



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΙΣΧΝΟΥ
ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΑΛΕΞΙΑΔΗ ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΑΡΤΕΜΙΣ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

Εξεταστική επιτροπή:

Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας (Επιβλέπων), Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.

Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.

Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ντακούλα Παναγιώτη, Καθηγητή στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη βοήθεια και την αδιάκοπη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της εργασίας μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία αφορά την αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης φράγματος ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (γνωστού και ως σκληρού επιχώματος) για διαφορετικές περιπτώσεις, εξετάζοντας την επιρροή του υλικού του σκληρού επιχώματος, της δυσκαμψίας του υποβάθρου θεμελίωσης, και της αυξανόμενης έντασης και διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης με στόχο τον βέλτιστο σχεδιασμό του φράγματος.

Τα φράγματα από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα ή σκληρό επίχωμα (Hardfill Dams) αποτελούν έναν σχετικά νέο τύπο κατασκευής που έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια. Το υδροηλεκτρικό έργο που αναλύεται αφορά ένα φράγμα μέγιστου ύψους 104 m, αξονοσυμμετρικής τραπεζοειδούς διατομής, με κλίση στις ανάντη και κατόντη παρειές ίση προς 0.7:1. Η διπλωματική εργασία βασίστηκε στην προσομοίωση και ανάλυση του προβλήματος χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα για την επίδραση των ανωτέρω παραμέτρων. Η αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς τους βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη κατάλληλων καταστατικών μοντέλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους. Κατά τη φάση της μοντελοποίησης, δημιουργήθηκε το προσομοίωμα με τη χρήση του προγράμματος FLAC 7 (Itasca). Για την ορθή προσομοίωση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες αναλύσεις ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου.

Κύριος στόχος της εργασίας ήταν η αριθμητική εκτίμηση κατάλληλων παραμέτρων της σεισμικής απόκρισης του φράγματος, όπως οι μετακινήσεις και επιταχύνσεις κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του φράγματος, και η κατανομή των μόνιμων μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και σεισμικών βλαβών (κυρίως εφελκυστικών ρηγματώσεων και διατμητικών ολισθήσεων) στο τέλος της σεισμικής δόνησης. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά είναι δυνατή η αξιολόγηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φράγματος στον σεισμό σχεδιασμού και ο προσδιορισμός της σεισμικής του ασφάλειας έναντι είτε περιορισμένων βλαβών ή πιθανής κατάρρευσής του με ανεξέλεγκτη ροή προς κατόντη.

Abstract

This Master's Thesis focuses on the numerical investigation of the seismic response of a roller-compacted, lean concrete dam, also known as a hardfill dam, under various scenarios. The study examines the influence of the hardfill material properties, the stiffness of the foundation materials, and the impact of increasing intensity and varying frequency content of seismic excitations, aiming to optimize the dam's design.

Hardfill dams represent a relatively recent construction technology that has evolved significantly over the past 30 years. The hydro-electric project analyzed here involves a dam with a maximum height of 104 meters, featuring an axisymmetric trapezoidal cross-section with the same slope of 0.7:1 on both the upstream and downstream faces. This thesis employs the finite difference method for simulation and analysis to derive meaningful conclusions about the impact of the various parameters mentioned. Accurate numerical simulation of their seismic behavior relies heavily on developing suitable constitutive models for the materials used in their construction. The modeling phase utilized the FLAC 7 software (Itasca), with numerous analyses conducted to ensure accurate calibration of the model. This rigorous approach ensures the validity of the simulation results.

The primary objective of the thesis is the numerical estimation of critical seismic response parameters of the dam, such as displacements and accelerations along its symmetry axis, and the distribution of permanent displacements, deformations, and seismic damages (mainly cracking due to tensile stresses and sliding failure due to shear stresses) at the end of seismic shaking. These results facilitate the evaluation of the dam's seismic behavior under design earthquake conditions, allowing for an assessment of its seismic safety against both limited damage and potential collapse with uncontrolled downstream flow.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή: Αντικείμενο εργασίας – Στόχοι.....	1
1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση φραγμάτων.....	4
2.1 Γενικά – Σκοπός κατασκευής φραγμάτων	4
2.2 Ιστορική αναδρομή – Βασικές χρήσεις φραγμάτων	7
2.2.1 Ιστορική αναδρομή	7
2.2.2 Βασικές χρήσεις φραγμάτων	8
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά - Τύποι φραγμάτων.....	10
2.3.1 Φράγματα από γεωυλικά	10
2.3.1.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα χωμάτων φραγμάτων	13
2.3.2 Φράγματα λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα.....	13
2.3.2.1 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά φραγμάτων λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα	14
2.3.2.2 Είδη ρωγμών και αιτίες εμφάνισης τους.....	15
2.3.2.3 Μέτρα για την αποφυγή εμφάνισης ρωγμών	16
2.3.3 Φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.....	17
2.3.4 Φράγματα βαρύτητας.....	20
2.3.4.1 Τοξωτά φράγματα.....	21
2.3.4.2 Αντηριδωτά φράγματα	23
2.3.4.3 Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος.....	25
2.3.4.5 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα φραγμάτων βαρύτητας	28
Κεφάλαιο 3 : Φράγματα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος ή σκληρού επιχώματος (Hardfill Dams)	29
3.1 Γενικά	29
3.2 Γεωμετρία.....	32
3.3 Υλικά.....	33
3.4 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες φραγμάτων ΑΚΣΕ	37
Κεφάλαιο 4 : Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος στο πρόγραμμα FLAC.....	42
4.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	42
4.2 Πρόγραμμα FLAC 7.....	44
4.3 Δημιουργία προσομοιώματος	45
4.3.1 Γεωμετρία μοντέλου, διακριτοποίηση, εισαγωγή υλικών	45
4.3.2 Συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις.....	48

4.4 Δυναμική ανάλυση μοντέλου	54
Κεφάλαιο 5 : Παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς φράγματος σκληρού επιχώματος	62
5.1 Εισαγωγή.....	62
5.2 Σεισμική απόκριση φράγματος σκληρού επιχώματος	64
5.2.1 Επίδραση της ποιότητας του Hardfill.....	64
5.2.2 Επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης.....	73
5.2.3 Επίδραση της έντασης του σεισμού	79
5.2.4 Επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης	85
Κεφάλαιο 6 : Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	95
6.1 Επίδραση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος	95
6.2 Επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης	97
6.3 Επίδραση του μεγέθους της σεισμικής έντασης.....	100
6.4 Επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης.....	102
Κεφάλαιο 7 : Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφία	106
Παράρτημα Α	108

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 2.1 : Ποσοστιαία κατανομή του νερού των ποταμών στον κόσμο.....	5	
Εικόνα 2.2 : Ποσοστιαία κατανομή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη	6	
Εικόνα 2.3 : Συνολικό ανεκμετάλλευτο υδροηλεκτρικό δυναμικό στην Ευρώπη	6	
Εικόνα 2.4 : Φράγμα Αζυλείας (Μουτάφης Ν., 2006)	8	
Εικόνα 2.5 : Φράγμα ιστιοπλοΐας (Σαχπάζης Κ., 2018).....	9	
Εικόνα 2.6 : Φράγμα Roselend, Γαλλία.....	10	
Εικόνα 2.7 : Φράγμα El Cayon, Mexico (Ντακούλας Π., Π.Θ.)	19	
Εικόνα 2.8 : Φράγμα Μεσοχώρας (Ντακούλας Π., Π.Θ.).....	20	
Εικόνα 2.9 : Φράγμα Three Gorges, Κίνα (Ντακούλας Π., Π.Θ.).....	21	
Εικόνα 2.10 : Αντηριδωτό φράγμα Λάδωνα (Μουτάφης Ν., 2009)	24	
Εικόνα 2.11 : Φράγμα Roselend (H=150m), Γαλλία	Εικόνα 2.12 : Φράγμα Bratlet (H=94m), ΗΠΑ	25
Εικόνα 2.13 : Φράγμα Daniel Johnson, Καναδάς (Ντακούλας Π., Π.Θ.).....	25	
Εικόνα 2.14 : Φράγμα Πλατανόβρυσης, Νέστος (Ντακούλας Π., Π.Θ.)	27	
Εικόνα 3.1 : Cindere Dam, Τουρκία (Ντακούλας Π., 2021).....	31	
Εικόνα 3.2 : Τυπική διατομή φράγματος κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος.....	32	
Εικόνα 3.3 : Στάδια κατασκευής φράγματος ΑΚΣΕ (Μουτάφης Ν., 2009)	38	
Εικόνα 3.4 : Εφαρμογή γεωμεμβράνης στο φράγμα Φιλιατρινού, Πελοπόννησος	39	
Εικόνα 3.5 : Κατασκευαστικές λεπτομέρειες κατάντη παρειάς φράγματος	40	
Εικόνα 3.6 : Διαμόρφωση πλίνθου σύμφωνα με τη μέθοδο στεγανοποίησης φράγματος	41	
Εικόνα 4.1 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με θεμελίωση χωρίς μάζα.....	43	
Εικόνα 4.2 : Σύγχρονα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων	44	
Εικόνα 4.3 : Δημιουργία κανάβου-Εισαγωγή συντεταγμένων γεωμετρίας	46	
Εικόνα 4.4 : Αποκοπή περιττών τετράκομβων στοιχείων κανάβου	46	
Εικόνα 4.5 : Συνοριακές συνθήκες θεμελίωσης (Flac 7, Itasca).....	48	
Εικόνα 4.6 : Εισαγωγή γεωμετρίας και ιδιοτήτων του σκυροδέματος της ανάντη πλάκας.....	49	
Εικόνα 4.7 : Εφαρμογή υδροστατικών πιέσεων στο μοντέλο	51	
Εικόνα 4.8 : Αρχικό μοντέλο ανάλυσης	52	
Εικόνα 4.9 : Οριζόντιες μετακινήσεις λόγω στατικής φόρτισης	53	
Εικόνα 4.10 : Κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω στατικής φόρτισης.....	53	
Εικόνα 4.11 : Κατακόρυφη ορθή τάση λόγω στατικής φόρτισης	54	
Εικόνα 4.12 : Υδροδυναμικές πιέσεις κατά Westergaard (Itasca, 2021).....	55	
Εικόνα 4.13 : Διατομή φράγματος και ορισμός του λόγου $\lambda = h/H$	56	
Εικόνα 4.14 : Οριζόντιες μετακινήσεις μετά το τέλος του σεισμού	60	
Εικόνα 4.15 : Κατακόρυφες μετακινήσεις μετά το τέλος του σεισμού	61	
Εικόνα 5.1 : Γεωμετρία της διατομής του φράγματος σκληρού επιχώματος (AutoCAD)	63	
Εικόνα 5.2 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 1)	66	
Εικόνα 5.3: Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 1).....	66	
Εικόνα 5.4 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης (Σενάριο 2)	68	
Εικόνα 5.5 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 2)	68	
Εικόνα 5.6 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης (Σενάριο 3)	70	
Εικόνα 5.7 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 3)	70	
Εικόνα 5.8 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 4)	72	
Εικόνα 5.9 : Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 4).....	72	
Εικόνα 5.10 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 5).....	74	

Εικόνα 5.11 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 5)	75
Εικόνα 5.12 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 6)	76
Εικόνα 5.13 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 6)	77
Εικόνα 5.14 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 7)	78
Εικόνα 5.15 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 7)	79
Εικόνα 5.16 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 8)	81
Εικόνα 5.17 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 8)	81
Εικόνα 5.18 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 9)	83
Εικόνα 5.19 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 9)	83
Εικόνα 5.20 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 10)	85
Εικόνα 5.21 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 10)	85
Εικόνα 5.22 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 11)	90
Εικόνα 5.23 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 11)	90
Εικόνα 5.24 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 12)	92
Εικόνα 5.25 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 12)	92
Εικόνα 5.26 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 13)	94
Εικόνα 5.27 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 13)	94

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) στην Ελλάδα.....	7
Πίνακας 3.1 : Ταξινόμηση κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Tanchev, 2014).....	29
Πίνακας 3.2 : Ιδιότητες υλικών σκληρού επιχώματος: Θλιπτική αντοχή, Γωνία τριβής ϕ , Συνοχή c , Μέτρο Ελαστικότητας, περιεκτικότητα σε τσιμέντο και ιπτάμενη τέφρα	37
Πίνακας 3.3 : Μέτρο Ελαστικότητας για διάφορα φράγματα τύπου FSHD (Tanchev, 2014)	41
Πίνακας 4.1 : Ιδιότητες υλικών σκληρού επιχώματος (hardfill) και θεμελίωσης (canyon).....	47
Πίνακας 4.2 : Ιδιότητες σκυροδέματος της ανάντη πλάκας	49
Πίνακας 4.3 : Συντελεστές α για τον υπολογισμό ιδιοπεριόδου φράγματος.....	56
Πίνακας 5.1 : Κατάλογος των παραμετρικών αναλύσεων για την διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς φράγματος σκληρού επιχώματος.....	63
Πίνακας 5.2. : Ιδιότητες του σκληρού επιχώματος για κάθε σενάριο 1, 2, 3, 4.	64
Πίνακας 5.3 : Ιδιότητες βράχου θεμελίωσης για τα σενάρια 1, 5, 6, 7.	73

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 : Τυπική διατομή ομοιογενούς φράγματος με ζώνες προστασίας.....	11
Σχήμα 2.2 : Τυπική διατομή γεωφράγματος με κεντρικό πυρήνα (Μουτάφης Ν., 2009).....	11
Σχήμα 2.3 : Τυπικές ζώνες φράγματος λιθορριπής (Ντακούλας Π., Π.Θ.)	14
Σχήμα 2.4 : Σημεία εμφάνισης ρωγμών λόγω ανομοιομορφων παραμορφώσεων	16
Σχήμα 2.5 : Τυπική διατομή φράγματος τύπου ΛΑΠΣ (Μουτάφης Ν., 2009)	18
Σχήμα 2.6 : Τυπική διατομή πλίνθου φράγματος τύπου ΛΑΠΣ (Μουτάφης Ν., 2009)	18
Σχήμα 2.7 : Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα, λιθόδεμα ή RCC (Μουτάφης Ν., 2009)	21
Σχήμα 2.8 : Κάτοψη τοξωτού φράγματος Ταυρωπού (Μουτάφης Ν., 2009)	23
Σχήμα 2.9 : Χαρακτηριστική τομή & Φωτογραφία φράγματος.....	23
Σχήμα 3.1 : Ανάλυση φράγματος FSHD, Londe & Lino, 1992	30
Σχήμα 3.2 : Συνολικές κατακόρυφες τάσεις και γωνία τριβής ϕ σε εναλλακτικά μοντέλα FSHD με παραβολικές όψεις, Londe & Lino, 1992 (Tanchev, 2014)	31
Σχήμα 3.3 : Θεωρητική κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο σώμα του φράγματος με και χωρίς νερό (Μουτάφης Ν., 2012).....	33
Σχήμα 3.4 : Θεωρητική κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο σώμα του φράγματος.....	33
Σχήμα 3.5 : Μονοαξονικές δοκιμές φόρτισης σε σκληρό επιχώμα.....	34
Σχήμα 3.6 : Επιρροή της περιεκτικότητας σε νερό στη θλιπτική αντοχή	35
Σχήμα 3.7 : Τυπικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού σκληρού επιχώματος	35
Σχήμα 3.8 : Αντοχή σκληρού επιχώματος στις 28 μέρες (Wu, Du, Yao & He, 2011)	36
Σχήμα 4.1 : Σεισμός Λευκάδας 2003: (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) Φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (για απόσβεση 5%).....	59
Σχήμα 5.1 : Σεισμός Αιγίου (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (απόσβεση 5%).....	86
Σχήμα 5.2 : Σεισμός Ληξουρίου (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (απόσβεση 5%).....	87
Σχήμα 5.3 : Σεισμός Μοναστηρακίου (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (απόσβεση 5%).....	88

Λίστα Γραφημάτων

Γράφημα 5.1 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 1).....	65
Γράφημα 5.2 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 1).....	65
Γράφημα 5.3 : Οριζόντιες μετακινήσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 2).....	67
Γράφημα 5.4 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 2).....	67
Γράφημα 5.5 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 3).....	69
Γράφημα 5.6 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 3).....	69
Γράφημα 5.7 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 4).....	71
Γράφημα 5.8 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 4).....	71
Γράφημα 5.9 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 5).....	73
Γράφημα 5.10 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 5).....	74
Γράφημα 5.11 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 6).....	75
Γράφημα 5.12 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 6).....	76
Γράφημα 5.13 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 7).....	77
Γράφημα 5.14 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 7).....	78
Γράφημα 5.15 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 8).....	80
Γράφημα 5.16 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 8).....	80
Γράφημα 5.17 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 9).....	82
Γράφημα 5.18 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 9).....	82
Γράφημα 5.19 : Οριζόντιες μετακινήσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 10).....	84
Γράφημα 5.20 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 10).....	84
Γράφημα 5.21 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 11).....	89
Γράφημα 5.22 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 11).....	89
Γράφημα 5.23 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 12)	91
Γράφημα 5.24 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 12).....	91
Γράφημα 5.25 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 13)	93
Γράφημα 5.26 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 13).....	93
Γράφημα 6.1 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 2, 3, 4	96
Γράφημα 6.2 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 2, 3, 4	97
Γράφημα 6.3 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 5, 6, 7	98
Γράφημα 6.4 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 5, 6, 7	99
Γράφημα 6.5 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 8, 9, 10	100
Γράφημα 6.6 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 8, 9, 10	101
Γράφημα 6.7: Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 11, 12, 13	102
Γράφημα 6.8 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 11, 12, 13	103

Γράφημα Παρ. Α. 39: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 10)	128
Γράφημα Παρ. Α. 40: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 10)	128
Γράφημα Παρ. Α. 41: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 11)	129
Γράφημα Παρ. Α. 42: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 11)	129
Γράφημα Παρ. Α. 43: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 11)	130
Γράφημα Παρ. Α. 44: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 11)	130
Γράφημα Παρ. Α. 45: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 12)	131
Γράφημα Παρ. Α. 46: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 12)	131
Γράφημα Παρ. Α. 47: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 12)	132
Γράφημα Παρ. Α. 48: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 12)	132
Γράφημα Παρ. Α. 49: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 13)	133
Γράφημα Παρ. Α. 50: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 13)	133
Γράφημα Παρ. Α. 51: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 13)	134
Γράφημα Παρ. Α. 52: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 13)	134

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή: Αντικείμενο εργασίας – Στόχοι

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης φράγματος ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (γνωστού και ως σκληρού επιχώματος) για διαφορετικές περιπτώσεις, εξετάζοντας την επιρροή του υλικού του σκληρού επιχώματος, της δυσκαμψίας του υποβάθρου θεμελίωσης, και της αυξανόμενης έντασης και διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης με στόχο τον βέλτιστο σχεδιασμό του φράγματος.

Αρχικά, θα δοθεί ο ορισμός του φράγματος ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος ή σκληρού επιχώματος, όπως συνηθίζεται να αναφέρεται, καθώς θα γίνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση των διαφόρων τύπων φραγμάτων, και της εξέλιξης σε αυτό το είδος φραγμάτων, που είναι δυνατόν να αποτελεί την βέλτιστη επιλογή σε αρκετές περιστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται ποια είναι τα οφέλη από την κατασκευή ενός φράγματος ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος, σε ποιες περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η κατασκευή τους και ποια σημεία θέλουν ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο δημιουργίας του προσομοιώματος, η γεωμετρία του φράγματος, η οποία παραμένει σταθερή σε όλες τις αναλύσεις, και τα στάδια της ανάλυσης. Πρώτα γίνεται η στατική ανάλυση του φράγματος όπου εφαρμόζεται η φόρτιση του ιδίου βάρους του φράγματος, ακολουθεί η εισαγωγή του νερού του ταμιευτήρα που αλληλοεπιδρά με το φράγμα και τέλος η φόρτιση υπό σεισμική διέγερση με βάση ιστορίες σεισμών που έχουν καταγραφεί παλαιότερα στον Ελλαδικό χώρο. Η προσομοίωση του μοντέλου αλληλεπίδρασης φράγμα-θεμελίωση-νερό της λεκάνης του ταμιευτήρα γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FLAC 7.0.

Κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του συστήματος φράγμα-θεμελίωση-νερό της λεκάνης του ταμιευτήρα. Έτσι, μελετώνται οι μετατοπίσεις-καθιζήσεις, η γενική παραμορφωσιμότητα του μοντέλου καθώς και οι επιταχύνσεις που σημειώνονται στο μοντέλο προσομοίωσης.

Απόρροια των αναλύσεων είναι η εξαγωγή αποτελεσμάτων κατακόρυφων και οριζοντίων επιταχύνσεων και σχετικών κατακόρυφων και οριζοντίων μετακινήσεων που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας του φράγματος, και κατά μήκος της πλάκας σκυροδέματος στην ανάντη παρειά του φράγματος που αποτελεί και διεπιφάνεια νερού-φράγματος. Επίσης η κατανομή των μονίμων οριζοντίων μετατοπίσεων και καθιζήσεων, καθώς και παραμορφώσεων και βλαβών στο τέλος της σεισμικής δόνησης. Βάσει κυρίως αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται η σύγκριση της σεισμικής απόκρισης του φράγματος για τα διαφορετικά σενάρια ανάλυσης όπως θα επεξηγηθούν παρακάτω, γίνεται η τελική αξιολόγηση, προκύπτουν συμπεράσματα και υποδεικνύονται σημεία για την μετ' έπειτα εξέλιξη της ερευνητικής διαδικασίας φραγμάτων από ισχνό κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.

1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

- **Κεφάλαιο 1**

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο περιεχόμενο της εργασίας και τον σκοπό της, καθώς γίνεται και μια αναφορά στη διάρθρωσή της.

- **Κεφάλαιο 2**

Στο δεύτερο κεφάλαιο διενεργείται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας των φραγμάτων, γίνεται αναφορά στην ιστορική εξέλιξη της τεχνοτροπίας κατασκευής των φραγμάτων, τα διάφορα είδη φραγμάτων που αποκομίσαμε από αυτή την εξέλιξη, τις χρήσεις τους καθώς και στην αναγκαιότητα ύπαρξης αυτών των έργων.

- **Κεφάλαιο 3**

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα αξονοσυμμετρικά φράγματα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος ή σκληρού επιχώματος, και συγκεκριμένα στη δομή, τα υλικά και τις απαιτήσεις μιας τέτοιου είδους κατασκευής φράγματος. Αναλύεται επίσης ο σχεδιασμός τους, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και το πεδίο εφαρμογής τέτοιου είδους φραγμάτων.

- **Κεφάλαιο 4**

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συνολική διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου προσομοίωσης στο χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών (FLAC 7.0) του υπό μελέτη συστήματος φράγμα-θεμελίωση-νερό που επιλέχθηκε (γεωμετρία μοντέλου, ιδιότητες υλικών, και σεισμική διέγερση).

- **Κεφάλαιο 5**

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Α, που αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, λόγω του μεγάλου όγκου αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

- **Κεφάλαιο 6**

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται και συγκρίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του πέμπτου κεφαλαίου με συνδυαστικά γραφήματα, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων.

- **Κεφάλαιο 7**

Στο έβδομο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου.

- **Βιβλιογραφία**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε βιβλία, άρθρα δημοσιεύσεων, σημειώσεις και ακαδημαϊκό υλικό που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

- **Παράρτημα Α**

Στο Παράρτημα Α παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης που δεν δόθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 2 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση φραγμάτων

2.1 Γενικά – Σκοπός κατασκευής φραγμάτων

Το νερό αποτελεί έναν από τους λίγους φυσικούς πόρους χωρίς τον οποίο δεν υπάρχει ζωή, διανέμεται άνισα στον κόσμο σε συνάρτηση με την γεωγραφία, το κλίμα, την εποχή και την ιδιομορφία του περιβάλλοντος. Το νερό είναι ένας αρκετά σημαντικός παράγοντας για την οικονομία και την βιωσιμότητα όλων των χωρών.

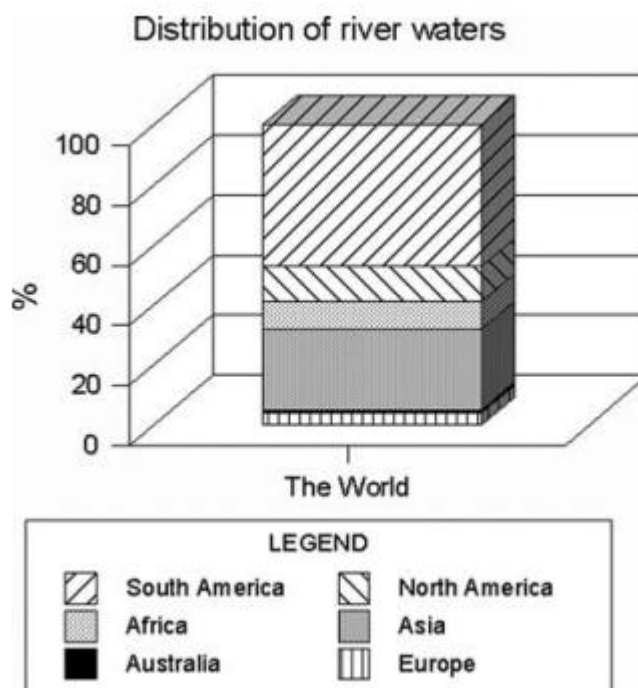
Λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού στη Γη, των αυξημένων απαιτήσεων κατανάλωσης πόσιμου νερού, της κατάχρησης των φυσικών του πόρων, της ρύπανσης, μόλυνσης, οι διαθέσιμοι πόροι του πόσιμου νερού δεν επαρκούν για να καλύψουν τις σύγχρονες ανάγκες σε συνδυασμό με την επιρροή της κλιματικής αλλαγής που αποτελεί απόρροια όλων των παραπάνω παραγόντων.

Ακόμη, το 97% του νερού στη Γη είναι «αλμυρό» νερό και μόνο το 3% είναι «γλυκό». Λίγο παραπάνω από τα δύο τρίτα (2/3) αυτού του «γλυκού» νερού βρίσκεται σε παγετώνες και πολικά παγοκαλύμματα, το υπόλοιπο (~1%) βρίσκεται με τη μορφή υγρού «γλυκού» νερού, κυρίως ως υπεδάφιο νερό, και μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα του συνολικού νερού της Γης βρίσκεται στην επιφάνεια του πλανήτη μας ή και στην ατμόσφαιρα του και αποτελεί διαθέσιμη πηγή νερού για την ύπαρξη ανθρώπινης ζωής.

Τα ποτάμια, που τροφοδοτούνται κυρίως από βροχοπτώσεις, ικανοποιούν τις ανάγκες σε νερό του 90% του παγκόσμιου πληθυσμού. Το υδάτινο δυναμικό των ποταμών ανέρχεται στα 2.000 km³ νερού, το οποίο ποσό κατανέμεται ανομοιόμορφα στις ηπείρους, όπως δίνεται στη συνέχεια. Στην Ευρώπη, το υδάτινο δυναμικό εκτιμάται στα 76 km³, στην Ασία στα 533 km³, στην Αφρική στα 184 km³, στη Βόρεια Αμερική στα 236 km³, στη Νότια Αμερική στα 947 km³ και στην Αυστραλία στα 24 km³ (Εικόνα 2.1). Το ετήσιο υδάτινο δυναμικό των ποταμών ανέρχεται στα 38.000 km³ με μέση περίοδο αναπλήρωσης στις 18-20 μέρες.

Λόγω αυτής της ανομοιόμορφης κατανομής του νερού, πολλές περιοχές υποφέρουν από ξηρασία ενώ άλλες έχουν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού. Επίσης, η ίδια περιοχή θα μπορούσε, κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου του έτους, να εκτεθεί σε ξηρασία, ενώ υπέφερε από πλημμύρες σε άλλη περίοδο. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η εκμετάλλευση του νερού των ποταμών με την κατασκευή φραγμάτων, δημιουργώντας έτσι ταμιευτήρες για την αποθήκευση και χρήση του νερού. Έτσι, τα φράγματα συμβάλλουν σημαντικά στην χωρική και χρονική ομογενοποίηση του υδάτινου δυναμικού των ποταμών.

Η κατασκευή φραγμάτων κρίνεται, λοιπόν, πλέον αναγκαία καθώς εκτός από την διαχείριση του νερού (ύδρευση, άρδευση, ρύθμιση της παροχτετευτικότητας των ποταμών) εξυπηρετεί και στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποτελεί την πιο «φιλική» προς το περιβάλλον ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, περιορίζοντας κατά πολύ το επιβλαβές αποτύπωμα του ανθρώπου στον πλανήτη.



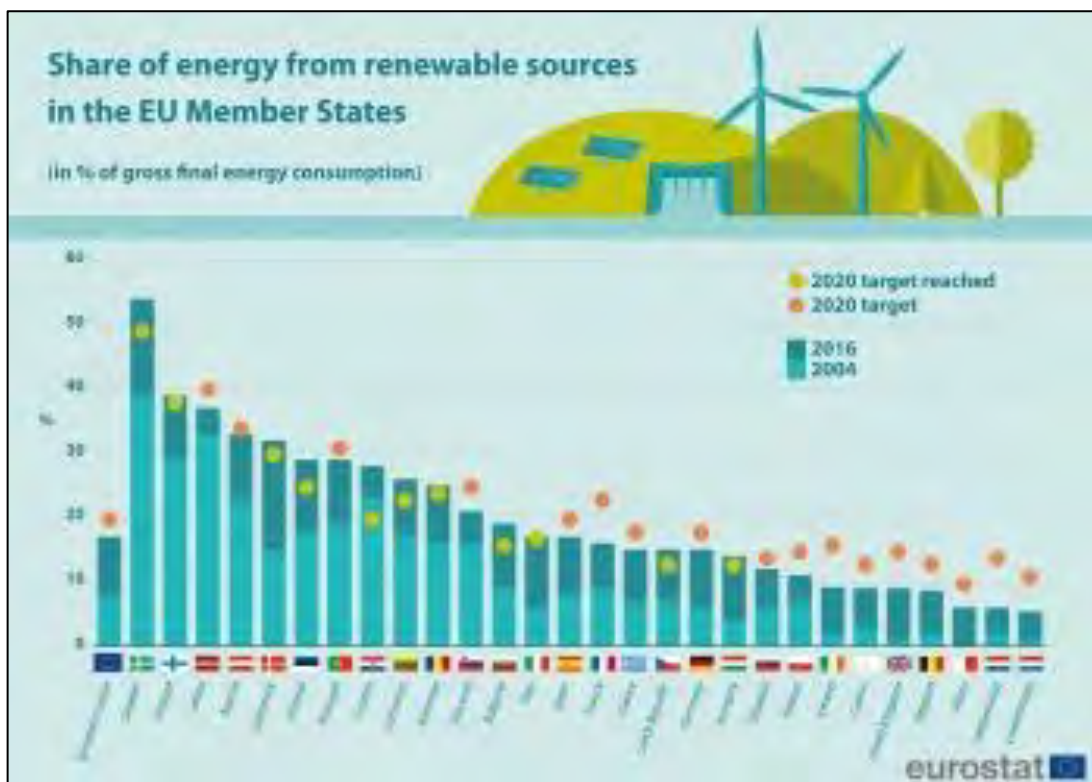
Εικόνα 2.1 : Ποσοστιαία κατανομή του νερού των ποταμών στον κόσμο

Η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς ανέρχεται στα 3.500 TWh, που αντιπροσωπεύει το ποσοστό του 20% της συνολικής κατανάλωσης σε ηλεκτρική ενέργεια και το ποσοστό του 7% της συνολικής κατανάλωσης από όλες τις πηγές ενέργειας, με σημαντικές διακυμάνσεις από χώρα σε χώρα. Μεταξύ των χωρών που έχουν το υψηλότερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς είναι η Νορβηγία (99%), η Βραζιλία (πάνω από 90%), η Αλβανία (80%), η Αυστρία (70%), ο Καναδάς (πάνω από 60%). Η συνολική εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύς στον κόσμο ανέρχεται στα 975.500 MW, ενώ αναμένεται να προστεθούν περισσότερα από 176.000 MW από υδροηλεκτρικά έργα που βρίσκονται υπό κατασκευή.

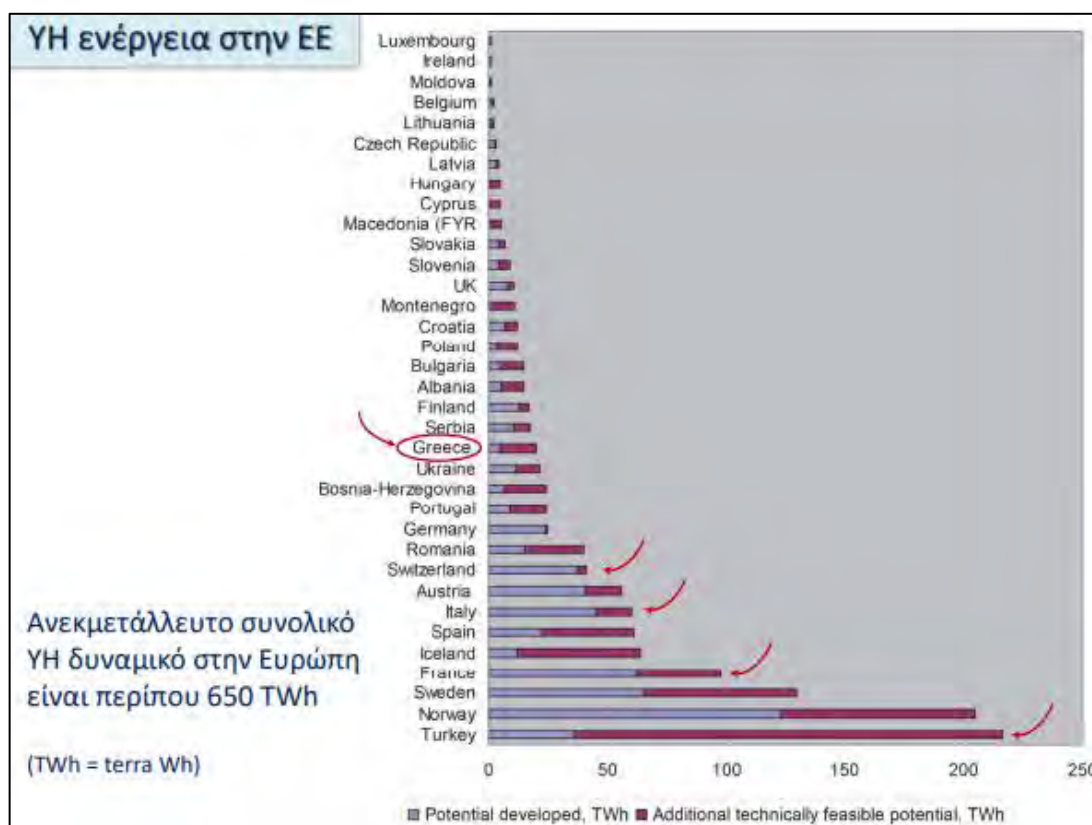
Μερικά από τα πλεονεκτήματα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- Οικονομικά πολύ ανταγωνιστική
- Πολύ φιλική προς το περιβάλλον, καθώς μειώνει τις εκπομπές CO₂
- Εξαιρετικά ευέλικτη στην χρήση με ταχύτητα απόκρισης 10 φορές μεγαλύτερη από θερμικές πηγές ενέργειας, πράγμα που βοηθά στην αντιμετώπιση των έντονων διακυμάνσεων ζήτησης αλλά και προσφοράς ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας.
- Συμβάλλει σημαντικά στην σταθερότητα του δικτύου διανομής ενέργειας, ώστε να είναι δυνατή η ενσωμάτωση των έντονα και απρόβλεπτα μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως είναι η ηλιακή και αιολική ενέργεια.

Στη παρούσα περίοδο, η εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη είναι 190 GW, με την υδροηλεκτρική ενέργεια να αντιστοιχεί στο 70% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Περίπου το 50% του υδροηλεκτρικού δυναμικού έχει αξιοποιηθεί στην Ευρώπη, ενώ σε χώρες εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο.



Εικόνα 2.2 : Ποσοστιαία κατανομή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη



Εικόνα 2.3 : Συνολικό ανεκμετάλλετο υδροηλεκτρικό δυναμικό στην Ευρώπη

Η Ευρώπη παράγει το 20% της ενέργειας που καταναλώνει από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και αναμένεται τριπλασιασμός των μεταβλητών ΑΠΕ (ηλιακή, αιολική ενέργεια), γεγονός που συνεπάγεται την αναγκαιότητα ενίσχυσης της σταθερότητας του συστήματος από υδροηλεκτρικά συστήματα.

Στην χώρα μας, το ποσοστό κάλυψης των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια από υδατοπτώσεις είναι μόλις 3,8%. Υπάρχουν 23 υδροηλεκτρικοί σταθμοί συνολικής εγκατεστημένης ισχύος περίπου 3.300 MW. Μερικοί από αυτούς αναφέρονται παρακάτω (Πίνακας 2.1).

ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΕΓΚΑΤΕ-ΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΚΑΘΑΡΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
ΔΕΗ	Άγρας	Άγρας I, II	2x25	2x25
ΔΕΗ	Ασώματα	Ασώματα I, II	2x54	2x54
ΔΕΗ	Εδεσσαίος	Εδεσσαίος	19	19
ΔΕΗ	Θησαυρός	Θησαυρός I-III	3x128	3x128
ΔΕΗ	Καστράκι	Καστράκι I-IV	4x80	4x80
ΔΕΗ	Κρεμαστά	Κρεμαστά I-IV	4x109.3	4x109.3
ΔΕΗ	Λάδωνας	Λάδωνας I, II	2x35	2x35
ΔΕΗ	Πηγές Αώου	Πηγές Αώου I, II	2x105	2x105
ΔΕΗ	Πλαστήρας	Πλαστήρας I-III	3x43.3	3x43.3
ΔΕΗ	Πλατανόβρυση	Πλατανόβρυση I, II	2x58	2x58
ΔΕΗ	Πολύφυτο	Πολύφυτο I-III	3x125	3x125
ΔΕΗ	Πουρνάρι I	Πουρνάρι I, I-III	3x100	3x100
ΔΕΗ	Πουρνάρι II	Πουρνάρι II, I-II	2x16	2x16
		Πουρνάρι II, III	1.6	1.6
ΔΕΗ	Στράτος	Στράτος I, II	2x75	2x75
ΔΕΗ	Σφηκιά	Σφηκιά I-III	3x105	3x105
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ			3017.7	3017.7

Πίνακας 2.1 : Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) στην Ελλάδα

2.2 Ιστορική αναδρομή – Βασικές χρήσεις φραγμάτων

2.2.1 Ιστορική αναδρομή

Τα φράγματα αρχικά κατασκευάστηκαν για την πρόληψη πλημμυρών και την παροχή νερού για άρδευση και ύδρευση. Ο Έλληνας ιστορικός Ηρόδοτος ήταν ο πρώτος που κατέγραψε την ύπαρξη φράγματος, αναφερόμενος σε ένα που χτίστηκε κάθετα στον ποταμό Νείλο στην Αίγυπτο περίπου το 2.900 π.Χ. Αυτό το φράγμα είχε ως σκοπό την προστασία της πόλης της Μέμφιδος από πλημμύρες και παρέμεινε λειτουργικό για περίπου 4.500 χρόνια. Τα φράγματα ήταν ιδιαίτερα δημοφιλή και κατά τα Ρωμαϊκά χρόνια, και κάποια από αυτά, δύο στον αριθμό, είναι ακόμη σε χρήση περίπου 2.000 χρόνια αργότερα. Τα παλαιότερα χρόνια τα φράγματα ήταν κατά κύριο λόγο λιθοκτιστα χρησιμοποιώντας ως συνδετικό υλικό, μείγμα από ασβέστη και ποζολάνη, ωστόσο είχαν γίνει αναφορές σε χωμάτινα φράγματα, τα οποία λόγω της ευαισθησίας τους στις καιρικές συνθήκες, διαβρώθηκαν με την πάροδο του χρόνου. Ένα καλά διατηρημένο φράγμα στην Ελλάδα μέχρι σήμερα, είναι το φράγμα της Αζυλείας, το

οποίο είναι ένα λιθόκτιστο φράγμα ύψους 11 m, που κατασκευάστηκε τον 4^ο αιώνα π.χ. (Εικόνα 2.4). Από την εποχή των Ρωμαϊκών χρόνων μέχρι και τον 18^ο αιώνα δεν βρέθηκαν καταγραφές για κατασκευές φραγμάτων.



Εικόνα 2.4 : Φράγμα Αζυλείας (Μουτάφης Ν., 2006)

Κατά τον 18^ο αιώνα, εξαιτίας της βιομηχανικής επανάστασης σε Ευρώπη και Αμερική και της άμεσης ανάγκης κάλυψης της αυξανόμενης ζήτησης και χρήσης του νερού, συστήνεται η πρώτη επιστημονική κοινότητα η οποία αρχίζει να θέτει το θεσμικό πλαίσιο γύρω από την ανάλυση του σχεδιασμού και κατασκευής των φραγμάτων.

Τον 19^ο αιώνα κατασκευάζονται τα πρώτα φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα σε στενά φαράγγια βραχώδους υποβάθρου. Η εξέλιξη της τεχνολογίας του σκυροδέματος οδήγησε στη βελτιστοποίηση του σχήματος των φραγμάτων με την εισαγωγή των τοξωτών φραγμάτων και των φραγμάτων κυλινδρικού σκυροδέματος δίνοντας ευελιξία στην αντιμετώπιση υποβάθρων θεμελίωσης ποικίλων αναγλύφων και επιτυγχάνοντας μείωση του κόστους και αύξηση της ταχύτητας κατασκευής.

2.2.2 Βασικές χρήσεις φραγμάτων

Το φράγμα είναι ένα τεχνικό έργο με λειτουργία κλειστής κοιλότητας για αποθήκευση νερού. Ωστόσο, τα υδροηλεκτρικά φράγματα, με τις πολλαπλές λειτουργίες τους, έχουν σημαντική επίδραση στην εθνική οικονομία και παρέχουν σημαντική συνεισφορά στην κοινωνική ζωή των περιοχών όπου βρίσκονται και λειτουργούν, με τις εξής χρήσεις:

- Παραγωγή ενέργειας

Η παραγόμενη ενέργεια είναι «πράσινη-καθαρή», καθώς δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με εκπομπές CO₂.

- Αντιπλημμυρική Προστασία

Οι ταμιευτήρες των ποταμών με την ικανότητα να συγκρατούν μεγάλο όγκο νερού δημιουργούν ανάσχεση των πλημμυρικών φαινομένων παρέχοντας αντιπλημμυρική προστασία στις κατάντη περιοχές των Υδροηλεκτρικών Σταθμών (ΥΗΣ) περιοχές.

- Αρδεύσεις

Από τους ταμιευτήρες των ΥΗΣ στην Ελλάδα αρδεύονται περίπου 5.000.000 στρέμματα, συμβάλλοντας έτσι στην γεωργική παραγωγή της χώρας.

- Ύδρευση

Οι πληθυσμοί πολλών πόλεων υδρεύονται από τους ταμιευτήρες των ΥΗΣ (π.χ. Θεσσαλονίκη, Καρδίτσα, Άρτα, Αγρίνιο, κ.λπ.).

- Ναυταθλητισμός

Πολλές περιοχές των λιμνών των ΥΗΣ χρησιμοποιούνται για ναυταθλητικές δραστηριότητες όπως θαλάσσιο σκι, κωπηλασία, καγιάκ, ιστιοπλοΐα, κ.λπ.



Εικόνα 2.5 : Φράγμα ιστιοπλοΐας (Σαχπάζης Κ., 2018)

- Αλιεία

Η αλιεία τόσο σε επαγγελματικό όσο και σε ερασιτεχνικό επίπεδο είναι μια από τις δραστηριότητες μέσα στους ταμιευτήρες των ΥΗΣ, οι οποίοι διαθέτουν καθαρό νερό.

- Αναψυχή

Οι όχθες των λιμνών είναι ιδανικές θέσεις για δημιουργία πόλων αναψυχής και τουρισμού.

- Αναβάθμιση Περιβάλλοντος

Σε γενικές γραμμές, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί βελτιώνουν το περιβάλλον δημιουργώντας οικοσυστήματα στις περιοχές των λιμνών και διατηρώντας οικολογικές ροές στα ποτάμια για την προστασία της ιχθυοπανίδας.

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά - Τύποι φραγμάτων

Τα φράγματα διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με το βασικό υλικό κατασκευής τους:

Φράγματα από σκυρόδεμα (δύσκαμπτα)

- Βαρύτητας (Concrete gravity dams)
- Αντηριδωτά (Buttress gravity dams)
- Τοξωτά (Arch-gravity dams)
- Τοξωτά διπλής καμπυλότητας (Arch double curvature dams)
- Σύνθετα αντηριδωτά-τοξωτά
- Κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete dams, RCC)
- Κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (Hardfill dams)



*Εικόνα 2.6 : Φράγμα Roselend, Γαλλία
(Ντακούλας Π., Π.Θ.)*

Φράγματα από γεωυλικά (εύκαμπτα)

- Επιχώματα εδάφους (Earth dams)
- Λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα (Earth core rockfill dams, ECRD)
- Λιθορριπής με πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη παρειά (Concrete faced rockfill dams, CFRD)

Στην πραγματικότητα, τα φράγματα σκληρού επιχώματος (hardfill) ή ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος είναι αποτέλεσμα εξέλιξης στο σχεδιασμό φραγμάτων κυλινδρούμενου σκυροδέματος λόγω των απαιτήσεων σε μείωση του όγκου και του κόστους κατασκευής. Το σκληρό επίχωμα μπορεί να οριστεί ως ένα ενδιάμεσο υλικό μεταξύ υλικού επιχώματος και σκυροδέματος, που έχει υψηλή συνοχή και αντοχή στη διάβρωση. Με την εισαγωγή των φραγμάτων σκληρού επιχώματος κατά τη δεκαετία του 1990, ελαχιστοποιείται ο όγκος των φραγμάτων, καθώς έχουν απότομες παρειές, και δίνεται η δυνατότητα κατασκευής τέτοιων φραγμάτων σε ευρύτερο φάσμα πετρωμάτων, καθώς δεν απαιτείται υψηλή αντοχή πετρώματος θεμελίωσης. Ωστόσο, θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στα φράγματα σκληρού επιχώματος (hardfill) σε επόμενο κεφάλαιο.

2.3.1 Φράγματα από γεωυλικά

Τα φράγματα επιχώματος είναι συνήθως χωμάτινα φράγματα που κατασκευάζονται από υλικό εδάφους της γύρω περιοχής.

Διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Ζώνη 7: Διάφορες ζώνες, π.χ. οδοποιίας, σταθεροποιητικοί αναβαθμοί, τυχαία υλικά κ.ο.κ

Ο πυρήνας του είναι δυνατόν να είναι κεντρικός ή κεκλιμένος με συμμετρική κλίση της ανάντη και κατάντη παρειάς του, ή και όχι.

2.3.1.1 Υλικά κατασκευής γεωφραγμάτων

Ο πρωταρχικός σκοπός στον σχεδιασμό των γεωφραγμάτων είναι η βέλτιστη αξιοποίηση των υλικών που βρίσκονται στην περιοχή του έργου. Συνεπώς, η χρήση υλικών εκτός της περιοχής του έργου θεωρείται γενικά λανθασμένη, καθώς αυξάνει το κόστος κατασκευής λόγω της μεταφοράς υλικών από μακρινές περιοχές.

Η διαστρωμάτωση αυτών των φραγμάτων επιφέρει τη χρήση διαφορετικών υλικών για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους και την κάλυψη των αδυναμιών τους. Το γεωφράγμα μπορεί να κατασκευαστεί από εδαφικά ή/και βραχώδη υλικά που βρίσκονται συνήθως στη γειτονιά του έργου. Ο σχεδιασμός του αναχώματος βασίζεται στην βέλτιστη οικονομοτεχνική εκμετάλλευση των υλικών.

Ο πυρήνας του γεωφράγματος είναι πρακτικά αδιαπέρατος (ή αποτελεί υλικό με χαμηλή διαπερατότητα) και εξασφαλίζει τη στεγανότητα του φράγματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πυρήνες των φραγμάτων δεν είναι απολύτως αδιαπέρατοι και γι' αυτό το λόγο με την πάροδο του χρόνου αναπτύσσεται διήθηση νερού και ως συνέπεια ένα δίκτυο ροής.

Κατά την κατασκευή του πυρήνα ενός γεωφράγματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εδαφικά υλικά με ποσοστό λεπτόκοκκου κλάσματος (δηλ. υλικό που διέρχεται από το πρότυπο κόσκινο ASTM No 200, με άνοιγμα 0,075 mm) μεγαλύτερο από 20%.

Τα κελύφη του γεωφράγματος κατασκευάζονται συνήθως από γαιώδη ή βραχώδη υλικά. Σε αυτά περιλαμβάνονται :

- τα αμμοχάλικα ποταμοχειμάρριων αποθέσεων,
- υλικά παλαιών αναβαθμίδων ποταμών
- πλευρικά κορήματα
- προϊόντα εκσκαφής αποσαθρωμένου βράχου

Στα βραχώδη υλικά περιλαμβάνονται :

- προϊόντα ανάπτυξης λατομείου
- προϊόντα απαιτούμενων εκσκαφών σε βραχώδεις σχηματισμούς

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κελυφών, λόγω του μεγάλου όγκου τους, σχετικά με τις άλλες ζώνες του γεωφράγματος θα πρέπει να τοποθετούνται στο ανάχωμα με τη μικρότερη δυνατή επεξεργασία, εάν είναι εφικτό, όπως προκύπτουν αμέσως μετά την εκσκαφή τους. Η διαλογή υλικών, το φιλτράρισμα ογκωδών τεμαχίων, η απομάκρυνση λεπτόκοκκου κλάσματος με πλύσιμο ή κοσκίνισμα επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος της κατασκευής, τόσο λόγω του κόστους εργασίας όσο και λόγω της χρονικής καθυστέρησης.

2.3.1.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα χωμάτων φραγμάτων

Τα γεωφράγματα ή φράγματα επιχώματος παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα

- Κατάλληλα για ευρείες και στενές κοιλάδες
- Κατάλληλα για ευρείες συνθήκες (από υγιή βράχο έως συμπιεστό και σχετικά διαπερατό έδαφος)
- Κάνουν χρήση φυσικών υλικών μειώνοντας το κόστος
- Εξαιρετικά ευέλικτα στη χρήση διαφορετικών τύπων υλικών για το επίχωμα, με κατάλληλη διαζώνιση
- Η κατασκευή τους είναι αυτοματοποιημένη και μηχανοποιημένη (λιγότερη ανθρώπινη παρέμβαση για καλουπώματα ή χρόνο ωρίμανσης)
- Με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να δεχθούν σημαντική καθίζηση χωρίς κίνδυνο ρωγμών ή καταστροφής
- Με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να αντισταθούν επαρκώς σε σεισμό

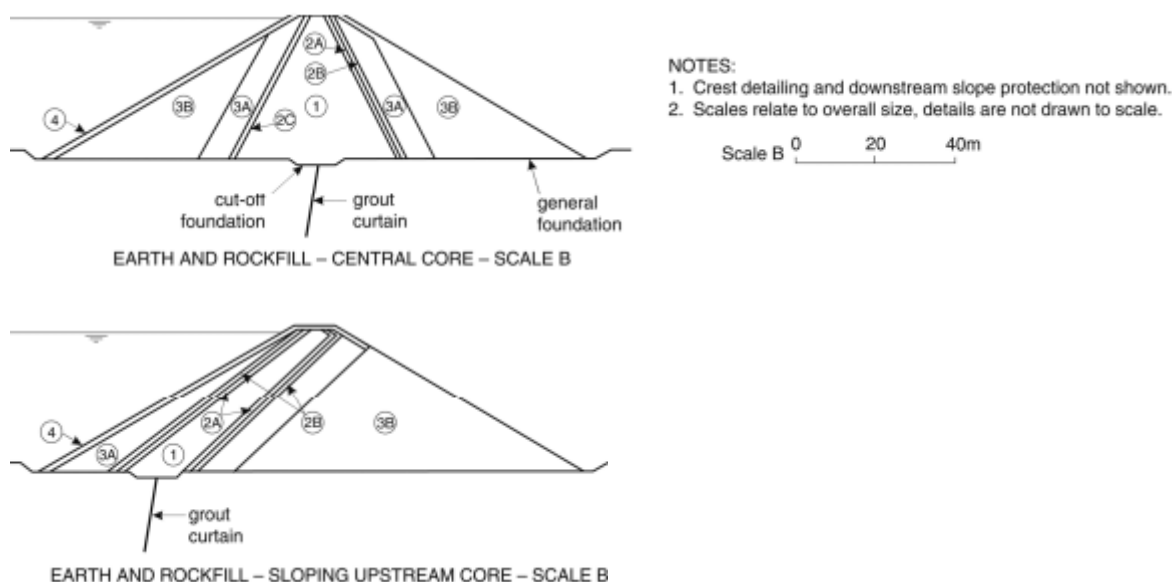
Μειονεκτήματα

- Μεγαλύτερη εγγενής ευαισθησία σε ζημιά ή καταστροφή κατά την υπερπήδηση της στέψης
- Ευάλωτα σε μη εμφανή διαρροή και εσωτερική διάβρωση ή διασωλήνωση του φράγματος ή της θεμελίωσης
- Για θεμελίωση σε βαθιά ή μη στερεοποιημένα εδαφικά στρώματα, είναι πιο ευάλωτα σε καθιζήσεις και ρευστοποίηση
- Ο υπερχειλιστής θα πρέπει να κατασκευαστεί στα αντερείσματα και όχι στο επίχωμα.

2.3.2 Φράγματα λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα

Τα φράγματα λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα επιτρέπουν την ροή του νερού στη διατομή τους. Στο εσωτερικό της διατομής τους και κατά μήκος του άξονα τους κατασκευάζεται ένα σώμα σχεδόν αδιαπέρατο, αποτελούμενο από συμπυκνωμένη υψηλής πλαστιμότητας άργιλο, τον λεγόμενο πυρήνα. Από τον πυρήνα έως ένα συγκεκριμένο βάθος κατασκευάζεται διάφραγμα ανακοπής της ροής του νερού, με αποτέλεσμα τον υποβιβασμό της στάθμης του νερού προς κατάντη. Εκατέρωθεν του πυρήνα τοποθετούνται διαπερατά υλικά από την γύρω περιοχή, διαμορφώνοντας τα εξωτερικά κελύφη του φράγματος.

Στο επόμενο σχήματα δίνονται οι τυπικές ζώνες διαζωνισμένου φράγματος λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα.



- | | |
|--|--|
| 1. Μη διαπερατό επίχωμα: έλεγχος ροής | 3A. Λιθορριπή: προσδίδει ευστάθεια |
| 2A. Λεπτό φίλτρο: έλεγχος ροής, πίεσης πόρων και διάβρωσης της ζώνης 1 | 3B. Χονδρόκοκκη λιθορριπή: προσδίδει ευστάθεια |
| 2B. Χονδρόκοκκο φίλτρο: έλεγχος διάβρωσης της 2A | 4. Rip-rap: έλεγχος διάβρωσης από κυματισμό ανάντη (ή κατόντη λόγω υπερχειλιστή) |
| 2C. Φίλτρο ανάντη ή κάτω από rip-rap | |
| 2D. Λεπτή στρώση για έδραση της πλάκας | |

Σχήμα 2.3 : Τυπικές ζώνες φράγματος λιθορριπής (Ντακούλας Π., Π.Θ.)

2.3.2.1 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά φραγμάτων λιθορριπής με αργιλικό πυρήνα

Όταν υπάρχει ανάγκη για την κατασκευή μεγάλου φράγματος, συνήθως κατασκευάζεται διαζωνισμένο φράγμα λιθορριπής. Κατασκευάζονται σε βραχώδη θεμέλια με σπάνιες εξαιρέσεις σε χαμηλότερα φράγματα. Τα κελύφη τους κατασκευάζονται από χονδρόκοκκο υλικό – χαλίκι, κροκάλες, με κλίσεις που ανάλογα από το υλικό και την θεμελίωση, διακυμαίνονται από 1:1.5 έως 1:2.2.

Η υδατοστεγανότητα ενός φράγματος παρέχεται μέσω του πυρήνα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από λεπτόκοκκο συνεκτικό υλικό, με πλάτος στέψης 3-4 m (για λειτουργικούς λόγους – διάβαση οχημάτων) ενώ στη βάση είναι συνήθως 0.2-0.5 φορές του ύψους του φράγματος, το οποίο εξαρτάται από την υδατοστεγανότητα και την παραμορφωσιμότητα του υλικού κατασκευής.

Τα φίλτρα λειτουργούν ως μεταβατικά στρώματα μεταξύ κελυφών και πυρήνα, εξυπηρετώντας τους ακόλουθους σκοπούς:

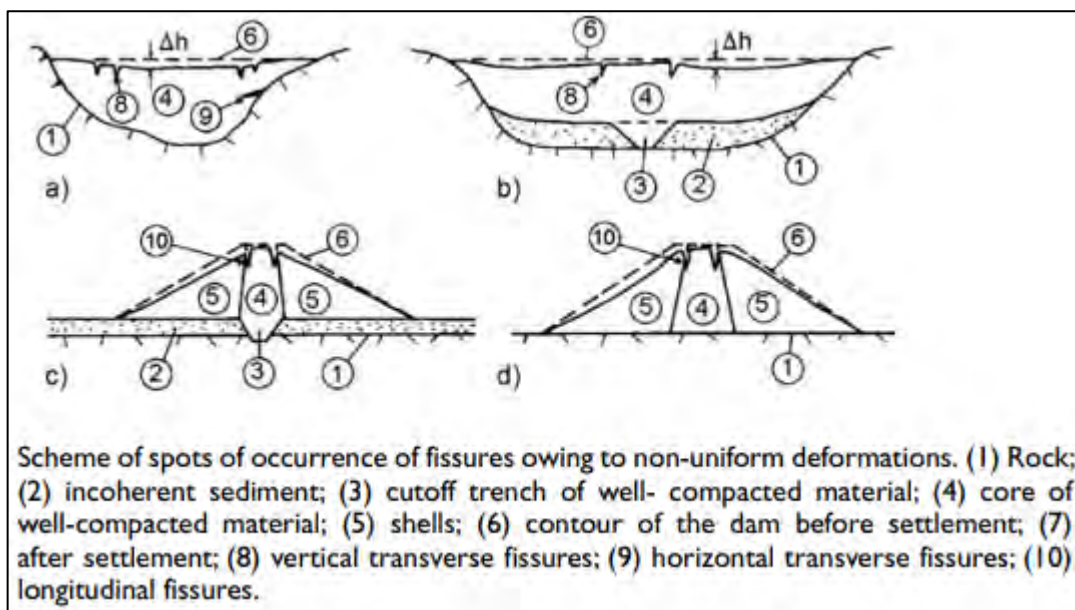
- Παρέχουν σταδιακή μετάβαση μεταξύ υλικών πυρήνα και κελύφους, τα οποία έχουν εξαιρετικά διαφορετική κοκκομετρική σύνθεση.
- Αποτρέπουν την μηχανική διάβρωση του φράγματος, δηλαδή την απομάκρυνση υλικού από τον πυρήνα προς το κατόντη κέλυφος μέσω της ροής του νερού και μειώνουν την παραμορφωσιμότητα στο σώμα του φράγματος, διασφαλίζοντας την αντοχή των υλικών του.

- Δίνουν τη δυνατότητα αυτόματης επούλωσης πιθανών ρωγμών στον πυρήνα του φράγματος. Συγκεκριμένα, υπό πίεση νερού το υλικό του παρακείμενου στρώματος φίλτρου συμπιέζεται σε τέτοιες σχισμές που θα μπορούσε να υπάρξει σημαντική μείωση της διαρροής νερού, αποτρέποντας έτσι την επέκταση των πιθανών ρωγμών.

2.3.2.2 Είδη ρωγμών και αιτίες εμφάνισης τους

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τον βαθμό επικινδυνότητας ανάπτυξης ρωγμών, οι τοπογραφικές συνθήκες στη θέση του φράγματος, το γεωλογικό υπόβαθρο, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής, τα στάδια κατασκευής του φράγματος με ιδιαιτερότητα να δίνεται κατά την πλήρωση της δεξαμενής, η ένταση και η διάρκεια πιθανών σεισμικών φορτίσεων, ατμοσφαιρικοί παράγοντες (Khan, 1983). Οι ρωγμές που δημιουργούνται στον πυρήνα του φράγματος μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

1. Ανάλογα με τη θέση και τη γεωμετρία τους, σε επιφανειακές ή εσωτερικές ρωγμές, σε εγκάρσιες ρωγμές (παράλληλες με την πορεία του νερού), σε διαμήκειες ρωγμές (παράλληλες με τον διαμήκη άξονα του φράγματος), σε στενές ($\delta < 1\text{mm}$), σε φαρδιές ($1 < \delta < 5\text{mm}$) και σε ανοιχτές ρωγμές ($\delta > 5\text{mm}$).
2. Σύμφωνα με την αιτία που τις προκαλεί, οι ρωγμές μπορεί να προκύψουν κατά την των στατικών φορτίων στη μάζα του υλικού πλήρωσης, από την πίεση του νερού ανάντη του φράγματος, από σεισμική διέγερση ή από ατμοσφαιρικές επιρροές (απότομες αλλαγές θερμοκρασιών, ψύξη, ξήρανση).
3. Ανάλογα με τον χαρακτήρα προέλευσης, οι ρωγμές μπορεί να προκύψουν λόγω εφελκυσμού (συνήθως στην διεπιφάνεια κελύφους-πυρήνα), λόγω διάτμησης (συχνότερα στην διεπιφάνεια πυρήνα-θεμελίωσης) ή λόγω διάβρωσης από την διήθηση του νερού μεταξύ φίλτρων και πυρήνα.
4. Ανάλογα με τον πιθανό κίνδυνο που μπορεί να προκαλέσουν, οι ρωγμές διακρίνονται σε επικίνδυνες ρωγμές, που διαπερνούν ολόκληρο το πάχος του πυρήνα, εμφανίζονται κοντά στην κορυφή ή κρύβονται στο εσωτερικό του πυρήνα, και σε λιγότερο επικίνδυνες, μικρές και ρηχές ρωγμές στην άνω ζώνη, οι οποίες μπορούν να επισκευαστούν εύκολα και με χαμηλό κόστος.



Σχήμα 2.4 : Σημεία εμφάνισης ρωγμών λόγω ανομοιόμορφων παραμορφώσεων
(Tanchev 2014, 2nd Edition, CRC Press)

Το σχήμα 2.4 δείχνει τις περιπτώσεις πρόκλησης ρωγμών λόγω ανομοιόμορφων παραμορφώσεων. Οι κατακόρυφες διαμήκειες ρωγμές οφείλονται στις μη ομοιόμορφες καθιζήσεις σε μια στενή κοιλάδα με απότομα πρανή, λόγω διαφορετικής καθίζησης του χαλαρού υλικού εναπόθεσης στις παρειές και του καλά συμπιεσμένου πυρήνα (a). Η οριζόντια διαμήκης ρωγμή (9) στο σχήμα (a) οφείλεται στην απότομη αλλαγή στην κλίση του πρανούς, δηλαδή στη βάση του φράγματος. Στις περιπτώσεις των σχημάτων (c), (d), εμφανίζονται κατακόρυφες διαμήκειες ρωγμές στα κελύφη και τον πυρήνα στην περιοχή γειτνίασης με τη στέψη, λόγω ανομοιόμορφης εναπόθεσης υλικού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως όταν υπάρχουν ενδείξεις εμφάνισης ρωγμών, είναι πιο δυσμενές αν ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από υλικό χαμηλής πλαστικότητας, ειδικά εάν η συμπύκνωση έγινε με ποσοστό υγρασίας μικρότερο του βέλτιστου, ένα καθόλου επιθυμητό, αλλά αρκετά σύνηθες σενάριο.

2.3.2.3 Μέτρα για την αποφυγή εμφάνισης ρωγμών

Λόγω της μοναδικότητας της θέσης και του τύπου κάθε φράγματος είναι δύσκολο να δοθούν γενικοί κανόνες υπέρ της ασφαλείας κατά την κατασκευή του φράγματος που θα αποτρέπουν την εμφάνιση ρωγμών εντός των στρωμάτων του. Γι' αυτό σε κάθε περίπτωση πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά οι πιθανότητες εμφάνισης ρωγμών. Ωστόσο, με βάση το παρουσιαζόμενο υλικό και την παγκόσμια κατασκευαστική εμπειρία, μπορούν να δοθούν οι ακόλουθες συστάσεις:

1. Ιδιαίτερη σημασία είναι απαραίτητο να δοθεί στην επιλογή χωματουργικού υλικού της γύρω περιοχής για την κατασκευή του πυρήνα του φράγματος. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν ερευνητικές εργασίες σε ικανοποιητικά βάθη για τον προσδιορισμό φυσικών, μηχανικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών της περιοχής δανειοθαλάμου. Οι περιοχές με εδάφη από γρανίτη καθώς και περιοχές

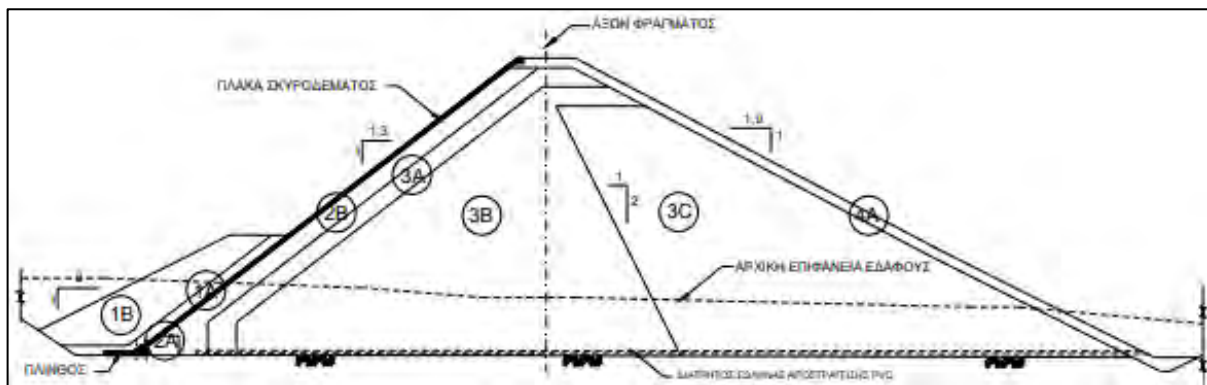
που υπάρχουν υλικά με σημαντικό ποσοστό κατιόντων νατρίου δεν συνίστανται. Τέτοια εδάφη είναι ευαίσθητα σε διάβρωση.

2. Είναι αναγκαίο να διενεργηθούν στατικές και δυναμικές αναλύσεις με σύγχρονες μεθόδους, με τη βοήθεια των οποίων να αξιολογηθεί ο κίνδυνος ανάπτυξης ρωγμών στον πυρήνα του φράγματος. Θα συνταχθούν συμπεράσματα ως προς την ανάγκη τροποποίησης του φράγματος κατά την πρώτη πλήρωση της δεξαμενής και βελτίωσης της θεμελίωσης με ενισχυτικές μεθόδους (π.χ. τσιμεντενέσεις).
3. Κατά την κατασκευή του πυρήνα, στη μέθοδο συμπίεσης των στρωμάτων θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ομοιομορφία της κοκκομετρικής σύνθεσης και την υγρασία.
4. Θα πρέπει να πραγματοποιηθεί κατάλληλη διεργασία στη θεμελίωση που να παρέχει ομοιόμορφη αλλαγή των κλίσεων στα πρανή του φράγματος. Οι κανονισμοί ορίζουν αλλαγή κλίσης υπό γωνία 10%.
5. Τα μεταβατικά στρώματα φίλτρων, που μπορούν να συμβάλλουν στην αυτο-ίαση των ρωγμών, θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από σωστά επιλεγμένα υλικά με κατάλληλες διαστάσεις και κοκκομετρική σύνθεση.
6. Η πρόοδος της κατασκευής των στρώσεων του φράγματος θα πρέπει να προσαρμόσεται στα χαρακτηριστικά του υλικού εναπόθεσης, έστω να φθάσει στην επιθυμητή διάχυση με την επιβολή της πίεσης των πόρων κατά την κατασκευή.
7. Να εκτελεσθεί αυστηρός έλεγχος των εργασιών κατά την προετοιμασία τόσο της θεμελίωσης όσο και κατασκευής του φράγματος.
8. Να αξιολογηθεί σωστά η σεισμικότητα της περιοχής και η επίδραση ενός πιθανού σεισμού κατά την κατασκευή του φράγματος.
9. Να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα όργανα μέσω των οποίων είναι δυνατόν να παρατηρηθούν οι παραμορφώσεις και οι τάσεις στο σώμα του φράγματος, καθ' όλη την διάρκεια κατασκευής, κατά την πρώτη πλήρωση της δεξαμενής και εξίσου κατά την περίοδο εξυπηρέτησης.
10. Να προβλεφθεί μία κατάλληλη διαδικασία πρώτης πλήρωσης της δεξαμενής για να αποφευχθεί ο κίνδυνος υδραυλικής αστοχίας-διασωλήνωσης.
11. Να αποφευχθεί η ύπαρξη αρμών μέσα στον πυρήνα του φράγματος, καθώς με την επίδραση της πίεσης κατά την κατασκευή των αρμών μπορεί να προκληθούν ρωγμές οι οποίες είναι δυνατόν να επεκταθούν και στις μεταβατικές ζώνες-φίλτρα.

2.3.3 Φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος

Στα φράγματα τύπου ΛΑΠΣ, το βασικό στοιχείο είναι η πλάκα σκυροδέματος, η οποία εξασφαλίζει την υδατοστεγανότητα της κατασκευής. Από την εμπειρία και ποικίλες αριθμητικές αναλύσεις, η πιο σημαντική παράμετρος που εξασφαλίζει την σωστή συμπεριφορά και απόδοση της πλάκας σκυροδέματος υπό συνθήκες στατικής και σεισμικής φόρτισης, είναι η ποιότητα συμπίεσης του βραχώδους υποβάθρου (Ντακούλας Π., 2012).

Η τυπική διατομή φράγματος τύπου ΛΑΠΣ δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

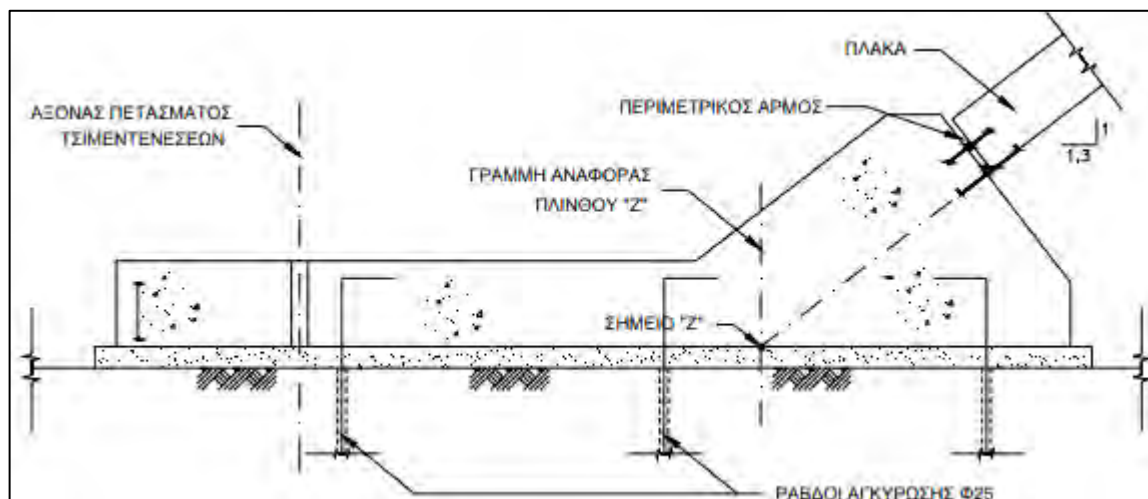


Σχήμα 2.5 : Τυπική διατομή φράγματος τύπου ΛΑΠΣ (Μουτάφης Ν., 2009)

Οι βασικές ζώνες φράγματος τύπου ΛΑΠΣ διακρίνονται ως εξής:

- Ζώνη 1Α: Λεπτόκοκκο υλικό, κυρίως ιλύς, με πρακτικά μηδενική πλαστιμότητα
- Ζώνη 1Β: Τυχαία υλικά, χωρίς απαιτήσεις διαβάθμισης ή συμπίκνωσης
- Ζώνη 2Α: Λεπτόκοκκο φίλτρο, διαβαθμισμένο υλικό με μέγιστο κόκκο 4.5 mm
- Ζώνη 3Α : Λιθορριπή, με μέγιστη διάσταση < 0.5 m, καλά συμπτυκνωμένη
- Ζώνη 3Β : Λιθορριπή, με μέγιστη διάσταση < 1 m, καλά συμπτυκνωμένη
- Ζώνη 3C : Λιθορριπή, με μέτριες απαιτήσεις υλικών και συμπίκνωσης
- Ζώνη 4Α : Ζώνη προστασίας κατάντη πρανούς αναχώματος (αν απαιτείται)

Κατά τη σύνδεση του στεγανού στοιχείου (πλάκα) με τη θεμελίωση και τη συνέχιση της πλάκας με την στεγανοποιημένη ζώνη θεμελίωσης (όπου εκτελούνται οι τσιμεντενέσεις) μεσολαβεί το τεχνικό έργο της «πλίνθου», κατασκευαζόμενο από οπλισμένο σκυρόδεμα με αγκύρια στο πέτρωμα θεμελίωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.6.



Σχήμα 2.6 : Τυπική διατομή πλίνθου φράγματος τύπου ΛΑΠΣ (Μουτάφης Ν., 2009)

Η σύνδεση της πλάκας με την πλίνθο πραγματοποιείται με περιμετρικό αρμό. Η πλάκα δεν βρίσκεται σε επαφή με την πλίνθο. Ανάμεσα τους υπάρχει διάκενο πλάτους 2 έως 3 εκατοστά. Η στεγανοποίηση του περιμετρικού αρμού γίνεται με τοποθέτηση στεγανωτικών ταινιών χαλκού και πλαστικού καθώς και άλλων υλικών.

Προϋποθέσεις για την κατασκευή φράγματος τύπου ΛΑΠΣ, είναι (Ντακούλας, 2021):

- Η ύπαρξη βραχώδους θεμελίωσης καλής ποιότητας για την έδραση της πλίνθου (του θεμελίου της πλάκας σκυροδέματος στα αντερείσματα και την κοίτη).
- Η δυνατότητα εξόρυξης λιθορριπής υγιούς σύστασης ή αμμοχάλικου για την κατασκευή του επιχώματος.
- Η μη ύπαρξη αργίλου για την κατασκευή αργιλικού πυρήνα.
- Η δυνατότητα οικονομοτεχνικής λύσης τοποθέτησης του εκχειλιστή στο αντέρεισμα.



Εικόνα 2.7 : Φράγμα El Cayon, Mexico (Ντακούλας Π., Π.Θ.)

Στη συνέχεια δίνονται μερικά από τα πλεονεκτήματα κατασκευής φραγμάτων τύπου ΛΑΠΣ (Ντακούλας Π., 2021):

- Αποκλείεται η περίπτωση διασωλήνωσης, σε αντίθεση με φράγματα αργιλικού πυρήνα.
- Είναι από τη φύση τους ευσταθείς κατασκευές λόγω ιδίου βάρους και όγκου. Αντίθετα με τα φράγματα σκυροδέματος, δε μεταφέρουν σημαντικά φορτία στα αντερείσματα.
- Οικονομία λόγω μικρότερου όγκου υλικών (πιο απότομη κλίση πρανών).
- Οικονομία λόγω μικρότερου μήκους συναφών έργων (σήραγγες εκτροπής, προσαγωγής, εκχειλιστές) που προκύπτει από την απότομη κλίση πρανών.
- Μικρότερη παροχή σχεδιασμού της εκτροπής.
- Το επίχωμα μπορεί να κατασκευάζεται και σε υγρό καιρό χωρίς ειδικό εξοπλισμό μεταφοράς και διάστρωσης.
- Ο καθαρισμός της θεμελίωσης δεν απαιτεί χειρωνακτική εργασία (μόνο στην έδραση της πλίνθου).
- Οι τσιμεντενέσεις μπορούν να γίνονται ταυτόχρονα με το ανάχωμα.
- Καλύτερη και ευκολότερη συντήρηση και παρακολούθηση του έργου.



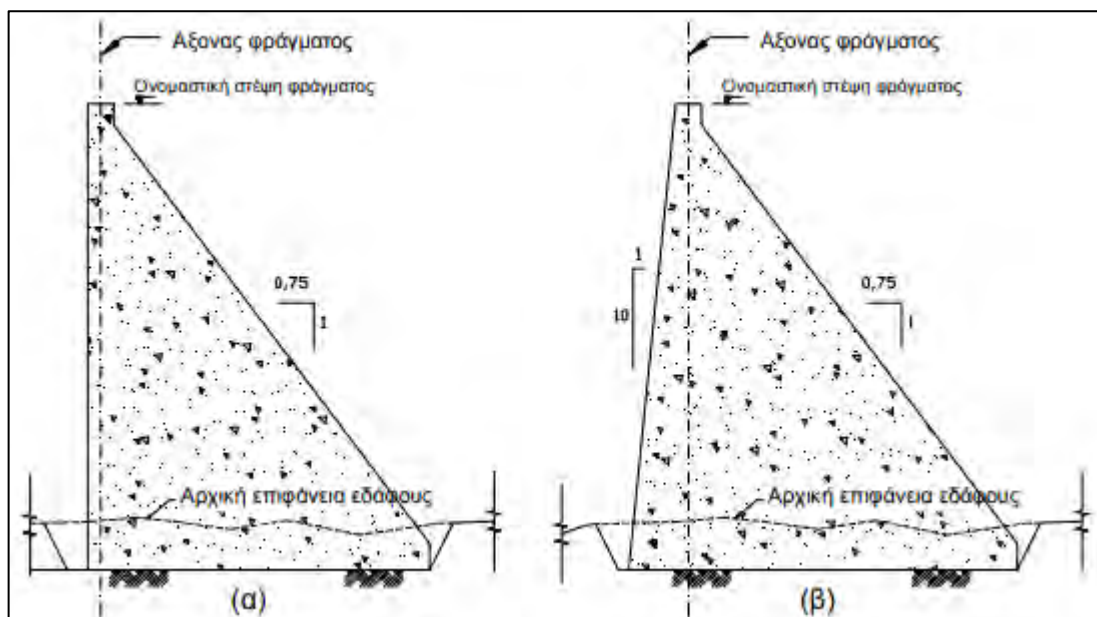
Εικόνα 2.8 : Φράγμα Μεσοχώρας (Ντακούλας Π., Π.Θ.)

2.3.4 Φράγματα βαρύτητας

Τα φράγματα βαρύτητας είναι φράγματα εξ' ολοκλήρου από σκυρόδεμα που συγκρατούν το νερό λόγω του μεγάλου βάρους τους. Η παρειά που βρίσκεται προς το νερό του ταμιευτήρα είναι συνήθως κατακόρυφη, ενώ η κατάντη είναι με κάποια κλίση. Επειδή η μεγαλύτερη υδροστατική πίεση αναπτύσσεται κοντά στη βάση του φράγματος, το φράγμα είναι παχύτερο στη βάση του, ενώ, καθώς η πίεση μειώνεται κοντά στην κορυφή, το φράγμα είναι πιο λεπτό στα ανώτερα τμήματά του.

Τα φράγματα βαρύτητας σημειώνουν αντίσταση στα φορτία που τους επιβάλλονται μέσω του ίδιου βάρους τους. Αντιστέκονται στην ολίσθηση μέσω της ανάπτυξης δυνάμεων τριβής και συνάφειας μεταξύ του υλικού του φράγματος και της θεμελίωσής του. Οι τριβές δημιουργούνται από την κατακόρυφη συνιστώσα του βάρους του φράγματος. Στην ανατροπή, το φράγμα αντιστέκεται μέσω των σταθεροποιητικών ροπών που αναπτύσσονται από το βάρος του. Λόγω της σημασίας του ίδιου βάρους στη λειτουργία τους, αυτά τα φράγματα ονομάζονται φράγματα βαρύτητας. Μπορούν να είναι κατασκευασμένα από λίθους ή σκυρόδεμα. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και άλλοι τύποι φραγμάτων βαρύτητας, όπως τα φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC), τα φράγματα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος (lean RCC) και τα φράγματα σκληρού επιχώματος (hardfill).

Τα φράγματα βαρύτητας από λιθόδεμα, σκυρόδεμα, RCC, ισχνό RCC, σχεδιάζονται με κατακόρυφη (Σχ. 2.7 α) ή παρακατακόρυφη (Σχ. 2.7 β) την ανάντη παρειά, ενώ η κατάντη παρειά σχεδιάζεται με κλίση περί την 0.75:1.



Σχήμα 2.7 : Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα, λιθόδεμα ή RCC (Μουτάφης Ν., 2009)

Ένα παράδειγμα φράγματος βαρύτητας είναι το φράγμα Three Gorges στη Κίνα, το οποίο τροφοδοτεί υδροηλεκτρικά εργοστάσια με ισχύ 22500 MW και έχει λεκάνη αποστράγγισης 1,000,000 km².



Εικόνα 2.9 : Φράγμα Three Gorges, Κίνα (Ντακούλας Π., Π.Θ.)

2.3.4.1 Τοξωτά φράγματα

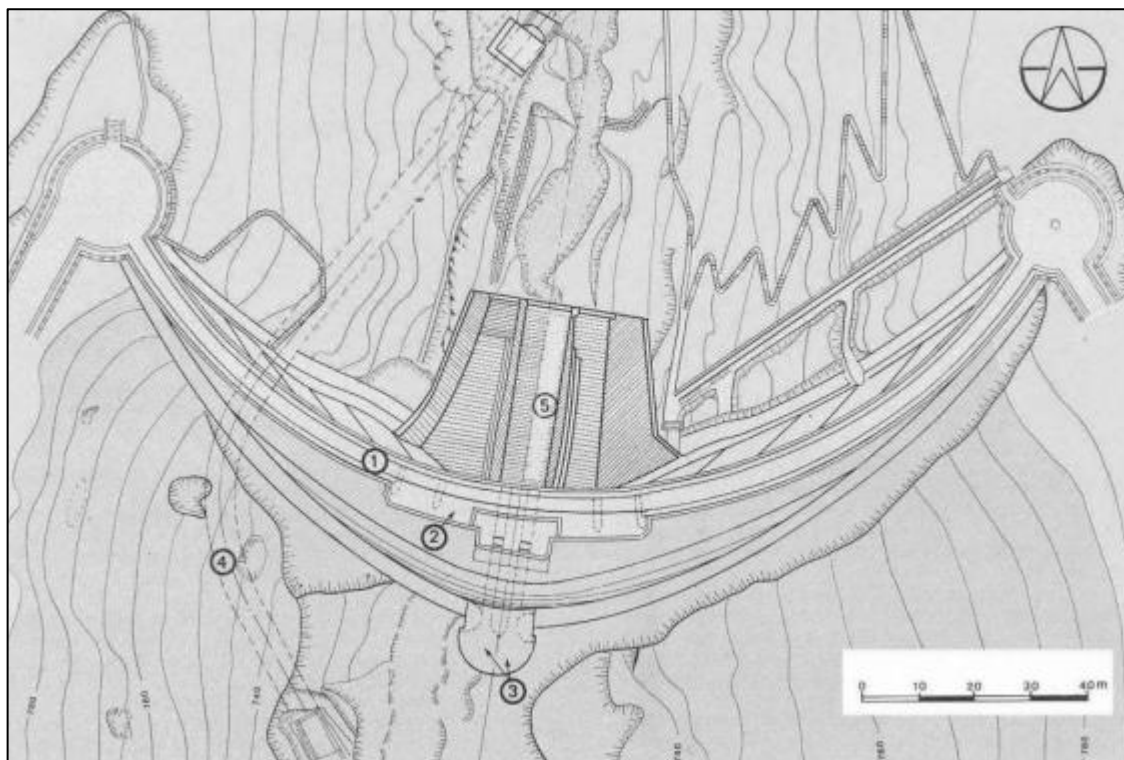
Τα τοξωτά φράγματα (ή αψιδωτά) είναι επίσης φράγματα βαρύτητας που κατασκευάζονται μέσα σε στενά απότομα φαράγγια, όταν υπάρχουν εξαιρετικές συνθήκες βραχομάζας για τη θεμελίωση της βάσης τους και των αντερεισμάτων τους. Η πλευρά που αντικρίζει το νερό του ταμιευτήρα είναι κυρτή, σχηματίζοντας αψίδα ή τόξο. Όταν το νερό πιέζει ένα τοξωτό

φράγμα, το φράγμα μεταφέρει τις υδροστατικές πιέσεις στα πρηνή του φαραγγιού ή της χαράδρας στα οποία είναι θεμελιωμένο. Τα τοξωτά ή αψιδωτά φράγματα μπορούν να κατασκευαστούν με λεπτό πάχος, καθώς ο σχεδιασμός τους επιτρέπει να αντέχουν τις υψηλές δυνάμεις που αναπτύσσονται. Αν υπάρχει ροή νερού μέσα στο φράγμα, η υψηλή πίεσή του θα διευρύνει γρήγορα το άνοιγμα διαρροής, απαιτώντας πολύ δαπανηρές εργασίες για την επισκευή.

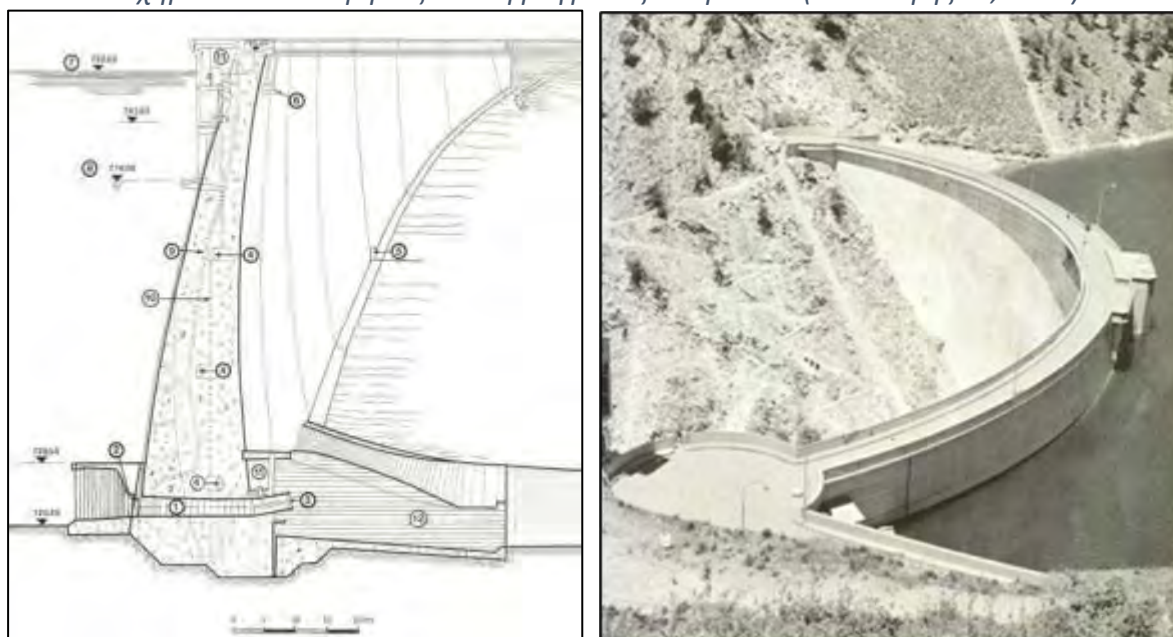
Τα τοξωτά φράγματα λειτουργούν μεταφέροντας το φορτίο του νερού στα αντερείσματα μέσω της καμπυλότητας του φορέα. Τα πρώτα τοξωτά φράγματα ήταν το Pontalto στην Αυστρία, κατασκευασμένο το 1611, και το Bear Valley στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, κατασκευασμένο το 1883.

Τα τοξωτά φράγματα κατασκευάζονται σε στενές κοιλάδες με τυπικό σχήμα V, για να είναι οικονομικά εφικτή η προσαρμογή των τόξων του φράγματος στα πρηνή της κοιλάδας. Επιπλέον, είναι απαραίτητο τα πετρώματα όπου θεμελιώνεται το φράγμα να είναι υψηλής αντοχής ώστε να αντέχουν τα συγκεντρωμένα φορτία από τον φορέα του φράγματος με μικρές μόνο μετακινήσεις. Επίσης, η ευνοϊκή διάταξη των ασυνεχειών των πετρωμάτων ως προς τη διάταξη του φορέα στα αντερείσματα είναι απαραίτητη, ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητικός συντελεστής ασφάλειας έναντι ολίσθησης ή/και ανατροπής.

Στην Ελλάδα, το μοναδικό τοξωτό φράγμα είναι το φράγμα Ταυρωπού, στον ομώνυμο ποταμό κοντά στην Καρδίτσα, με ύψος 83 μέτρα και όγκο 100.000 κυβικά μέτρα. Η κάτοψη του φράγματος φαίνεται στο Σχ. 2.8, ενώ χαρακτηριστική τομή και όψη του φράγματος παρουσιάζονται στο Σχ. 2.9. Διακρίνεται η καμπύλωση και η σύγκλυση των ισοϋψών των φυσικών πρηνών στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος και η προσαρμογή του άξονα του φράγματος σε αυτήν τη σύγκλυση. Αυτή η προσαρμογή αποτελεί βασική παράμετρο για τον ορθό σχεδιασμό του φράγματος.



Σχήμα 2.8 : Κάτοψη τοξωτού φράγματος Ταυρωπού (Μουτάφης Ν., 2009)



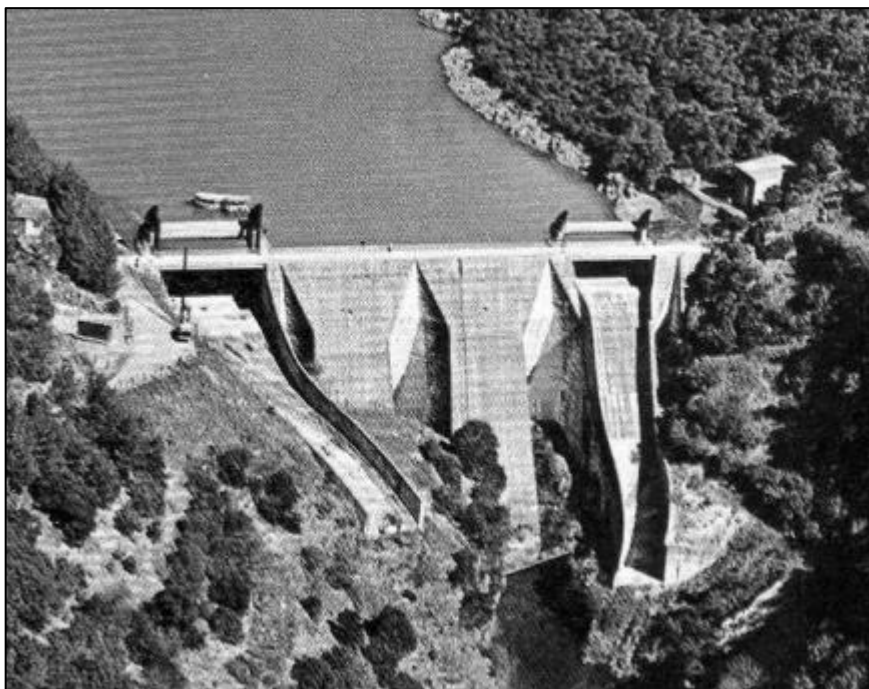
Σχήμα 2.9 : Χαρακτηριστική τομή & Φωτογραφία φράγματος

2.3.4.2 Αντηριδωτά φράγματα

Τα αντηριδωτά φράγματα (buttress dams) όπως και τα φράγματα βαρύτητας, βασίζονται στις ίδιες αρχές, στέκονται δηλαδή στη θέση τους λόγω του ιδίου βάρους τους. Διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι μειώνεται ο όγκος του σκυροδέματος στον φορέα τους μέσω αντηρίδων, αλλά παράλληλα αυξάνεται το μήκος θεμελίωσης κατά μήκος της κοίτης

του ποταμού, με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται προς τα έξω ο μοχλοβραχίονας εφαρμογής του βάρους.

Φωτογραφία του μοναδικού αντηριδωτού φράγματος στην Ελλάδα, του φράγματος Λάδωνα, δείχνεται στην Εικ. 2.10. Το φράγμα σχεδιάζεται με τέσσερις αντηρίδες, από τις οποίες οι δύο ακραίες περιλαμβάνουν του εκχειλιστές του φράγματος. Στο διάκενο μεταξύ των αντηρίδων γίνεται διαπλάτυνση του σώματος των αντηρίδων, χωρίς να υφίσταται ενδιάμεσος φορέας.



Εικόνα 2.10 : Αντηριδωτό φράγμα Λάδωνα (Μουτάφης Ν., 2009)

Στη φωτογραφία διακρίνονται οι δύο εκχειλιστές, με ανυψούμενα θυροφράγματα, που λειτουργούν με αντίβαρα. Όταν η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια πλημμυρικού γεγονότος φθάσει ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, το θυρόφραγμα ανυψώνεται και συνεχίζει να ανυψώνεται με την άνοδο της στάθμης στον ταμιευτήρα.

Αξιοσημείωτο είναι οι καμπύλες των διωρύγων πτώσης των εκχειλιστών, κατάντη του έργου υπερχειλίσης, όπου η ροή του νερού είναι υπερκρίσιμη, γεγονός που απαιτεί εγκάρσια ανύψωση του δαπέδου, ούτως ώστε η δέσμη νερού να εκτρέπεται προς την πλευρά της κοίτης του ποταμού.

Ως επί το πλείστον τα αντηριδωτά φράγματα βαρύτητας απαιτούν μικρότερη μάζα σκυροδέματος και είναι δυνατόν να είναι ευθεία ή καμπύλα.



Εικόνα 2.11 : Φράγμα Roselend ($H=150m$), Γαλλία
(Ντακούλας Π., Π.Θ.)



Εικόνα 2.12 : Φράγμα Bratlet ($H=94m$), ΗΠΑ

Το μεγαλύτερο αντηριδωτό φράγμα στον κόσμο είναι το φράγμα Daniel Johnson στον Καναδά με ύψος 214m και μήκος 1312m. Αποτελείται από 14 αντηρίδες και 13 τοξωτά τμήματα, εξυπηρετεί δύο υδροηλεκτρικά εργοστάσια με ισχύ 2596 MW, το μεγαλύτερο πάχος του φράγματος σημειώνεται στα 22.5 m.



Εικόνα 2.13 : Φράγμα Daniel Johnson, Καναδάς (Ντακούλας Π., Π.Θ.)

2.3.4.3 Φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η κατασκευή φράγματος από κυλινδρούμενο συμπυκνούμενο σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete – RCC) είναι μια τεχνολογία που είχε ως στόχο τη μείωση του κόστους των φραγμάτων. Ένα βασικό στοιχείο αυτών των φραγμάτων είναι η επιτεύξιμη ταχύτητα κατασκευής. Έχει σημειωθεί μείωση του κόστους κατασκευής από 25% σε 50% σε σχέση με το κόστος των φραγμάτων βαρύτητας και μείωση του χρόνου κατασκευής κατά 1 έως 2 έτη.

Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα περιέχει τα ίδια βασικά υλικά που περιέχει το κανονικό σκυρόδεμα, τσιμέντο Portland, ποζολάνη ή υπτάμενη τέφρα, νερό, άμμο και χαλίκια, πρόσθετα υλικά.

Τα αδρανή υλικά έχουν συνήθως μέγιστο κόκκο 40-50mm για την καλύτερη δυνατή συμπεριφορά του σκυροδέματος. Χρήση μεγαλύτερων μέγιστων κόκκων (π.χ. έως 80mm) οδηγεί σε μεγαλύτερη αντοχή, αλλά και μεγαλύτερη χωρική μεταβλητότητα της αντοχής (ανομοιογένεια), προβλήματα κατασκευής, και κατώτερης ποιότητας αρμούς.

Το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι επαρκώς ξηρό ώστε να αντέχει το βάρος του κυλίνδρου του δονητή αλλά και επαρκώς υγρό ώστε να είναι δυνατή η ομοιόμορφη κατανομή της πάστας του τσιμέντου μεταξύ των κόκκων κατά τη διάσπρωση και συμπύκνωση.

Κατά την τοποθέτηση του συμπαγούς σκυροδέματος στο φράγμα εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην θερμότητα ενυδάτωσης που εκλύεται κατά την επαφή του συμπαγούς σκυροδέματος με το νερό και από τη θερμότητα που απορροφά το σκυρόδεμα από το περιβάλλον.

Εν γένει, για να ψυχθεί το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται κρύο νερό ή πάγος στο μείγμα κατά την εφαρμογή, καθώς αυτό είναι οικονομικά αποδοτικό. Η θερμοκρασία του υλικού μπορεί επίσης να μειωθεί με τη χρήση υγρού αζώτου, αλλά αυτή η μέθοδος είναι πολύ δαπανηρή και μπορεί να μην αποδώσει.

Πιο συγκεκριμένα, συστήνεται η κατασκευή εγκάρσιων αρμών υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Πρέπει να εγκαθίστανται εύκολα και να μην επηρεάζουν σημαντικά την τοποθέτηση του RCC (Roller-Compacted Concrete). Επιπλέον, απαραίτητη είναι η συμπερίληψη αποστράγγισης και υδατοστεγάνωσης.

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις κατά την κατασκευή των φραγμάτων κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete Dams):

- Η πρώτη προσέγγιση που βασίζεται στην στεγανότητα του κυλινδρούμενου σκυροδέματος και των αρμών διαστολής-συστολής μεταξύ των στρωμάτων σκυροδέματος.
- Η εναλλακτική προσέγγιση που βασίζεται σε ένα ανεξάρτητο αδιαπέρατο σώμα το οποίο τοποθετείται στην ανάντη όψη του φράγματος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στον Ελλαδικό χώρο είναι το φράγμα Πλατανόβρυσης στο Νέστο ποταμό με ύψος 95 m, μήκος στέψης 270 m για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 450,000 m³ σκυρόδεμα.



Εικόνα 2.14 : Φράγμα Πλατανόβρυσης, Νέστος (Ντακούλας Π., Π.Θ.)

Τα φράγματα τύπου RCC παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα φράγματα λιθορριπής:

- Ταχύτερη κατασκευή (με συναφή κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη)
- Μειωμένη χρήση τσιμέντου
- Μεγαλύτερη απλότητα κατασκευής
- Μειωμένη χρήση ξυλότυπων
- Απλοποιημένη εκτροπή και διαχείριση ποταμού κατά την κατασκευή (η υπερπήδηση νερού έχει ενσωματωθεί πλήρως στο σχεδιασμό διαχείρισης του ποταμού)
- Μειωμένο άμεσο και έμμεσο κόστος υλοποίησης

Αν και πολλά από τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν επιβεβαιωθεί μέσω επαναλαμβανόμενης και επιτυχημένης εφαρμογής, ένα φράγμα τύπου RCC δεν αντιπροσωπεύει πάντα τη λύση του φράγματος χαμηλού κόστους. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν π.χ. τα αδρανή να μην είναι επαρκώς διαθέσιμα ή οι συνθήκες θεμελίωσης να είναι υπερβολικά κακές, να απαιτούν βαθιές εκσκαφές ή να οδηγούν σε καθιζήσεις. Επιπλέον, συνθήκες που μπορούν να εξασφαλίσουν αποτελεσματικότητα και κατά συνέπεια ανταγωνιστικότητα του κόστους κατασκευής, συνδέονται με τον ευρύ ή περιορισμένο χώρο εργασίας για την ενσωμάτωση εκτεταμένων έργων.

2.3.4.5 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα φραγμάτων βαρύτητας

Κατωτέρω περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φραγμάτων βαρύτητας (Ντακούλας Π., 2021).

Πλεονεκτήματα φραγμάτων βαρύτητας

1. Τα φράγματα βαρύτητας είναι κατάλληλα για στενές ή ευρείες κοιλάδες, αρκεί το υλικό θεμελίωσης να είναι υγιής βράχος σε μικρό βάθος (< 5m). Τα τοξωτά φράγματα είναι κατάλληλα για στενές κοιλάδες.
2. Τα φράγματα σκυροδέματος δεν είναι ευάλωτα από την υπερχειλίση της στέψης.
3. Οι διασωληνώσεις, βαλβίδες και άλλα συναφή έργα ενσωματώνονται σε δωμάτια ή σήραγγες του φράγματος.
4. Έχουν υψηλή ανθεκτικότητα σε σεισμική καταπόνηση.
5. Τα τοξωτά (ή θολωτά) φράγματα έχουν υψηλή αντοχή σε κοιλάδες με στενότητα και υγιή αντερείσματα.
6. Είναι δυνατή η κατασκευή υπερχειλιστή στο σώμα του φράγματος, αρκεί να ελέγχεται η διάβρωση και πιθανή υποσκαφή στην κατάντη πλευρά του φράγματος.

Μειονεκτήματα φραγμάτων βαρύτητας

1. Τα φράγματα βαρύτητας απαιτούν υγιή και σταθερό βράχο θεμελίωσης.
2. Απαιτούν επεξεργασμένα κατάλληλης ποιότητας και ποσότητας αδρανή υλικά. Επίσης, μεταφορά και απόθεση μεγάλων ποσοτήτων τσιμέντου και άλλων υλικών.
3. Η μαζική κατασκευή σκυροδέματος είναι αργή, απαιτεί σημαντικό αριθμό εργατών, διακοπές εργασίας κατά την τοποθέτηση του σκυροδέματος, αρκετή ικανότητα στο καλούπωμα και την σκυροδέτηση κ.λ.π
4. Το κόστος σκυροδέματος ανά μονάδα όγκου είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος επιχώματος. Η μικρότερη ποσότητα σκυροδέματος που απαιτείται για ένα φράγμα συγκεκριμένου ύψους σπανίως εξισορροπεί το κόστος κατασκευής.

Κεφάλαιο 3 : Φράγματα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος ή σκληρού επιχώματος (Hardfill Dams)

3.1 Γενικά

Με την πάροδο των χρόνων, προέκυψε η ανάγκη για ακόμη πιο οικονομικές και ταχύτερες κατασκευές, που να αντιμετωπίζουν τα μειονεκτήματα των φραγμάτων RCC (Roller-Compacted Concrete). Εμφανίστηκαν έτσι, τα αξονοσυμμετρικά φράγματα κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (FSHD ή Hardfill Dams). Τα φράγματα ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος ή σκληρού επιχώματος αποτελούν έναν καινοτόμο τύπο έργου που εξελίσσεται συνεχώς τα τελευταία 30 χρόνια.

Η κατασκευή ενός αξονοσυμμετρικού φράγματος κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (FSHD ή ΑΚΣΕ) περιλαμβάνει ένα μίγμα αδρανών, νερού και τσιμέντου κατάλληλων αναλογιών. Οι έλεγχοι στατικότητας και τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη είναι παρόμοια με αυτά των φραγμάτων βαρύτητας. Η διαφοροποίηση αυτών των φραγμάτων, όπως και των RCC (Roller-Compacted Concrete), από τα φράγματα βαρύτητας συμβατικού σκυροδέματος έγκειται στην κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, στις χρησιμοποιούμενες αναλογίες υλικών και στην μέθοδο κατασκευής τους. Επιπλέον, τα φράγματα τύπου ΑΚΣΕ έχουν χαρακτηριστική ισοσκελή τραπεζοειδή διατομή.

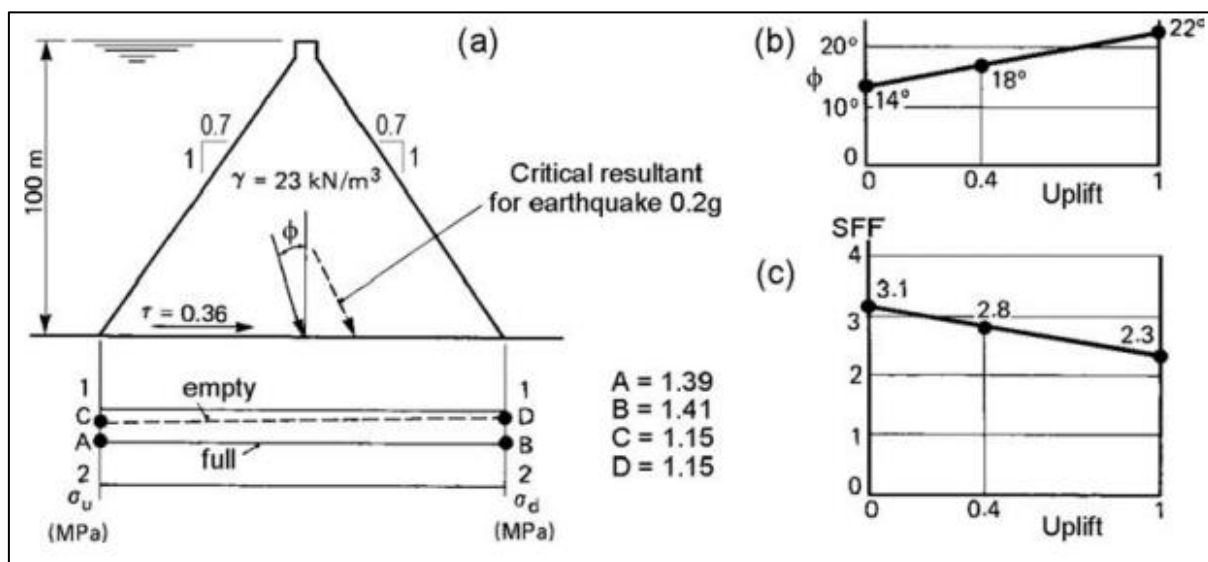
Το υλικό κατασκευής των φραγμάτων τύπου ΑΚΣΕ διαφέρει σε κάθε έργο, αναλόγως των απαιτήσεων του και της διάθεσης των υλικών της ευρύτερης περιοχής. Στην ουσία, πρόκειται για παραλλαγές σύνθεσης του υλικού, με αυξομειώσεις στο χρησιμοποιούμενο ποσοστό τσιμέντου και στην κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Το παραγόμενο υλικό είναι στην πραγματικότητα ένας τύπος σκυροδέματος, με ιδιότητες κοντά σε αυτές του RCC, και ονομάζεται σκληρό επίχωμα.

Το υλικό σκληρού επιχώματος μπορεί να οριστεί ως ένα υλικό κυλινδρούμενου συμπακνούμενου σκυροδέματος (RCC) με χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, με (ή χωρίς) προσθήκη ποζολάνης (ή υπτάμενης τέφρας) με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή τιμή της αναλογίας νερό/τσιμέντο. Ο μέσος όρος χρησιμοποιούμενων τιμών (τσιμέντο 60 kg/m³, ποζολάνη 13 kg/m³, νερό 135 kg/m³ και αναλογία νερού/τσιμέντο=1.86) μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές φραγμάτων από RCC, στον Πίνακα 3.1. Το σκληρό επίχωμα είναι ένα υλικό με υψηλή συνοχή και αντοχή στη διάβρωση.

Type of the mixture	Low-cementitious	High-cementitious	Medium-cementitious	RCD (used in Japan)
Cementitious content (cement + pozzolan [kg/m ³])	<99	>150	100–149	120–130
Pozzolan content [% mass of cementitious material]	0–40	30–80	20–60	20–35
Compressive strength [MPa]	5–15	17.5–31.5	11–21	

Πίνακας 3.1 : Ταξινόμηση κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Tanchev, 2014)

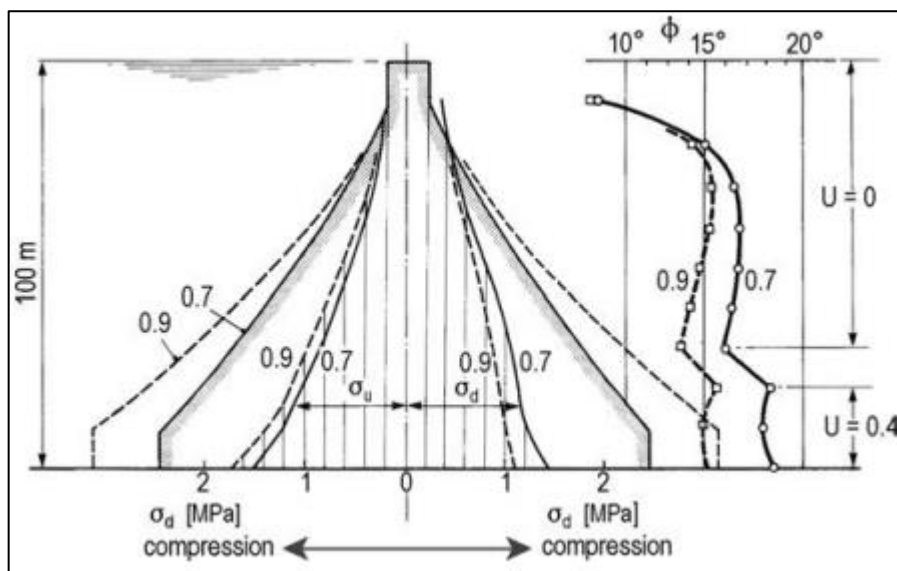
Η βασική ιδέα των φραγμάτων αυτών εξηγήθηκε καλά από τους Londe και Lino (1992), οι οποίοι ανέλυσαν ένα υποθετικό σενάριο αξονοσυμμετρικού φράγματος σκληρού επιχώματος ύψους 100 μέτρων, με κλίσεις ανάντη και κατάντη πρανούς 0.7:1. Οι τάσεις που επικρατούν στη βάση του φράγματος φαίνονται στο Σχήμα 3.1 (a). Το υλικό εμφανίζει αντοχή σε εφελκυσμό με περιθώριο 0.4 MPa από το άνω όριο ονομαστικής εφελκυστικής τάσης από σεισμό. Στην πραγματικότητα, ένας σεισμός επιτάχυνσης 0.2g, θα προκαλούσε μηδαμινές εφελκυστικές τάσεις, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για φράγματα βαρύτητας σε διάφορες τοποθεσίες ανά τον κόσμο, καθώς σημειώνονται αστοχίες στους πόδες των φραγμάτων. Η μέγιστη συμπίεση στη βάση του φράγματος είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή του φράγματος βαρύτητας κατά 1 MPa.



Σχήμα 3.1 : Ανάλυση φράγματος FSHD, Londe & Lino, 1992 (Tanchev, 2014)

Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ των φραγμάτων βαρύτητας και των φραγμάτων σκληρού επιχώματος αφορά στις διατμητικές τάσεις. Στα φράγματα από σκληρό επίχωμα η μέση διατμητική τάση μειώνεται από 0.63 MPa σε 0.36 MPa. Η γωνία τριβής ϕ , για διαφορετικές υποθέσεις ανύψωσης του νερού κυμαίνεται από 14° έως 22° , έναντι 28° έως 43° στα φράγματα βαρύτητας (Σχήμα 3.1 (b)). Ο συντελεστής τριβής διάτμησης (SFF) είναι πάντα υψηλότερος από 2 (Σχήμα 3.1 (c)), ακόμη και για υλικό με συνοχή $c=0.3 \text{ MPa}$ και γωνία τριβής $\phi=30^\circ$, όπως θεωρήθηκε στο υποθετικό σενάριο από τους Londe και Lino (1992).

Οι Londe και Lino επίσης ανέλυσαν εναλλακτικές διατομές αυτού του τύπου φράγματος, στις οποίες οι όψεις του φράγματος ανάντη και κατάντη εμφανίζονται παραβολικές αντί για ευθείες, έτσι ώστε να διατηρούν την αύξηση του όγκου καθ' ύψος σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τα συμβατικά φράγματα σκυροδέματος. Οι συνολικές κατακόρυφες τάσεις εξακολουθούν να είναι μέτριες (Σχήμα 3.2). Στο πείραμα αυτό θεωρείται πως γίνεται ελεγχόμενη αποστράγγιση του νερού στα κατώτερα στρώματα του φράγματος και προς τη θεμελίωση, γι' αυτό η πίεση του νερού είναι μηδέν ($u=0$) σε σημαντικό ύψος του φράγματος.



Σχήμα 3.2 : Συνολικές κατακόρυφες τάσεις και γωνία τριβής ϕ σε εναλλακτικά μοντέλα FSHD με παραβολικές όψεις, Londe & Lino, 1992 (Tanchev, 2014)

Το φράγμα Cindere στην Τουρκία με ύψος 107m, είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα φράγματος σκληρού επιχώματος (Εικόνα 3.1). Το φράγμα Cindere, του οποίου η κατασκευή ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2002, είναι το πρώτο φράγμα από σκληρό επίχωμα στην Τουρκία. Έχει σχεδιαστεί με μέγιστο ύψος 107m, μήκος 281m, κλίσεις πρανών 0.7:1, χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας για τη βελτιστοποίηση του σχήματος του και αναλύθηκε με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση της αντοχής του. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στο δομικό σχεδιασμό, την ευστάθεια και την επιλογή των υλικών λόγω της υψηλής σεισμικότητας της θέσης του φράγματος στο Buyuk Menderes.



Εικόνα 3.1 : Cindere Dam, Τουρκία (Ντακούλας Π., 2021)

Στη συνέχεια δίνονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα φράγματα σκληρού επιχώματος.

Πλεονεκτήματα

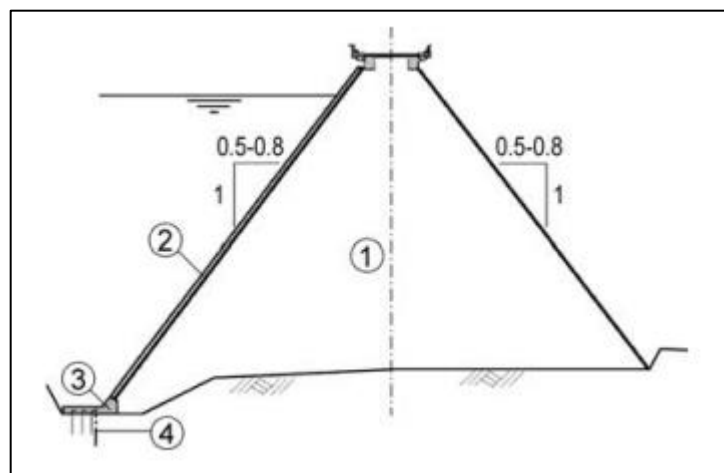
- Φυσική αποστράγγιση σώματος φράγματος
- Αποφυγή ανάπτυξης πίεσης πόρων στο εσωτερικό του φράγματος
- Με την στεγανοποίηση της ανάντη πλευράς, η ανάπτυξη ρωγμών είναι σε αποδεκτό πλαίσιο. Δεν επηρεάζεται η ευστάθεια του φράγματος. Δεν υφίσταται διήθηση νερού.
- Δεν υπάρχει απαίτηση για τη διαμόρφωση αρμών συστολής-διαστολής.
- Δεν υπάρχει απαίτηση για εγκατάσταση στεγανωτικών ταινιών σε αρμούς.
- Σημαντική μείωση κόστους υπερχειλιστή
- Μείωση κόστους συστήματος εκτροπής
- Σημαντική μείωση του χρόνου κατασκευής

Μειονεκτήματα

- Ανάγκη κατασκευής στεγανού στοιχείου στην ανάντη παρειά του φράγματος, π.χ. πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, μεμβράνη, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (σε φράγματα μικρού ύψους)
- Ανάγκη κατασκευής πλίνθου

3.2 Γεωμετρία

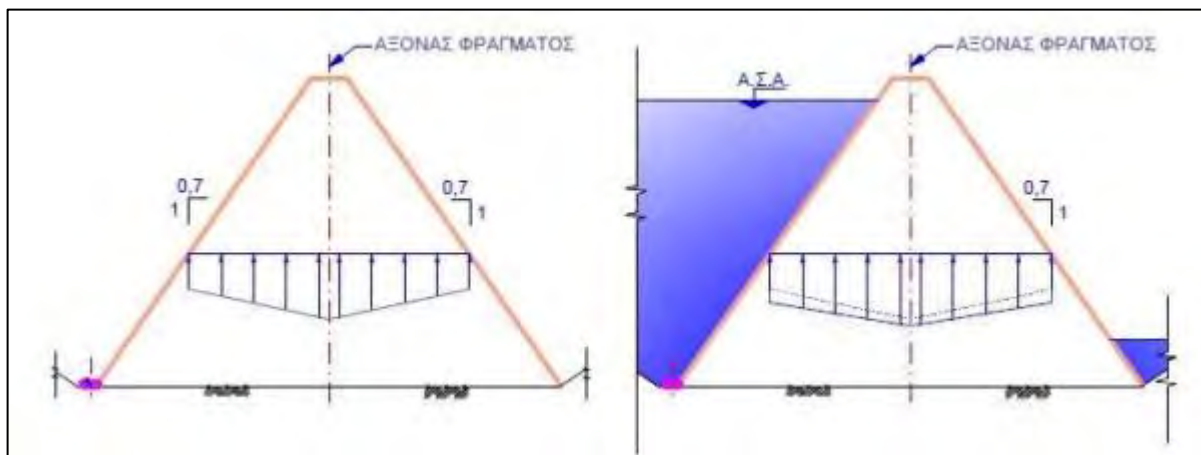
Τα φράγματα τύπου ΑΚΣΕ έχουν τραπεζοειδή συμμετρική διατομή, με κλίσεις πρανών σχεδιασμένες έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η στατική επάρκεια της κατασκευής και η μείωση των τάσεων στη βάση. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται η τυπική διατομή φράγματος τύπου ΑΚΣΕ, όπου (1) το σκληρό επίχωμα, (2) στεγανό στοιχείο, (3) πλίνθος, (4) κουρτίνα τσιμεντενέσεων.



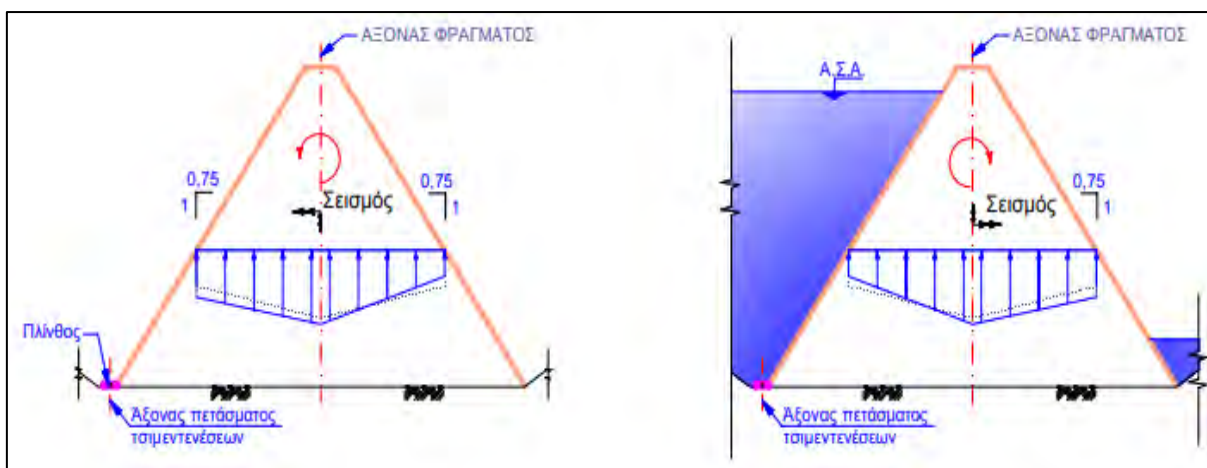
Εικόνα 3.2 : Τυπική διατομή φράγματος κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (Tanchev, 2014)

Οι κλίσεις των πρανών, είναι περίπου της τάξης του 0.7:1 έως 0.8:1 (Ο:Κ). Με τις κλίσεις αυτές επιτυγχάνεται προσεγγιστικά η εξισορρόπηση της ροπής λόγω της πλευρικής ώθησης από την πίεση του νερού και από τη ροπή που προκύπτει από το βάρος του νερού.

Εξαιτίας της διαμόρφωσης αυτής, σχηματίζεται περίπου ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στη βάση σε οποιαδήποτε στάθμη κι αν βρίσκεται το νερό στον ταμιευτήρα. Ακόμη, η παρουσία εφελκυστικών τάσεων κατά τις φάσεις λειτουργίας δεν είναι πιθανή, ενώ πιθανό είναι να μην εμφανιστούν και κατά τη διάρκεια σεισμών. Έτσι θεωρείται πως τα φράγματα ΑΚΣΕ έχουν πρακτικά μηδενική ευαισθησία σε σεισμικές καταπονήσεις και ως συνέπεια μπορούν να κατασκευαστούν σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα.



Σχήμα 3.3 : Θεωρητική κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο σώμα του φράγματος με και χωρίς νερό (Μουτάφης Ν., 2012)



Σχήμα 3.4 : Θεωρητική κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο σώμα του φράγματος με σεισμό (Μουτάφης Ν., 2012)

3.3 Υλικά

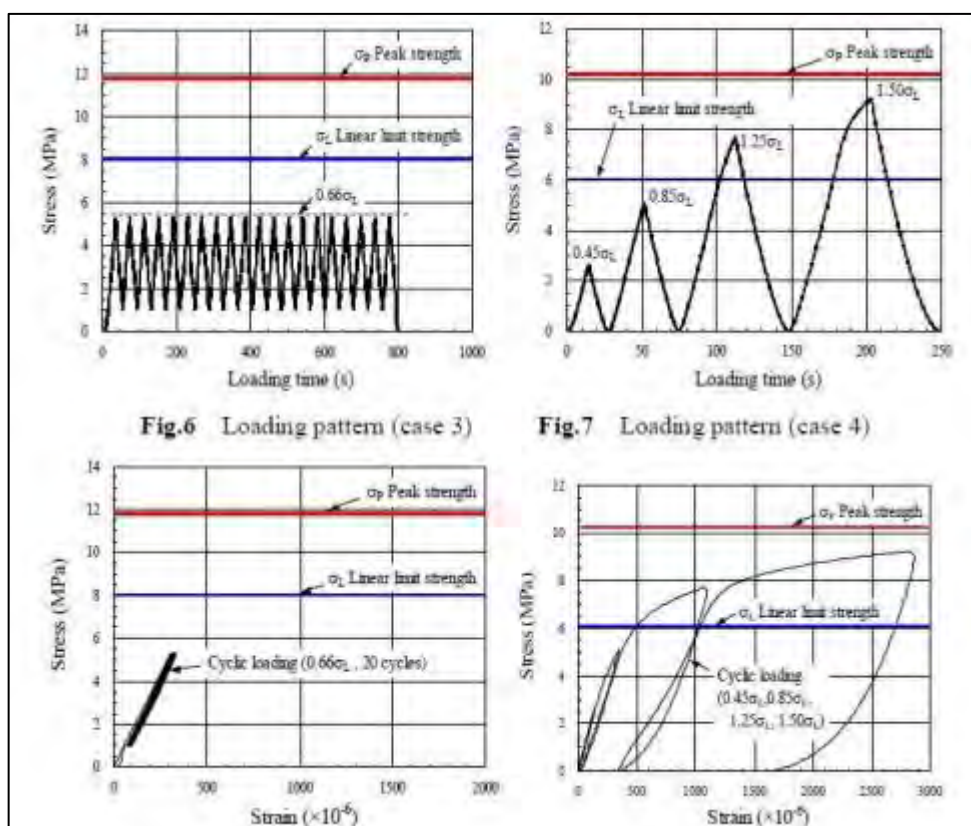
Στα φράγματα ΑΚΣΕ, δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις για θλιπτική αντοχή, γι' αυτό η περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι χαμηλή. Οι μηχανικές ιδιότητες του σκληρού επιχώματος πριν τη σκλήρυνσή του είναι πανομοιότυπες με εκείνες του υλικού κατασκευής γεωφραγμάτων. Μετά τη σκλήρυνση, οι ιδιότητες βελτιώνονται σημαντικά. Επομένως, συμπεραίνουμε πως το υλικό σκληρού επιχώματος έχει συμπεριφορά μεταξύ γεωυλικού και σκυροδέματος.

Πιο ειδικά, το παραγόμενο υλικό είναι ελαστοπλαστικό, με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με το σκυρόδεμα, μέτριας θλιπτικής αντοχής και μικρής εφελκυστικής αντοχής. Όταν είναι σχετικά νωπό, το σκληρό επίχωμα παραμορφώνεται εύκολα ώστε να αποφεύγονται ρηγματώσεις από σχεδόν οποιαδήποτε μορφή φόρτισης, συμπεριλαμβανομένων και των θερμοκρασιακών μεταβολών.

Το σκληρό επίχωμα είναι ένα είδος τεχνητού τσιμεντοειδούς υλικού που προκύπτει από την πρόσμιξη μικρού ποσοστού τσιμέντου με νερό και αδρανή από βράχους, τυχαίες προσχώσεις και αδύναμο λατομικό πέτρωμα με ελάχιστη επεξεργασία. Ποικίλες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις είναι αποδεκτές στο σχεδιασμό κατασκευής φραγμάτων σκληρού επιχώματος, πράγμα που δίνει ευελιξία στην τοποθεσία του φράγματος.

Η παράμετρος που διερευνάται κυρίως στο σχεδιασμό και τον ποιοτικό έλεγχο του χονδρόκοκκου υλικού πλήρωσης είναι η συμπίεστικότητα του και θλιπτική αντοχή υπό δοκιμές συμπίεσης.

Η συμπεριφορά του σκληρού επιχώματος είναι ελαστική μέχρι να ξεπεραστεί το όριο θλιπτικής αντοχής, οπότε η συμπεριφορά γίνεται ελαστοπλαστική. Στο άρθρο των Wu et al. (2011) παρουσιάζονται τριαξονικές δοκιμές, όπως και στο άρθρο των Peng & Yuan (2014) παρουσιάζονται μονοαξονικές δοκιμές για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπου φαίνεται ξεκάθαρα το σημείο διαρροής. Εάν αυτό το σημείο δεν ξεπεραστεί, η συμπεριφορά παραμένει εντελώς ελαστική.

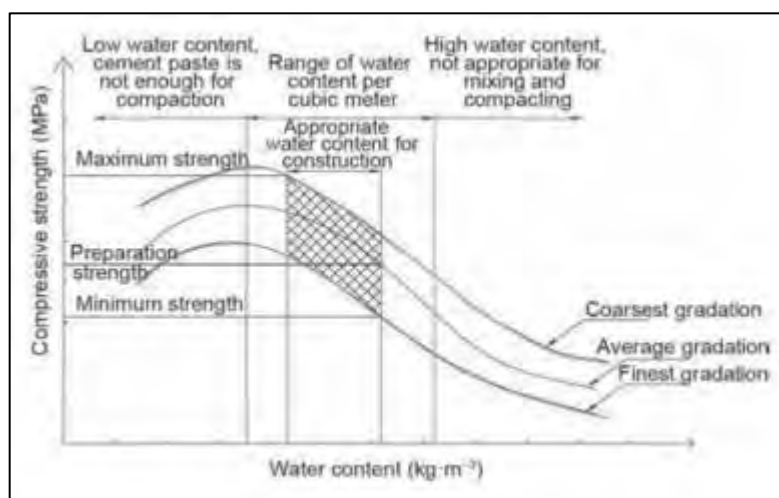


Σχήμα 3.5 : Μονοαξονικές δοκιμές φόρτισης σε σκληρό επίχωμα (Peng & Yuan, 2014)

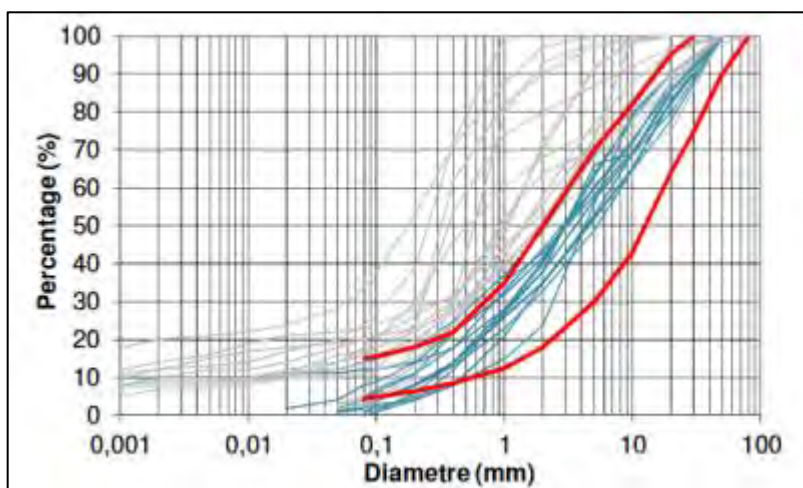
Όπως αναφέρεται σε μεγάλο όγκο βιβλιογραφίας, σε μετρήσεις του μέτρου Young (σχετικά νωπού υλικού) που έχουν πραγματοποιηθεί στο σώμα του φράγματος, δίνονται τιμές από 400 MPa έως 1500 MPa. Δηλαδή, είναι εμφανής η ευκαμψία του υλικού σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Η περιεκτικότητα σε νερό επηρεάζει τη θλιπτική αντοχή του υλικού όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Απαιτείται μέτρια χρήση νερού για να επιτευχθεί η εργασιμότητα και επαρκής αντοχή του υλικού. Στο σχήμα 3.7, δίνονται τα τυπικά όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης για τα σκληρά αδρανή.

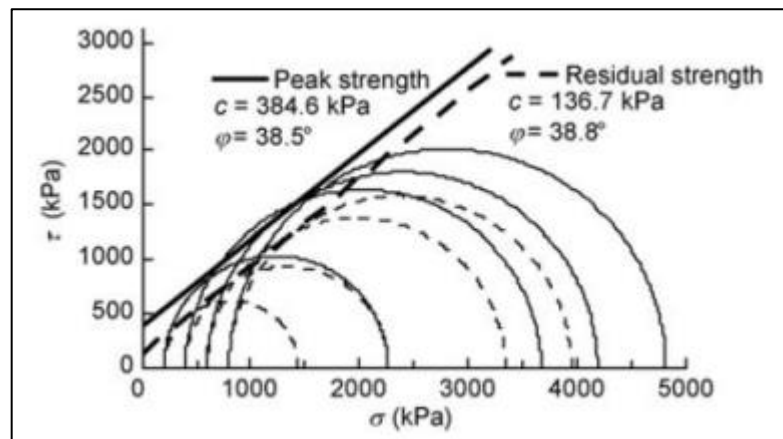
Η αντοχή του σκληρού επιχώματος μπορεί να εκφραστεί ως θλιπτική αντοχή αλλά και ως αντοχή διάτμησης, που εμπεριέχει τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (ϕ) του υλικού. Στο σχήμα 3.8, παρουσιάζονται οι παράμετροι αντοχής διάτμησης του σκληρού επιχώματος από τους Wu et al. (2011).



Σχήμα 3.6 : Επιρροή της περιεκτικότητας σε νερό στη θλιπτική αντοχή του υλικού σκληρού επιχώματος (Jia, Lino, Jin & Zheng, 2016)



Σχήμα 3.7 : Τυπικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικού σκληρού επιχώματος (Jia et al., 2016)



Σχήμα 3.8 : Αντοχή σκληρού επιχώματος στις 28 μέρες (Wu, Du, Yao & He, 2011)

Μια στατιστική ανάλυση των φραγμάτων σκληρού επιχώματος που έχουν κατασκευαστεί μέχρι τώρα, δείχνει ότι η θλιπτική αντοχή 5-7 MPa χρησιμοποιείται ως απαίτηση σχεδιασμού σε τέτοιου τύπου φράγματα (Πίνακας 3.2). Οι τιμές των 6 MPa και άνω προτάθηκαν σε φράγματα με ύψος > 50 m. Μικρότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού αντιστοιχούν σε φράγματα όπου η χρησιμοποιούμενη ποσότητα τσιμέντου είναι σημαντικά μειωμένη. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας Young ποικίλουν από 5 έως 10 GPa, ενώ χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται σε χαμηλότερης αντοχής υλικού. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο κυμαίνεται μεταξύ 40 και 80 kg/m³, με μέση τιμή τα 60 kg/m³. Η ιπτάμενη τέφρα δεν αναφέρεται σε όλα τα έργα, ωστόσο συναντάται συνήθως με τιμές περιεκτικότητας από 20 έως 30 kg/m³. Οι Jia, Lino, Jin & Zheng (2016) πρότειναν μια τιμή περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα στα 80 kg/m³.

Source	Compressive strength (MPa)	Friction angle ($^{\circ}$)	Cohesion. C (MPa)	Es (MPa)	Cement (kg/m ³)	Flying ash (kg/m ³)
(Thibaut & Lino, 2012)		35	0		120	
(Wu, Du, Yao, & He, 2011)	9.2	38.5	0.38		40	60
(Torkamani & Mohammad, 2012)		45	1	12000		
(Cai, Yang, Guo, & Song, 2014)		40.8	0.44			
(Liu, Qiao, Li, Hao, & Gao, 2015)		25	0.091		0%	
		28.4	0.153		3%	
		26.9	0.417		5%	
		26.4	0.759		8%	
(Granell, Duque, Sanchez, & Ruiz, 2019)	5.0	35	0.5	10000		
(Koumoulos & Korgialos, 2008)	5.0					20%
(Fujisawa, et al., 2004)	7.3-11.8			2000		
(Hanada, Tamezawa, Oyabu, & Matsueda, 2002)	3.1-8.48			7400-17100		
(Gouvas & Orfanos, 2014)	6.0				51	
(Xu & Jin, 2020)	1.2				40	
	1.8				60	
	2.2				80	
	5.0				100	
(Ayagh & Mohammadian, 2017)	7.0			10000		
	5.0			8000		
	5.0			5000		
(Xiong, Weng, & He, 2013)	5.0	40		8000		
				4000-		
(Yanmaz & Sezgin, 2009)		45	0.8	11586	70	

Πίνακας 3.2 : Ιδιότητες υλικών σκληρού επιχώματος: Θλιπτική αντοχή, Γωνία τριβής φ , Συνοχή c , Μέτρο Ελαστικότητας, περιεκτικότητα σε τσιμέντο και υπάμενη τέφρα (Tanchev, 2014)

3.4 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες φραγμάτων ΑΚΣΕ

Διάστρωση – Συμπύκνωση

Όσον αφορά την παρασκευή μίγματος, αυτή πραγματοποιείται σε ειδικά τροποποιημένες εγκαταστάσεις παρασκευής για τις ιδιότητες του σκληρού επιχώματος.

Οι διαδικασίες που απαιτούν προσεκτικό χρονικό προγραμματισμό και τήρηση αυτού λόγω των περιορισμένων χρονικά περιθωρίων τους είναι η μεταφορά και η διάστρωση. Το μείγμα, από τη στιγμή που παρασκευάζεται, πρέπει να διαστρωθεί μέσα σε 15 λεπτά και όταν η θερμοκρασία αέρα είναι μεγαλύτερη από 20°C. Για τον λόγο αυτό, προτιμάται η χρήση ταινιοδρόμων αντί παραδοσιακών οχημάτων μεταφοράς. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας και των συνθηκών της περιοχής εφαρμογής, χρησιμοποιούνται συνήθως οχήματα ανατρέπόμενου κάδου. Για να αποφευχθεί ο διαχωρισμός των κόκκων, η αρχική εναπόθεση του μεταφερόμενου υλικού πρέπει να γίνεται τμηματικά σε σωρούς, με το ύψος να μην υπερβαίνει τα 1,5 μέτρα.

Πριν να μπει η πρώτη στρώση του κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος, πρέπει να γίνει εξυγίανση των σαθρών πετρωμάτων και των χωμάτων στη διεπιφάνεια φράγματος-θεμελίωσης. Επιπλέον, τοποθετείται εξισωτική στρώση από συμβατικό σκυρόδεμα κατηγορίας C8/10 ή C12/15. Επίσης, σε κάθε στρώση υλικού πρέπει να γίνεται διαμόρφωση με την προβλεπόμενη από την προδιαγραφές κλίση μέσω μηχανημάτων που έχει επιλέξει ο εκάστοτε κατασκευαστής.



Εικόνα 3.3 : Στάδια κατασκευής φράγματος ΑΚΣΕ (Μουτάφης Ν., 2009)

Η πρώτη διάστρωση πραγματοποιείται με χρήση ερπυστριοφόρων προωθητών. Η διάστρωση πραγματοποιείται σε οριζόντιες στρώσεις κατάλληλου πάχους, ώστε το συμπυκνωμένο υλικό να είναι πάχους 30 εκατοστών, με μέγιστη ανοχή ± 5 cm. Είναι σημαντικό τα μηχανήματα διάστρωσης να μην κυκλοφορούν στην επιφάνεια του συμπυκνωμένου υλικού για να μην προκαλέσουν διαταραχές και ζημιές. Πριν από τη διάστρωση μιας νέας στρώσης, η προηγούμενη στρώση βρέχεται ελαφρώς για να υπάρχει υγρασία στο υλικό.

Η συμπύκνωση του μείγματος γίνεται με αυτοκινούμενους δονητικούς συμπυκνωτές, με στατικό βάρος τουλάχιστον 7,5 τόνων και διπλά λεία τύμπανα διαμέτρου 1,4 m. Οι συμπυκνωτές διαθέτουν όργανα μέτρησης του αριθμού των διαδρομών που εκτελούν. Ο αριθμός των διελεύσεων που απαιτούνται για την ικανοποιητική συμπύκνωση του υλικού καθορίζεται από τις εργαστηριακές μελέτες με τη δοκιμή Proctor, αλλά δεν είναι μικρότερος από 6 διελεύσεις. Η τελική επιφάνεια κάθε στρώσης πρέπει να είναι ομοιόμορφη, ελαφρώς τραχεία, χωρίς χαλαρά χαλίκια, εγχοπές ή προεξοχές. Η μάζα κάθε στρώσης απαιτείται να είναι ομοιογενής, με τη μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα.

Στεγάνωση ανάντη πλευράς

Όπως εξηγείται παραπάνω, τα φράγματα τύπου ΑΚΣΕ είναι διαπερατά. Για την αντιμετώπιση των αρνητικών συνεπειών αυτής της διαπερατότητας, τοποθετείται είτε στεγανωτική πλάκα από συμβατικό σκυρόδεμα είτε συνθετικές μεμβράνες στην ανάντη πλευρά του φράγματος, η οποία συνδέεται με το βραχώδες υπόβαθρο και τη θεμελίωση

μέσω της πλίνθου στον πόδα του φράγματος. Εφαρμογή αυτής της τεχνοτροπίας γίνεται και στα λιθόρριπτα φράγματα. Για τη στεγάνωση με πλάκα σκυροδέματος, αυτή είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος. Το πάχος της πλάκας είναι μεταβλητό, με ελάχιστη τιμή τα 30 cm και συνήθως αυξάνεται προς τη βάση. Η κατασκευή της γίνεται σε λωρίδες πλάτους 8 έως 15 μέτρων, όπου η ένωση της ανάντη πλάκας με την πλίνθο πραγματοποιείται με φατνώματα που έχουν χρονική προτεραιότητα στη σκυροδέτηση. Επιπλέον, πριν τη σκυροδέτηση, η ανάντη πλευρά πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα. Σε κάθε περίπτωση, τοποθετούνται αποστραγγιστικές στοές στο σώμα του φράγματος.

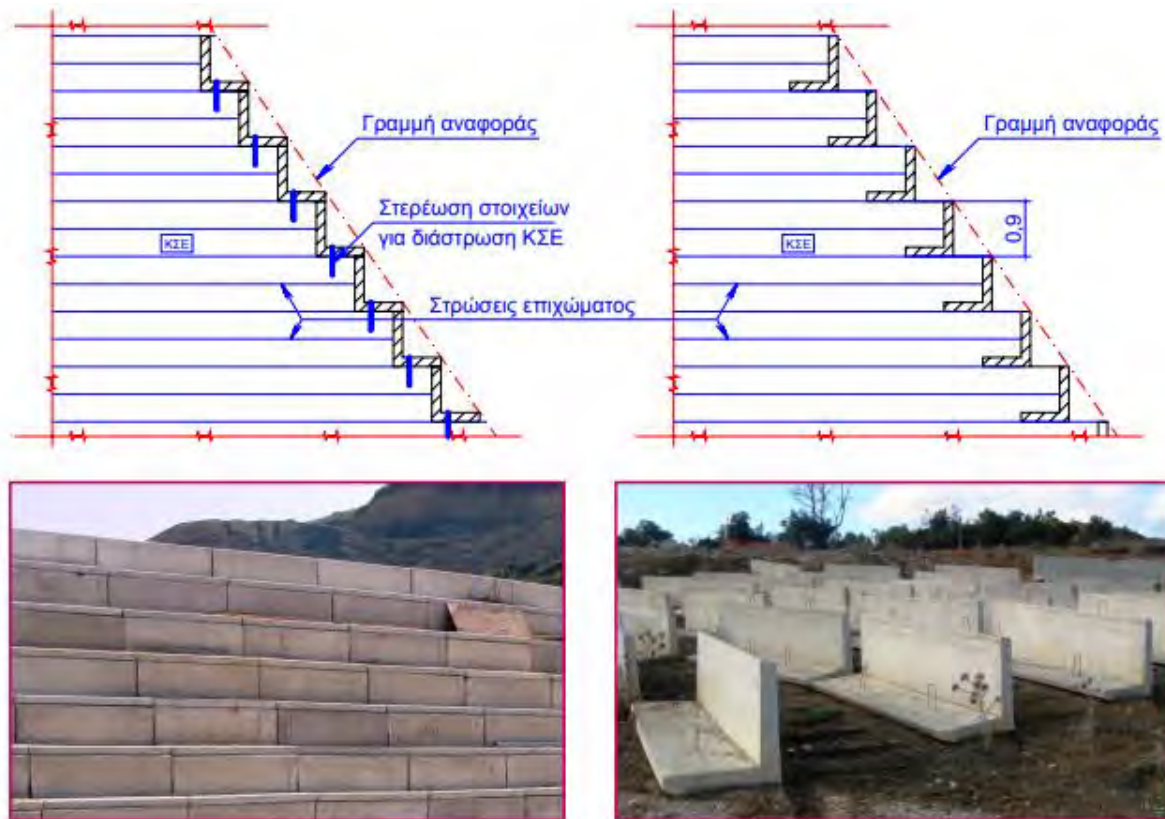
Η επένδυση με γεωμεμβράνη είναι μια εναλλακτική επιτυχής μέθοδος αντί της πλάκας σκυροδέματος που έχει χρησιμοποιηθεί στο φράγμα Φιλιατρινού στην Ελλάδα και στο φράγμα Cameron Ellis στην Αφρική το 2016.



*Εικόνα 3.4 : Εφαρμογή γεωμεμβράνης στο φράγμα Φιλιατρινού, Πελοπόννησος
(Μουτάφης & Θανόπουλος, 2015)*

Διαμόρφωση κατάντη παρειάς φράγματος

Στην κατάντη όψη του φράγματος χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα στοιχεία για την προστασία της κλίσης του πρανούς, εξασφαλίζοντας απλότητα στην κατασκευή (Εικόνα 3.5). Τοποθετούνται πριν την κατασκευή κάθε στρώσης. Τοποθετούνται δύο ή τρεις στρώσεις σκληρού επιχώματος για κάθε προκατασκευασμένο στοιχείο.

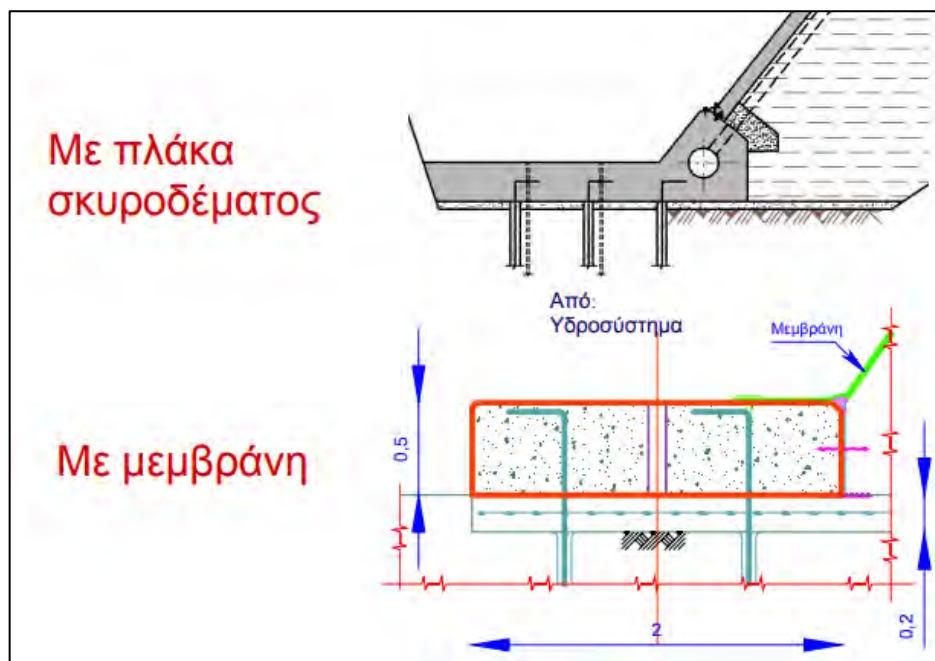


Εικόνα 3.5 : Κατασκευαστικές λεπτομέρειες κατάντη παρειάς φράγματος
(Μουτάφης Ν., 2012)

Πλίνθος

Η πλίνθος μπορεί να τοποθετηθεί σε βράχο ή ακόμη και σε αλλουβιακές προσχώσεις με την προϋπόθεση πως εξασφαλίζει τη ελέγχιμη διαπερατότητα της θεμελίωσης. Σε περίπτωση που η πλίνθος θεμελιωθεί σε βράχο χρησιμοποιείται κουρτίνα τσιμεντενέσεων για την μείωση της ροής νερού προς τη θεμελίωση του φράγματος. Στην περίπτωση θεμελίωσης της σε αλλουβιακές αποθέσεις, κατασκευάζεται τοίχος αποκοπής για τον έλεγχο της ροής.

Η πλίνθος είναι μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος η οποία συνδέει το ανάντη στεγανό στοιχείο του φράγματος με την θεμελίωση. Το πλάτος της κυμαίνεται μεταξύ 1:20 - 1:25 φορές της στάθμης του νερού. Το ελάχιστο πλάτος κατασκευής είναι συνήθως 3 m και το ελάχιστο πάχος της 0.3 m. Σε υψηλότερα φράγματα εφαρμόζεται πάχος 0.6 m. Η πλίνθος είναι αγκυρωμένη στο βράχο για να αποφευχθεί η ανύψωση της κατά την αρμολόγηση.



Εικόνα 3.6 : Διαμόρφωση πλίνθου σύμφωνα με τη μέθοδο στεγανοποίησης φράγματος (Μουτάφης Ν., 2012)

Θεμελίωση

Τα φράγματα από Hardfill μπορούν να κατασκευαστούν με θεμελιώσεις χαμηλής αντοχής. Όταν το υλικό του φαραγγιού έχει μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από 0.5 GPa, η κατασκευή τέτοιου τύπου φράγματος είναι εφικτή (Πίνακας 3.3). Σε φαραγγία με μέτρο ελαστικότητας μικρότερα από 0.5 GPa, προτιμάται η κατασκευή γεωγραμμάτων.

Dam	Canyon Modulus of Deformation E_s (GPa)	Source
Cindere dam, Turkey	3	(Yanmaz & Sezgin, 2009)
La Moncion dam, Dominican republic	0.53	(Ruiz M. , 2011)
Koudiat Acerdoune dam, Algeria	1	(Ruiz M. , 2011)
Biscarrués, Spain	0.5-2	(Granell, Duque, Sanchez, & Ruiz, 2019)
Kahir, Iran	0.8-1.5	(Ayagh, Mohammadian, & Fadaei, 2017)
Dasht-e-Palang, Iran	0.5-1.5	(Ayagh, Mohammadian, & Fadaei, 2017)
Boroujerdi, Iran	1-2	(Ayagh, Mohammadian, & Fadaei, 2017)
Giri-Castel, Iran	1.3	(Ayagh, Mohammadian, & Fadaei, 2017)

Πίνακας 3.3 : Μέτρο Ελαστικότητας για διάφορα φράγματα τύπου FSHD (Tanchev, 2014)

Γενικά, προτείνονται θεμελιώσεις με $E_s > 1$ GPa. Το Hardfill είναι ένα υλικό χαμηλής ακαμψίας και μπορεί να αντέξει με μεγαλύτερη ευκολία παραμορφώσεις στο σώμα του και τη θεμελίωση του σε σχέση με τα φράγματα κυλινδρούμενου σκυροδέματος που είναι πιο δύσκαμπτα. Το μέτρο ελαστικότητας του σκληρού επιχώματος (Hardfill) δίνεται από πολλούς ερευνητές στα 10 GPa.

Κεφάλαιο 4 : Δημιουργία αριθμητικού προσομοιώματος στο πρόγραμμα FLAC

4.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1960 από τον Clough. Είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Το σύστημα χωρίζεται σε μικρά (πεπερασμένα) στοιχεία με πλέγμα. Το πρόβλημα μεταφράζεται σε ένα σύστημα εξισώσεων για κάθε στοιχείο και η ανάλυση προσεγγίζει μια λύση ελαχιστοποιώντας το σφάλμα.

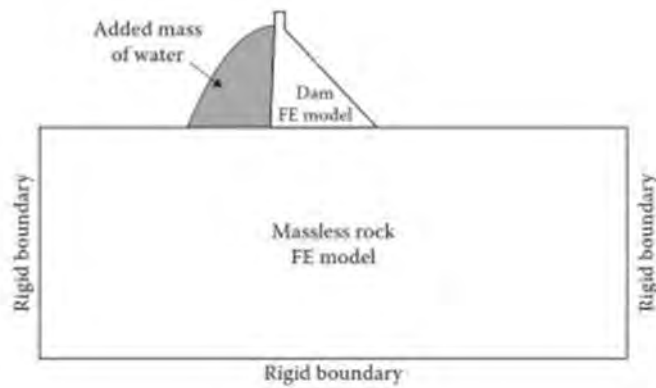
Αυτή η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι από τις παλαιότερες αριθμητικές τεχνικές που βρίσκεται σε εφαρμογή για τη λύση συνόλων διαφορικών εξισώσεων, δεδομένων αρχικών τιμών (ή/και οριακών τιμών) κατά Desai & Christian, 1977. Στη μέθοδο της πεπερασμένων διαφορών, κάθε παράγωγος στο σύνολο των εξισώσεων που τη διέπουν αντικαθίσταται απευθείας από μια αλγεβρική έκφραση γραμμένη ως προς τις μεταβλητές πεδίου (π.χ. μετατόπιση) σε διακριτά σημεία του χώρου. Αυτές οι μεταβλητές είναι απροσδιόριστες εντός στοιχείων.

Στα πρώτα χρόνια, η ανάλυση περιλάμβανε μόνο τη δομή του φράγματος, στερεωμένη σε άκαμπτη θεμελίωση όπου εφαρμοζόταν η σεισμική δόνηση στη βάση. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση είχε αρκετές ασυνέπειες. Το θεμέλιο δεν είναι άκαμπτο, και το σώμα του φράγματος αλληλεπιδρά με το νερό της δεξαμενής και το βράχο του φαραγγιού. Αυτό κάνει την ανάλυση περίπλοκη, που απαιτεί συνδυαστικούς πολυάριθμους υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό, έπρεπε να αναπτυχθούν μέθοδοι για την προσομοίωση αυτών των αλληλεπιδράσεων.

Για την προσέγγιση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης των υλικών, το ελαστικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αρχικά, και αργότερα αντικαταστάθηκε από το μη γραμμικό ελαστικό-πλαστικό μοντέλο. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων ενσωματώνει σύνθετες διαδικασίες αριθμητικής ανάλυσης και παρέχει ένα σημαντικό εργαλείο, το οποίο ενισχύθηκε από την αυξημένη υπολογιστική ισχύ.

Οι απλουστευμένες ψευδοστατικές μέθοδοι γενικά υποτιμούν τη σεισμική φόρτιση, αλλά και την ικανότητα των σωμάτων να αντιστέκονται σε αυτές τις δυνάμεις. Με τον καιρό, αναπτύχθηκαν πολύπλοκες μέθοδοι ανάλυσης για να αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά των κατασκευών υπό σεισμική φόρτιση.

Ο Clough (1980) πρότεινε να επεκταθεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων συμπεριλαμβανομένης της θεμελίωσης χωρίς μάζα. Η μέθοδος της προστιθέμενης μάζας (Westergaard, 1933) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της υδροδυναμικής πίεσης του νερού της δεξαμενής. Η σεισμική διέγερση εφαρμόστηκε στο κάτω άκαμπτο όριο της θεμελίωσης (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με θεμελίωση χωρίς μάζα
(Chopra A., 2020)

Κατά τη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων συνεχούς μέσου, το σύστημα αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία συγκεκριμένων διαστάσεων. Το πρόβλημα μετατρέπεται σε μεγάλο αριθμό εξισώσεων που λύνονται κατά προσέγγιση με αριθμητική ανάλυση. Με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) γίνεται διακριτοποίηση που επιτρέπει διαφορετικά υλικά και ιδιότητες σε διαφορετικά στοιχεία του μοντέλου, ενώ πολύπλοκες φορτίσεις μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο.

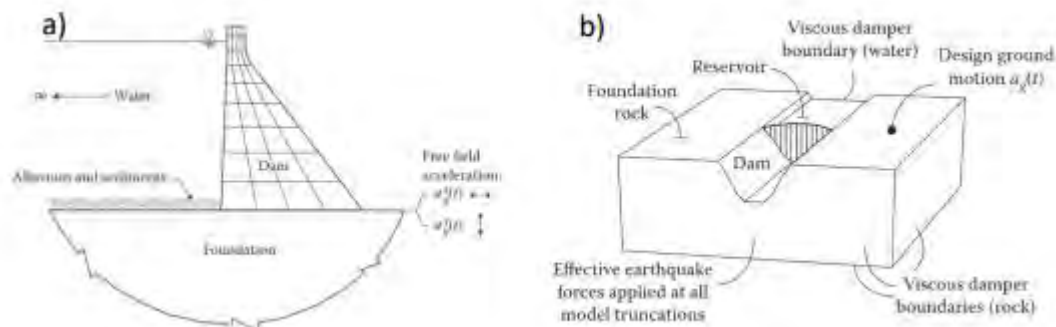
Η διαδικασία για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει ακόλουθα βήματα:

- 1) Διακριτικοποίηση του συνεχούς μέσου: Το μοντέλο αρχικά χωρίζεται σε μικρά στοιχεία, συνδεδεμένα με κόμβους. Οι πιέσεις και οι μετατοπίσεις είναι συνήθως άγνωστες μεταβλητές. Χρησιμοποιούνται διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα στοιχείων που επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της λύσης, ανάλογα με το πρόβλημα. Το μέγεθος των στοιχείων εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος, τη γεωμετρία των επιμέρους κατηγοριών υλικών και το μήκος των κυμάτων διάδοσης στη μέγιστη συχνότητα του σεισμού.
- 2) Ορισμός ιδιοτήτων στοιχείων: Σε αυτό το στάδιο ορίζονται οι ιδιότητες των επιμέρους στοιχείων με εξισώσεις. Το σύστημα περιέχει τελικά όλες τις ιδιότητες των επιμέρους στοιχείων σε μητρική μορφή που εκφράζει τη συμπεριφορά του καθενός στοιχείου ύστερα από μετασχηματισμό σε ένα συνολικό μητρώο που αντιπροσωπεύει τις εξισώσεις του συστήματος.
- 3) Ορισμός οριακών συνθηκών: Οι εξισώσεις του συστήματος τροποποιούνται για να αναπαραστήσουν τις οριακές συνθήκες. Γνωστές εξαρτημένες μεταβλητές, φορτία, τάσεις ή μετατοπίσεις επιβάλλονται σε κόμβους ή επιφάνειες στοιχείων.

Με αυτή τη πρακτική, οι μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούν πολύπλοκες διαδικασίες, περιλαμβάνοντας:

- τα πεδία νερού και θεμελίωσης της δεξαμενής
- την αλληλεπίδραση φράγματος-θεμελίωσης
- την αλληλεπίδραση φράγματος-νερού λαμβάνοντας υπόψη τη συμπίεστικότητα του νερού.

Σύγχρονα δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα δίνονται παρακάτω (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 : Σύγχρονα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων φράγματος-δεξαμενής- θεμελίωσης για 2D & 3D ανάλυση (Chopra A., 2020)

Η ρεαλιστική μοντελοποίηση συστημάτων φράγματος – νερού – θεμελίωσης απαιτεί ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνει όλους τους προηγούμενως προσδιορισμένους παράγοντες.

Υδροδυναμικές πιέσεις-μέθοδος Westergaard

Η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού σε μια δεξαμενή και ενός φράγματος μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στην συμπεριφορά του φράγματος κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Ο Westergaard (1933) δημιούργησε μια μαθηματική λύση για αυτή την αλληλεπίδραση, και αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται συχνά στη πράξη από τους μηχανικούς. Αν και η έλευση των υπολογιστών επέτρεψε την αριθμητική λύση συζευγμένων διαφορικών εξισώσεων συστημάτων στερεών και ρευστών, ο τύπος που προτάθηκε από τον Westergaard χρησιμοποιείται ευρέως για ανάλυση ευστάθειας μικρότερων φραγμάτων και προκαταρκτικούς υπολογισμούς στο σχεδιασμό μεγάλων φραγμάτων.

4.2 Πρόγραμμα FLAC 7

Κατά βάση στις παραμετρικές αναλύσεις του υπό μελέτη συστήματος φράγματος-νερού-θεμελίωσης που επιλέχθηκε, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το FLAC 2D της εταιρίας Itasca (2020). Το πρόγραμμα FLAC δισδιάστατης ανάλυσης (2D) είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών για υπολογισμούς στο πεδίο της Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Στο FLAC είναι ενσωματωμένη η γλώσσα προγραμματισμού FISH. Με τη FISH, οι χρήστες μπορούν να γράψουν τις δικές τους λειτουργίες και να εφαρμόσουν τα δικά τους καταστατικά μοντέλα.

Το FLAC παρέχει τη δυνατότητα του μενού ή των εντολών. Η λειτουργία μενού παρέχει εύκολη πρόσβαση στις λειτουργίες του FLAC. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει στους αρχάριους χρήστες να ξεκινήσουν άμεσα την επίλυση προβλημάτων με το FLAC με απλό τρόπο. Η λειτουργία εντολών απαιτεί γνώση των εντολών που χρησιμοποιούνται από το FLAC, κάτι που μπορεί να είναι πιο δύσκολο για τους νέους χρήστες σε σύγκριση με τη λειτουργία μενού.

4.3 Δημιουργία προσομοιώματος

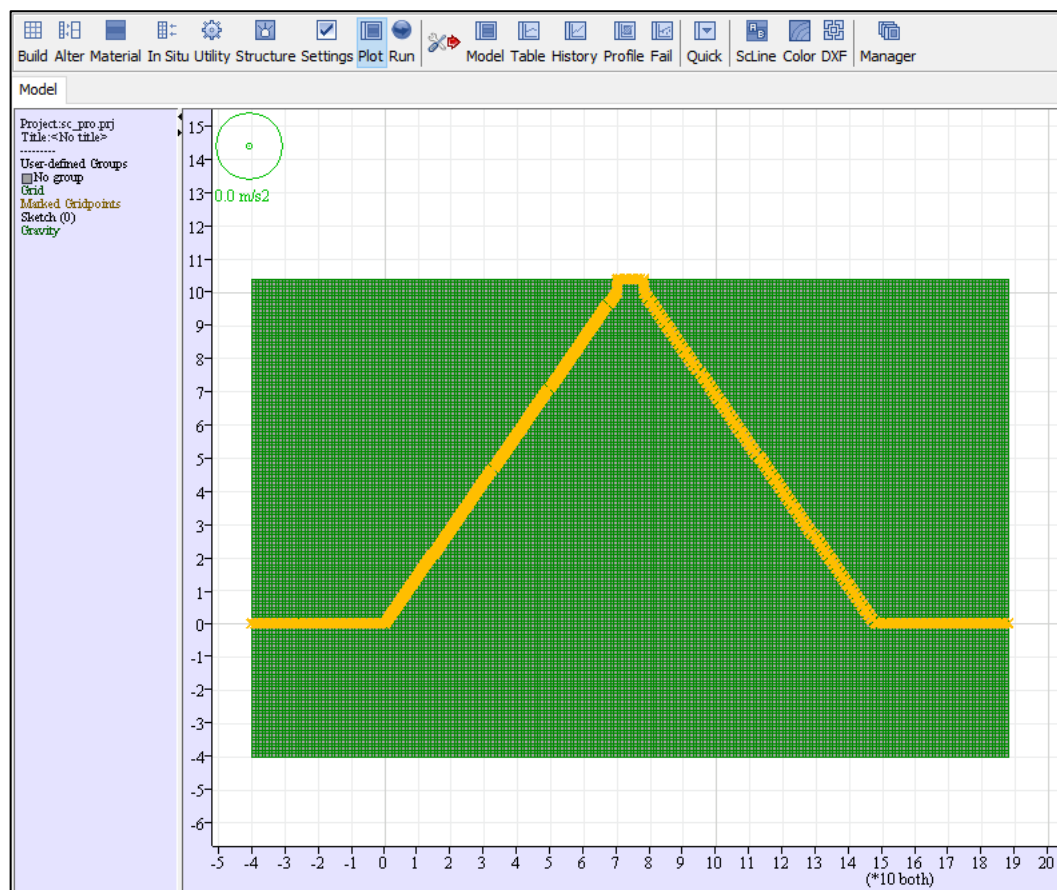
4.3.1 Γεωμετρία μοντέλου, διακριτοποίηση, εισαγωγή υλικών

Αρχικά, επιλέχθηκε η γεωμετρία του φράγματος με μέγιστο ύψος στέψης 104 m και κλίσεις πρανών 0.7/1 (πλάτος/ύψος). Η θεμελίωση θα σχεδιαστεί σε βάθος 40 m και με απόσταση εκατέρωθεν των πρανών 40 m. Η γεωμετρία αυτή θα παραμείνει σταθερή καθ' όλες τις αναλύσεις των διαφορετικών σεναρίων της σεισμικής απόκρισης του μοντέλου. Οι παραλλαγές των σεναρίων ανάλυσης θα είναι αποτέλεσμα τροποποίησης του υλικού της θεμελίωσης, του υλικού του σκληρού επιχώματος, του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης και της έντασης του σεισμού (όπως θα επεξηγηθεί παρακάτω).

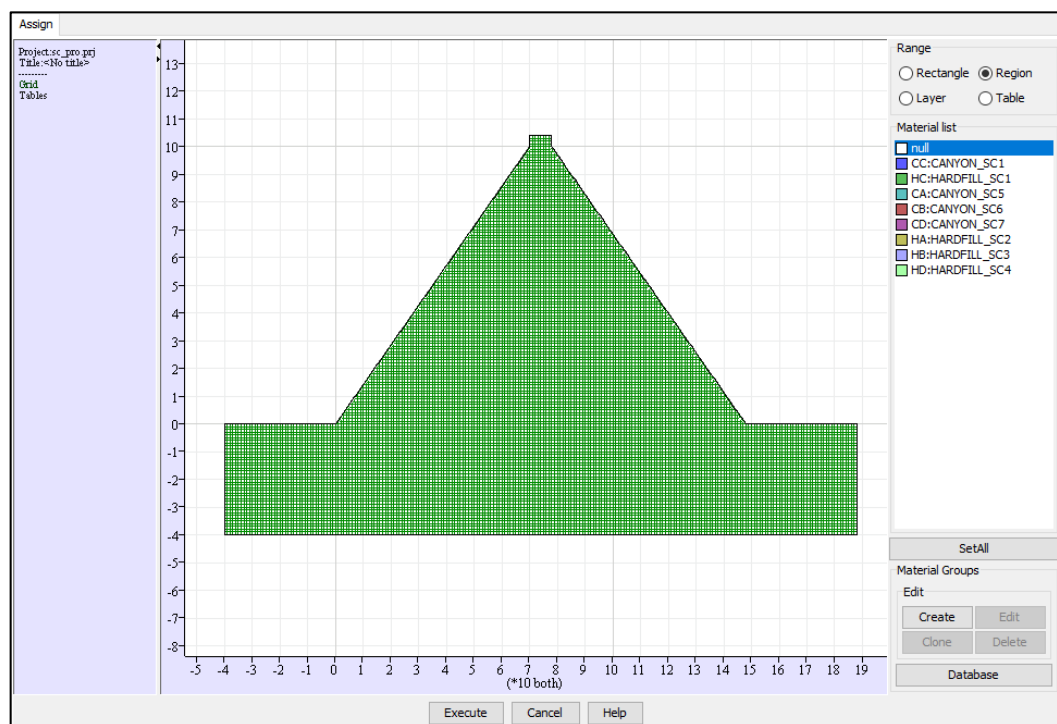
Δημιουργείται, λοιπόν, ένας κάναβος πλάτους (x) 228m και ύψους (y) 144m με τις εντολές από το μενού εργασίας, Build-Generate-Simple. Στη συνέχεια, γίνεται η διακριτοποίηση του κανάβου (Edit-Mesh-Zoning manual) έτσι ώστε να διαιρεθεί η δισδιάστατη επιφάνεια σε τετρακομβικά στοιχεία διαστάσεων 1x1m. Μέσω της εντολής In Situ-Table δημιουργείται ένας πίνακας με τις συντεταγμένες των στοιχείων που περικλείουν τη γεωμετρία του φράγματος και της θεμελίωσης. Με την εντολή Alter-Shape ενεργοποιούνται τα σημεία που δόθηκαν προηγουμένως στον πίνακα (Generate) και ακολούθως με την εντολή Material-Assign-null αποκόπτονται από την επιφάνεια τα περιττά στοιχεία, όπως δίνεται στις παρακάτω εικόνες 4.3 και 4.4.

Σε επόμενο βήμα εισάγονται οι ιδιότητες των υλικών του υποβάθρου θεμελίωσης και του σκληρού επιχώματος. Θεωρείται πως η θεμελίωση θα προσομοιωθεί ως ένα υλικό με ελαστική συμπεριφορά ενώ το σκληρό επίχωμα θα προσομοιωθεί κατά την ανάλυση με το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, και αποκοπή της εφελκυστικής τάσης (tension cut off).

Οι ιδιότητες των υλικών του βασικού σεναρίου (Material-Assign) εισάγονται, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 4.1. Μεγαλύτερη αναφορά για τα υλικά σκληρού επιχώματος που χρησιμοποιήθηκαν θα γίνει σε επόμενη παράγραφο.



Εικόνα 4.3 : Δημιουργία κανάβου-Εισαγωγή συντεταγμένων γεωμετρίας



Εικόνα 4.4 : Αποκοπή περιττών τετράκομβων στοιχείων κανάβου

CANYON	CC
ρ (kg/m ³)	2450
E (MPa)	5880
ν	0.2
B (MPa)	3266
G (MPa)	2450
Vs (m/s)	1000
HARDFILL	HC
ρ (kg/m ³)	2150
E (MPa)	10000
ν	0.2
B (MPa)	5555
G (MPa)	4167
Vs (m/s)	1392
f _c (MPa)	6
f _t (MPa)	0.72
ϕ	42
c (MPa)	1,336

Πίνακας 4.1 : Ιδιότητες υλικών σκληρού επιχώματος (*hardfill*) και θεμελίωσης (*canyon*) του βασικού σεναρίου ανάλυσης

Οι παραπάνω λειτουργίες που αφορούν στη γεωμετρία, την διακριτοποίηση και την εισαγωγή υλικών στο μοντέλο μπορούν να δοθούν και με κώδικα Fish, ως εξής:

```

config ats dynamic extra 1
grid 228, 144
gen -40.0, -40.0 -40.0, 104.0 188.0, 104.0 188.0, -40.0 i=1,229 j=1,145
model elastic i=1,228 j=1,144
table 1 delete
table 1 -40.00 0 0 0 70.00 100.0 70.00 104.0 78.00 104.0 78.00 100.0 148.0 0 188.0 0
gen table 1
model null region 173 118
group 'null' region 173 118
group delete 'null'
model null region 82 106
group 'null' region 82 106
group delete 'null'
mark i 41 185 j 41
mark i 186 188 j 41
group 'CC:CANYON_SC1' region 170 19
group 'HC:HARDFILL_SC1' region 115 89
group 'HC:HARDFILL_SC1' region 41 41
group 'HC:HARDFILL_SC1' region 188 41
model elastic notnull group 'CC:CANYON_SC1'
prop density=2450.0 bulk=3.26667E9 shear=2.45E9 notnull group 'CC:CANYON_SC1'
model mohr notnull group 'HC:HARDFILL_SC1'

```

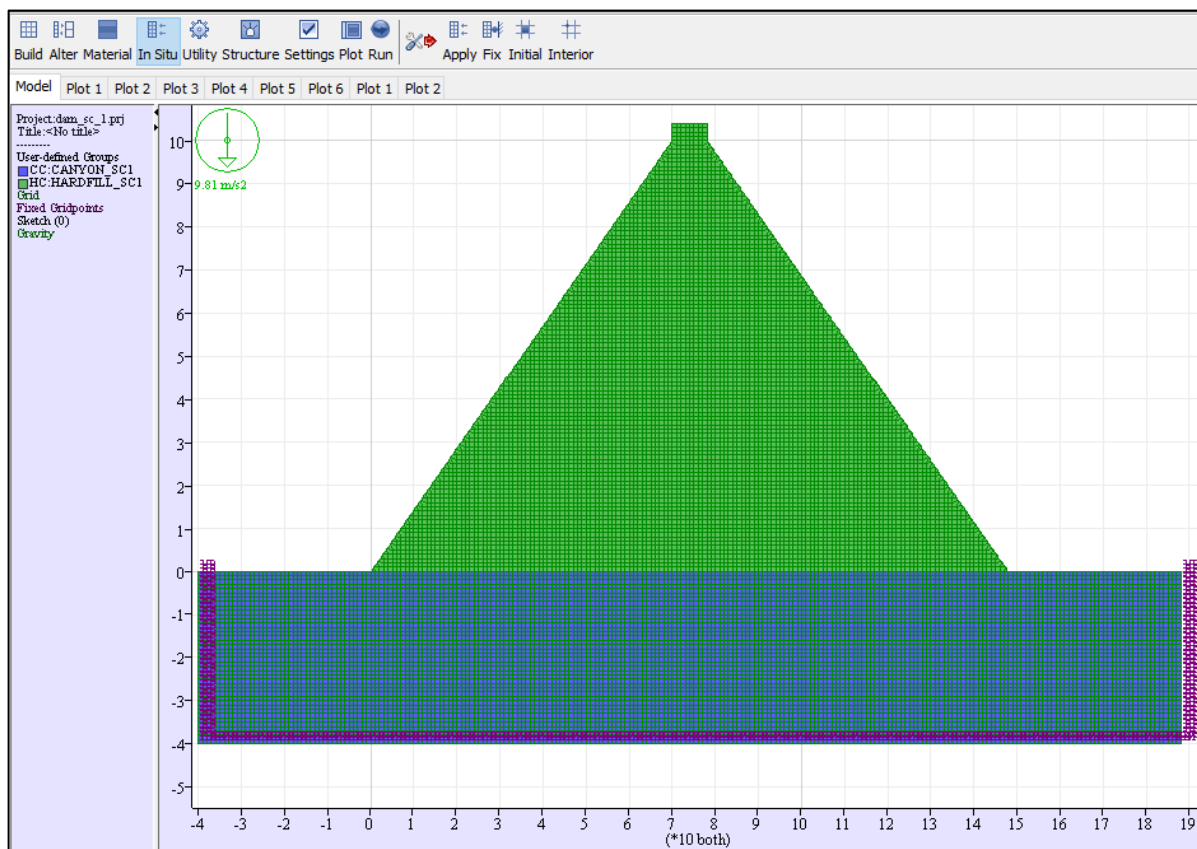
prop density=2150.0 bulk=5.55556E9 shear=4.16667E9 cohesion=1336000.0 friction=42.0
dilation=0.0 tension=720000.0 notnull group 'HC:HARDFILL_SC1'

4.3.2 Συνοριακές συνθήκες και φορτίσεις

Στον παρακάτω αναφερόμενο κώδικα ορίζονται οι συνολικές συνοριακές συνθήκες στις περιοχές όπου είναι τα όρια του μοντέλου. Με την εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών δεσμεύονται οι μετακινήσεις στα άκρα της θεμελίωσης. Δεσμεύεται λοιπόν η οριζόντια μετακίνηση κατά x στο δεξί και αριστερό άκρο της θεμελίωσης, καθώς και η πίεση των πόρων (pore pressure, pp). Στο κάτω όριο της θεμελίωσης δεσμεύεται η οριζόντια μετακίνηση x , η κατακόρυφη μετακίνηση y , και η πίεση των πόρων pp . Η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών μπορεί να γίνει από το μενού εργασίας με την εντολή In Situ-Fix, ή γράφοντας τις παρακάτω εντολές στη «γλώσσα» Fish.

Στον κώδικα Fish προστίθενται οι ακόλουθες γραμμές εντολών:

```
fix x y j 1  
fix x i 1 j 1 41  
fix x i 229 j 1 41
```



Εικόνα 4.5 : Συνοριακές συνθήκες θεμελίωσης (Flac 7, Itasca)

Εισαγωγή ανάντη πλάκας σκυροδέματος

Στο μοντέλο εισάγεται το στεγανό διάφραγμα στην ανάντη παρειά του φράγματος, το οποίο προσομοιώνει την πλάκα σκυροδέματος που ακουμπά στην θεμελίωση στον πόδα του πρανούς. Το στοιχείο σκυροδέματος εισάγεται με την εντολή Structure-Beam από το μενού εργασίας κι έτσι δημιουργούνται αυτόματα οι κόμβοι και τα δικομβικά γραμμικά στοιχεία

που το απαρτίζουν. Οι ιδιότητες του υλικού σκυροδέματος (γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά) δίνονται από το παράθυρο “Element Properties” που εμφανίζεται επιλέγοντας ένα τυπικό στοιχείο σκυροδέματος τύπου Beam. Οι ιδιότητες της πλάκας σκυροδέματος είναι σταθερές καθ’ όλες τις παραμετρικές αναλύσεις.

Πλάκα	A
ρ (kg/m ³)	2400
E (MPa)	30000
ν	0.2
B (MPa)	16666
G (MPa)	12500
f _c (MPa)	30
f _t (MPa)	3.6

Πίνακας 4.2 : Ιδιότητες σκυροδέματος της ανάντη πλάκας

Εικόνα 4.6 : Εισαγωγή γεωμετρίας και ιδιοτήτων του σκυροδέματος της ανάντη πλάκας

Έτσι σχηματίζονται οι παρακάτω εντολές στον κώδικα Fish:

```
struct node 1 0.0,0.0
struct node 2 0.41446885,0.59209836
struct node 3 0.8282151,1.1831645
struct node 4 1.2413764,1.773395
struct node 5 1.6542453,2.3632076
struct node 6 2.067114,2.95302
.....
struct node 170 69.58713,99.41019
struct node 171 70.0,100.0
struct beam begin node 1 end node 2 seg 1 prop 1001
.....
struct beam begin node 170 end node 171 seg 1 prop 1001
struct prop 1001
struct prop 1001 density 2400.0 e 3E10 height 0.5 width 1.0 syield 3600000.0 sycomp 3.0E7
```

Στη συνέχεια δημιουργείται η διεπιφάνεια μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και του σκληρού επιχώματος μέσω της οποίας ορίζεται ο τρόπος κατασκευής της πλάκας σκυροδέματος, η πλάκα είναι πρακτικά επικαθήμενη (unglued), όχι συγκολλημένη με δείκτη ακαμψίας (τάση/παραμόρφωση) $kn=2e^8$ Pa και διατμητικής αντίστασης $ks=2e^7$ Pa, ορίζεται ακόμη και ο τρόπος αλληλεπίδρασης της πλάκας με το σκληρό επίχωμα, δίνονται παράμετροι που ορίζουν την ολίσθηση της πλάκας όπως είναι η γωνία τριβής f (friction angle). Ορίζεται επίσης, η συνοχή c (cohesion) της διεπιφάνειας, η γωνία διασταλτικότητας d (dilation angle) και οι παράμετροι $tbond$, $sbratio$, $bslip$ όπου,

$bslip$ (on ή off): Επιτρέπεται ή δεν επιτρέπεται η ολίσθηση για ένα συνδεδεμένο τμήμα διεπαφής. Η προεπιλογή είναι απενεργοποιημένη (δηλαδή, η ολίσθηση δεν επιτρέπεται). Εάν το $bslip$ είναι ενεργοποιημένο, το FLAC θα μηδενίσει αυτόματα τη διαστολή.

$tbond$: εφελκυστική αντοχή (tensile strength, Pa)

$sbratio$: Ο λόγος της διατμητικής αντοχής ως προς την εφελκυστική αντοχή ($tbond$). Η προεπιλεγμένη τιμή για το $sbratio$ είναι 100 (δηλαδή, η αντοχή διάτμησης είναι 100 φορές της αντοχής σε εφελκυσμό).

Τέλος, δεσμεύονται οι μετακινήσεις στο κάτω άκρο της πλάκας όπου υπάρχει η πλίνθος.

Οι παραπάνω λειτουργίες δίνονται μέσω του κώδικα Fish:

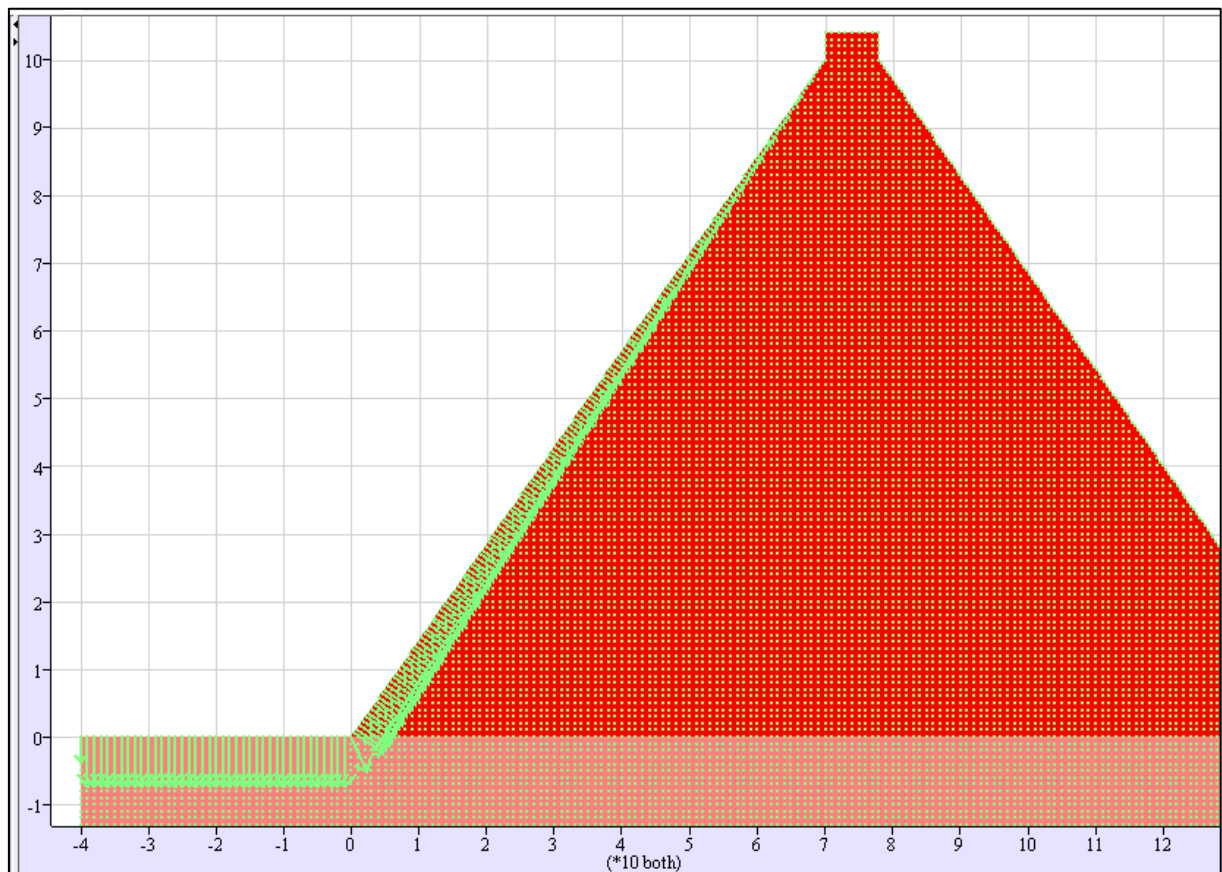
```
interface 1 unglued kn=2.0E7 ks=2000000.0 cohesion=1.0 dilation=0.0 friction=34.992 tbond=0.0
sbratio=100.0 bslip=off
struct prop 1001 density 2400.0 e 3E10 height 0.5 width 1.0 syield 3600000.0 sycomp 3.0E7
struct node 1 fix x y
```

Υδροστατική πίεση

Εφαρμόζεται στο μοντέλο η υδροστατική πίεση του νερού της δεξαμενής. Οι πιέσεις προσομοιώνονται από το ύψος των 100 m του φράγματος έως και τον πόδα του. Έτσι, σύμφωνα με τον τύπο $p = z * g * \rho$, όπου z : το βάθος του νερού, g : επιτάχυνση της βαρύτητας και ρ : πυκνότητα του νερού, $p = 100 \text{ m} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 1000 \text{ kg/m}^3 = 980670 \text{ Pa}$. Η πίεση του νερού εφαρμόζεται με τριγωνική κατανομή από το ύψος των 100 m, όπου η πίεση είναι μηδενική, μέχρι και τον πόδα του, όπου φθάνει την τιμή των 980670 Pa, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

Κώδικας Fish:

```
apply pressure 980670.0 from 1,41 to 41,41  
apply pressure 980670.0 var 0.0 -980670.0 from 41,41 to 111,141  
struct node 1 free x y
```



Εικόνα 4.7 : Εφαρμογή υδροστατικών πιέσεων στο μοντέλο

Στατική ανάλυση

Έχουμε δημιουργήσει το αρχικό μοντέλο το οποίο υποβάλλουμε σε στατική ανάλυση, εξετάζοντας την ευστάθεια της κατασκευής με φορτία το ίδιο βάρος της κατασκευής και τις υδροστατικές πιέσεις από το νερό του ταμιευτήρα.

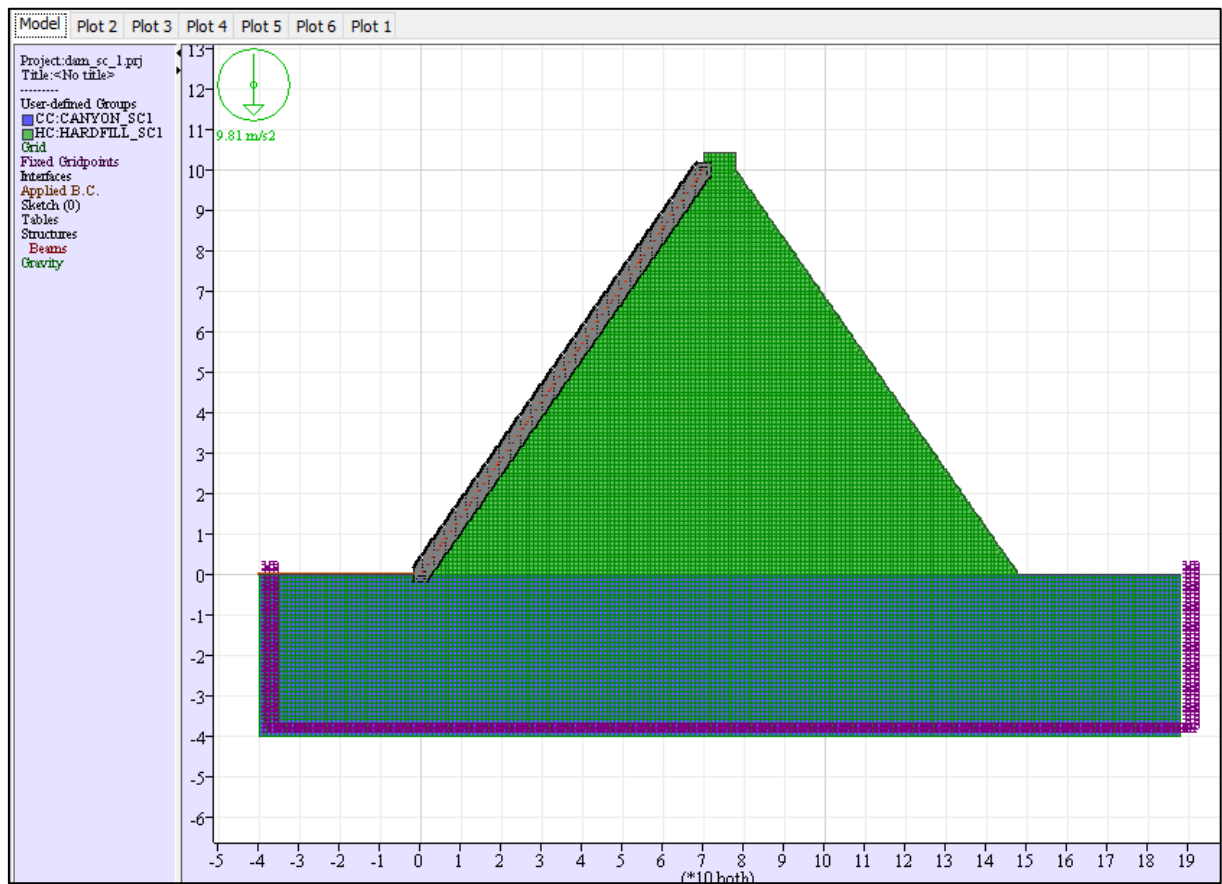
Εισάγουμε τις εξής εντολές για την πραγματοποίηση της στατικής ανάλυσης:

set gravity=9.81

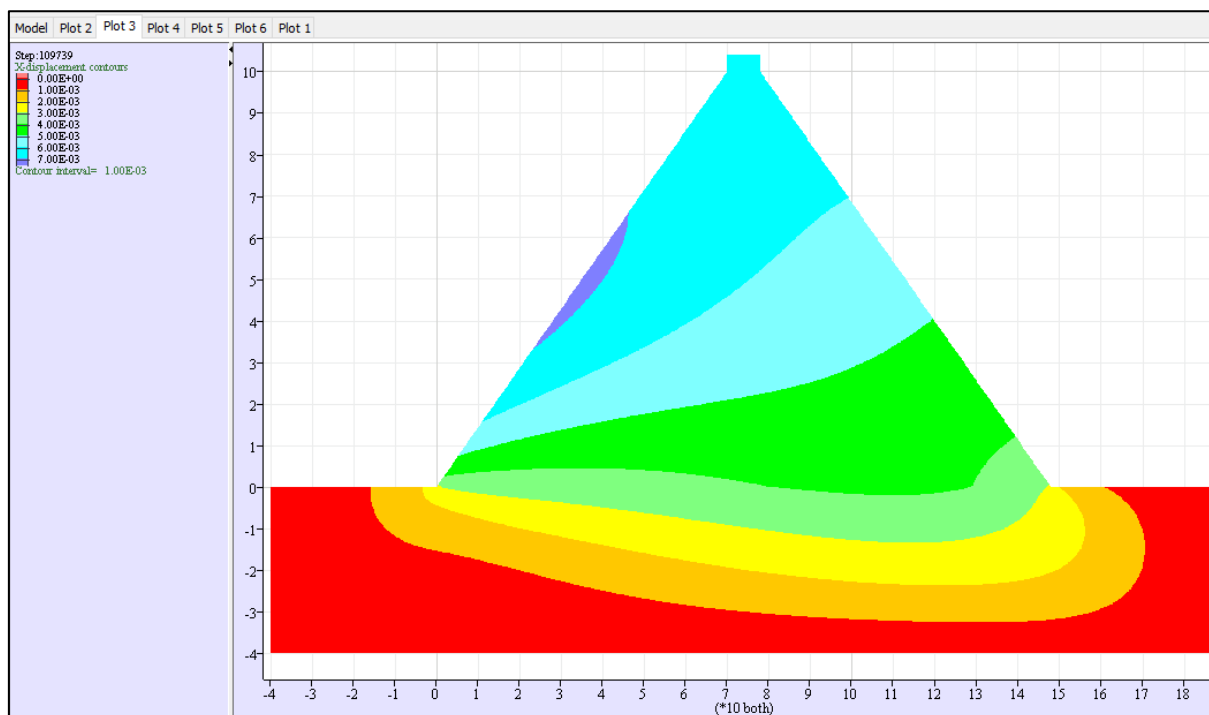
set dyn=off

history 999 unbalanced

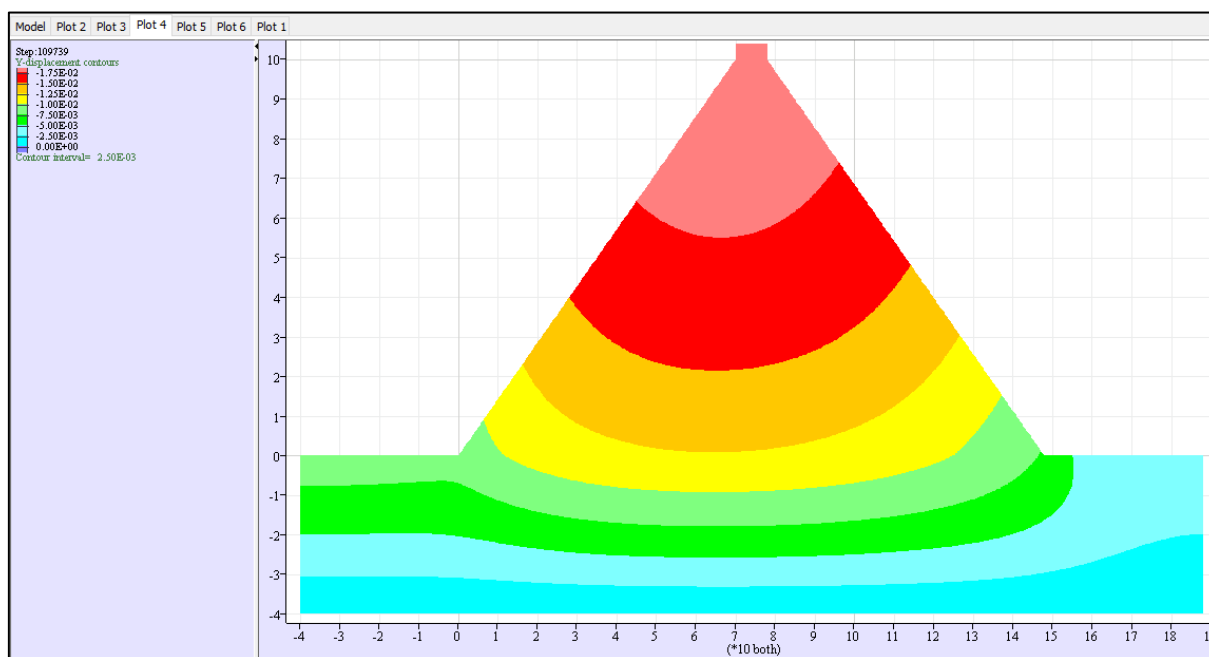
solve



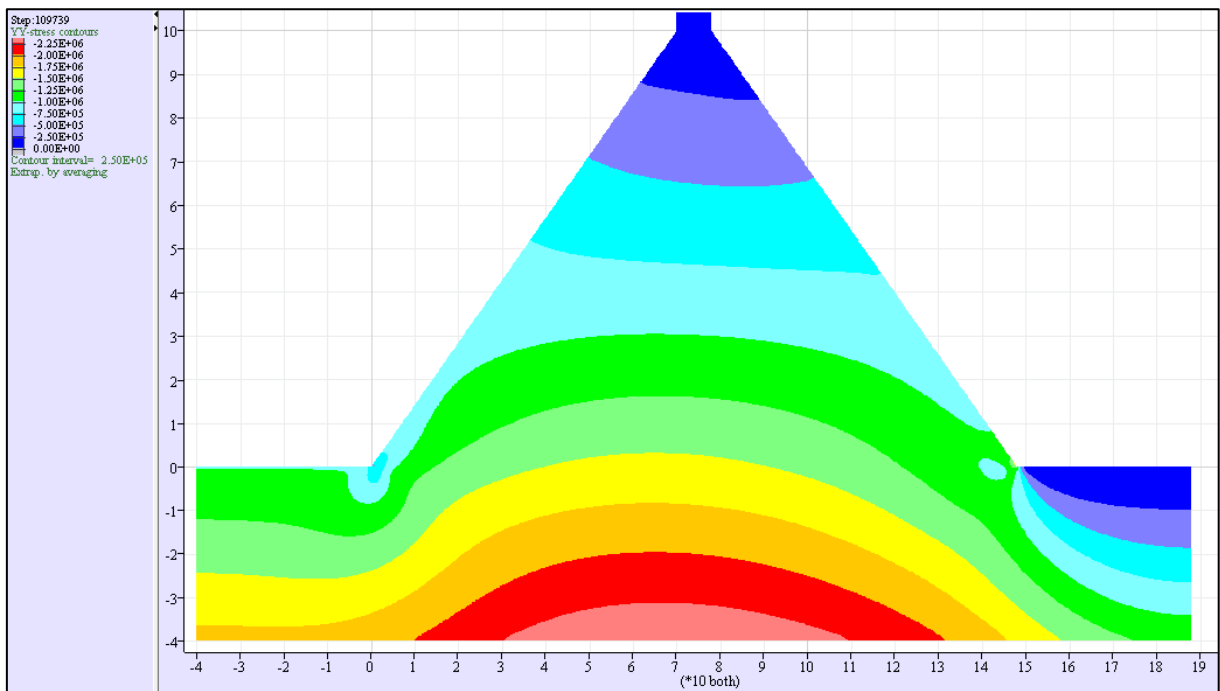
Εικόνα 4.8 : Αρχικό μοντέλο ανάλυσης



Εικόνα 4.9 : Οριζόντιες μετακινήσεις λόγω στατικής φόρτισης



Εικόνα 4.10 : Κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω στατικής φόρτισης



Εικόνα 4.11 : Κατακόρυφη ορθή τάση λόγω στατικής φόρτισης

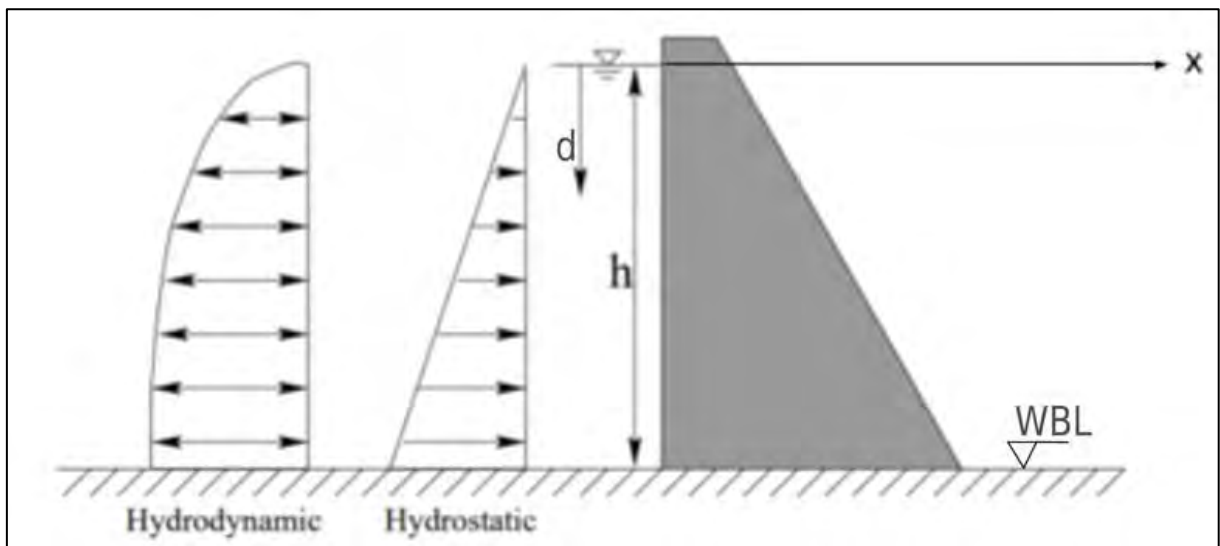
Παρατηρούμε πως οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις που σημειώνονται είναι της τάξης των 7 mm κάτω από το κέντρο της πλάκας σκυροδέματος και μειώνονται σταδιακά στο σώμα του φράγματος, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις είναι της τάξης των 1.75 cm, με τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις να σημειώνονται κοντά στη στέψη του φράγματος. Η ανάπτυξη των κύριων τάσεων στο σώμα του φράγματος αφορά κατά βάση θλιπτικές τάσεις. Η κατατομή της κατακόρυφης ορθής τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως το μοντέλο ανταποκρίνεται ορθά στην προσομοίωση του συστήματος φράγμα-νερό ταμειυτήρα για τα στατικά φορτία πριν τον σεισμό.

4.4 Δυναμική ανάλυση μοντέλου

Υδροδυναμικές πιέσεις στο φράγμα

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η αλληλεπίδραση μεταξύ μίας δύσκαμπτης κατασκευής και του εξωτερικού νερού δημιουργεί πρόσθετες πιέσεις στην ανάντη όψη του φράγματος. Αυτές οι υδροδυναμικές πιέσεις μπορούν να προσεγγιστούν με τον τύπο Westergaard (1933), ο οποίος χρησιμοποιεί μια παραβολική προσέγγιση για τις πρόσθετες υδροδυναμικές πιέσεις λόγω της κίνησης του σεισμού. Στην εικόνα 4.12 βλέπουμε τις δυνάμεις που οφείλονται στις συνολικές πιέσεις του νερού με την εξέλιξη του σεισμικού παλμού. Σημειώνεται ότι οι υδροδυναμικές δυνάμεις δρουν και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η πίεση του νερού θεωρείται ως προστιθέμενη μάζα, που δρα στην ανάντη επιφάνεια μιας δομής φράγματος και το υπόλοιπο νερό θεωρείται ότι είναι ανενεργό.



Εικόνα 4.12 : Υδροδυναμικές πιέσεις κατά Westergaard (Itasca, 2021)

$$p = \frac{7}{8} \rho a_x \sqrt{hd}$$

ρ = Density of water
 a_x = Horizontal acceleration

Αυτή η εξίσωση δίνει την υδροδυναμική πίεση που ασκείται στην ανάντη όψη του φράγματος, στο βάθος d , λόγω της επιτάχυνσης του εδάφους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θεωρία Westergaard βασίζεται στις εξής παραδοχές: (α) Η πλευρά

του τοίχου που επενεργεί η υδροδυναμική πίεση είναι κατακόρυφη. (β) το νερό είναι ασυμπίεστο και (γ) ο τοίχος είναι άκαμπτος. Δεδομένου ότι καμία από τις τρεις παραδοχές δεν ισχύουν στην παρούσα περίπτωση, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση της μεθόδου προστιθέμενης μάζας κατά Westergaard είναι μία απλουστευτική προσέγγιση του προβλήματος.

Στη βιβλιοθήκη του προγράμματος Flac 2D υπάρχει αποθηκευμένη εντολή η οποία υλοποιεί την θεωρία προστιθέμενης μάζας του Westergaard, ορίζοντας κάποιες παραμέτρους (το ύψος διεπαφής νερού-φράγματος: 100 m, την κατεύθυνση κίνησης του νερού, εδώ οριζόντια μόνο, και την πυκνότητα του νερού 1000 kg/m³), όπως δίνεται παρακάτω.

```
;call wester
ini xdisp 0 ydisp 0 xvel 0 yvel 0
call westergaard.fis
set _dx=+1 _dy=0. yb = 0. height = 100. den_w = 1e3
_westergaard
```

Απόσβεση υστερητικής ενέργειας (Rayleigh Damping)

Υπολογισμός ιδιοσυχνότητας φράγματος:

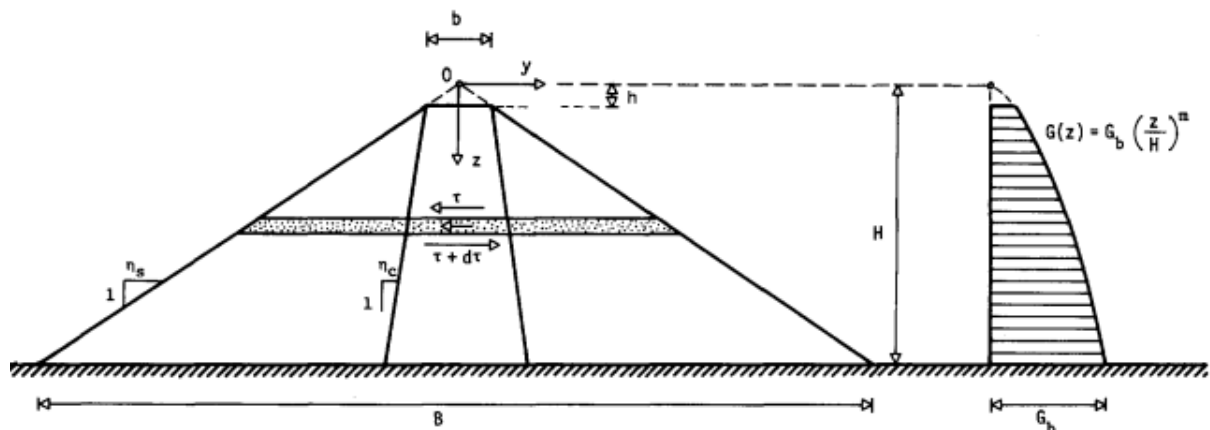
Η ιδιοσυχνότητα του φράγματος εκφράζεται ως προς την ταχύτητα του κύματος από την παρακάτω σχέση,

$$\omega_n = \frac{a_n(2-m)}{2} \frac{C_b}{H}$$

Όπου,

$C_b = \sqrt{G/\rho} = 1317.67 \text{ m/s}$ για $G=4.167 \text{ GPa}$ και $\rho=2150 \text{ kg/m}^3$ (σκληρό επίχωμα).

H : το ύψος του φράγματος, η τιμή του a_n εξαρτάται από την ανομοιογένεια m (εδώ $m=0$) και τον λόγο $\lambda = h/H$ (εδώ $\lambda=0.016$), όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.13 : Διατομή φράγματος και ορισμός του λόγου $\lambda = h/H$
(Dakoulas and Gazetas, 1985)

Table 2. Roots a_n for coefficient of inhomogeneity m equal to 0

λ	mode n							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0.00	2.405	5.520	8.654	11.792	14.931	18.071	21.212	24.352
0.03	2.409	5.541	8.703	11.880	15.068	18.262	21.464	24.670
0.05	2.416	5.576	8.783	12.016	15.265	18.527	21.797	25.074
0.10	2.448	5.726	9.096	12.510	15.949	19.403	22.866	26.335
0.15	2.501	5.948	9.525	13.153	16.807	20.473	24.148	27.829
0.20	2.574	6.233	10.048	13.917	17.809	21.711	25.622	29.536
0.25	2.668	6.580	10.666	14.804	18.963	23.131	27.305	31.484
0.30	2.786	6.994	11.388	15.831	20.293	24.763	29.239	33.718
0.35	2.930	7.485	12.231	17.024	21.833	26.651	31.474	36.300
0.40	3.107	8.067	13.222	18.421	23.637	28.859	34.086	39.315
0.45	3.323	8.763	14.400	20.078	25.771	31.471	37.175	42.880
0.50	3.588	9.605	15.818	22.070	28.336	34.608	40.883	47.161

Πίνακας 4.3 : Συντελεστές a_n για τον υπολογισμό ιδιοπεριόδου φράγματος
(Dakoulas and Gazetas, 1985)

Από τον παραπάνω πίνακα για $m=0$, $\lambda=0.016$ και $n=1$ (1^η ιδιοπερίοδος) προκύπτει η τιμή της του $a_n=2.407$, οπότε η ιδιοσυχνότητα είναι $f = 4.85 \text{ Hz}$ και η ιδιοπερίοδος $T = 0.206 \text{ s}$.

Θεώρηση απόσβεσης:

Τρεις διαφορετικοί τύποι απόσβεσης χρησιμοποιούνται στη σεισμική ανάλυση: (α) απόσβεση υλικού (εγγενής απόσβεση του καταστατικού προσομοιώματος και/ή απόσβεση

Rayleigh), (β) απόσβεση κυματικής ακτινοβολίας και (γ) πολύ μικρή ποσότητα αριθμητικής απόσβεσης.

Στη δυναμική ανάλυση άμεσης ολοκλήρωσης, η ανελαστική συμπεριφορά υλικών περιλαμβάνει μετατροπή ενέργειας σε θερμότητα (εγγενής απόσβεση υλικού). Πρόσθετα η απόσβεση Rayleigh μπορεί να εισαχθεί μέσω των συντελεστών απόσβεσης: αR για αναλογική απόσβεση μάζας και βR για αναλογική απόσβεση ακαμψίας. Μια στατιστική ανάλυση της απόσβεσης που μετρήθηκε σε 32 φράγματα από σκυρόδεμα (Chopra, 2020) έδειξε η απόσβεση δεν μπορεί να υπερβαίνει το 5%. Στο μοντέλο που μελετάται εδώ η απόσβεση Rayleigh θεωρήθηκε 3%.

Στον κώδικα Fish δίδονται η ιδιοσυχνότητα του φράγματος και η απόσβεση Rayleigh του υλικού θεμελίωσης όπως ορίστηκαν παραπάνω.

```
; set numerical damping for model  
; Rayleigh type, value 0.03 (3%) with a minimum at frequency f = 4.85 Hz  
;  
set dy_damp=rayleigh 0.03 4.85
```

Στην συνέχεια τροποποιούνται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος και εισάγεται ο σεισμός. Για οριζόντια διέγερση, μόνο οι κατακόρυφες μετακινήσεις δεσμεύονται στο κάτω όριο της θεμελίωσης. Στα δύο κατακόρυφα όρια του μοντέλου επιβάλλονται συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

Στην συγκεκριμένη ανάλυση, τα αποτελέσματα της οποίας θα δοθούν παρακάτω, εισάγουμε το επιταχυνσιογράφημα από το σεισμό της Λευκάδας, ο οποίος έχει διάρκεια 30 sec με βήμα 0.01 sec. Οι επιταχύνσεις είναι βαθμονομημένες με μέγιστη επιτάχυνση 0.3g. Τα στοιχεία της σεισμικής διέγερσης δίνονται στα επόμενα γραφήματα.

Κώδικας Fish:

```
; apply free field boundary conditions  
apply ff
```

```
fix y j=1
```

```
water d=1000. bulk 2.e9 tens 100000.
```

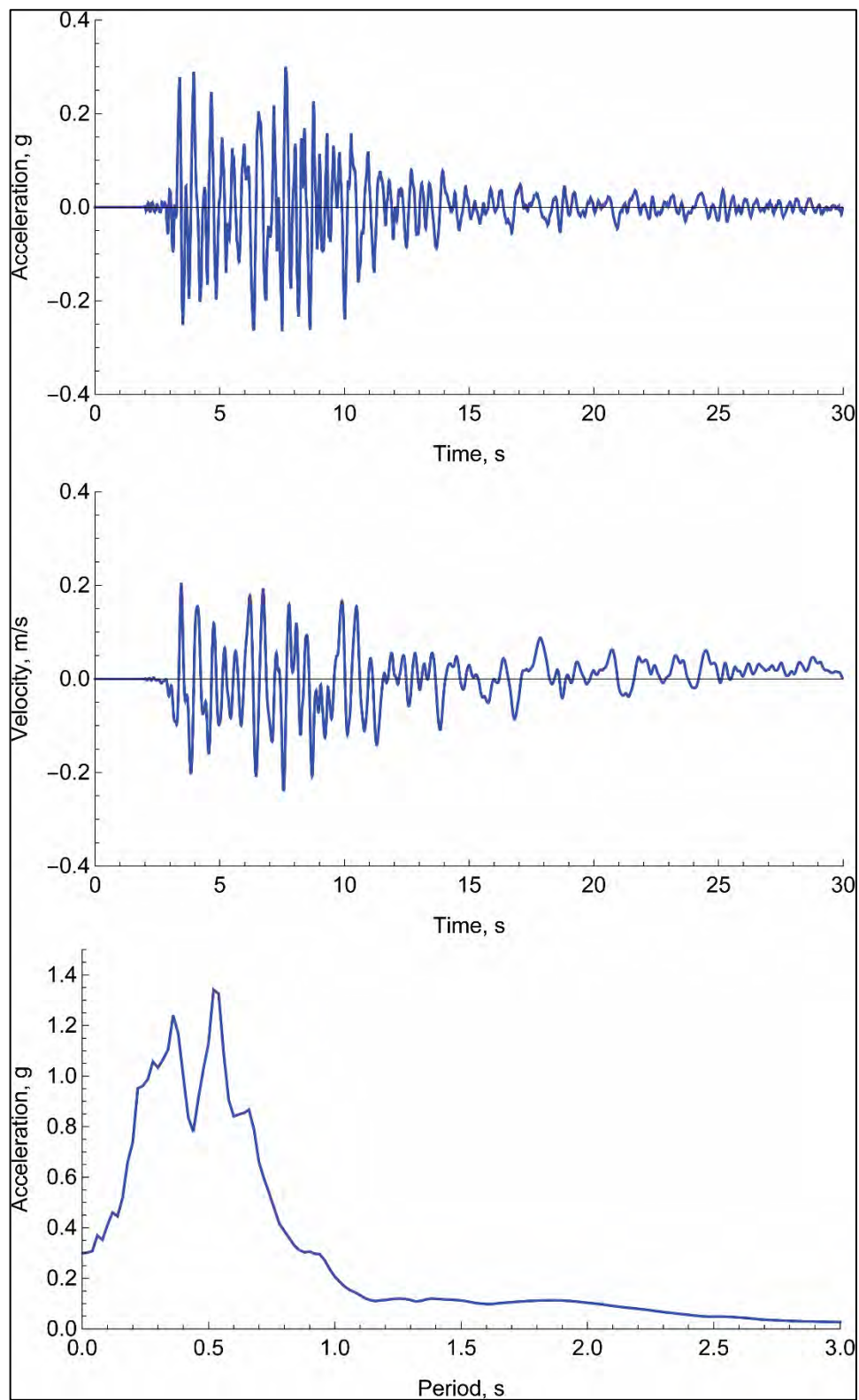
```
; read acceleration in the horizontal direction  
; read acceleration in the vertical direction  
; read the corresponding time
```

```
def io1  
  float tim1 w11  
  array tim1(2998) w11(2998)  
  status = open('tim1.dat', 0, 1)  
  status = read(tim1, 2998)  
  status = close  
  status = open('lefkada_xacc.dat', 0, 1)  
  status = read(w11, 2998)  
  status = close
```

```
; use the above records to make tables of horizontal and vertical acceleration versus time  
loop n (1, 2998)  
  xtable(3,n)=parse(tim1(n),1)  
  ytable(3,n)=parse(w11(n),1)  
end_loop  
end  
io1  
def ww11  
  ww11=table(3,dytime)  
end  
ww11
```

```
; apply the horizontal and vertical excitation at the base of the model
```

```
;  
apply xacc=9.81 hist=ww11 j=1  
apply yacc=0.0 j=1
```

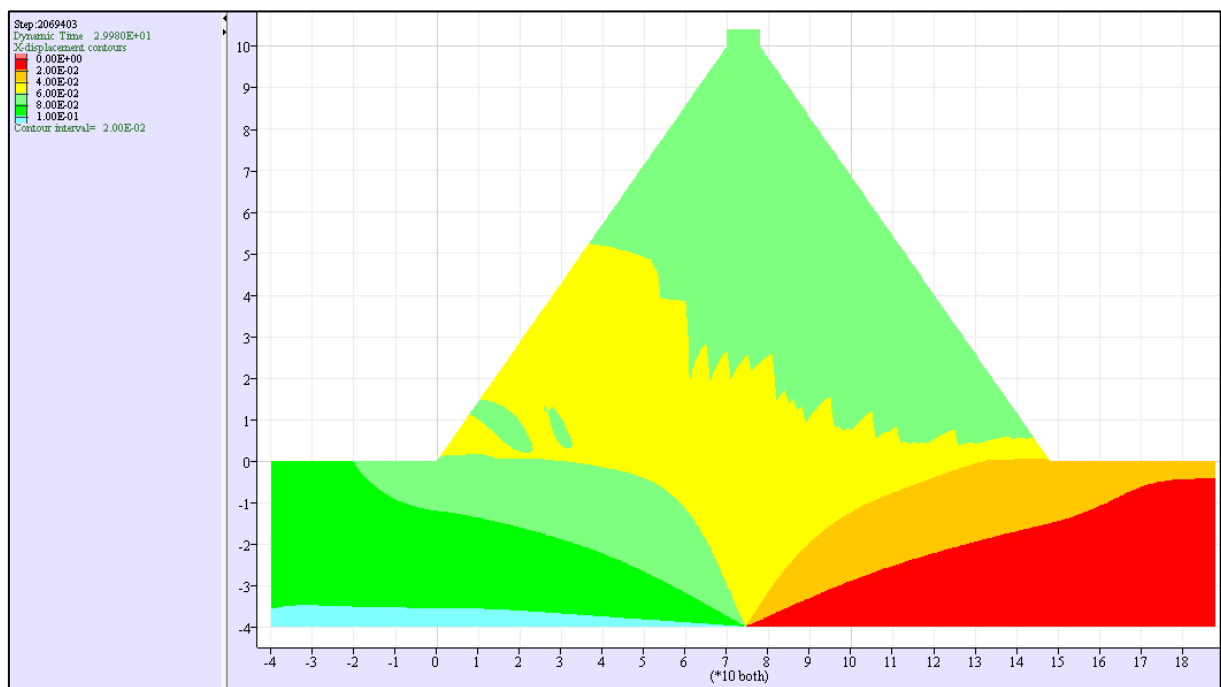


Σχήμα 4.1 : Σεισμός Λευκάδας 2003: (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) Φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (για απόσβεση 5%)

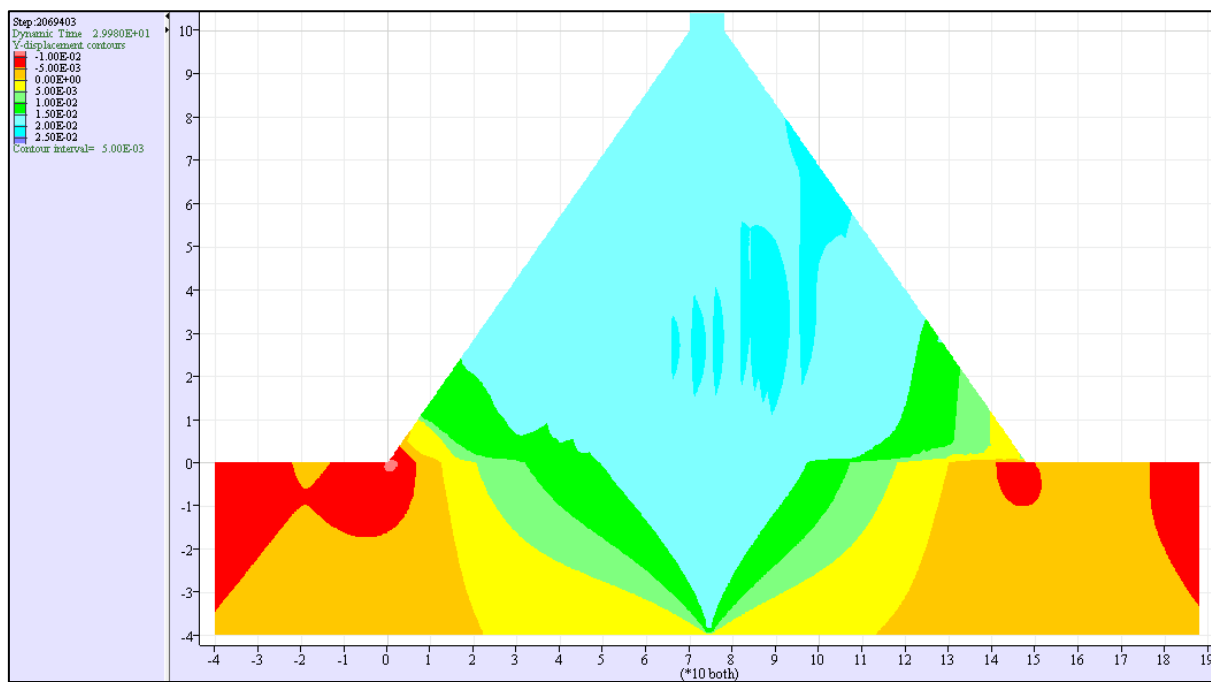
Τέλος ορίζονται οι παράμετροι της σεισμικής ανάλυσης, βήματα ανάλυσης, γεωμετρικές αποκλίσεις, περίοδος ανανέωσης του μοντέλου ως εξής:

```
; --- dynamic analysis ---  
; initial settings for dynamic analysis  
;  
set mech      on  
set dyn on  
set flow      off  
set mu        on  
set fast off ;  
set overwrite on  
set geometry  0.2  
set large  
set step 20000000  
set dytime = 0.  
set ncwrite 100
```

Από την παραπάνω ανάλυση δίνονται για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις στο φράγμα, καθώς και οι οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις στο σώμα του φράγματος και την θεμελίωση από την αλληλεπίδραση του συστήματος νερό-φράγμα-θεμελίωση υπό σεισμική φόρτιση, από τον σεισμό της Λευκάδας. Τόσο οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετακινήσεις των στοιχείων του συστήματος είναι της τάξης του εκατοστού. Ωστόσο, πιο αναλυτικά συμπεράσματα θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.14 : Οριζόντιες μετακινήσεις μετά το τέλος του σεισμού



Εικόνα 4.15 : Κατακόρυφες μετακινήσεις μετά το τέλος του σεισμού

Κεφάλαιο 5 : Παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς φράγματος σκληρού επιχώματος

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις του χρησιμοποιούμενου προγράμματος προσομοίωσης FLAC 7. Τα αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται στις παρακάτω παραγράφους είναι επαρκή ώστε να γίνει κατανοητή η σεισμική απόκριση του φράγματος συγκεκριμένης γεωμετρίας (Εικόνα 5.1) για διαφορετικές ποιότητες σκληρού επιχώματος, για διαφορετικής δυσκαμψίας θεμελίωση, για διαφορετικής έντασης σεισμό και για διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο σεισμού, και στη συνέχεια να αξιολογηθεί.

Για το σκληρό επίχωμα (hardfill) υπάρχουν τέσσερα σενάρια (HA, HB, HC και HD), τα οποία αντιστοιχούν σε υλικά με θλιπτική αντοχή 4, 5, 6 και 8 MPa, αντίστοιχα, εκ των οποίων η αντοχή των 6 MPa είναι το βασικό σενάριο.

Για τον βράχο θεμελίωσης (canyon rock) υπάρχουν επίσης τέσσερα σενάρια (CA, CB, CC, CD), τα οποία αντιστοιχούν σε ταχύτητες διατμητικών κυμάτων Vs ίσες προς 500, 750, 1000 και 2000 m/s, με την ταχύτητα 1000 m/s να αποτελεί το βασικό σενάριο.

Για την διερεύνηση της επίδρασης της έντασης της σεισμικής δόνησης, χρησιμοποιείται το επιταχυνσιογράφημα της Λευκάδας βαθμονομημένο σε 0.2g, 0.3g, 0.4g και 0.5g.

Τέλος, για την διερεύνηση της επίδρασης του συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης, χρησιμοποιούνται τα επιταχυνσιογραφήματα από τέσσερις διαφορετικούς σεισμούς (Αίγιο, Λευκάδα, Ληξούρι και Μοναστηράκι). Για τον σκοπό αυτό, όλες οι εν λόγω χρονοϊστορίες επιτάχυνσης είναι βαθμονομημένες σε μέγιστη τιμή $a_{max} = 0.3g$.

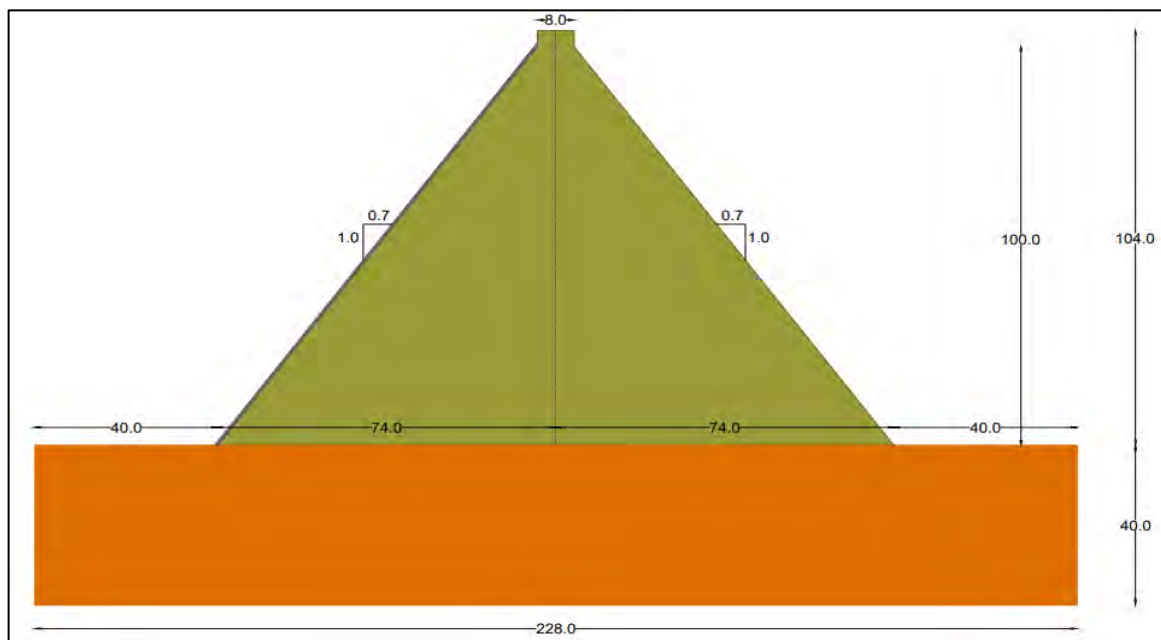
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εξής παραμετρικές αναλύσεις:

1. Επίδραση της ποιότητας του hardfill (f_c , E): αναλύσεις 1, 2, 3, 4 στον Πίνακα 5.1.
2. Επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου της κοιλάδας: αναλύσεις 1, 5, 6, 7 στον Πίνακα 5.1.
3. Επίδραση της έντασης της σεισμικής διέγερσης: αναλύσεις 1, 8, 9, 10 στον Πίνακα 5.1. Στο μοντέλο εισάγεται ο σεισμός της Λευκάδας με διαφορετική ένταση για κάθε μια από τις παραμετρικές αναλύσεις με $a_{max} = 0.2g, 0.3g, 0.4g$, και $0.5g$.
4. Επίδραση του διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης: αναλύσεις 1, 11, 12, 13 στον Πίνακα 5.1. Εδώ χρησιμοποιούνται διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις για κάθε παραμετρική ανάλυση του μοντέλου.

Θα συγκρίνουμε γραφικά τα αποτελέσματα για κάθε μία παραμετρική ανάλυση για να δούμε την επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων. Η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί αρχικά μέσω των μέγιστων τιμών των οριζοντίων και κατακόρυφων μετακινήσεων και επιταχύνσεων που θα σημειωθούν στις αναλύσεις υπό σεισμική φόρτιση, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των υδροδυναμικών πιέσεων από το νερό της λεκάνης του ταμιευτήρα στο φράγμα.

Case	Hardfill	Canyon	Earthquake	Amax (g)
1	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Lefkada	0.3
2	HA	CC	Lefkada	0.3
3	HB	CC	Lefkada	0.3
4	HD	CC	Lefkada	0.3
5	HC	CA	Lefkada	0.3
6	HC	CB	Lefkada	0.3
7	HC	CD	Lefkada	0.3
8	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Lefkada	0.2
9	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Lefkada	0.4
10	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Lefkada	0.5
11	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Aegion	0.3
12	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Lixouri	0.3
13	HC (Basic Scen.)	CC (Basic Scen.)	Monastiraki	0.3

Πίνακας 5.1 : Κατάλογος των παραμετρικών αναλύσεων για την διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς φράγματος σκληρού επιχώματος



Εικόνα 5.1 : Γεωμετρία της διατομής του φράγματος σκληρού επιχώματος (AutoCAD)

5.2 Σεισμική απόκριση φράγματος σκληρού επιχώματος

Οι μετακινήσεις και επιταχύνσεις που δίνονται στα παρακάτω γραφήματα αφορούν σημεία στον άξονα του φράγματος καθ' ύψος και προέκυψαν μετά από επεξεργασία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica και υπολογιστικών φύλλων excel.

5.2.1 Επίδραση της ποιότητας του Hardfill

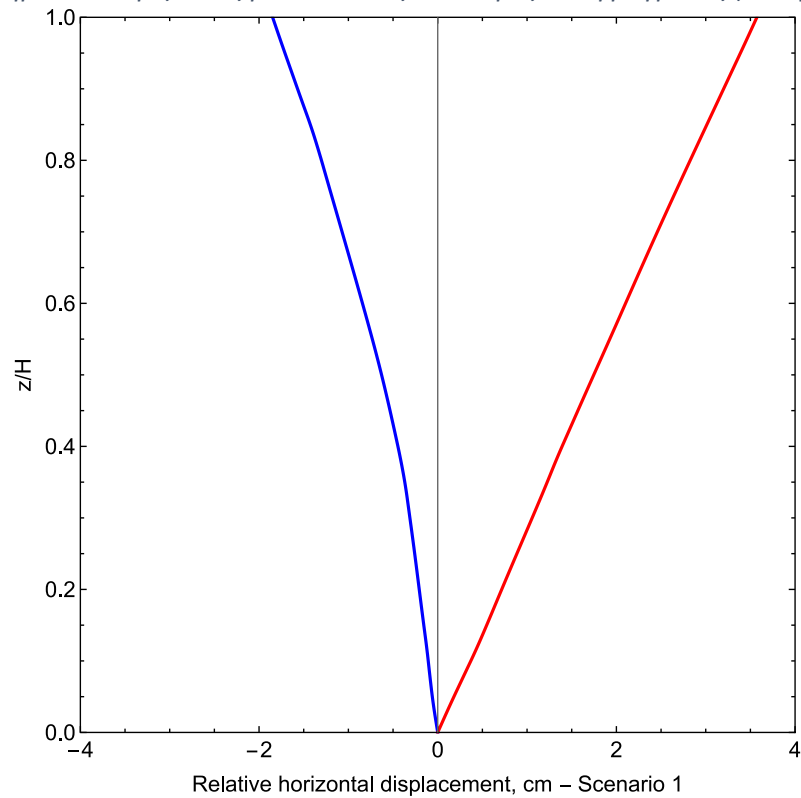
Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι τέσσερις διαφορετικές ποιότητες υλικών Hardfill που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των παρακάτω σεναρίων ανάλυσης. Σε αυτές τις αναλύσεις διατηρήθηκε ο ίδιος τύπος θεμελίωσης ($V_s = 1000$ m/s) τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στον Πίνακα 5.3 της επόμενης παραγράφου (5.2.2). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διέγερση το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Λευκάδας με $a_{max}=0.3g$.

HARDFILL	HA	HB	HC*	HD
ρ (kg/m ³)	2150	2150	2150	2150
E (MPa)	8170	9140	10000	11560
ν	0.2	0.2	0.2	0.2
B (MPa)	4540	5078	5555	6422
G (MPa)	3404	3808	4167	4817
V_s (m/s)	1258	1330	1392	1496
f_c (MPa)	4	5	6	8
f_t (MPa)	0.48	0.6	0.72	0.96
ϕ	42	42	42	42
c (MPa)	0.89	1.113	1.336	1.781

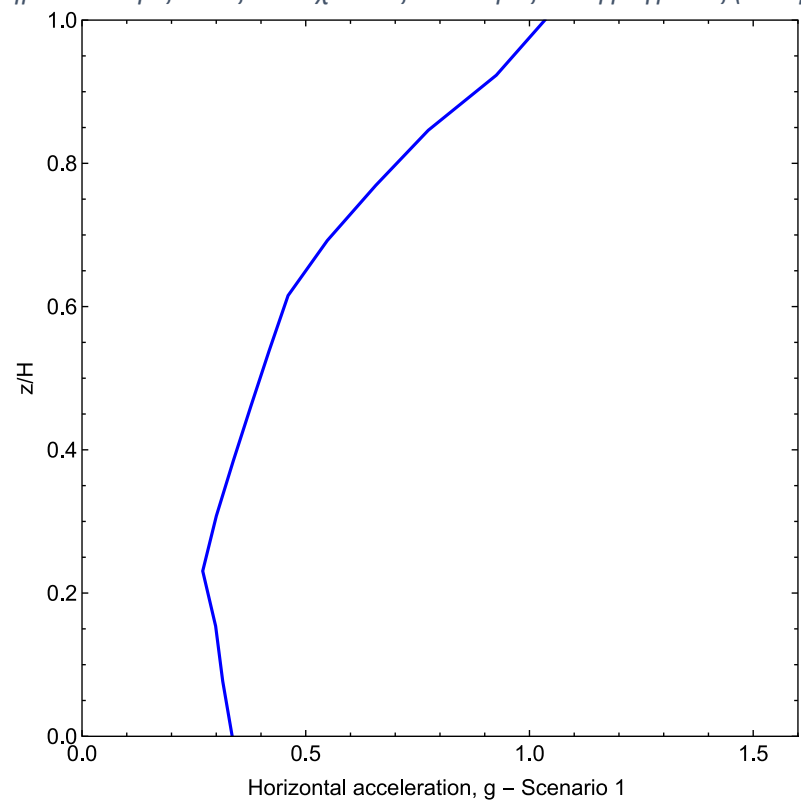
Πίνακας 5.2. : Ιδιότητες του σκληρού επιχώματος για κάθε σενάριο 1, 2, 3, 4.

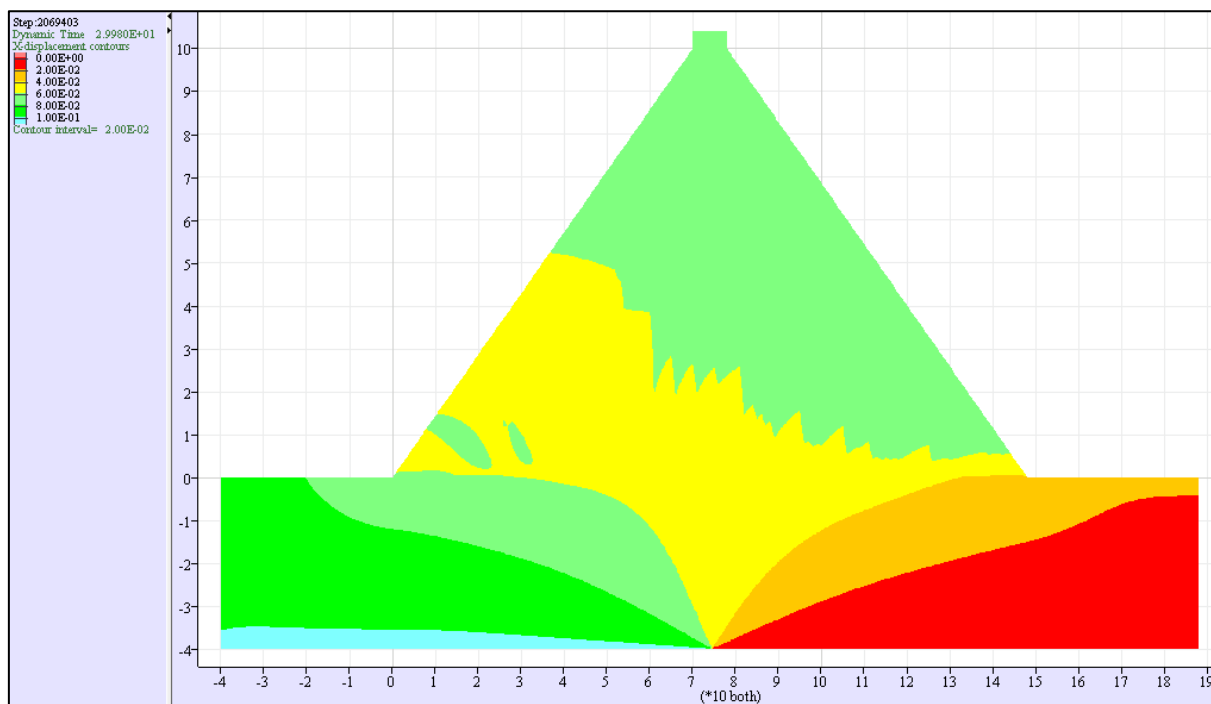
*Η ποιότητα υλικού στην περίπτωση του HC είναι το βασικό σενάριο.

Γράφημα 5.1 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 1)

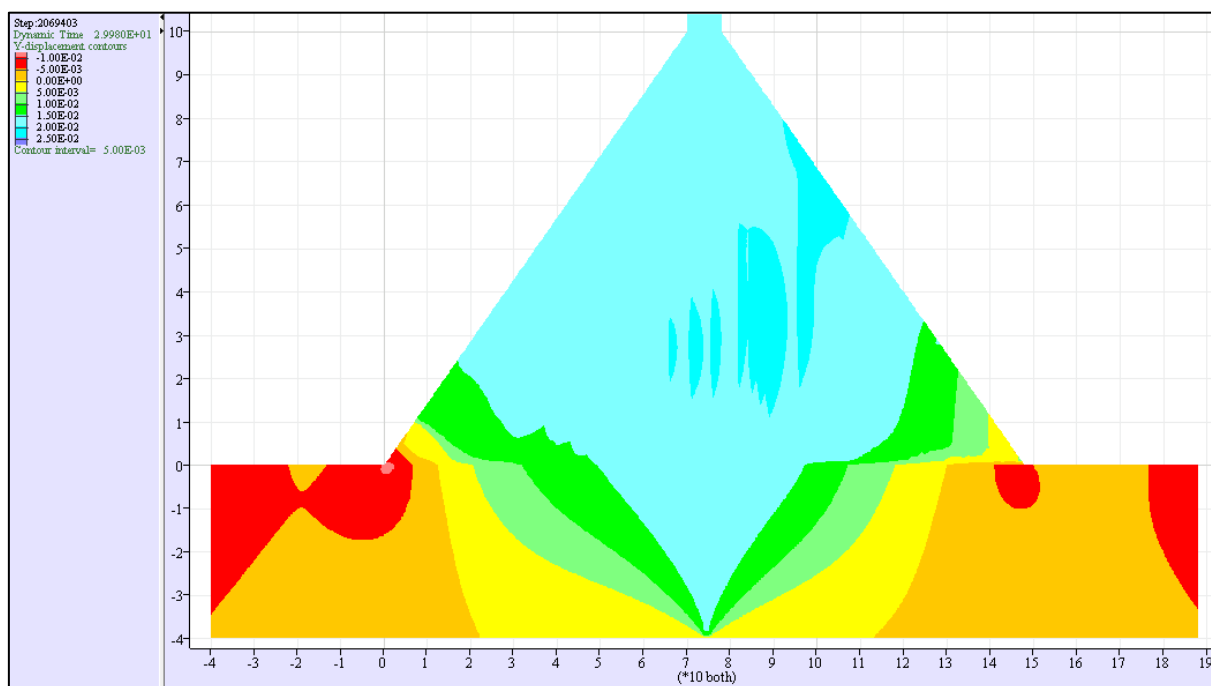


Γράφημα 5.2 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 1)



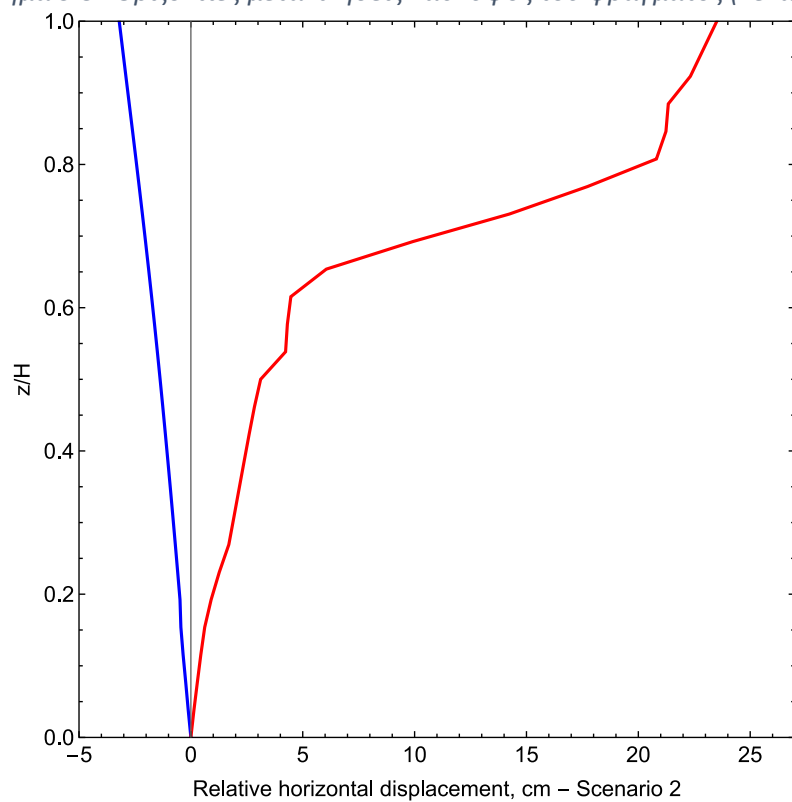


Εικόνα 5.2 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 1)

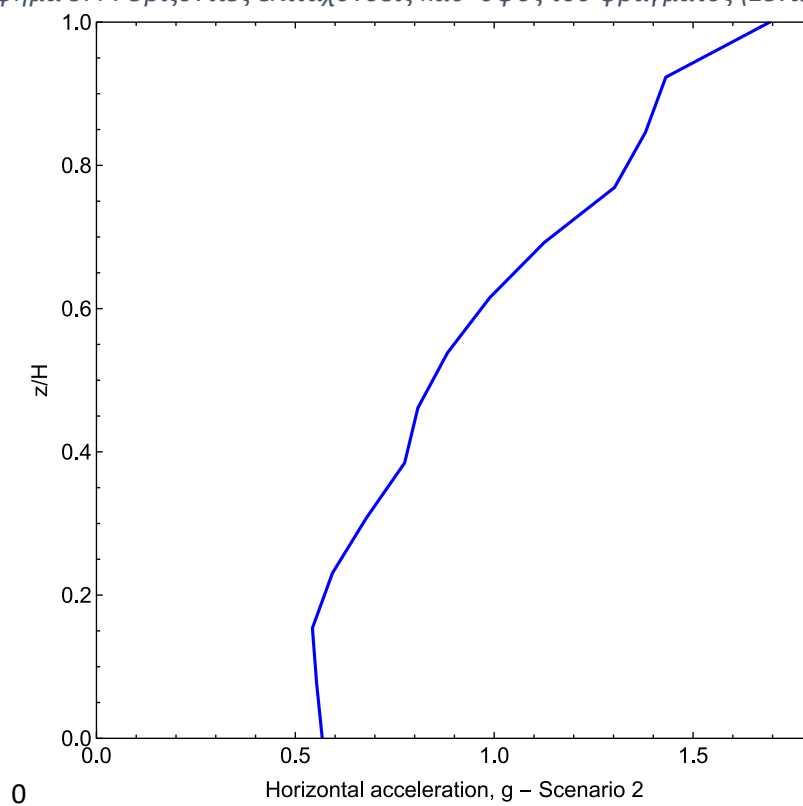


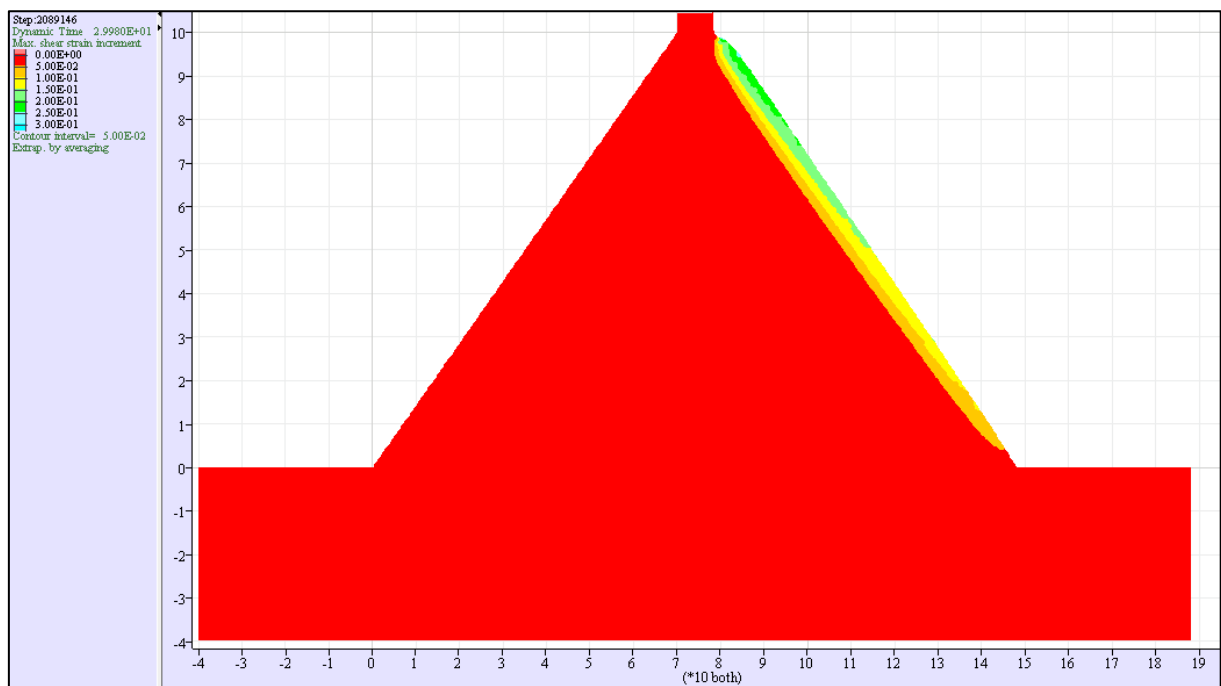
Εικόνα 5.3: Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 1)

Γράφημα 5.3 : Οριζόντιες μετακινήσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 2)



Γράφημα 5.4 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 2)



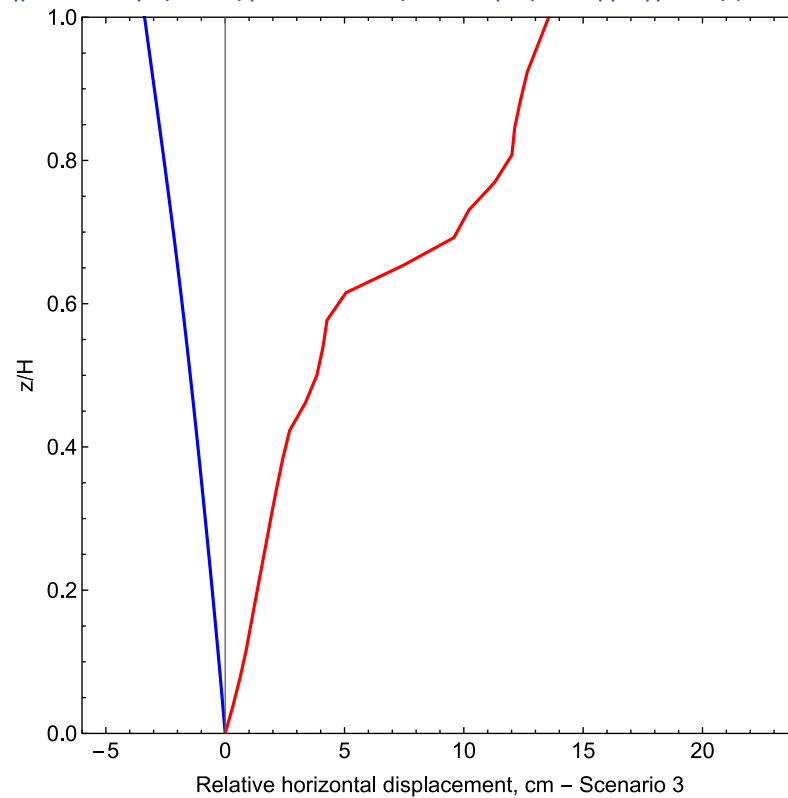


Εικόνα 5.4 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης (Σενάριο 2)

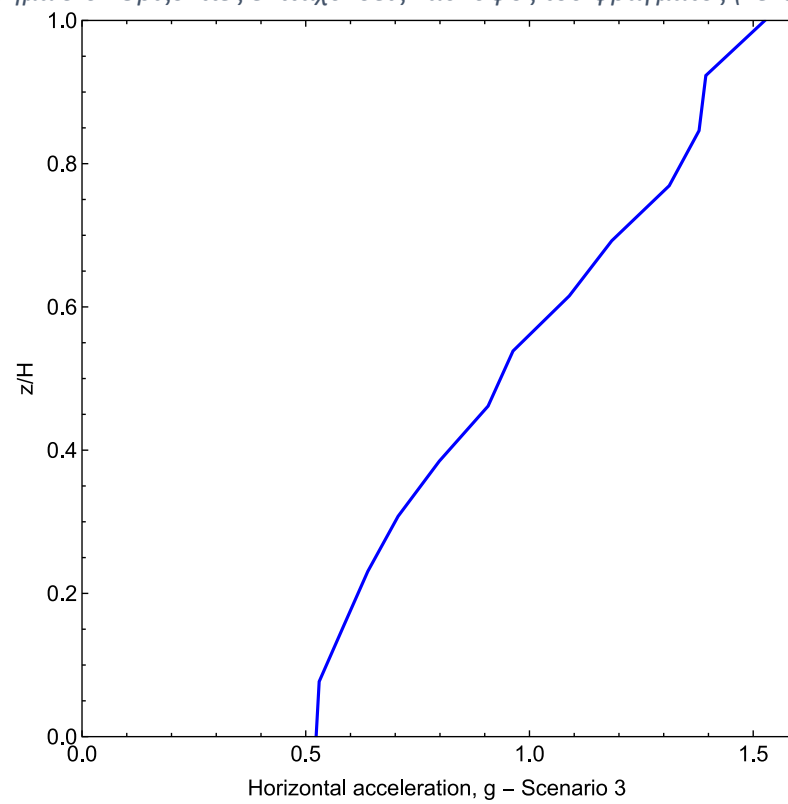


Εικόνα 5.5 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 2)

Γράφημα 5.5 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 3)



Γράφημα 5.6 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 3)



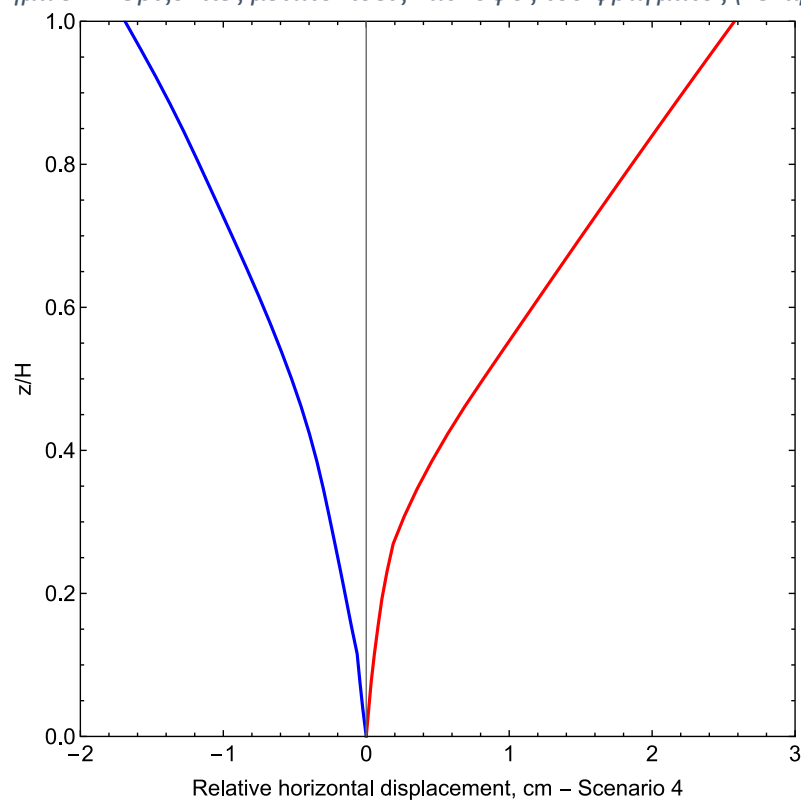


Εικόνα 5.6 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης (Σενάριο 3)

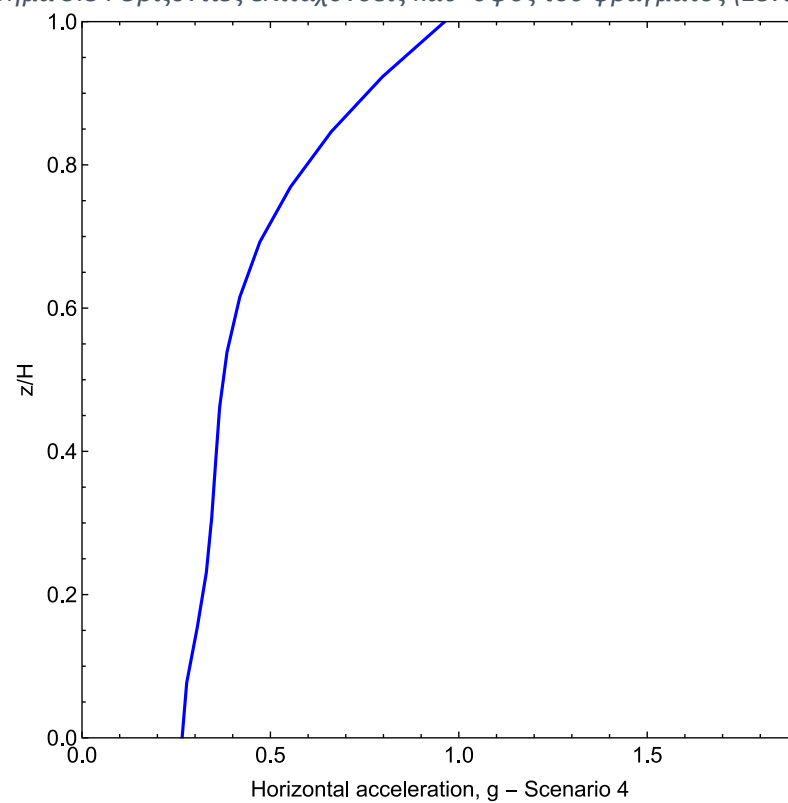


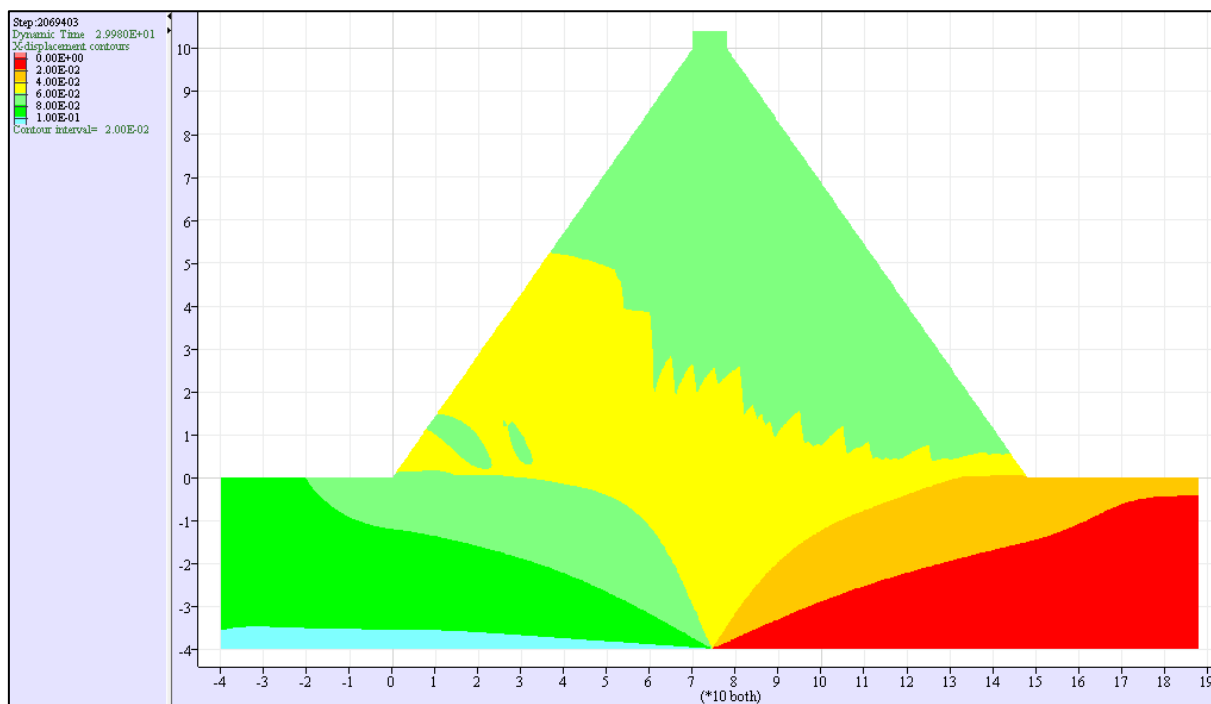
Εικόνα 5.7 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 3)

Γράφημα 5.7 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 4)

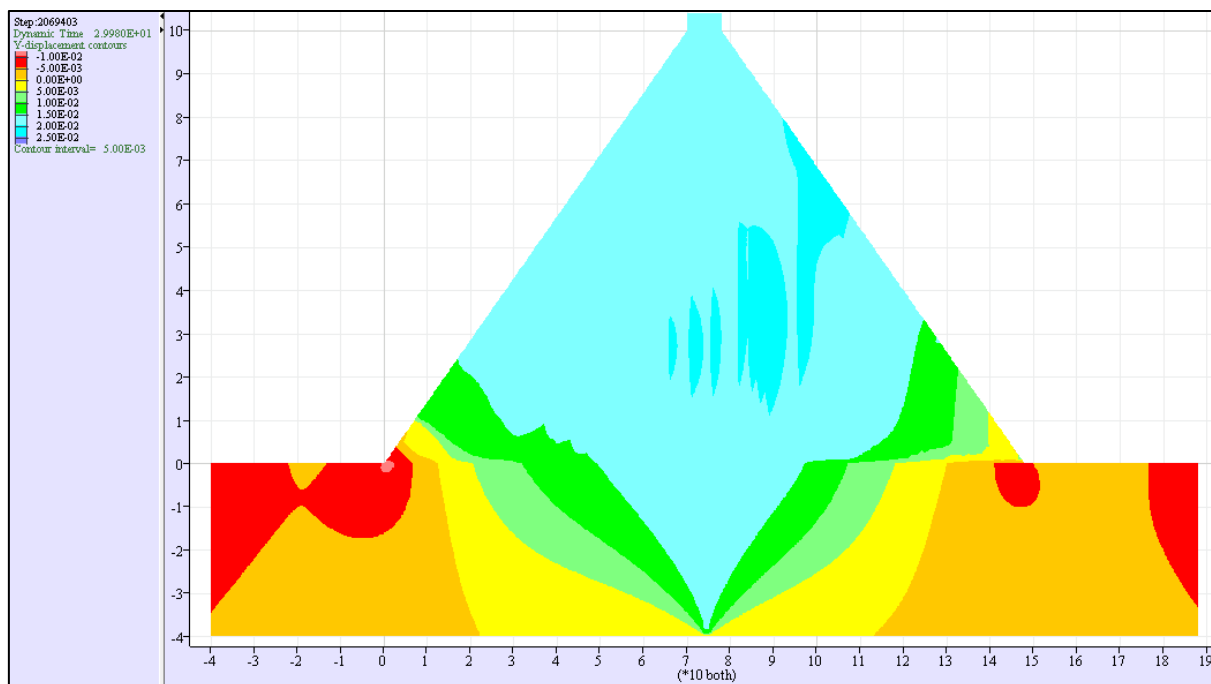


Γράφημα 5.8 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 4)





Εικόνα 5.8 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 4)



Εικόνα 5.9 : Κατακόρυφες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 4)

5.2.2 Επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης

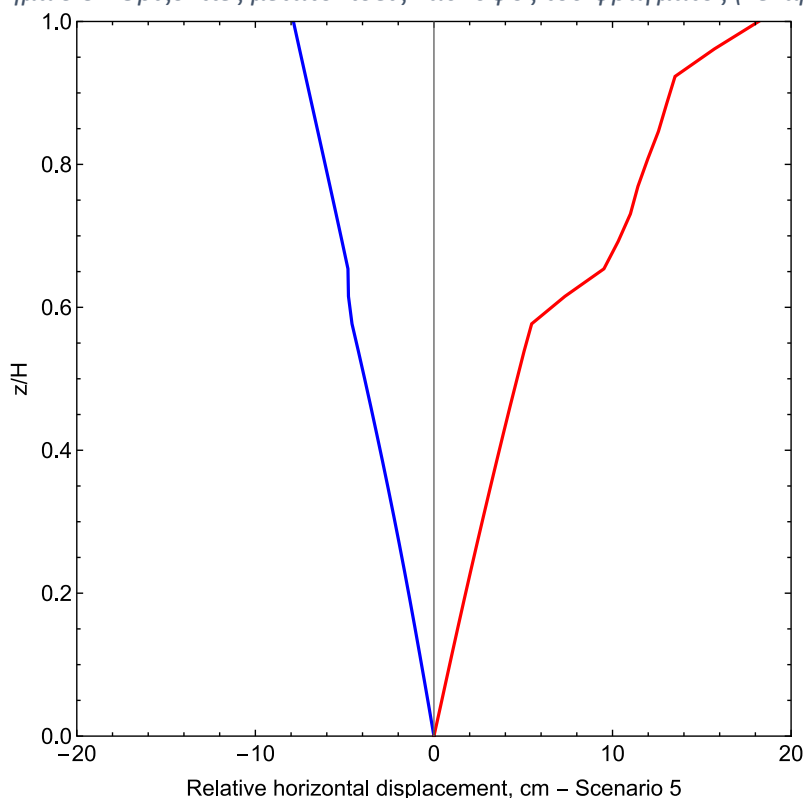
Στον Πίνακα 5.3 δίνονται οι τέσσερις διαφορετικού τύποι βράχου θεμελίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των παρακάτω σεναρίων ανάλυσης. Όλες οι αναλύσεις αφορούν σκληρό επίχωμα με θλιπτική αντοχή 6 MPa, και με ιδιότητες του βράχου θεμελίωσης όπως δίνονται στον Πίνακα 5.3. Ως σεισμική διέγερση χρησιμοποιήθηκε το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Λευκάδας με $a_{\max}=0.3g$.

CANYON	CA	CB	CC*	CD
ρ (kg/m ³)	2450	2450	2450	2450
E (MPa)	1470	3310	5880	23520
ν	0.2	0.2	0.2	0.2
B (MPa)	816.7	1838	3266	13066
G (MPa)	612.5	1379	2450	9800
Vs (m/s)	500	750	1000	2000

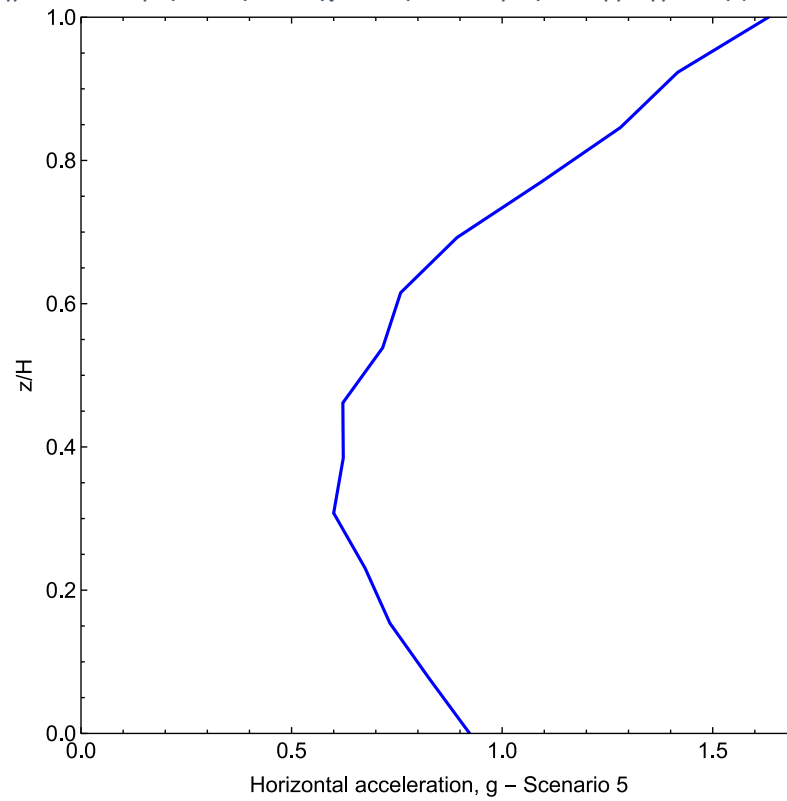
Πίνακας 5.3 : Ιδιότητες βράχου θεμελίωσης για τα σενάρια 1, 5, 6, 7.

*Το υλικό του βράχου θεμελίωσης της περίπτωσης CC είναι το βασικό σενάριο

Γράφημα 5.9 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 5)



Γράφημα 5.10 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 5)

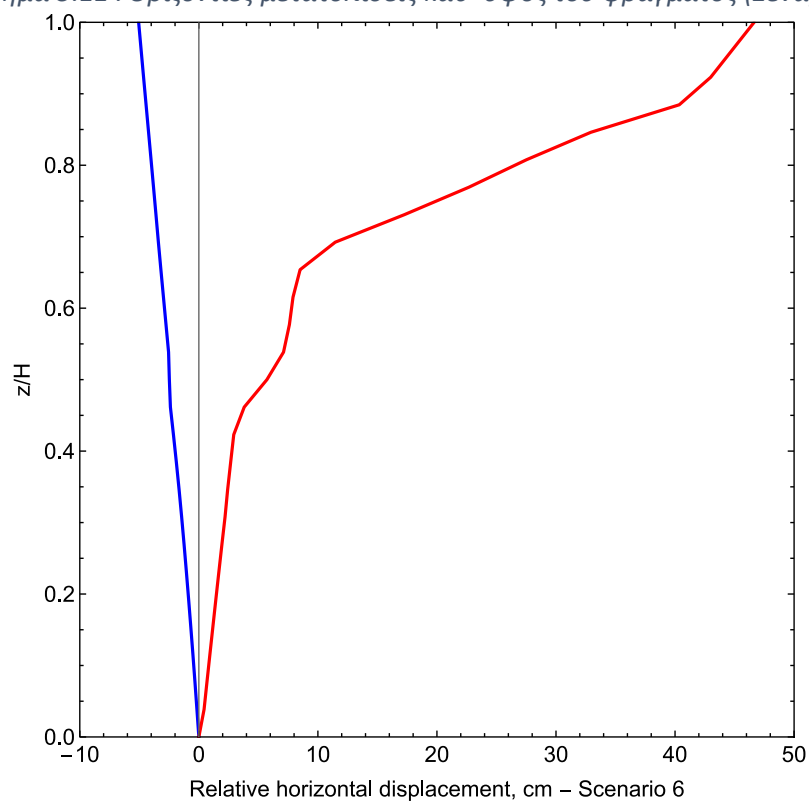


Εικόνα 5.10 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 5)

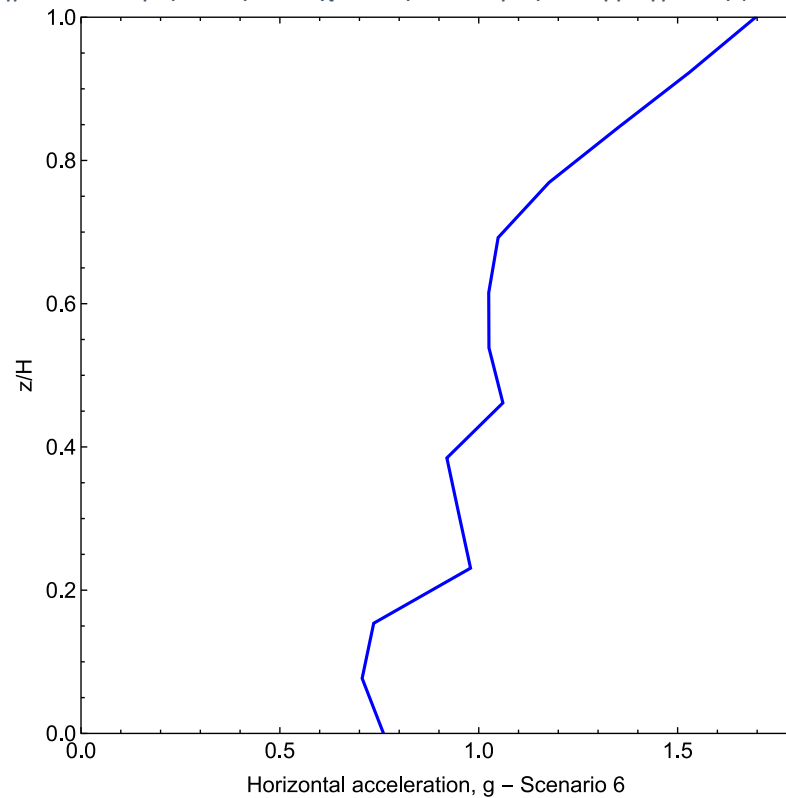


Εικόνα 5.11 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 5)

Γράφημα 5.11 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 6)



Γράφημα 5.12 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 6)

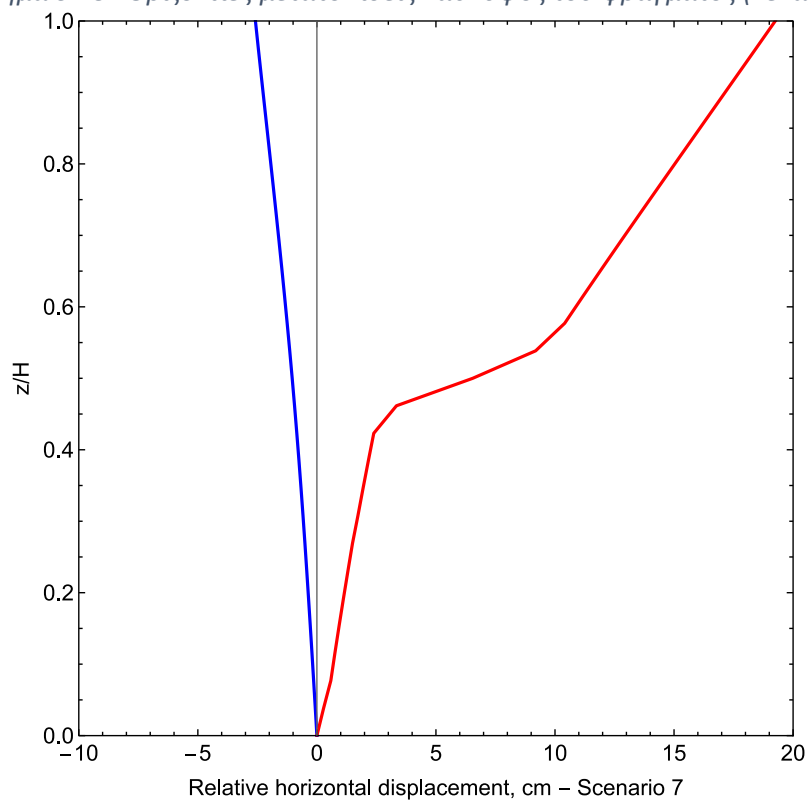


Εικόνα 5.12 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 6)

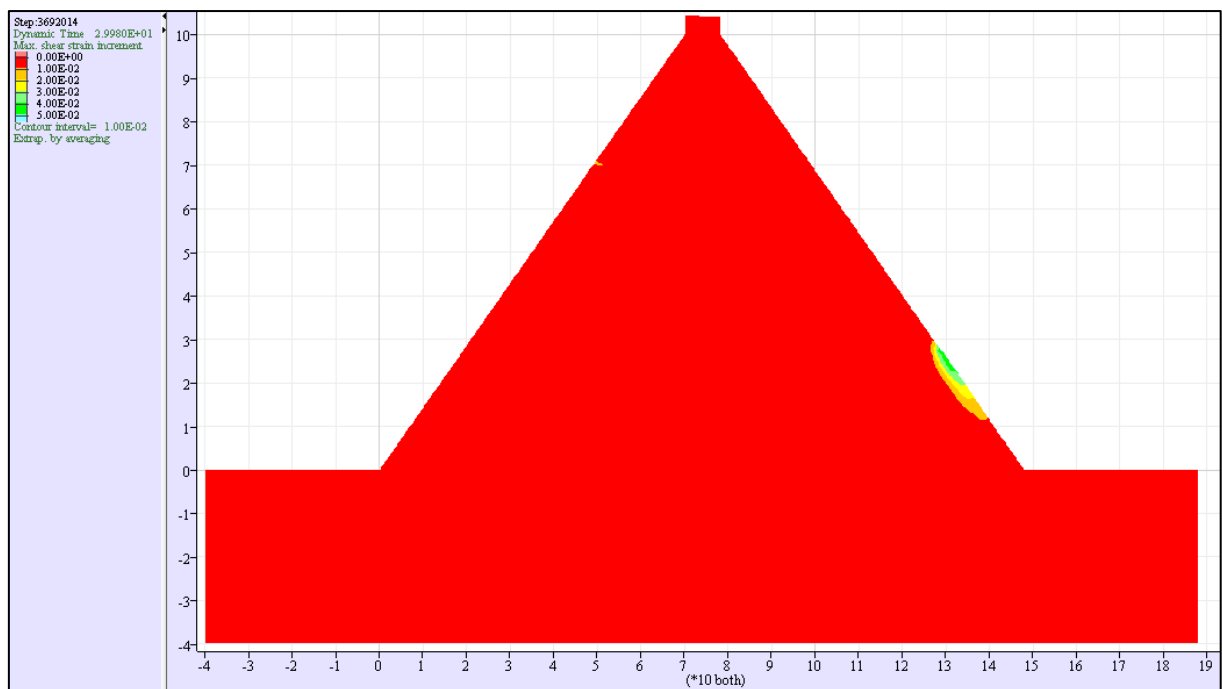
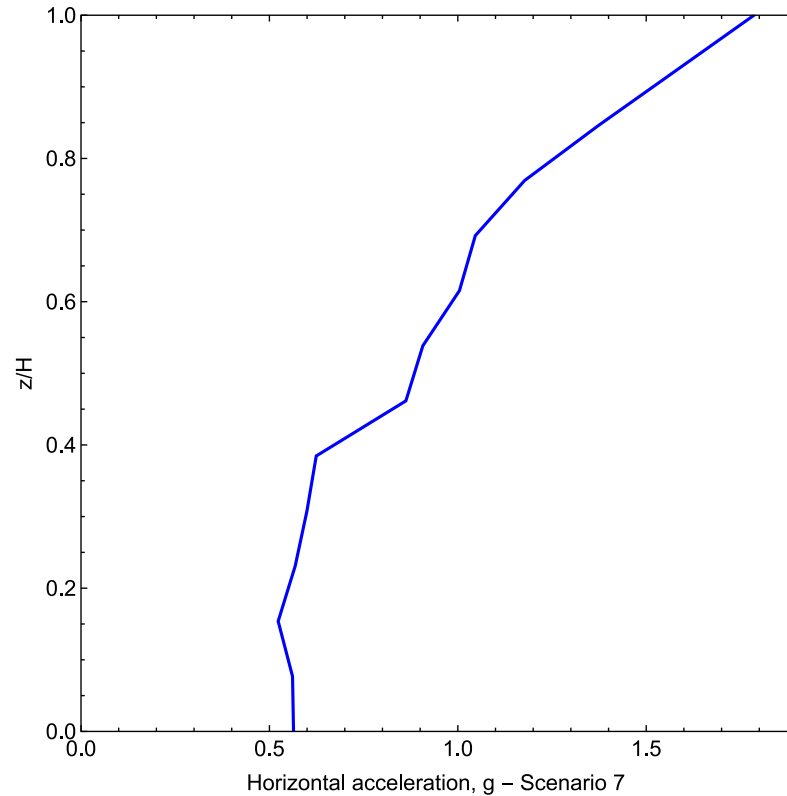


Εικόνα 5.13 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 6)

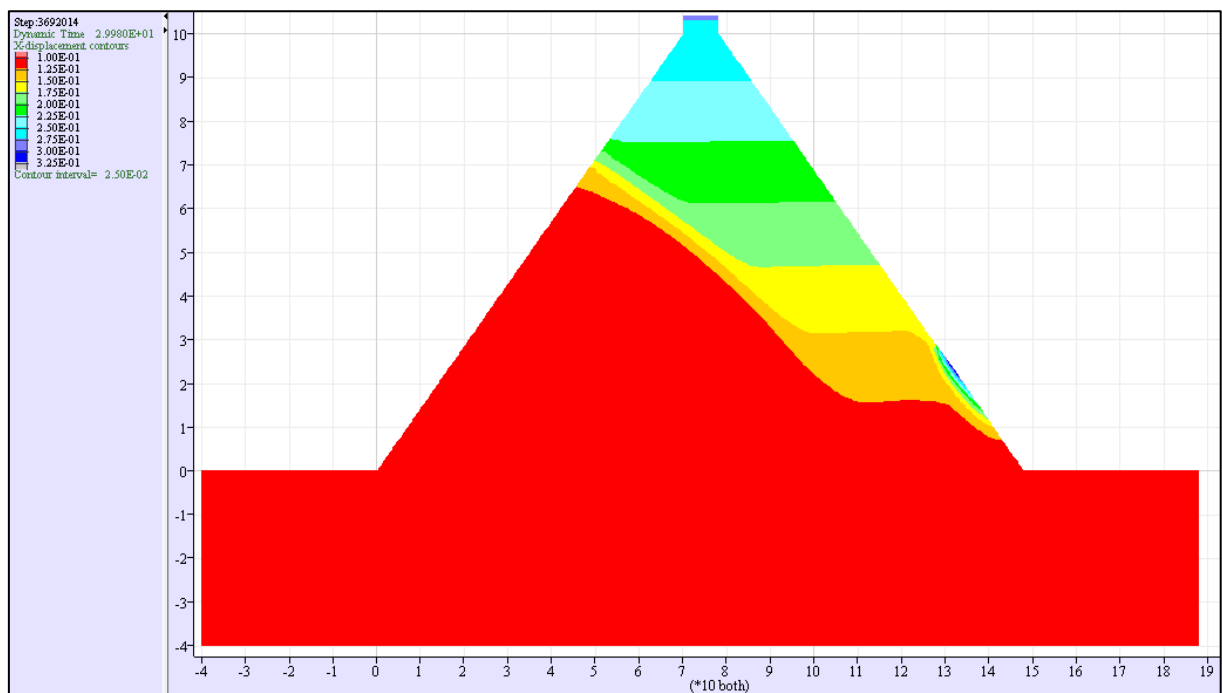
Γράφημα 5.13 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 7)



Γράφημα 5.14 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 7)



Εικόνα 5.14 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 7)

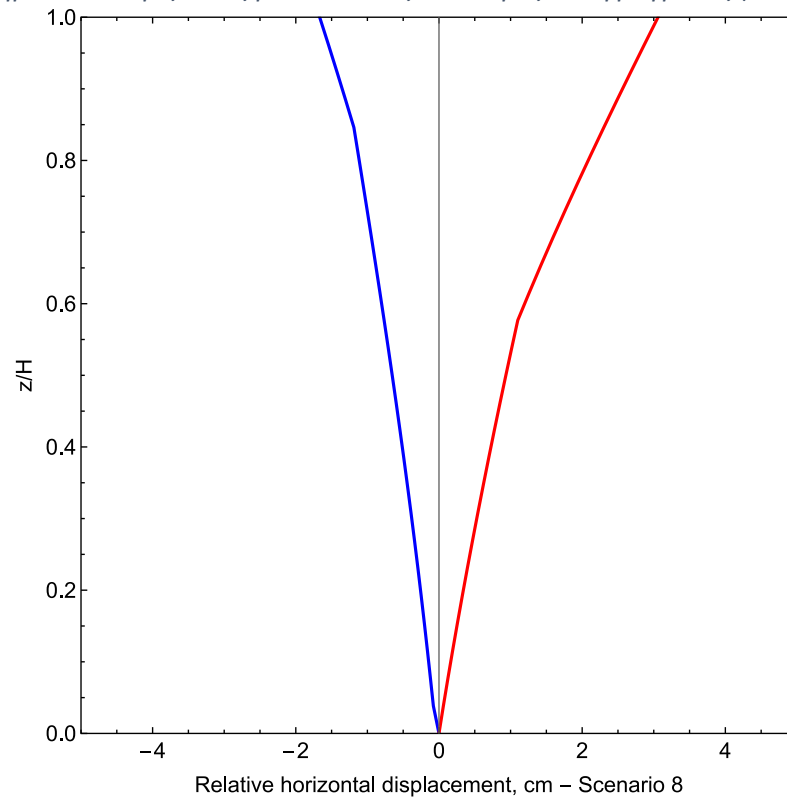


Εικόνα 5.15 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 7)

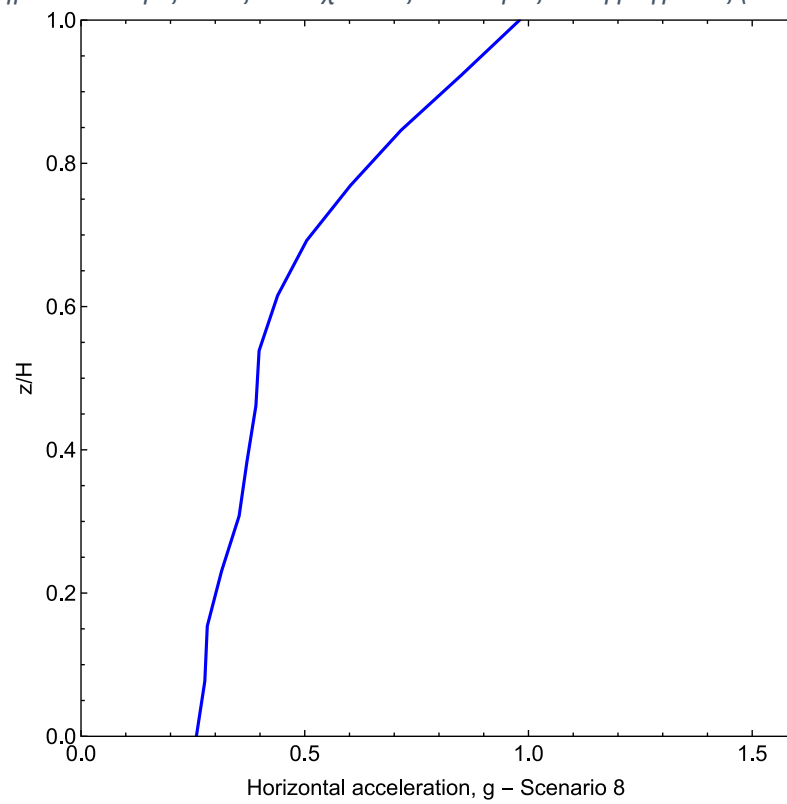
5.2.3 Επίδραση της έντασης του σεισμού

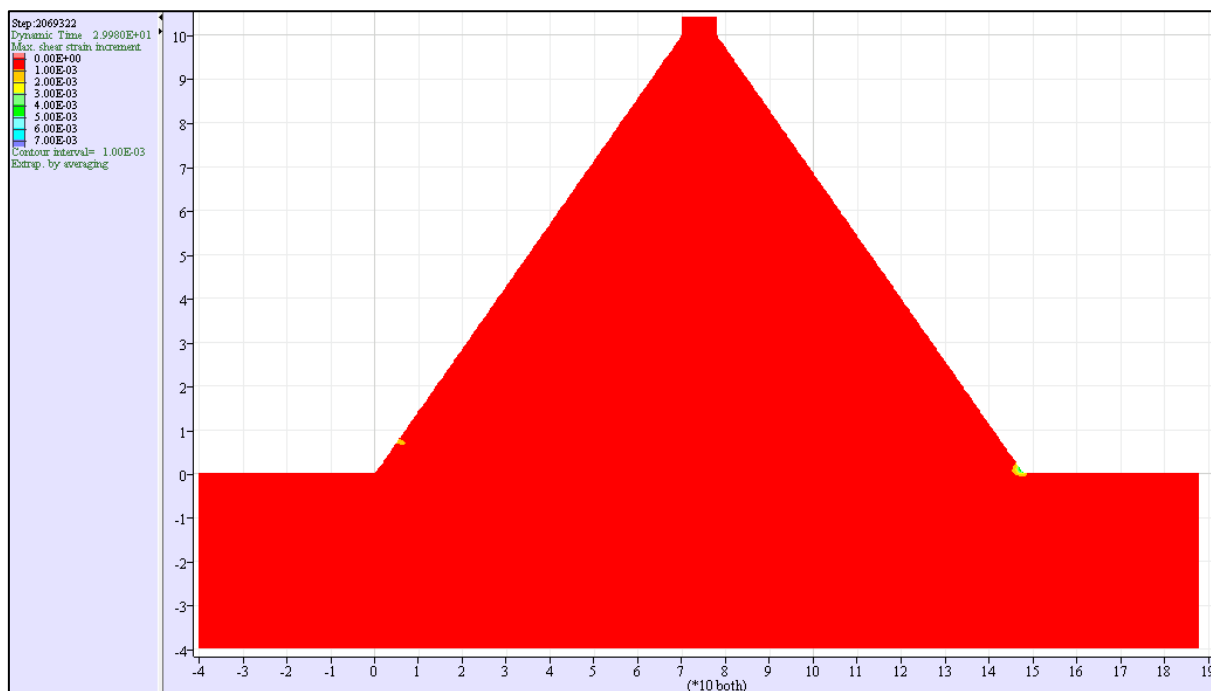
Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν σεισμικές αναλύσεις σκληρού επιχώματος με θλιπτική αντοχή 6 MPa, βράχο θεμελίωσης με ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 1000 \text{ m/s}$, υπό την διέγερση του σεισμού της Λευκάδας. Στα σενάρια, 8, 9, 10 τροποποιείται η ένταση του σεισμού (PGA) σε 0.2g, 0.4g και 0.5g αντίστοιχα.

Γράφημα 5.15 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 8)

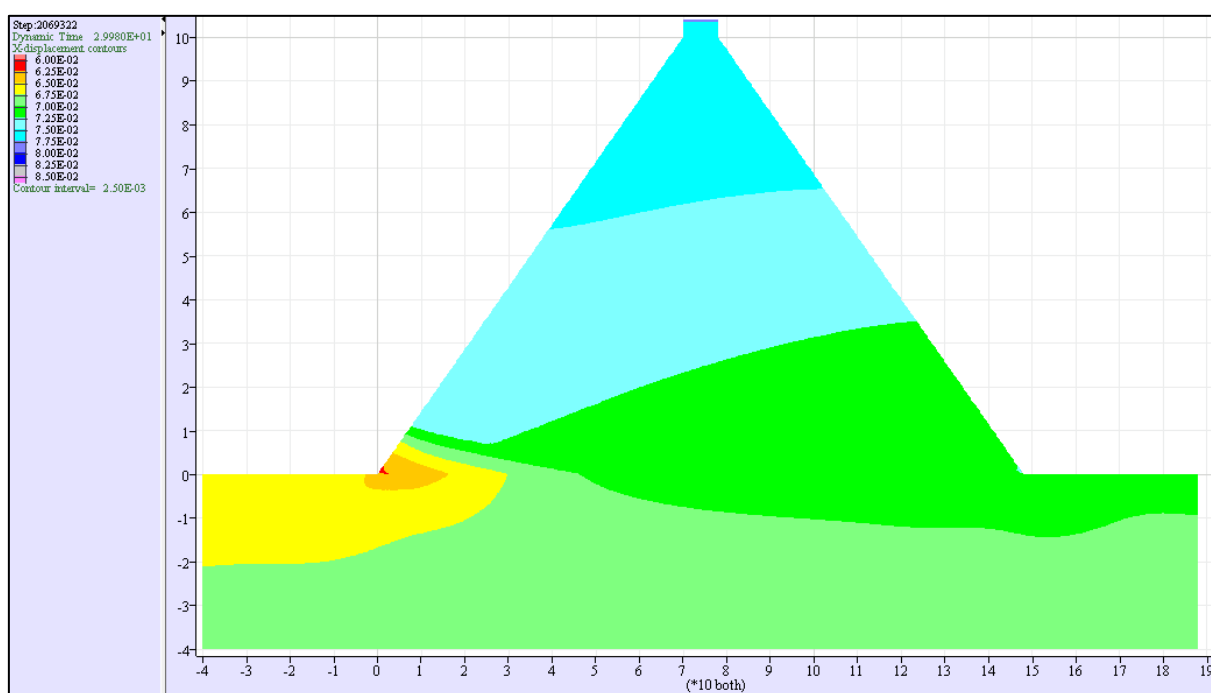


Γράφημα 5.16 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 8)



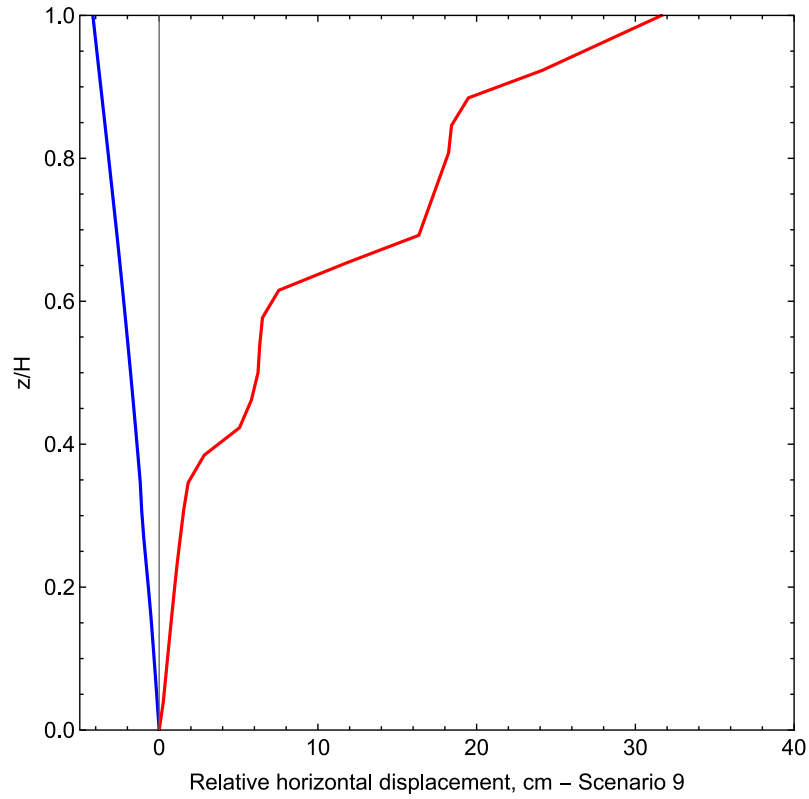


Εικόνα 5.16 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 8)

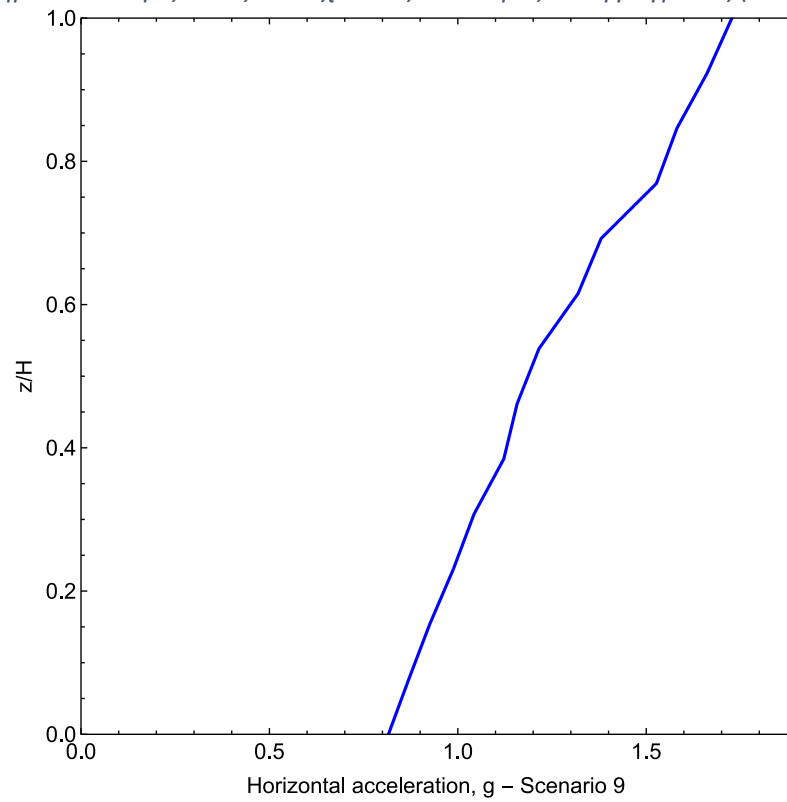


Εικόνα 5.17 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 8)

Γράφημα 5.17 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 9)

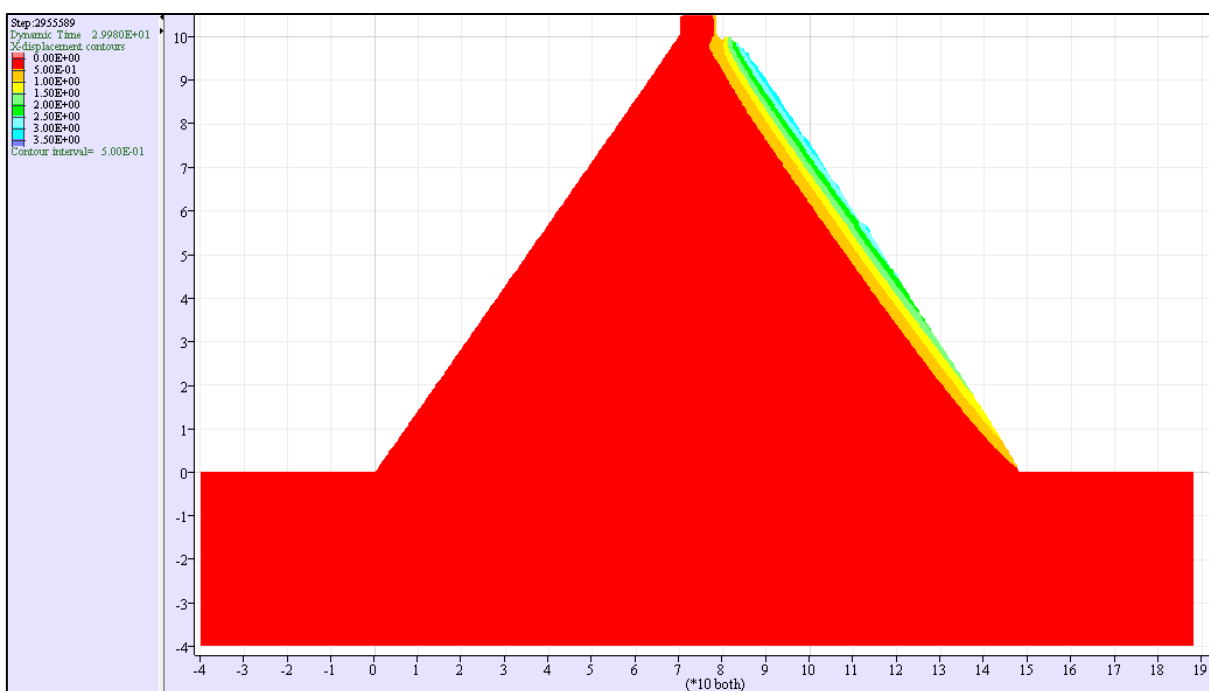


Γράφημα 5.18 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 9)



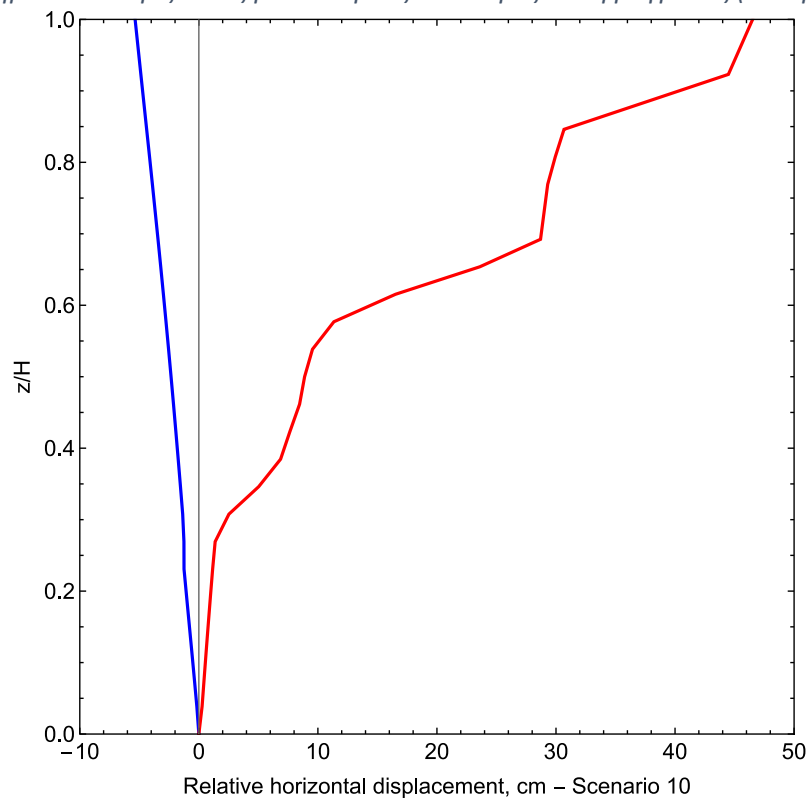


Εικόνα 5.18 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 9)

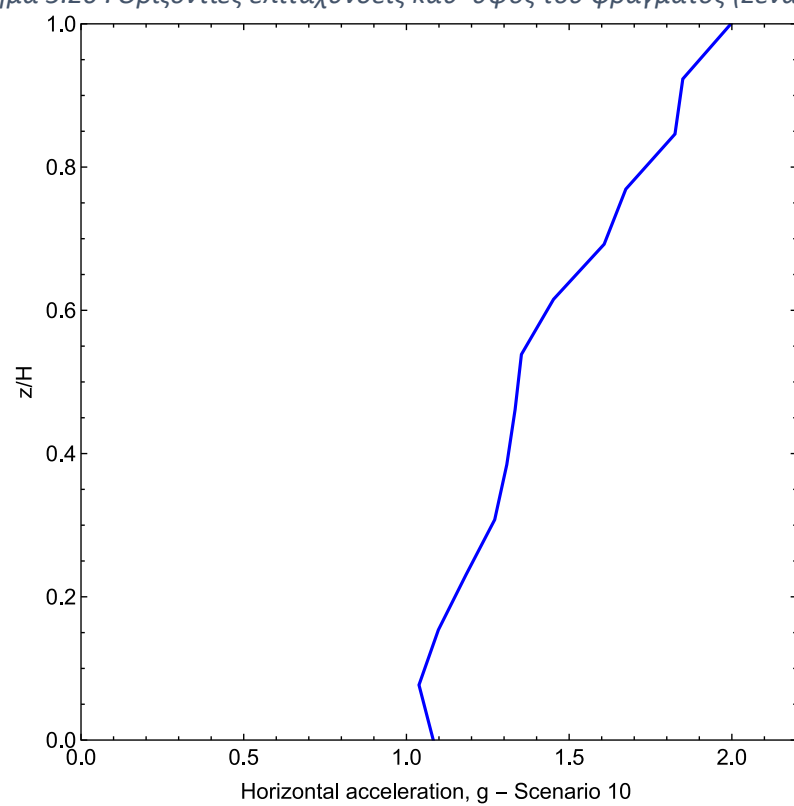


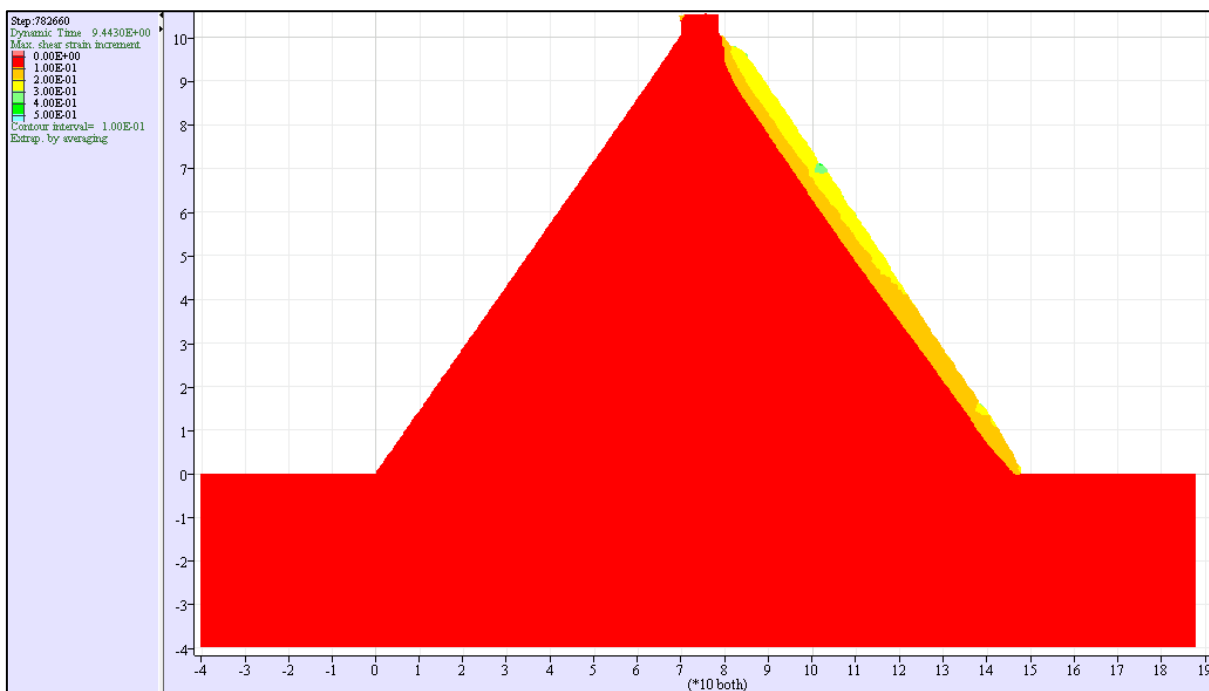
Εικόνα 5.19 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 9)

Γράφημα 5.19 : Οριζόντιες μετακινήσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 10)

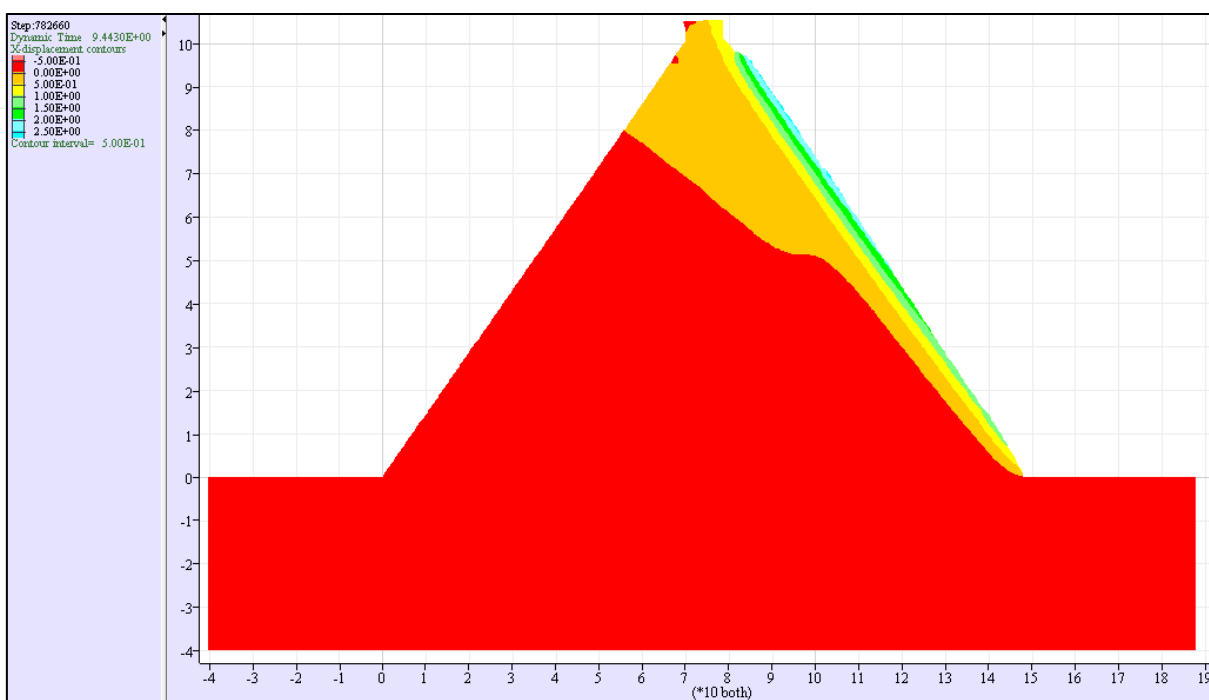


Γράφημα 5.20 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 10)





Εικόνα 5.20 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 10)



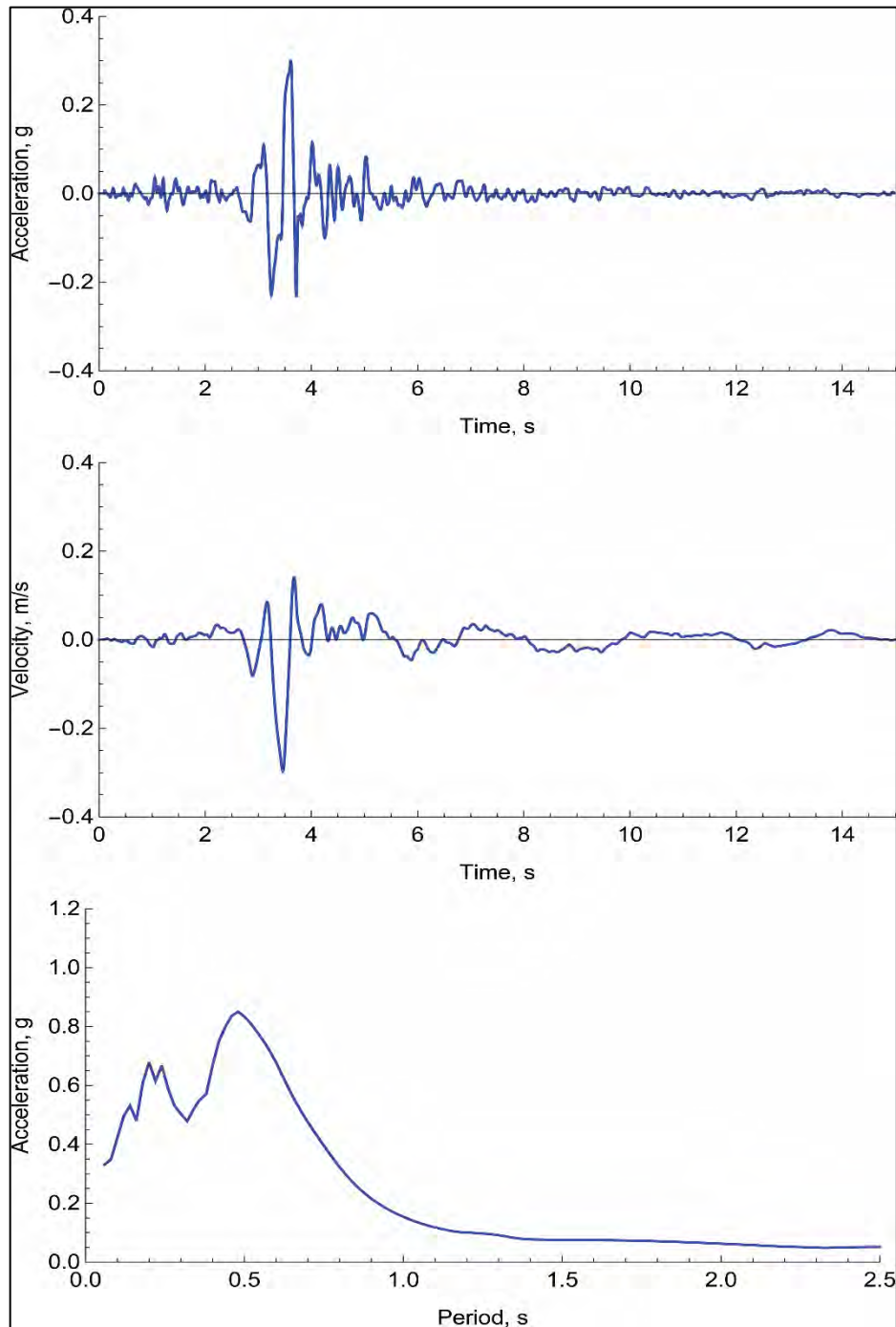
Εικόνα 5.21 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 10)

5.2.4 Επίδραση του συχνотικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε την σεισμική συμπεριφορά του βασικού μοντέλου ανάλυσης (σκληρό επίχωμα με θλιπτική αντοχή 6 MPa και βράχος θεμελίωσης με ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 1000$ m/s) για διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις. Οι σεισμοί που

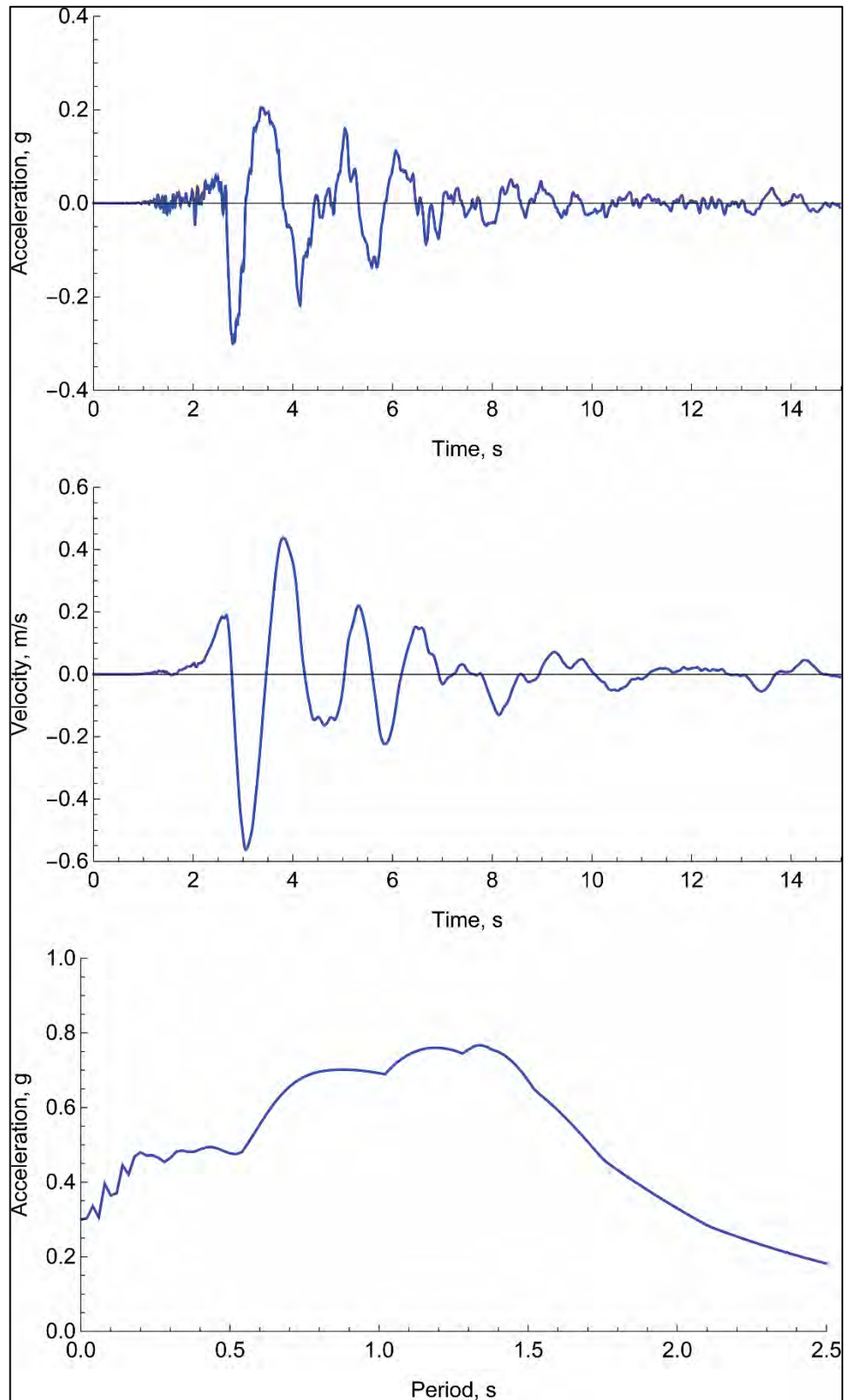
χρησιμοποιήθηκαν είναι του Αιγίου, του Ληξουρίου, της Λευκάδας και του Μοναστηρακίου. Τα δεδομένα του σεισμού της Λευκάδας έχουν δοθεί στην παράγραφο 4.4. Τα δεδομένα των υπόλοιπων σεισμών δίνονται παρακάτω.

Σεισμικής διέγερση Αιγίου:



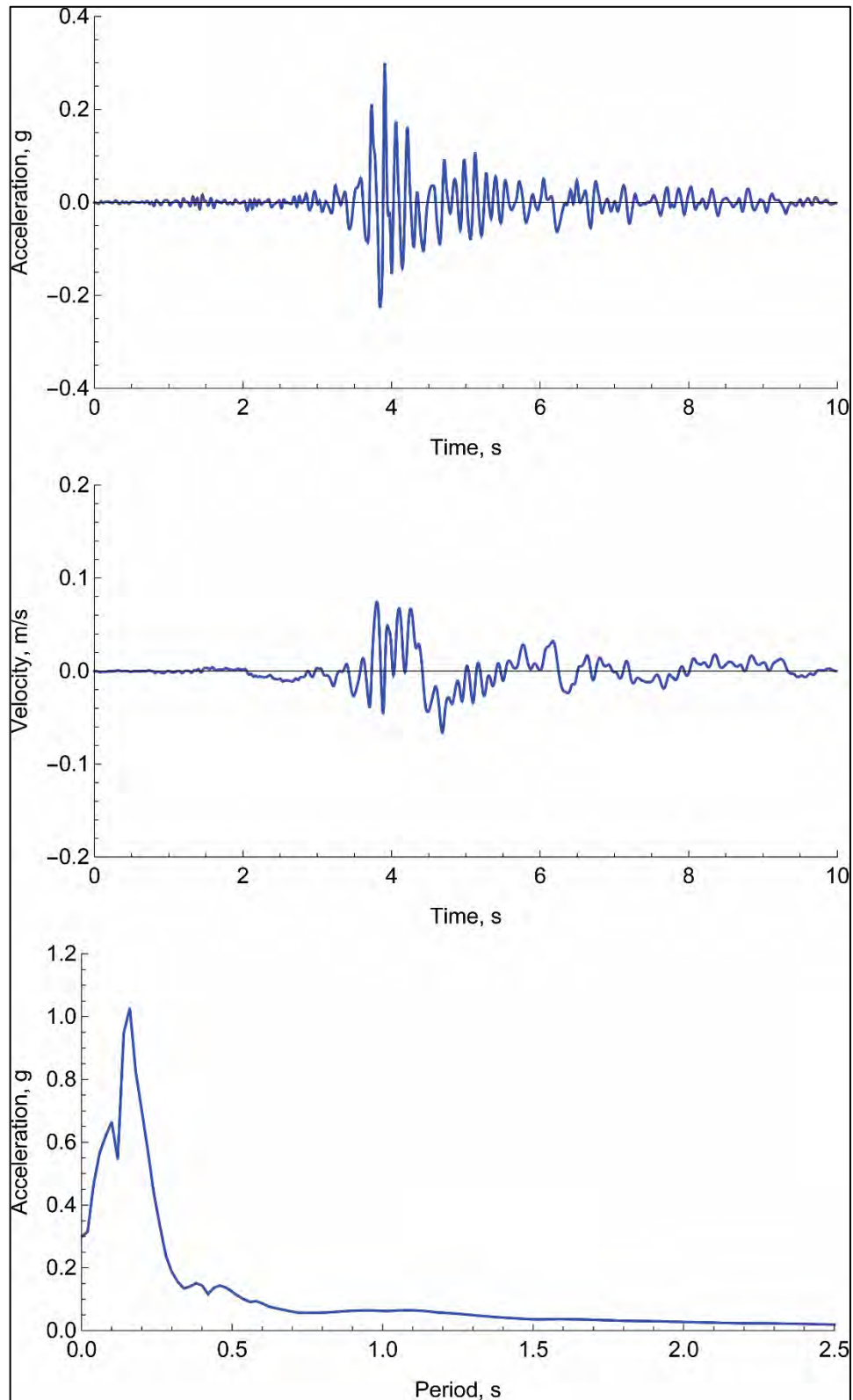
Σχήμα 5.1 : Σεισμός Αιγίου (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (απόσβεση 5%)

Σεισμική διέγερση Ληξουρίου:



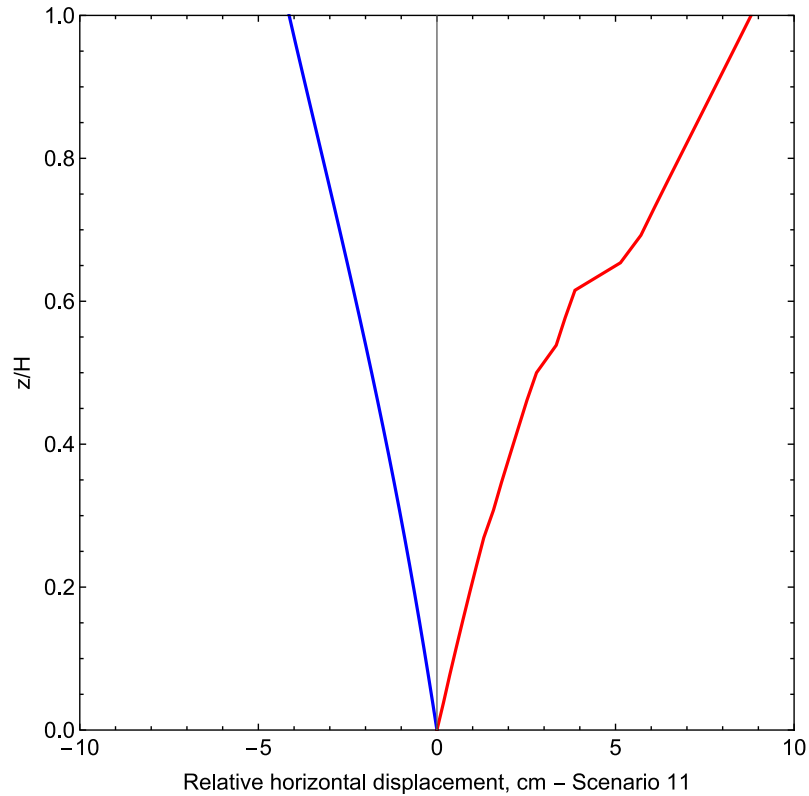
Σχήμα 5.2 : Σεισμός Ληξουρίου (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (απόσβεση 5%)

Σεισμική διέγερση Μοναστηρακίου:

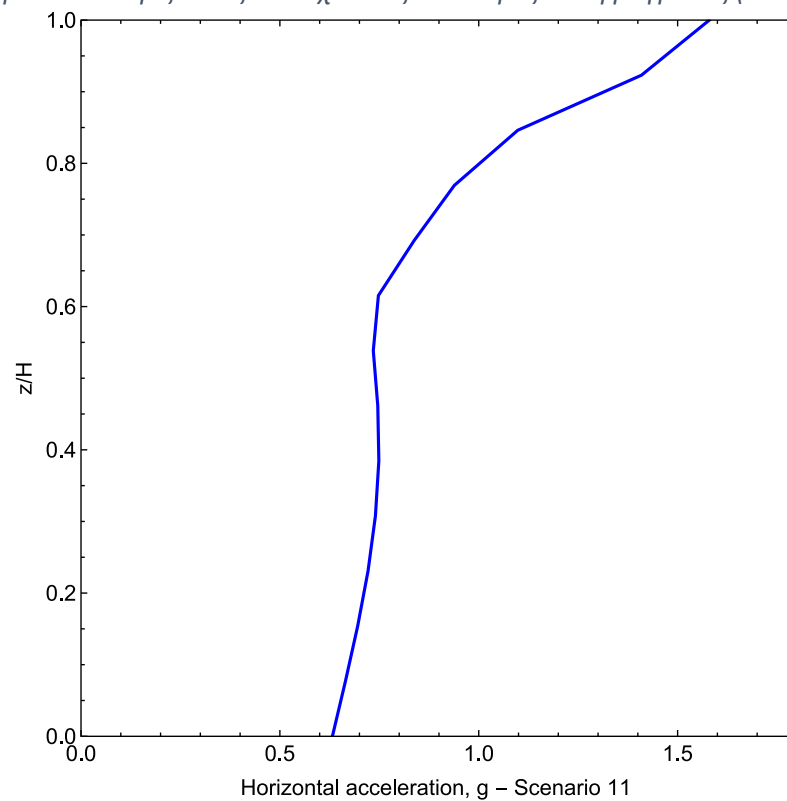


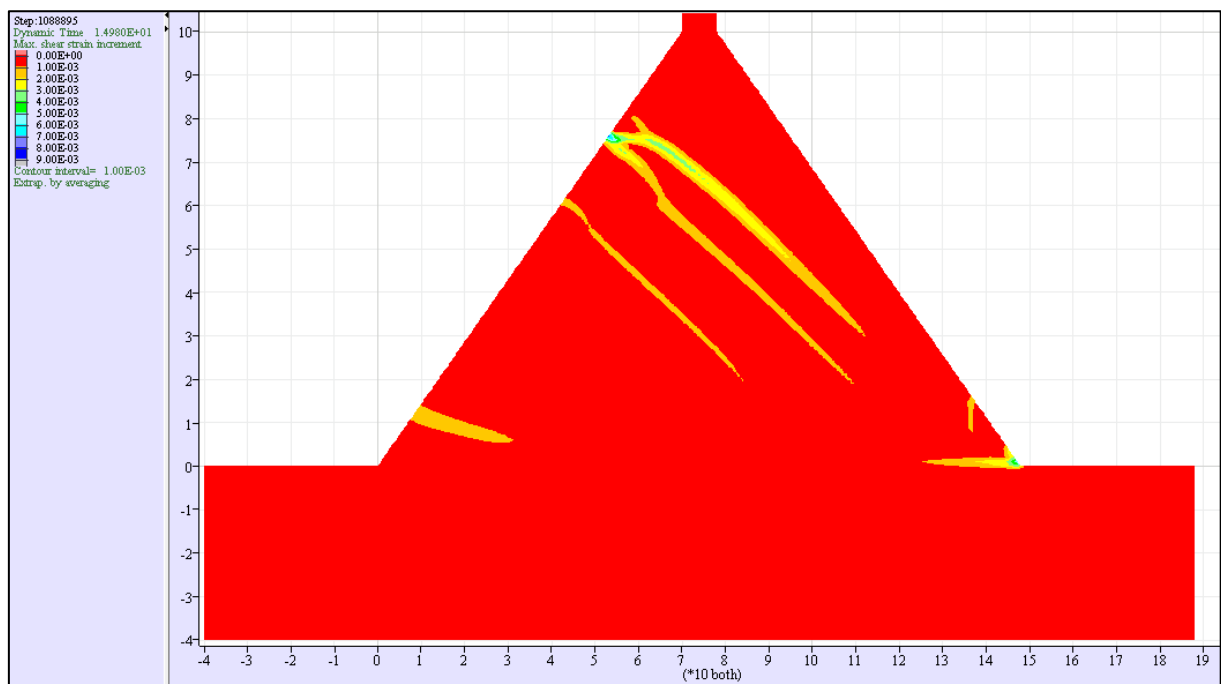
Σχήμα 5.3 : Σεισμός Μοναστηρακίου (α) επιτάχυνση (β) ταχύτητα (γ) φάσμα απόκρισης επιτάχυνσης (απόσβεση 5%)

Γράφημα 5.21 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 11)

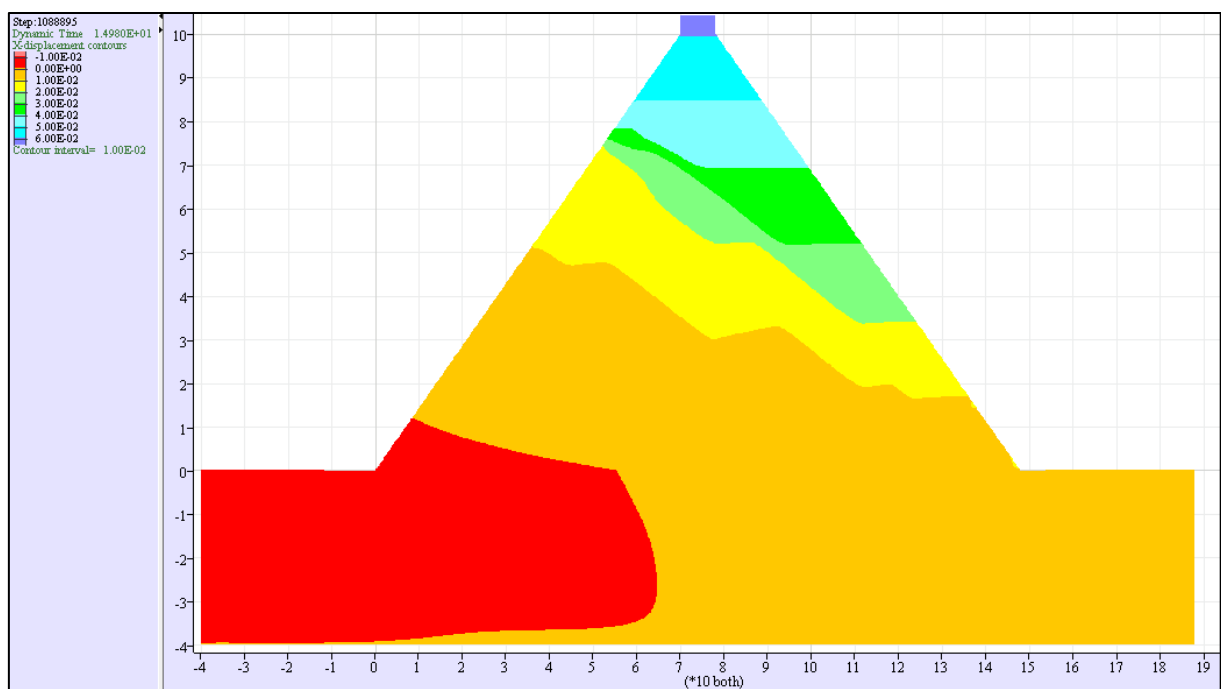


Γράφημα 5.22 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 11)



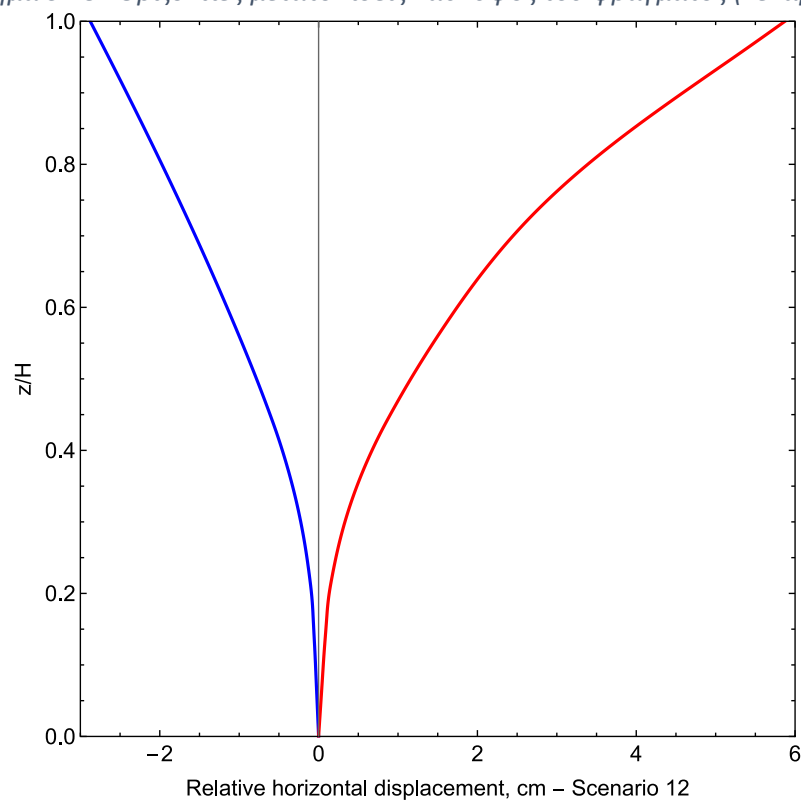


Εικόνα 5.22 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 11)

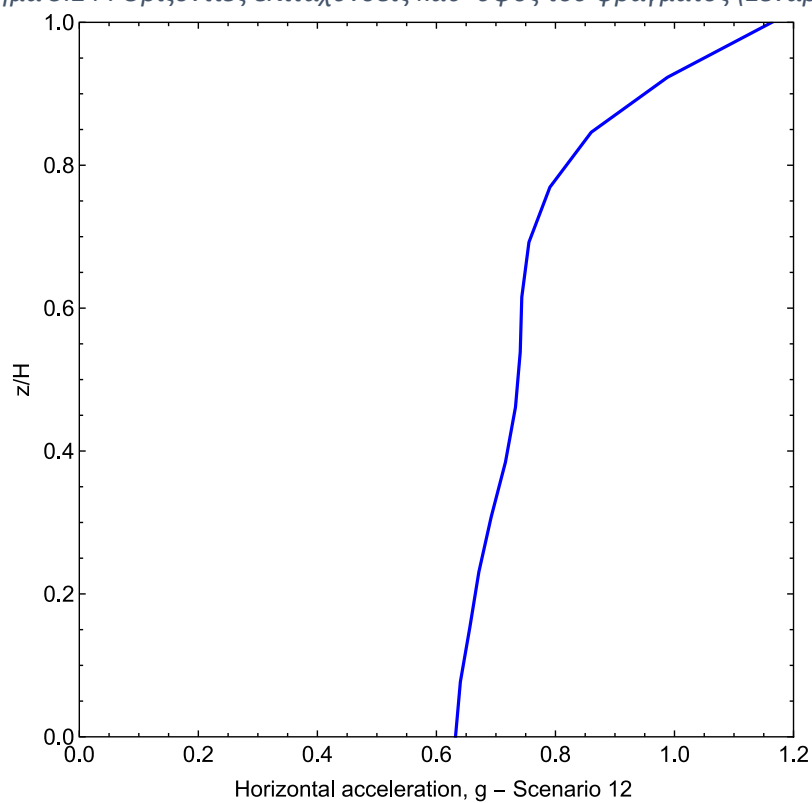


Εικόνα 5.23 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 11)

Γράφημα 5.23 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 12)

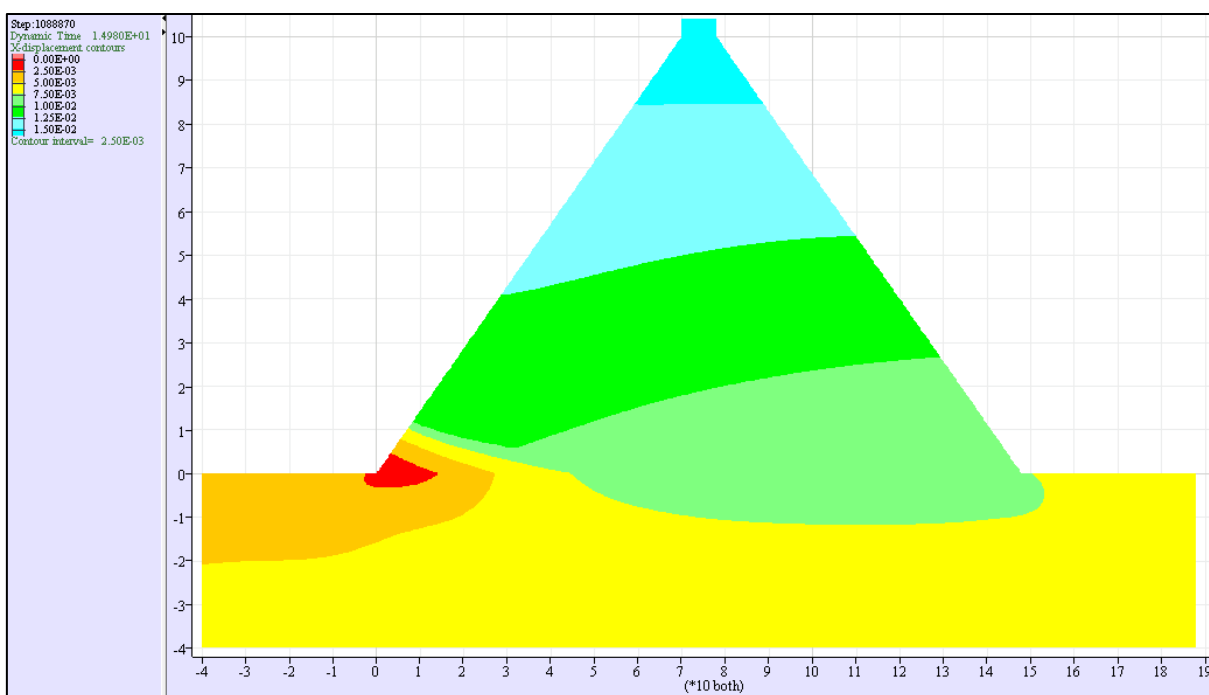


Γράφημα 5.24 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 12)



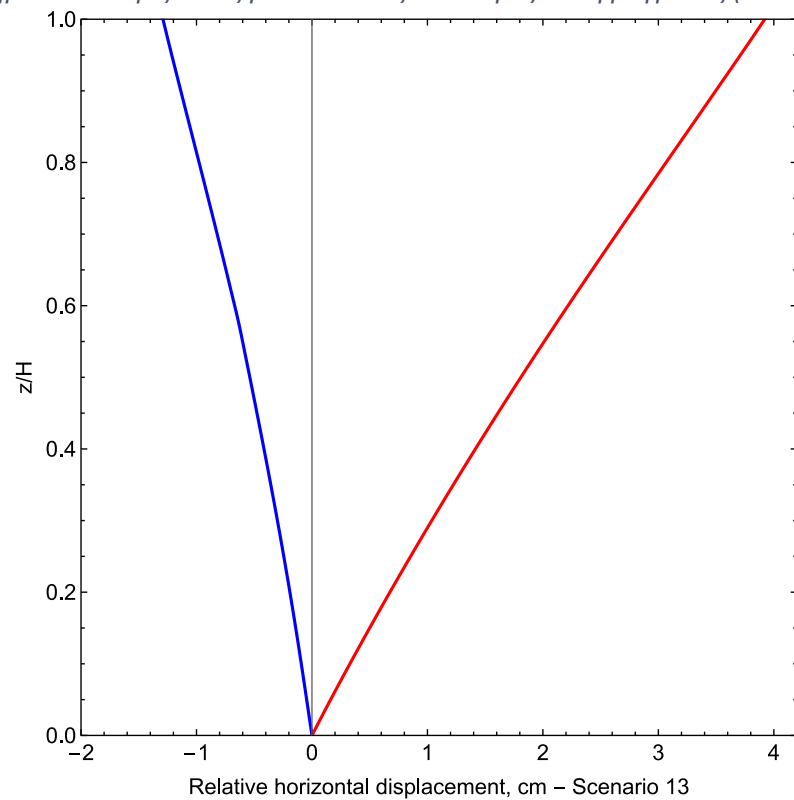


Εικόνα 5.24 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 12)

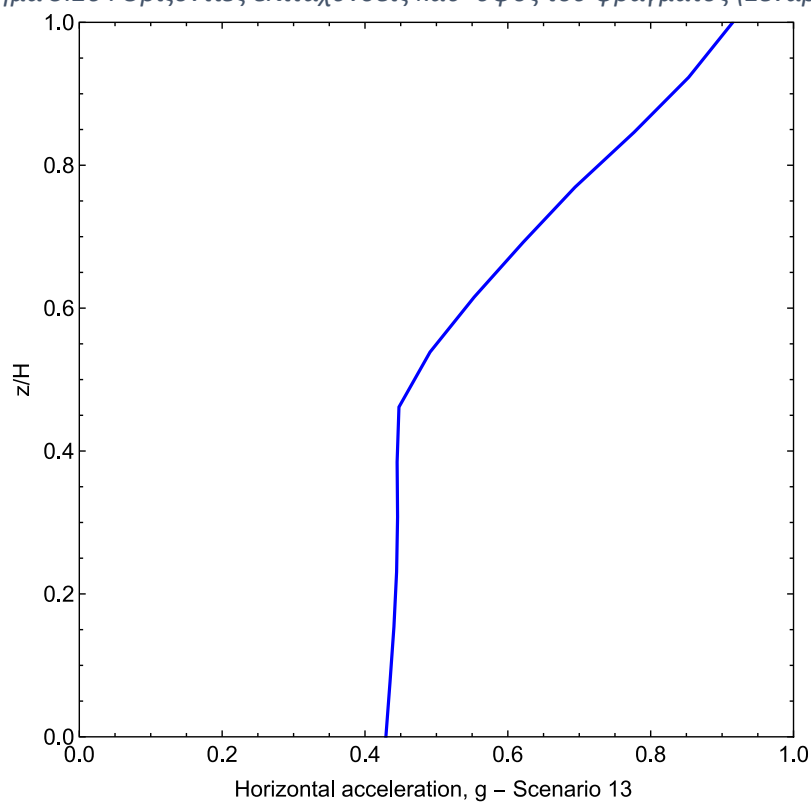


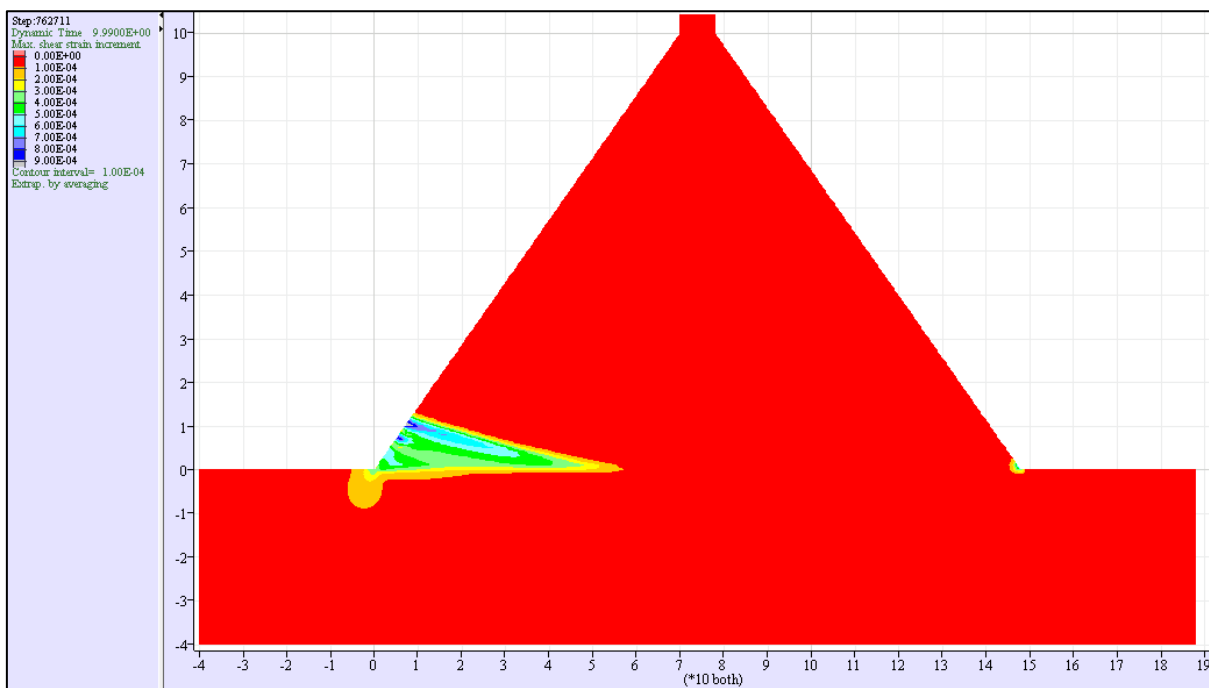
Εικόνα 5.25 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 12)

Γράφημα 5.25 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 13)

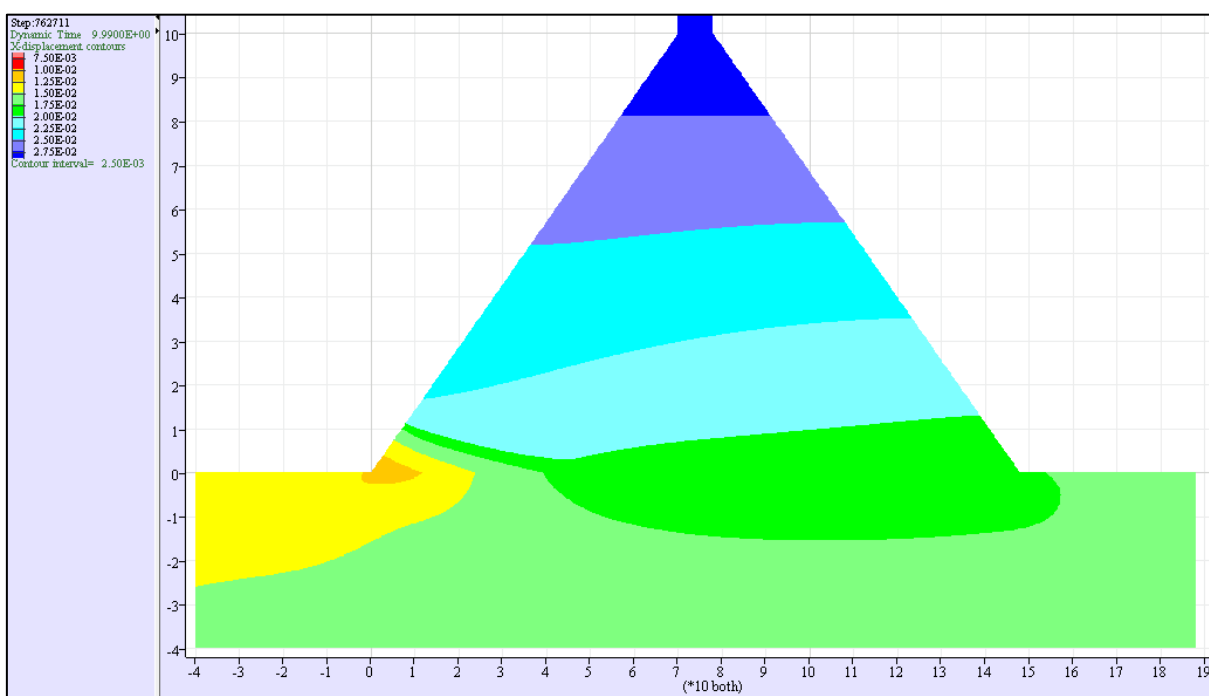


Γράφημα 5.26 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος (Σενάριο 13)





Εικόνα 5.26 : Κατανομή της μεταβολής της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης στο τέλος του σεισμού (Σενάριο 13)



Εικόνα 5.27 : Οριζόντιες μετατοπίσεις μετά το τέλος του σεισμού (Σενάριο 13)

Κεφάλαιο 6 : Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

6.1 Επίδραση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος

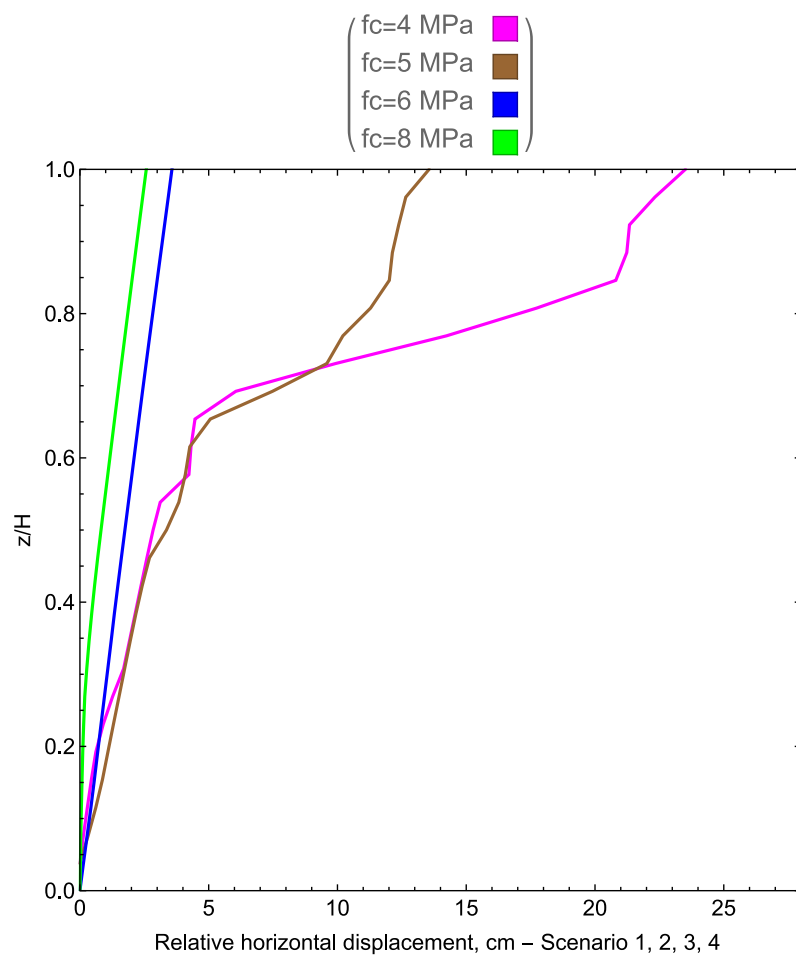
Εξετάζοντας την επίδραση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος στην σεισμική απόκριση του φράγματος, δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά προσομοιώματα, όπου διαφοροποιείται η θλιπτική αντοχή του σκληρού επιχώματος με τιμές 4, 5, 6, και 8 MPa. Οι αναλύσεις αφορούν φράγμα συνολικού ύψους 104 m, οι δυναμικές αναλύσεις συμπεριλαμβάνουν τα σεισμικά δεδομένα της Λευκάδας με μέγιστη επιτάχυνση 0.3g και η δυσκαμψία της θεμελίωσης αντιστοιχεί σε ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s=1000$ m/s. Τα στοιχεία των δυναμικών αναλύσεων δίνονται στον Πίνακα 5.1.

Αναφορικά με την επίδραση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος, στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης. Παρατηρείται ότι οι μικρότερες δυνατές μετακινήσεις του φράγματος προκύπτουν για το σκληρό επίχωμα τύπου HD (σενάριο 4) με θλιπτική αντοχή 8 MPa, εφελκυστική αντοχή 0.96 MPa, μέτρο ελαστικότητας 11.56 GPa και συνοχή 1.781 MPa (Πίνακας 5.2). Για την αμέσως μικρότερη αντοχή του σκληρού επιχώματος ($f_c=6$ MPa, τύπος hardfill HC), η απόκριση παρατηρούμε πως αυξάνεται ελαφρά, αλλά τα αποτελέσματα εξακολουθούν να είναι πλήρως αποδεκτά. Μειώνοντας την θλιπτική αντοχή του φράγματος κάτω από 6 MPa παρατηρούμε ασυνέχειες στη καμπύλη των μετατοπίσεων οι οποίες υποδηλώνουν κάποια μορφή αστοχίας, δηλαδή κάποια ολίσθηση μάζας του σκληρού επιχώματος. Συνδυαστικά με την κατανομή της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης του φράγματος (Εικόνες 5.4 και 5.6) και τις οριζόντιες μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στο σώμα του (Εικόνες 5.5 και 5.7), συμπεραίνουμε κατολισθήσεις στο κατάντη πρανές του φράγματος.

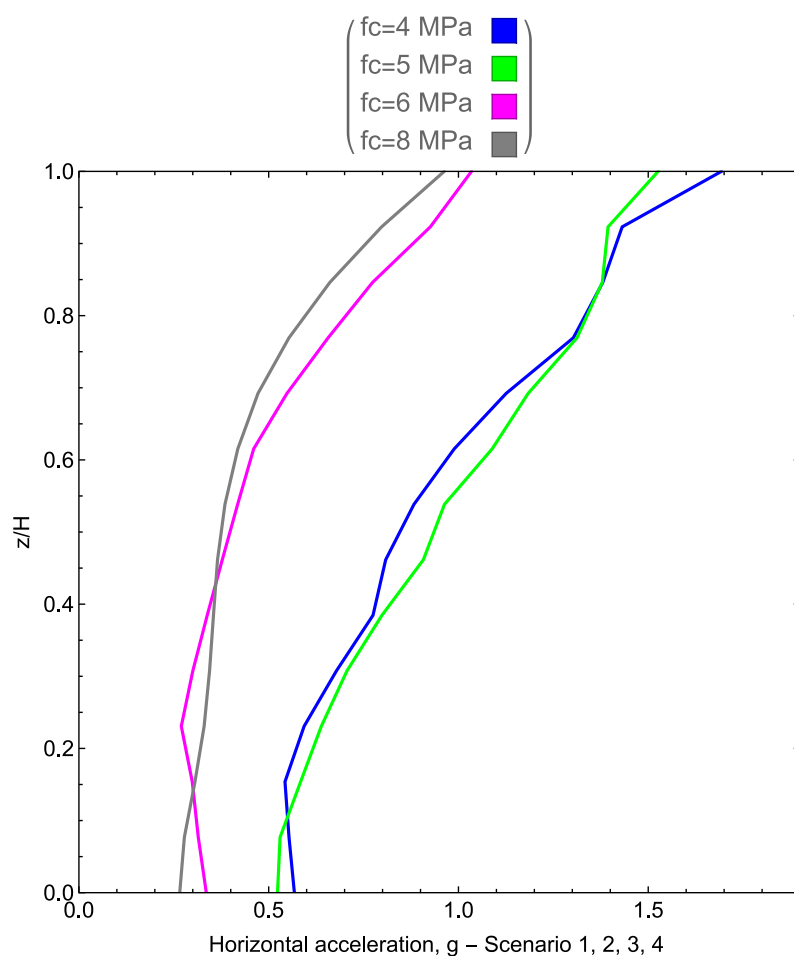
Πράγματι, στην περίπτωση θλιπτικής αντοχής σκληρού επιχώματος ίσης προς 4 MPa και 5 MPa, οι μέγιστες μόνιμες οριζόντιες μετατοπίσεις στο κατάντη πρανές είναι περίπου 2 m (βλέπε Σχήματα 5.5 και 5.7, αντίστοιχα). Οι μετατοπίσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές και συνεπώς αυτή η ποιότητα σκυροδέματος είναι ανεπαρκής γι' αυτό το ύψος φράγματος και αυτή την μέγιστη επιτάχυνση.

Αντίθετα, στην περίπτωση θλιπτικής αντοχής σκληρού επιχώματος ίσης προς 6 MPa και 8 MPa, οι μέγιστες μόνιμες οριζόντιες μετατοπίσεις στο κατάντη πρανές είναι μικρότερες από περίπου 2.5 cm (βλέπε Σχήματα 5.3 και 5.9, αντίστοιχα). Οι μετατοπίσεις αυτές είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες, άρα δεν υπάρχει πρακτικά καμία βλάβη στο σκληρό επίχωμα, και συνεπώς αυτή η ποιότητα σκυροδέματος είναι πλήρως επαρκής.

Γράφημα 6.1 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 2, 3, 4
(Σεισμός Λευκάδας, PGA 0.3g, Vs=1000 m/s)



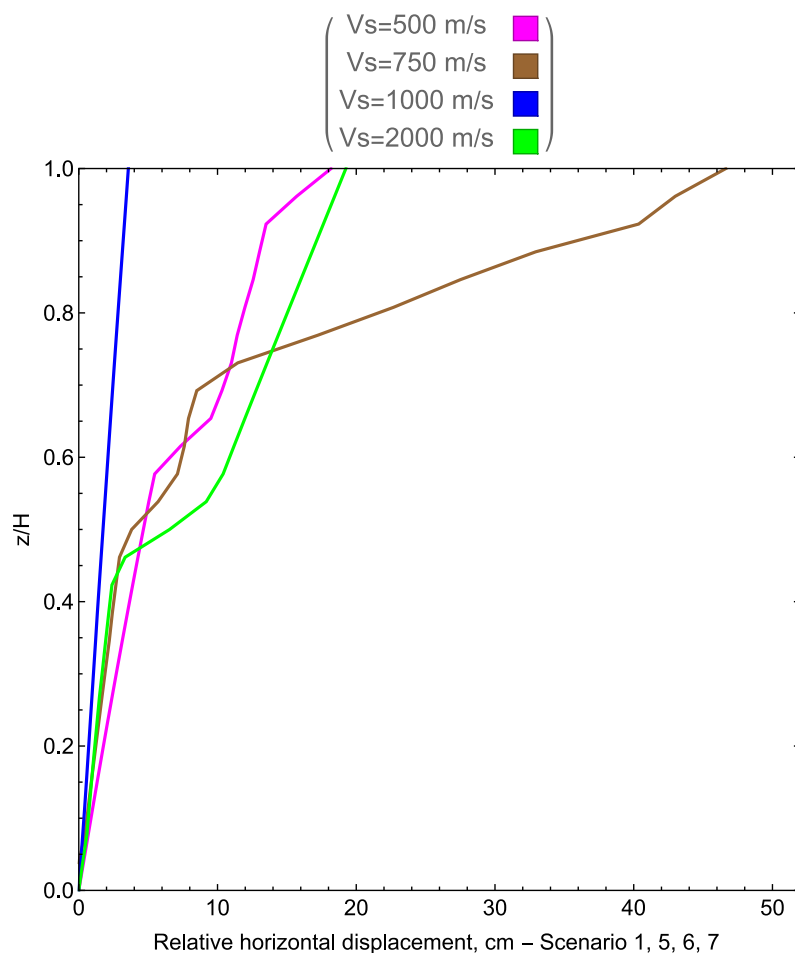
Γράφημα 6.2 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 2, 3, 4
(Σεισμός Λευκάδας, PGA 0.3g, Vs=1000 m/s)



6.2 Επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης

Σε αυτή την περίπτωση όπου εξετάζουμε την επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης στην σεισμική απόκριση του φράγματος, δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα ανάλυσης, όπου διαφοροποιείται ο βράχος θεμελίωσης με τιμές ταχύτητας διατμητικών κυμάτων Vs ίσες προς 500, 750, 1000, και 2000 m/s (Πίνακας 5.3). Οι αναλύσεις αφορούν φράγμα συνολικού ύψους 104 m, οι δυναμικές αναλύσεις έχουν ως σεισμική διέγερση το σεισμό της Λευκάδας (PGA = 0.3g) και η θλιπτική αντοχή του σκληρού επιχώματος είναι $f_c = 6$ MPa.

Γράφημα 6.3 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 5, 6, 7
(Σεισμός Λευκάδας, $PGA=0.3g$, $f_c=6\text{ MPa}$)



Παρατηρούμε πως μειώνοντας τη δυσκαμψία του βράχου οι μετακινήσεις και οι επιταχύνσεις που σημειώνονται στο σώμα και στη στέψη του φράγματος αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό.

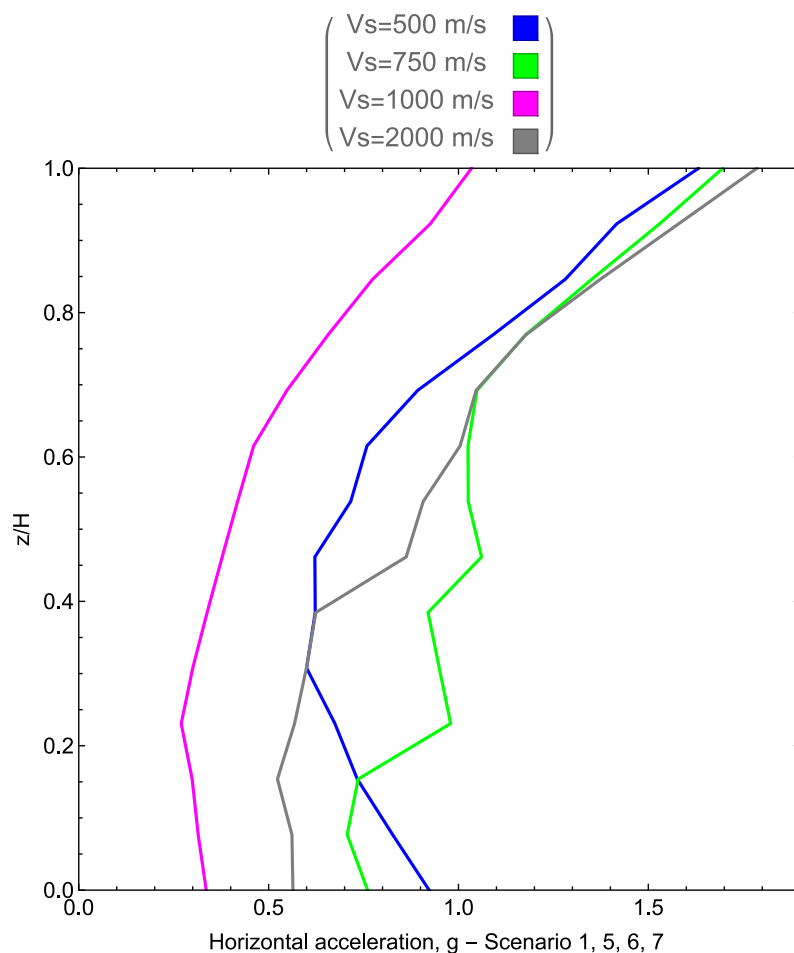
Για τη μικρότερη δυνατή δυσκαμψία βράχου ($V_s = 500\text{ m/s}$) και την βέλτιστη επιλογή υλικού σκληρού επιχώματος το μοντέλο της δυναμικής ανάλυσης φθάνει σε κατάρρευση για το δεδομένο σεισμό της Λευκάδας, πριν από τα πρώτα 14 s σεισμού (πολύ πριν το τέλος του σεισμού διάρκειας 30 s). Συνεπώς οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις στο σχήμα 6.3 για την περίπτωση αυτή δεν είναι αξιόπιστες. Για $V_s = 750\text{ m/s}$, η ανάλυση ολοκληρώνεται στα 30 s διέγερσης, και η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση στην στέψη είναι περίπου 46 cm, ενώ η μέγιστη μόνιμη οριζόντια μετατόπιση του κατάντη πρανούς στο τέλος του σεισμού είναι περίπου 2.25 m (Σχήμα 5.13). Συνεπώς υπάρχει σημαντική βλάβη στο φράγμα υπό μορφή ολίσθησης μάζας σκληρού επιχώματος.

Για $V_s = 1000\text{ m/s}$ (βασικό σενάριο), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα αποτελέσματα είναι εξαιρετικά ικανοποιητικά, με πολύ μικρές μέγιστες μετατοπίσεις.

Για $V_s = 2000\text{ m/s}$, η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση στην στέψη είναι μεγαλύτερη από αυτή του βασικού σεναρίου, περίπου 19 cm, ενώ η μέγιστη μόνιμη οριζόντια μετατόπιση είναι περίπου 22 cm (Σχήμα 5.15). Την περίπτωση αυτή φαίνεται πως αρχίζει να δημιουργείται μια επιφάνεια αστοχίας κοντά στον πόδα του κατάντη πρανούς με σχετικά μικρή ολίσθηση

(Εικόνα 5.15). Συμπερασματικά, η δυσκαμψία του βράχου της θεμελίωσης μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην δημιουργία μονίμων οριζόντιων μετατοπίσεων με ολίσθηση μάζας σκληρού επιχώματος. Η παρουσία εδάφους ή βράχου χαμηλής δυσκαμψίας αυξάνει γενικά τις μέγιστες μετατοπίσεις, επιταχύνσεις, και μόνιμες μετατοπίσεις στο φράγμα. Από την άλλη μεριά, η αύξηση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης δεν σημαίνει πάντα και μείωση των μεγίστων μετατοπίσεων και επιταχύνσεων στο φράγμα, λόγω μείωσης της ακτινοβολούμενης ενέργειας και σε κάποιες περιπτώσεις λόγω πιθανών φαινομένων συντονισμού. Συνεπώς κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά ως ιδιαίτερη περίπτωση.

Γράφημα 6.4 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 5, 6, 7
(Σεισμός Λευκάδας, PGA 0.3g, $f_c=6$ MPa)

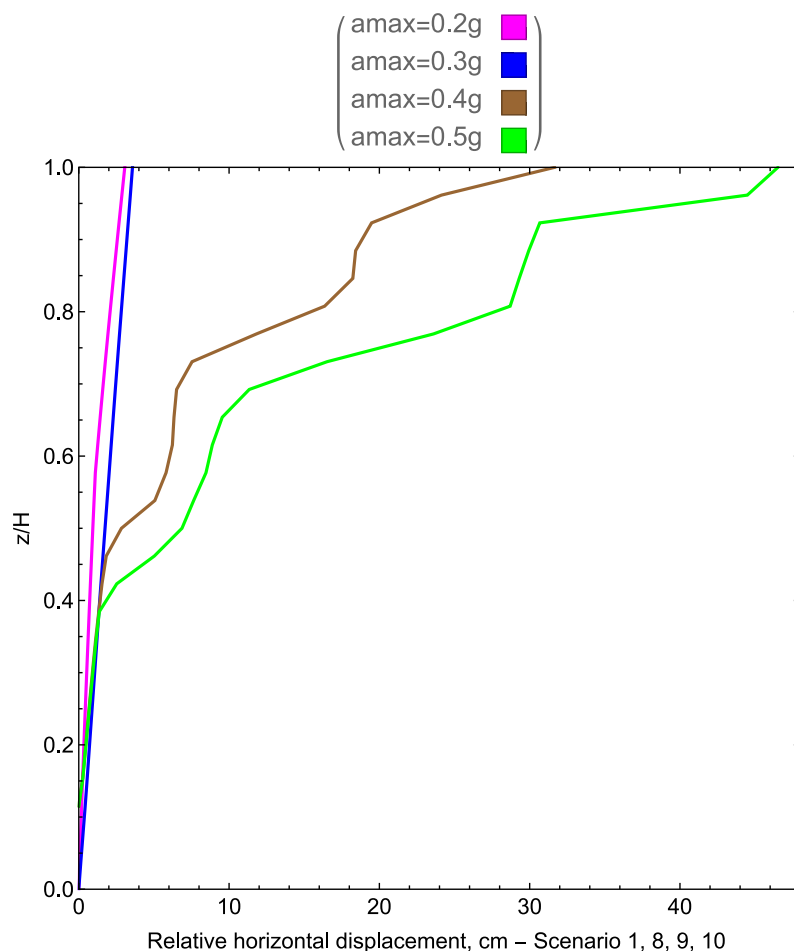


Ωστόσο αξίζει, ως περαιτέρω έρευνα να επαναληφθούν οι αναλύσεις του υπο-κεφαλαίου 6.2, θεωρώντας το σημείο αναφοράς του σεισμού σχεδιασμού είναι η ελεύθερη επιφάνεια του βράχου της θεμελίωσης κατάντη του φράγματος, όπου όλες οι αναλύσεις θα πρέπει να προβλέπουν μέγιστη επιτάχυνση ίση προς 0.3g. Μία τέτοια σειρά αναλύσεων έδινε μια πιο συνεπή εικόνα για την αξιολόγηση της επίδρασης της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης.

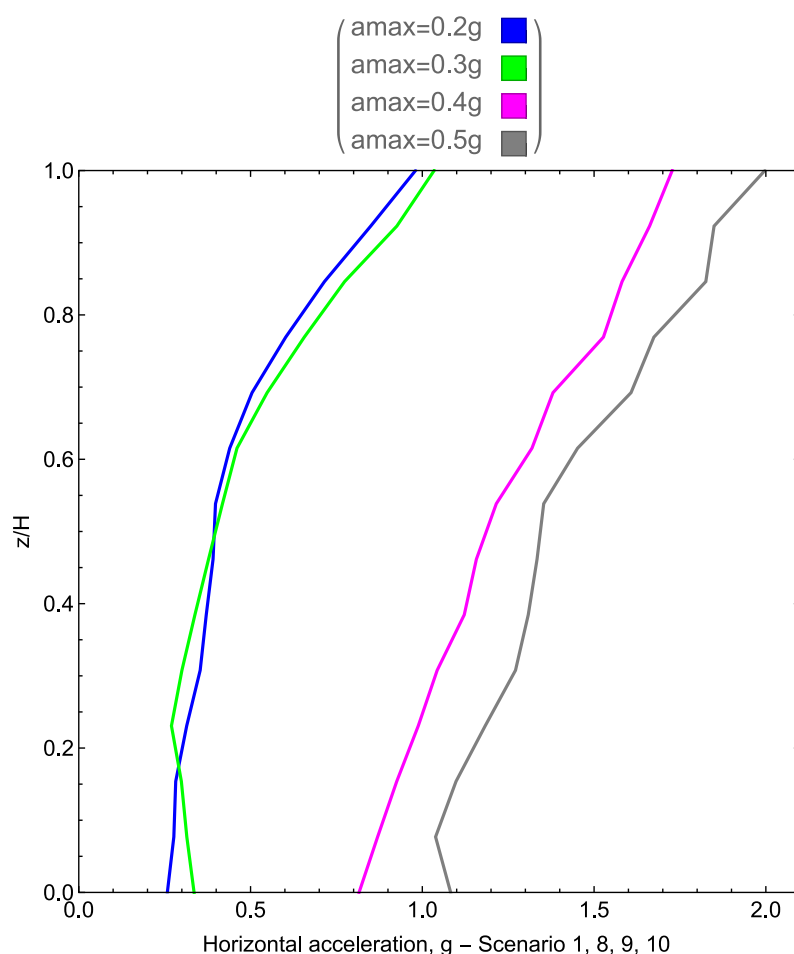
6.3 Επίδραση του μεγέθους της σεισμικής έντασης

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε την επίδραση της έντασης του σεισμού στην απόκριση του φράγματος. Στις παρακάτω αναλύσεις η γεωμετρία του φράγματος παραμένει σταθερή, το σκληρό επίχωμα έχει θλιπτική αντοχή 6 MPa και ο βράχος θεμελίωσης έχει ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 1000$ m/s. Η σεισμική διέγερση που χρησιμοποιήθηκε είναι από την καταγραφή του σεισμού της Λευκάδας για διαφορετικές εντάσεις, ήτοι 0.2g, 0.3g, 0.4g, και 0.5g (Πίνακας 5.1).

Γράφημα 6.5 : Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 8, 9, 10
(Σεισμός Λευκάδας, $V_s=1000$ m/s, $f_c=6$ MPa)



Γράφημα 6.6 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 8, 9, 10
(Σεισμός Λευκάδας, $V_s=1000$ m/s, $f_c=6$ MPa)



Παρατηρούμε πως μειώνοντας την ένταση του σεισμού κατά 0.1g οι οριζόντιες μετατοπίσεις δε σημειώνουν σημαντική διαφορά από τις αντίστοιχες του σεναρίου 1, ωστόσο υπάρχει μια μικρή μείωση.

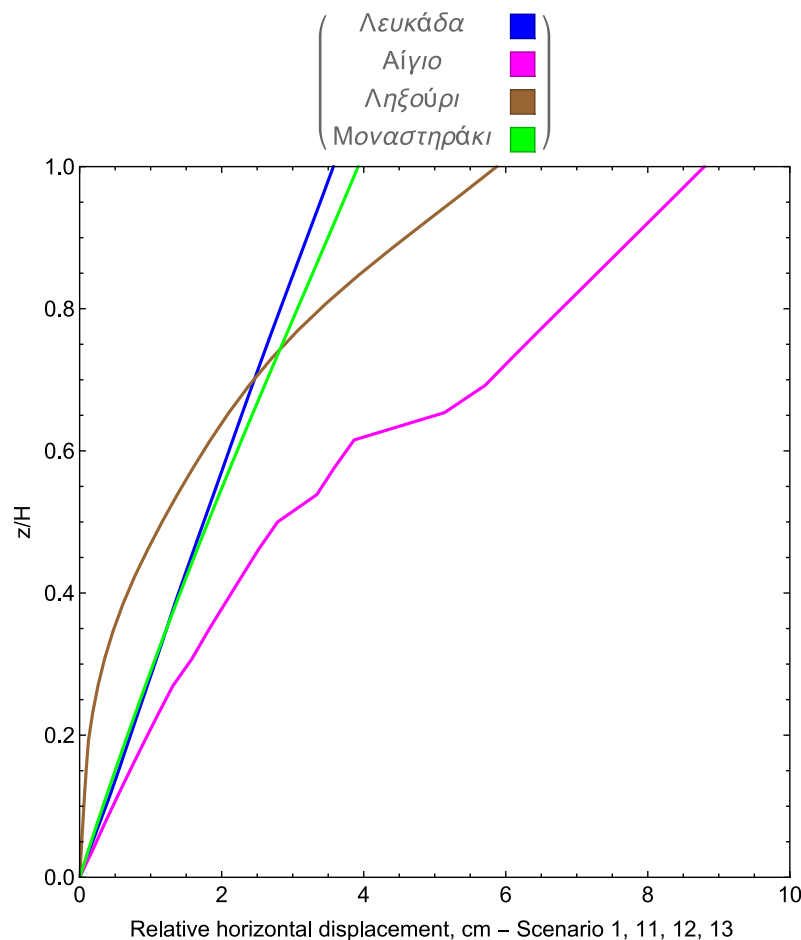
Για μεγαλύτερης έντασης σεισμού αυξάνονται σημαντικά οι μετακινήσεις και οι επιταχύνσεις στις δύο κατευθύνσεις. Στις αναλύσεις των σεναρίων 9, 10 σημειώνονται αστοχίες κατάντη πρανούς (Εικόνα 5.18, 5.19, 5.20, 5.21). Πράγματι, για $PGA = 0.4g$, η μέγιστη μόνιμη μετατόπιση στο κατάντη πρανές φθάνει τα 3.5 m (βλέπε Σχήμα 5.19), ενώ για $PGA = 0.5g$, η ανάλυση σταματά λόγω αριθμητικού προβλήματος στα 9.5 s και κατά την στιγμή αυτή η μέγιστη μετατόπιση στο κατάντη πρανές είναι μεταξύ 2.5 και 3 m (βλέπε Σχήμα 5.21).

Συμπερασματικά, για $PGA \geq 0.4g$ επέρχεται αστοχία του σκληρού επιχώματος, και συνεπώς για αυξημένες σεισμικές εντάσεις επιβάλλεται η αύξηση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος. Στην περίπτωση αυτή, θα ήταν χρήσιμο να ελεγχθεί η επάρκεια σκληρού επιχώματος με θλιπτική αντοχή ίση προς 8 MPa.

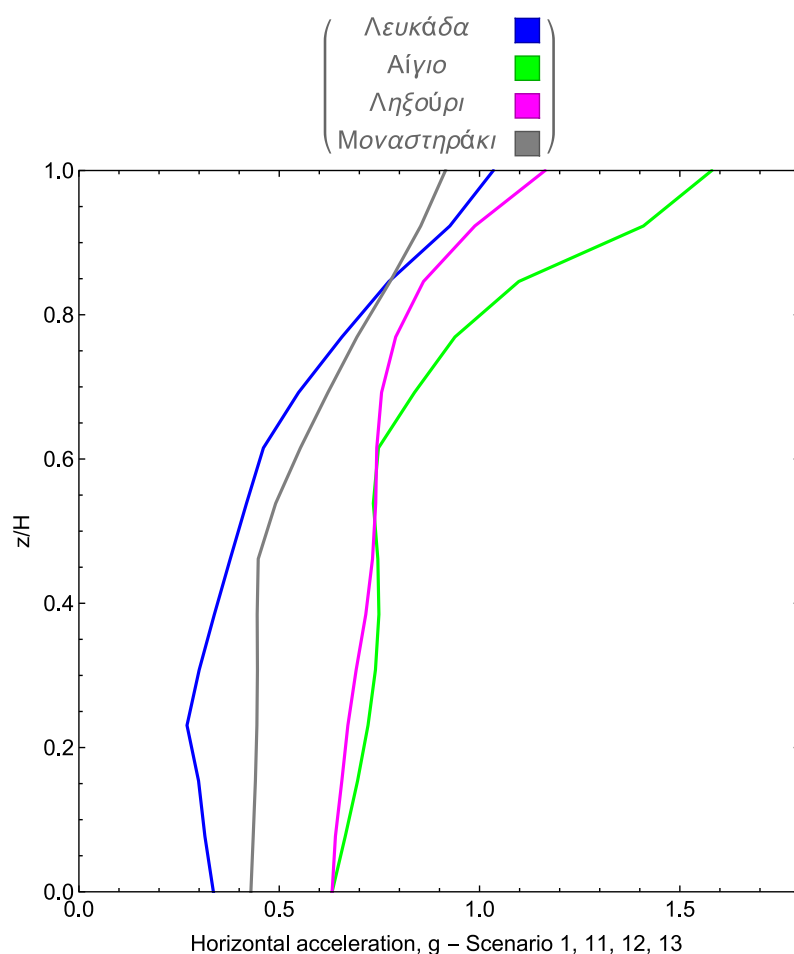
6.4 Επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε την επίδραση του διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου του σεισμού στο φράγμα. Στις παρακάτω αναλύσεις η γεωμετρία του φράγματος παραμένει σταθερή, το σκληρό επίχωμα έχει θλιπτική αντοχή 6 MPa και ο βράχος θεμελίωσης έχει ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s = 1000$ m/s. Το σενάριο 1 αφορά όπως και παραπάνω τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το σεισμό της Λευκάδας, στα σενάρια 11, 12 και 13 χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές των σεισμών στις περιοχές Αίγιο, Ληξούρι και Μοναστηράκι αντίστοιχα βαθμονομημένες για $PGA = 0.3g$ (Πίνακας 5.1).

Γράφημα 6.7: Οριζόντιες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 11, 12, 13 ($PGA = 0.3g$, $V_s = 1000$ m/s, $f_c = 6$ MPa)



Γράφημα 6.8 : Οριζόντιες επιταχύνσεις καθ' ύψος του φράγματος – Σενάρια 1, 11, 12, 13
(PGA 0.3g, $V_s=1000$ m/s, $f_c=6$ MPa)



Παρατηρούμε πως για το σεισμό του Αιγίου που είναι ένας σεισμός της μισής περίπου διάρκειας από αυτόν της Λευκάδας, διαφορετικού συχνотικού περιεχομένου και ίδιας έντασης έχουμε μια αύξηση στα αποτελέσματα των μετακινήσεων και επιταχύνσεων. Στο σενάριο 11 (σεισμός Αιγίου) σημειώνονται κάποιες ρηγματώσεις στο σώμα του φράγματος (Εικόνα 5.22, 5.23). Η μέγιστη μόνιμη μετατόπιση στο τέλος του σεισμού είναι μικρή, περίπου 6 cm (Εικόνα 5.23). Στις αναλύσεις των σεναρίων 12 και 13 σημειώνεται αύξηση των τάσεων και της διατμητικής παραμόρφωσης στον πόδα του ανάντη πρανούς στην περιοχή της πλίνθου (Εικόνες 5.24, 5.25, 5.26, 5.27), πράγμα που αξίζει να εκτιμηθεί και να ληφθούν μέτρα ενίσχυσης της περιοχής.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω αναλύσεων συμπεραίνουμε πως στη σεισμική απόκριση ενός φράγματος σκληρού επιχώματος σημαντική παράμετρος επιρροής είναι η κατάλληλη επιλογή υλικού σκληρού επιχώματος καθώς και τοποθεσίας φράγματος με κατάλληλο υλικό θεμελίωσης. Η αλληλεπίδραση φράγματος-θεμελίωσης-νερού θα καθορίσει την σεισμική συμπεριφορά του σκληρού επιχώματος.

Σε κάθε περίπτωση επιβάλλεται η χρήση πολλών διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων από καταγραφές ιστορικών σεισμών, με κατάλληλα χαρακτηριστικά τα οποία εκφράζουν την σεισμικότητα της περιοχής. Σύμφωνα με τον επερχόμενο αντισεισμικό κανονισμό, απαιτείται

η χρήση 7 σεισμικών διεγέρσεων και η λήψη της μέσης τιμής της απόκρισης του συνόλου των αναλύσεων.

Κεφάλαιο 7 : Συμπεράσματα

Η παρούσα Διπλωματική αφορά την αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς φράγματος ισχνού κυλινδρούμενου σκυροδέματος για διαφορετικές περιπτώσεις, εξετάζοντας την επιρροή του υλικού του σκληρού επιχώματος, της δυσκαμψίας του υποβάθρου θεμελίωσης, και της αυξανόμενης έντασης και διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης με στόχο τον βέλτιστο σχεδιασμό του φράγματος. Αναλύθηκε ένα φράγμα ύψους 104 m, αξονοσυμμετρικής τραπεζοειδούς διατομής, με κλίση στις ανάντη και κατάντη παρειές ίση προς 0.7:1. Η ανάλυση του προβλήματος έγινε χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Κύριος στόχος της εργασίας ήταν η αριθμητική εκτίμηση κατάλληλων παραμέτρων της σεισμικής απόκρισης του φράγματος, όπως οι μετακινήσεις και επιταχύνσεις κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του φράγματος, και η κατανομή των μόνιμων μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και σεισμικών βλαβών (κυρίως εφελκυστικών ρηγματώσεων και διατμητικών ολισθήσεων) στο τέλος της σεισμικής δόνησης.

Αναφορικά με την επίδραση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του φράγματος είναι πολύ καλή για σκληρό επίχωμα με θλιπτική αντοχή ίση ή μεγαλύτερη των 6 MPa. Μειώνοντας τη θλιπτική αντοχή κάτω από 6 MPa, παρατηρείται ολίσθηση μάζας του σκληρού επιχώματος της τάξης των 2 - 3 μέτρων.

Σχετικά με την επίδραση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης, συμπεραίνεται ότι μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη δημιουργία μόνιμων οριζόντιων μετατοπίσεων και στην ολίσθηση της μάζας του σκληρού επιχώματος. Η παρουσία εδάφους ή βράχου χαμηλής δυσκαμψίας αυξάνει γενικά τις μέγιστες μετατοπίσεις, επιταχύνσεις και μόνιμες μετατοπίσεις στο φράγμα. Από την άλλη, η αύξηση της δυσκαμψίας του βράχου θεμελίωσης δεν σημαίνει πάντα μείωση των μεγίστων μετατοπίσεων και επιταχύνσεων στο φράγμα, λόγω μείωσης της ακτινοβολούμενης ενέργειας και πιθανών φαινομένων συντονισμού. Συνεπώς, κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται λεπτομερώς ξεχωριστά.

Σχετικά με την επίδραση της σεισμικής έντασης, συμπεραίνεται ότι για $PGA \geq 0.4g$ επέρχεται αστοχία του σκληρού επιχώματος, και συνεπώς, για αυξημένες σεισμικές εντάσεις επιβάλλεται η αύξηση της ποιότητας του σκληρού επιχώματος. Σε αυτή την περίπτωση, θα ήταν χρήσιμο να ελεγχθεί η επάρκεια σκληρού επιχώματος με θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη των 6 MPa.

Σχετικά με την επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης, συμπεραίνουμε ότι η κατάλληλη επιλογή υλικού σκληρού επιχώματος καθώς και η κατασκευή του φράγματος σε κατάλληλο υλικό θεμελίωσης είναι σημαντικοί παράγοντες για

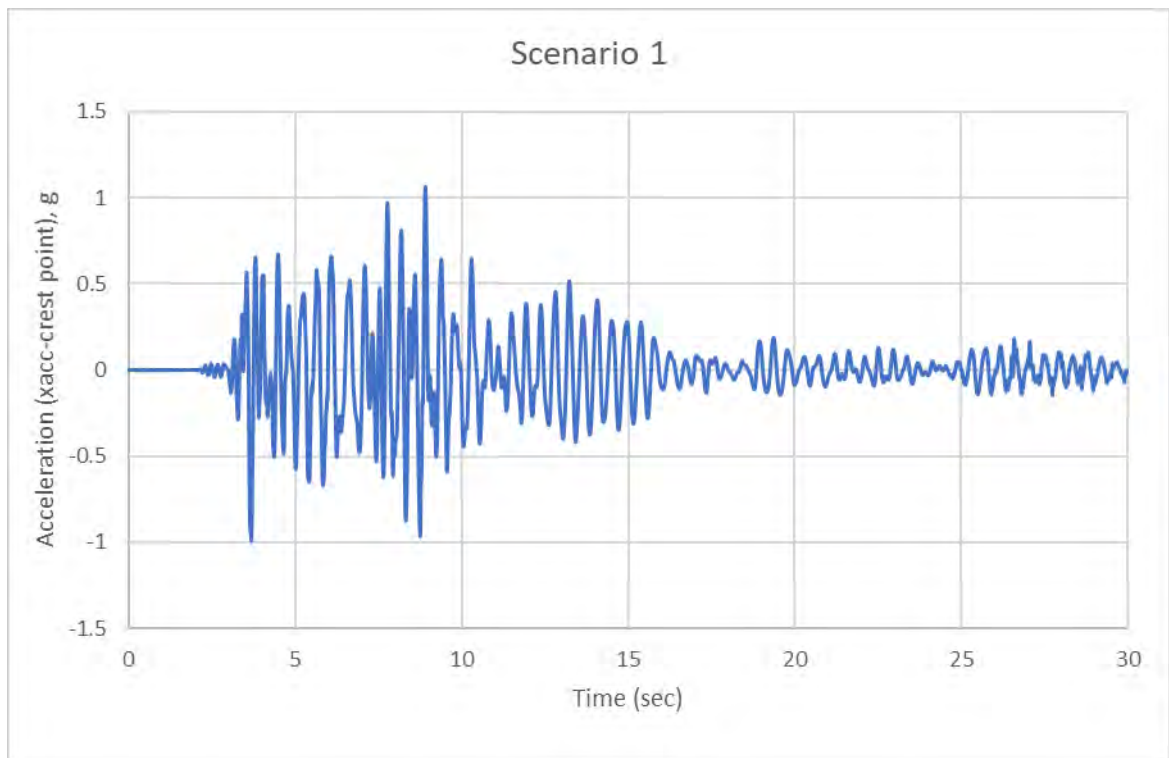
τη σεισμική απόκριση του φράγματος. Η αλληλεπίδραση φράγματος-θεμελίωσης-νερού θα καθορίσει τη σεισμική συμπεριφορά του σκληρού επιχώματος. Επιβάλλεται επίσης η χρήση πολλών διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων από καταγραφές ιστορικών σεισμών, με κατάλληλα χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν τη σεισμικότητα της περιοχής.

Βιβλιογραφία

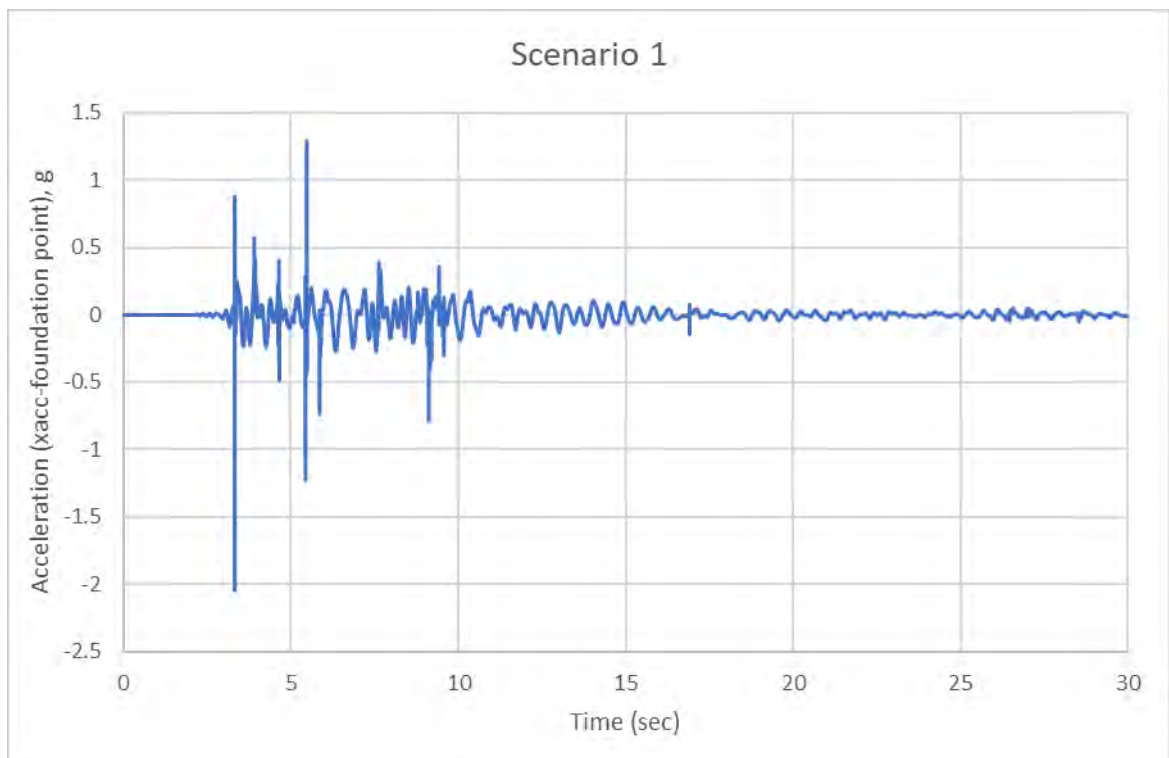
- ❖ Berga L., J.M. Buil, C. Jofré, S. Chonggang, 2006, *ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS, PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) DAMS, 17–19 NOVEMBER 2003, MADRID, SPAIN, Taylor & Francis Group plc, London, UK.*
- ❖ Cai A, Wu Y, Guo X, Ming, Y, 2012, *Research review of the cement sand and gravel (CSG) dam, Front. Struct. Civ. Eng. 2012, 6(1), 19–24*
- ❖ Chopra, A K., 2020, *Earthquake engineering for concrete dams: analysis, design, and evaluation by Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, USA.*
- ❖ Clough, R. W., 1980,. *Nonlinear mechanisms in the seismic response of arch dams, Proceedings, International Conference on Earthquake Engineering, Skopje, Yugoslavia.*
- ❖ Dakoulas, P, Gazetas, G., 1985, “A Class of Inhomogeneous Shear Beam Models for Seismic Analysis of Earth Dams and Embankments”, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 4, pp. 166-182.
- ❖ Gouvas H, Orfanos, 2014, C. *Determination of Factors Affecting Compressive Strength of Lean Rcc Mixtures: The experience of Filiatrinis Dam, Article in Geotechnical and Geological Engineering, October 2014.*
- ❖ Hinks, J L, 2023. *Earthquake engineering for dams and reservoirs (edited by J L Hinks), Emerald Publishing, ICE, Dorset, UK.*
- ❖ Itasca. *Fast Lagrangian Analysis of Continua, User Manual, Minneapolis, MN, 2020.*
- ❖ Jia, J., Lino, M., Jin, F., & Zheng, C. (2016). *The Cemented Material Dam: A New, Environmentally Friendly Type of Dam. Engineering*, 490–497.
- ❖ Londe P, Lino M. 1992, *The faced symmetrical hardfill dam: A new concept for RCC, Water Power and Dam Construction*, 42(2), 19-24.
- ❖ Moutafis, N. (2006). *Hydraulic structures - Dams. National Technical University of Athens.*
- ❖ Moutafis, N., & Thanopoulos, Y. (2015). *Hardfill Dams and Geomembrane Facings.*
- ❖ Peng Y, Yuan Y, 2014, *Analysis on the Dynamic Properties of Hardfill Materials, Journal of applied science and engineering innovation Vol.1 No.1 2014.*
- ❖ Tanchev, L., 2014, *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures, 2nd Edition by CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, Leiden.*
- ❖ Westergaard, H.M., 1933, *Water pressure on dams during earthquakes. ASCE Trans. 98 (2):418–433*

- ❖ *WU MengXi, DU Bin, YAO YuanCheng, HE XianFeng, 2011, An experimental study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material. Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.*
- ❖ *Xiong K, Weng, Y H, He Y L, 2013, Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam, Conference: Water Science and Engineering, Apr. 2013, National Dam Safety Research Center.*
- ❖ *Μουτάφης Ν. Ι., 2009, Τεχνολογία Γεωφραγμάτων, Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.*
- ❖ *Μουτάφης Ν., 2012, Εσπερίδα Αξονοσυμμετρικών Φραγμάτων Σκληρού Επιχώματος, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ), Σεπτέμβριος 2012, Αθήνα*
- ❖ *Ντακούλας Π., 2021, Σημειώσεις Μαθήματος: Υδροηλεκτρικά Φράγματα, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*
- ❖ *Σαχπάζης Κ., 2018, Γεωτεχνική Μηχανική των Φραγμάτων, 1^η έκδοση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.*

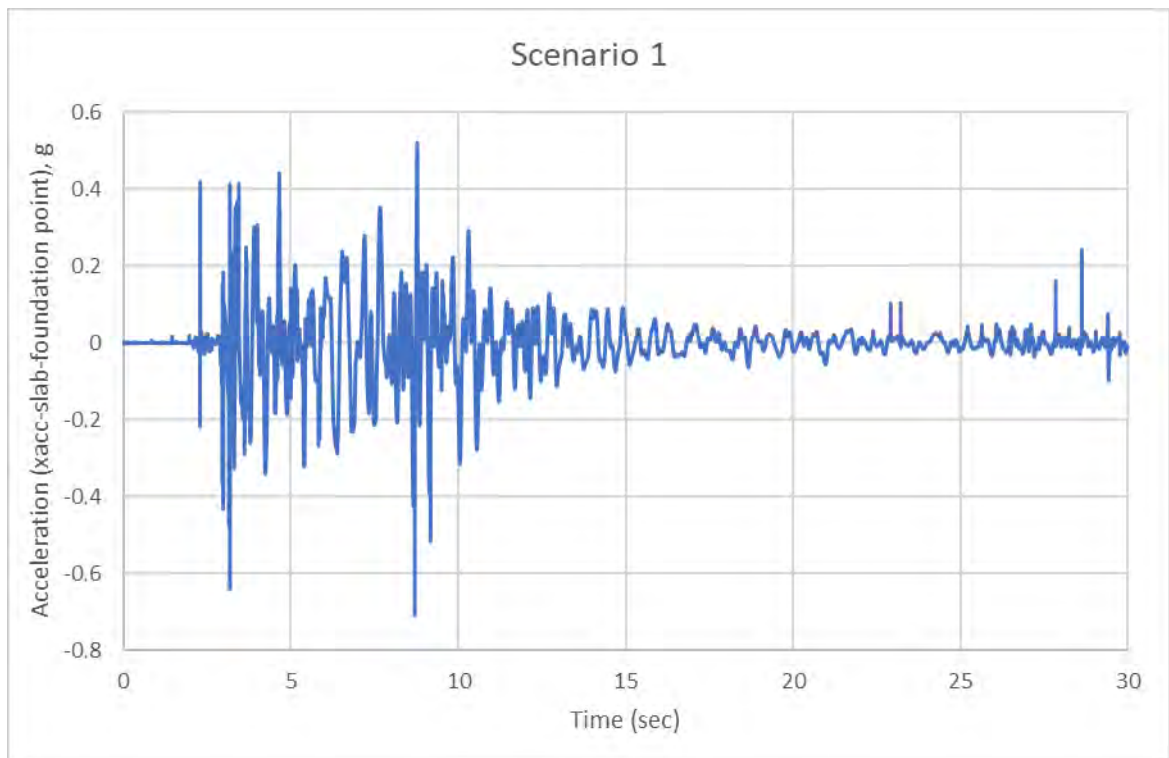
Παράρτημα Α



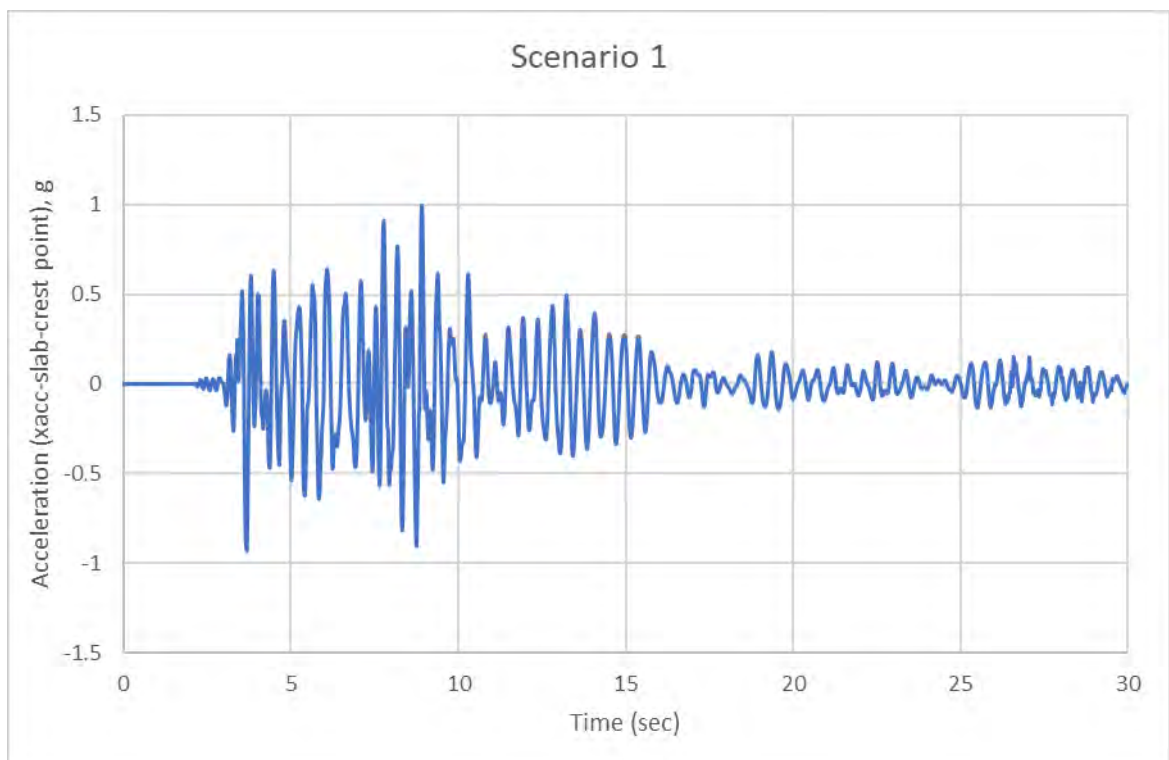
Γράφημα Παρ. Α. 1 : Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 1)



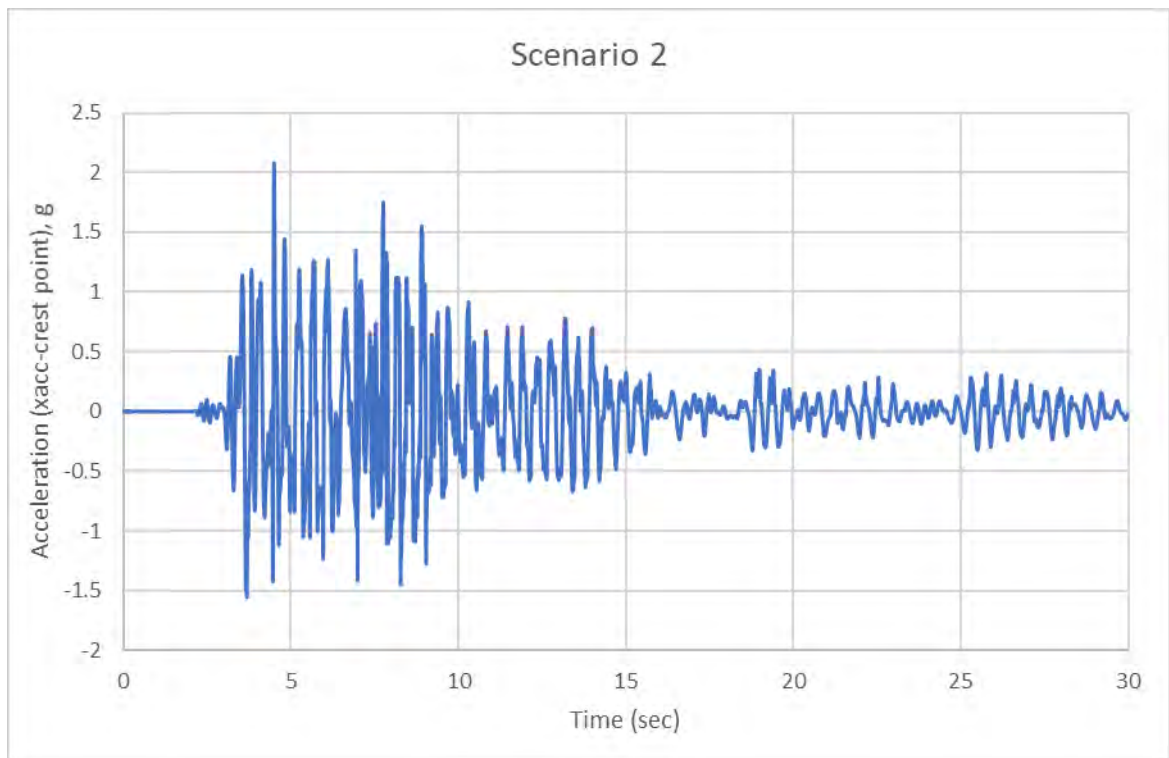
Γράφημα Παρ. Α. 2 : Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 1)



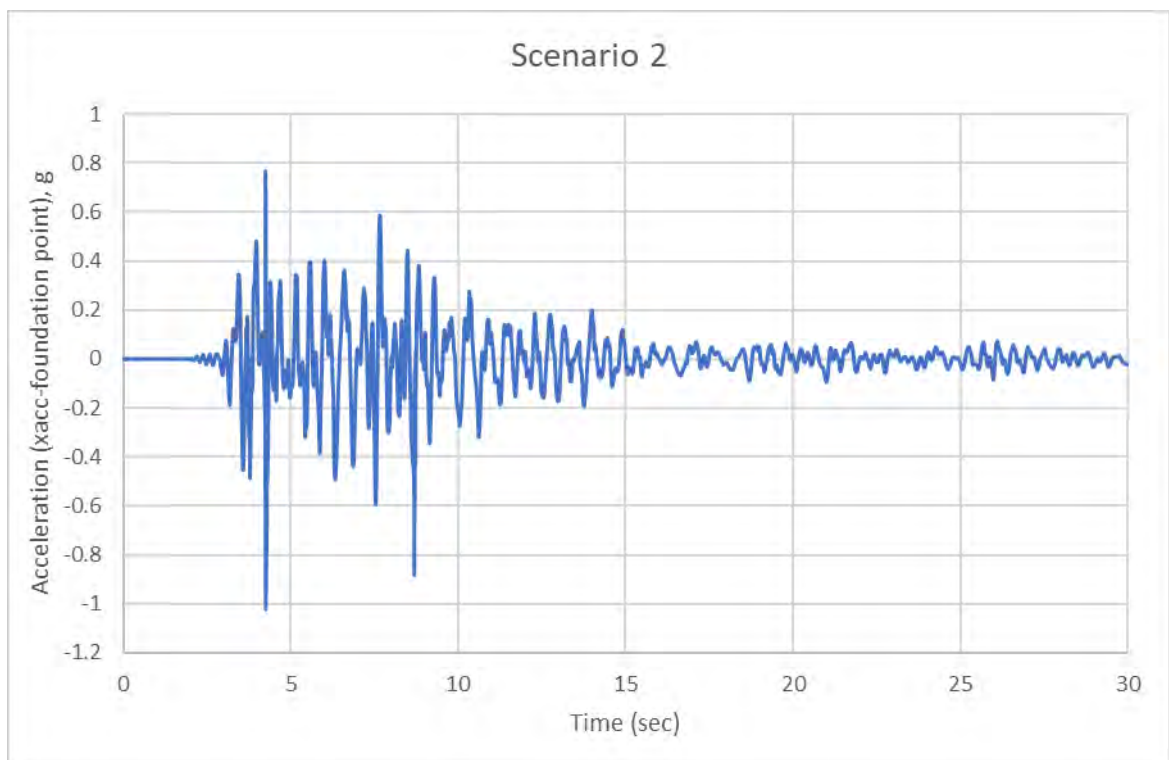
Γράφημα Παρ. Α. 3 : Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 1)



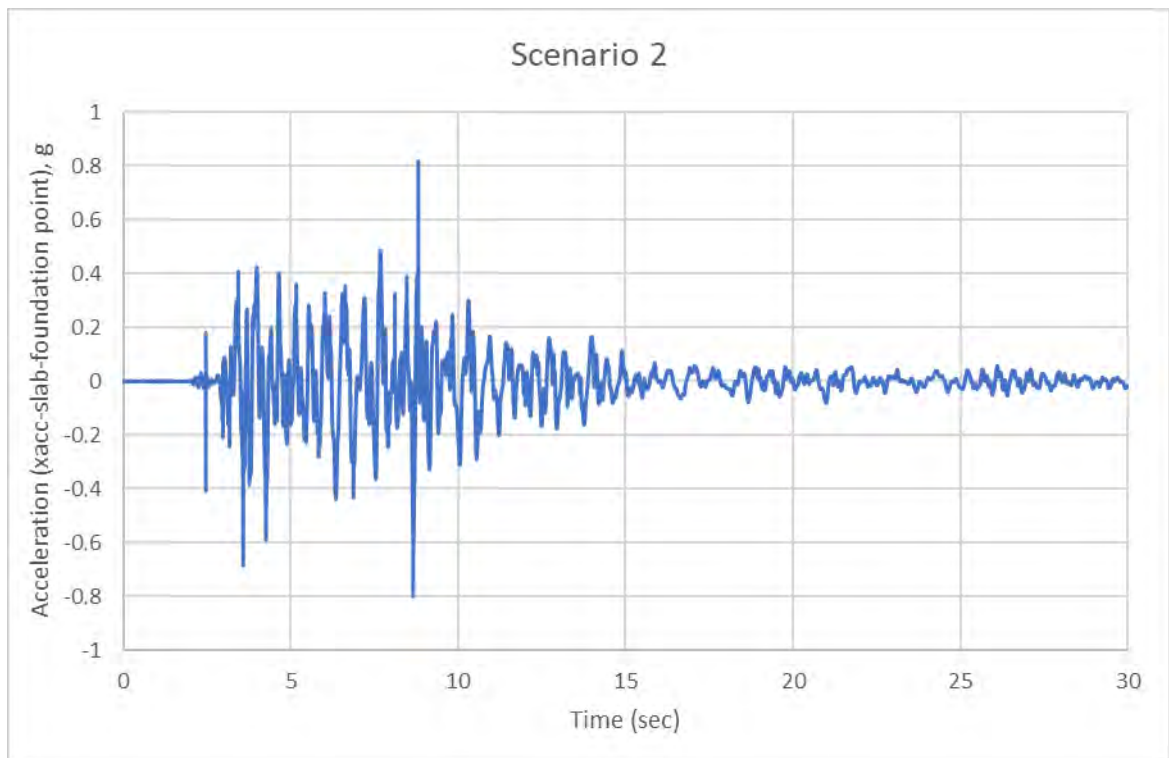
Γράφημα Παρ. Α. 4 : Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 1)



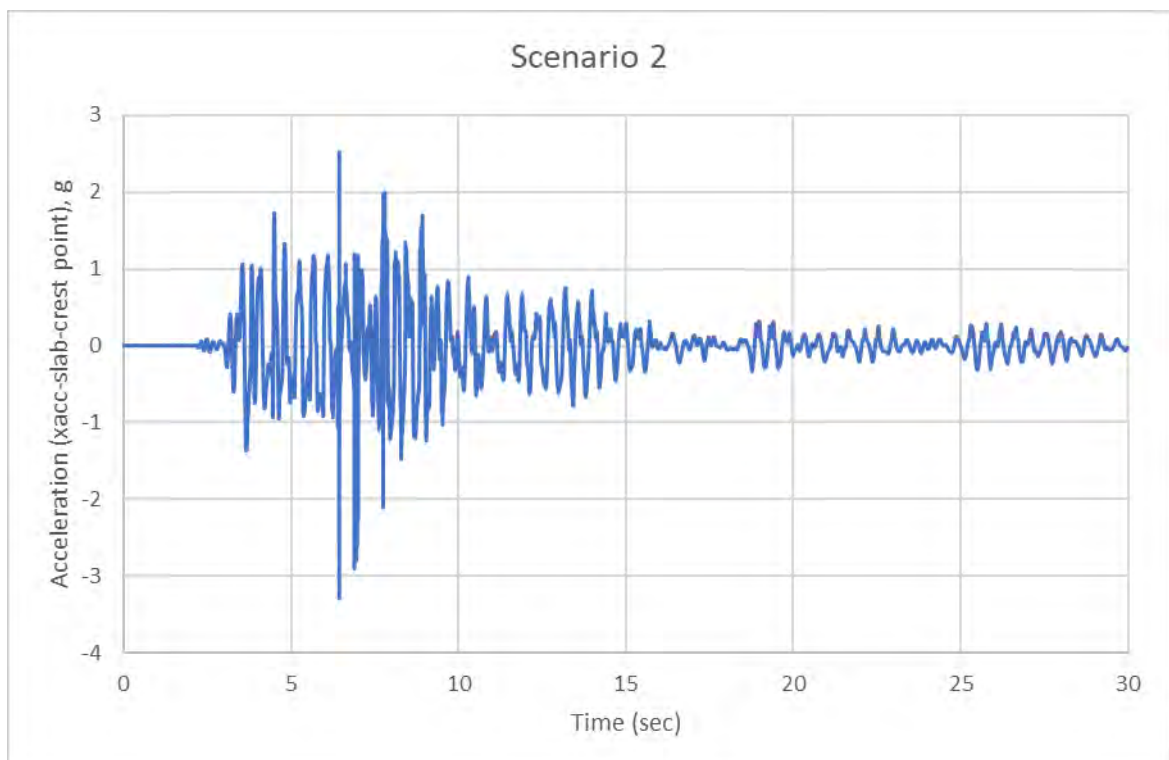
Γράφημα Παρ. Α. 5 : Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 2)



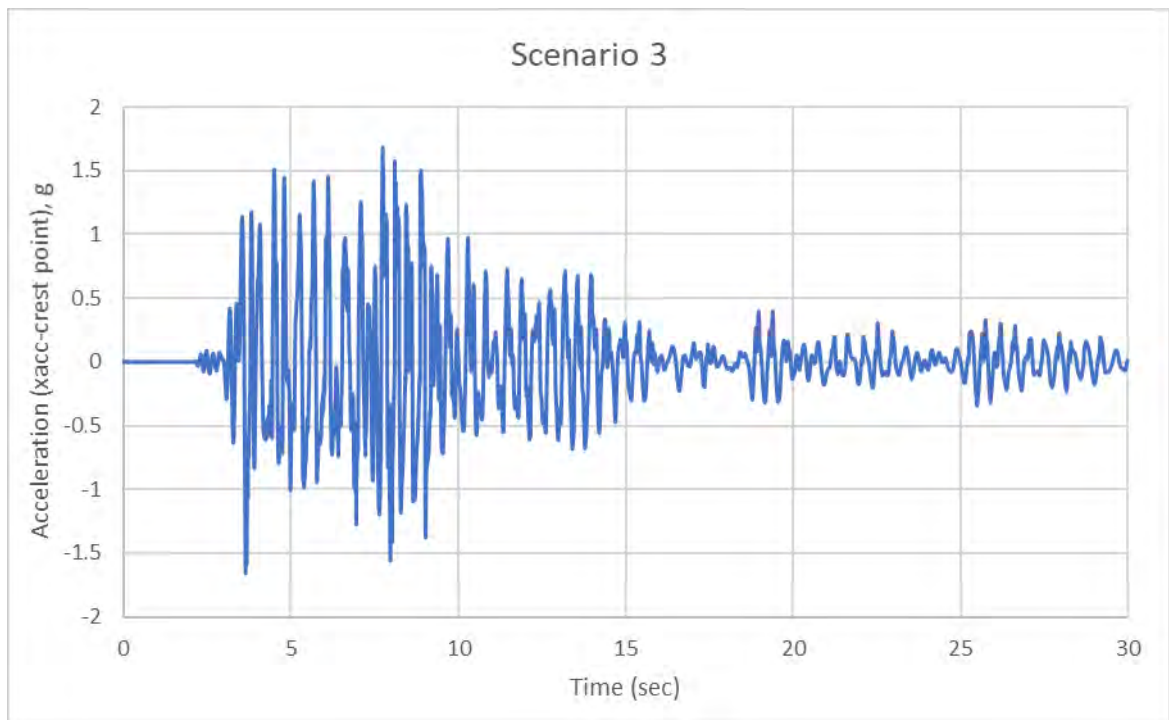
Γράφημα Παρ. Α. 6 : Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 2)



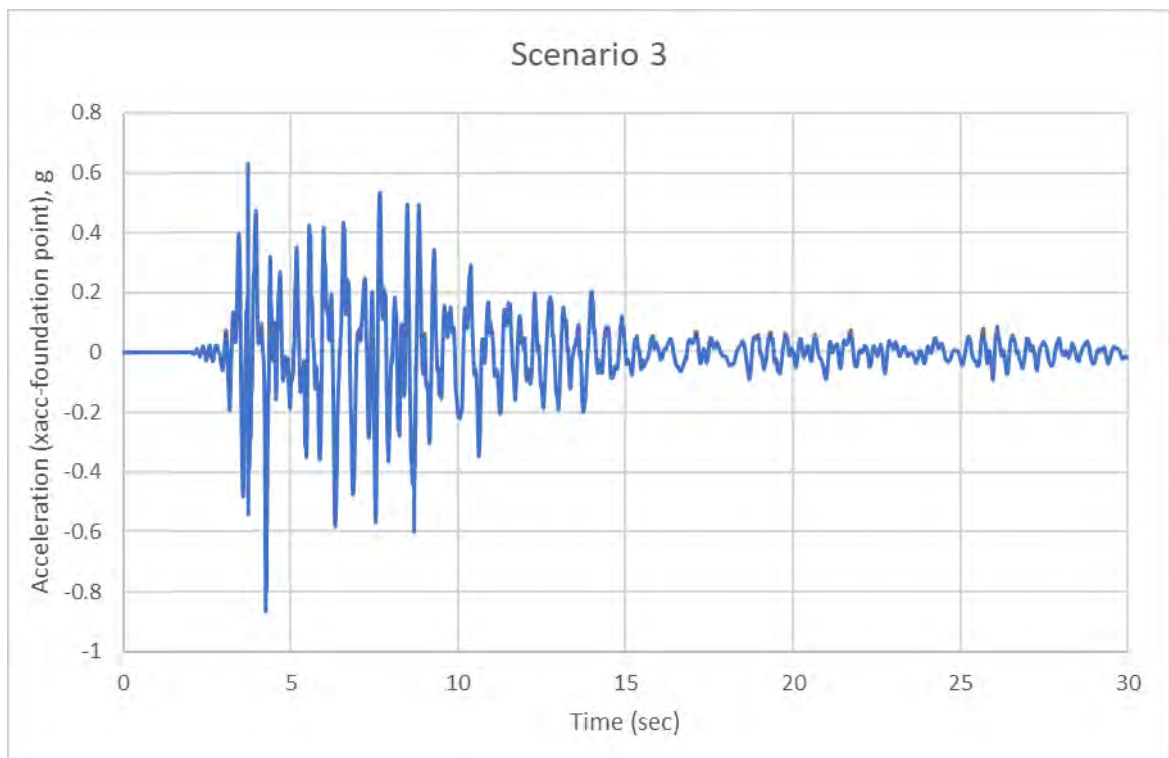
Γράφημα Παρ. Α. 7 : Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 2)



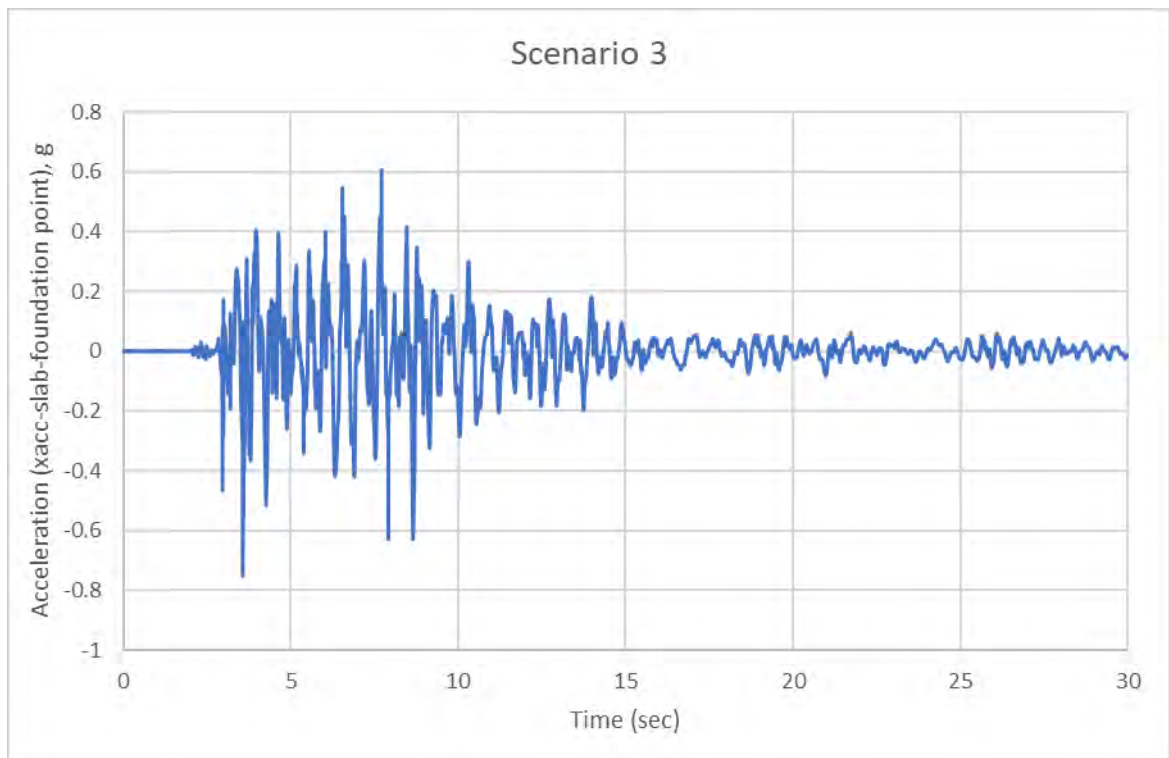
Γράφημα Παρ. Α. 8: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 2)



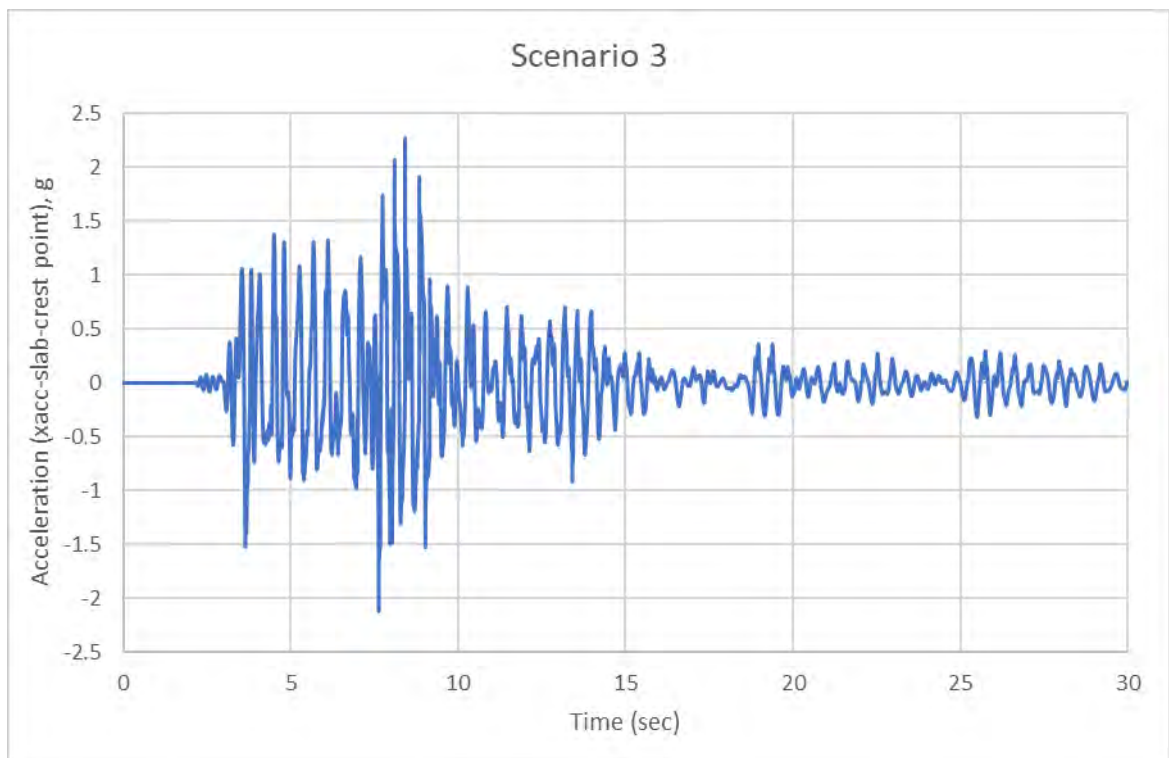
Γράφημα Παρ. Α. 9: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 3)



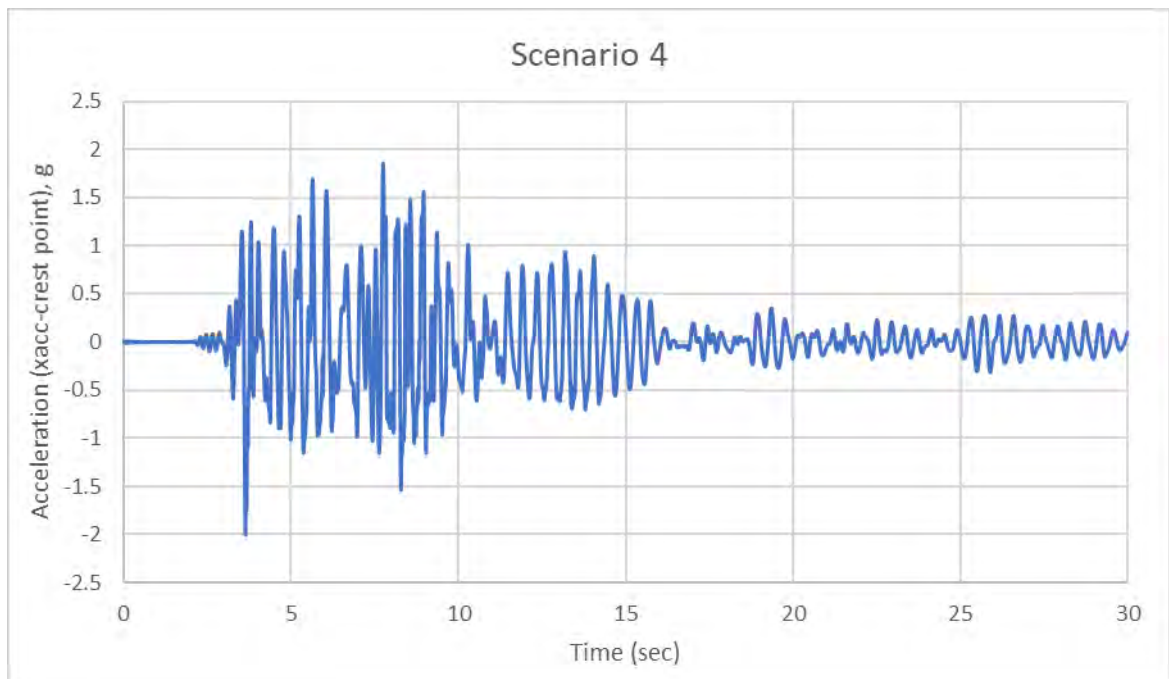
Γράφημα Παρ. Α. 10: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 3)



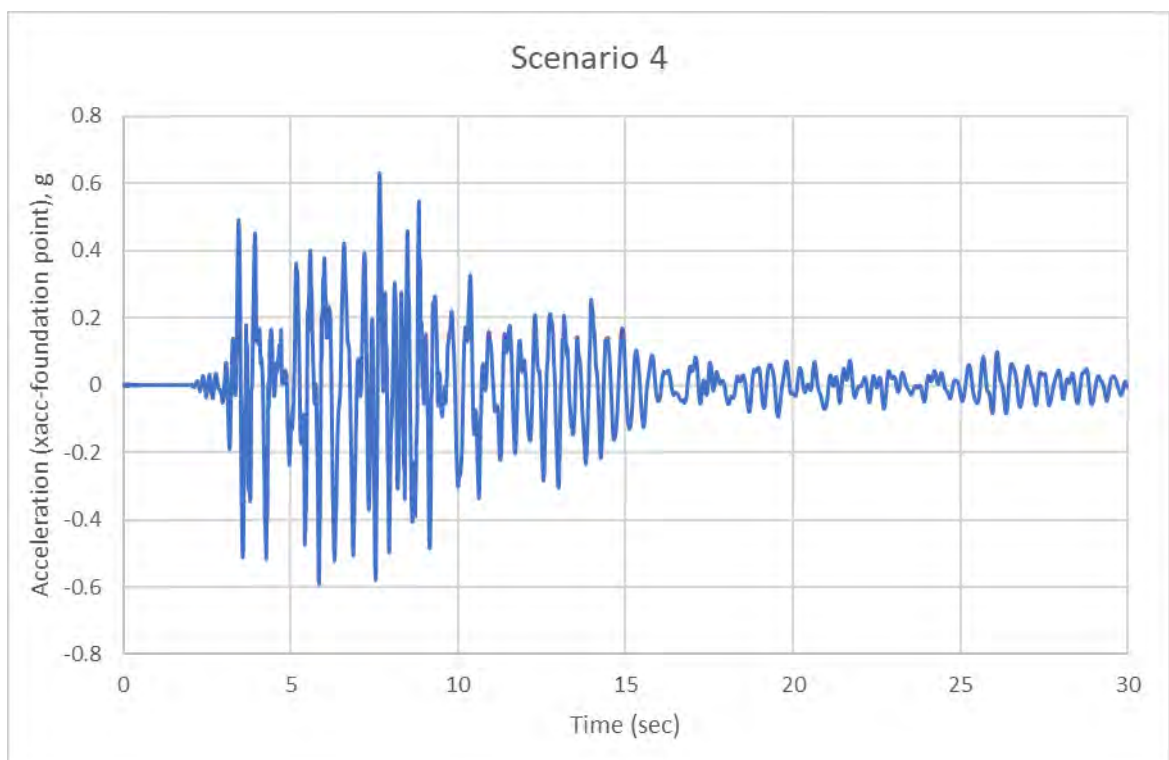
Γράφημα Παρ. Α. 11: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 3)



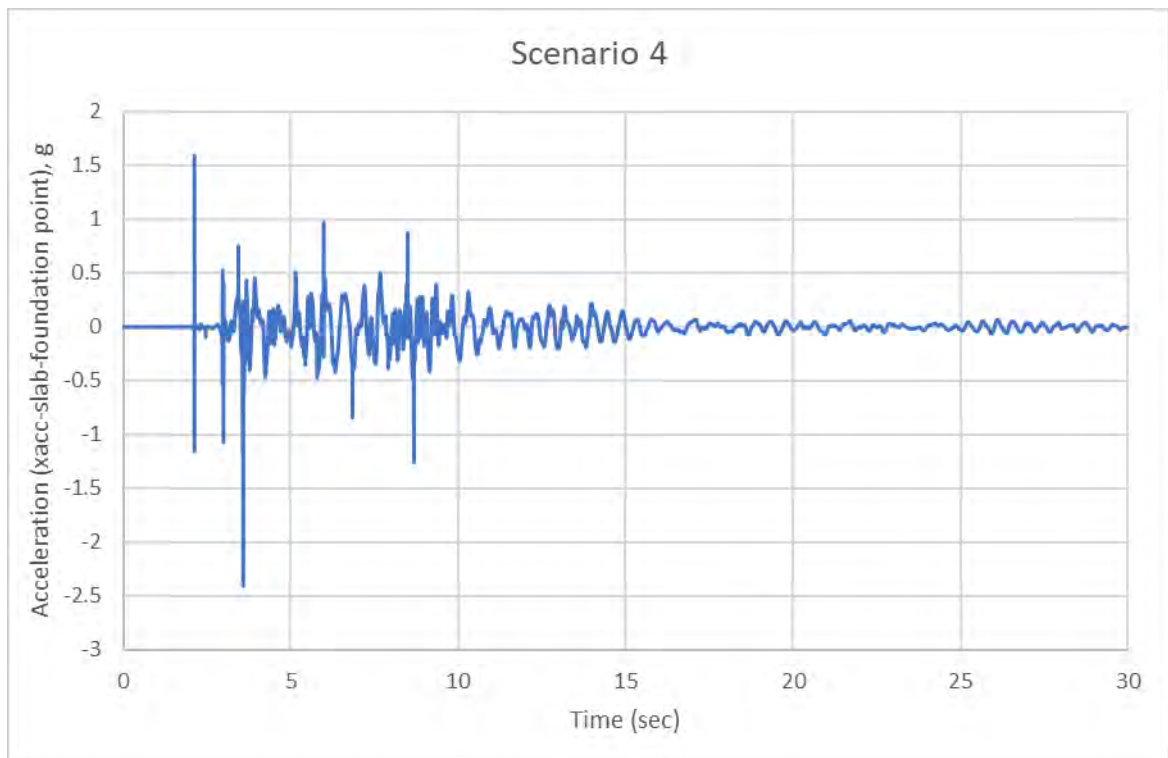
Γράφημα Παρ. Α. 12: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 3)



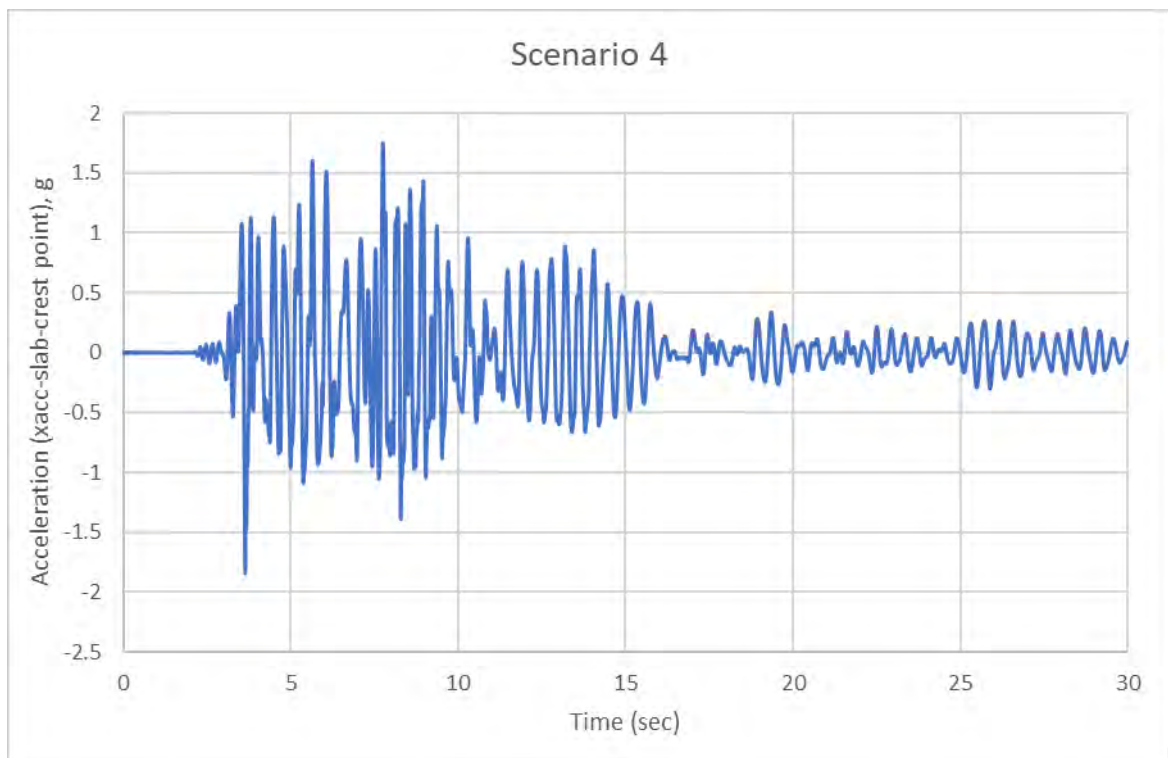
Γράφημα Παρ. Α. 13: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 4)



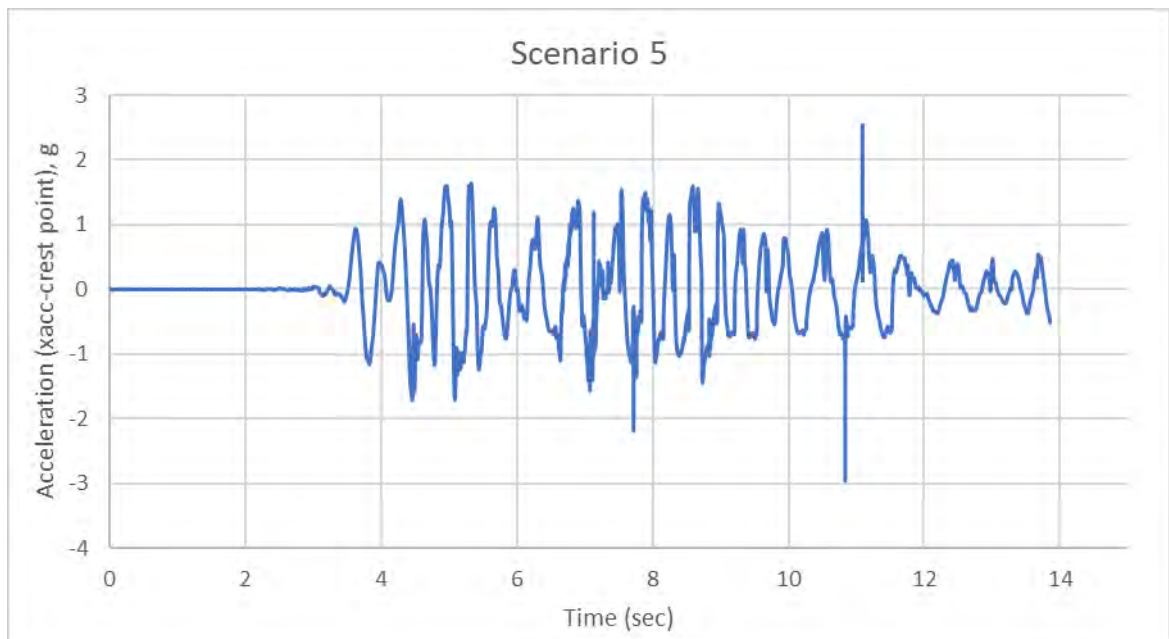
Γράφημα Παρ. Α. 14: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 4)



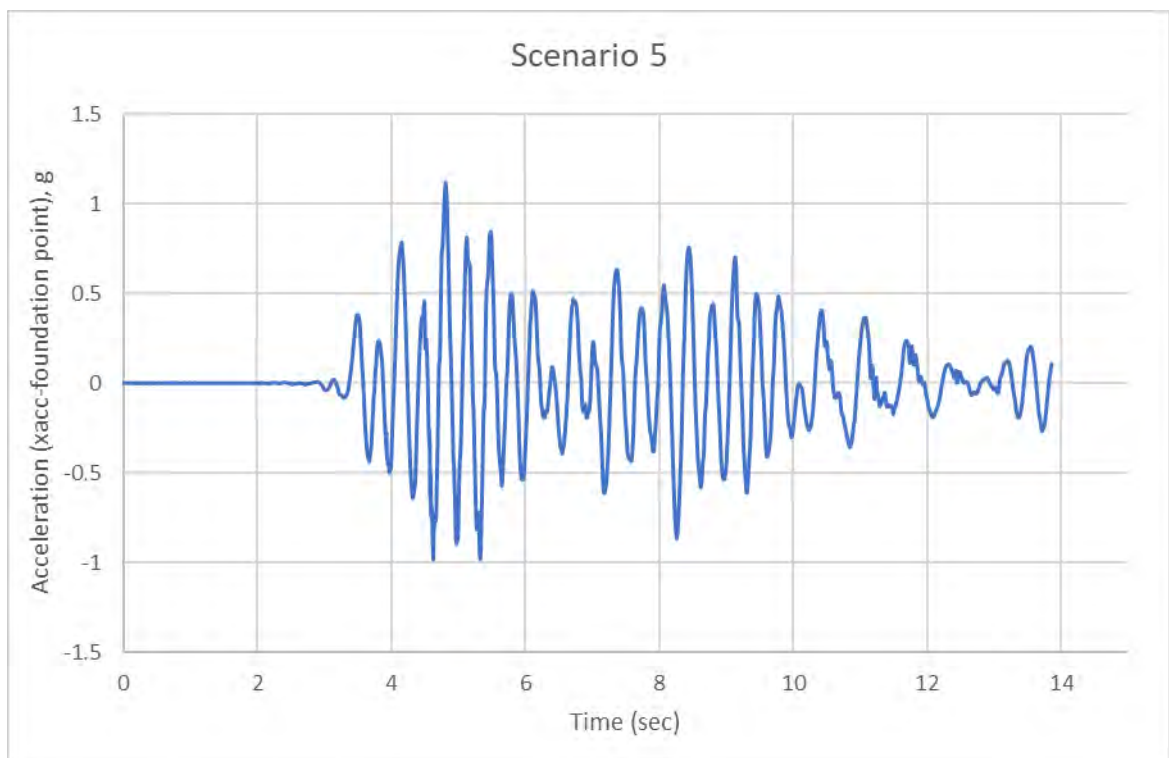
Γράφημα Παρ. Α. 15: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 4)



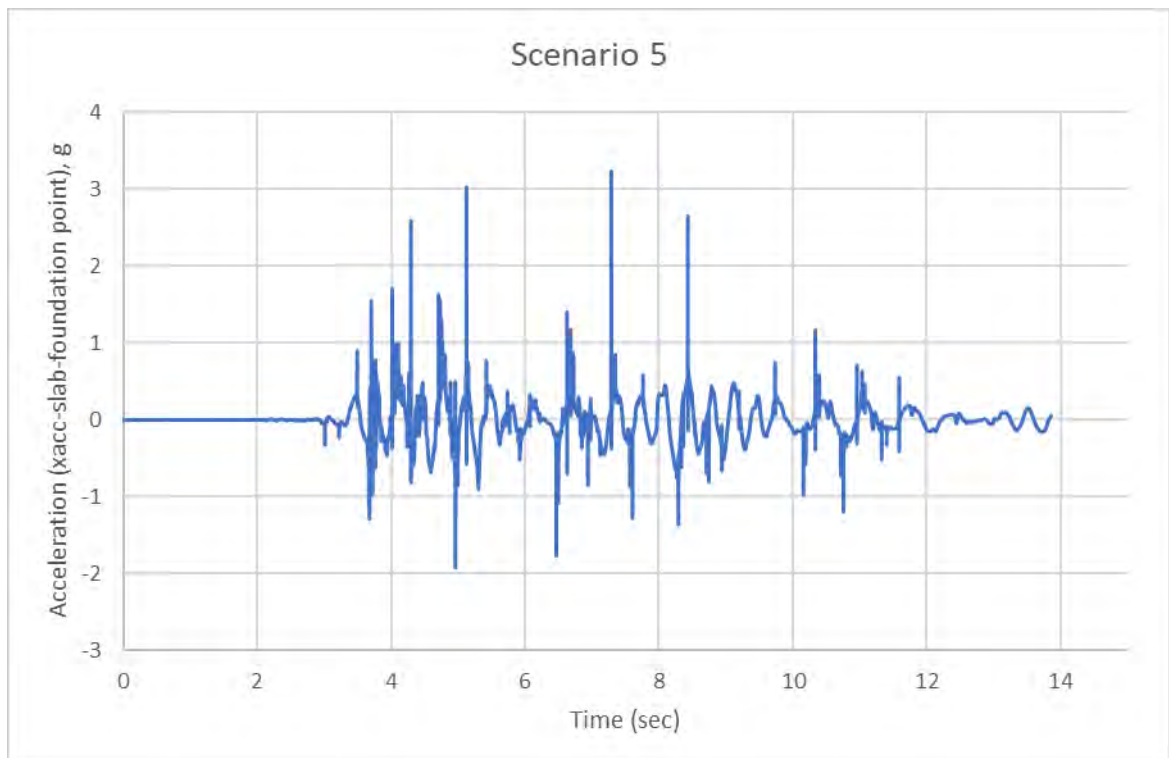
Γράφημα Παρ. Α. 16: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 4)



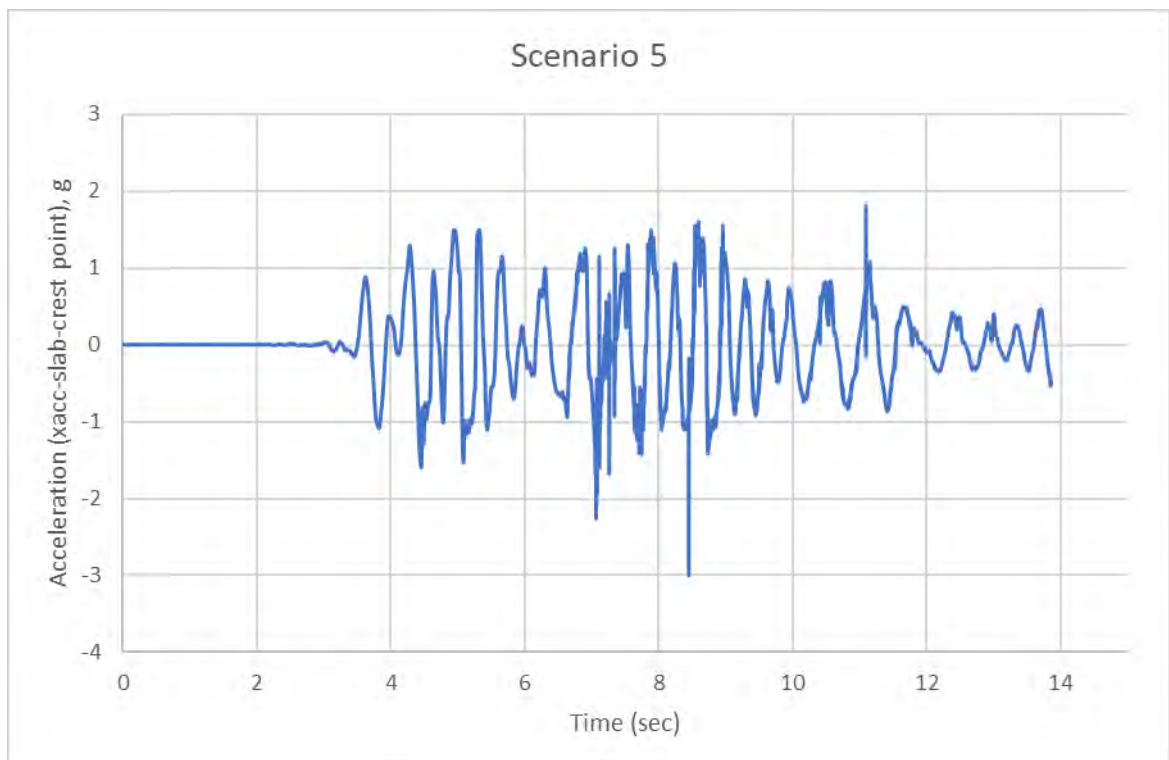
Γράφημα Παρ. Α. 17: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 5)



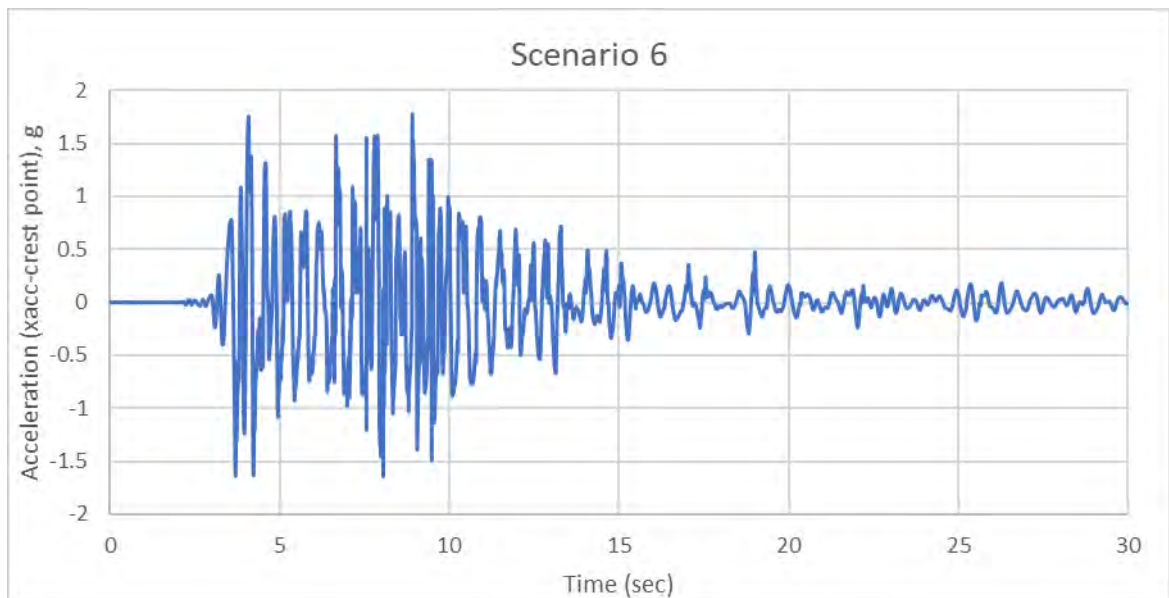
Γράφημα Παρ. Α. 18: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 5)



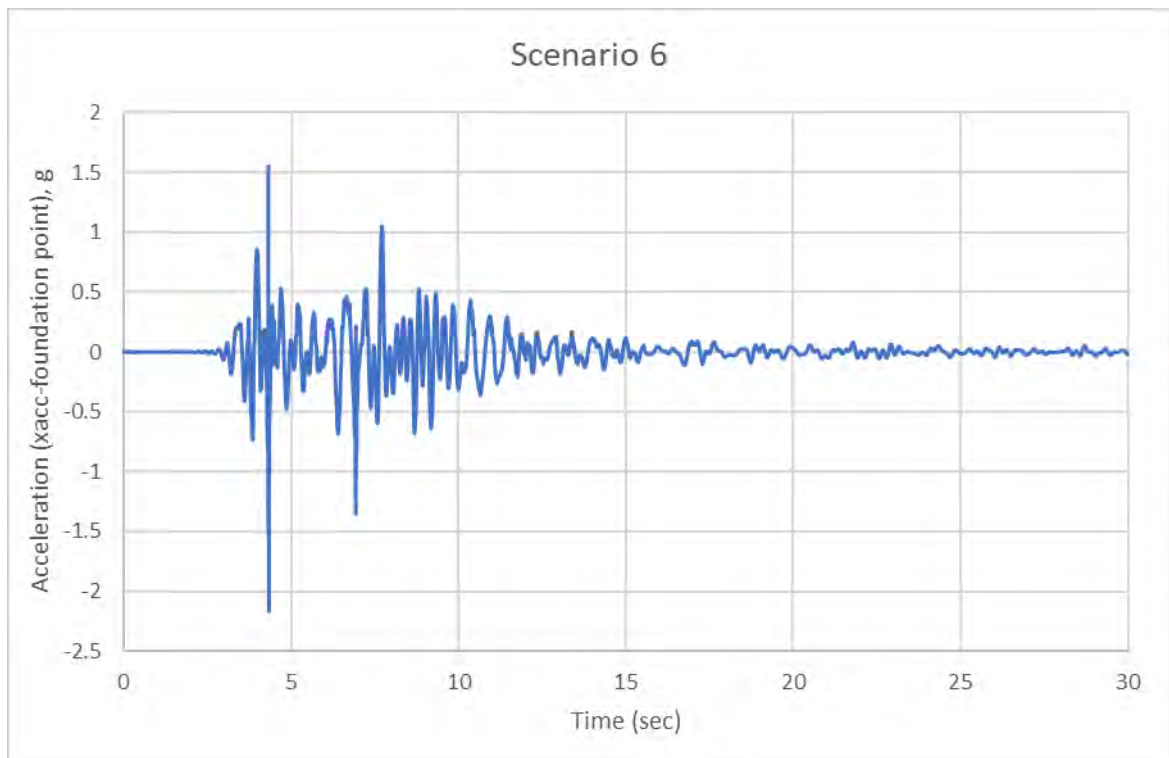
Γράφημα Παρ. Α. 19: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 5)



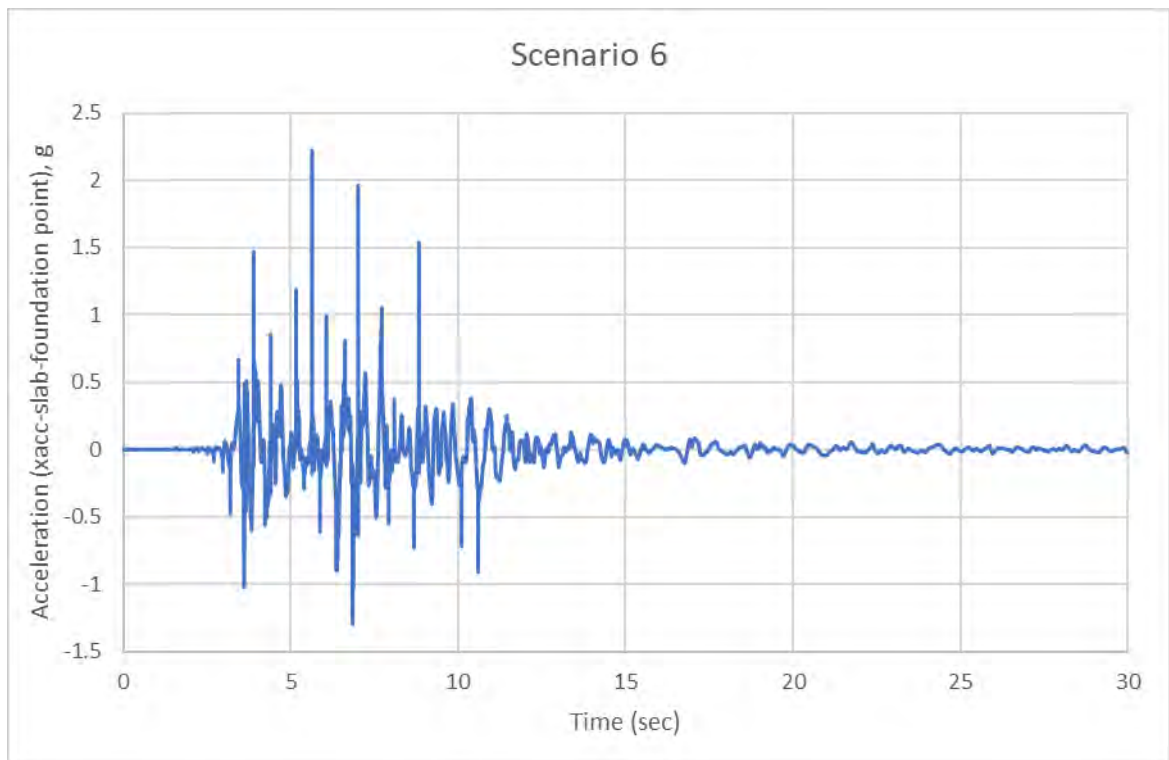
Γράφημα Παρ. Α. 20: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 5)



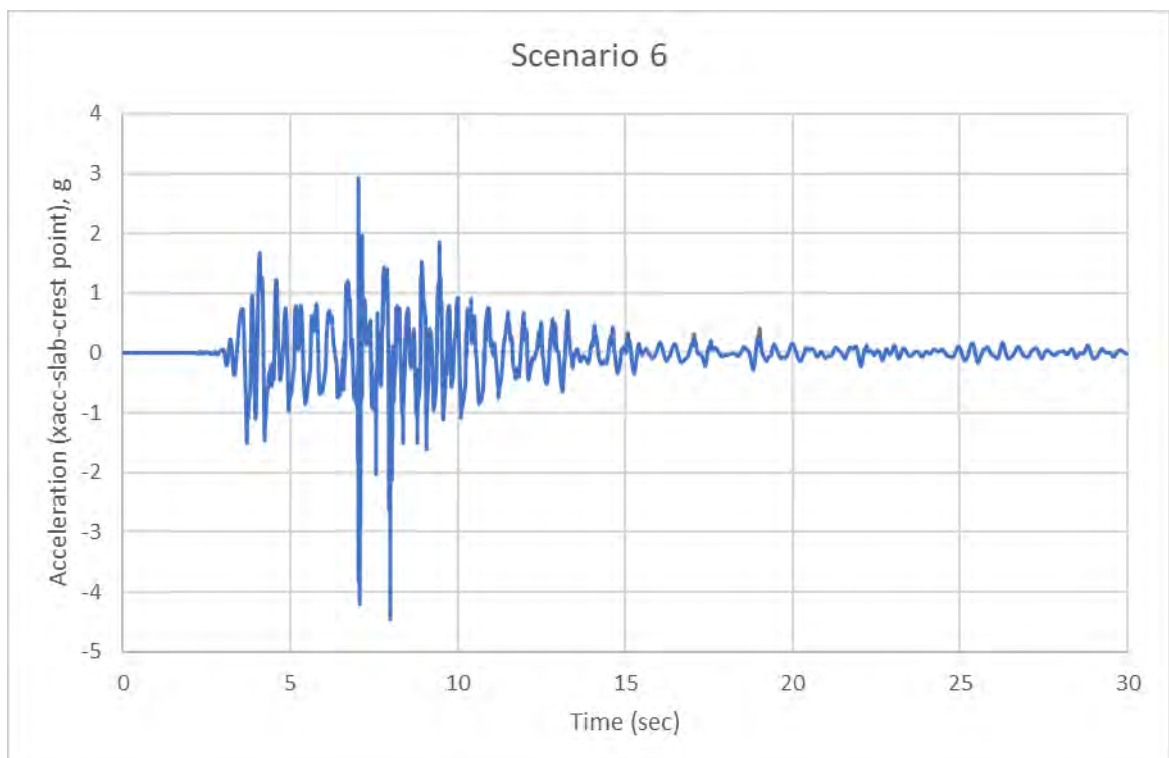
Γράφημα Παρ. Α. 21: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 6)



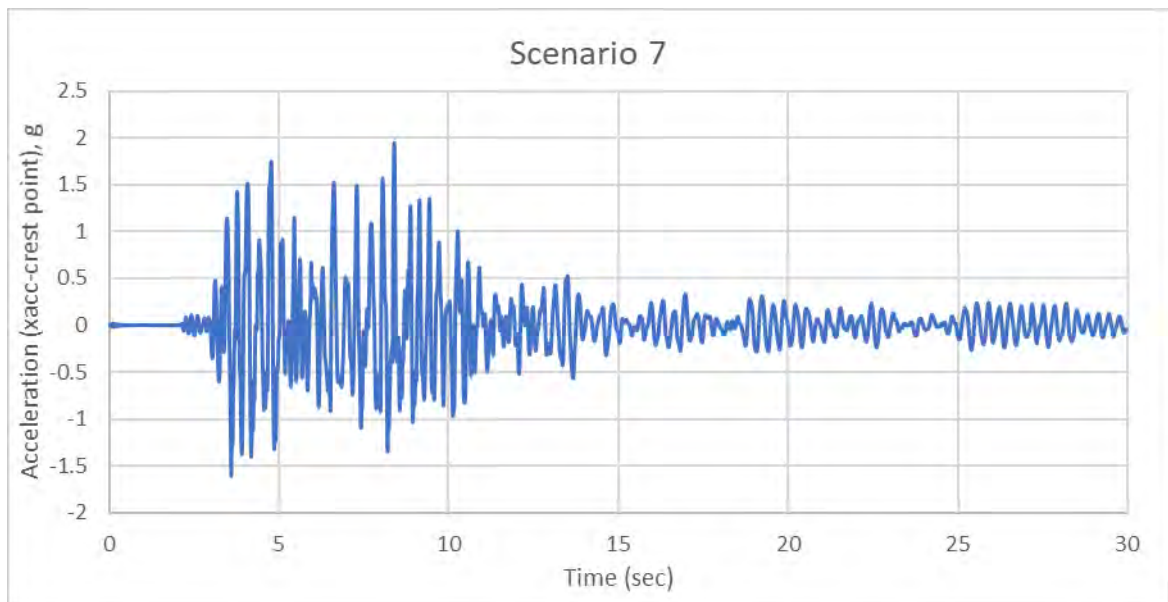
Γράφημα Παρ. Α. 22: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 6)



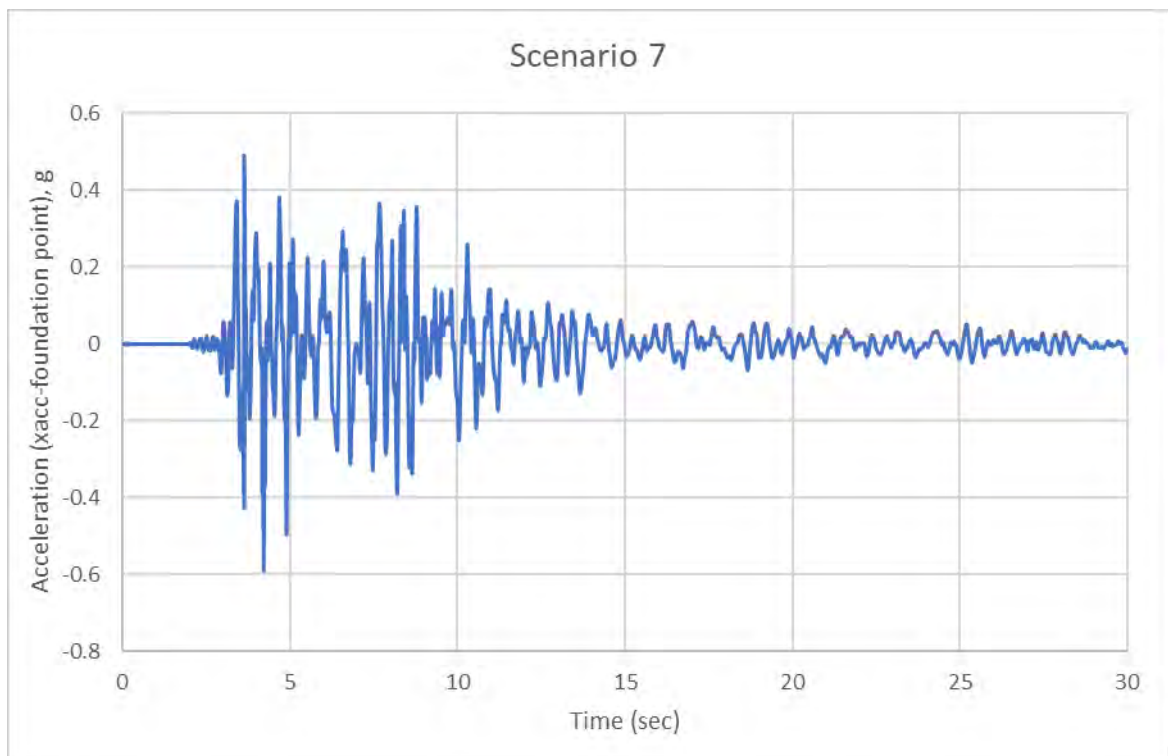
Γράφημα Παρ. Α. 23: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 6)



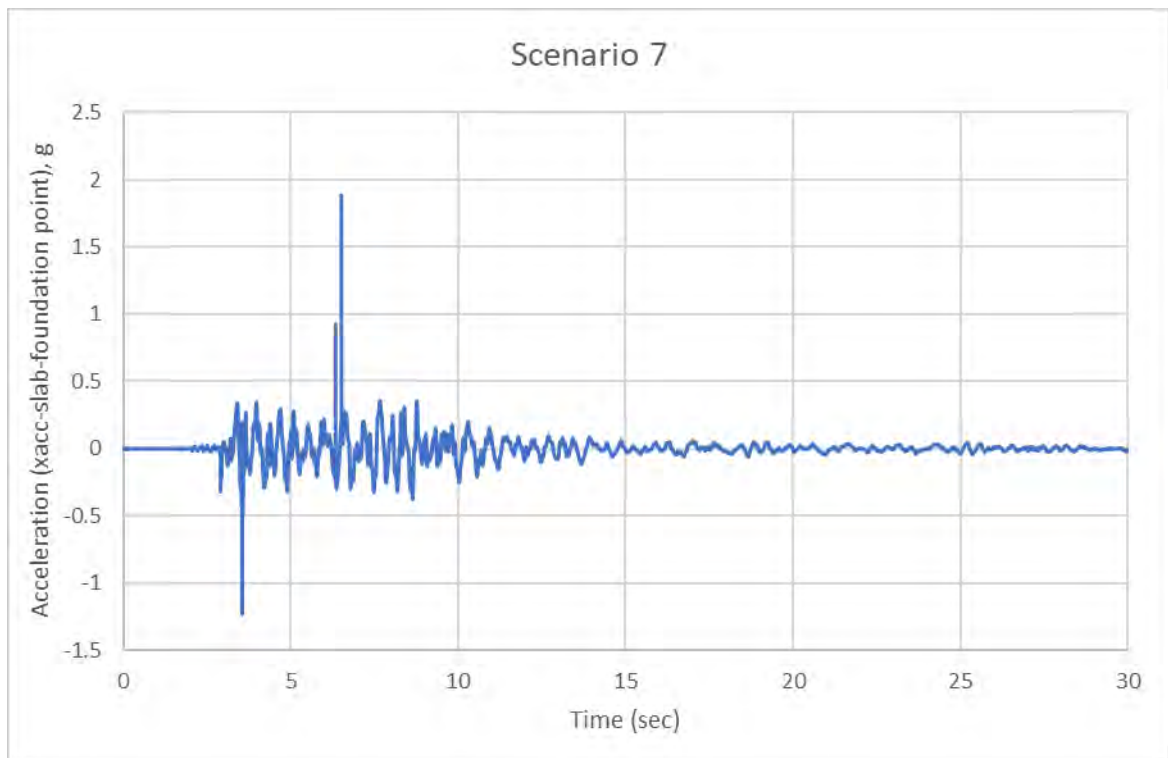
Γράφημα Παρ. Α. 24: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 6)



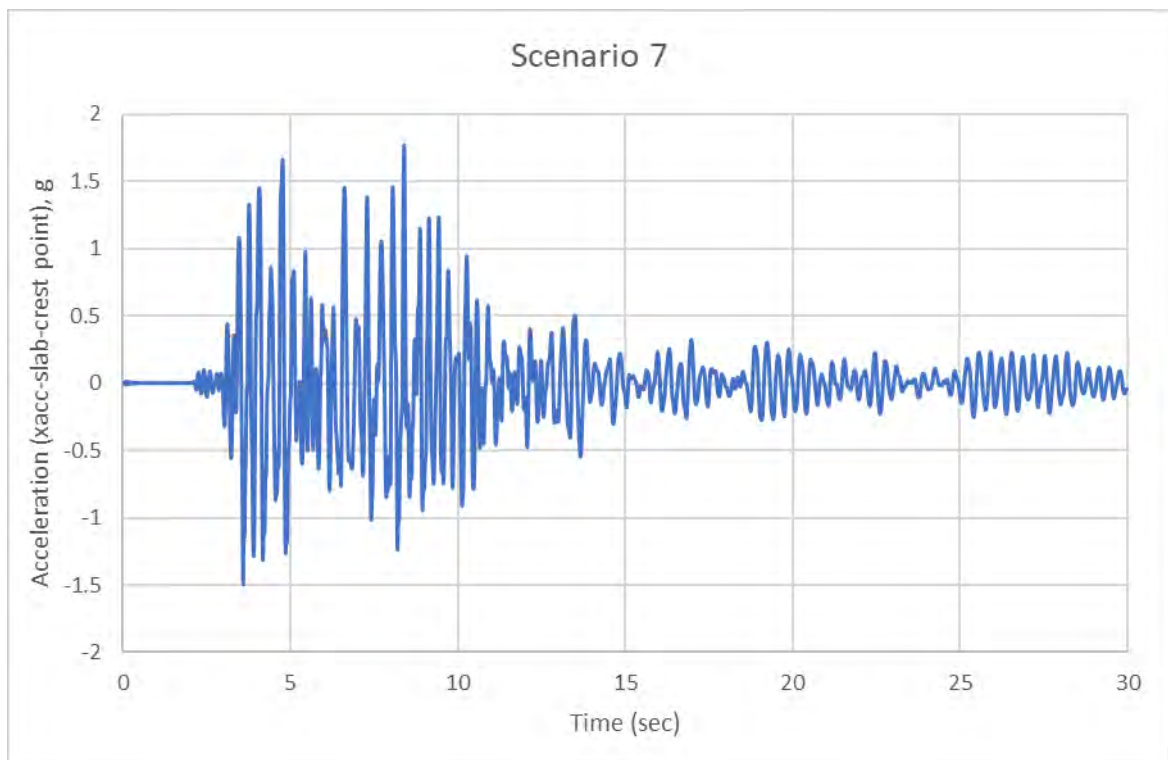
Γράφημα Παρ. Α. 25 : Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 7)



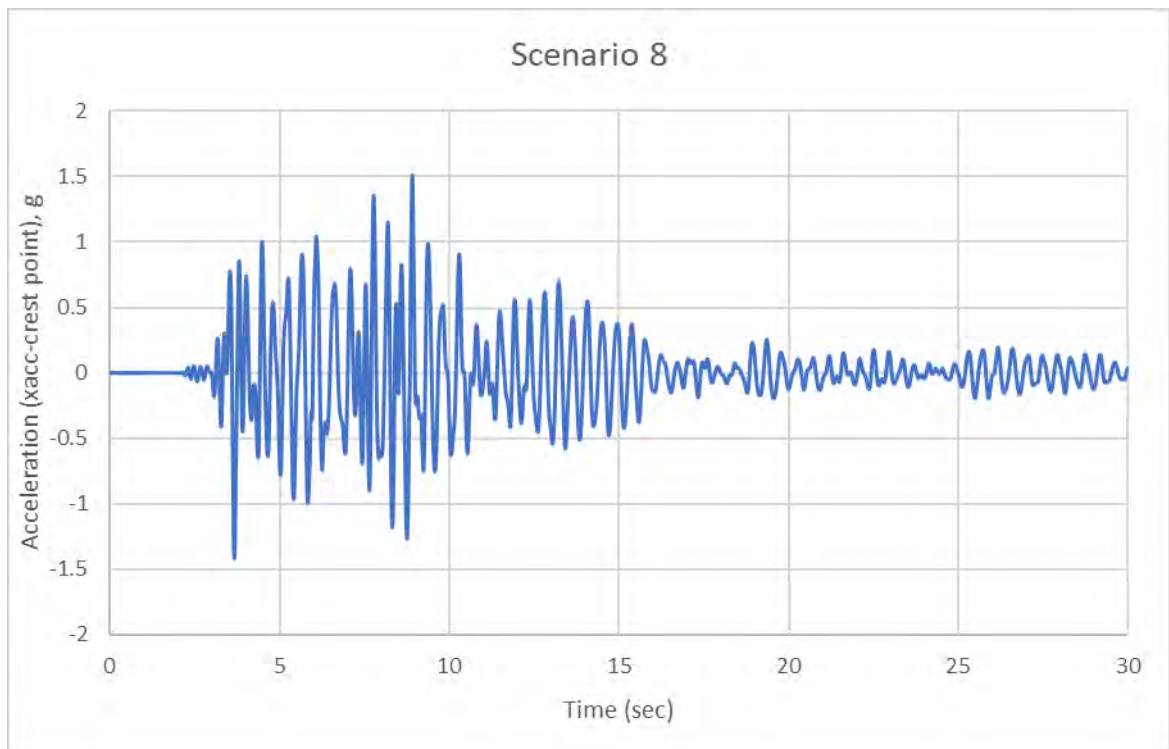
Γράφημα Παρ. Α. 26: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 7)



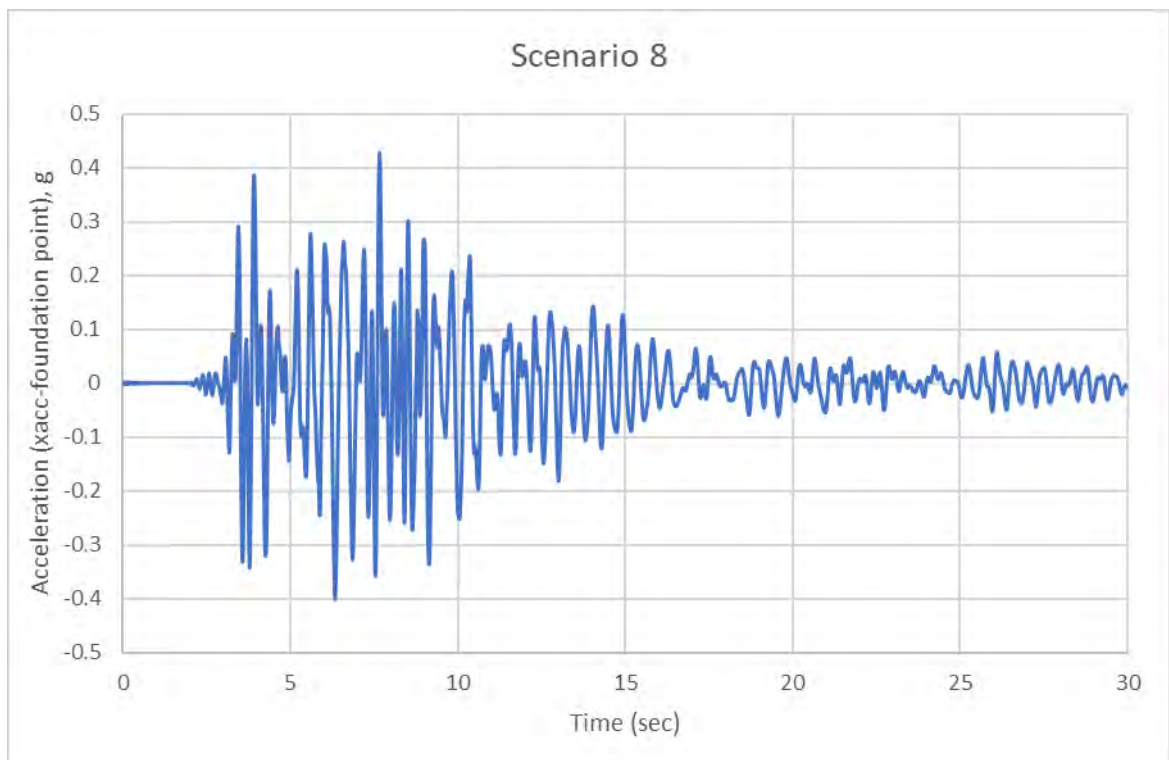
Γράφημα Παρ. Α. 27: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 7)



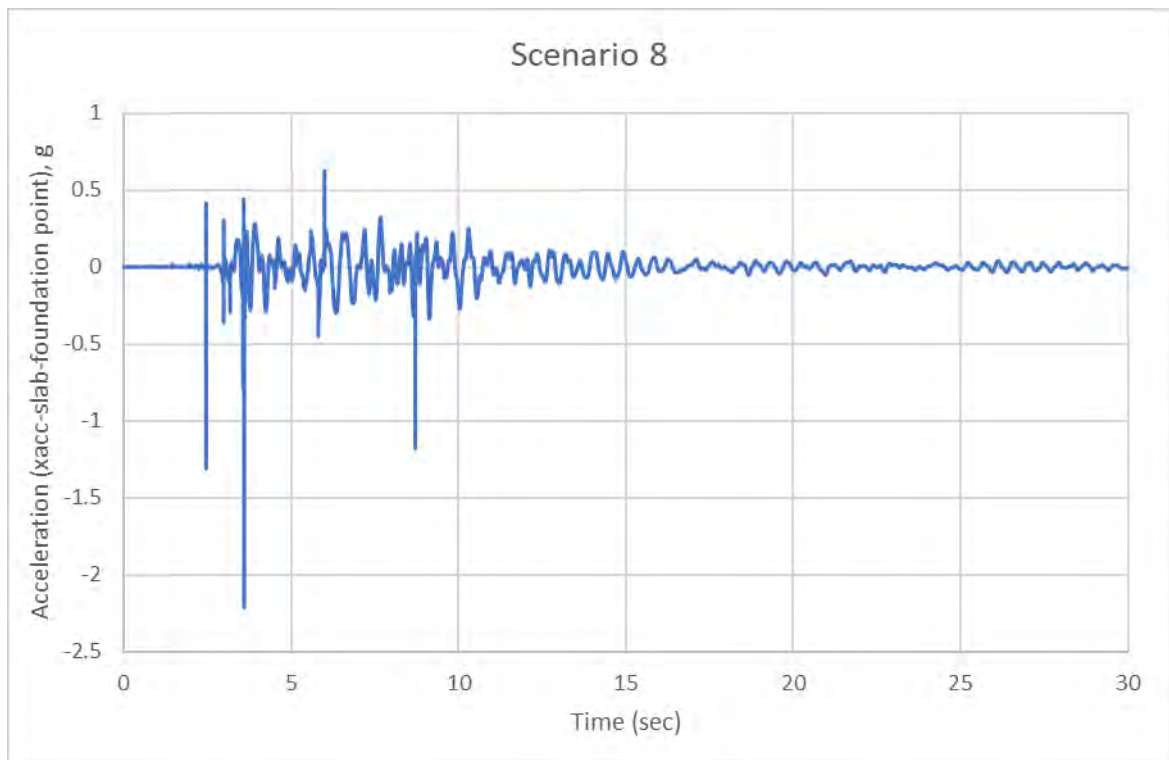
Γράφημα Παρ. Α. 28: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 7)



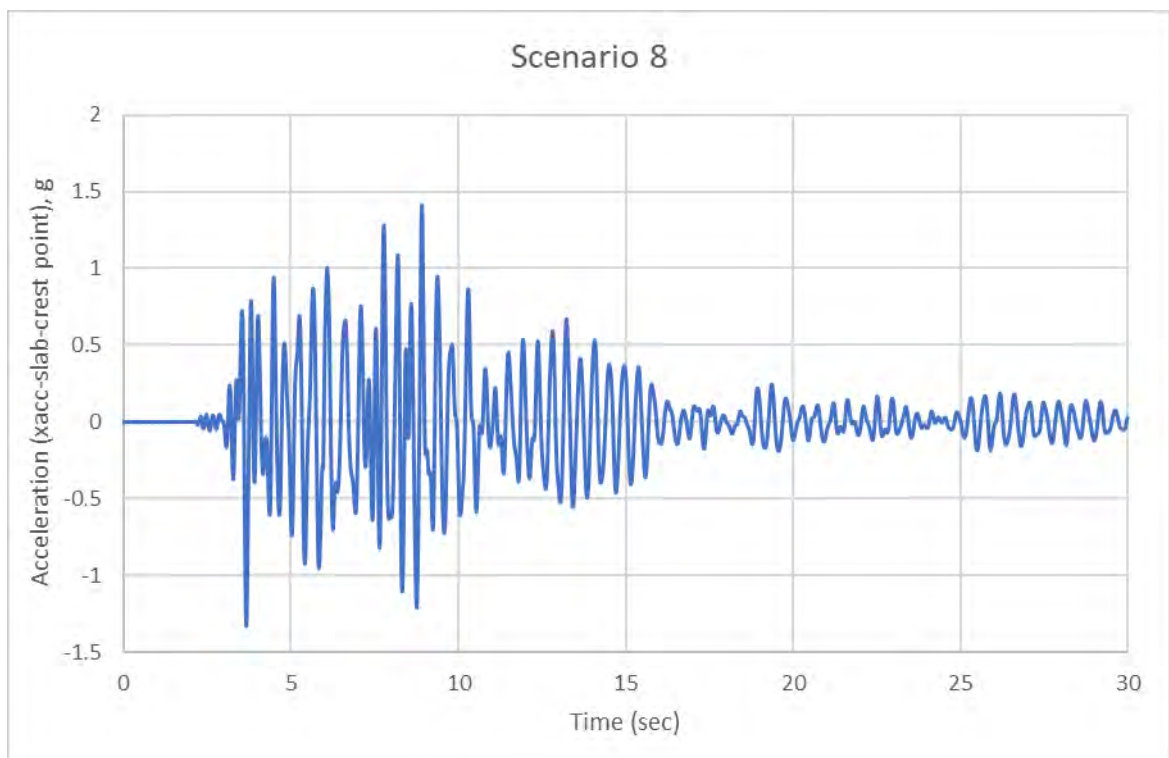
Γράφημα Παρ. Α. 29: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 8)



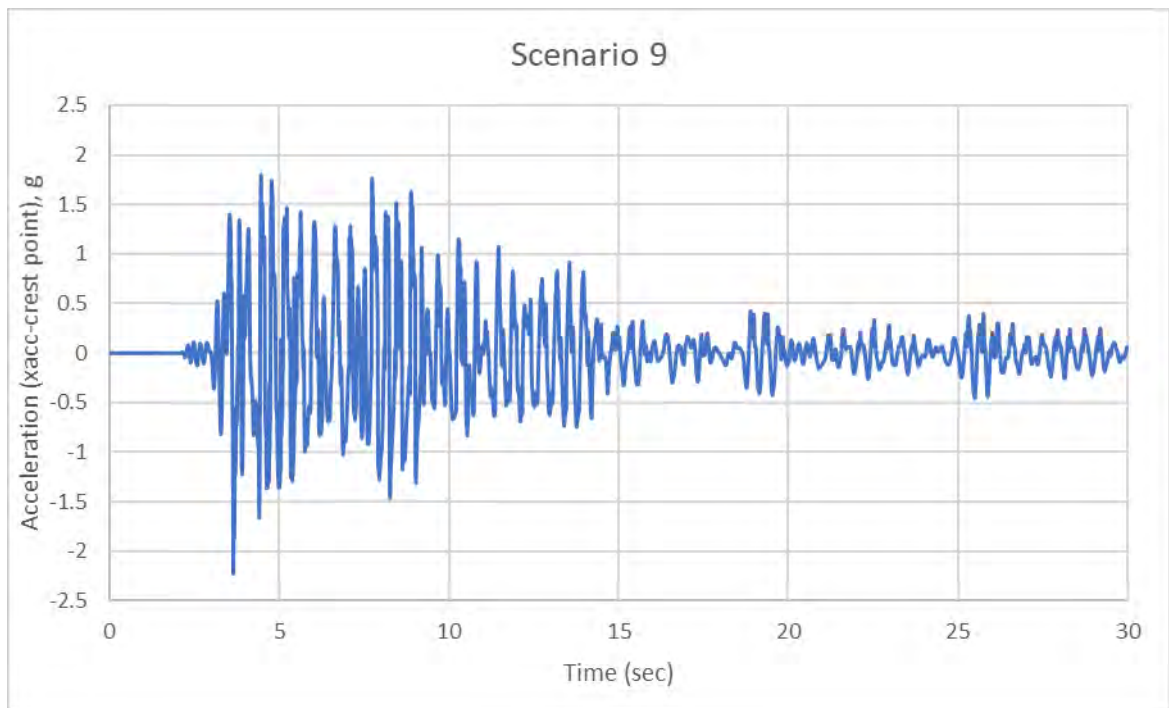
Γράφημα Παρ. Α. 30: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 8)



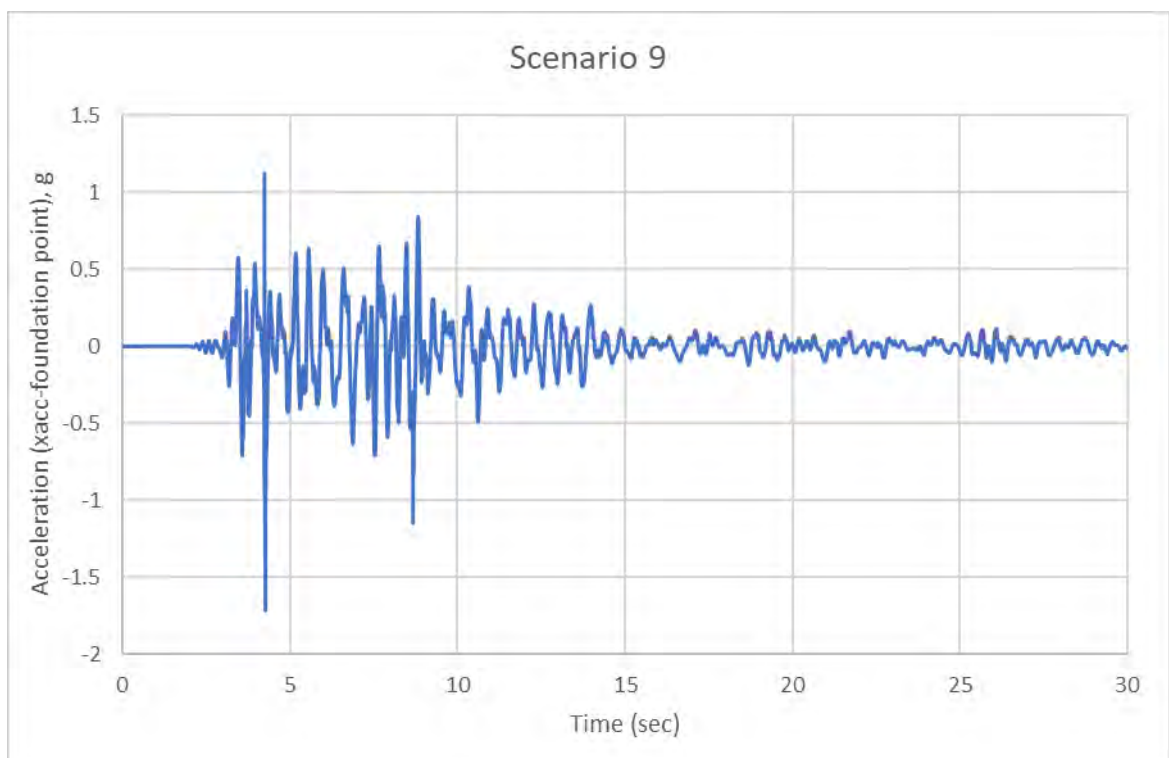
Γράφημα Παρ. Α. 31: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 8)



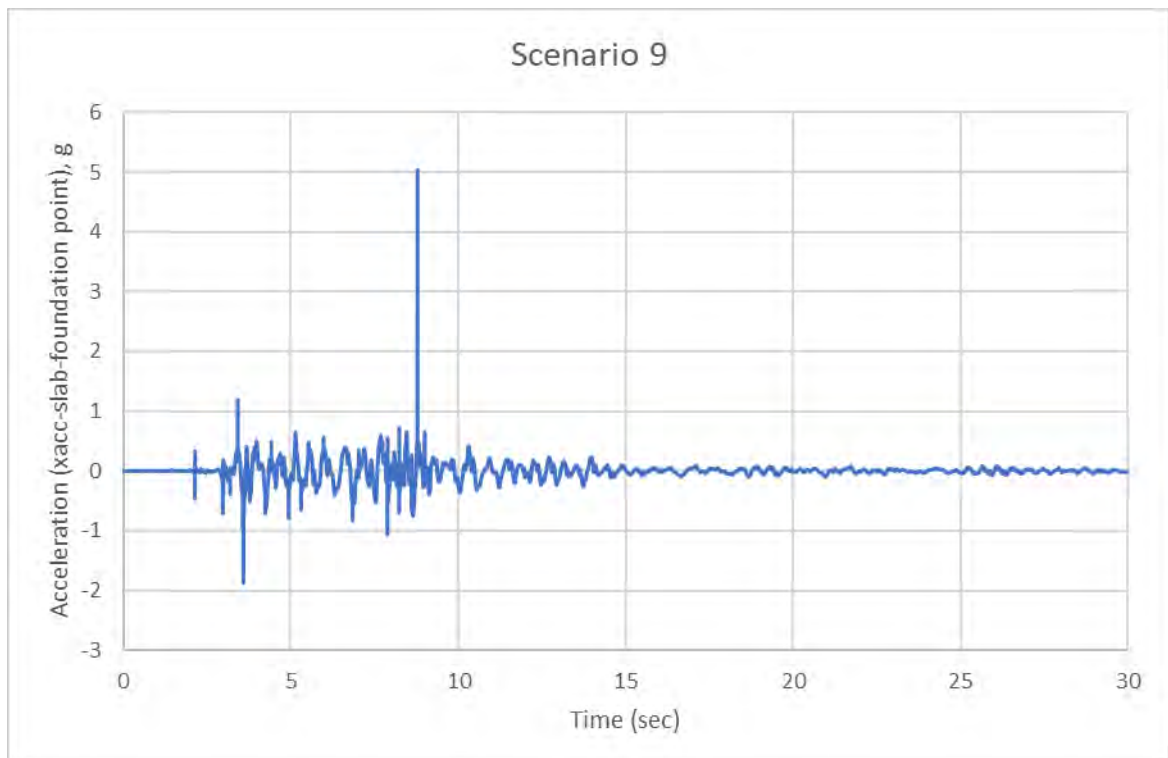
Γράφημα Παρ. Α. 32: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 8)



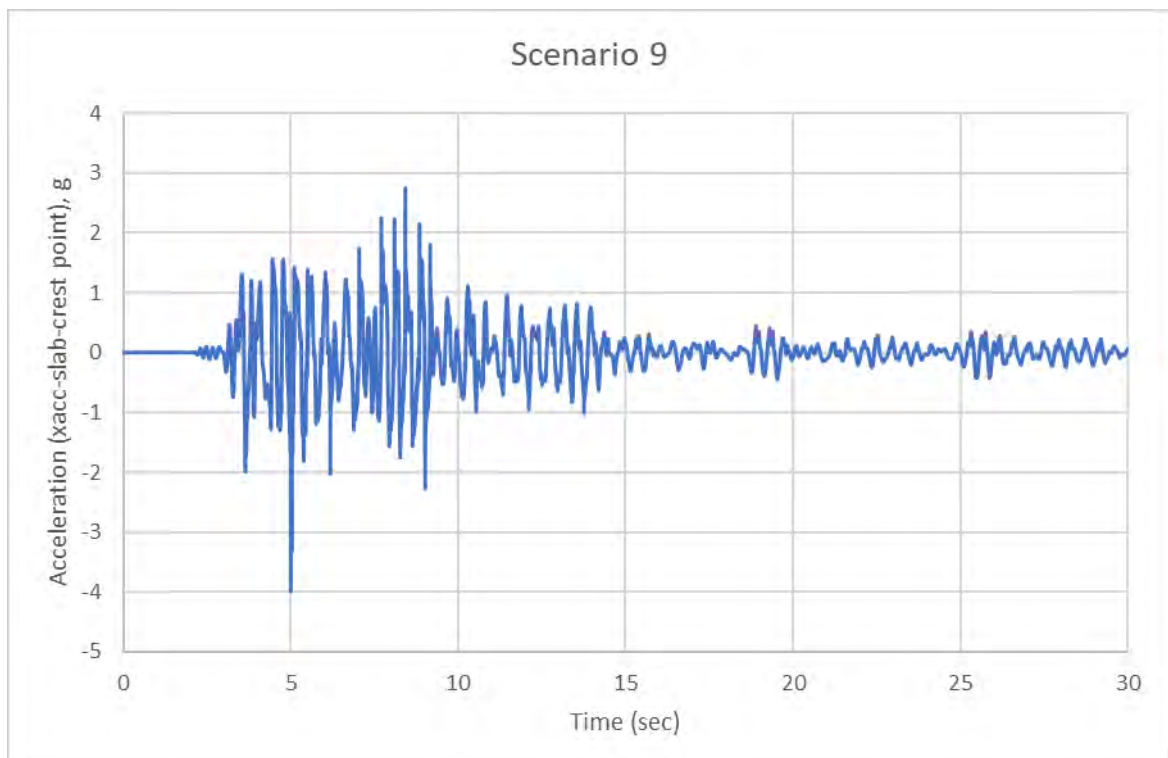
Γράφημα Παρ. Α. 33: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 9)



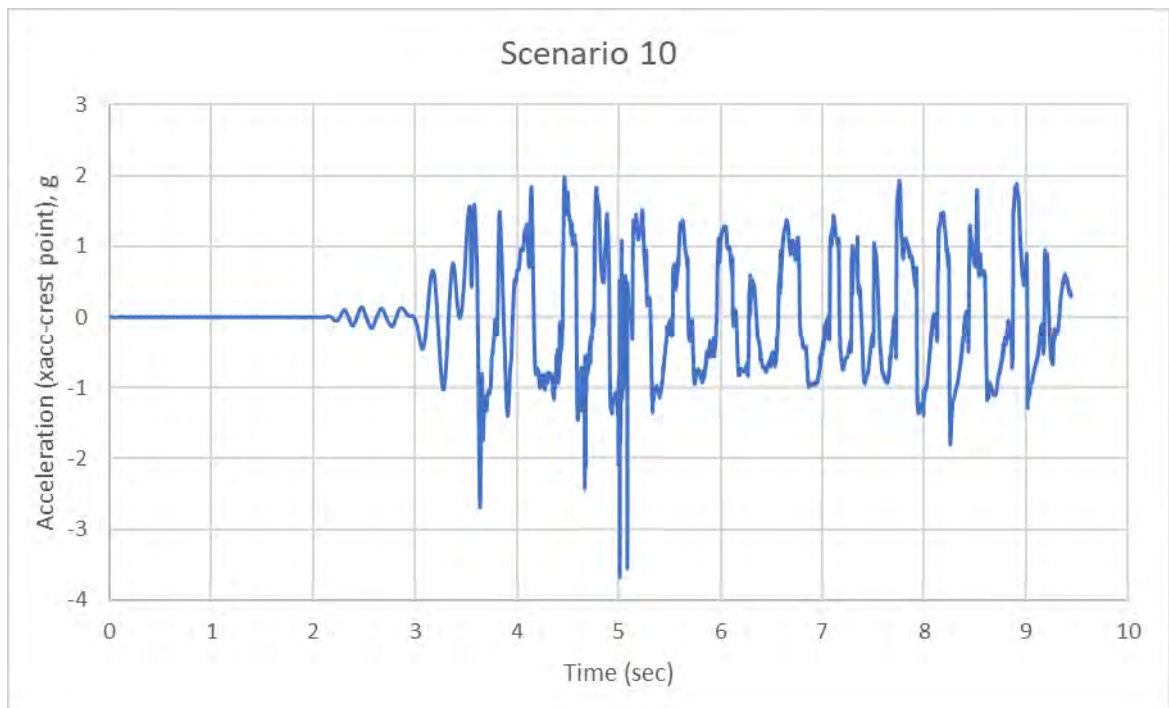
Γράφημα Παρ. Α. 34: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 9)



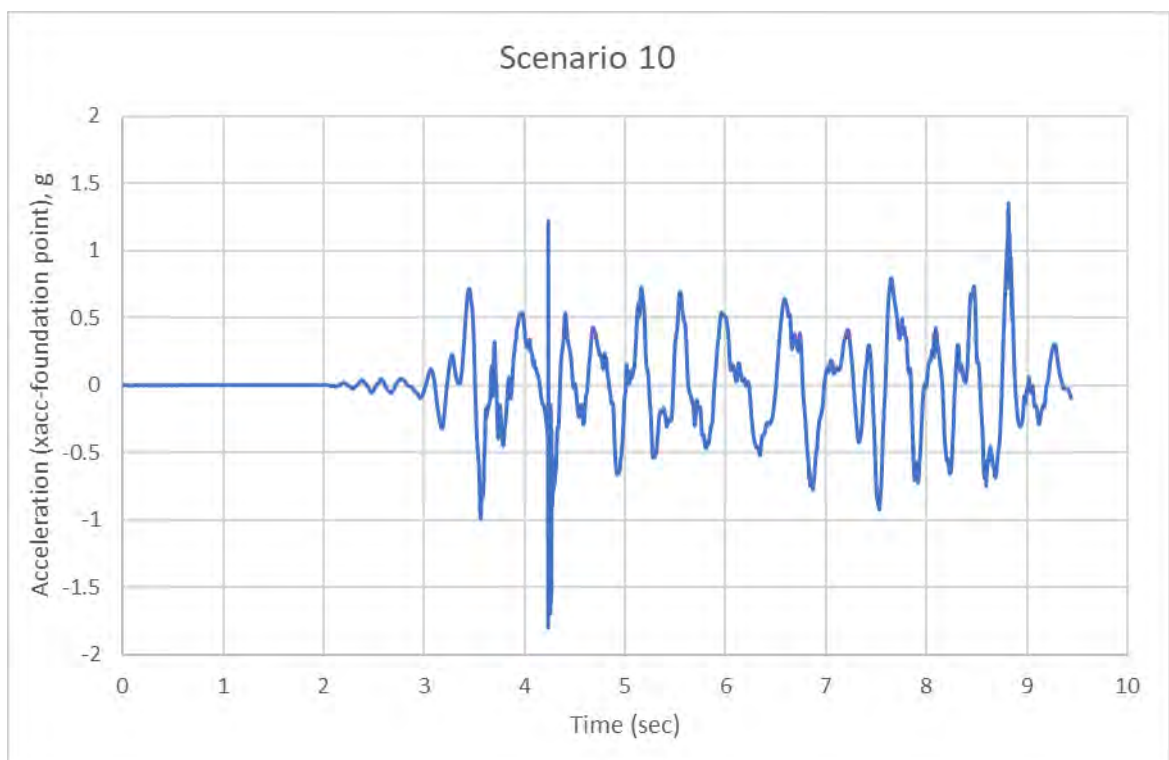
Γράφημα Παρ. Α. 35: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 9)



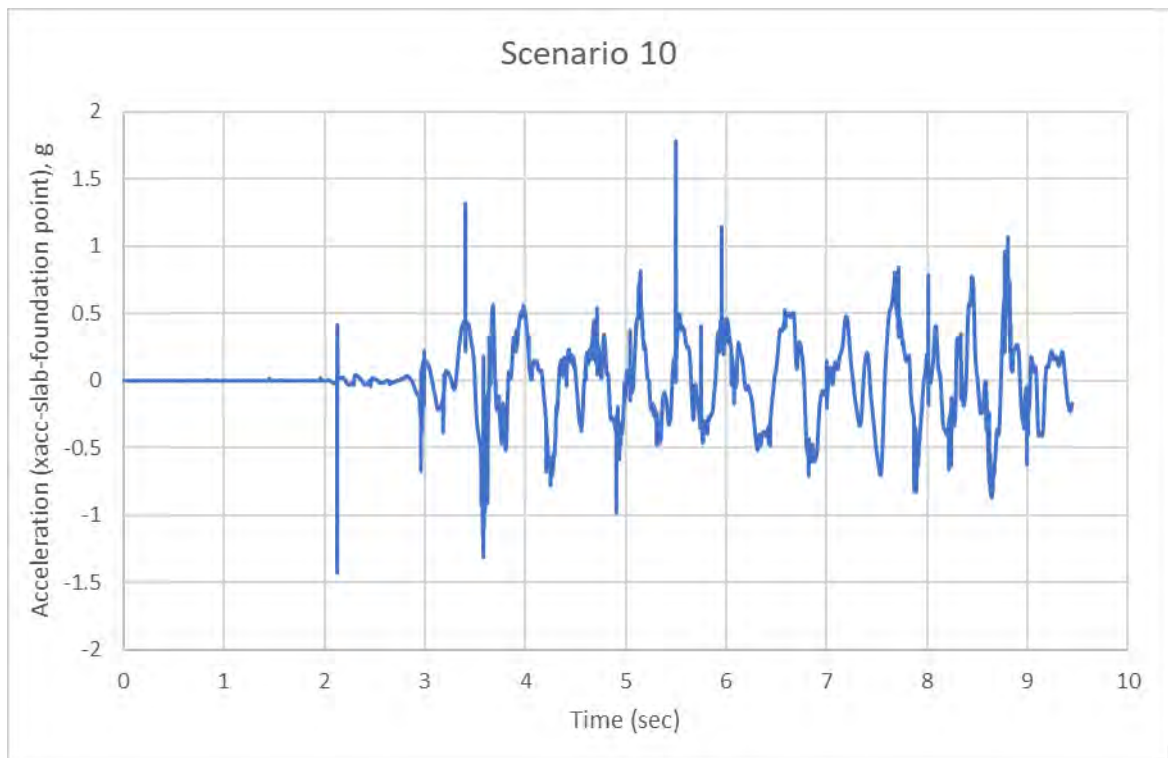
Γράφημα Παρ. Α. 36: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 9)



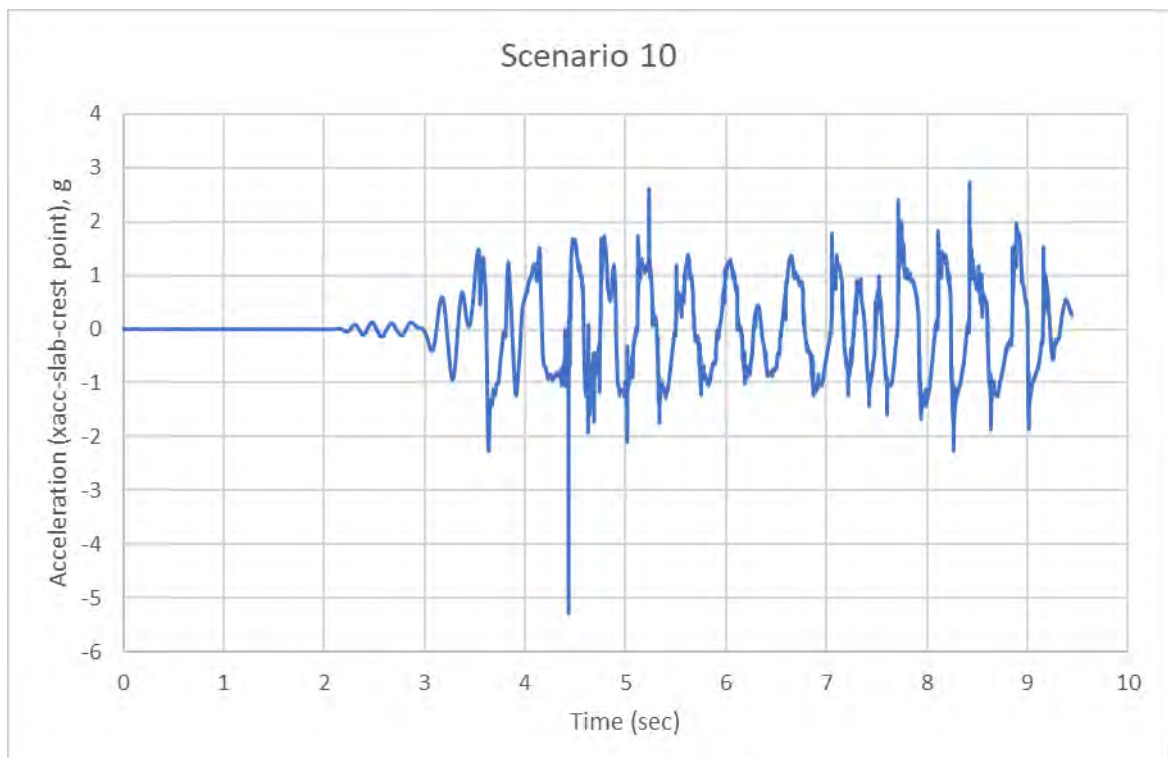
Γράφημα Παρ. Α. 37: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 10)



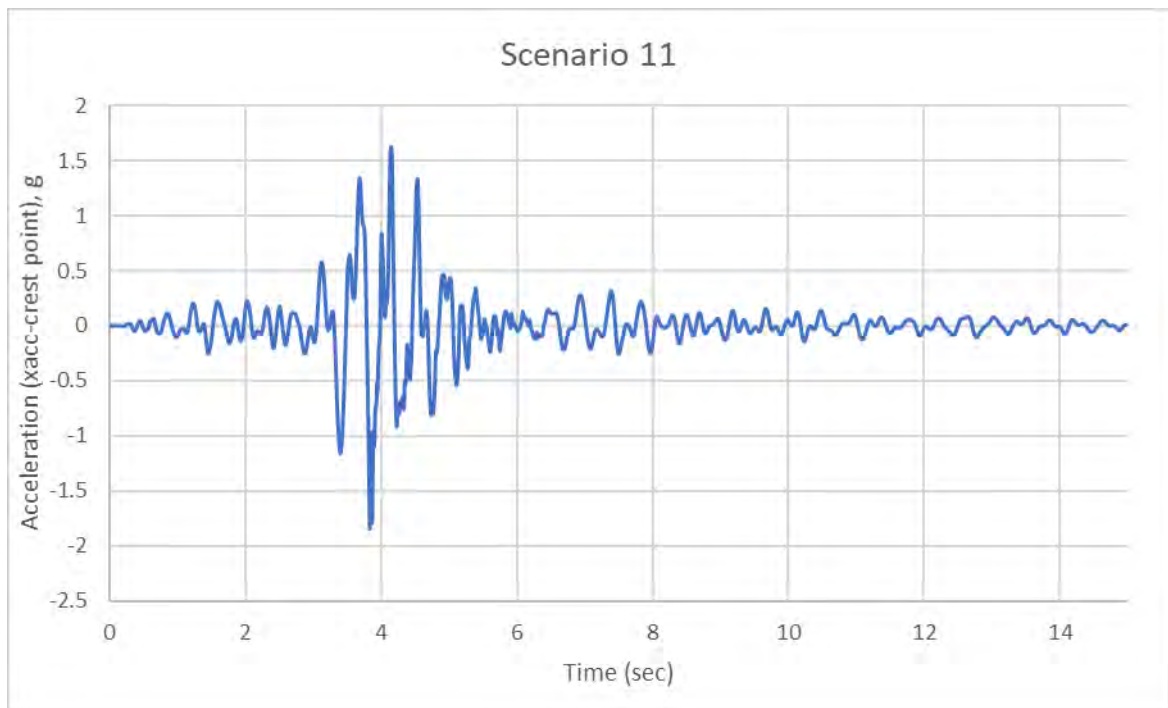
Γράφημα Παρ. Α. 38: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 10)



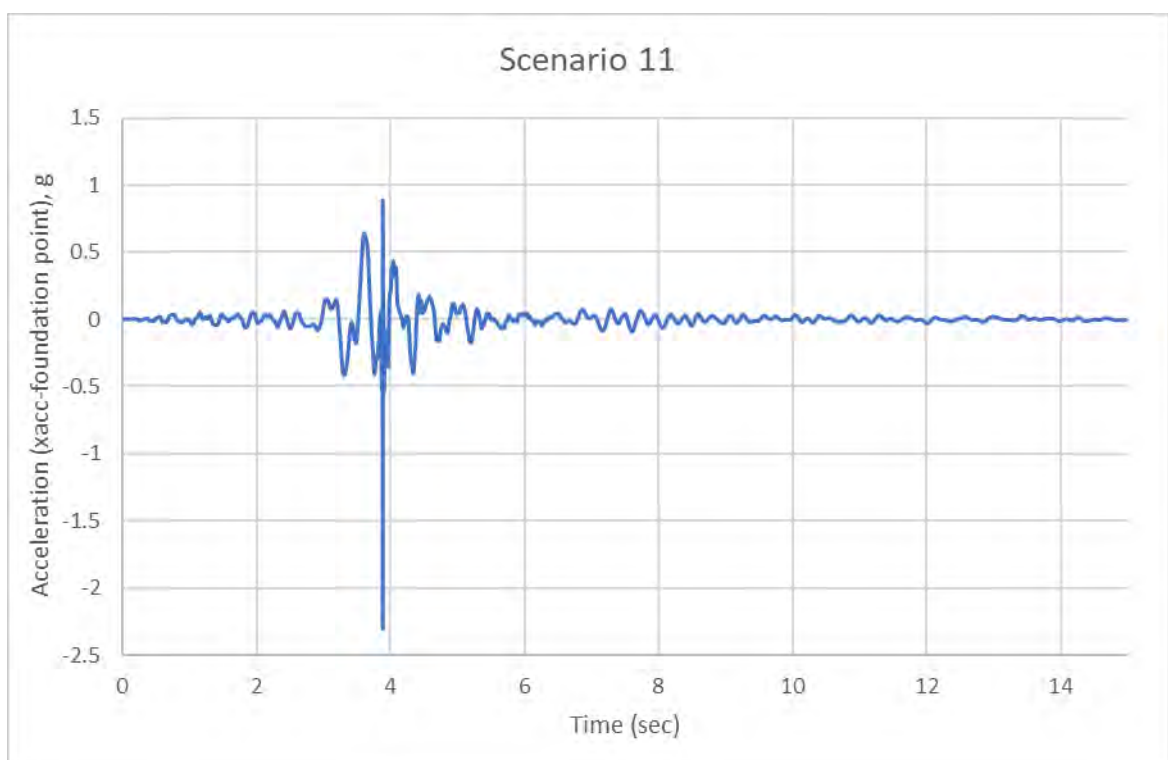
Γράφημα Παρ. Α. 39: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 10)



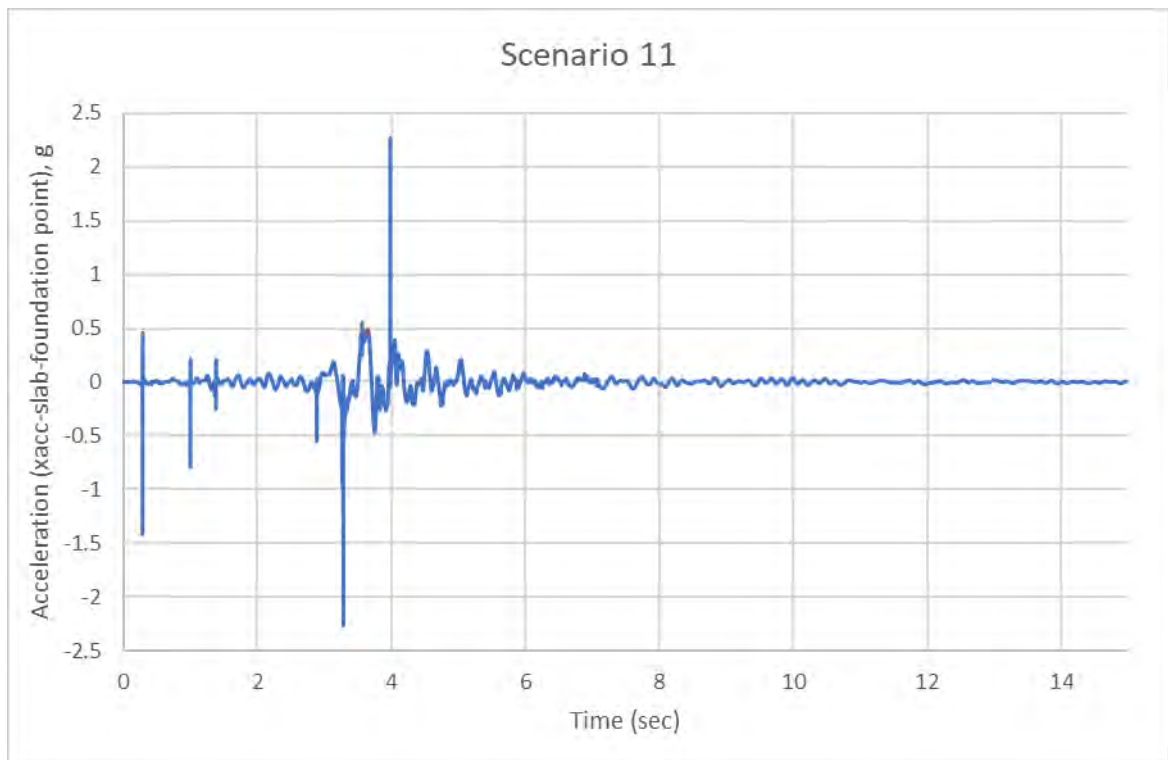
Γράφημα Παρ. Α. 40: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 10)



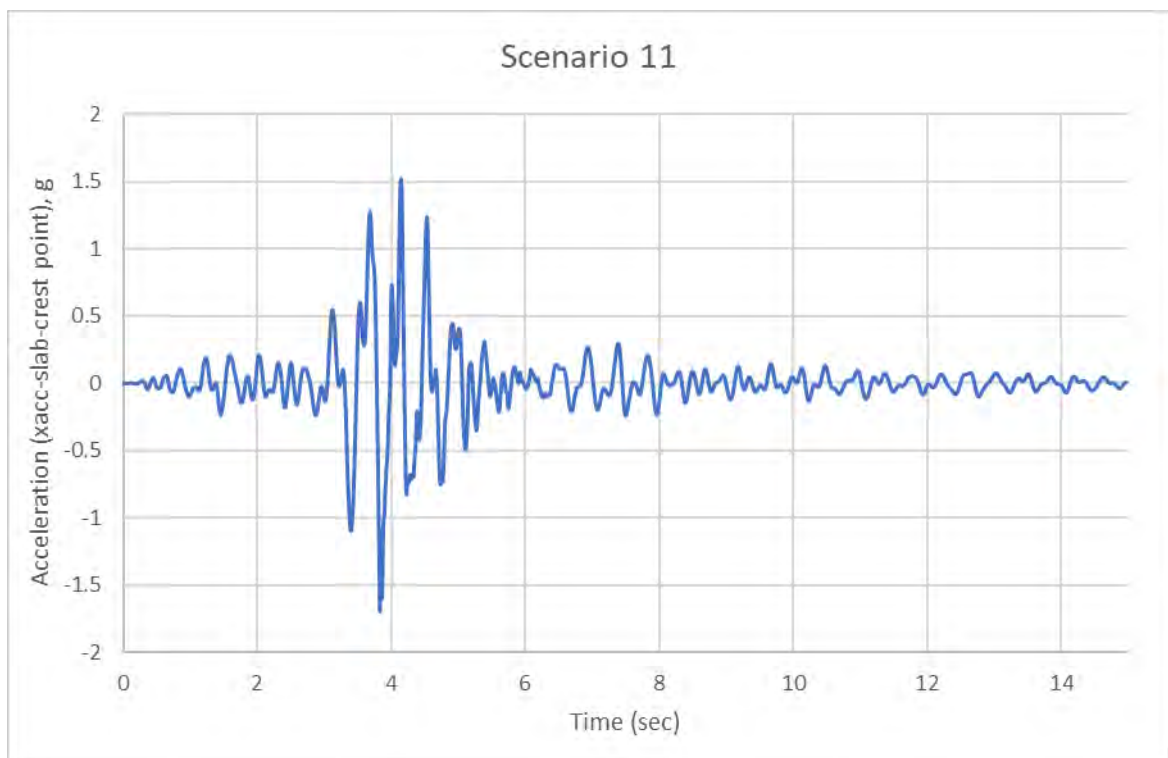
Γράφημα Παρ. Α. 41: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 11)



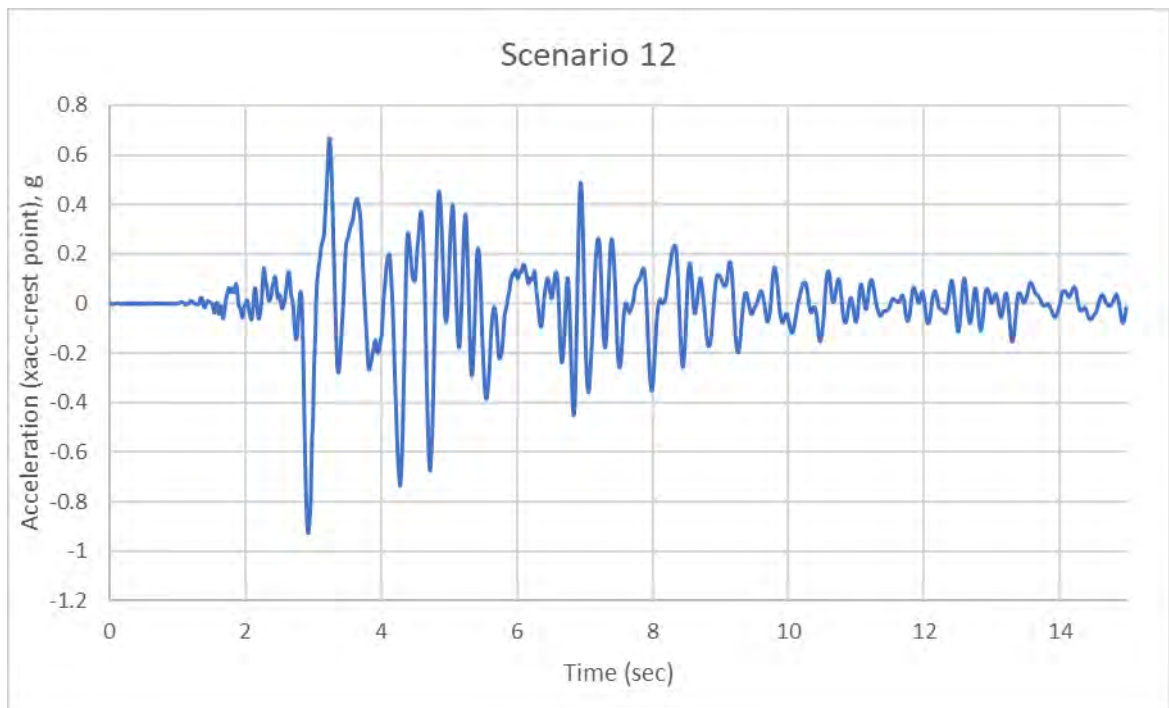
Γράφημα Παρ. Α. 42: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 11)



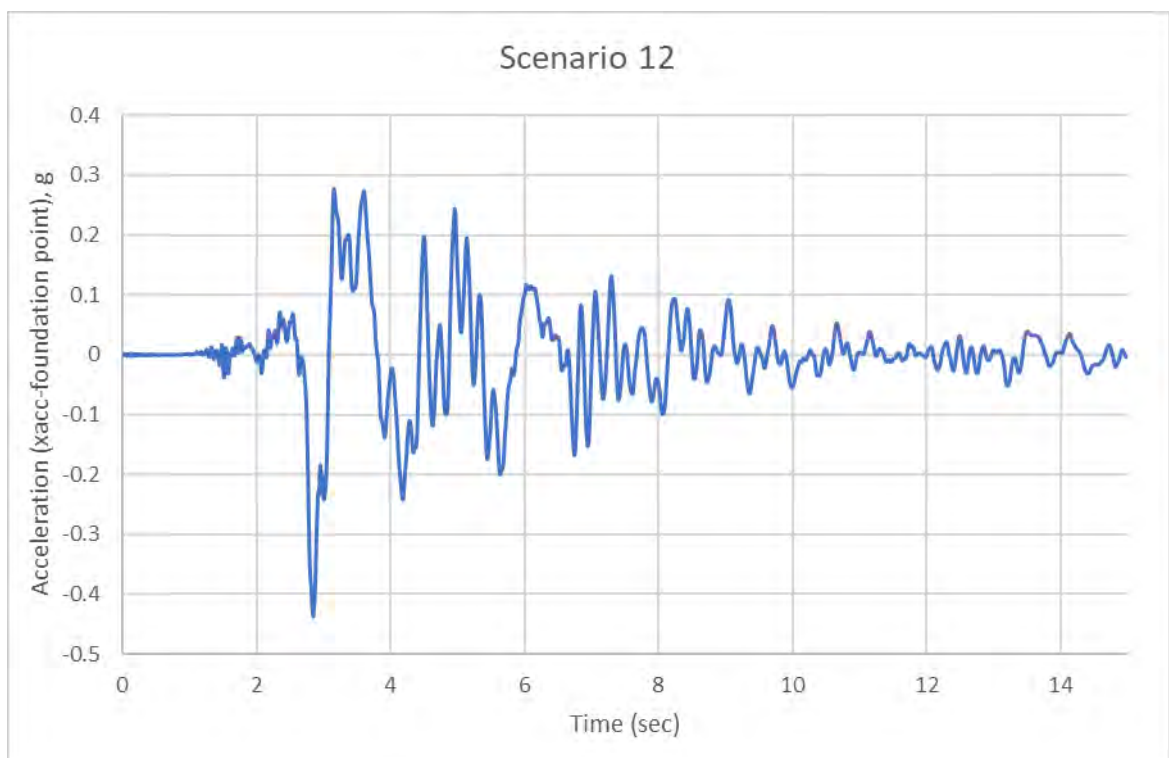
Γράφημα Παρ. Α. 43: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 11)



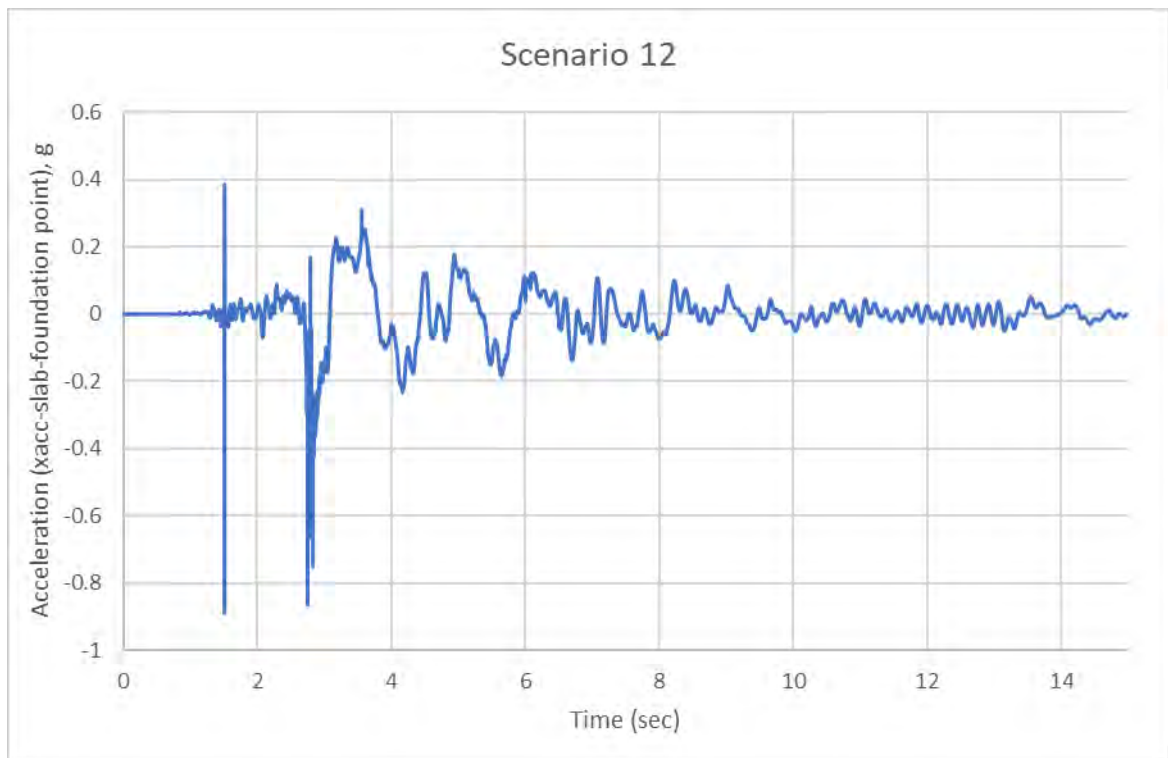
Γράφημα Παρ. Α. 44: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 11)



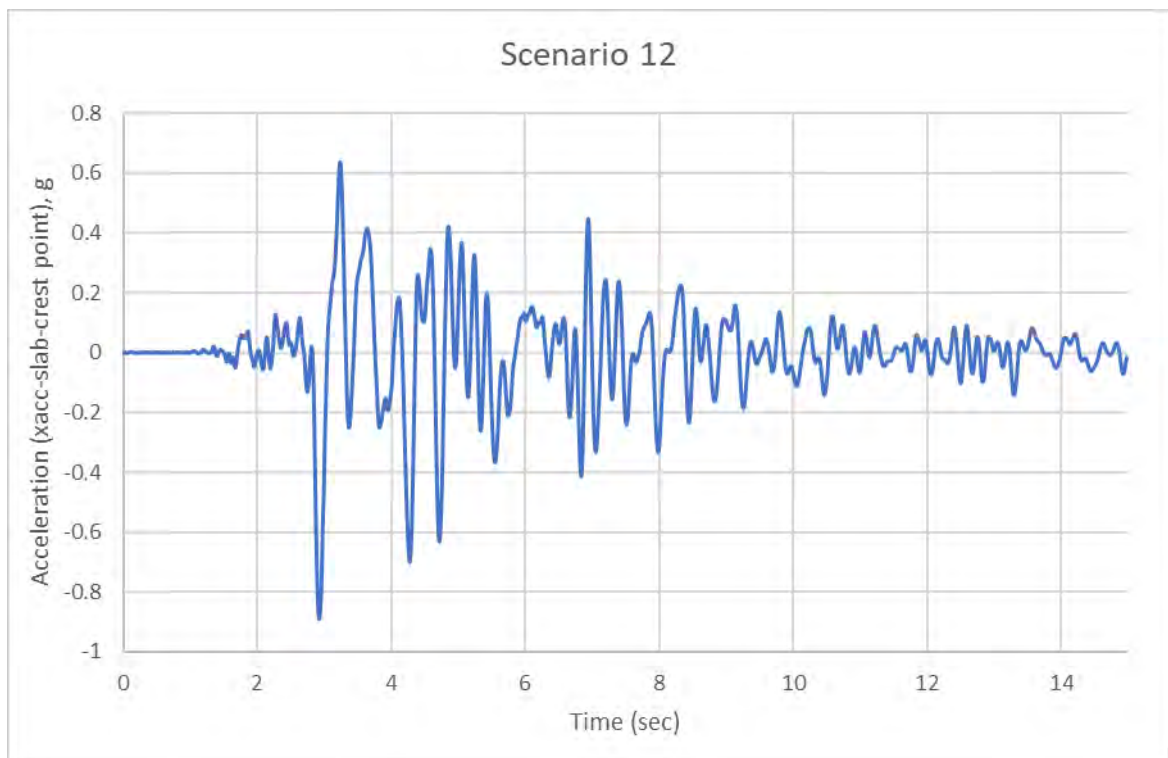
Γράφημα Παρ. Α. 45: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 12)



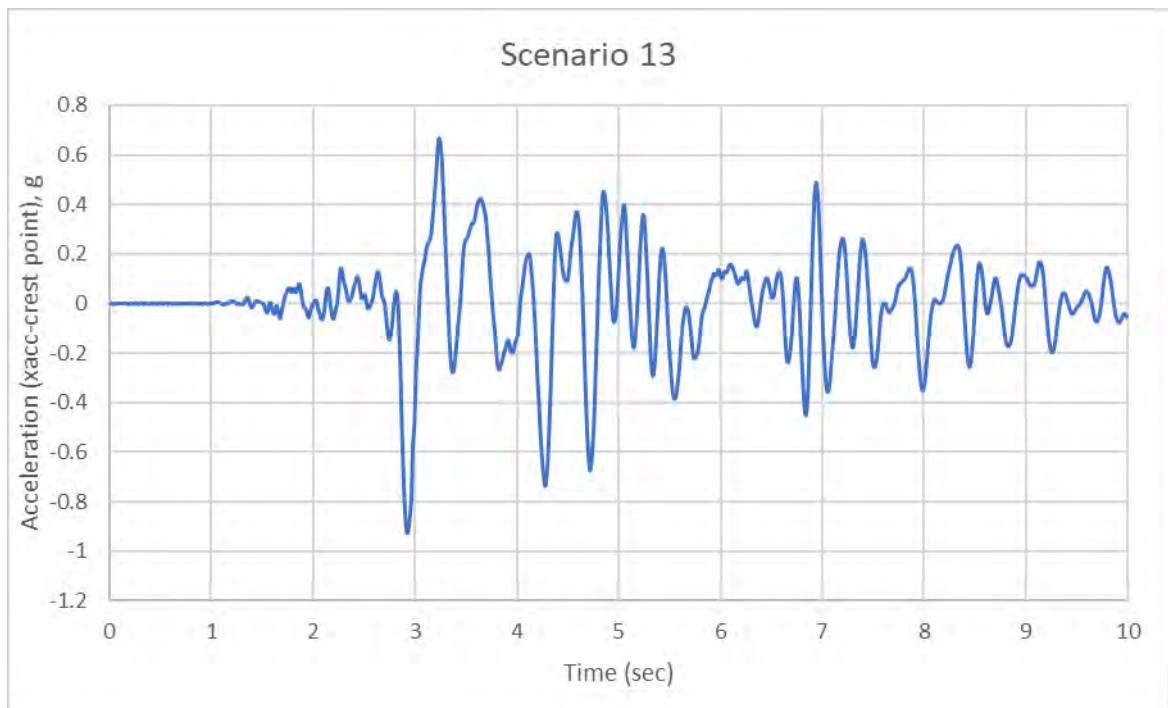
Γράφημα Παρ. Α. 46: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 12)



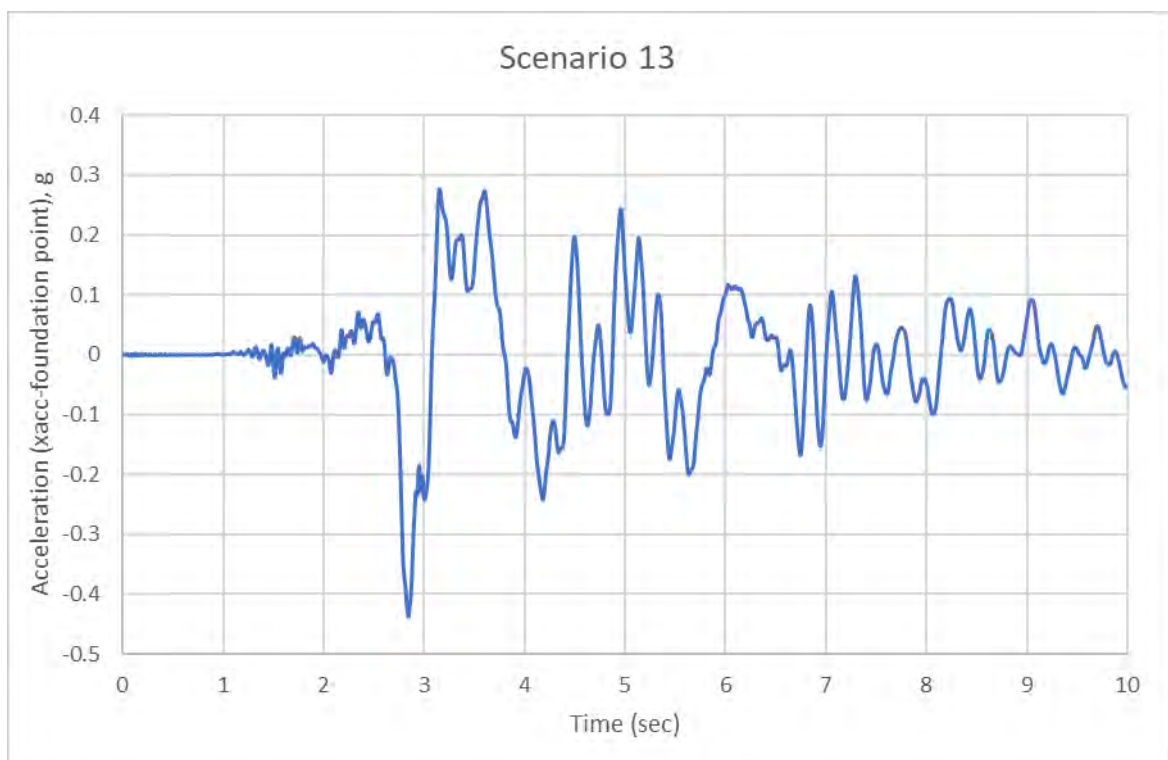
Γράφημα Παρ. Α. 47: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 12)



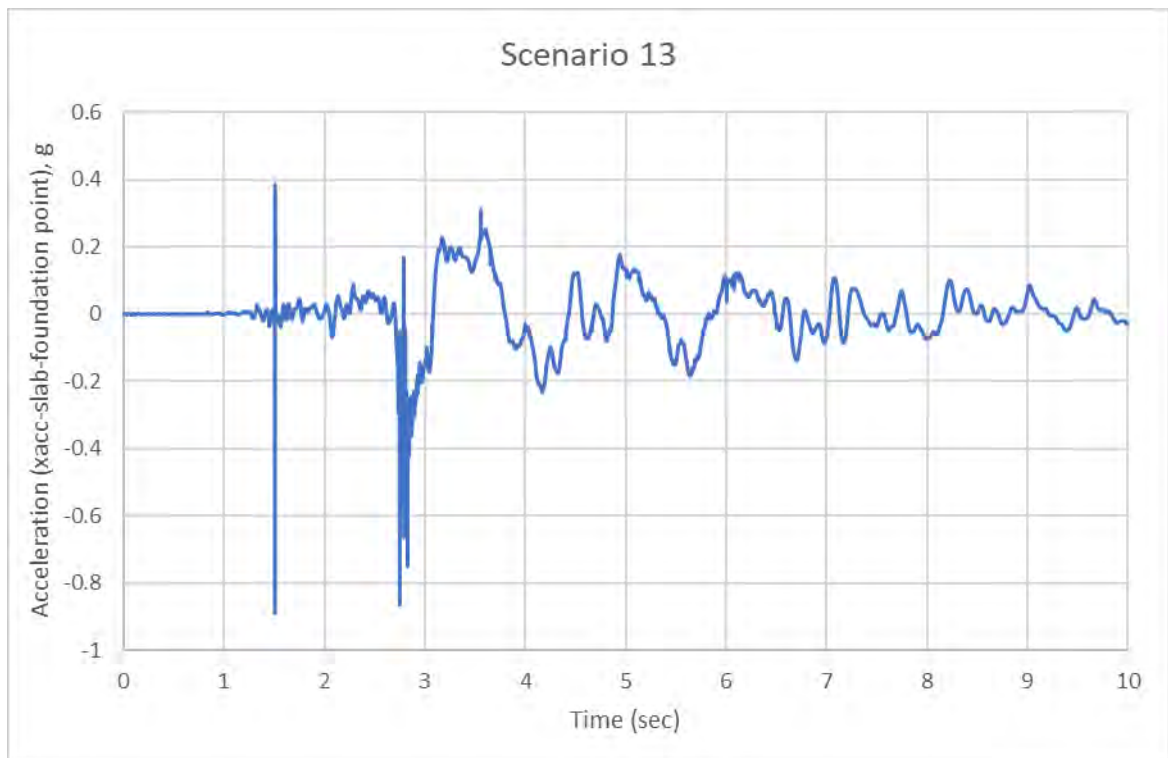
Γράφημα Παρ. Α. 48: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 12)



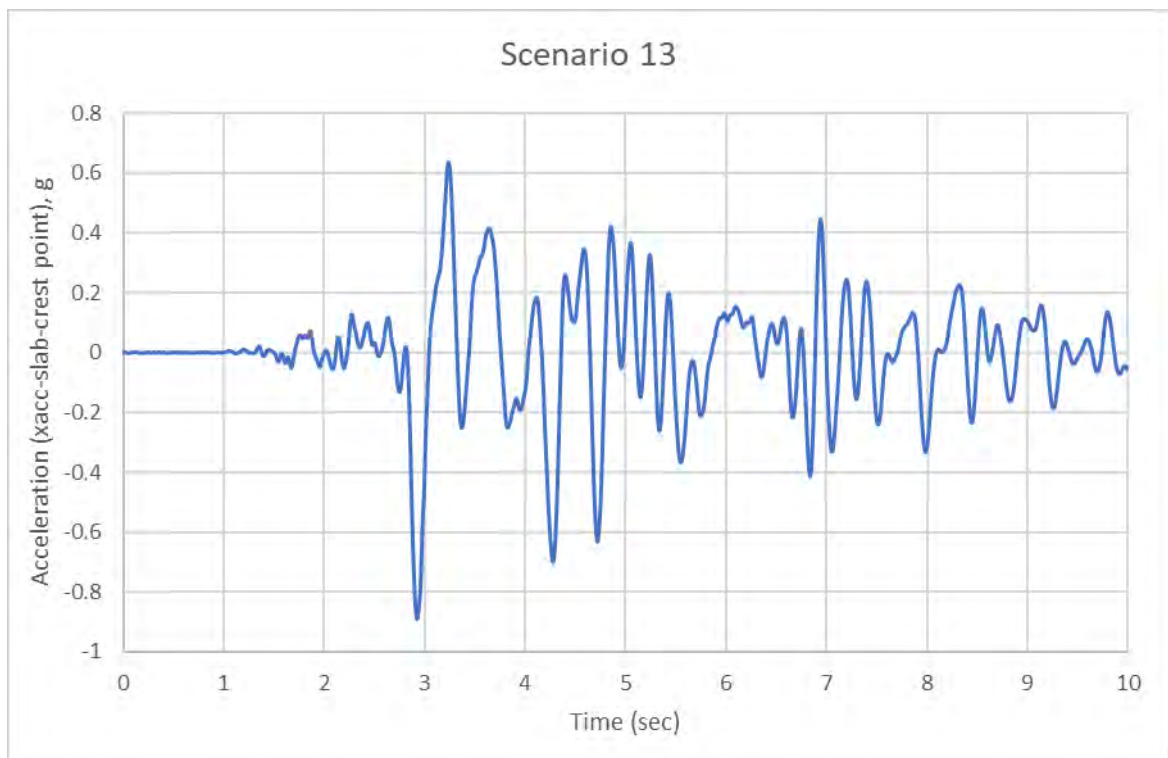
Γράφημα Παρ. Α. 49: Επιταχυνσιογράφημα στη στέψη του φράγματος (Σενάριο 13)



Γράφημα Παρ. Α. 50: Επιταχυνσιογράφημα στη βάση του φράγματος (Σενάριο 13)



Γράφημα Παρ. Α. 51: Επιταχυνσιογράφημα στο κάτω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 13)



Γράφημα Παρ. Α. 52: Επιταχυνσιογράφημα στο άνω άκρο της πλάκας σκυροδέματος (Σενάριο 13)