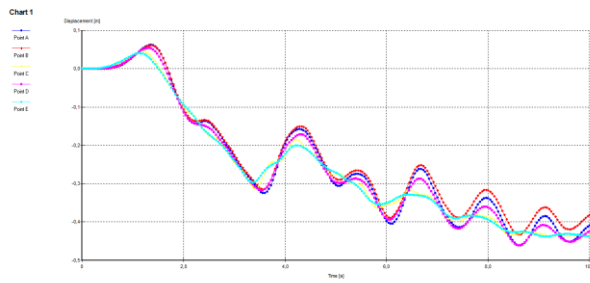
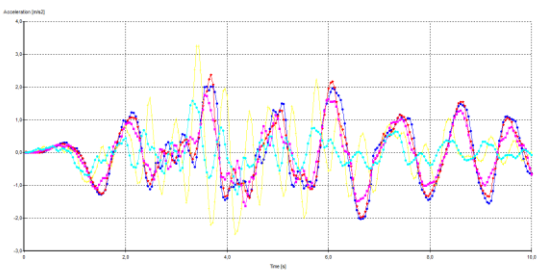


# Parkfield 20 km

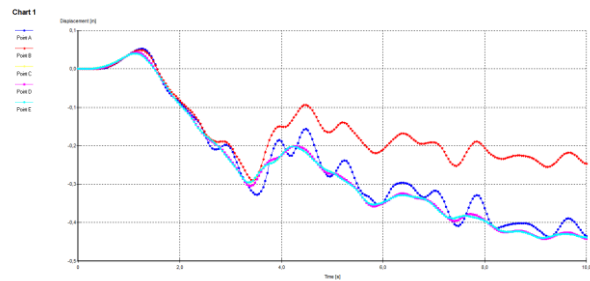
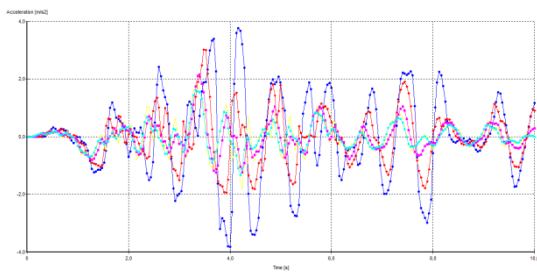
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



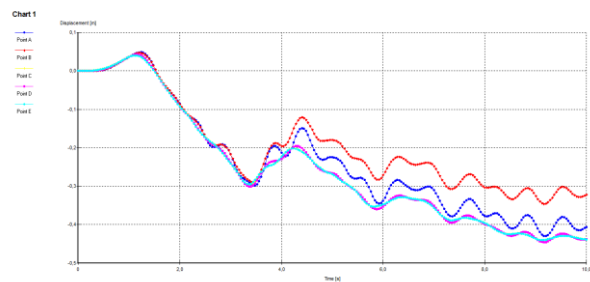
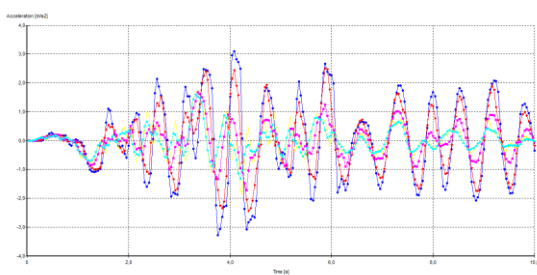
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



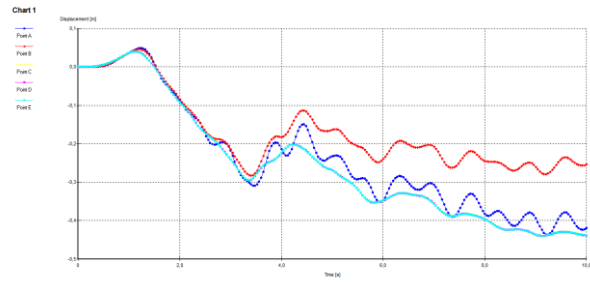
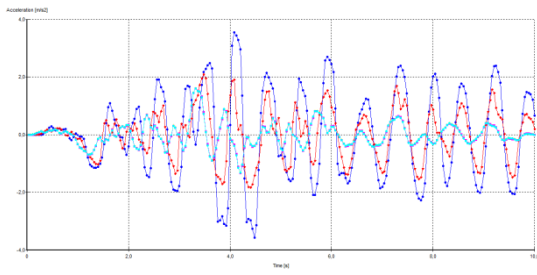
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



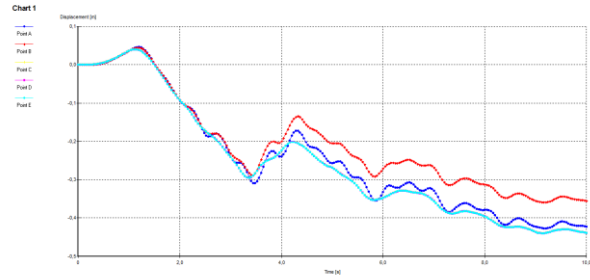
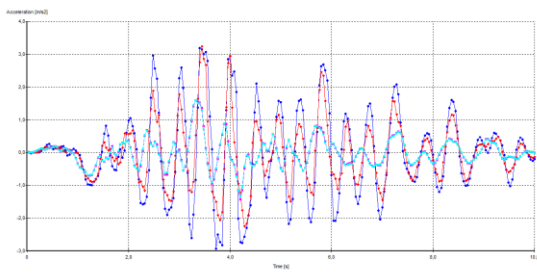
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5<sup>ο</sup>

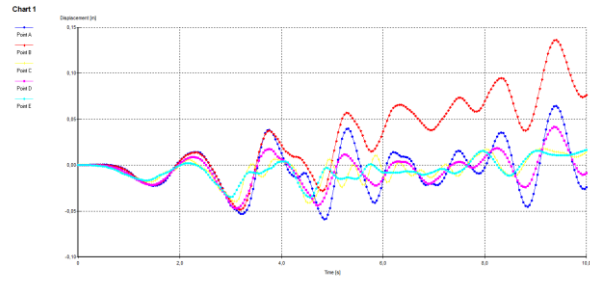
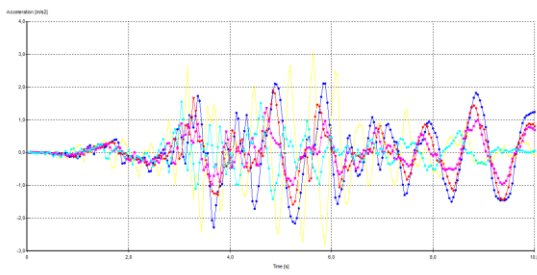


## Σενάριο 6<sup>ο</sup>

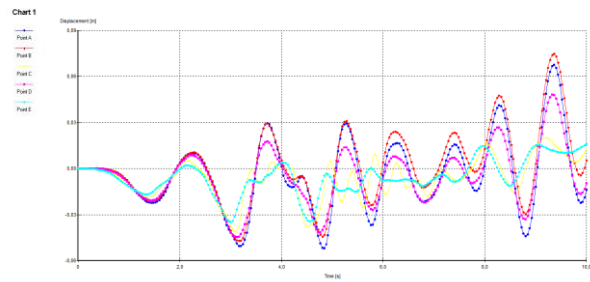
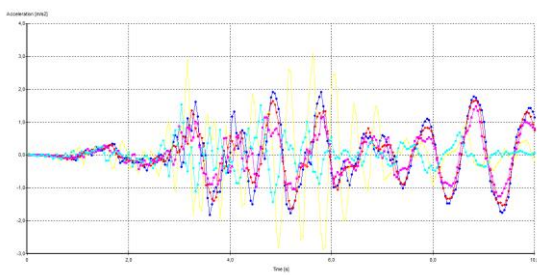


## Whittier

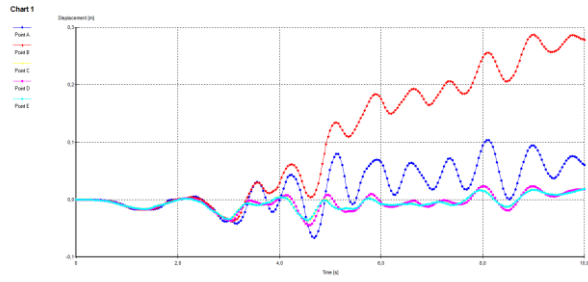
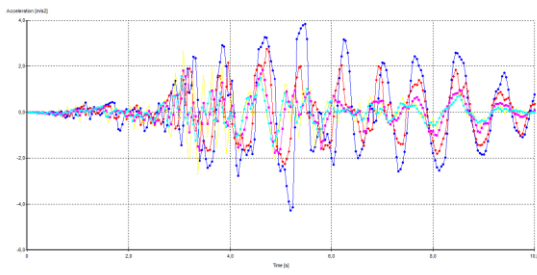
### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



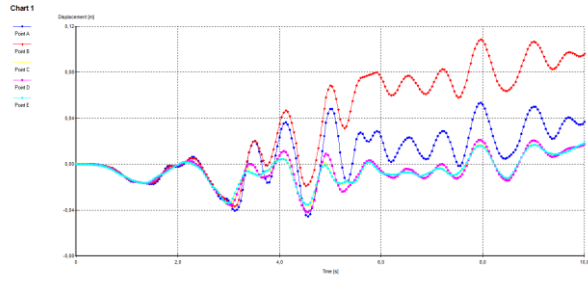
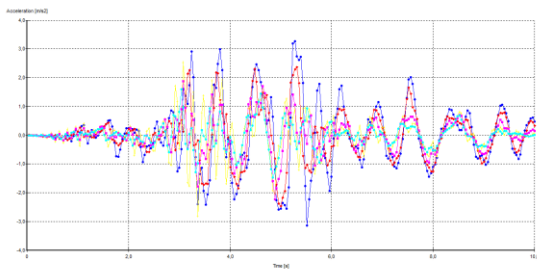
### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



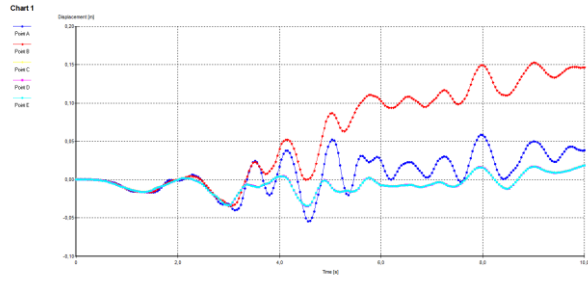
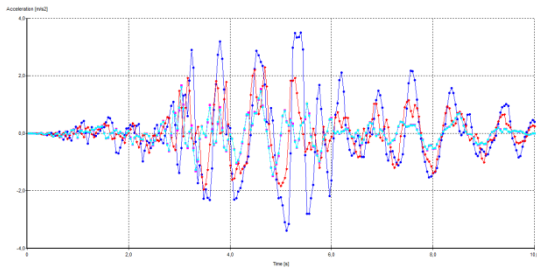
### Σενάριο 3°



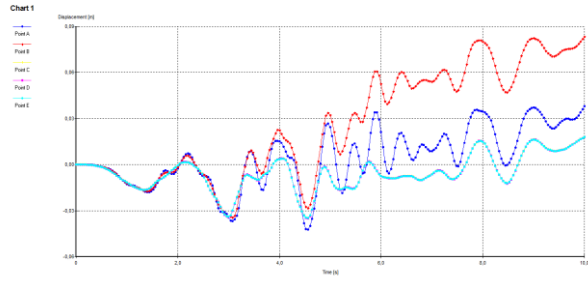
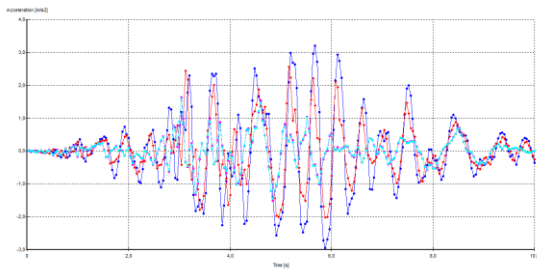
### Σενάριο 4°



### Σενάριο 5°



### Σενάριο 6°

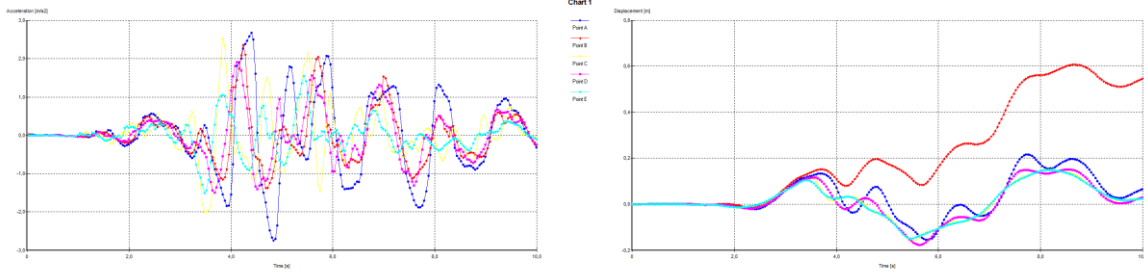




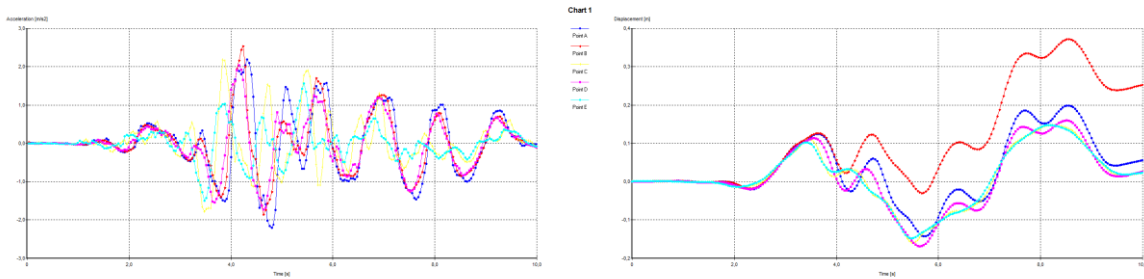
# Ανελαστικές αναλύσεις 0,16g (Λιθορριπή 2) ( Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης- Χρονοϊστορίες μετατόπισης)

## Chalfant

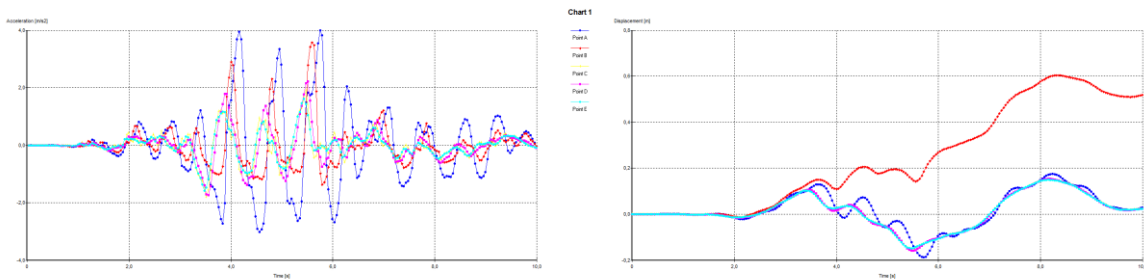
### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



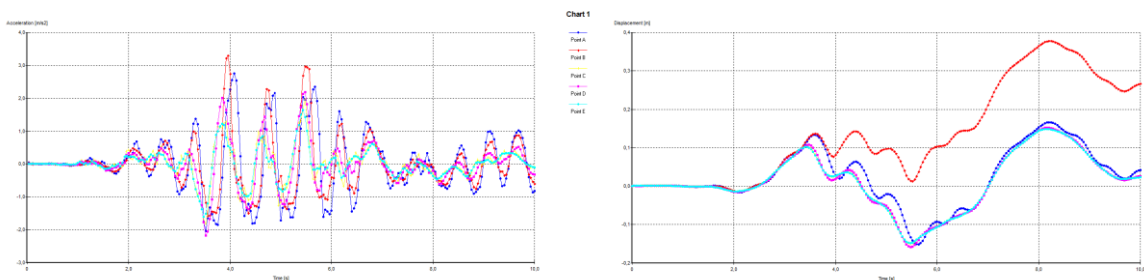
### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



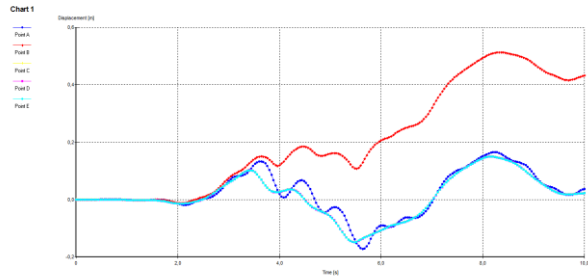
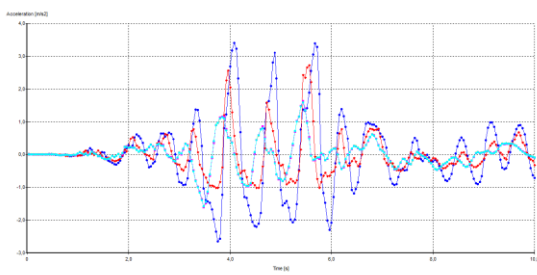
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



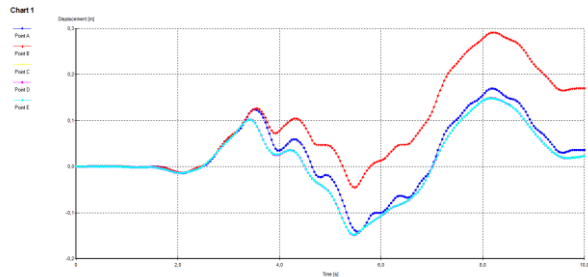
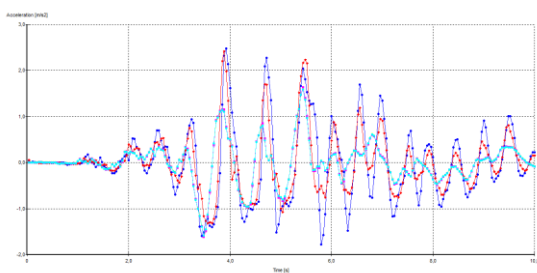
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5<sup>ο</sup>

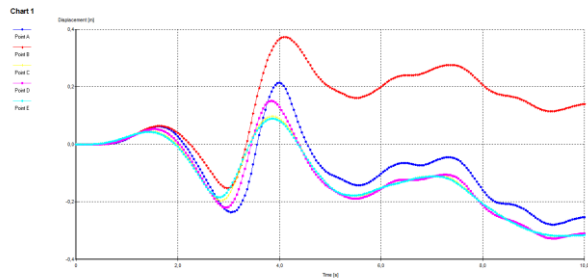
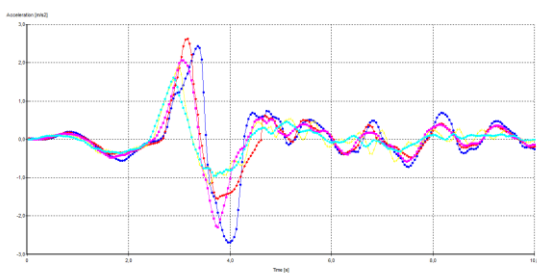


## Σενάριο 6<sup>ο</sup>

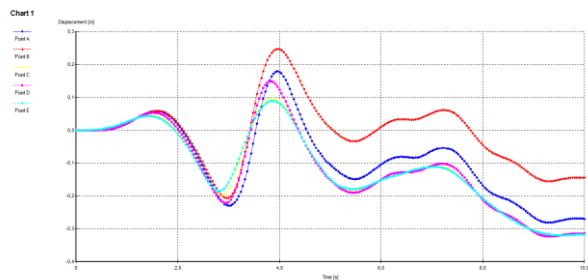
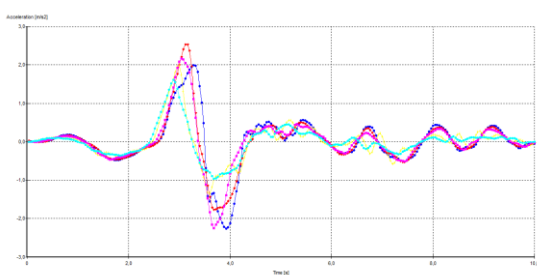


## Erzincan

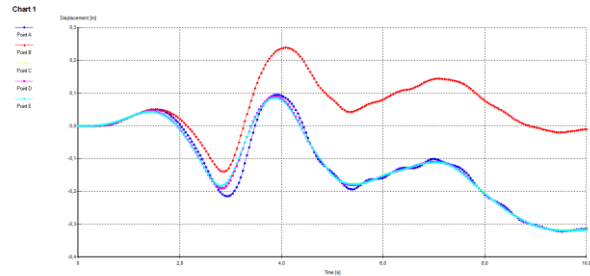
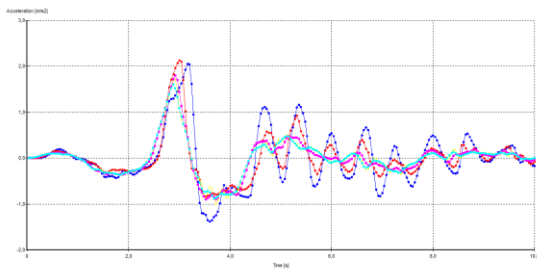
### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



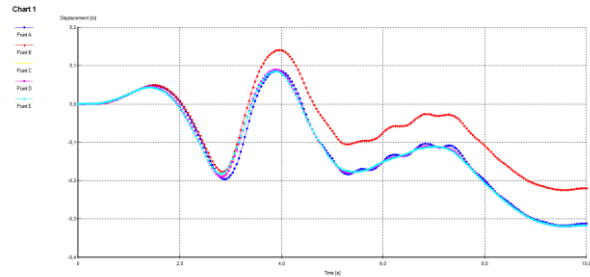
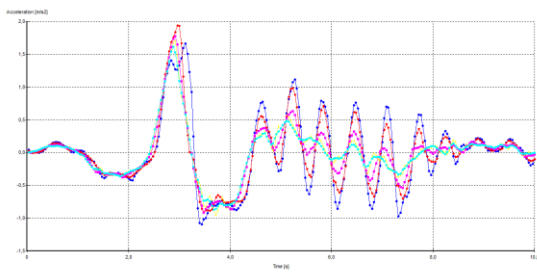
### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



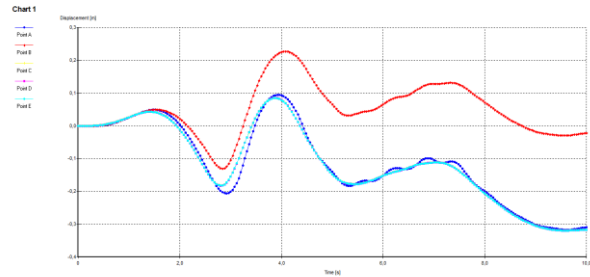
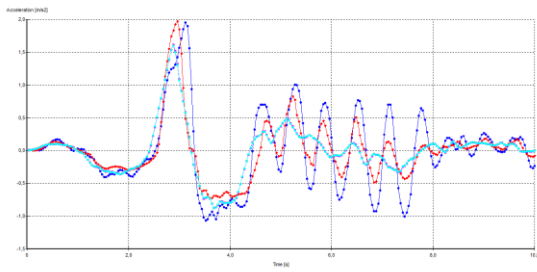
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



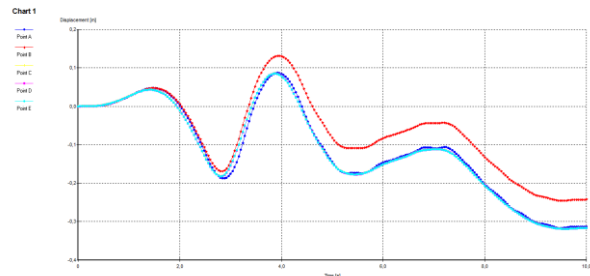
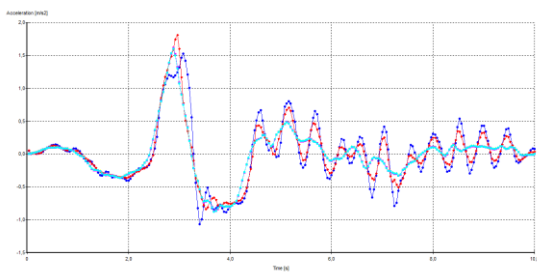
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

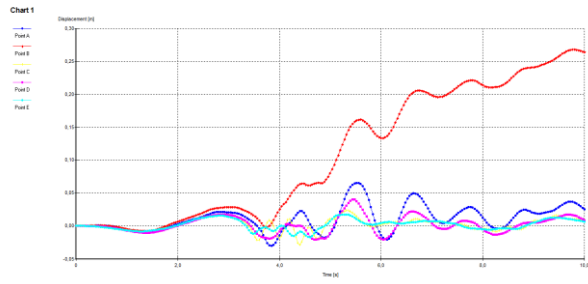
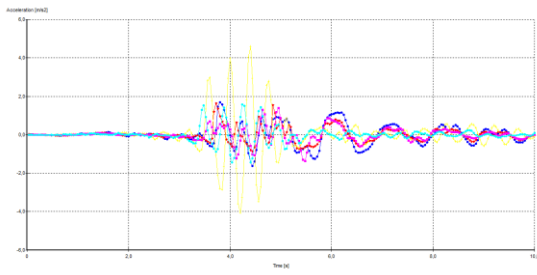


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

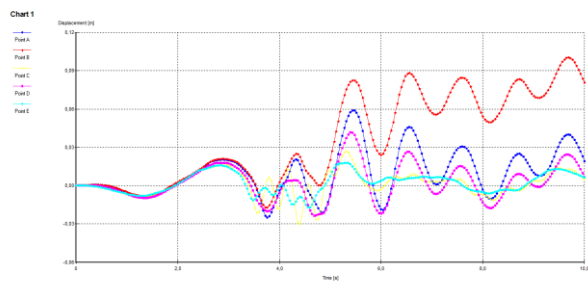
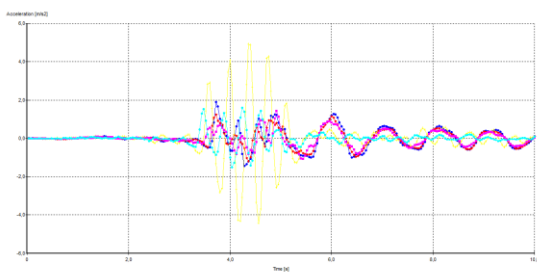


# Friuli

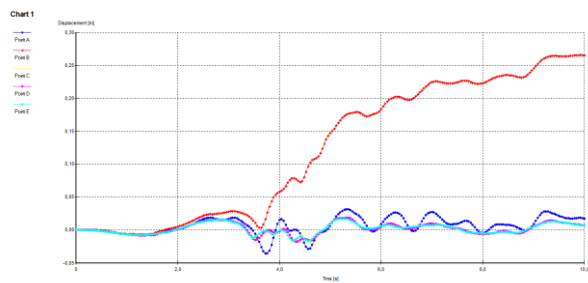
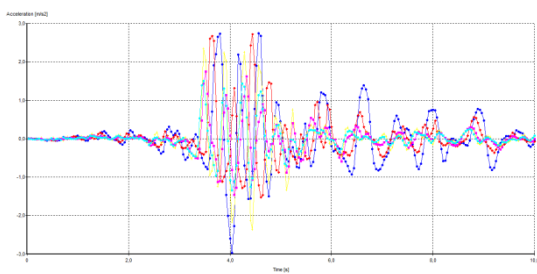
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



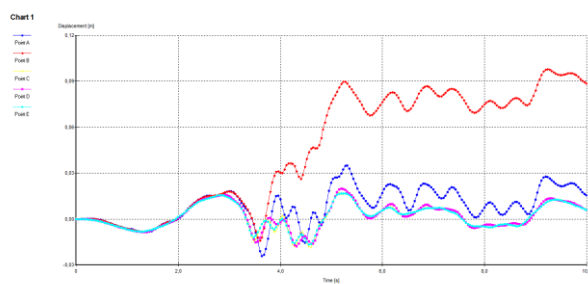
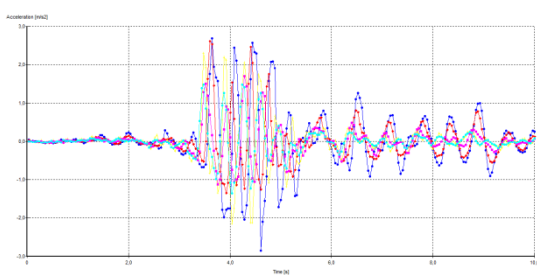
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



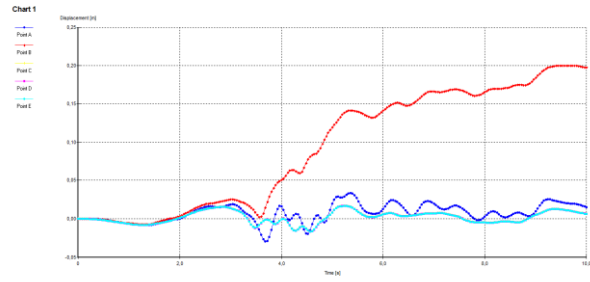
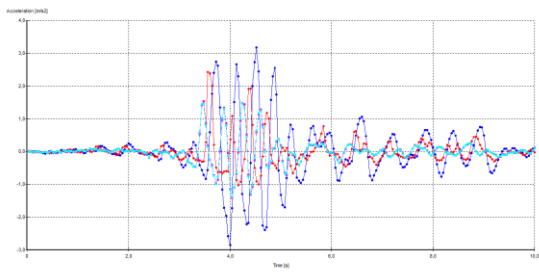
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



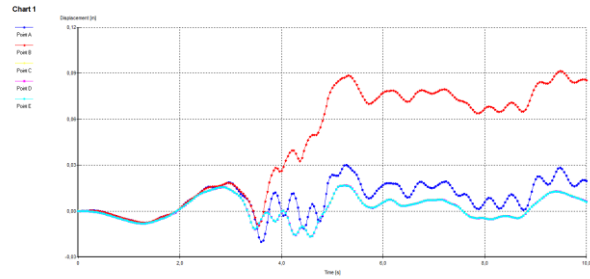
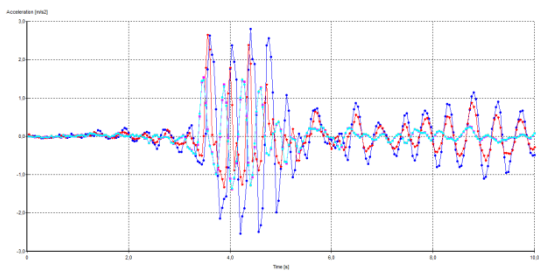
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

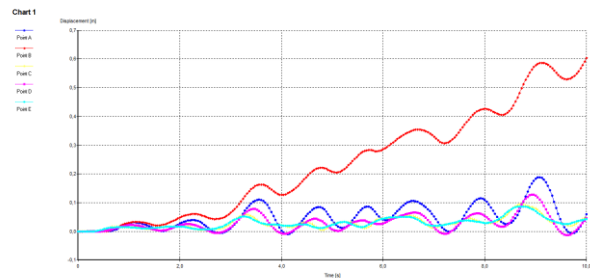
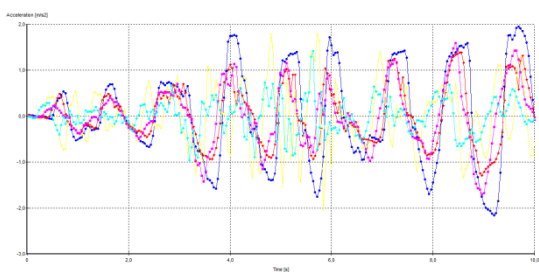


## Σενάριο 6°

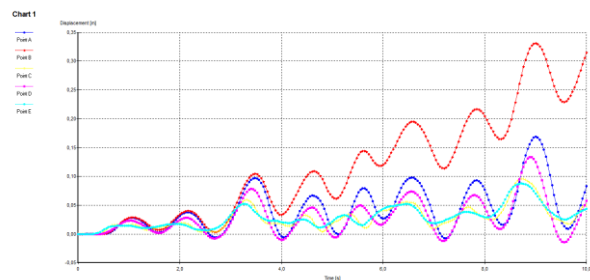
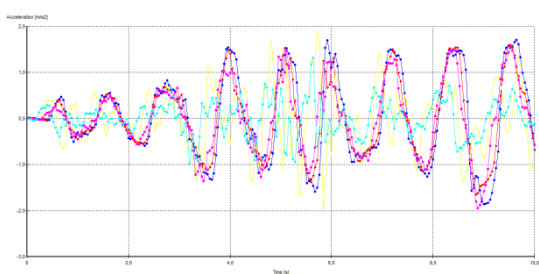


## Ionian

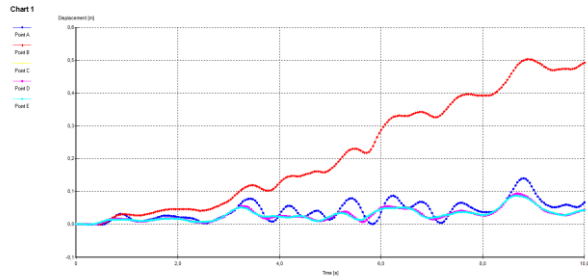
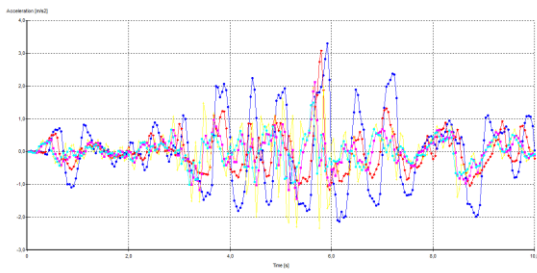
### Σενάριο 1°



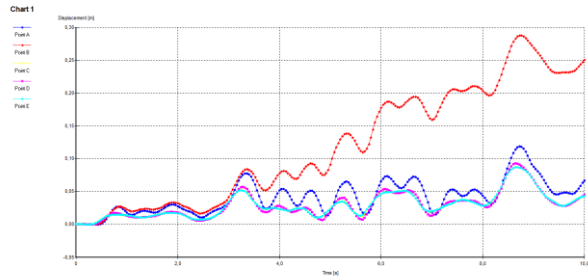
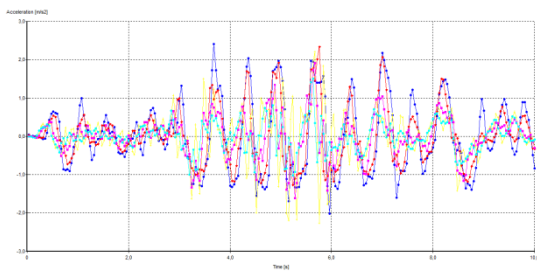
### Σενάριο 2°



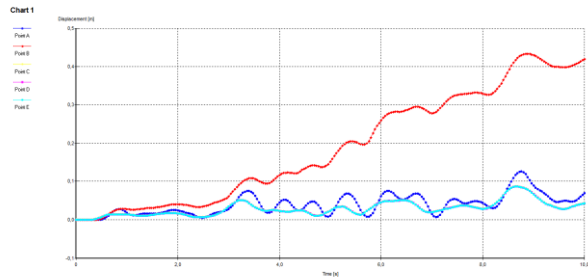
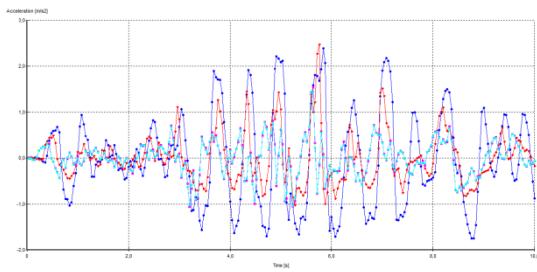
### Σενάριο 3°



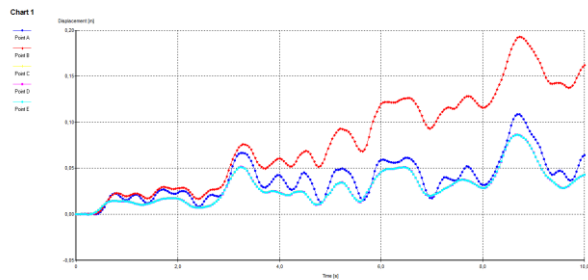
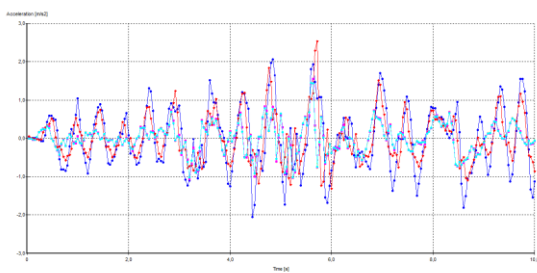
### Σενάριο 4°



### Σενάριο 5°

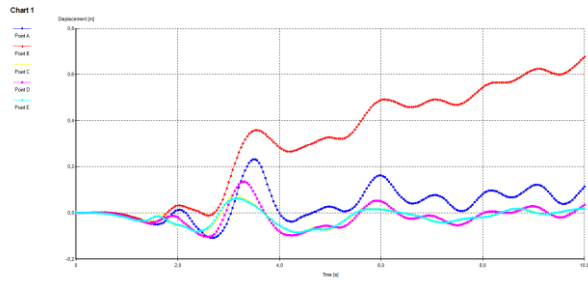
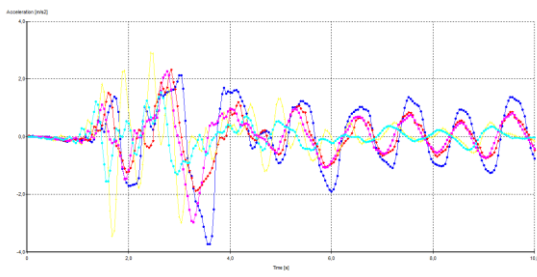


### Σενάριο 6°

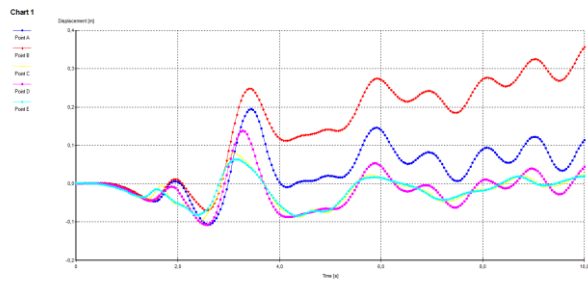
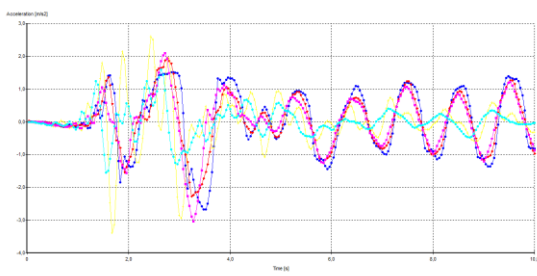


# Καλαματα

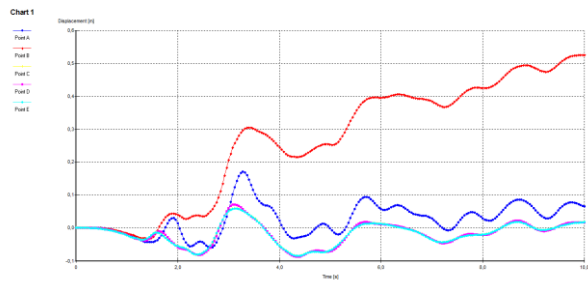
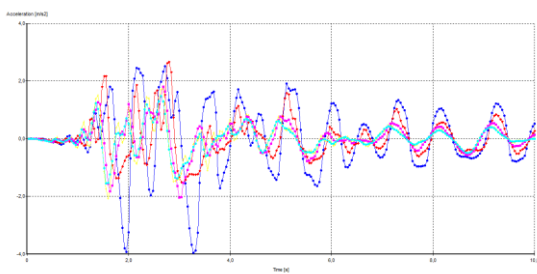
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



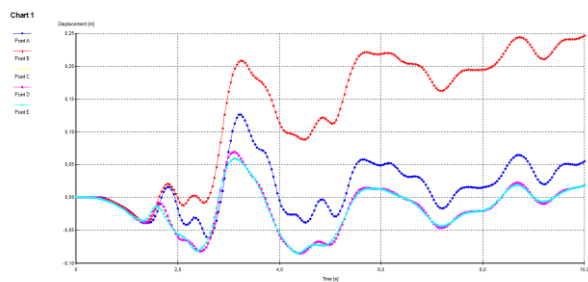
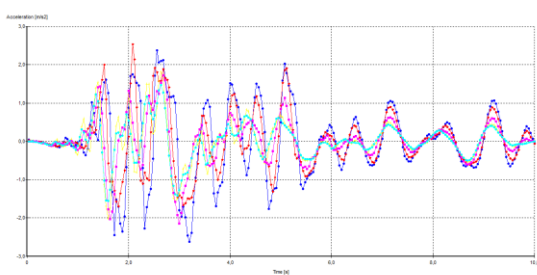
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



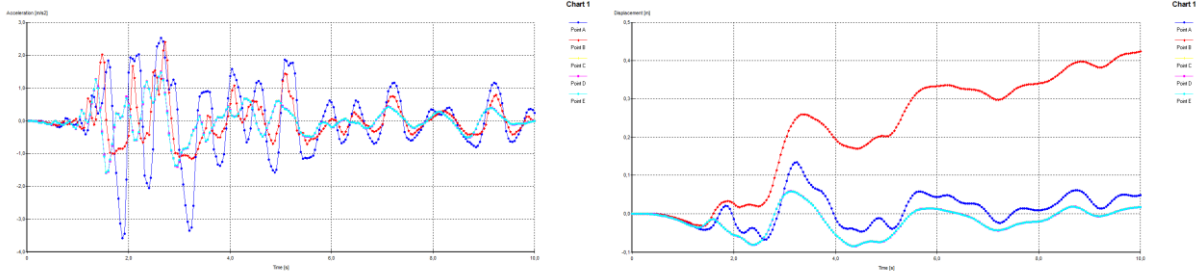
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



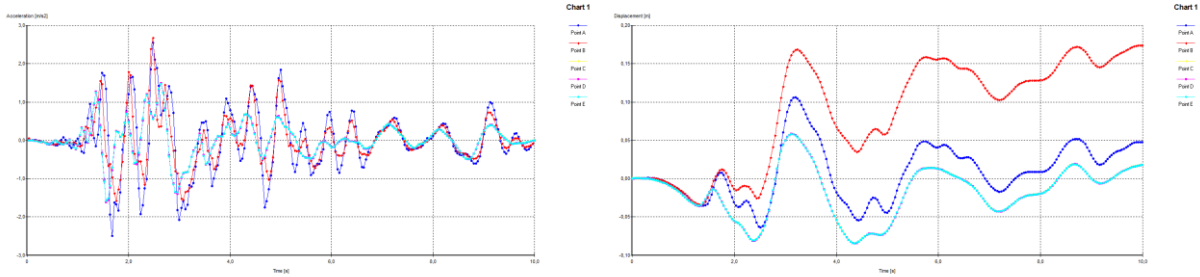
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5°

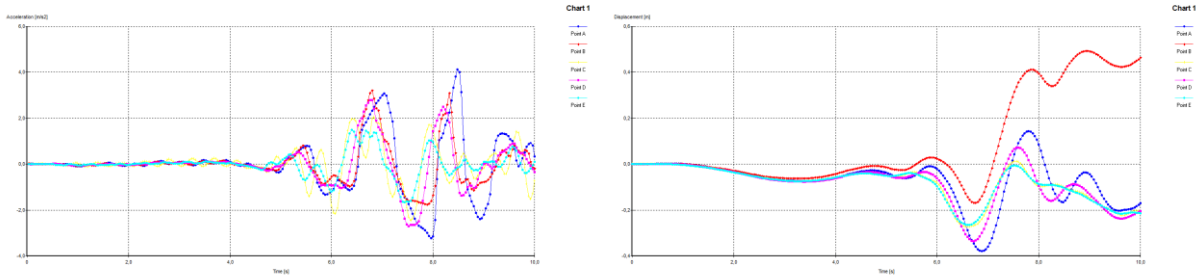


### Σενάριο 6°

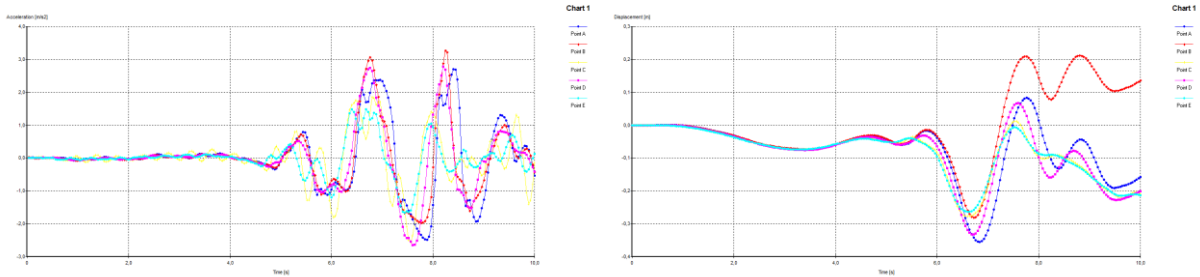


## Montenegro

### Σενάριο 1°

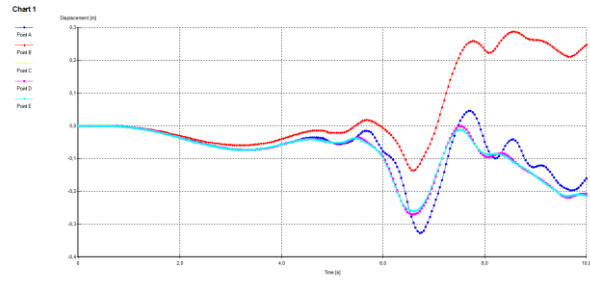
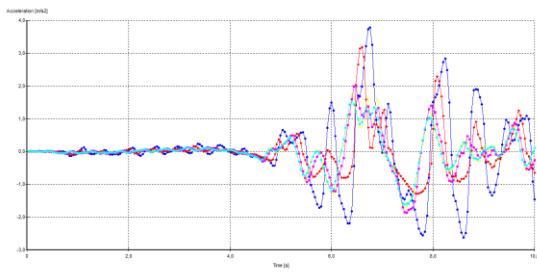


### Σενάριο 2°

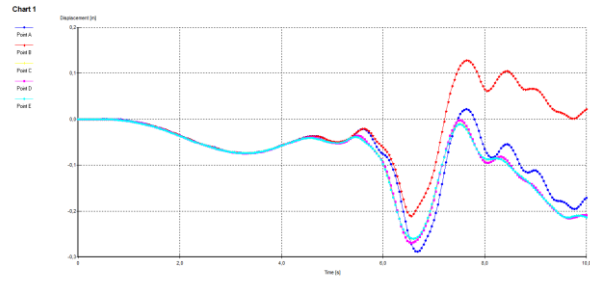
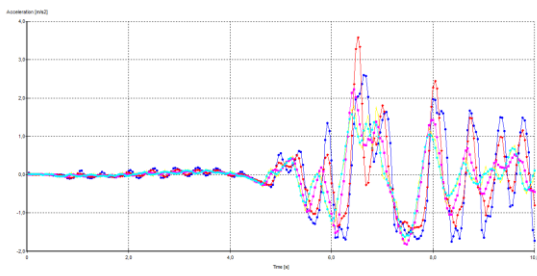




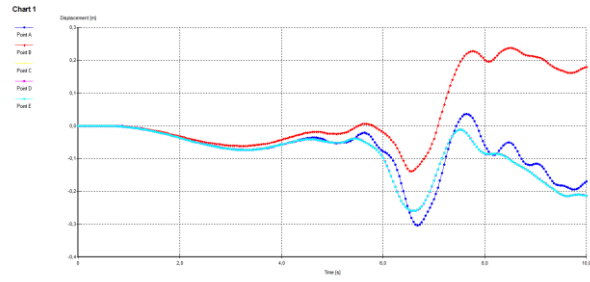
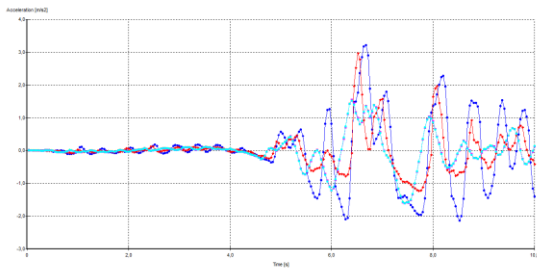
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



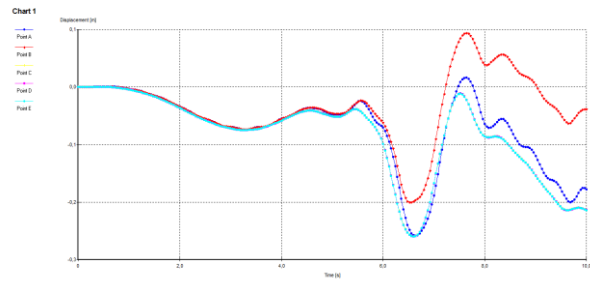
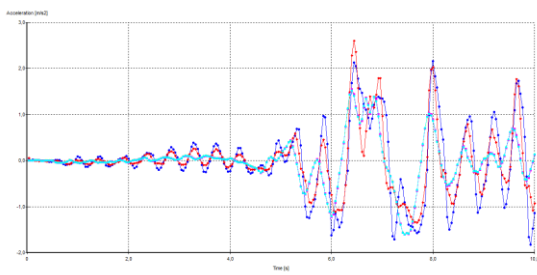
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

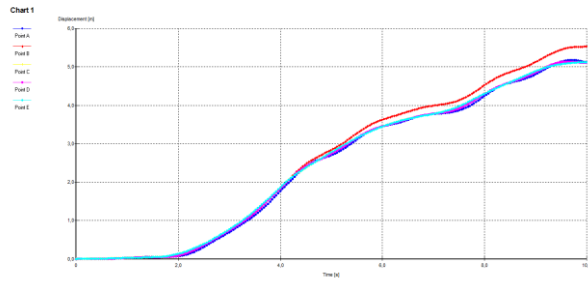
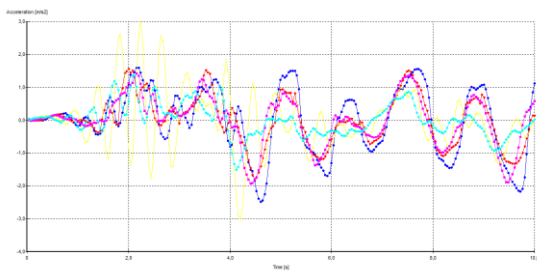


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

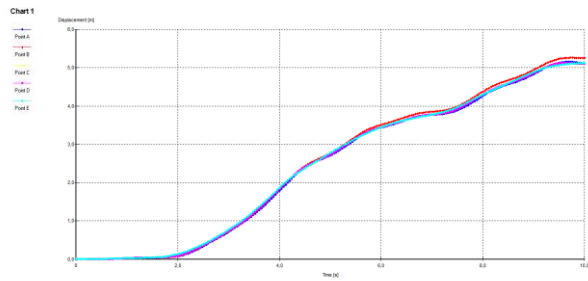
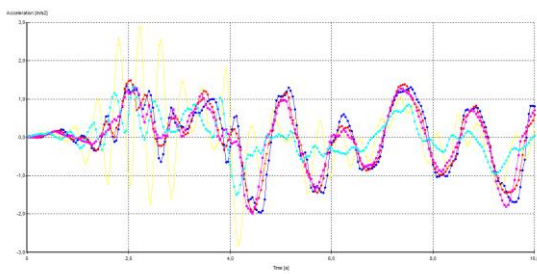


# Nsps

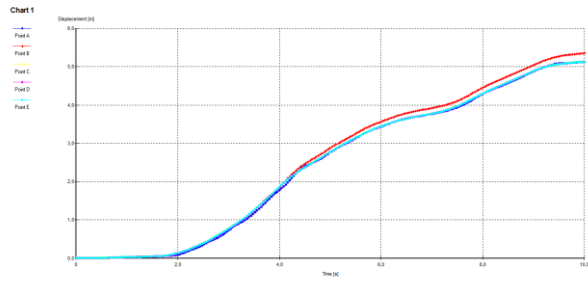
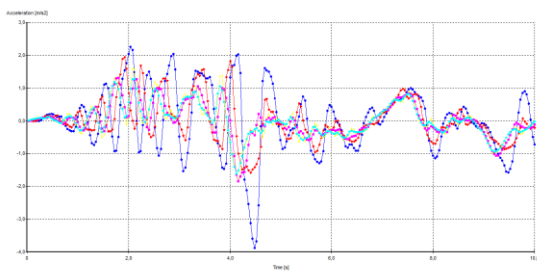
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



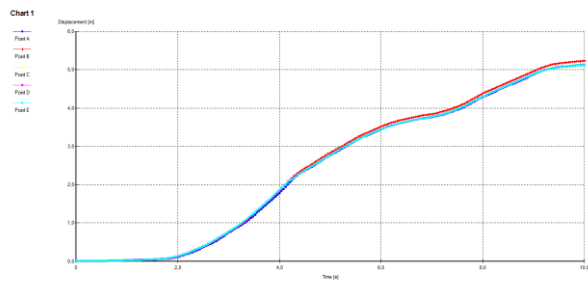
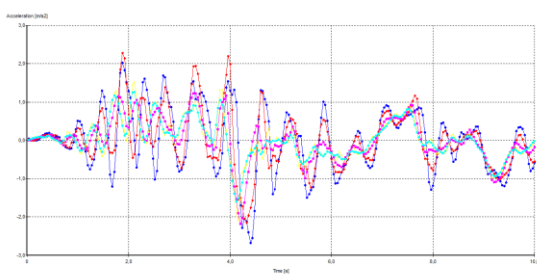
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



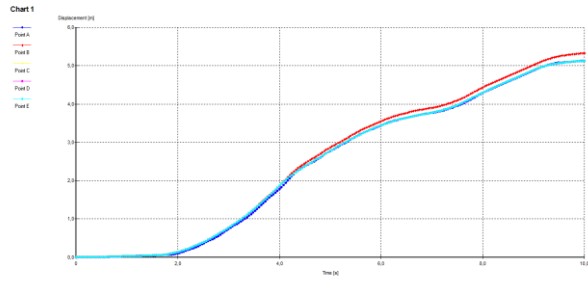
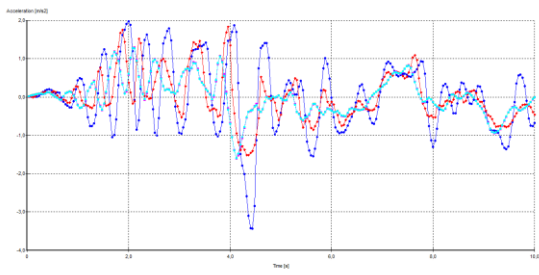
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



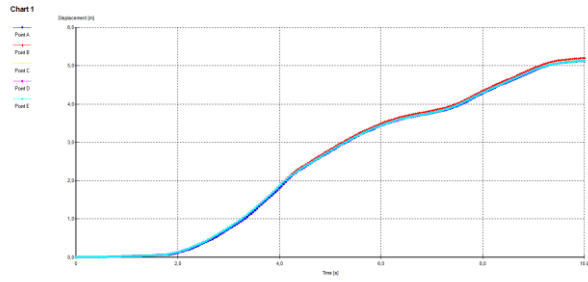
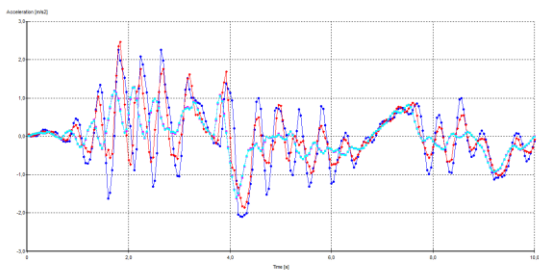
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

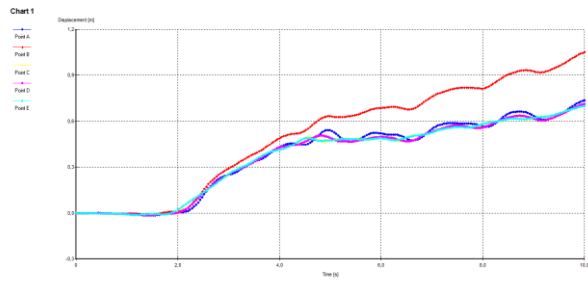
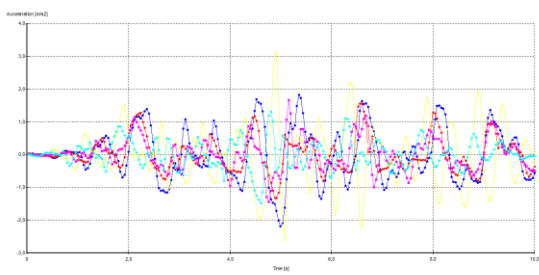


## Σενάριο 6°

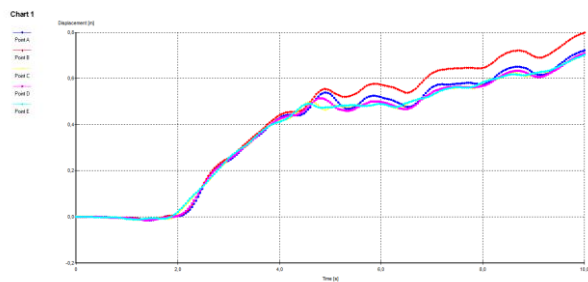
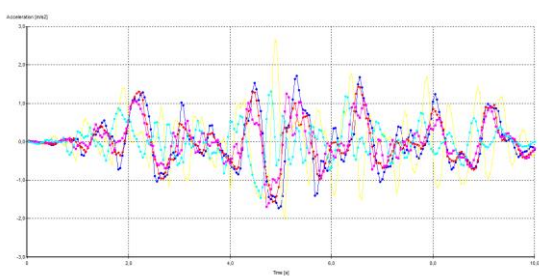


## Parkfield 11 km

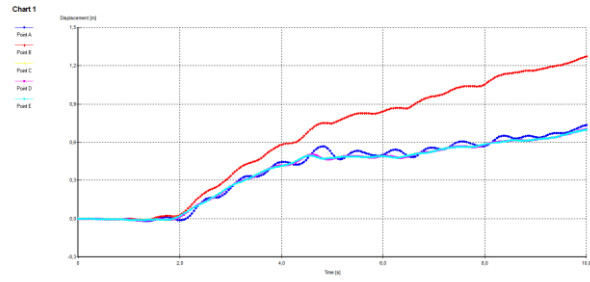
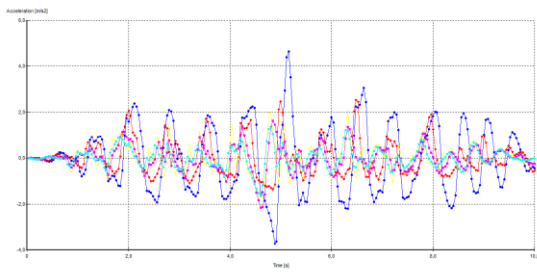
### Σενάριο 1°



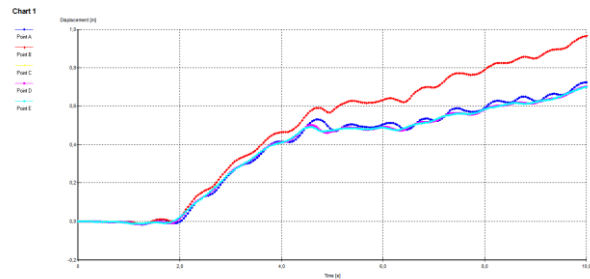
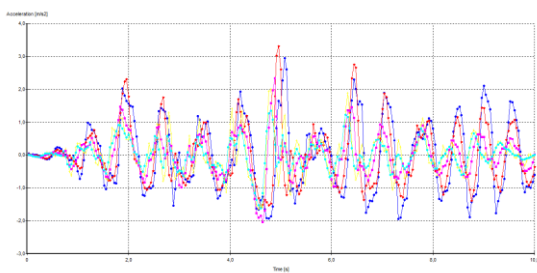
### Σενάριο 2°



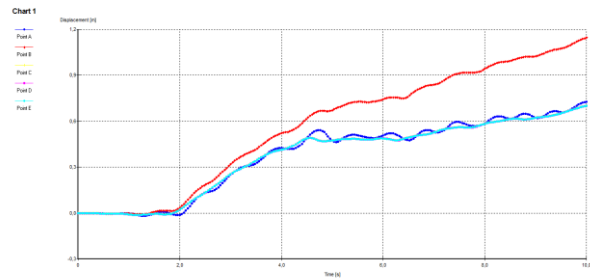
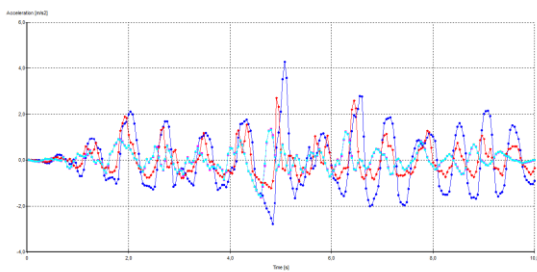
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



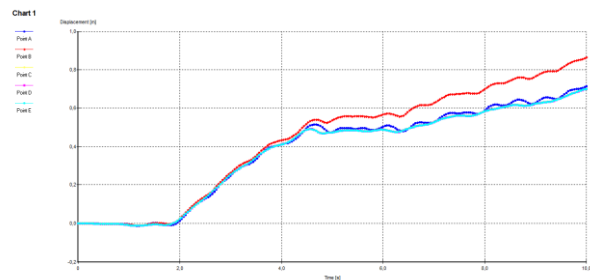
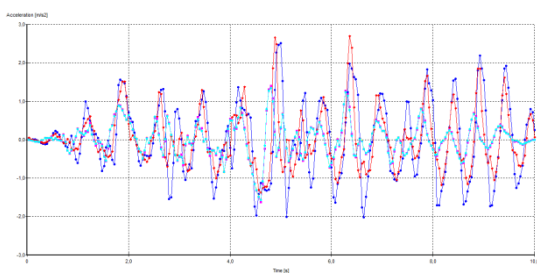
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

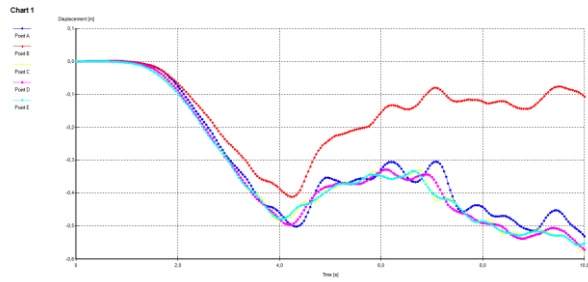
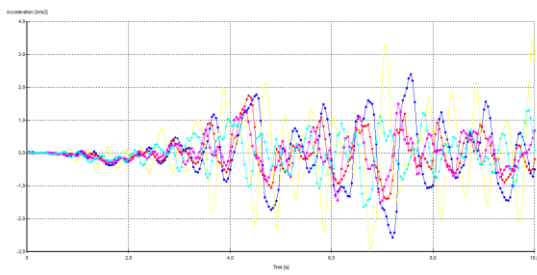


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

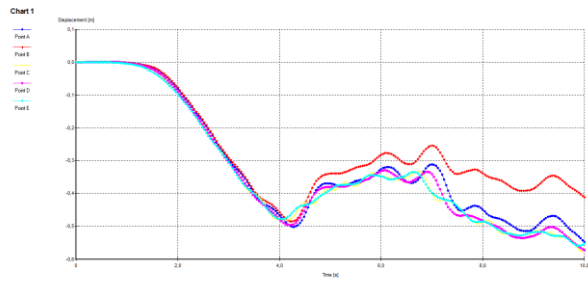
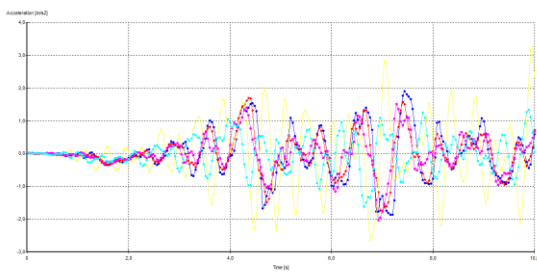


# Parkfield 14 km

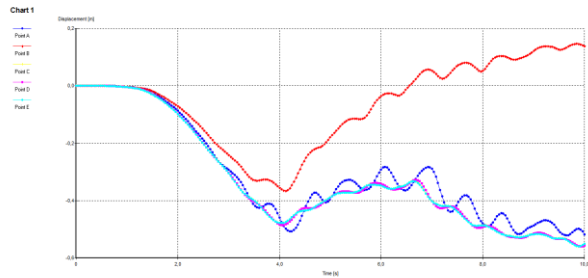
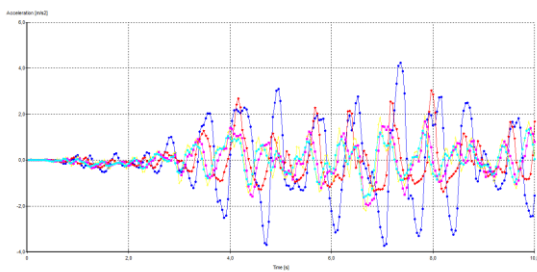
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



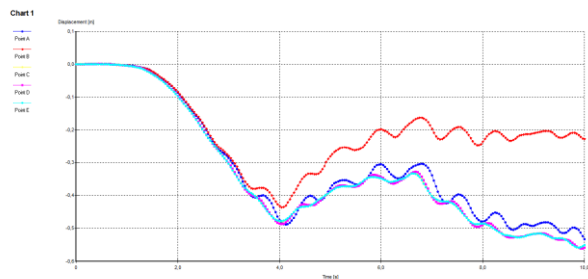
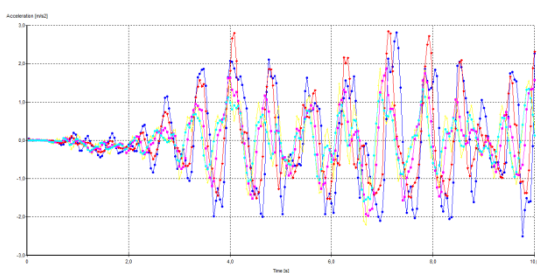
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



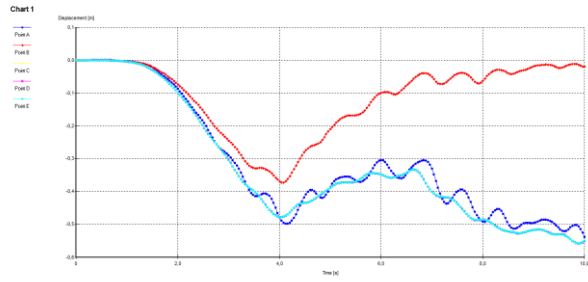
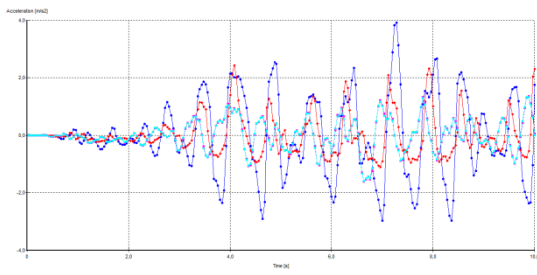
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



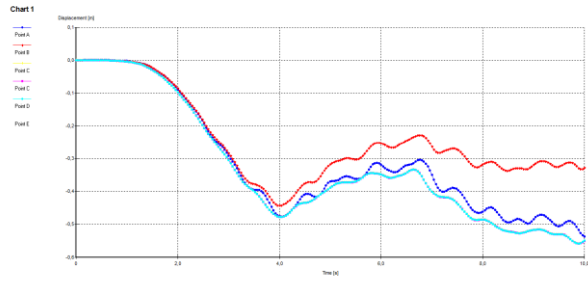
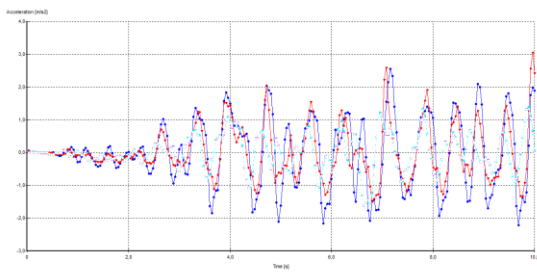
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5°

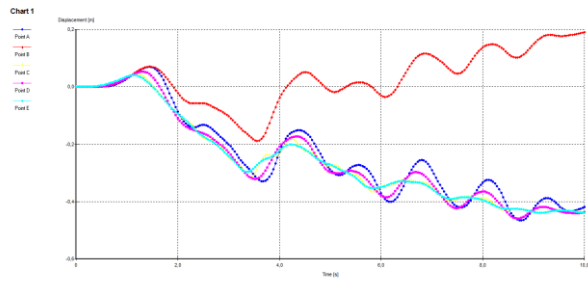
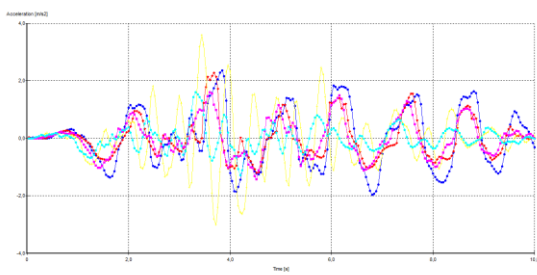


### Σενάριο 6°

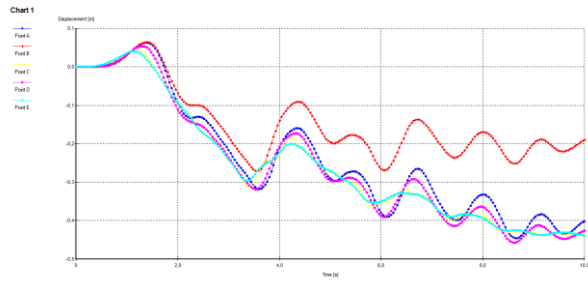
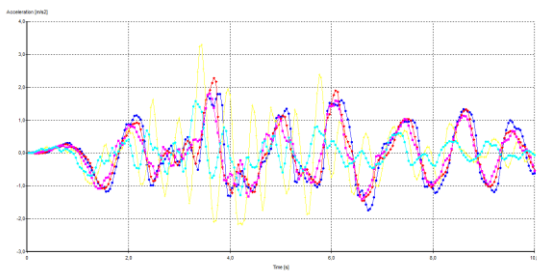


## Parkfield 20 km

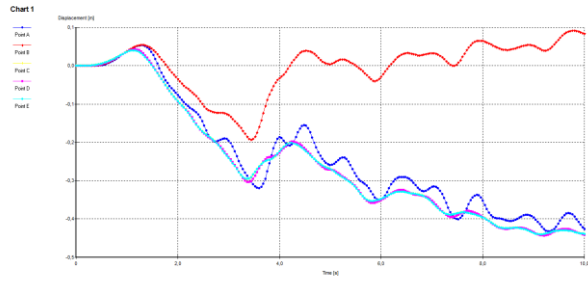
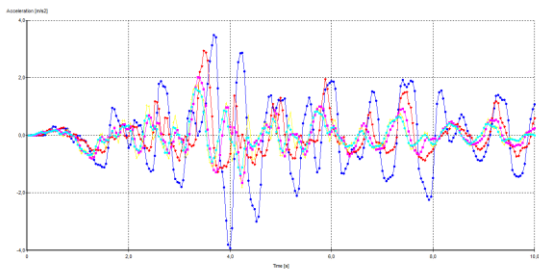
### Σενάριο 1°



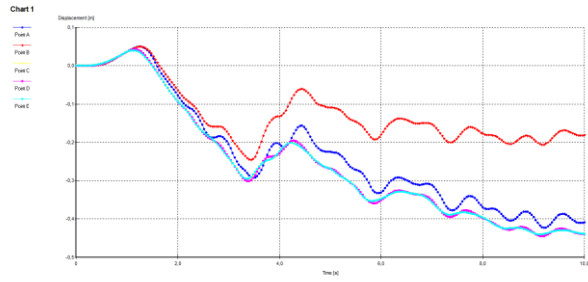
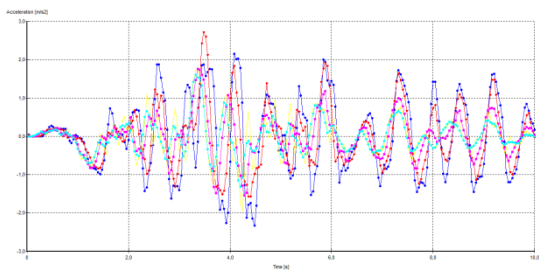
### Σενάριο 2°



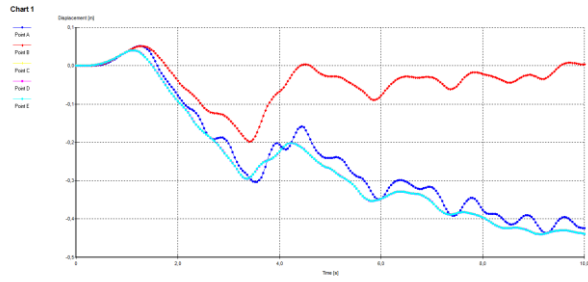
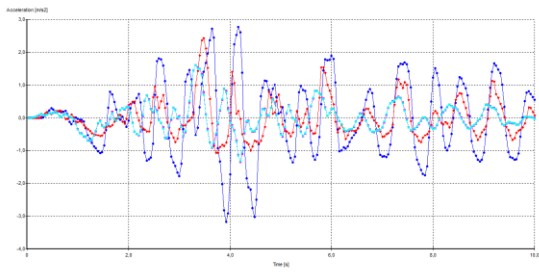
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



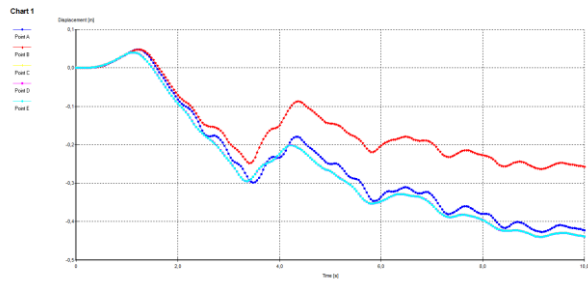
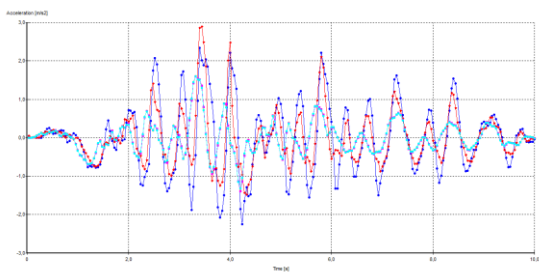
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

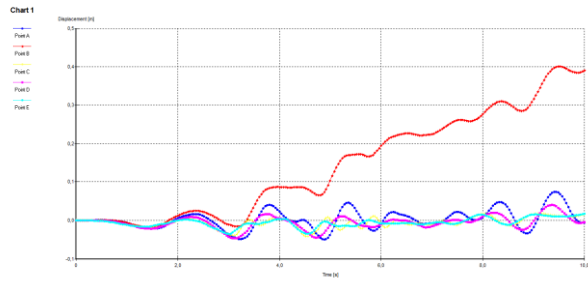
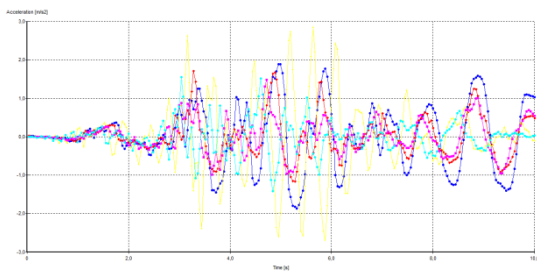


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

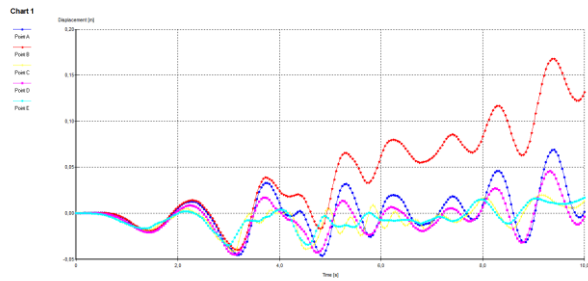
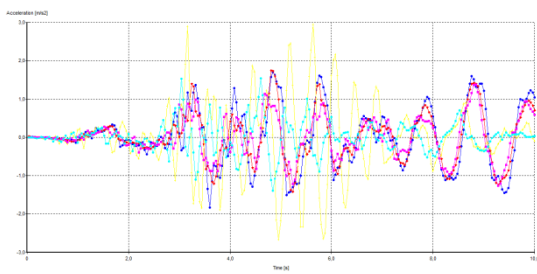


# Whittier

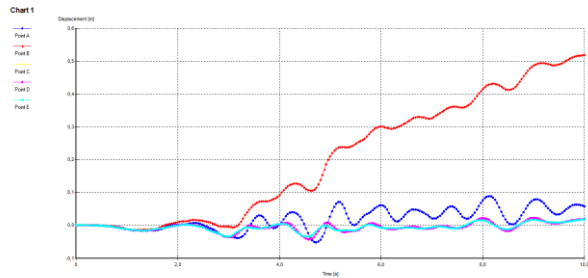
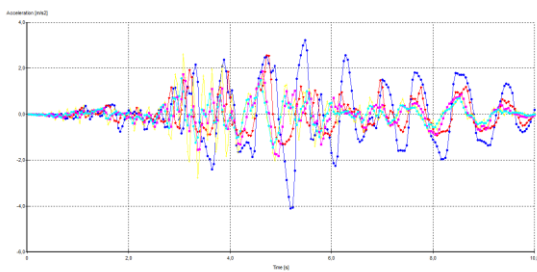
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



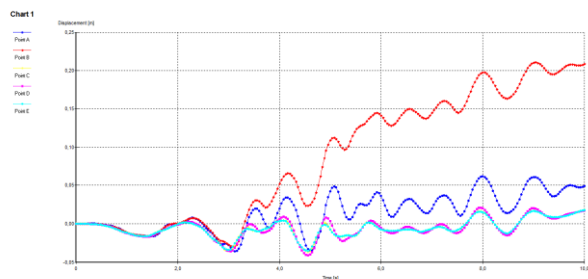
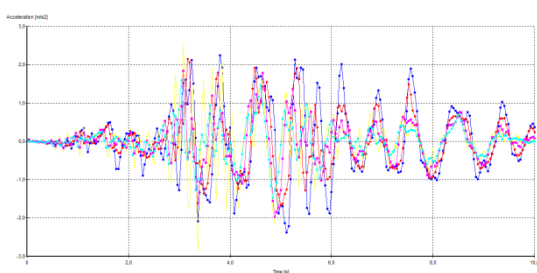
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



## Σενάριο 3<sup>ο</sup>

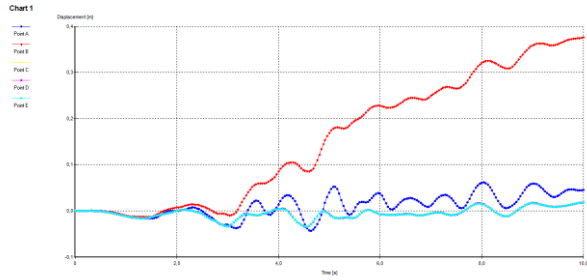
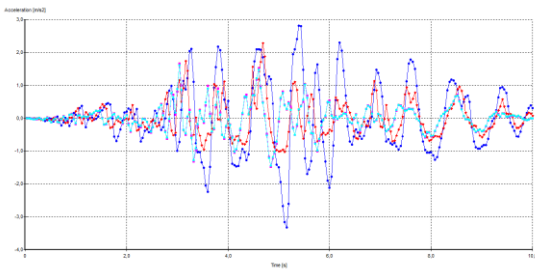


## Σενάριο 4<sup>ο</sup>

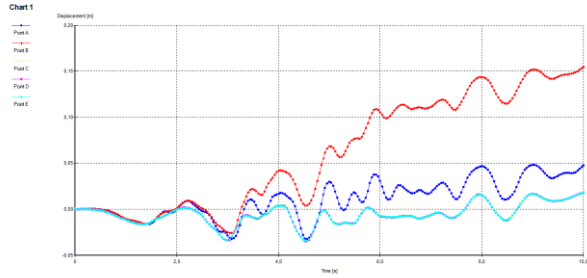
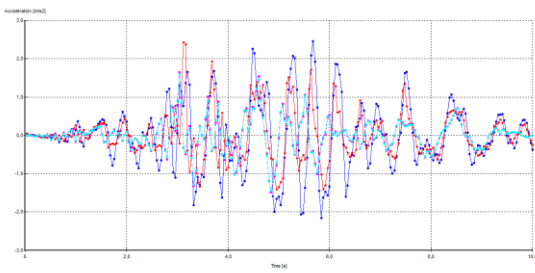




### Σενάριο 5<sup>ο</sup>



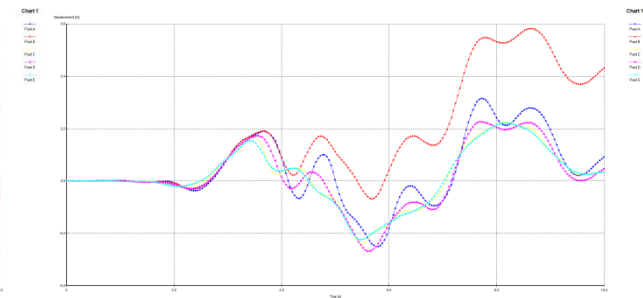
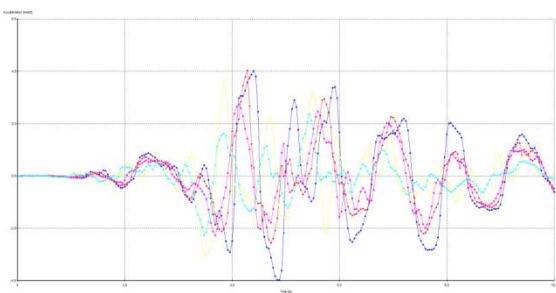
### Σενάριο 6<sup>ο</sup>



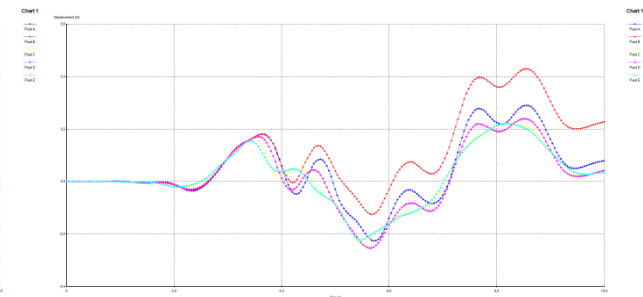
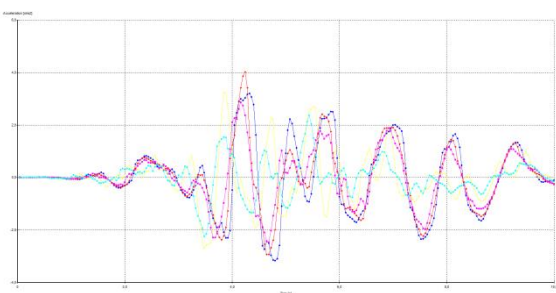
## **Ανελαστικές αναλύσεις 0,24g (Λιθορριπή 1) ( Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης- Χρονοϊστορίες μετατόπισης)**

### Chalfant

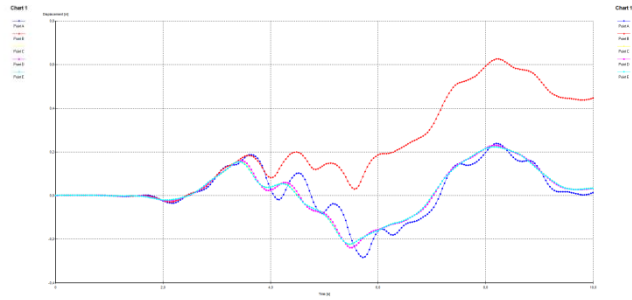
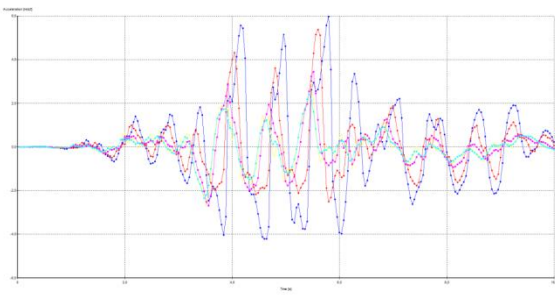
#### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



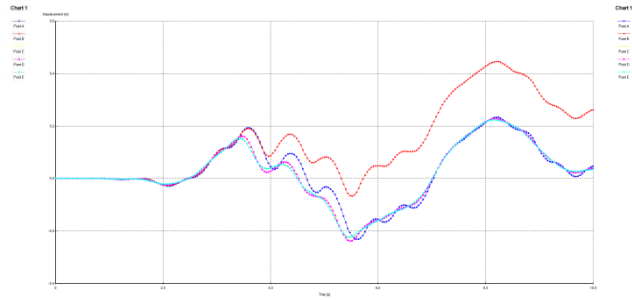
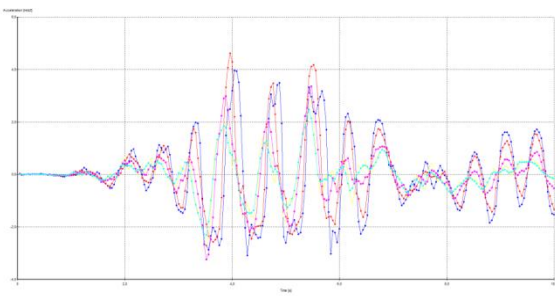
#### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



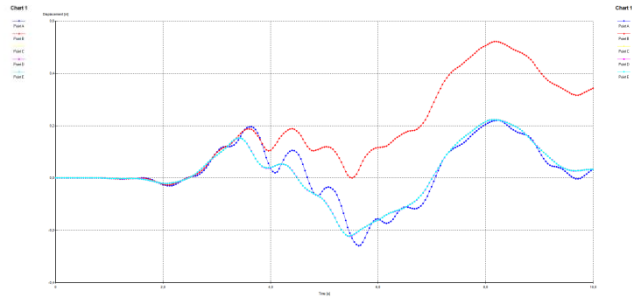
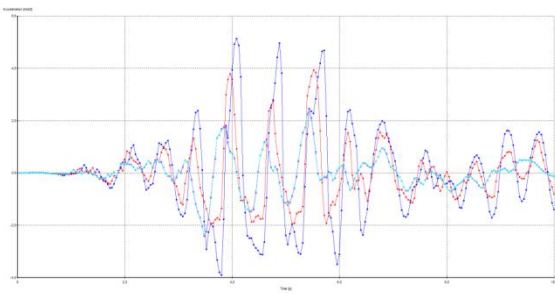
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



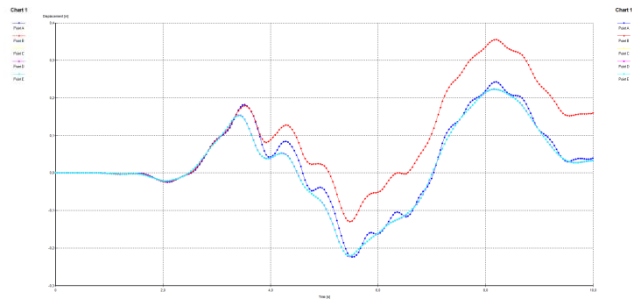
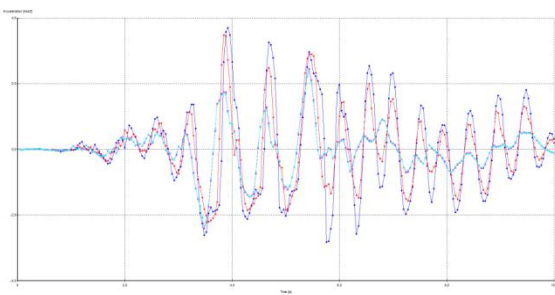
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

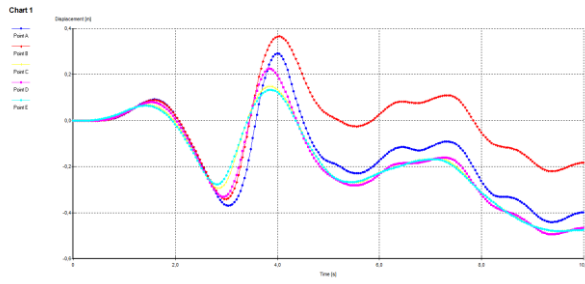
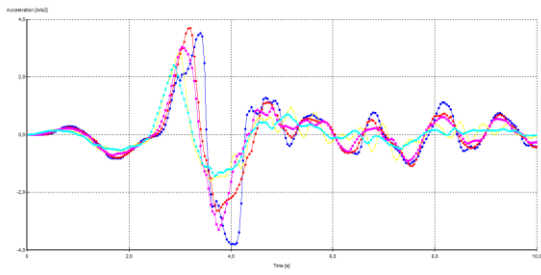


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

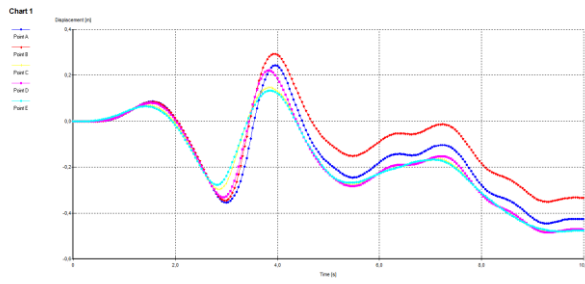
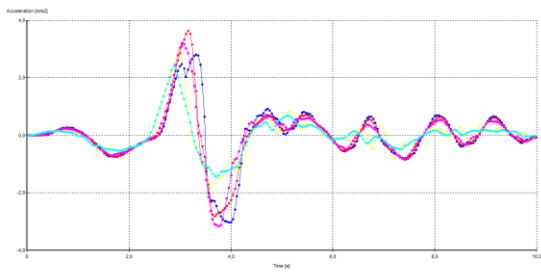


# Erzincan

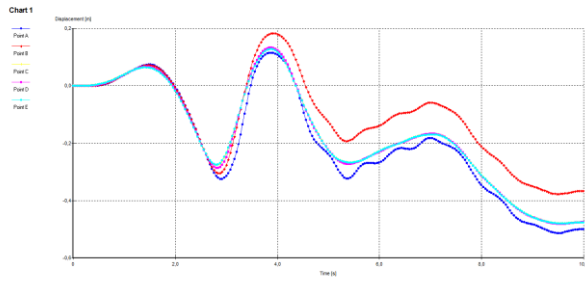
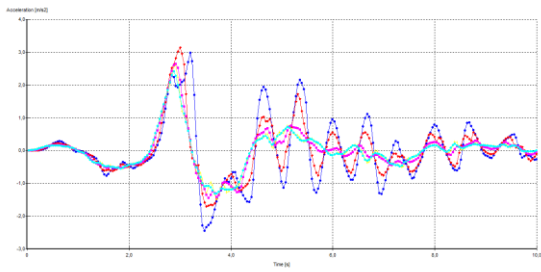
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



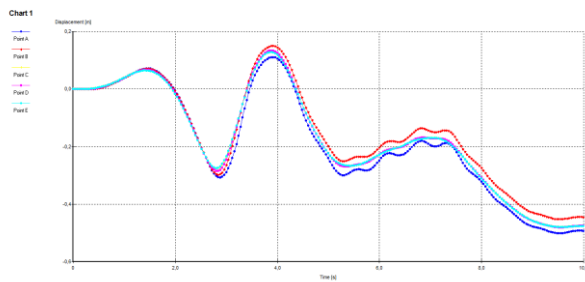
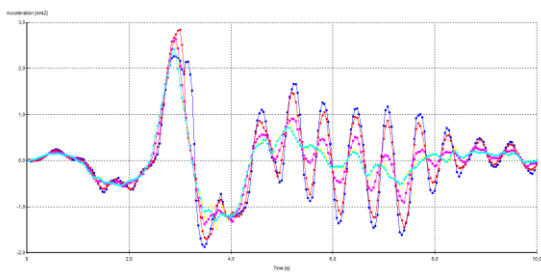
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



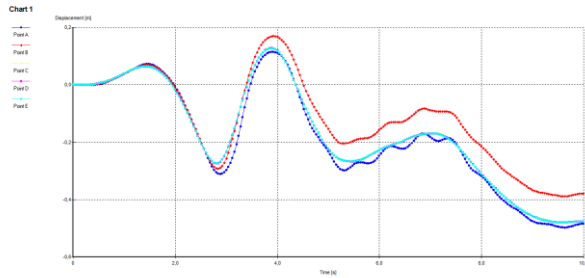
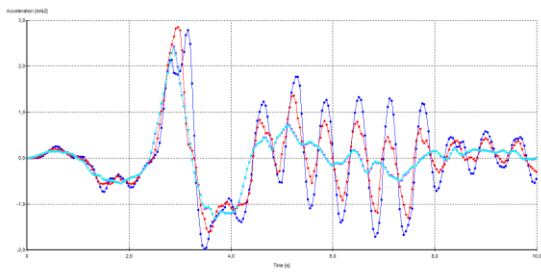
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



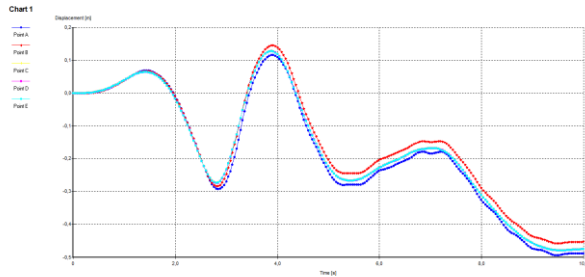
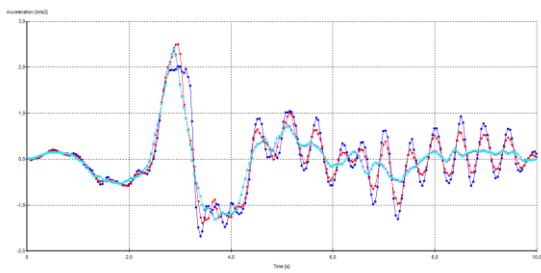
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

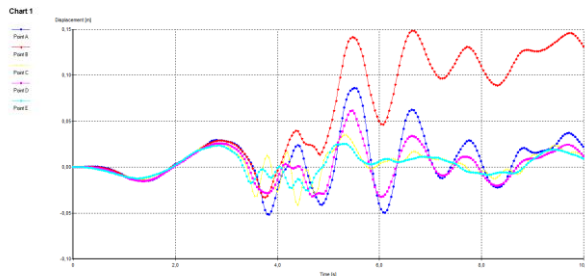
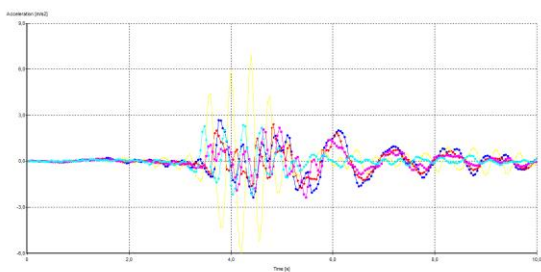


## Σενάριο 6°

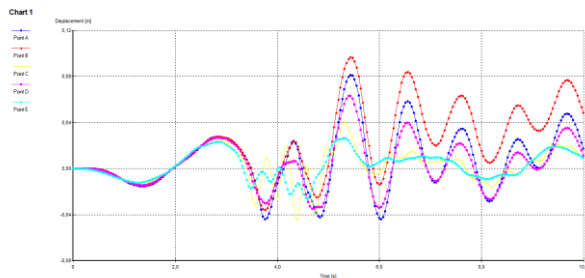
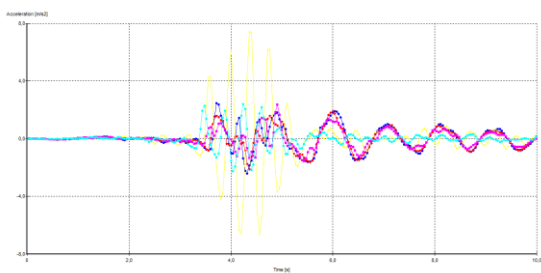


## Friuli

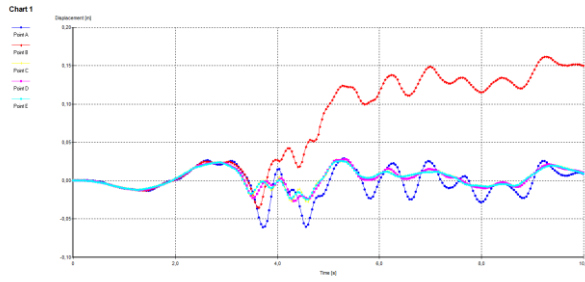
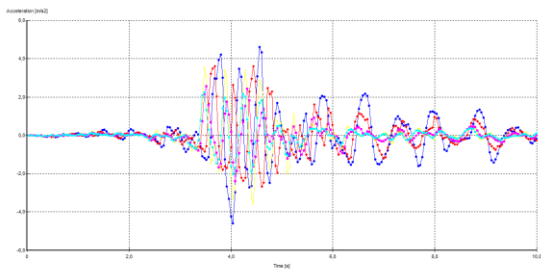
### Σενάριο 1°



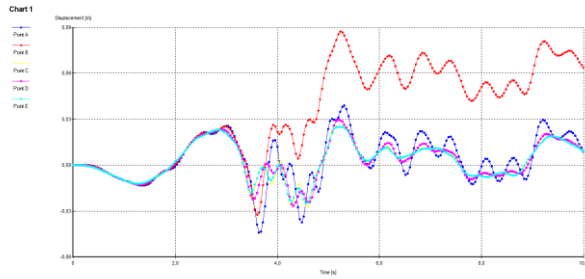
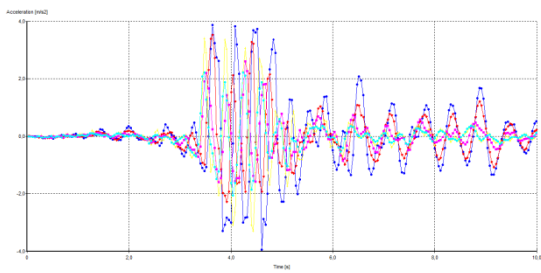
### Σενάριο 2°



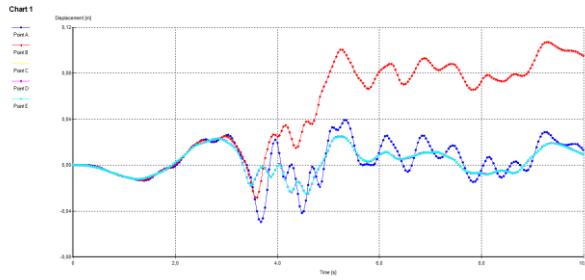
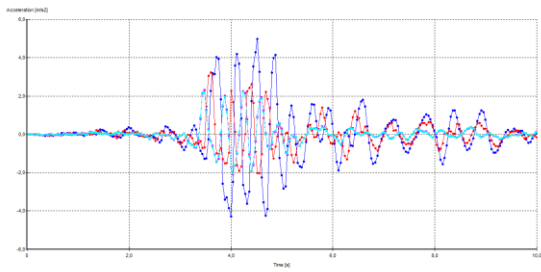
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



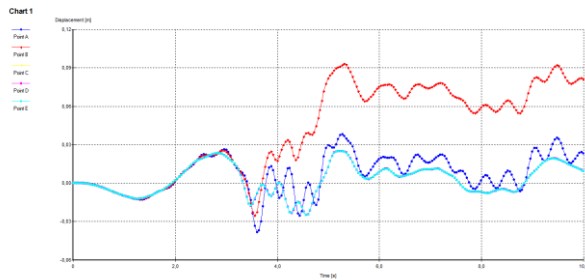
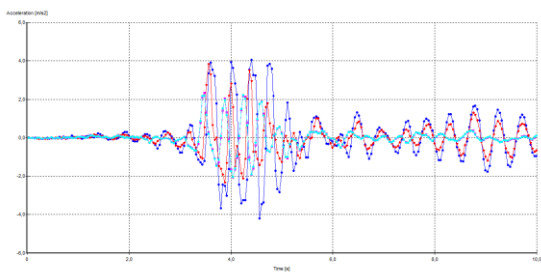
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

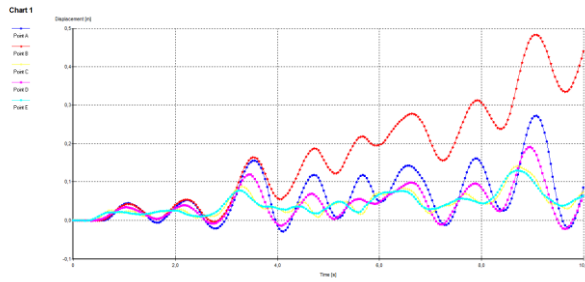
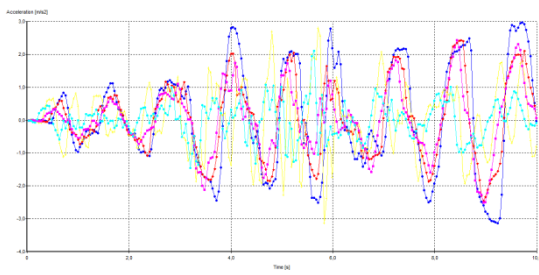


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

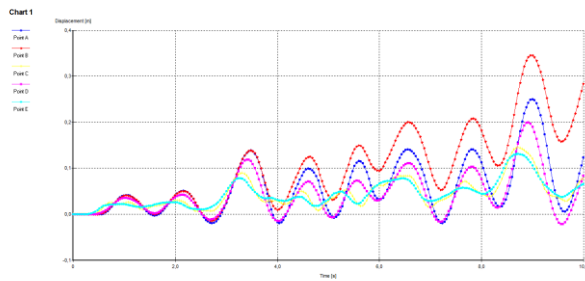
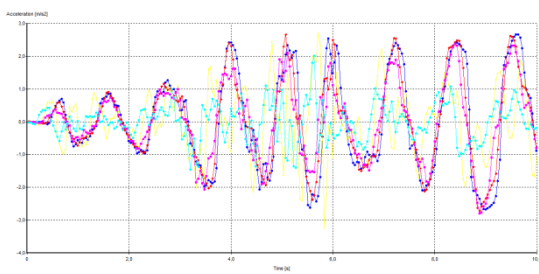


# Ionian

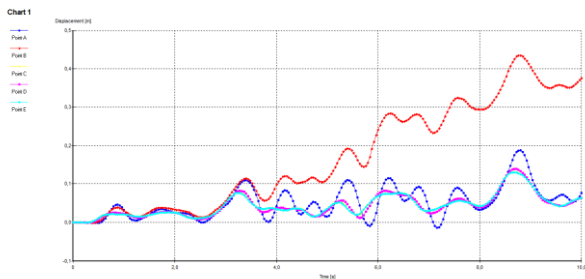
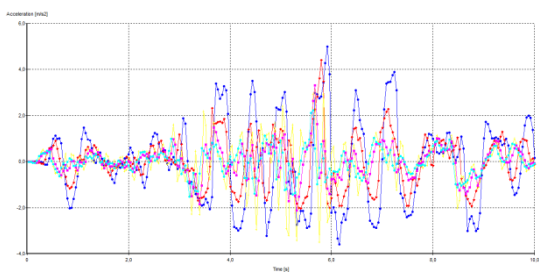
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



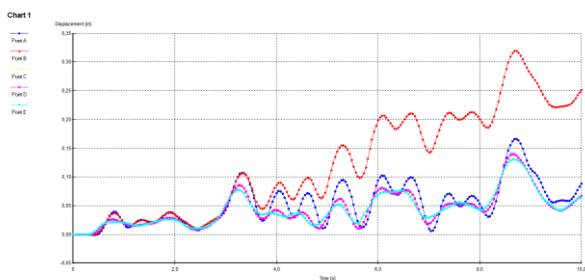
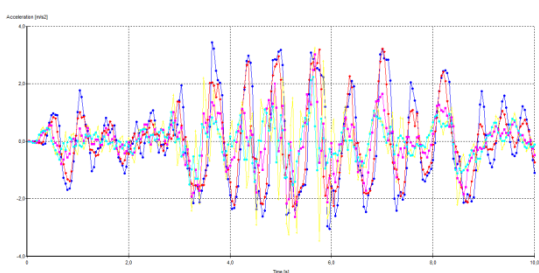
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



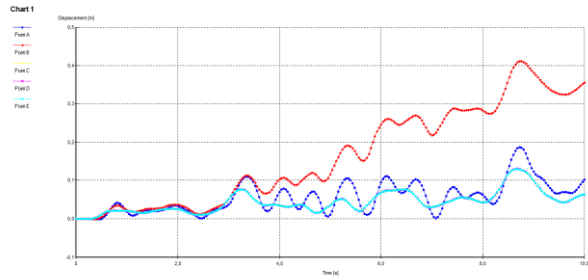
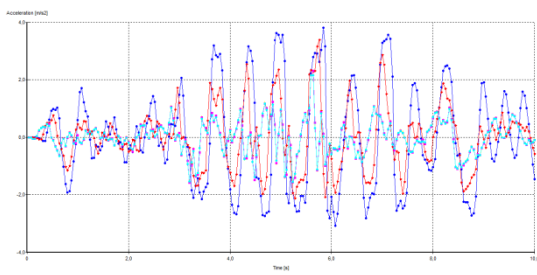
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



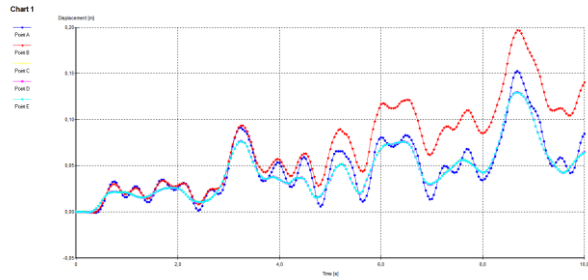
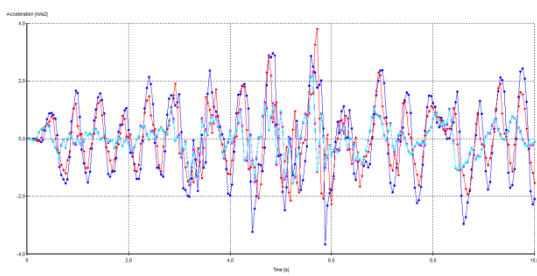
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

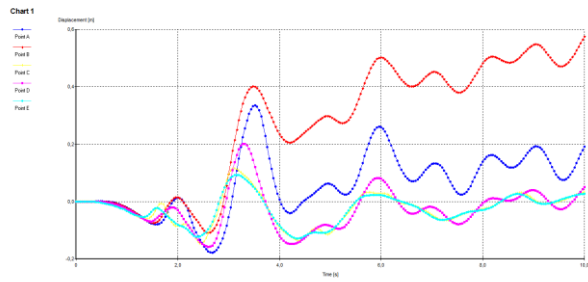
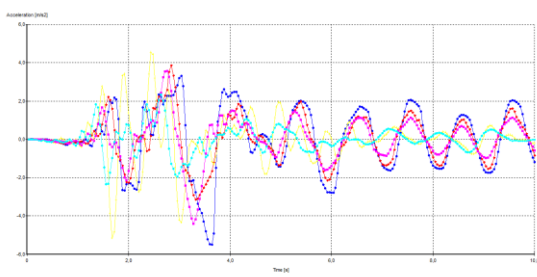


## Σενάριο 6°

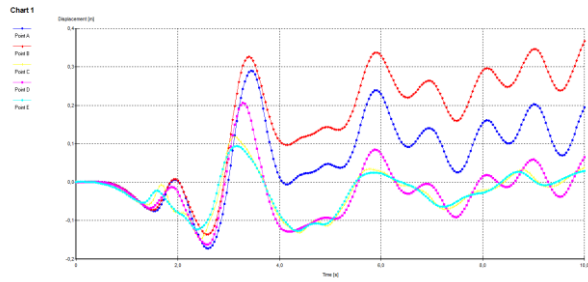
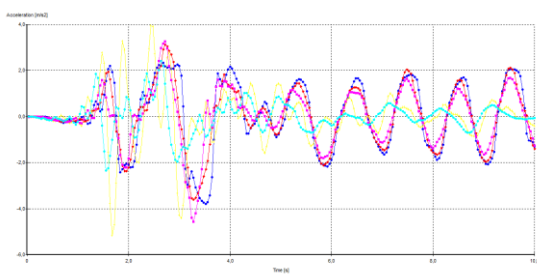


## Kalamata

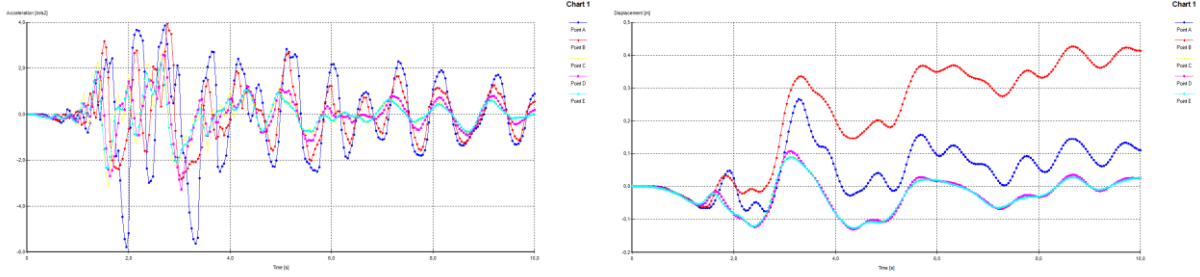
### Σενάριο 1°



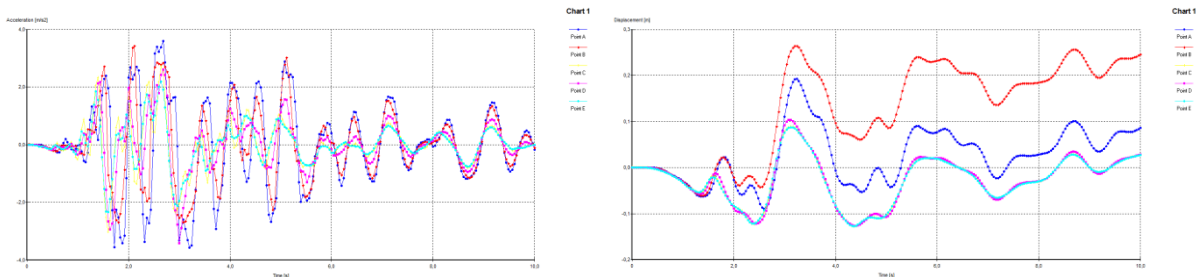
### Σενάριο 2°



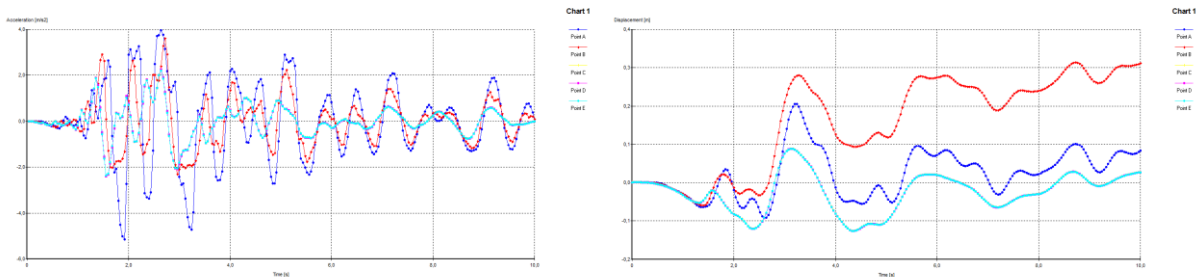
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



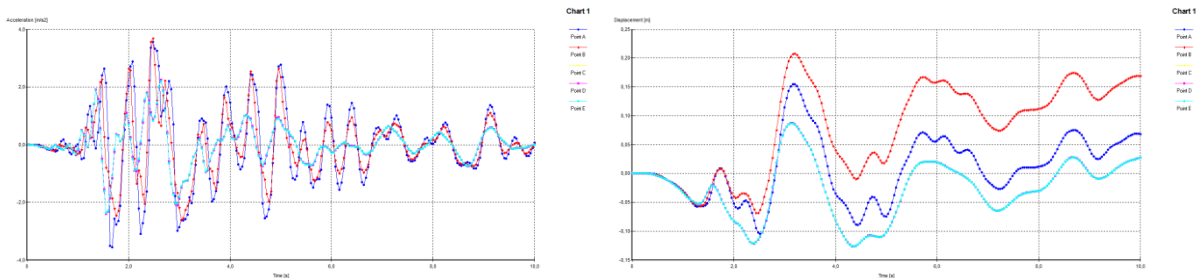
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>



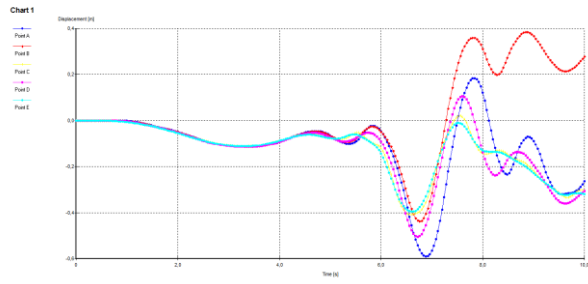
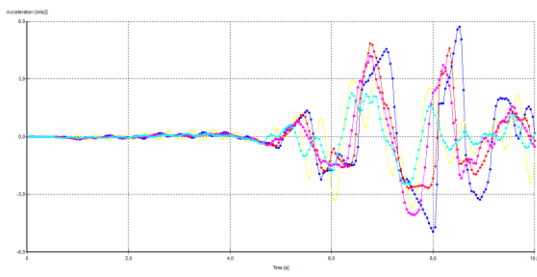
### Σενάριο 6<sup>ο</sup>



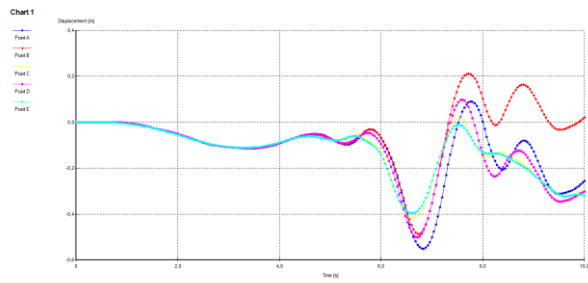
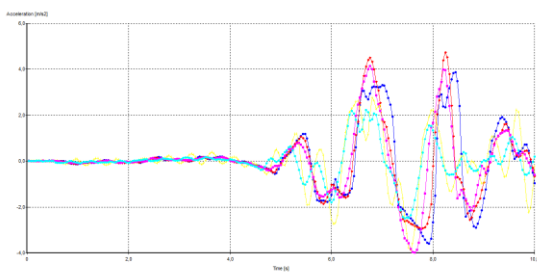


# Montenegro

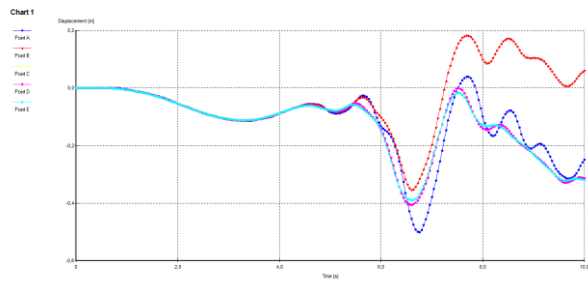
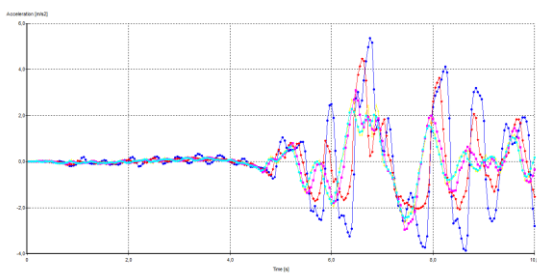
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



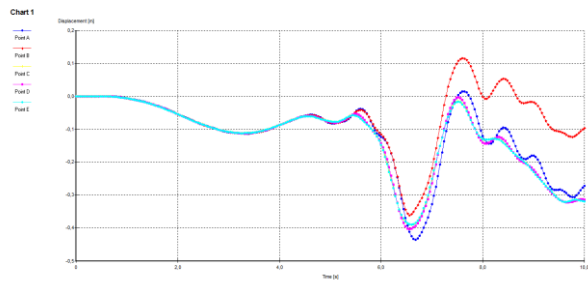
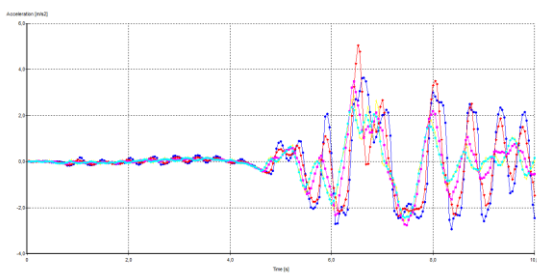
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



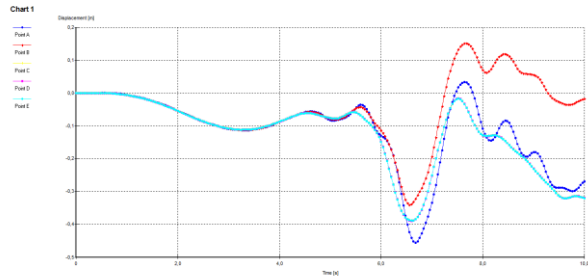
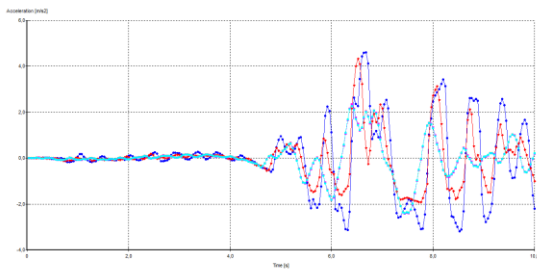
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



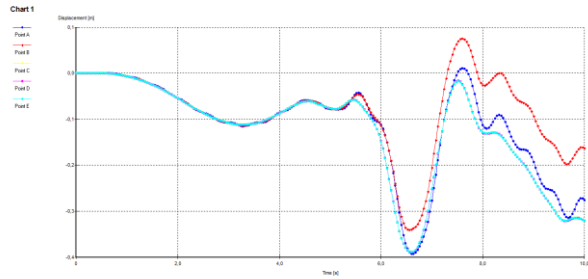
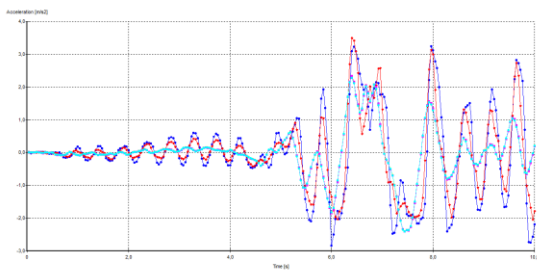
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5°

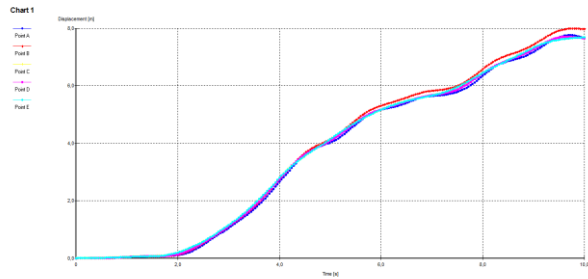
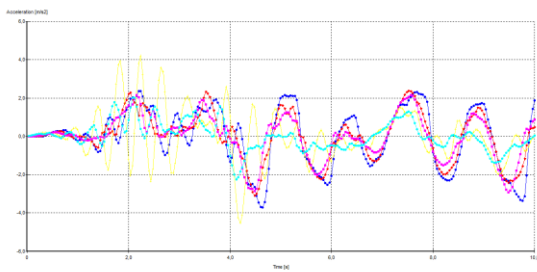


### Σενάριο 6°

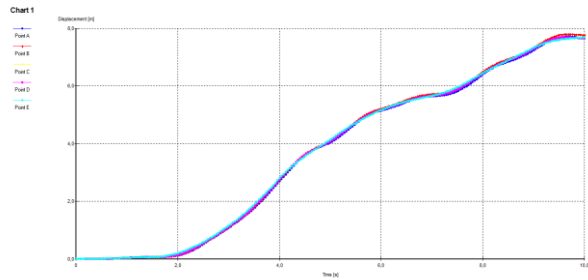
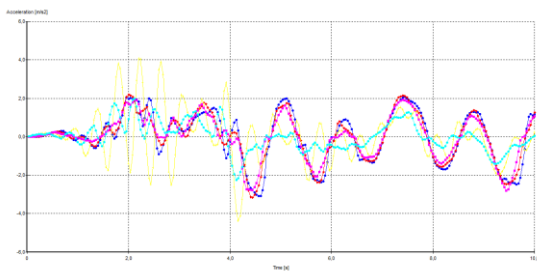


## Nsps

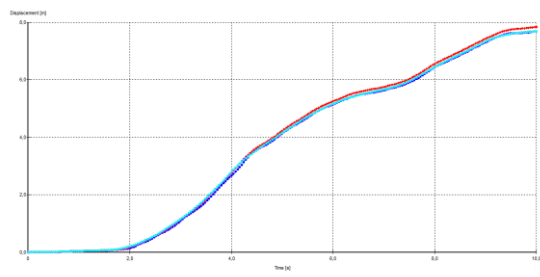
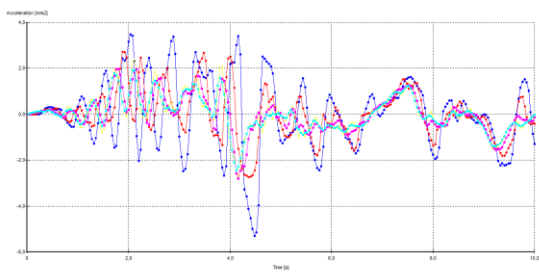
### Σενάριο 1°



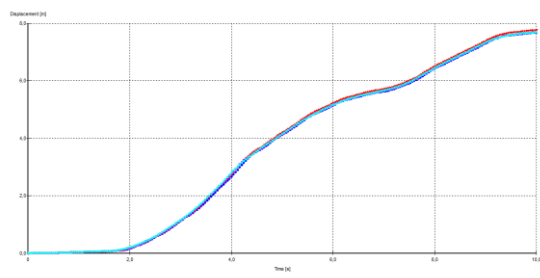
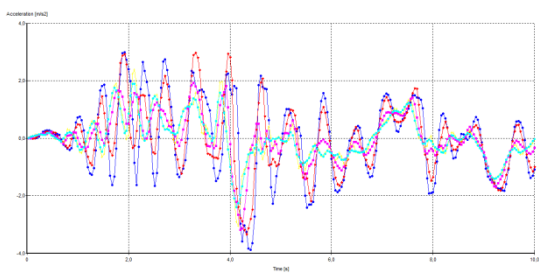
### Σενάριο 2°



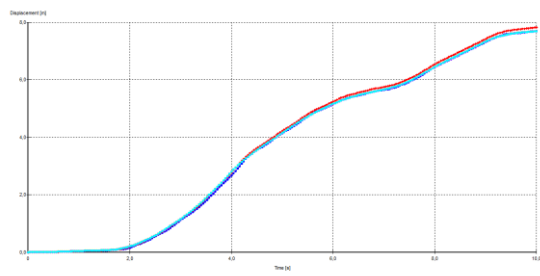
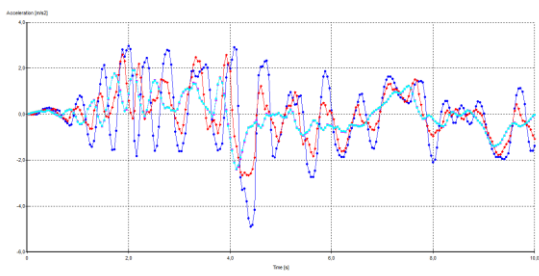
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



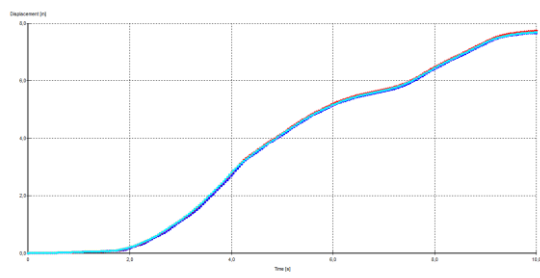
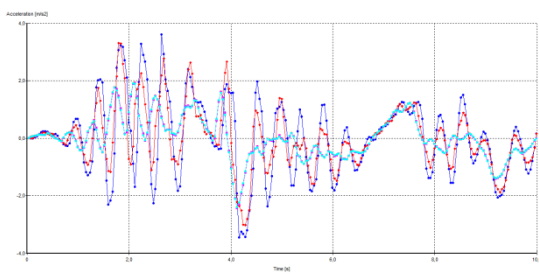
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

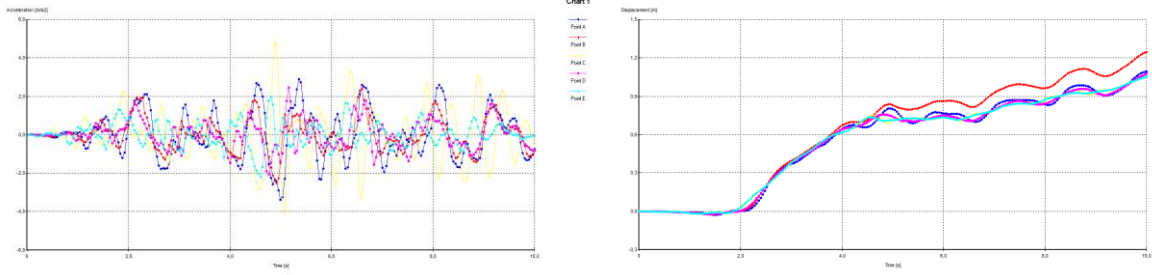


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

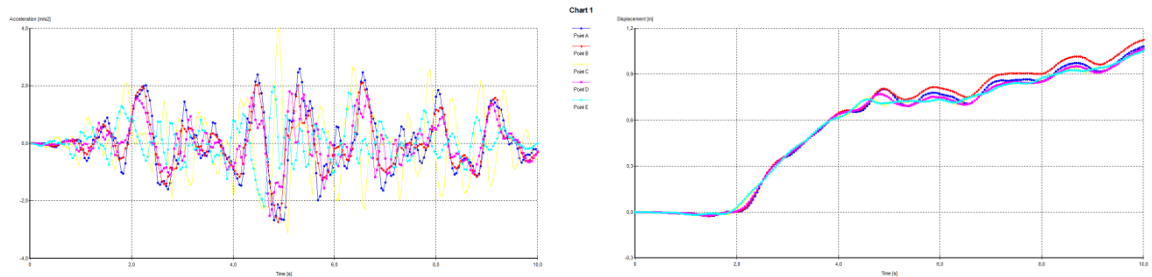


# Parkfield 11 km

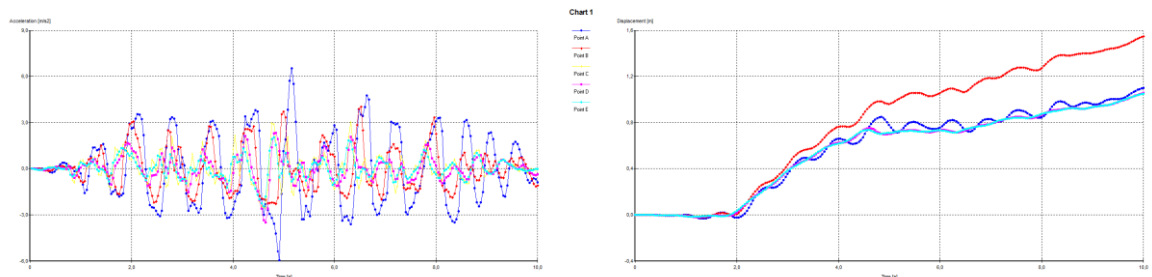
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



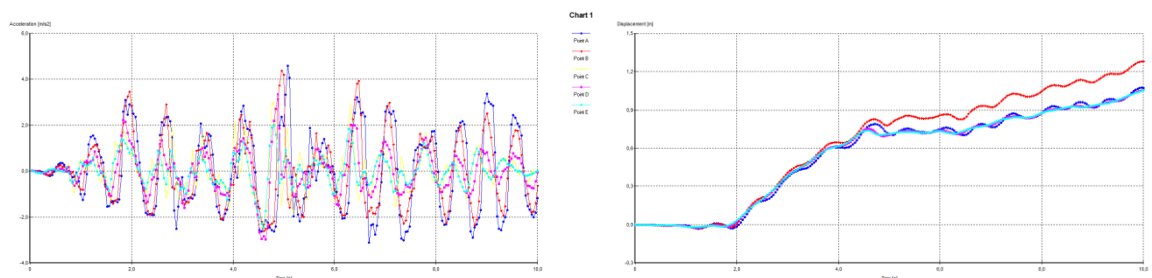
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



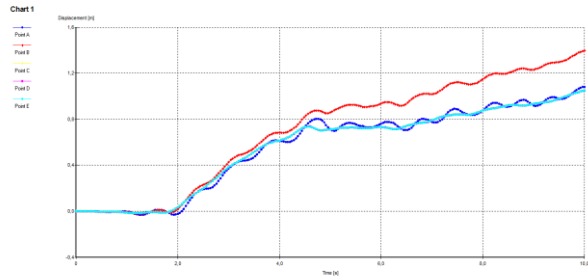
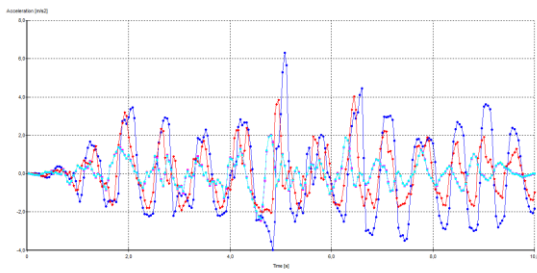
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



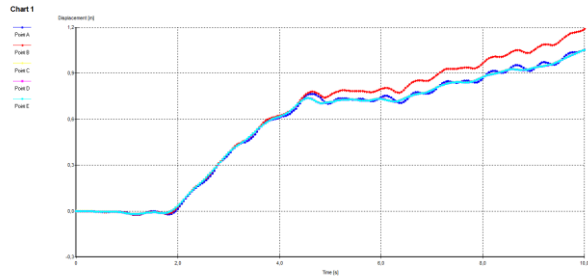
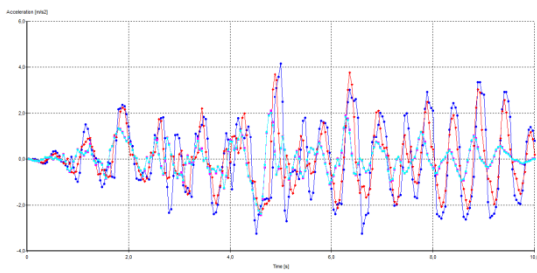
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5°

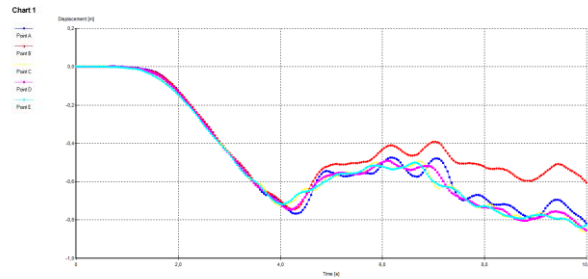
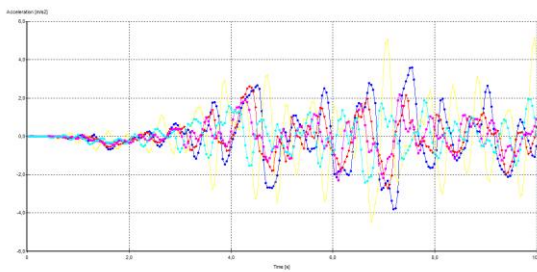


### Σενάριο 6°

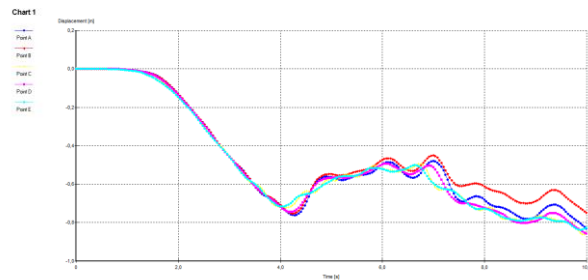
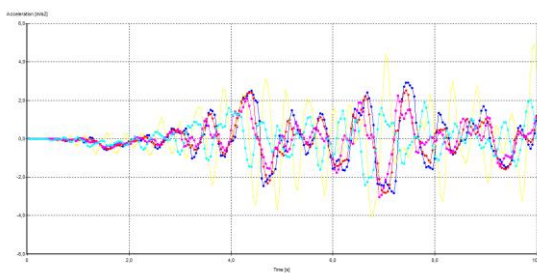


## Parkfield 14 km

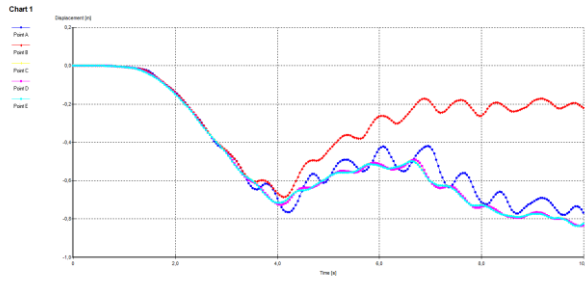
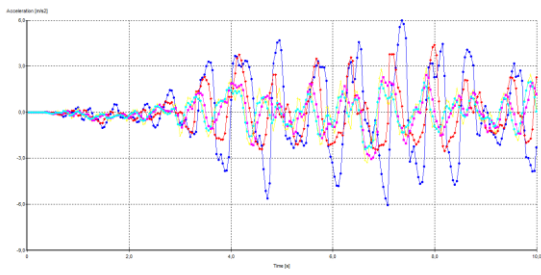
### Σενάριο 1°



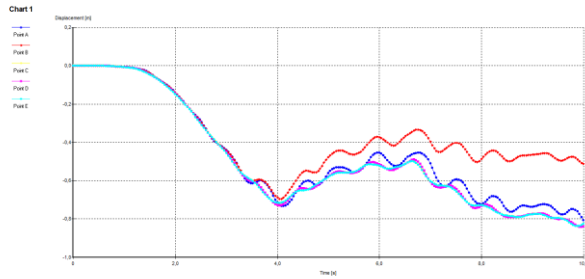
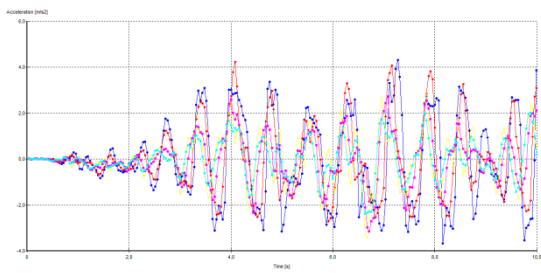
### Σενάριο 2°



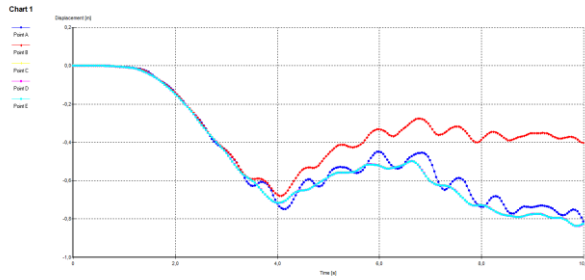
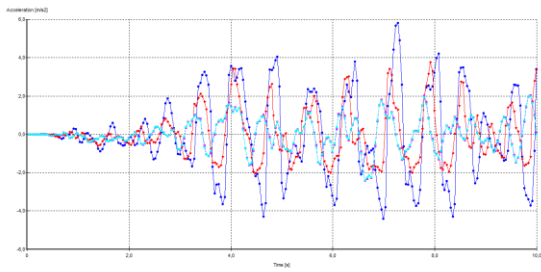
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



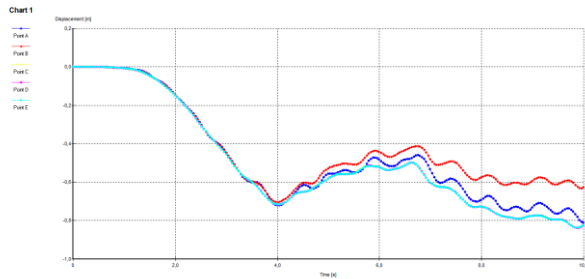
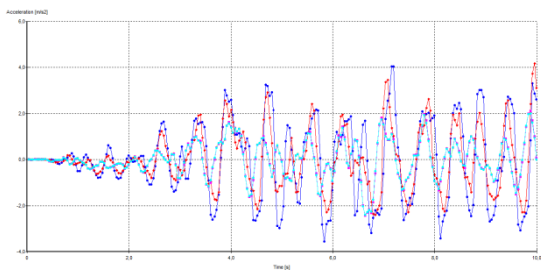
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

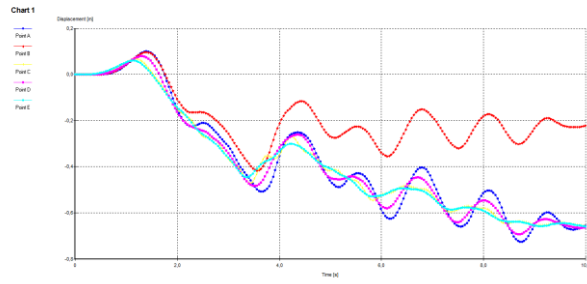
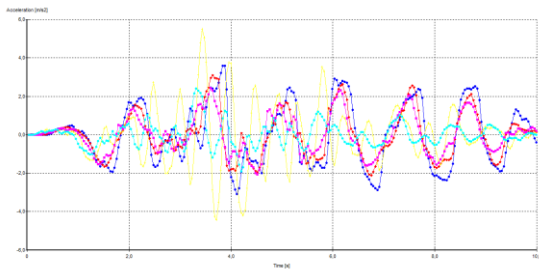


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

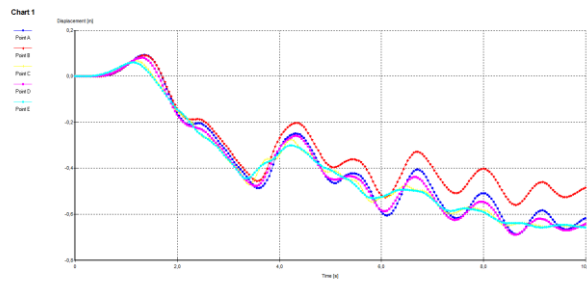
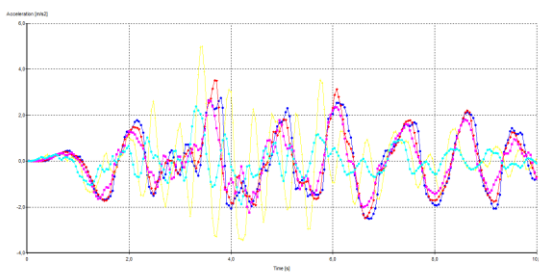


# Parkfield 20 km

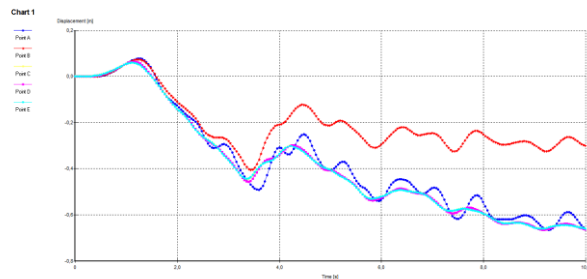
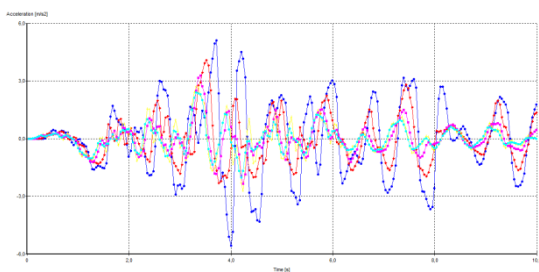
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



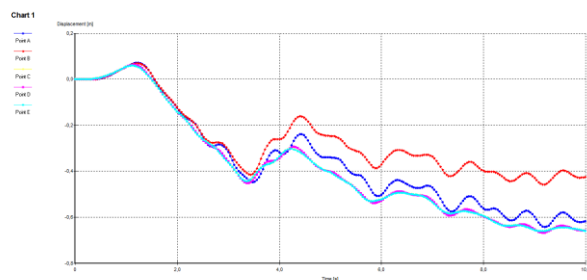
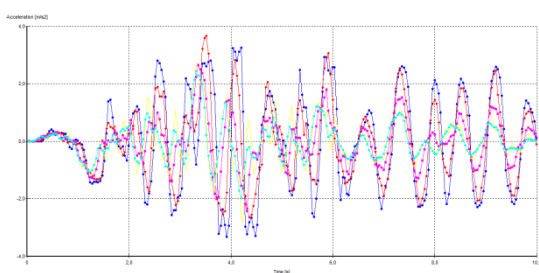
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



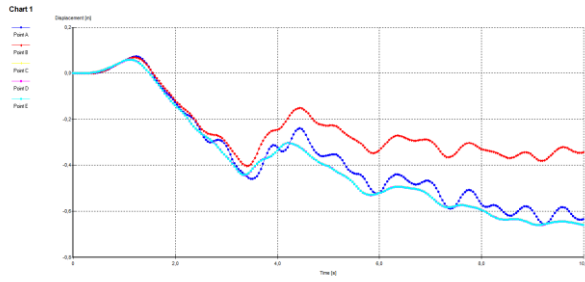
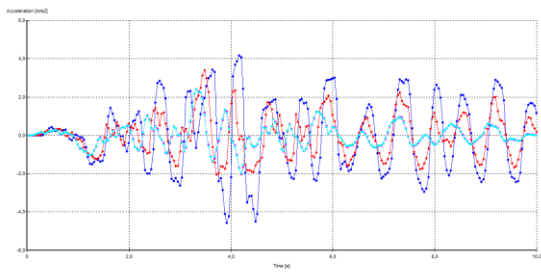
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



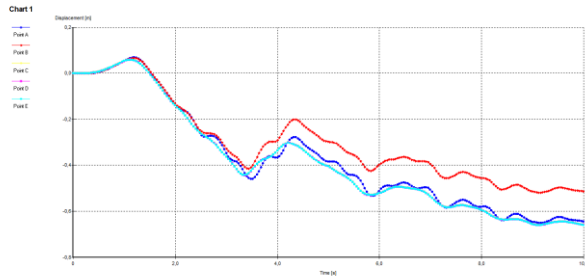
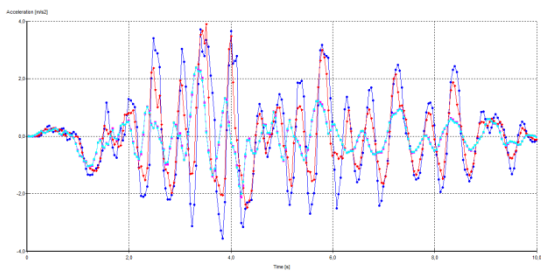
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

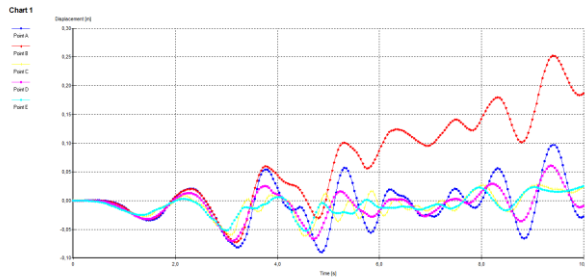
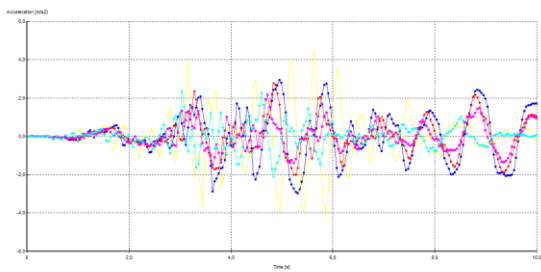


## Σενάριο 6°

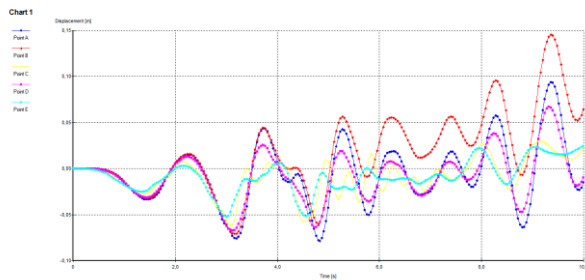
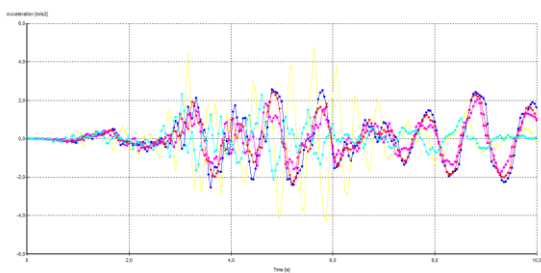


## Whittier

### Σενάριο 1°

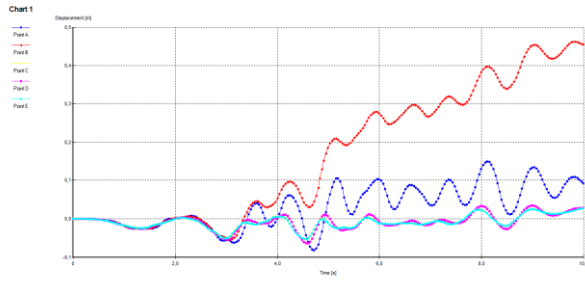
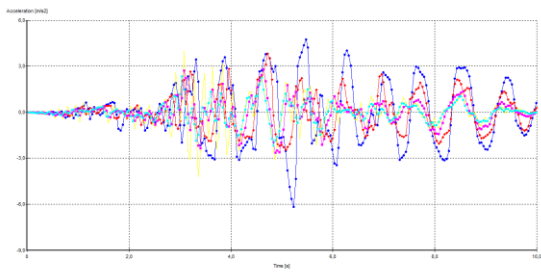


### Σενάριο 2°

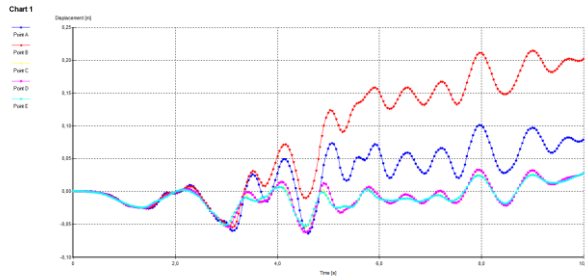
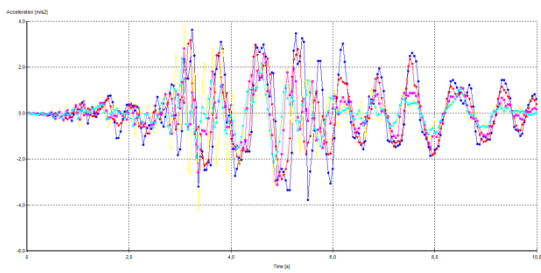




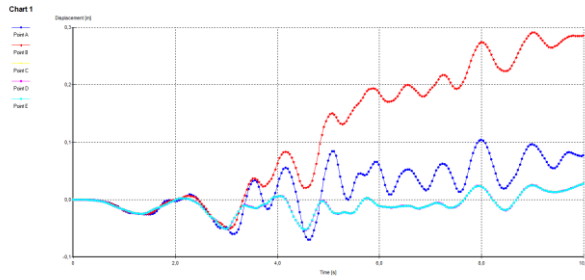
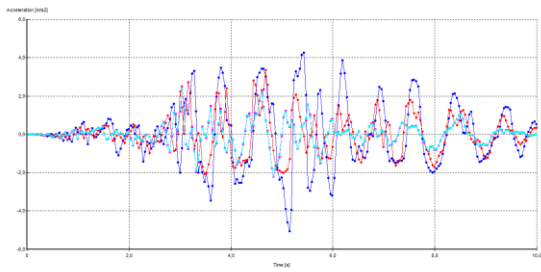
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



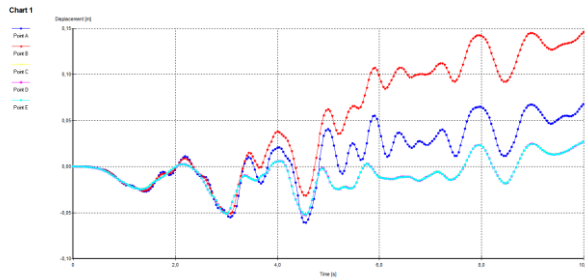
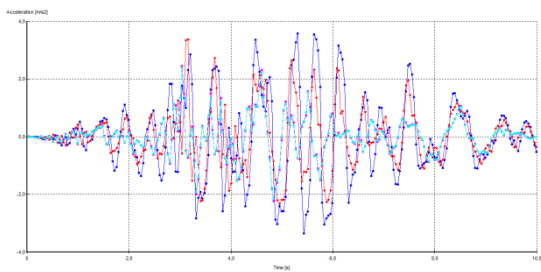
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>



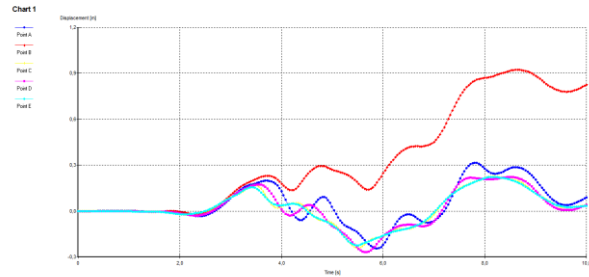
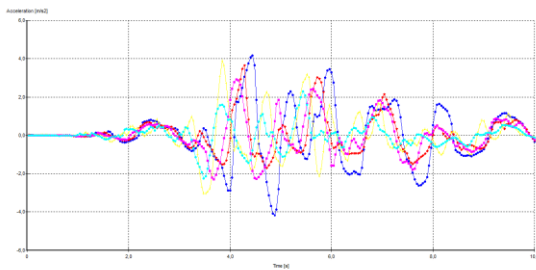
### Σενάριο 6<sup>ο</sup>



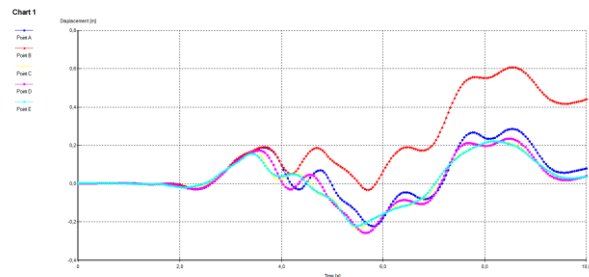
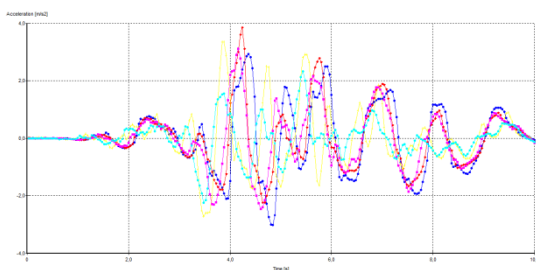
# Ανελαστικές αναλύσεις 0,24g ( Λιθορριπή 2) ( Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης- Χρονοϊστορίες μετατόπισης)

## Chalfant

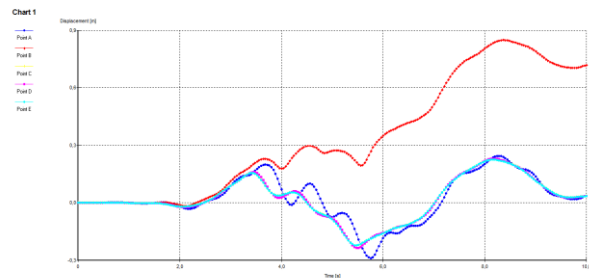
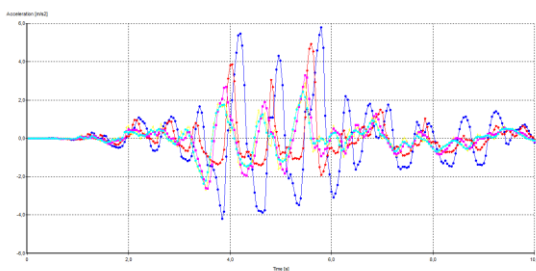
### Σενάριο 1<sup>ο</sup>



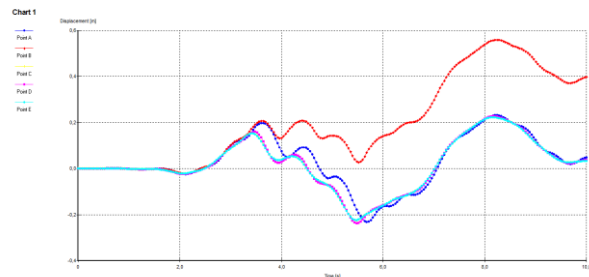
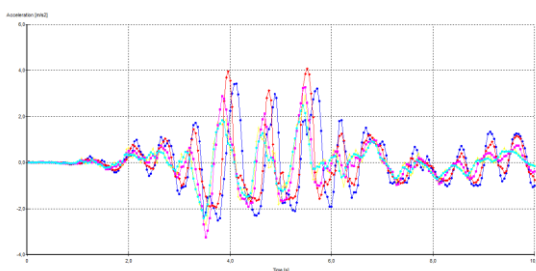
### Σενάριο 2<sup>ο</sup>



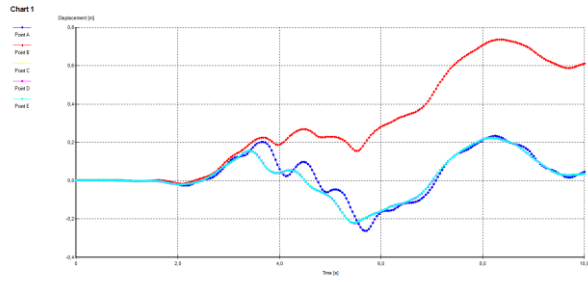
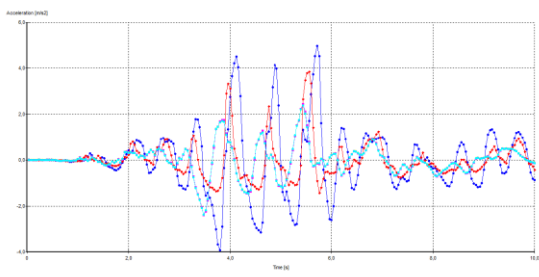
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



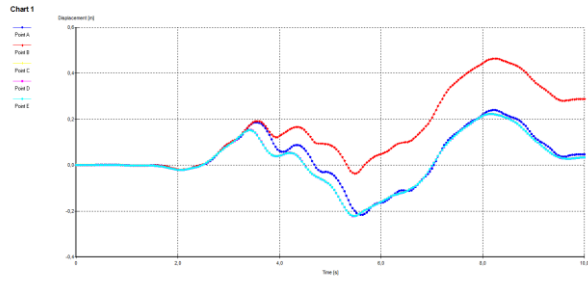
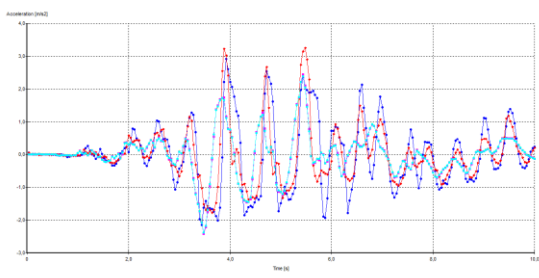
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5°

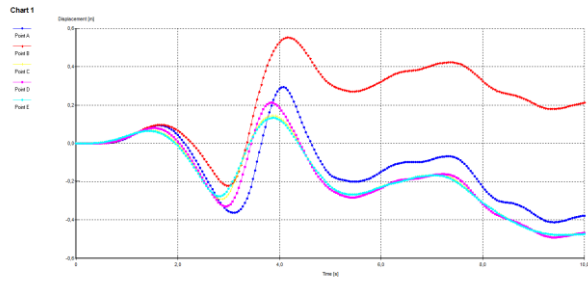
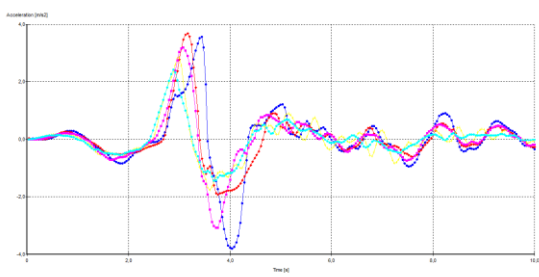


### Σενάριο 6°

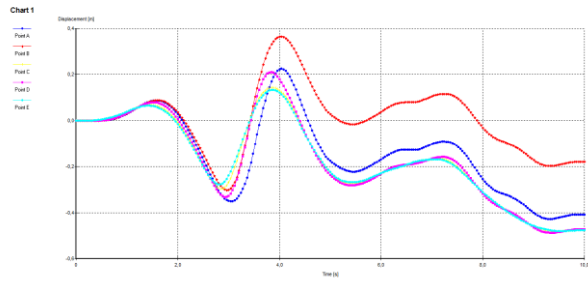
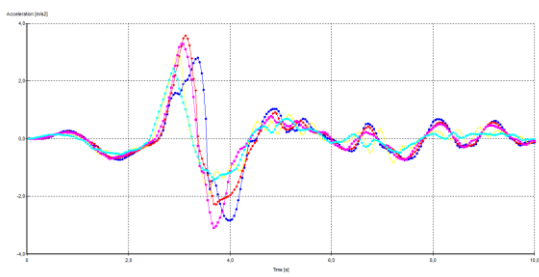


## Erzincan

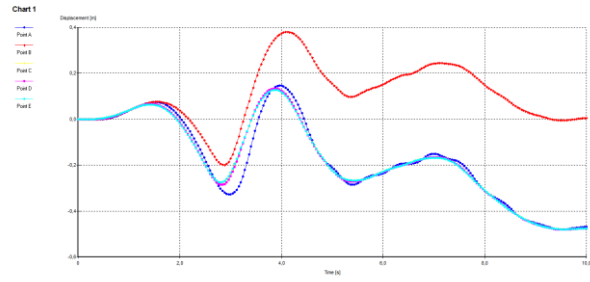
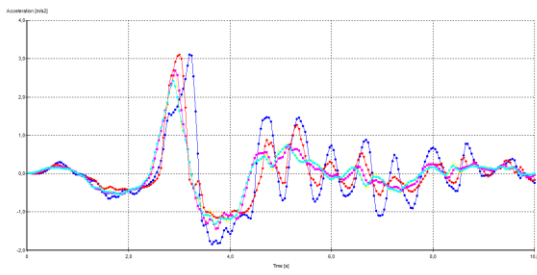
### Σενάριο 1°



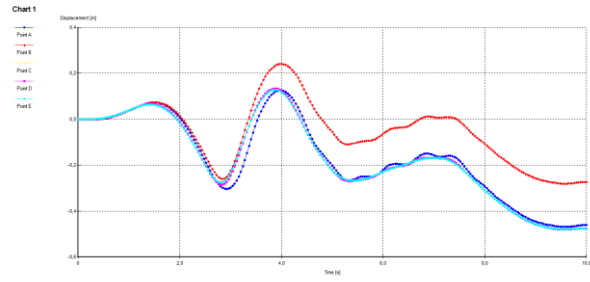
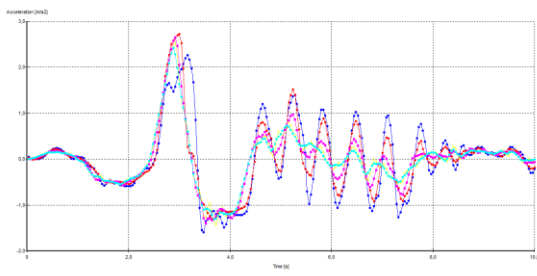
### Σενάριο 2°



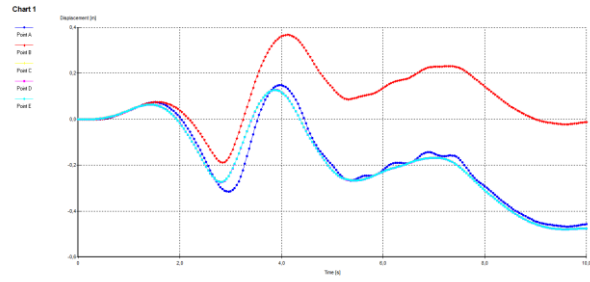
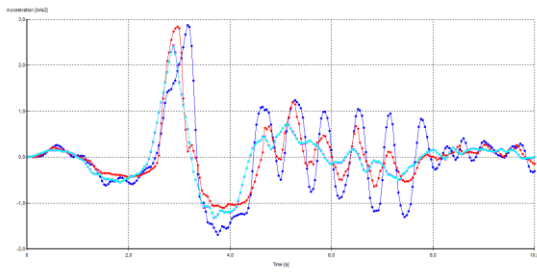
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



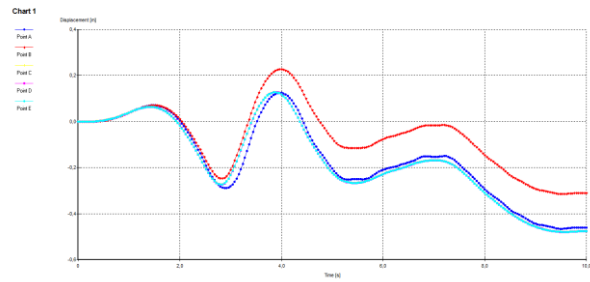
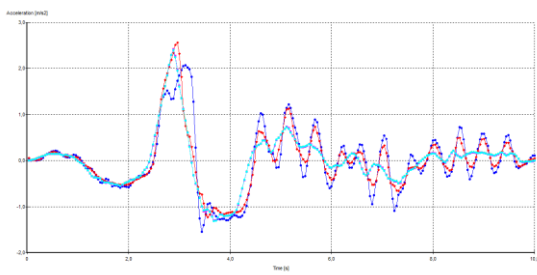
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>



### Σενάριο 6<sup>ο</sup>



# Friuli

## Σενάριο 1<sup>ο</sup>

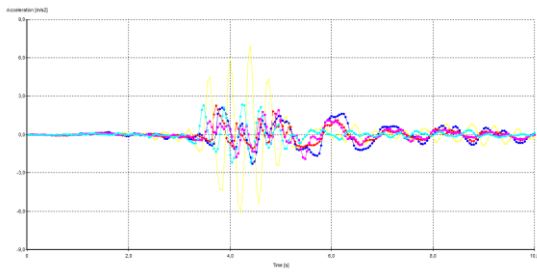


Chart 1

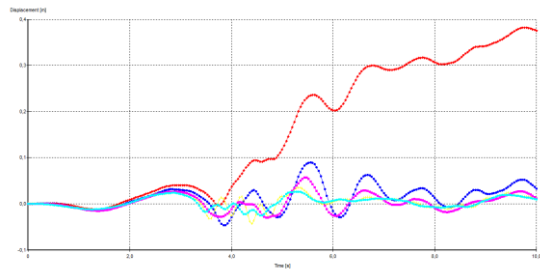


Chart 1

## Σενάριο 2<sup>ο</sup>

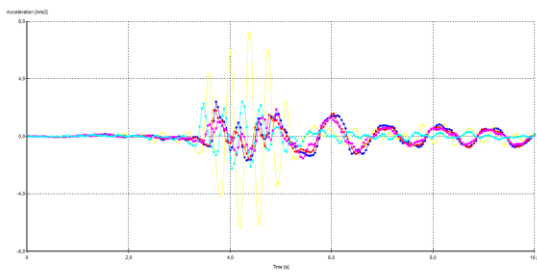


Chart 1

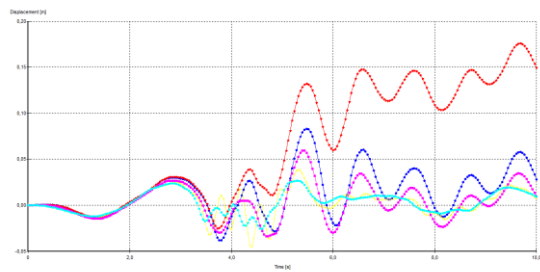


Chart 1

## Σενάριο 3<sup>ο</sup>

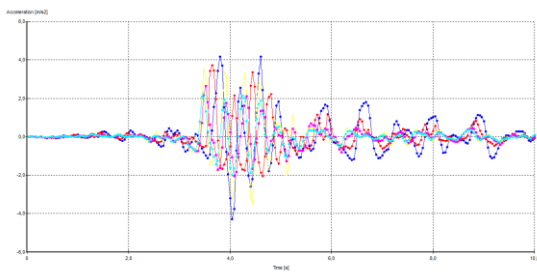


Chart 1

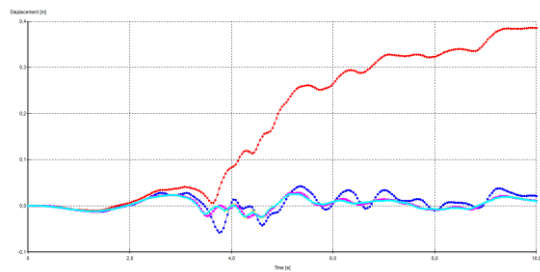


Chart 1

## Σενάριο 4<sup>ο</sup>

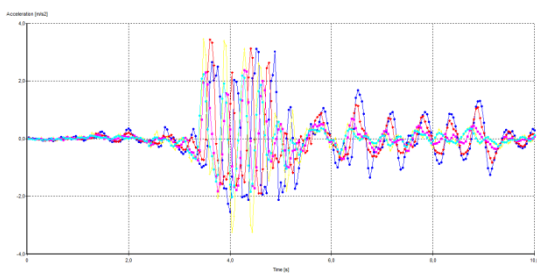


Chart 1

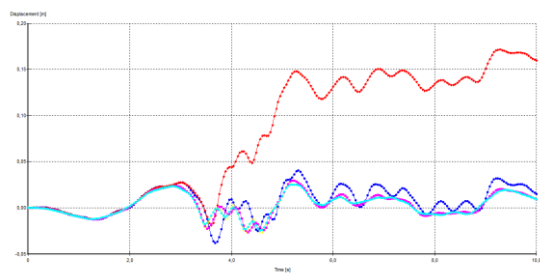
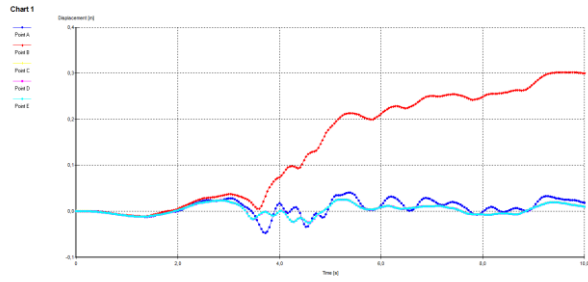
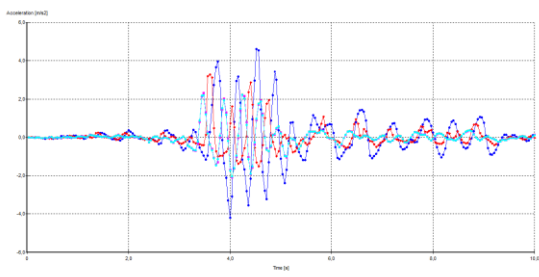
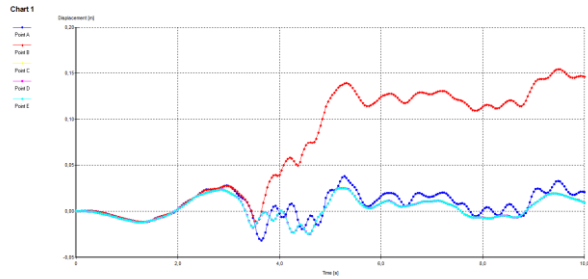
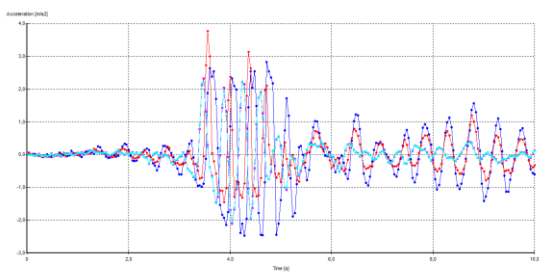


Chart 1

## Σενάριο 5°

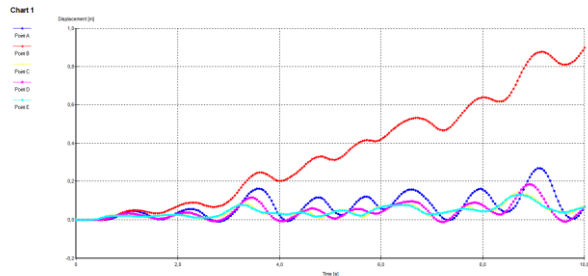
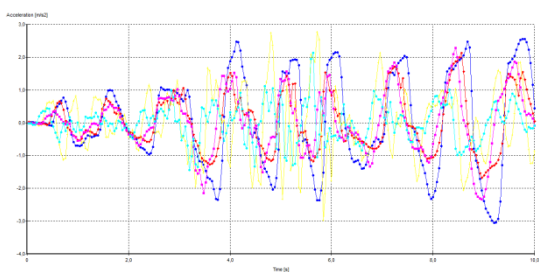


## Σενάριο 6°

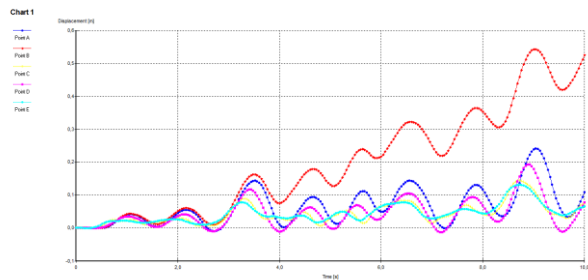
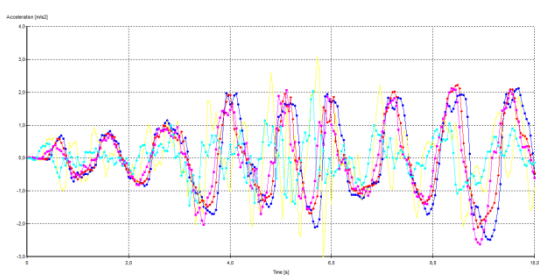


## Ionian

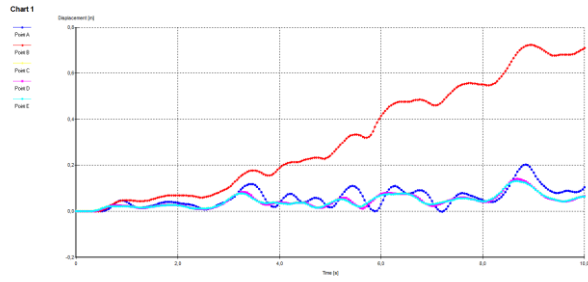
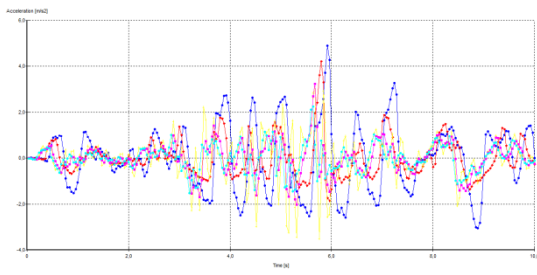
### Σενάριο 1°



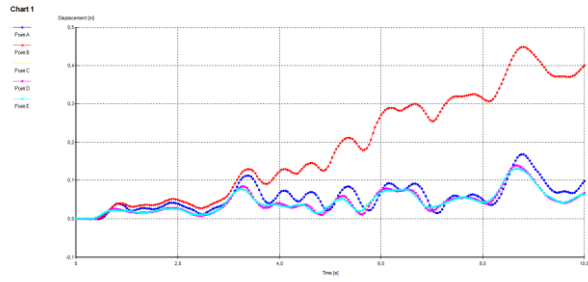
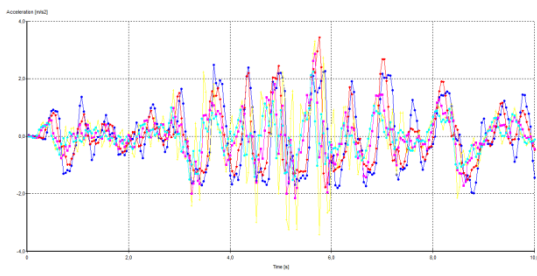
### Σενάριο 2°



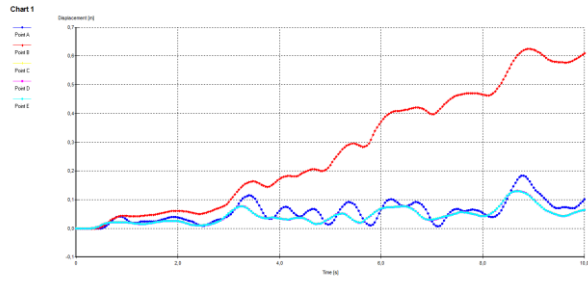
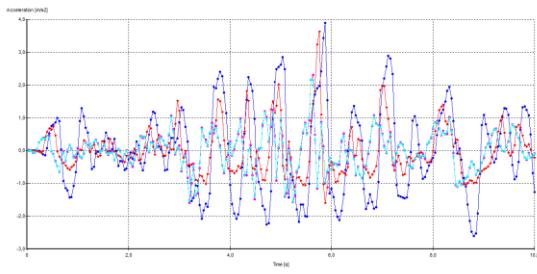
### Σενάριο 3°



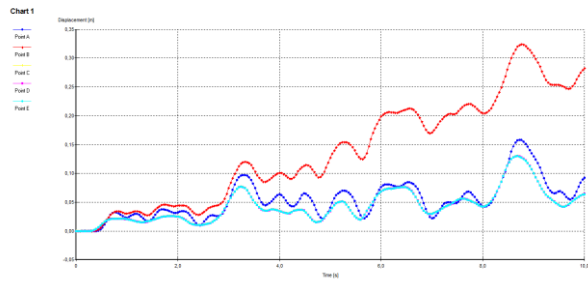
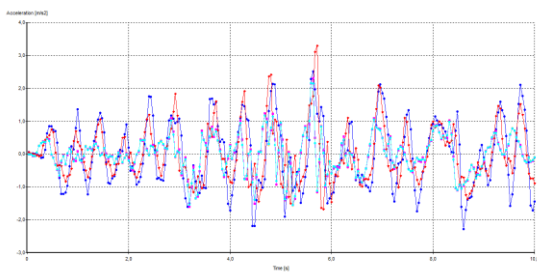
### Σενάριο 4°



### Σενάριο 5°

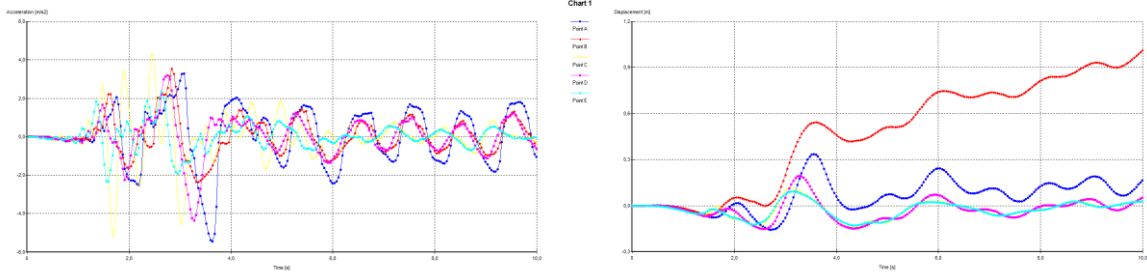


### Σενάριο 6°

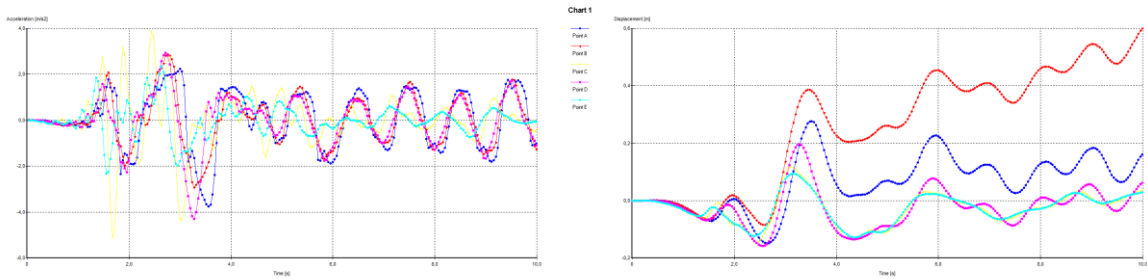


# Καλαματα

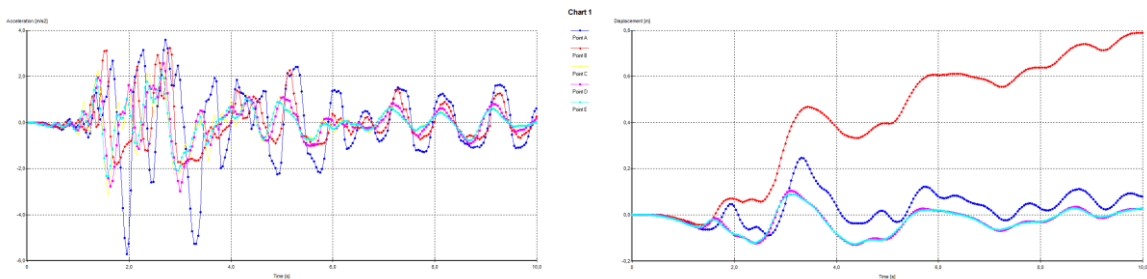
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



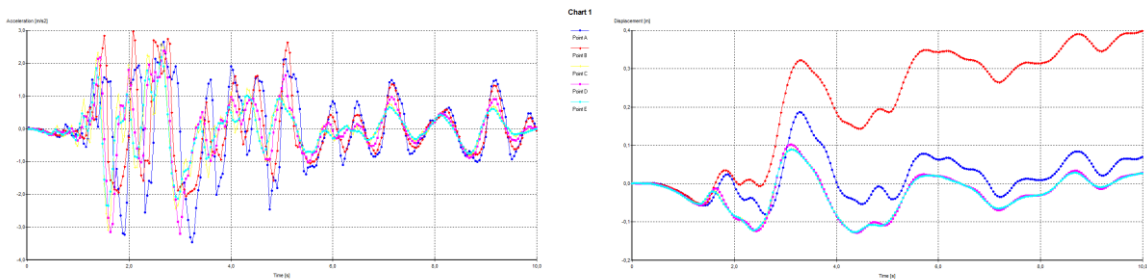
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



## Σενάριο 3<sup>ο</sup>

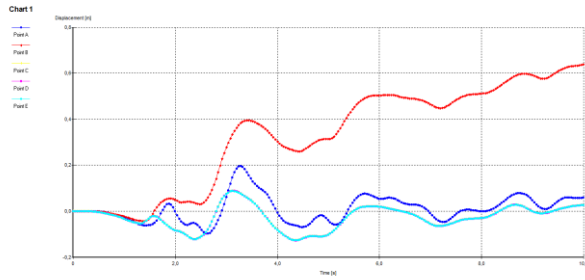
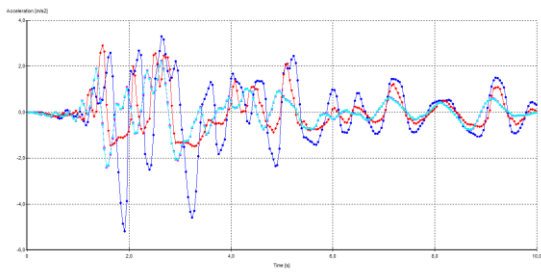


## Σενάριο 4<sup>ο</sup>

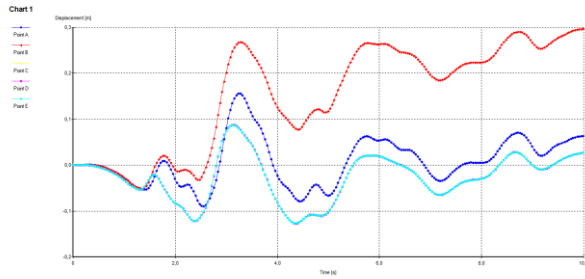
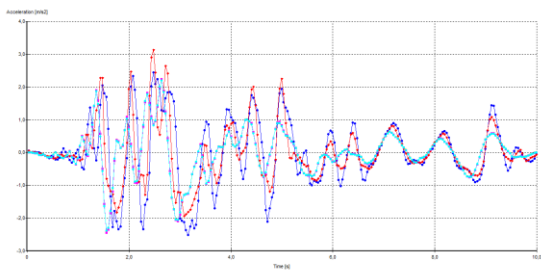




## Σενάριο 5°

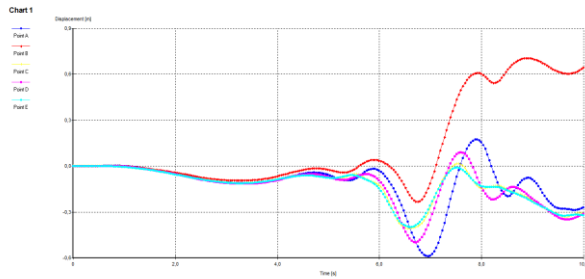
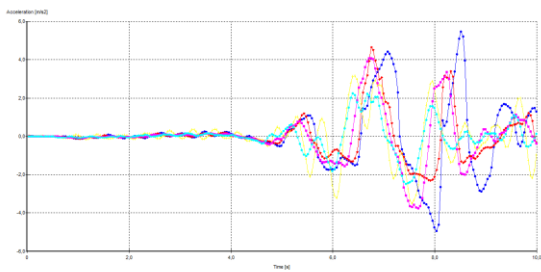


## Σενάριο 6°

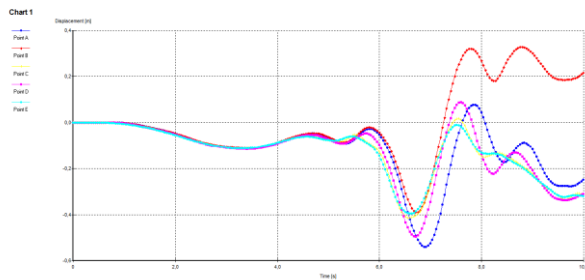
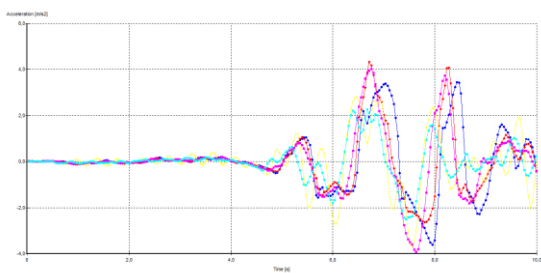


## Montenegro

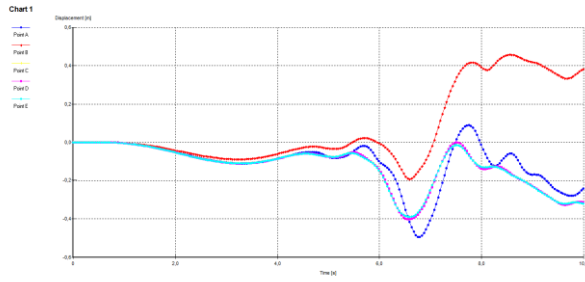
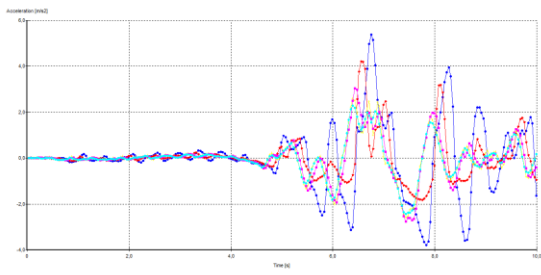
### Σενάριο 1°



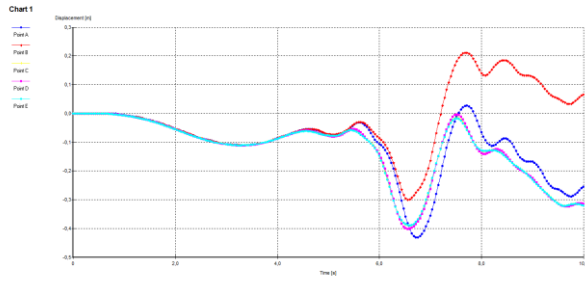
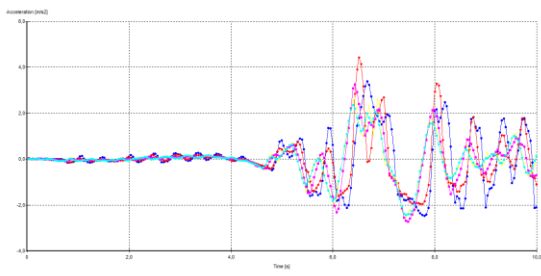
### Σενάριο 2°



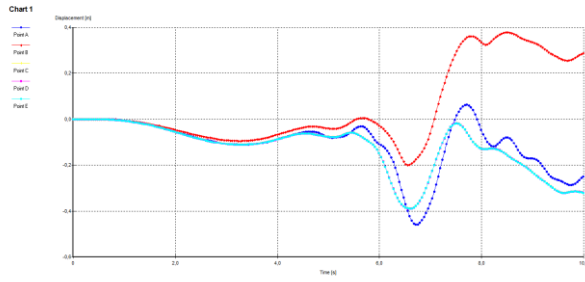
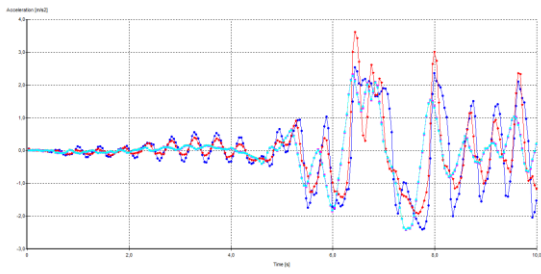
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



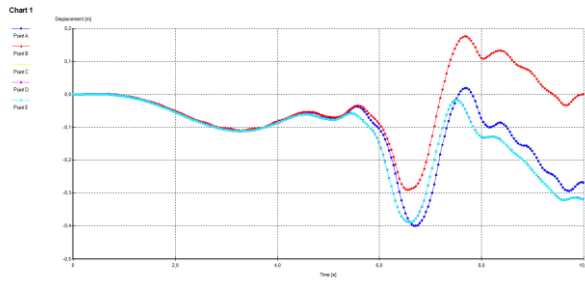
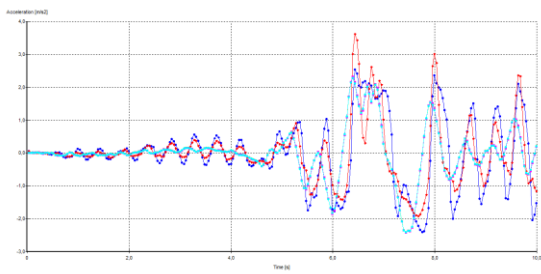
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

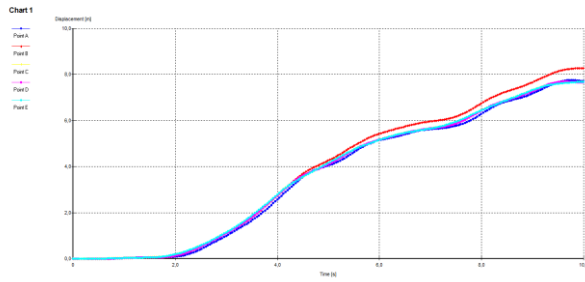
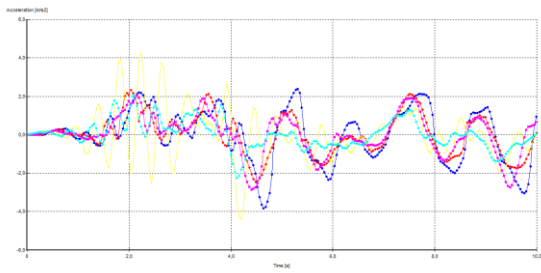


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

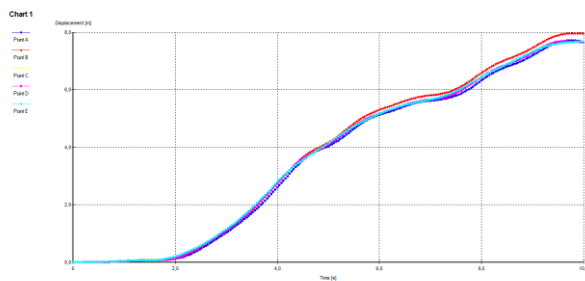
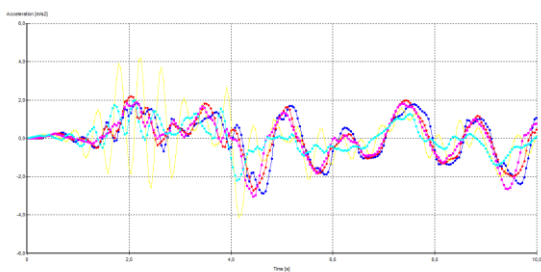


# Nsps

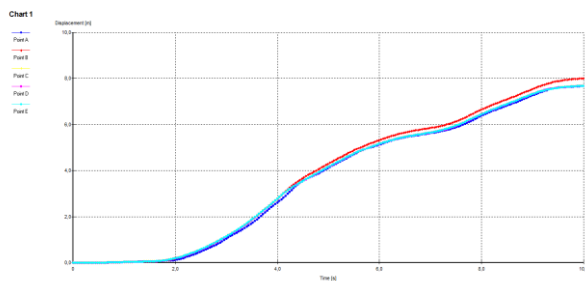
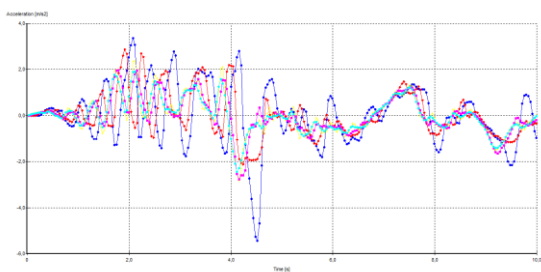
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



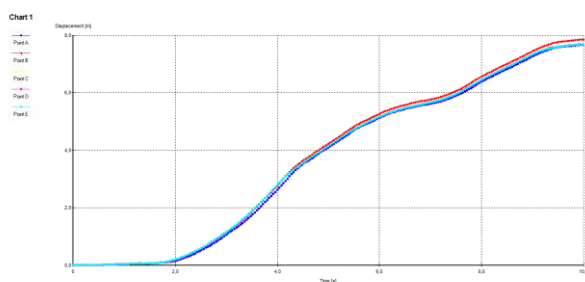
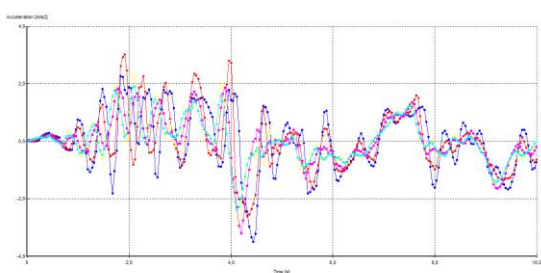
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



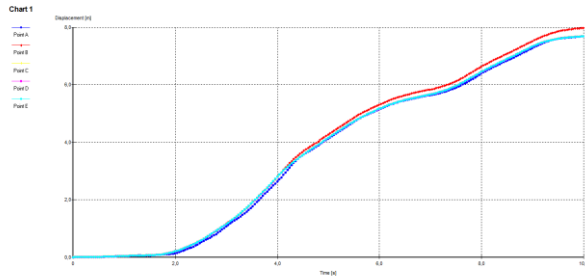
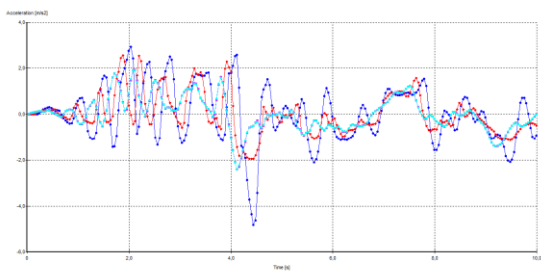
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



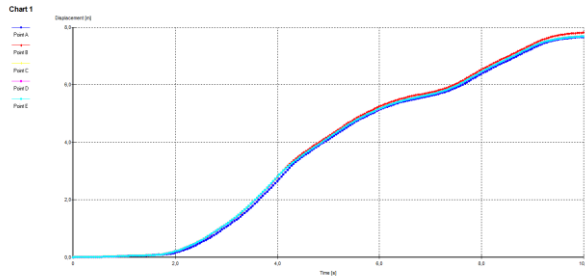
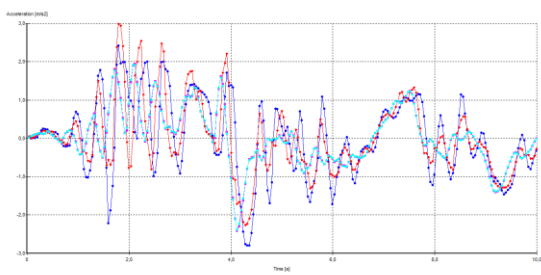
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5°

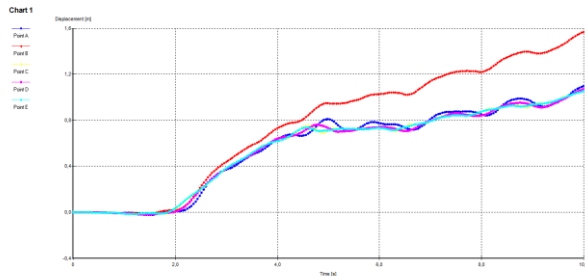
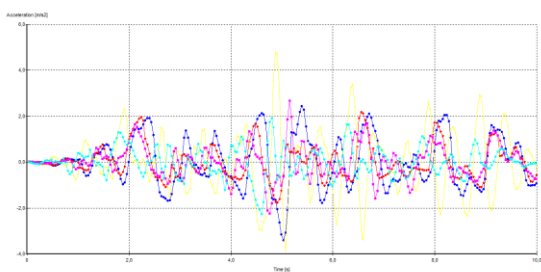


## Σενάριο 6°

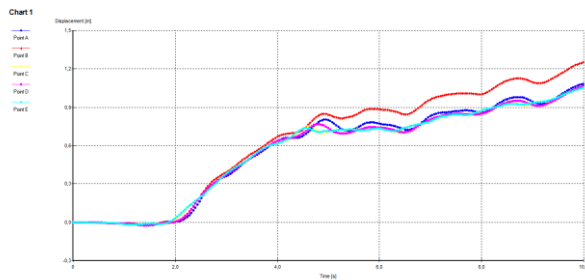
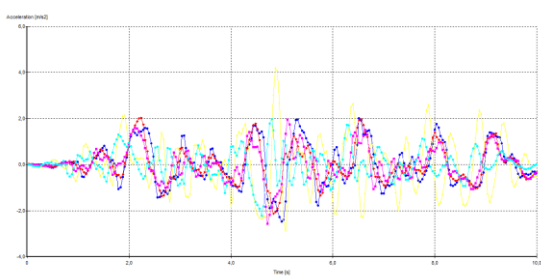


## Parkfield 11 km

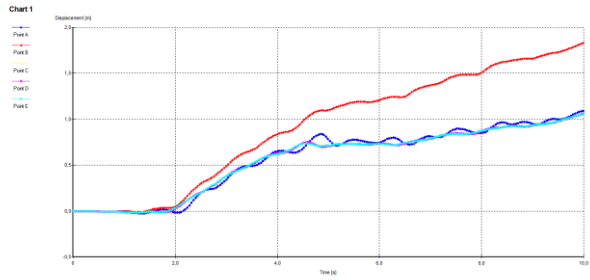
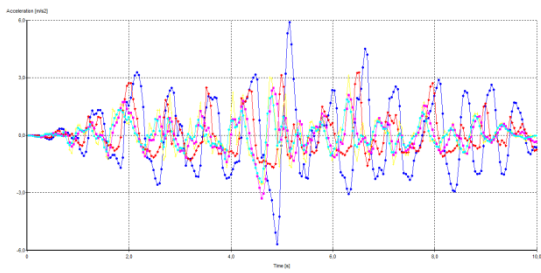
### Σενάριο 1°



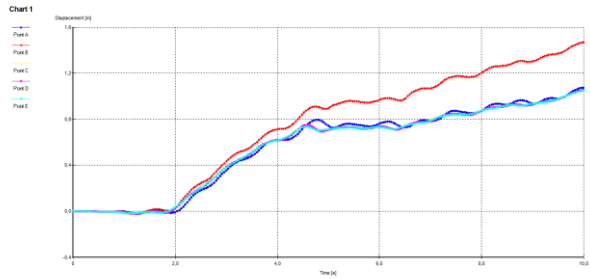
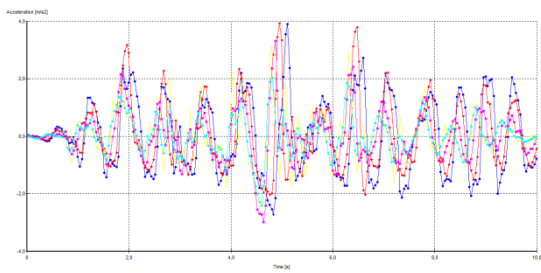
### Σενάριο 2°



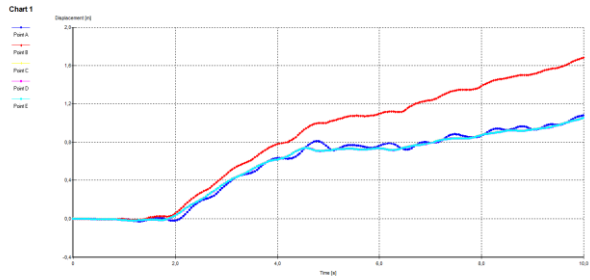
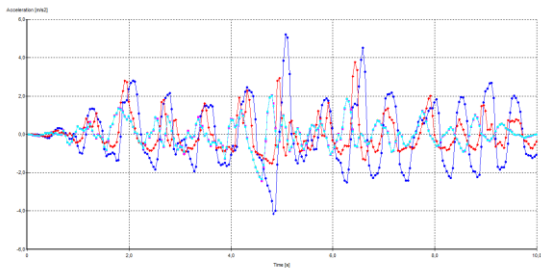
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



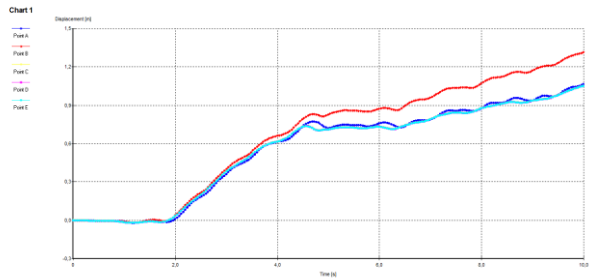
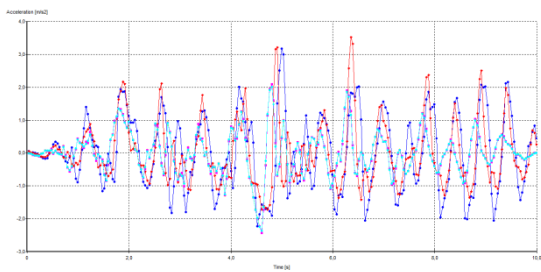
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>

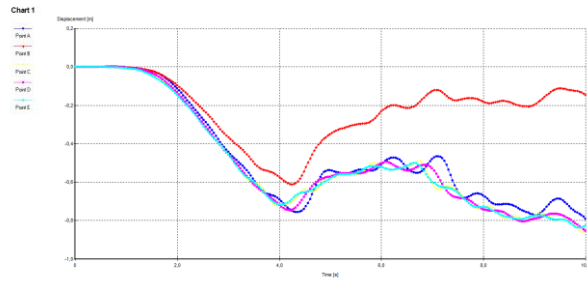
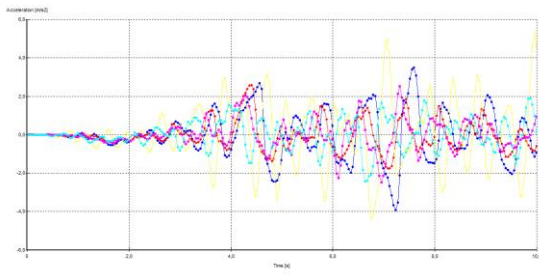


### Σενάριο 6<sup>ο</sup>

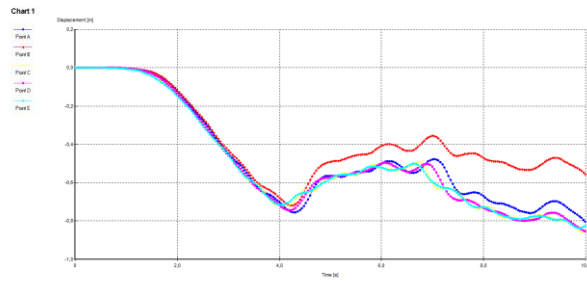
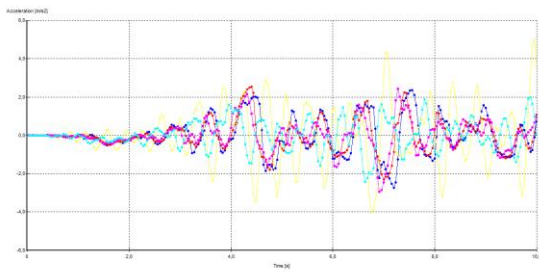


# Parkfield 14 km

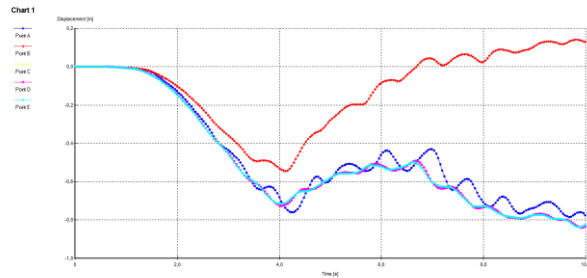
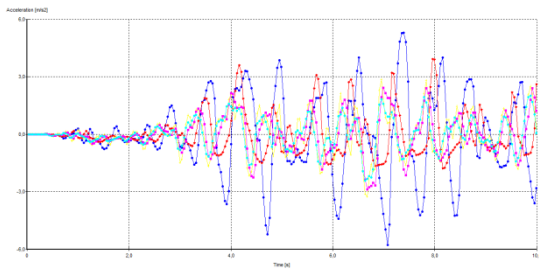
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



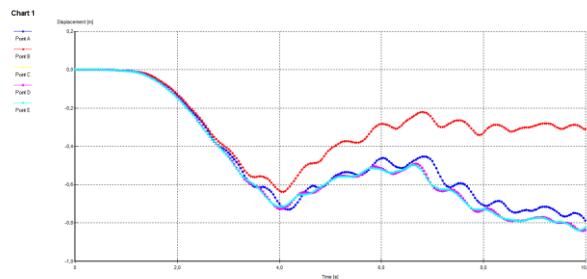
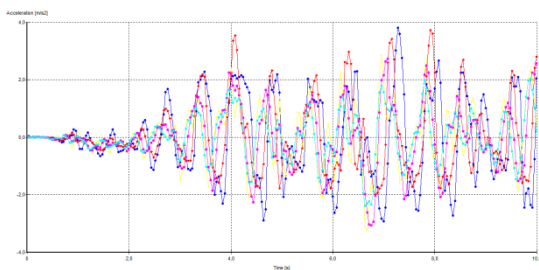
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



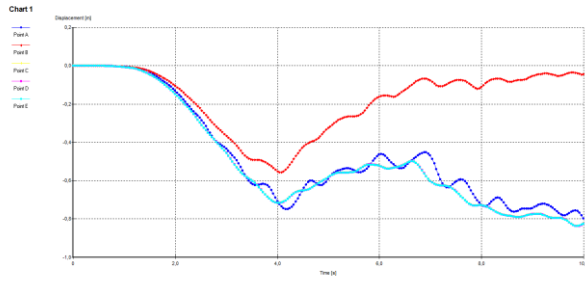
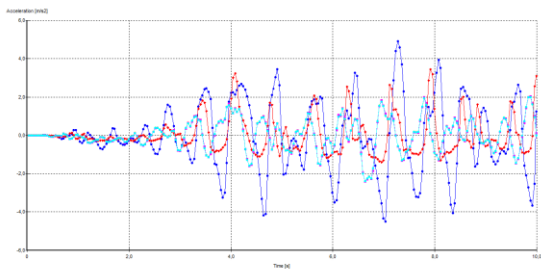
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



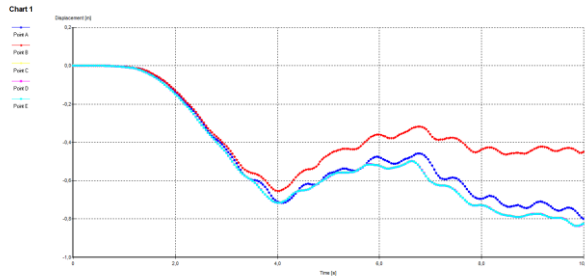
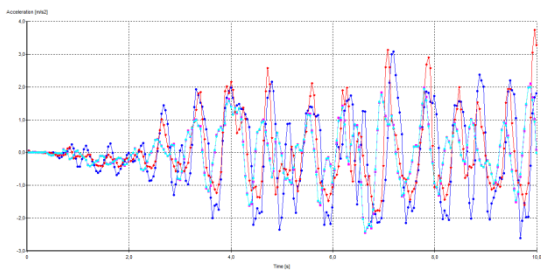
## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5°

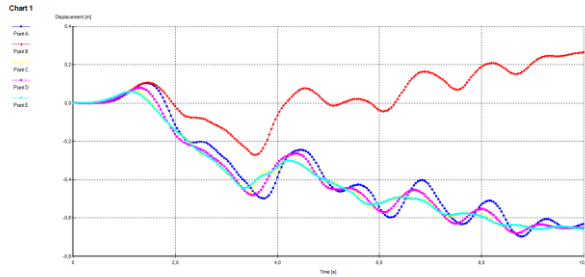
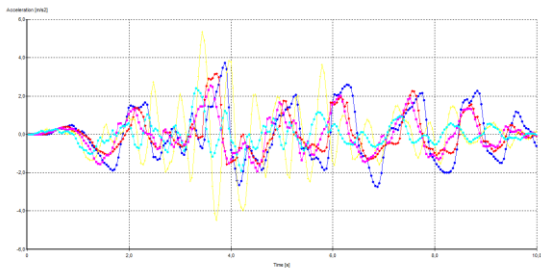


### Σενάριο 6°

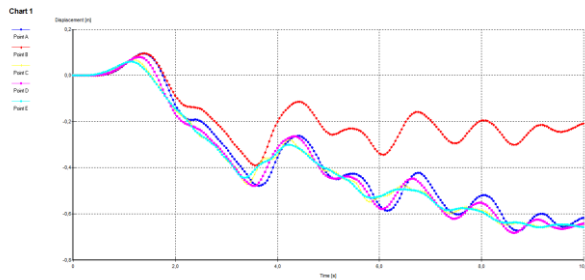
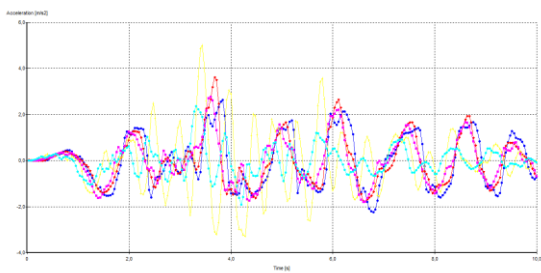


## Parkfield 20 km

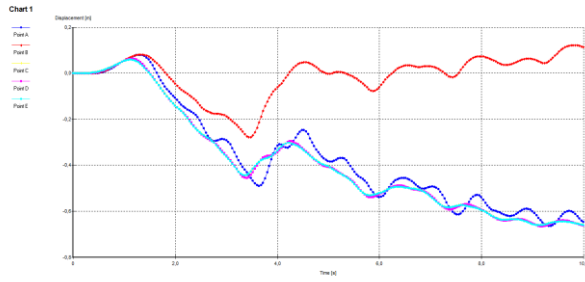
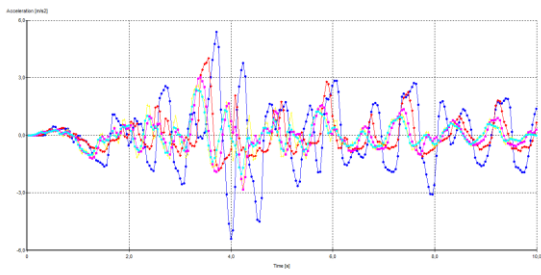
### Σενάριο 1°



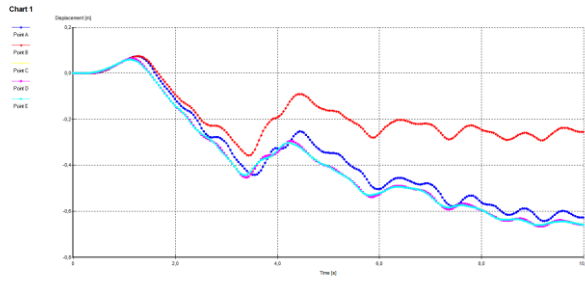
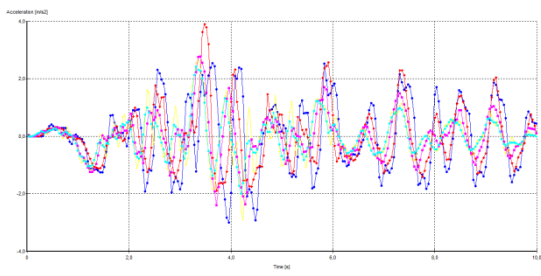
### Σενάριο 2°



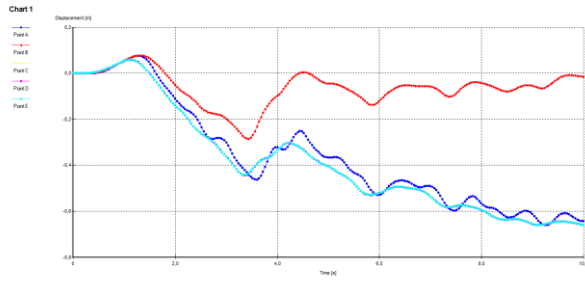
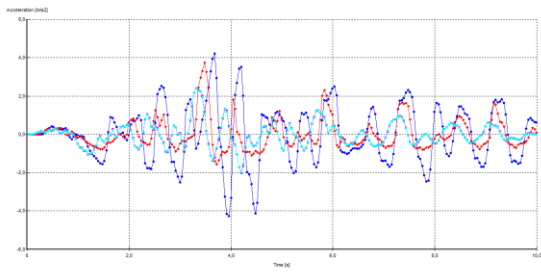
### Σενάριο 3<sup>ο</sup>



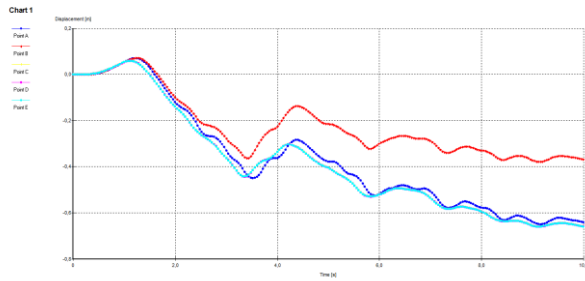
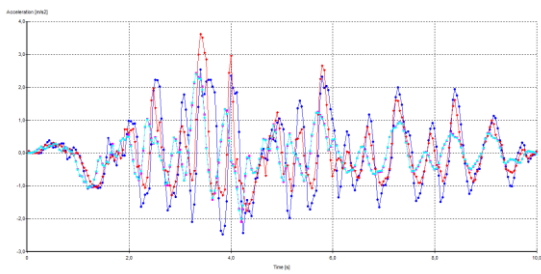
### Σενάριο 4<sup>ο</sup>



### Σενάριο 5<sup>ο</sup>



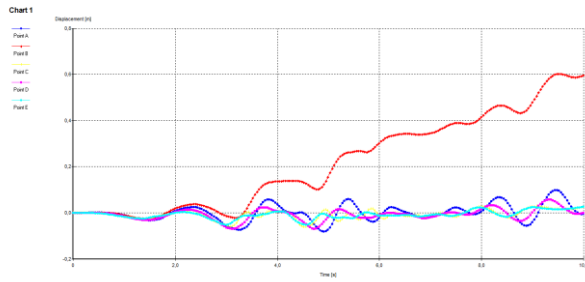
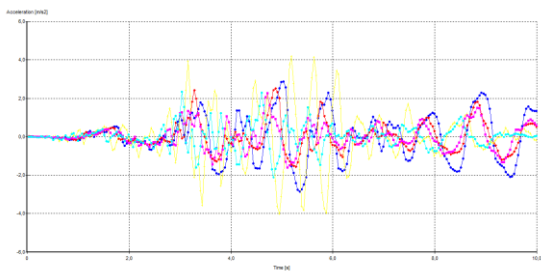
### Σενάριο 6<sup>ο</sup>



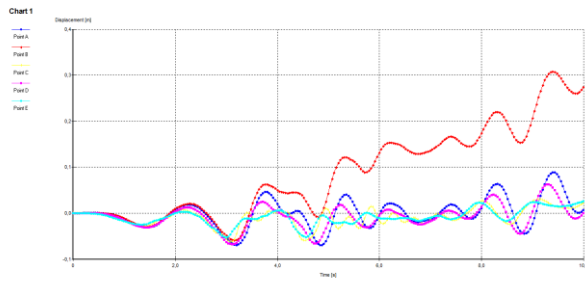
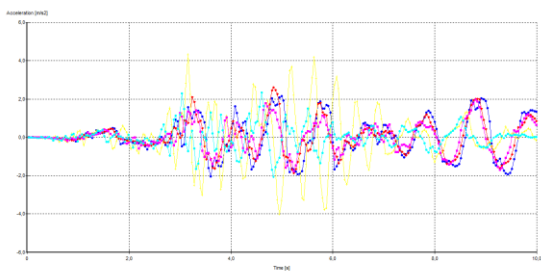


# Whittier

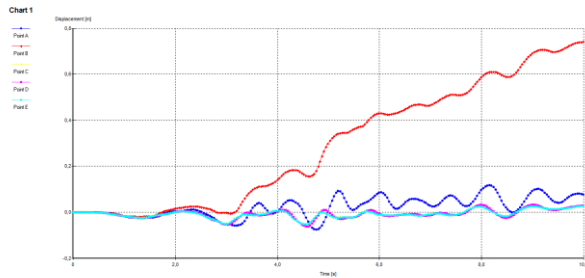
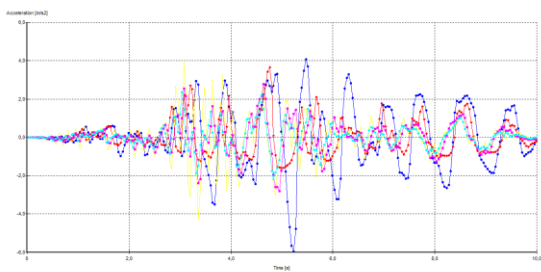
## Σενάριο 1<sup>ο</sup>



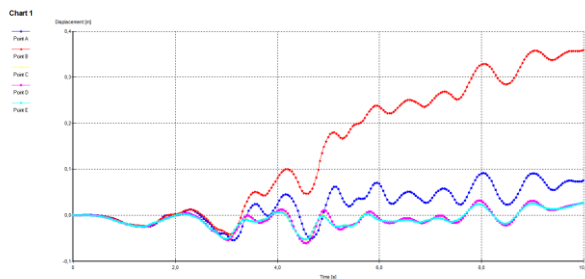
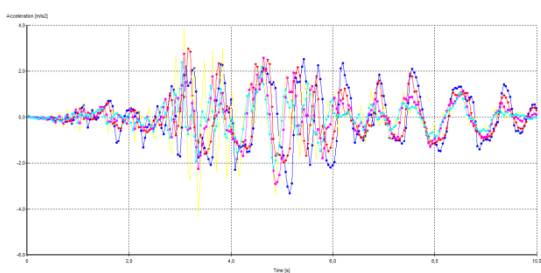
## Σενάριο 2<sup>ο</sup>



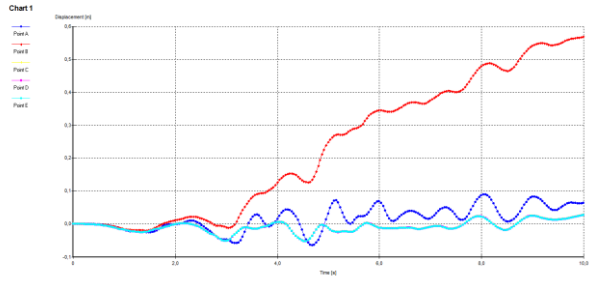
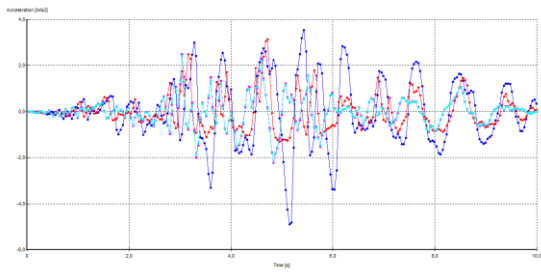
## Σενάριο 3<sup>ο</sup>



## Σενάριο 4<sup>ο</sup>



## Σενάριο 5<sup>ο</sup>



## Σενάριο 6<sup>ο</sup>

