



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

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

Μεταπτυχιακή Διατριβή

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

ΚΑΡΑΣΑΧΙΝΙΔΗ ΕΛΕΝΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ 2019

© 2019 Καρασαχινίδη Ελένη

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

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

Τρίτος Εξεταστής

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

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής αυτής διατριβής, κ. Ντακούλα Παναγιώτη, για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, τους καθηγητές κα. Καλλιόγλου Πολυξένη και κ. Εφραιμίδη Γεώργιο, για το ενδιαφέρον που έδειξαν για την εργασία αυτή.

Τέλος, ευχαριστώ τους δικούς μου ανθρώπους, οικογένεια και φίλους, για όλη την υποστήριξη, φροντίδα και αγάπη που έλαβα και λαμβάνω από αυτούς.

Χωρίς τη συμβολή όλων των παραπάνω, δε θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Καρασαχινίδη Ελένη

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ
ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Καρασαχινίδη Ελένη

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2019

Επιβλέπων Καθηγητής: Ντακούλας Παναγιώτης, Καθηγητής

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των υδροδυναμικών πιέσεων που ασκούνται σε κατακόρυφο φράγμα σκυροδέματος κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης.

Για πολλές δεκαετίες, η μελέτη των υδροδυναμικών πιέσεων του ταμιευτήρα βασίσθηκε στις απλουστευμένες αναλυτικές λύσεις των Westergaard (1933) και Zangar (1952), οι οποίες θεωρούν το νερό ως ασυμπίεστο υλικό. Στην παρούσα μελέτη, αρχικά έγινε σύγκριση των υδροδυναμικών πιέσεων μεταξύ των μαθηματικών λύσεων των Westergaard (1933) και Zangar (1952) και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων κάνοντας χρήση μεθόδου «προστιθέμενης μάζας» με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων αυτών κατέδειξαν πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών λύσεων και των αριθμητικών αναλύσεων με βάση την μέθοδο «προστιθέμενης μάζας». Όμως, δεδομένου ότι οι ανωτέρω αναλύσεις βασίζονται στην παραδοχή της ασυμπιεστότητας του νερού, είναι δυνατόν να δώσουν συντηρητικά αποτελέσματα και να επηρεάσουν δυσμενώς την κατασκευή του έργου. Με στόχο τον περισσότερο ακριβή υπολογισμό των υδροδυναμικών πιέσεων, έγινε επίσης χρήση ακουστικών στοιχείων για την προσομοίωση του νερού του ταμιευτήρα. Οι αναλύσεις με τα ακουστικά στοιχεία λαμβάνουν υπόψη την συμπίεστικότητα του νερού, την ακτινοβολία κινητικής ενέργειας στο μακρινό τεχνητό όριο της λεκάνης και στην διεπιφάνεια νερού και βράχου κοιλάδας. Τα προσομοιώματα φράγματος-ταμιευτήρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι δισδιάστατα και υπόκεινται σε οριζόντια αρμονική ταλάντωση. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για την διερεύνηση της επίδρασης της ευκαμψίας του φράγματος και της ευκαμψίας του βράχου θεμελιώσεως στην ανάπτυξη των υδροδυναμικών πιέσεων υπό δυναμική διέγερση. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων συγκρίθηκαν και με τα αντίστοιχα των λύσεων προστιθέμενης μάζας.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ευκαμψία του φράγματος, η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στις αναλυτικές λύσεις, είναι δυνατόν να έχει πολύ σημαντική επίδραση στο μέγεθος των υδροδυναμικών πιέσεων. Επίσης, η ευκαμψία του βράχου της θεμελίωσης επηρεάζει αρκετά το μέγεθος των υδροδυναμικών πιέσεων, αλλά σε αρκετά μικρότερο βαθμό από την ευκαμψία του φράγματος.

Λέξεις κλειδιά :

Υδροδυναμικές Πιέσεις, Φράγμα, Δυναμική ανάλυση, Αριθμητικό προσομοίωμα, πεπερασμένα στοιχεία, Ακουστικά στοιχεία

HYDRODYNAMIC PRESSURES ACTING ON CONCRETE DAMS UNDER SEISMIC
LOADING

Karasachinidi Eleni

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2019

Supervisor Professor: Dakoulas Panagiotis, Professor,

Abstract

The main subject of this thesis is the study of the hydrodynamic pressure acting on the vertical upstream face of a concrete dam during seismic excitation.

For many decades, the study of the hydrodynamic pressure of the reservoir has been based on the simplified added mass approaches of Westergaard (1933) and Zangar (1952) which make the assumption that water is an incompressible material. In this study, a comparison has been made initially between the hydrodynamic pressures estimated by the analytical solutions of Westergaard (1933) and Zangar (1952) and those computed by numerical analyses using the same added mass formulations implemented in the finite element program ABAQUS. The results of this comparison showed good agreement between analytical and numerical solutions that are based on added mass method. However, given the fact that the above mentioned analyses are based on the assumption that the water is incompressible, they may lead to conservative results and even affect adversely the construction. Numerical analyses using acoustic elements take into account the compressibility of water, the reflection of the kinetic energy on the artificial boundary of the reservoir and on the reservoir-foundation interface. The created dam-reservoir numerical models function as two-dimensional systems, subjected to horizontal harmonic oscillation. In the thesis, parametric analyses were conducted in order to investigate the effect of the flexibility of both the dam and the foundation on the hydrodynamic pressures which are developed under dynamic excitation. The results of these simulations were also compared with those obtained using the added mass technique.

The results indicate that the dam's flexibility, which is not taken into account in the analytical solutions, has potentially a significant effect on the magnitude of hydrodynamic pressures. In addition, the flexibility of the foundation rock affects considerably the magnitude of hydrodynamic pressures, yet not to the same extent as the dam's flexibility.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1:	Εισαγωγή	1
1.1.	Ορισμός προβλήματος	1
1.2.	Στόχος έρευνας	2
1.3.	Δομή της διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2:	Βιβλιογραφική Επισκόπηση	3
2.1.	Αναλυτικές λύσεις	3
2.1.1.	WESTERGAARD	3
2.1.2.	ZANGAR	4
2.2.	Αριθμητικές λύσεις	6
2.2.1.	ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	6
2.2.2.	ΣΤΟΙΧΕΙΑ EULER	7
2.2.3.	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΡΕΥΣΤΟΥ (FLUID ELEMENTS)	7
2.3.	Συνοριακή συνθήκη απείρου (Infinite Boundary Condition)	8
2.4.	Ανάλογο ιξώδους απορροφητήρα (αποσβεστήρα)	9
2.5.	Υπολογισμός απόσβεσης Rayleigh (Rayleigh damping)	11
Κεφάλαιο 3:	Σύγκριση Μεθόδων	13
3.1.	Αριθμητικές αναλύσεις με ακουστικά στοιχεία	13
3.2.	Westergaard αναλυτική λύση	16
3.3.	Westergaard αριθμητική λύση	16
3.4.	Zangar αναλυτική λύση	17
3.5.	Zangar αριθμητική λύση	18
3.6.	Σύγκριση αποτελεσμάτων	18
Κεφάλαιο 4:	Παραμετρικές Αναλύσεις	22
4.1.	Επίδραση ευκαμψίας βάσης	22
4.1.1.	ΆΚΑΜΠΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΑΚΑΜΠΤΟ ΒΡΑΧΟ	22
4.1.2.	ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΑΚΑΜΠΤΟ ΒΡΑΧΟ	27
4.1.3.	ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΒΡΑΧΟ	33
4.2.	Επίδραση ευκαμψίας φράγματος	45
4.2.1.	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	45
4.2.2.	ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ	47
4.2.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ	58
Κεφάλαιο 5:	Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για τα τρία προσομοιώματα	43
Πίνακας 2 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 5m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.	47
Πίνακας 3 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 7m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.	50
Πίνακας 4 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 9m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.	52
Πίνακας 5 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 12m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.	55
Πίνακας 6: Πρώτες τρεις σημαντικές συχνότητες προσομοιωμάτων	57
Πίνακας 7 : Μέγιστες και ελάχιστες τιμές υδροδυναμικών πιέσεων και επιταχύνσεων εμφανιζόμενες στη βάση του φράγματος.....	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1:Το σύστημα φράγματος - ταμιευτήρα του Westrgaard	4
Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα του ηλεκτρικού ανάλογου που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη του Zangar	4
Σχήμα 3: Συντελεστής πίεσης συναρτήσει της σταθερής κλίσης της ανάντη παρειάς	5
Σχήμα 4 : Διάδοση σεισμικού κύματος στη φύση (Towhata, 2008).....	8
Σχήμα 5 : Τεχνητή αντανάκλαση σεισμικής ενέργειας σε όριο αριθμητικού μοντέλου (Towhata, 2008)	8
Σχήμα 6 : Μηχανισμός συντοριακής συνθήκης ιξώδους απόσβεσης (Towhata, 2008)	9
Σχήμα 7 : Μονοδιάστατο κύμα που οδεύει κατά μήκος απειρομήκους ράβδου (Kramer, 1996).....	9
Σχήμα 8: Καμπύλη απόσβεσης Rayleigh	12
Σχήμα 9 : Προσομοίωμα φράγματος-ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας έχει μήκος 80 m και προσομοιώνεται με ακουστικά στοιχεία.	14
Σχήμα 10 : Προσομοίωμα φράγματος-ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας έχει μήκος 160 m και προσομοιώνεται με ακουστικά στοιχεία.	14
Σχήμα 11 : Επιβαλλόμενη οριζόντια αρμονική επιτάχυνση στη βάση του φράγματος.....	15
Σχήμα 12 : Προσομοίωμα φράγματος με ανάντη στοιχεία χρήστη προστιθέμενης μάζας	16
Σχήμα 13: Σύγκριση υδροδυναμικών πιέσεων από την αναλυτική και αριθμητική λύση κατά Westergaard, την αναλυτική και αριθμητική λύση κατά Zangar και από αριθμητική λύση με χρήση ακουστικών στοιχείων για την προσομοίωση του νερού του ταμιευτήρα.	19
Σχήμα 14 : Κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων σε άκαμπτο κατακόρυφο φράγμα, με διάφορα μήκη ταμιευτήρα (PELECANOS, 2013)	20

Σχήμα 15 : Κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο κατακόρυφο φράγμα, με διάφορα μήκη ταμιευτήρα (PELECANOS, 2013)	20
Σχήμα 16 Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων (ακουστικά στοιχεία $L=2H$)	21
Σχήμα 17 : Προσομοίωμα άκαμπτου φράγματος σε άκαμπτο βράχο	22
Σχήμα 18 : Επιβαλλόμενη οριζόντια επιτάχυνση.....	24
Σχήμα 19 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε άκαμπτο φράγμα - άκαμπτο βράχο	25
Σχήμα 20 Μέγιστες υδροδυναμικές πιέσεις για άκαμπτο φράγμα - άκαμπτο βράχο ($t = 3.00 \text{ sec}$)	25
Σχήμα 21 : Ελάχιστες υδροδυναμικές πιέσεις για άκαμπτο φράγμα-άκαμπτο βράχο ($t = 2.50 \text{ sec}$)	25
Σχήμα 22 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων.....	26
Σχήμα 23 : Καθ' ύψος κατανομή ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων.....	26
Σχήμα 24 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα - άκαμπτο βράχο.....	28
Σχήμα 25 : Κατανομή μέγιστων θετικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 3.00 \text{ sec}$).....	28
Σχήμα 26 : Κατανομή ελάχιστων αρνητικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 4.5 \text{ sec}$).....	28
Σχήμα 27 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων	29
Σχήμα 28 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων	30
Σχήμα 29 : Λεπτομέρεια κατανομής ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων.....	30
Σχήμα 30 : Καθ' ύψος κατανομή ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων	31
Σχήμα 31 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων	31
Σχήμα 32 : Χρονοϊστορίες οριζόντιων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος..	32
Σχήμα 33 : Χρονοϊστορίες κατακόρυφων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος	32
Σχήμα 34 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος πλάτους 5 m θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο	33
Σχήμα 35 : Καμπύλη απόσβεσης Rayleigh για σκυρόδεμα και βράχο	34
Σχήμα 36 : Εμβαδό επιρροής αποσβεστήρα για δύο διαφορετικά είδη κόμβων.....	35
Σχήμα 37 : Επιβαλλόμενες διατμητικές τάσεις στη βάση τη θεμελίωσης	37
Σχήμα 38 : Χρονοϊστορία αναπτυσσόμενης οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του βράχου θεμελίωσης.....	37
Σχήμα 39 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε διάφορα σημεία καθ' ύψος της ανάντη πλευράς του εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 5 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο	38
Σχήμα 40 : Κατανομή μέγιστων θετικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 4.00 \text{ sec}$).....	38
Σχήμα 41 : Κατανομή ελάχιστων αρνητικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 2.5 \text{ sec}$).....	39
Σχήμα 42 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων	39
Σχήμα 43: Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων	40
Σχήμα 44: Λεπτομέρεια κατανομής ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων.....	40
Σχήμα 45 : Καθ' ύψος κατανομή ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων	41
Σχήμα 46 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων	41
Σχήμα 47 : Χρονοϊστορίες οριζόντιων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος..	42

Σχήμα 48 : Χρονοϊστορίες κατακόρυφων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος	42
Σχήμα 49 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων	44
Σχήμα 50 : Σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τη βάση του φράγματος, όταν μεγιστοποιούνται οι υδροδυναμικές πιέσεις στη βάση του φράγματος	44
Σχήμα 51 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 7 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο	45
Σχήμα 52 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 9 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο	46
Σχήμα 53 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 12 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο	46
Σχήμα 54 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 5 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	48
Σχήμα 55 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 5 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	48
Σχήμα 56 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 5 m ($f_1 = 1.62$ Hz)	49
Σχήμα 57 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 5 m ($f_2 = 4.71$ Hz)	49
Σχήμα 58 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 5 m ($f_3 =$ 10.02 Hz)	49
Σχήμα 59 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 7 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	50
Σχήμα 60 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 7 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	51
Σχήμα 61 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 7 m ($f_1 = 2.34$ Hz)	51
Σχήμα 62 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 7 m ($f_2 = 6.60$ Hz)	51
Σχήμα 63 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 7 m ($f_3 = 9.83$ Hz)	52
Σχήμα 64 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 9 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	53
Σχήμα 65 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 9 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	53
Σχήμα 66 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 9 m ($f_1 = 2.95$ Hz)	54
Σχήμα 67 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 9 m ($f_2 = 7.14$ Hz)	54
Σχήμα 68 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 9 m ($f_3 = 9.48$ Hz)	54
Σχήμα 69 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 12 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	55
Σχήμα 70 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 12 m, σε διάστημα συχνοτήτων $0 \div 18$ Hz	56
Σχήμα 71 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 12 m ($f_1 =$ 3.64 Hz)	56

Σχήμα 72 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 12 m ($f_2 = 8.84$ Hz).....	56
Σχήμα 73 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 12 m ($f_3 = 10.08$ Hz).....	57
Σχήμα 74 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 7 m- εύκαμπτο βράχο	58
Σχήμα 75 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 9 m- εύκαμπτο βράχο	58
Σχήμα 76 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 12 m- εύκαμπτο βράχο	59
Σχήμα 77 : Καθ' ύψος κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων, όταν μεγιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος ($B = 5$ m : $t = 4.01$ sec, $B = 7$ m : $t = 5.00$ sec, $B = 9$ m : $t = 3.98$ sec, $B = 12$ m : $t = 4.07$ sec, όπου B το πλάτος του φράγματος)	60
Σχήμα 78 : Ολικές πιέσεις, όταν μεγιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος.....	60
Σχήμα 79 Λεπτομέρεια ολικών πιέσεων, για μέγιστες πιέσεις βάσης	61
Σχήμα 80 : Σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τη βάση του φράγματος, τη στιγμή εμφάνισης των μέγιστων πιέσεων βάσης.....	61
Σχήμα 81 : Καθ' ύψος κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων τη στιγμή κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος ($B = 5$ m : $t = 2.49$ sec, $B = 7$ m : $t = 3.48$ sec, $B = 9$ m : $t = 4.50$ sec, $B = 12$ m : $t = 3.52$ sec)	62
Σχήμα 82 : Ολικές πιέσεις τη στιγμή κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος.....	63
Σχήμα 83 : Σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τη βάση του φράγματος τη στιγμή κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος.....	63
Σχήμα 84 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται η ελάχιστη υδροδυναμική πίεση.....	65
Σχήμα 85 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη υδροδυναμική πίεση.....	65
Σχήμα 86 : Μέγιστες και ελάχιστες υδροδυναμικές πιέσεις βάσης φράγματος και ελάχιστη ολική πίεση για διαφορετικά πλάτη φράγματος.....	67

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Ορισμός προβλήματος

Τα φράγματα αποτελούν έργα κομβικής σημασίας για τη διαχείριση και προστασία του υδατικού δυναμικού εξαιτίας της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης σε νερό και των κλιματικών αλλαγών που αυξάνουν την αβεβαιότητα της διαθεσιμότητάς του. Επίσης επιτελούν ρόλο ρυθμιστή στο ενεργειακό ισοζύγιο, ειδικά στις μέρες μας με την αυξανόμενη ευαισθητοποίηση για τα περιβαλλοντικά ζητήματα και την απαίτηση για στροφή προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Γενικότερα, εξυπηρετώντας πολλαπλούς σκοπούς (ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρικό έλεγχο, υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας, αναψυχή και τουρισμό) είναι έργα με καθοριστική σημασία για την τοπική οικονομία, αλλά και την οικονομία των κρατών.

Εξαιτίας της μεγάλης σπουδαιότητας των φραγμάτων ως έργων υποδομής αλλά και των τεράστιων οικονομικών και κοινωνικών συνεπειών που δυνητικά μπορεί να έχει μια πιθανή αστοχία σε ένα τέτοιο έργο, η ανάγκη για προσεκτική μελέτη τους είναι αδιαμφισβήτητη. Η μελέτη μιας τέτοιας κατασκευής δε θα μπορούσε να θεωρηθεί ολοκληρωμένη αν δεν περιλαμβάνει, εκτός των υπολοίπων, μία πλήρη και λεπτομερή σεισμική μελέτη.

Η αλληλεπίδραση φράγματος – ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, δηλαδή η κατανομή της υδροδυναμικής πίεσης που ασκεί ο ταμιευτήρας σε ένα φράγμα κατά τη διάρκεια του σεισμού, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη δυναμική απόκριση του φράγματος και πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε δυναμική ανάλυση.

Καθώς η αδρανειακή δύναμη μιας κατασκευής είναι συνάρτηση της επιτάχυνσης και της μάζας, η αλληλεπίδραση φράγματος – ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια ενός σεισμού έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις σε λεπτότερης διατομής, λιγότερο ογκώδη φράγματα. Σε τέτοια φράγματα ο λόγος της μάζας του νερού προς τον όγκο της κατασκευής είναι μεγαλύτερος, πράγμα που υποδηλώνει ότι η κατασκευή θα επηρεάζεται περισσότερο από τη κίνηση της μάζας του νερού. (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)

Υπάρχουν τρεις μεθοδολογίες προσομοίωσης των υδροδυναμικών πιέσεων:

1. Χρήση συγκεντρωμένων μαζών, οι οποίες προσδιορίζονται από θεωρίες προστιθέμενης μάζας (Westergaard, Zangar και άλλες)
2. Προσομοίωση με ενσωμάτωση της συμπίεστικότητας του υγρού σε ανάλυση στο χώρο των συχνοτήτων
3. Προσομοίωση με χρήση τρισδιάστατων στερεών πεπερασμένων στοιχείων στα οποία δίνονται ιδιότητες υλικών ρευστού

1.2. Στόχος έρευνας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι να μελετηθούν οι υδροδυναμικές πιέσεις που αναμένεται να ασκηθούν από τον ταμιευτήρα σε φράγμα σκυροδέματος, με κατακόρυφη ανάντη παρειά, κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης. Μελετάται πως επηρεάζονται οι αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές πιέσεις από διάφορες παραμέτρους. Τέτοιες παράμετροι είναι η μέθοδος υπολογισμού τους, οι συνοριακές συνθήκες της θεμελίωσης στην αριθμητική προσομοίωση του συστήματος θεμελίωσης - φράγματος - ταμιευτήρα που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της θεμελίωσης ως εύκαμπτη ή άκαμπτη αλλά και η ευκαμψία του ίδιου του φράγματος.

1.3. Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται μια σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στο αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά περιγράφονται δύο από τις βασικότερες αναλυτικές λύσεις (Westergaard και Zangar) της δυναμικής φόρτισης που δέχεται ένα φράγμα από τον ταμιευτήρα. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε άλλες αριθμητικές προσεγγίσεις του φαινομένου.

Στο τρίτο κεφάλαιο ελέγχεται η συνάφεια των αποτελεσμάτων μεταξύ των θεωρητικών, αναλυτικών λύσεων, αριθμητικών εφαρμογών τους στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και της μεθόδου με την οποία έχει γίνει η προσομοίωση του ταμιευτήρα του φράγματος στην παρούσα διπλωματική, προσομοίωση με ακουστικά στοιχεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της ευκαμψίας του βράχου θεμελίωσης και της ευκαμψίας του ίδιου του φράγματος στις αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές πιέσεις κατά τη διάρκεια δυναμικής φόρτισης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μία ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, βρίσκεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1. Αναλυτικές λύσεις

2.1.1. WESTERGAARD

Ο πρώτος που υπολόγισε αναλυτικά την υδροδυναμική επίδραση του ταμιευτήρα πάνω σε φράγμα κατά τη διάρκεια σεισμού ήταν ο Westergaard το 1933, ο οποίος εξήγαγε μια εξίσωση για να περιγράψει τις πιέσεις του νερού πάνω σε φράγμα από σκυρόδεμα (απείρως δύσκαμπτο και με κατακόρυφη ανάντη παρειά). Η μελέτη του Westergaard βασίστηκε στη θεωρία της ελαστικότητας και έλαβε υπόψη την κίνηση του νερού του ταμιευτήρα υπό την επίδραση οριζόντιας αρμονικής διέγερσης. (PELECANOS, 2013)

Στην αναλυτική λύση προστιθέμενης μάζας Westergaard γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

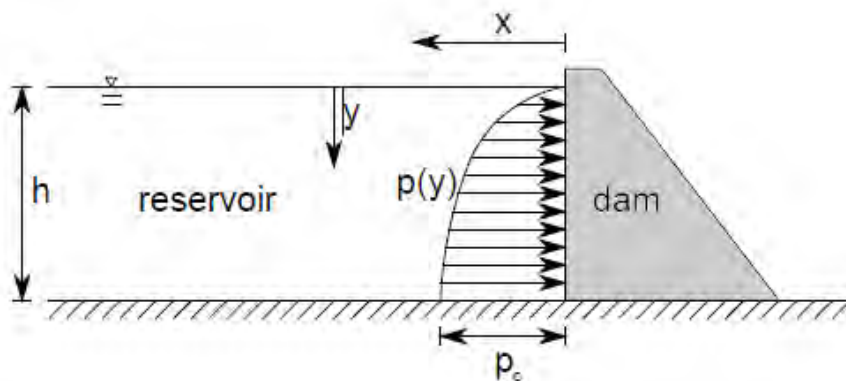
1. Το νερό θεωρείται ασυμπίεστο
2. Η επιφάνεια του ταμιευτήρα βρίσκεται σε ηρεμία.
3. Ο ταμιευτήρας έχει άπειρο μήκος.
4. Η κίνηση του νερού γίνεται μόνο κατά τον οριζόντιο άξονα. Η διέγερση είναι οριζόντια αρμονική.
5. Η ανάντη παρειά του φράγματος θεωρείται κατακόρυφη και άκαμπτη. (ITASCA, n.d.)

Η υδροδυναμική πίεση θεωρήθηκε σταθερή και προστέθηκε στον ψευδοστατικό υπολογισμό για την ευστάθεια του φράγματος. Αντί να προσθέσει την υδροδυναμική πίεση ως εξωτερική δύναμη, ο Westergaard πρότεινε να προσομοιωθεί η αδρανειακή συνεισφορά του νερού στη κίνηση του φράγματος με την πρόσθεση μιας μάζας νερού στη μάζα του φράγματος. Αυτή είναι η έννοια της προστιθέμενης μάζας. Το πλάτος, b αυτής της μάζας νερού που προστίθεται στο φράγμα ακολουθεί την κατανομή που δίνεται στην Εξίσωση (1), ενώ οι υδροδυναμικές πιέσεις που προκύπτουν δίνονται από την Εξίσωση (2).

$$b(y) = \frac{7}{8} \cdot \sqrt{h \cdot y} \quad (1)$$

$$P(y) = b \cdot \gamma_w \cdot a_c \cdot g \quad (2)$$

- Όπου, b : πλάτος νερού η μάζα του οποίου προστίθεται στη μάζα του σκυροδέματος στο φράγμα (m)
- h : βάθος ταμιευτήρα (m)
- y : απόσταση από την επιφάνεια του νερού (m)
- γ_w : πυκνότητα του νερού (t/m^3)
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2)
- a_c : συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης
- P : υδροδυναμική πίεση (kPa)



Σχήμα 1: Το σύστημα φράγματος - ταμιευτήρα του Westergaard

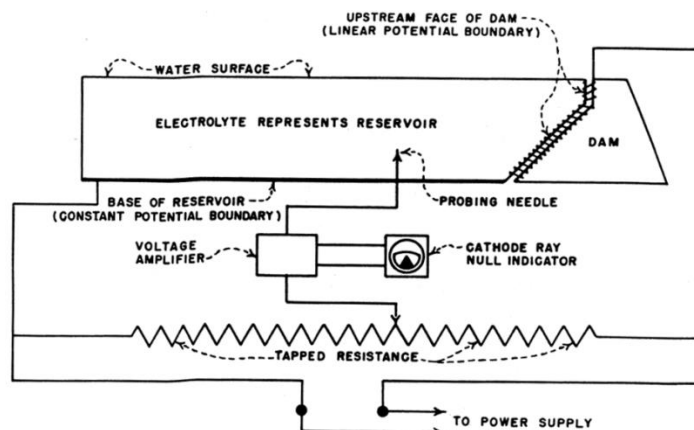
2.1.2. ZANGAR

Ο πρώτος που μελέτησε την κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων που επενεργούν πάνω σε φράγμα άκαμπτο με κεκλιμένη ανάντη παρειά την ώρα του σεισμού ήταν ο Zangar το 1952.

Ο Zangar έκανε τις παραδοχές ότι:

1. Το νερό είναι ασυμπίεστο
2. Δεν υπάρχει κίνηση του νερού κάθετα σε κανένα σημείο του φράγματος
3. Ο ταμιευτήρας έχει μεγάλο, πρακτικά άπειρο μήκος.
4. Η κίνηση του νερού γίνεται μόνο κατά τον οριζόντιο άξονα. Η διέγερση είναι οριζόντια αρμονική.
5. Η ανάντη παρειά του φράγματος είναι κεκλιμένη και άκαμπτη.

Με βάση αυτές τις παραδοχές και χρησιμοποιώντας εξισώσεις ρευστομηχανικής, ο Zangar παρατήρησε ότι μπορεί να προκύψει ένα ηλεκτρικό ανάλογο, για την κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων σε κεκλιμένη επιφάνεια, το ανάλογο που φαίνεται στο Σχήμα 2. Διενήργησε πειράματα χρησιμοποιώντας αυτό το ανάλογο και παρουσίασε τα αποτελέσματα συγκρίνοντας τα με αυτά της αναλυτικής λύσης του Westergaard, με τα οποία δεν υπήρχε σημαντική απόκλιση. (Zangar, 1952)



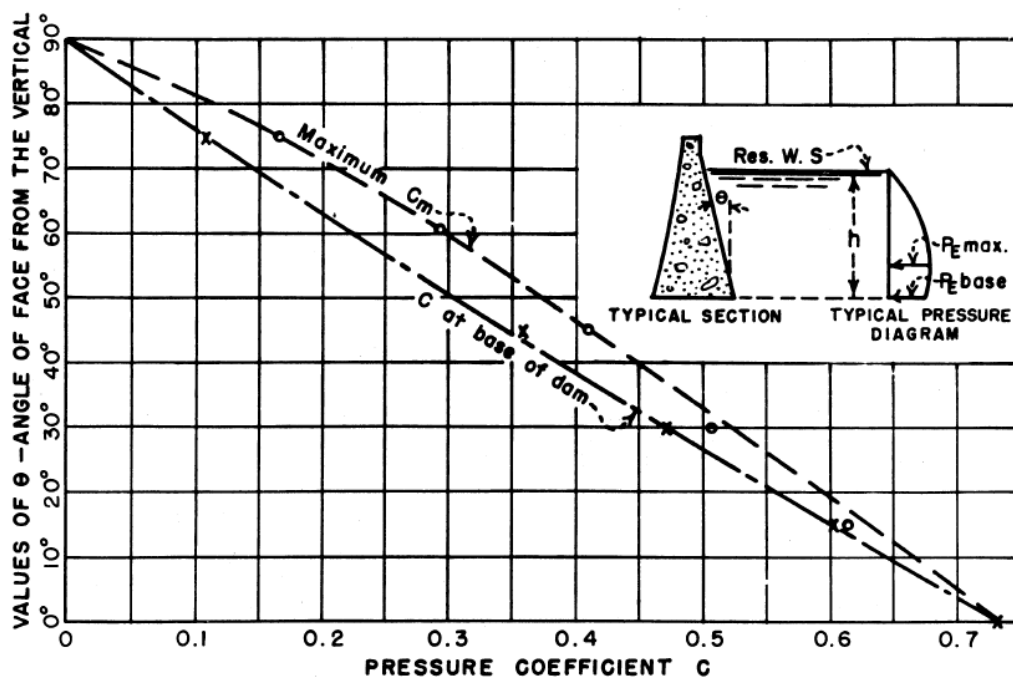
Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα του ηλεκτρικού αναλόγου που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη του Zangar

Η κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων κατά Zangar δίνεται από την εξίσωση (3)

$$P(y) = C(y) \cdot \gamma_w \cdot a_c \cdot g \cdot h \quad (3)$$

$$C(y) = 0.5 C_m \cdot \left[\frac{y}{h} \cdot \left(2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \cdot \left(2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (4)$$

- Όπου, P : Υδροδυναμική πίεση (kPa)
 C : Συντελεστής πίεσης, δίνεται από την εξίσωση (4)
 C_m : Συντελεστής που εξαρτάται από την ανάντη κλίση του φράγματος, η μέγιστη τιμή του C, δίνεται από το Σχήμα 3
 y : απόσταση από την επιφάνεια του νερού (m)
 γ_w : πυκνότητα του νερού (t/m³)
 a_c : συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης
 g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²)
 h : βάθος ταμιευτήρα (m)



Σχήμα 3: Συντελεστής πίεσης συναρτήσει της σταθερής κλίσης της ανάντη παρειάς

2.2. Αριθμητικές λύσεις

2.2.1. ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα ακουστικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση προβλημάτων όπου ένα ακουστικό μέσο υπόκειται σε σχετικά μικρές μεταβολές πίεσης, όπως η διάδοση ηχητικών κυμάτων διαμέσου του αέρα. Τα στοιχεία αυτά δε μεταφέρουν διατμητικές τάσεις και η πίεσή τους είναι ανάλογη με την ογκομετρική παραμόρφωσή τους. Η επίλυση ενός ακουστικού μέσου ορίζεται με μια μόνο μεταβλητή πίεσης. (Simulia, 2014)

Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, η εξίσωση ισορροπίας που χρησιμοποιείται για τις μικρές μετακινήσεις συμπιεστού ρευστού, χωρίς ιξώδες που ρέει διαμέσου ενός υλικού με μητρωειδή αντίσταση είναι η ακόλουθη :

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \dot{u}^f + \rho_f \ddot{u}^f = 0 \quad (5)$$

Όπου, p : Η υδροδυναμική πίεση που αναπτύσσει το ρευστό (χωρίς την αρχική υδροστατική πίεση)
 x : Η θέση του στοιχείου του ρευστού σωματιδίου
 \dot{u}^f : Η ταχύτητα του στοιχείου του ρευστού σωματιδίου
 \ddot{u}^f : Η επιτάχυνση του στοιχείου του ρευστού σωματιδίου
 ρ_f : Η πυκνότητα του ρευστού
 γ : Η οπισθέλκουσα δύναμη (μονάδες δύναμης ανά όγκο ανά ταχύτητα), η οποία προκαλείται από το ρευστό ενός υλικού με μητρωειδή αντίσταση

Γίνεται η παραδοχή ότι δεν υπάρχει σταθερή ροή του ρευστού.

Το ρευστό θεωρείται συμπιεστό και χωρίς ιξώδες και έτσι η υδροδυναμική πίεση συνδέεται με το μέτρο συμπιεστότητας και την ογκομετρική παραμόρφωση με την εξίσωση (6)

$$p = -K_f \varepsilon_V \quad (6)$$

Όπου, K_f : Το μέτρο συμπιεστότητας
 ε_V : Η ογκομετρική παραμόρφωση $\varepsilon_V = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$

Με την εφαρμογή κατάλληλων ιδιοτήτων υλικού του ακουστικού μέσου, δηλαδή της πυκνότητας και του μέτρου συμπιεστότητας του νερού, τα ακουστικά στοιχεία μπορούν να προσομοιώσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του νερού. Έτσι ο ταμιευτήρας του φράγματος μπορεί να προσομοιωθεί με ακουστικά στοιχεία. Τέλος, υπάρχουν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες που εξασφαλίζουν την απορρόφηση της ενέργειας στο τεχνητό όριο του ταμιευτήρα και μπορούν να προσομοιώσουν φαινόμενα όπως τους κυματισμούς στην ελεύθερη επιφάνεια (sloshing), την αντίσταση στη μετάδοση κυμάτων στον πυθμένα του ταμιευτήρα λόγω ύπαρξης ιζημάτων και άλλα. (Muto, et al., 2012), (Maltidis & Stempniewski, 2013)

2.2.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ EULER

Σε μια κλασική μέθοδο ανάλυσης κατά Lagrange, οι κόμβοι βρίσκονται πάνω σε υλικό και τα στοιχεία παραμορφώνονται καθώς το υλικό παραμορφώνεται. Το κάθε στοιχείο Lagrange αποτελείται εξολοκλήρου από ένα υλικό και συνεπώς το όριο ενός υλικού συμπίπτει με το όριο κάποιων στοιχείων.

Αντίθετα, σε μια ανάλυση με στοιχεία Euler, οι κόμβοι βρίσκονται σε έναν κάνναβο στο χώρο ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή μη υλικών. Το υλικό ή τα υλικά ρέουν διαμέσου των στοιχείων Euler, ενώ αυτά παραμένουν σταθερά και απαραμόρφωτα στο χώρο.

Τα στοιχεία Euler δεν είναι απαραίτητα πληρωμένα 100% από υλικό, μπορεί να είναι τελείως κενά ή μερικώς πληρωμένα από κάθε υλικό. Το κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία δηλαδή, μπορεί να περιλαμβάνει ένα, κανένα ή περισσότερα από ένα υλικά την ίδια χρονική στιγμή. Κάθε χρονική στιγμή, για κάθε στοιχείο, υπολογίζεται ένας συντελεστής πλήρωσης του στοιχείου από κάθε υλικό. Έτσι το όριο του όγκου που καταλαμβάνει κάθε υλικό πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα και δε συμπίπτει αναγκαστικά με τα όρια των στοιχείων.

Τα στοιχεία Euler σχηματίζουν συνήθως ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλέγμα που εκτείνεται αρκετά πέρα από τα όρια των υλικών, έτσι ώστε να παρέχουν αρκετό χώρο στα υλικά να κινηθούν και να παραμορφωθούν. Αυτό, διότι εάν τα υλικά κινηθούν εκτός του χώρου του πλέγματος Euler, τότε χάνονται από την προσομοίωση.

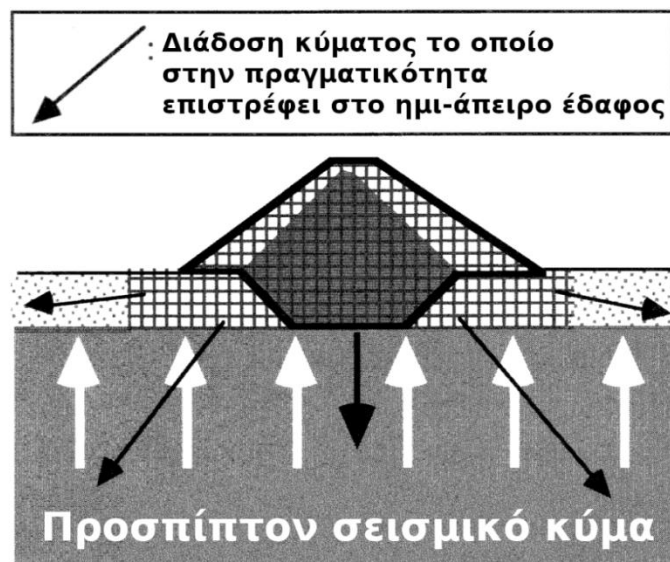
Σε ένα προσομοίωμα υπάρχει η δυνατότητα να συνυπάρχουν και να αλληλεπιδρούν στοιχεία Euler και στοιχεία Lagrange. Αυτές οι αναλύσεις, με σύζευξη στοιχείων Euler και Lagrange (CEL) χρησιμοποιούνται για να προσομοιώνουν προβλήματα αλληλεπίδρασης ρευστών με κατασκευές. Οι αναλύσεις με στοιχεία Euler είναι πολύ αποτελεσματικές όπου υπάρχουν υλικά που υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις όπως ροή ρευστού, πρόσκρουση κύματος ρευστού σε στερεό όριο, ροή αερίων, προβλήματα διάτρησης ή γενικότερα σε περιπτώσεις που τα κλασικά στοιχεία Lagrange χάνουν την ακρίβεια τους εξαιτίας μεγάλων παραμορφώσεων. (ABAQUS, 2014)

2.2.3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΡΕΥΣΤΟΥ (FLUID ELEMENTS)

Τα στοιχεία ρευστού είναι τρισδιάστατα στερεά στοιχεία στα οποία προσδίδονται οι ιδιότητες του νερού. Η μη συμπιεστότητα του νερού και η έλλειψη διατμητικής αντοχής εισάγονται με λόγο Poisson $\nu = 0.5$ ή κάποια τιμή πολύ κοντά σε αυτό και μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης $K = 2.2 \text{ GPa}$. Η προσομοίωση του νερού με στοιχεία στερεού επιφέρει αριθμητικές αστάθειες εξαιτίας της ύπαρξης ιδιάζουσων τιμών μηδενικής ενέργειας (zero energy modes). Οι αριθμητικές αυτές αστάθειες μπορούν να μετριαστούν με επιλογή κατάλληλων ελέγχων (όπως επιλογή ελέγχου ενέργειας κλεψύδρας), συνοριακών συνθηκών και κατάλληλων ιδιοτήτων υλικού. (Maltidis & Stempniewski, 2013)

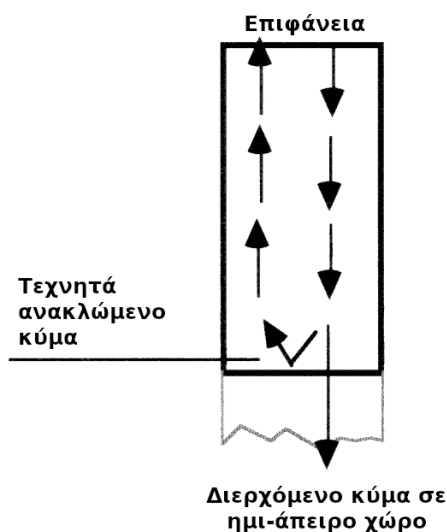
2.3. Συνοριακή συνθήκη απείρου (Infinite Boundary Condition)

Οι αριθμητικές αναλύσεις που γίνονται με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνουν συνήθως μοντέλα που προσομοιώνουν περιορισμένο τμήμα του εδάφους, παρόλο που το έδαφος στην πραγματικότητα είναι πρακτικά άπειρο. Ένα σεισμικό κύμα, στη φύση, αφού προσπίπτει στην επιφάνεια της κατασκευής, στη συνέχεια επιστρέφει ανακλώμενο πίσω στο ημι-άπειρο έδαφος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4 : Διάδοση σεισμικού κύματος στη φύση (Towhata, 2008)

Εξαιτίας της διαφοράς μεταξύ πραγματικότητας και προσομοιώματος μπορεί να παρεμποδιστεί αυτή η επιστροφή του σεισμικού κύματος καθώς αυτό ανακλάται τεχνητά από το τεχνητό όριο του προσομοιώματος αντί να διέλθει στο ημι-άπειρο χώρο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5 : Τεχνητή αντανάκλαση σεισμικής ενέργειας σε όριο αριθμητικού μοντέλου (Towhata, 2008)

Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το σφάλμα και να απομακρυνθεί η ανακλώμενη στα τεχνητά όρια του προσομοιώματος σεισμική ενέργεια, εισάγονται ειδικές συνοριακές συνθήκες.

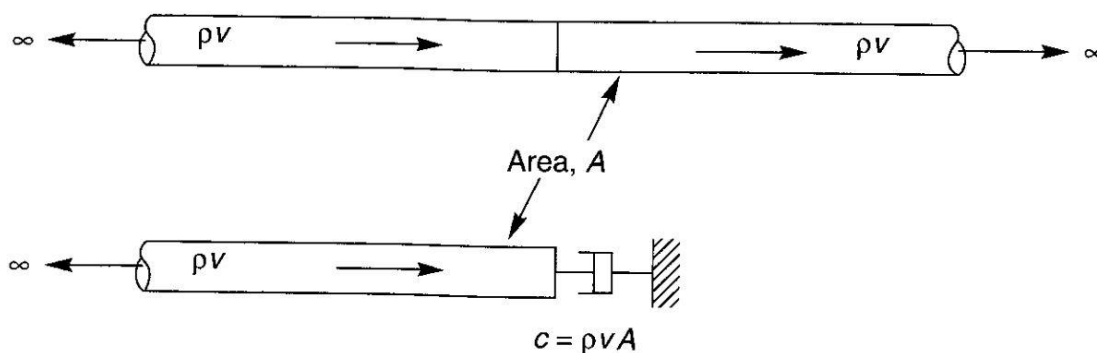
Συνοριακές συνθήκες που εξυπηρετούν αυτό το σκοπό, στο ABAQUS, είναι τα συνοριακά στοιχεία απείρου μήκους (infinite elements), οι ιξώδεις αποσβεστήρες (dashpots), η μη ανακλαστική επιφάνεια ακουστικού μέσου (simpedance) και άλλα.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται πώς το ημι-άπειρο έδαφος μπορεί να αντικατασταθεί, στα όρια του μοντέλου, από αποσβεστήρα που παρέχει συνοριακή συνθήκη ιξώδους απόσβεσης. Ο τρόπος υπολογισμού της σταθεράς του αποσβεστήρα παρουσιάζεται στη συνέχεια, στην παράγραφο 2.4.



Σχήμα 6 : Μηχανισμός συνοριακής συνθήκης ιξώδους απόσβεσης (Towhata, 2008)

2.4. Ανάλογο ιξώδους απορροφητήρα (αποσβεστήρα)



Σχήμα 7 : Μονοδιάστατο κύμα που οδεύει κατά μήκος απειρομήκους ράβδου (Kramer, 1996)

Αν ένα κύμα διαδίδεται κατά μήκος απειρομήκους ράβδου με διατομή A από συνεχές, ελαστικό υλικό, πυκνότητας ρ , τότε η συνολική δύναμη η οποία αναπτύσσεται σε τυχαία διατομή δίνεται από τον τύπο:

$$F = A \cdot \sigma = A \cdot M \cdot \varepsilon = -A \cdot M \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = (\rho \cdot V \cdot A) \dot{u} \quad (7)$$

Όπου, A : Το εμβαδό της διατομής της ράβδου
 σ : Αναπτυσσόμενη τάση
 ε : Παραμόρφωση
 M : Το κατάλληλο μέτρο δυσκαμψίας του υλικού
 u : Μετατόπιση υλικού σημείου
 \dot{u} : Ταχύτητα υλικού σημείου
 ρ : Η πυκνότητα του υλικού διάδοσης
 V : Ταχύτητα διάδοσης κύματος

Το τμήμα της ράβδου δεξιά της τυχαίας διατομής μπορεί να αντικατασταθεί με ιξώδη απορροφητήρα. Προκειμένου η κίνηση αριστερά της τυχαίας διατομής να μην επηρεαστεί από την αντικατάσταση αυτή, θα πρέπει ο αποσβεστήρας να επιβάλλει την ίδια δύναμη στη διατομή. Θα πρέπει δηλαδή να ισχύει $F = C \dot{u} = (\rho \cdot V \cdot A) \dot{u}$.

Τελικά, η σταθερά του αποσβεστήρα δίνεται από τον τύπο:

$$C = \rho \cdot V \cdot A \quad (8)$$

Ο αποσβεστήρας απορροφά πλήρως την ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος και δεν επέρχεται αντανάκλαση. (Γκαζέτας, 1995)

Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων προκύπτει από τη σχέση:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

Η ταχύτητα διάδοσης διαμήκων (ή διαστολικών) κυμάτων προκύπτει από τη σχέση:

$$V_p = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (10)$$

Όπου, G : Το μέτρο διάτμησης του υλικού διάδοσης
 D : Το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης
 ρ : Η πυκνότητα του υλικού διάδοσης

Τέλος, το μέτρο διάτμησης G δίνεται από τη σχέση :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (11)$$

και το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης από τη σχέση :

$$D = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (12)$$

Όπου, E : Το μέτρο ελαστικότητας
 ν : Ο λόγος Poisson

2.5. Υπολογισμός απόσβεσης Rayleigh (Rayleigh damping)

Η απόσβεση στις κατασκευές οφείλεται στην ύπαρξη μη γραμμικών φαινομένων που προκαλούν απώλειες ενέργειας. Στο ABAQUS, όπως και στα περισσότερα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, παρέχεται η δυνατότητα να συμπεριληφθεί στις ιδιότητες υλικού απόσβεση Rayleigh. Η απόσβεση Rayleigh περιλαμβάνει μια παράμετρο απόσβεσης λόγω μάζας και μια παράμετρο απόσβεσης λόγω δυσκαμψίας, οι οποίες συνδυαστικά δίνουν τη συνολική ποσοστιαία κρίσιμη απόσβεση, ξ. (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)

Ο όρος a_R , ο συντελεστής απόσβεσης λόγω μάζας, εισάγει δυνάμεις απόσβεσης που προκαλούνται από τις απόλυτες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στο προσομοίωμα και σχετίζονται με άνοιγμα αρμών ή απώλειες τριβής σε αρμούς.

Ο όρος b_R , ο συντελεστής απόσβεσης λόγω δυσκαμψίας, εισάγει απόσβεση ανάλογη του ρυθμού παραμόρφωσης που σχετίζεται με το ίδιο το υλικό του μέσου.

Για τον ορισμό της απόσβεσης Rayleigh αρκεί να ορισθούν, για κάθε υλικό, οι δύο συντελεστές απόσβεσης: ο συντελεστής a_R “alpha” για την απόσβεση που εξαρτάται από τη μάζα και ο συντελεστής b_R “beta”, για την απόσβεση που είναι ανάλογη της δυσκαμψίας. (ABAQUS, 2014)

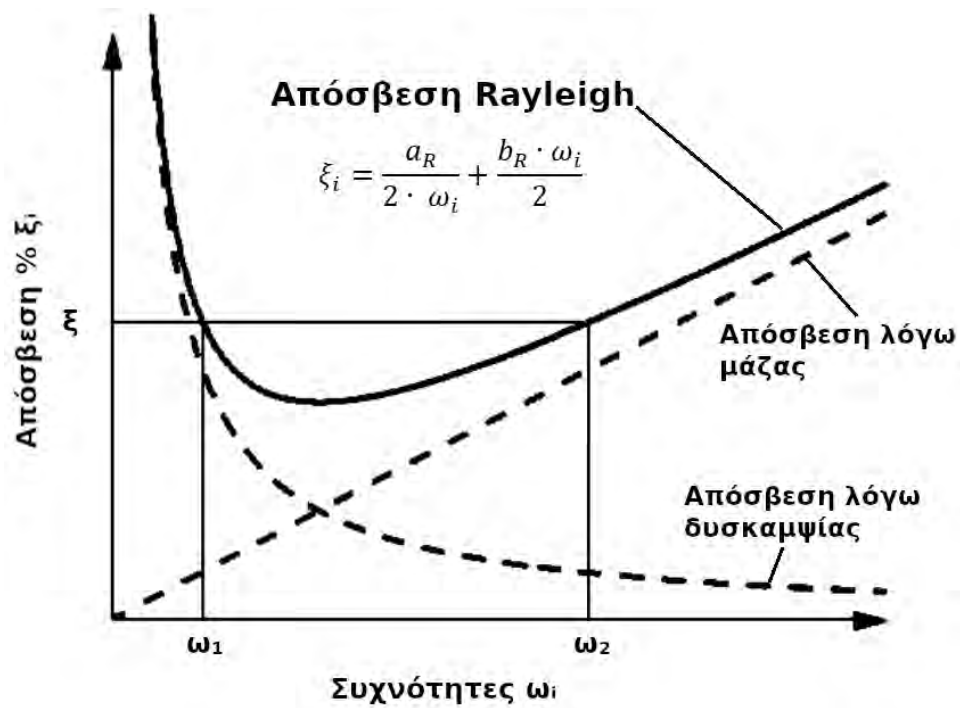
Η εξίσωση που δίνει τη κρίσιμη απόσβεση είναι :

$$\xi_i = \frac{a_R}{2 \cdot \omega_i} + \frac{b_R \cdot \omega_i}{2} = \frac{a_R}{4 \cdot \pi \cdot f_i} + b_R \cdot \pi \cdot f_i \quad (13)$$

Όπου, ξ_i : Κρίσιμη απόσβεση για ω_i (%)
 a_R : Συντελεστής απόσβεσης λόγω μάζας
 b_R : Συντελεστής απόσβεσης λόγω δυσκαμψίας
 ω_i : Συχνότητα ταλάντωσης (rad/sec) $\omega_i = 2\pi f_i$
 f_i : Συχνότητα ταλάντωσης (Hz)

Μια μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων a_R και b_R είναι να επιλεγθούν δύο συχνότητες ταλάντωσης f_1 και f_2 (για παράδειγμα η 1^η ιδιοσυχνότητα και μια πολλαπλάσια συχνότητα αυτής), στις οποίες η απόσβεση ισούται με την επιθυμητή τιμή. Οι τιμές που παίρνει η απόσβεση στο εύρος συχνοτήτων ενδιαμέσως στις

επιλεγμένες είναι ελαφρώς μικρότερη από την επιλεγμένη και εκτός αυτού του διαστήματος συχνοτήτων, σημαντικά μεγαλύτερη.



Σχήμα 8: Καμπύλη απόσβεσης Rayleigh

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση Μεθόδων

Για τη δημιουργία των αριθμητικών προσομοιωμάτων της παρούσας εργασίας έγινε χρήση του λογισμικού γενικής χρήσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και συγκεκριμένα η έκδοση 6.14 (2014).

3.1. Αριθμητικές αναλύσεις με ακουστικά στοιχεία

Στην παρούσα μελέτη οι υδροδυναμικές πιέσεις προκύπτουν απευθείας από την πίεση των ακουστικών στοιχείων. Έτσι, αρχικά, ήταν αναγκαίο να επαληθευθεί ότι το μοντέλο στο οποίο η προσομοίωση του ταμιευτήρα γίνεται με ακουστικά στοιχεία δίνει παρόμοιες τιμές υδροδυναμικών πιέσεων με αριθμητικές λύσης προστιθέμενης μάζας.

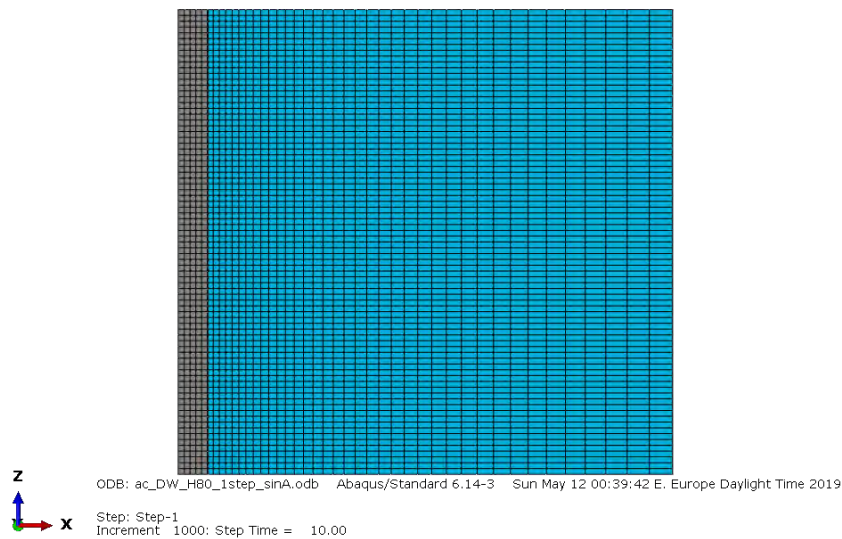
Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν δύο βασικά προσομοιώματα που αποτελούνται από δύο τμήματα (parts) το καθένα. Και τα δύο προσομοιώματα περιλαμβάνουν ένα φράγμα ύψους $H = 80$ m και πλάτους 5 m και τον ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας έχει ύψος επίσης 80 m και μήκος στο ένα προσομοίωμα $L = H = 80$ m και στο δεύτερο $L = 2H = 160$ m. Τα δύο μοντέλα έχουν πλάτος 1 m κατά μήκος του άξονα y (βάθος), δηλαδή είναι πρακτικά δύο διαστάσεων (2D), αλλά υλοποιούνται με στοιχεία τριών διαστάσεων.

Τα τμήματα του φράγματος και του ταμιευτήρα ενώνονται μεταξύ τους με συνένωση των αντίστοιχων κόμβων (εντολή *tie)

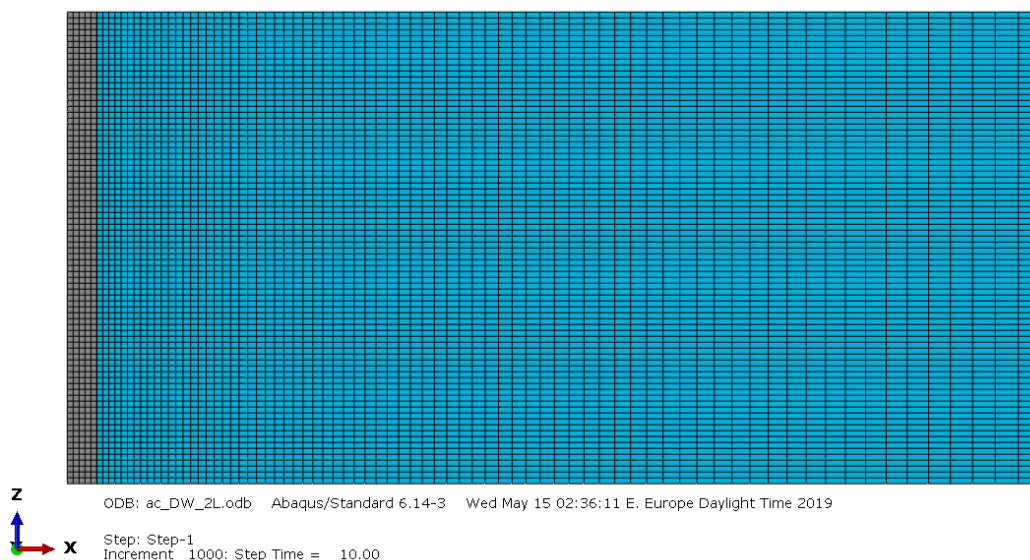
Διακριτοποίηση

Το τμήμα του φράγματος αποτελείται από κάνναβο $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ και τρισδιάστατα, οκτακομβικά, πεπερασμένα στοιχεία μειωμένου βαθμού ολοκλήρωσης C3D8R (8-node linear brick, reduced integration with hourglass control).

Το τμήμα του ταμιευτήρα και στα δύο προσομοιώματα συγκροτείται από τρισδιάστατα, οκτακομβικά ακουστικά πεπερασμένα στοιχεία AC3D8 (8-node linear acoustic brick), σε κάνναβο με σταθερή πυκνότητα (κατά μήκος του άξονα z) και διαβαθμισμένη πυκνότητα πλέγματος, έτσι ώστε το πλέγμα να είναι πυκνότερο κοντά στο φράγμα και πιο αδρό σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτό.



Σχήμα 9 : Προσομοίωμα φράγματος-ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας έχει μήκος 80 m και προσομοιώνεται με ακουστικά στοιχεία.



Σχήμα 10 : Προσομοίωμα φράγματος-ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας έχει μήκος 160 m και προσομοιώνεται με ακουστικά στοιχεία.

Ιδιότητες Υλικών

Το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα είναι σκυρόδεμα ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό, με πυκνότητα $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E = 3.1 \cdot 10^7 \text{ kPa} = 31 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$.

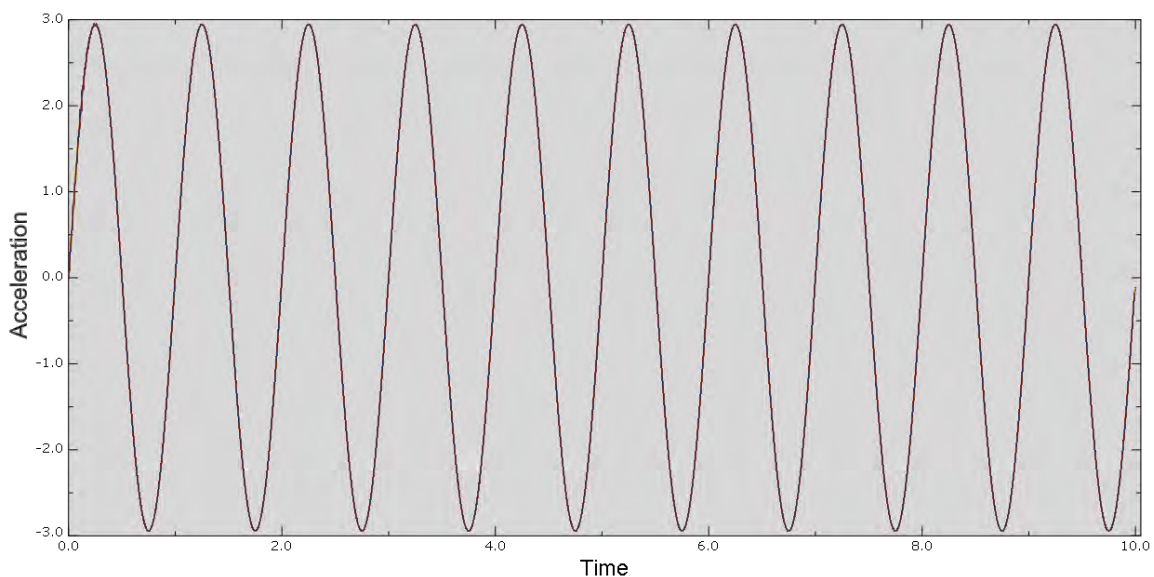
Το νερό του ταμιευτήρα θεωρήθηκε συμπιεστό με μέτρο συμπιεστότητας (bulk modulus) $K = 2.2 \cdot 10^6 \text{ kPa} = 2.2 \text{ GPa}$ και πυκνότητα $\rho_w = 1 \text{ t/m}^3$.

Επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση

Η ανάλυση περιλαμβάνει ένα μόνο βήμα δυναμικής ανάλυσης, στο οποίο γίνεται παραδοχή γραμμικότητας της γεωμετρίας. Σε αυτό το βήμα, το μόνο φορτίο που επιβάλλεται είναι αρμονικές, ημιτονοειδείς επιταχύνσεις κατά τη διεύθυνση του άξονα x στη βάση του φράγματος αλλά και στην κατάντη παρειά του, έτσι ώστε το φράγμα να συμπεριφερθεί πρακτικά σαν ένα άκαμπτο στοιχείο. Παραλείπεται η επιβολή της βαρύτητας και των υδροστατικών δυνάμεων προκειμένου οι πιέσεις του νερού της λεκάνης να οφείλονται αποκλειστικά στις υδροδυναμικές πιέσεις.

Στο Σχήμα 11 απεικονίζεται η χρονοϊστορία των επιβαλλόμενων ημιτονοειδών επιταχύνσεων. Η συχνότητά τους είναι 1 Hz και το μέγιστο μέτρο τους είναι :

$$0.3g = 0.3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 2.943 \text{ m/s}^2$$



Σχήμα 11 : Επιβαλλόμενη οριζόντια αρμονική επιτάχυνση στη βάση του φράγματος

Συνοριακές Συνθήκες

Η εκτός επιπέδου κίνηση (κατά τον άξονα y) δεσμεύεται και στα δύο προσομοιώματα. Η καθ' ύψος κίνηση (κατά τον άξονα z) δεσμεύεται στη βάση του φράγματος και του ταμιευτήρα.

Η πίεση των ακουστικών στοιχείων μηδενίζεται, στο υψόμετρο $z = 80 \text{ m}$, που βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

Τέλος, αποτρέπεται η τεχνητή ανάκλαση κυμάτων (με την εντολή *Simpedance, nonreflecting = IMPROVED) στο άκρο του ταμιευτήρα που βρίσκεται μακριά από το φράγμα ($x = 80 \text{ m}$ και 160 m , αντίστοιχα, στα δύο προσομοιώματα). Με αυτή την εντολή αποτρέπεται η συσσώρευση ενέργειας κατά τη διάρκεια της επιβολής του δυναμικού φορτίου, καθώς επιτρέπει τη διέλευση των προσπιπτόντων κυμάτων πίεσης στο όριο του προσομοιώματος χωρίς να δημιουργεί αντανάκλασεις.

3.2. Westergaard αναλυτική λύση

Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών πιέσεων με βάση την αναλυτική λύση προστιθέμενης μάζας Westergaard έγινε με χρήση των εξισώσεων (1) και (2).

$$b(z) = \frac{7}{8} \cdot \sqrt{h \cdot z}$$

$$P(z) = b \cdot \gamma_w \cdot a_c \cdot g$$

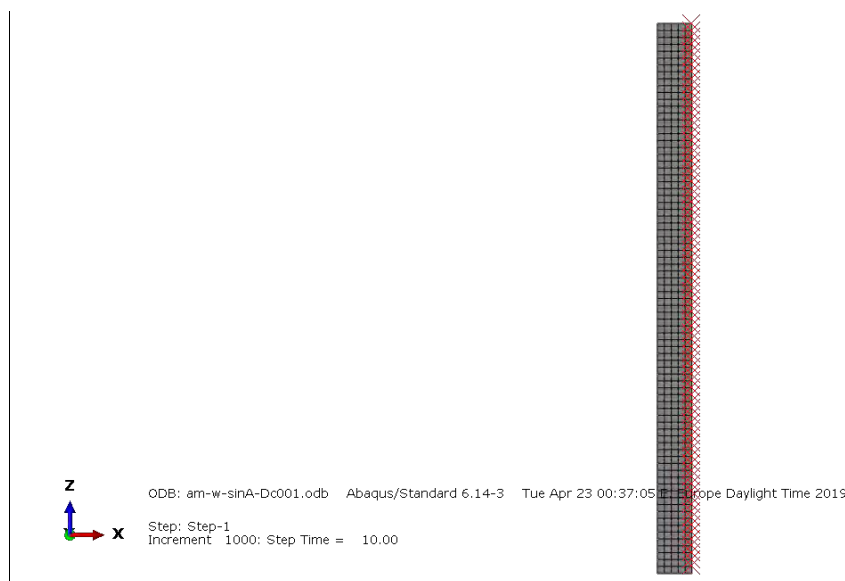
Όπου z η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών πιέσεων έγινε ανά 1 m βάθους.

Στους υπολογισμούς, το βάθος του νερού λήφθηκε $h = 80$ m, η πυκνότητα του νερού $\gamma_w = 1$ t/m³, η επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9.81$ m/s² και ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης $a_c = 0.3$.

3.3. Westergaard αριθμητική λύση

Για την ενσωμάτωση της μεθόδου προστιθέμενης μάζας Westergaard στο ABAQUS δημιουργήθηκε προσομοίωμα αποτελούμενο από ένα τμήμα, το φράγμα, ύψους 80 m, πλάτους 5 m και βάθους 1 m.

Τα στοιχεία που αποτελούν το τμήμα του φράγματος είναι τρισδιάστατα, οκτακομβικά, πεπερασμένα στοιχεία μειωμένου βαθμού ολοκλήρωσης C3D8R (8-node linear brick, reduced integration with hourglass control) διαστάσεων 1m × 1m × 1m.



Σχήμα 12 : Προσομοίωμα φράγματος με ανάντη στοιχεία χρήστη προστιθέμενης μάζας

Η προστιθέμενη μάζα του νερού εισάγεται με τη βοήθεια ειδικών στοιχείων χρήστη (user elements). Τα χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου χρήστη υπολογίζονται καλώντας αντίστοιχη υπορουτίνα αναπτυγμένη από το χρήστη, σε γλώσσα την οποία υποστηρίζει το ABAQUS (C, C++ και FORTRAN). Στην προκειμένη περίπτωση, καλείται υπορουτίνα ανεπτυγμένη σε FORTRAN. Η υπορουτίνα αυτή λαμβάνει σαν ορίσματα από το χρήστη :

1. το βάθος του ταμιευτήρα
2. τη συντεταγμένη του άξονα z στην οποία βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια του νερού (στάθμη ταμιευτήρα)
3. την πυκνότητα του νερού

Στη συνέχεια, υπολογίζει την προστιθέμενη μάζα ανά στοιχείο, με βάση την θεωρία του Westergaard και προκύπτουν στοιχεία χρήστη επίπεδα, τετρακομβικά, με μάζα ίση με τη προστιθέμενη μάζα κατά Westergaard για εμβαδό ίσο με το εμβαδό του στοιχείου.

Σε αυτή την ανάλυση οι υδροδυναμικές πιέσεις λαμβάνονται από τις τάσεις s_{11} οι οποίες αναπτύσσονται στην ανάντη επιφάνεια του φράγματος, σαν αντίδραση των υδροδυναμικών πιέσεων. Προκειμένου να υπολογιστούν μόνο οι υδροδυναμικές πιέσεις και να μη συμμετέχουν οι αδρανειακές δυνάμεις του φράγματος στα αποτελέσματα, το υλικό από το οποίο αποτελείται το προσομοίωμα του φράγματος θεωρείται εδώ μηδενικής πρακτικά μάζας με πυκνότητα $\rho = 0.001 \text{ t/m}^3$, ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό με μέτρο Poisson $\nu = 0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 3.1 \cdot 10^7 \text{ kPa} = 31 \text{ GPa}$.

Η ανάλυση αποτελείται από ένα μόνο βήμα δυναμικής ανάλυσης κατά τη διάρκεια του οποίου, στη βάση του φράγματος και στην κατάντη παρειά του, επιβάλλεται αρμονική, ημιτονοειδής επιτάχυνση κατά τη διεύθυνση του άξονα x. Η χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 11. Η μέγιστη τιμή είναι : $0.3g = 2.943 \text{ m/s}^2$ και η συχνότητα 1 Hz. Δεν επιβάλλεται η βαρύτητα ούτε και οι υδροστατικές πιέσεις.

Η εκτός επιπέδου κίνηση (κατά τον άξονα y) δεσμεύεται. Στη βάση του φράγματος, δεσμεύεται η καθ' ύψος κίνηση (κατά τον άξονα z).

3.4. Zangar αναλυτική λύση

Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών πιέσεων με βάση την αναλυτική λύση προστιθέμενης μάζας Zangar έγινε με χρήση των εξισώσεων (3) και (4).

$$P(z) = C(z) \cdot \gamma_w \cdot a_c \cdot g \cdot h$$

$$C(z) = 0.5 C_m \cdot \left[\frac{z}{h} \cdot \left(2 - \frac{z}{h} \right) + \sqrt{\frac{z}{h} \cdot \left(2 - \frac{z}{h} \right)} \right]$$

Όπου z η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών πιέσεων έγινε ανά 1 m βάθους.

Ο συντελεστής C_m , για κατακόρυφη ανάντη παρειά του φράγματος, λαμβάνει την τιμή $C_m = 0.743$ (για κατακόρυφη ανάντη επιφάνεια φράγματος $\theta = 0^\circ$). Οι υπόλοιπες μεταβλητές λαμβάνουν ίδιες τιμές με την αναλυτική λύση Westergaard.

3.5. Zangar αριθμητική λύση

Για την αριθμητική λύση Zangar με χρήση του κώδικα ABAQUS χρησιμοποιήθηκε προσομοίωμα ίδιας γεωμετρίας με αυτό της αριθμητικής λύσης Westergaard.

Αποτελείται από ένα τμήμα φράγματος, με ύψος 80 m, πλάτος 5 m και βάθος 1 m, τα στοιχεία του οποίου είναι τρισδιάστατα, οκτακομβικά, πεπερασμένα στοιχεία μειωμένου βαθμού ολοκλήρωσης C3D8R (8-node linear brick, reduced integration with hourglass control) διαστάσεων $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$.

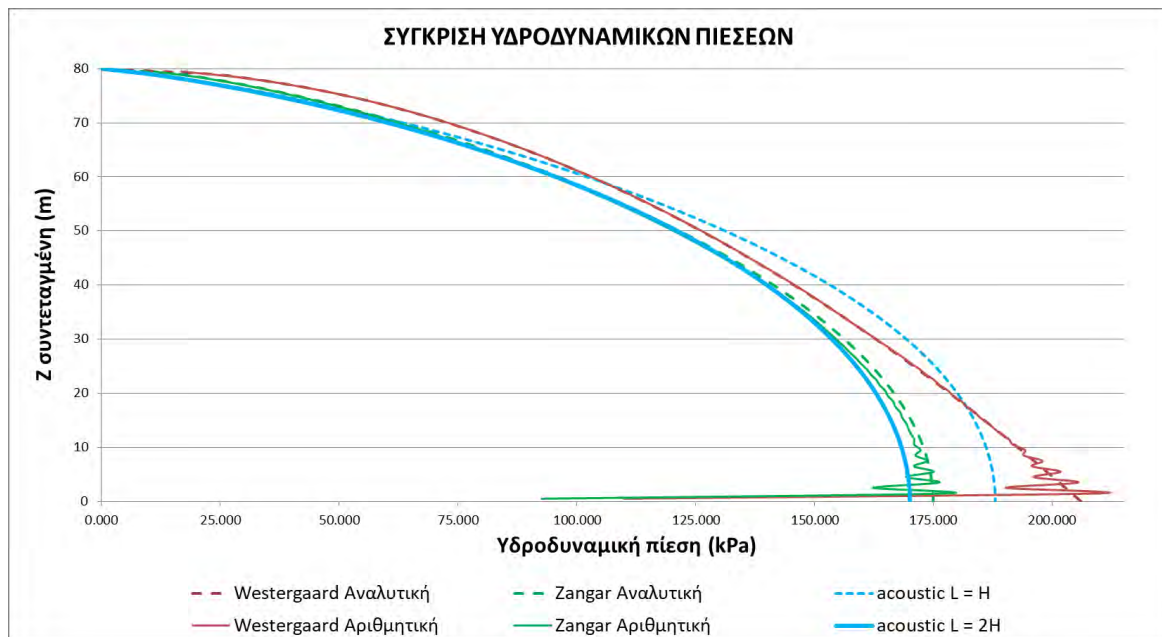
Η προστιθέμενη μάζα εισάγεται με στοιχεία χρήστη (user elements), των οποίων τα χαρακτηριστικά ορίζονται μέσω υπορουτίνας FORTRAN. Τα στοιχεία χρήστη, είναι επίπεδα, τεσσάρων κόμβων και η προστιθέμενη μάζα κατά Zangar υπολογίζεται από την υπορουτίνα λαμβάνοντας σαν ορίσματα από το χρήστη :

1. το βάθος του ταμιευτήρα
2. τη συντεταγμένη του άξονα z στην οποία βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια του νερού (στάθμη ταμιευτήρα)
3. την πυκνότητα του νερού
4. το συντελεστή πίεσης C_m (μέγιστη τιμή του συντελεστή C)
5. $\cos(\theta^\circ)$, το συνημίτονο της ανάντη κλίσης του φράγματος

Οι ιδιότητες των υλικών, τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης και οι υπόλοιπες παραδοχές και συνοριακές συνθήκες είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο Westergaard.

3.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα όλων των επιλύσεων, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 13, καταδεικνύουν ότι η αναλυτική λύση Westergaard ταυτίζεται με την αριθμητική λύση Westergaard και αντίστοιχα η αναλυτική λύση Zangar ταυτίζεται με την αριθμητική λύση Zangar. Οι έντονες διακυμάνσεις των υδροδυναμικών πιέσεων που παρουσιάζονται κοντά στη βάση του φράγματος, στις αριθμητικές λύσεις των μεθόδων προστιθέμενης μάζας, αποτελούν αριθμητικά σφάλματα που δεν αλλάζουν την ουσία των αποτελεσμάτων. Οφείλονται στην παρουσία άκαμπτου ορίου στη βάση του προσομοιώματος και η εμφάνισή τους θα ήταν πιο περιορισμένη εάν η διακριτοποίηση ήταν περισσότερο λεπτομερής.



Σχήμα 13: Σύγκριση υδροδυναμικών πιέσεων από την αναλυτική και αριθμητική λύση κατά Westergaard, την αναλυτική και αριθμητική λύση κατά Zangar και από αριθμητική λύση με χρήση ακουστικών στοιχείων για την προσομοίωση του νερού του ταμιευτήρα.

Η λύση προστιθέμενης μάζας Westergaard είναι η πλέον συντηρητική. Η μέγιστη υδροδυναμική πίεση που υπολογίζεται με βάση αυτή την επίλυση είναι 206 kPa .

Με τη μέθοδο προστιθέμενης μάζας τροποποιημένη κατά Zangar η μέγιστη υπολογιζόμενη υδροδυναμική πίεση είναι 175 kPa.

Η αριθμητική ανάλυση με ταμιευτήρα μήκους ίσου με το ύψος του φράγματος ($L = H$) δίνει αποτελέσματα σε ενδιάμεσες τιμές, με τη μέγιστη υδροδυναμική πίεση να φτάνει τα 190 kPa.

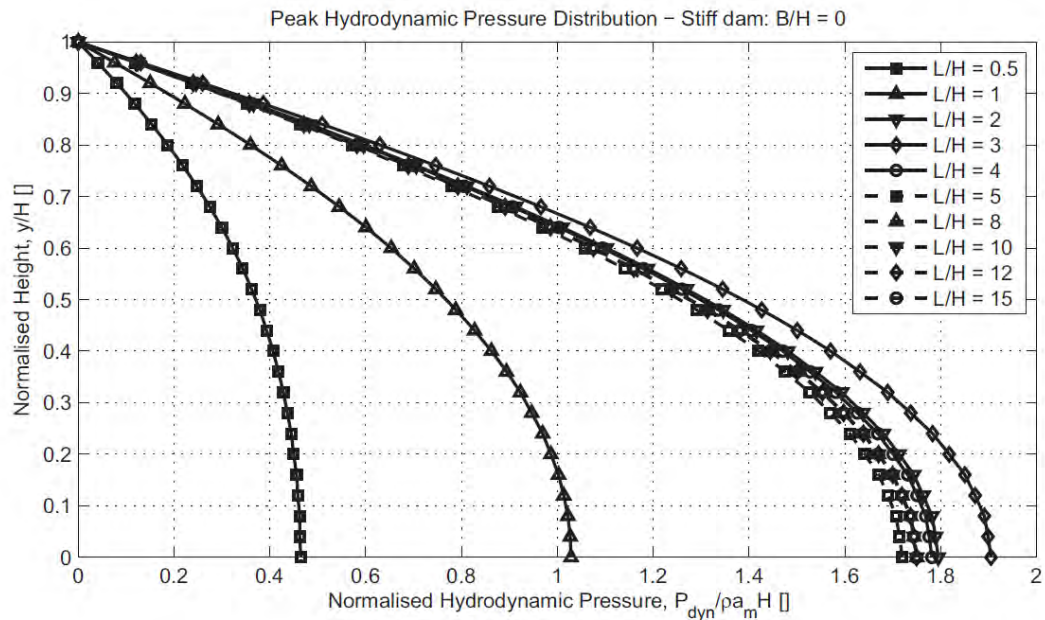
Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης με ταμιευτήρα μήκους ίσου με δύο φορές το ύψος του φράγματος ($L = 2H$) βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τη μέθοδο Zangar, με τη μέγιστη υδροδυναμική πίεση να φτάνει τα 170 kPa.

Η διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων με προσομοίωση του ταμιευτήρα με ακουστικά στοιχεία είναι αρκετά σημαντική. Τα αποτελέσματα από το προσομοίωμα με τον ταμιευτήρα μεγαλύτερου μήκους θεωρούνται πιο ακριβή. Όσο πιο μακριά βρίσκεται το τεχνητό, ανάντη όριο του ταμιευτήρα και όσο μεγαλύτερη μάζα νερού περιλαμβάνεται στο προσομοίωμα, τόσο πιο μικρή είναι η επιρροή είναι η επιρροή του ορίου αυτού στις υδροδυναμικές πιέσεις που ασκούνται στο φράγμα. (PELECANOS, 2013)

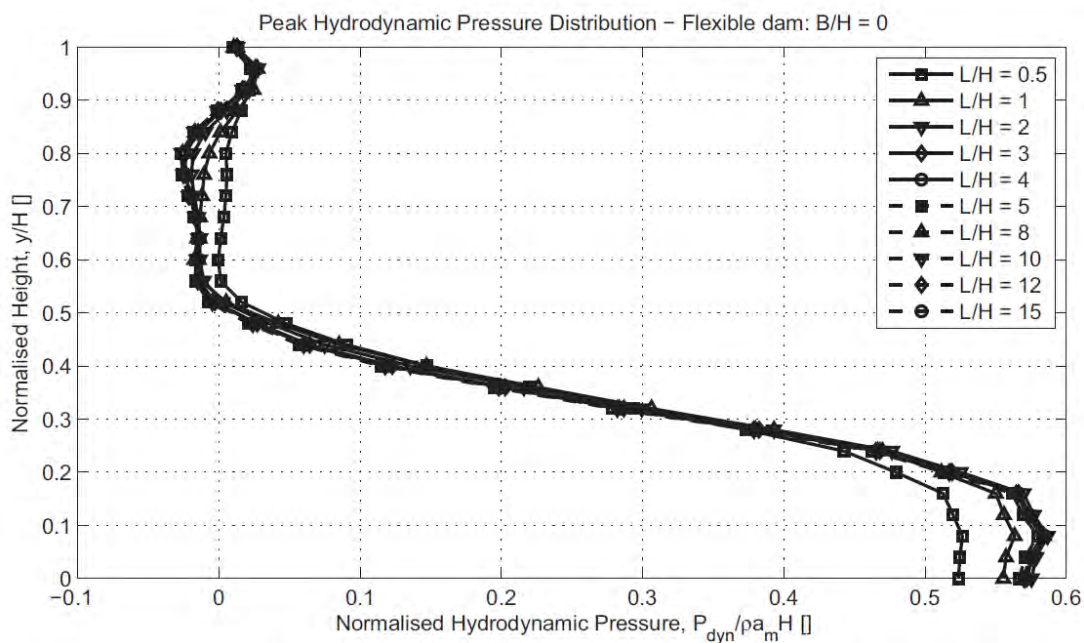
Ακόμα καλύτερα αποτελέσματα θα εξάγονταν από μεγαλύτερα μήκη ταμιευτήρα. Ο Πελεκάνος (PELECANOS, 2013) προτείνει για άκαμπτο κατακόρυφο φράγμα, μήκη ταμιευτήρα μεγαλύτερα των $5H$, ενώ για εύκαμπτο κατακόρυφο φράγμα, μήκη ταμιευτήρα μεγαλύτερα των $2H$.

Στο Σχήμα 14 και στο Σχήμα 15 φαίνονται οι καθ' ύψος κατανομές των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων σε κατακόρυφο άκαμπτο και εύκαμπτο αντίστοιχα φράγμα για διαφορετικά μήκη ταμιευτήρα.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας κρίθηκε επαρκές μήκος ταμιευτήρα το $L = 2H = 160$ m.

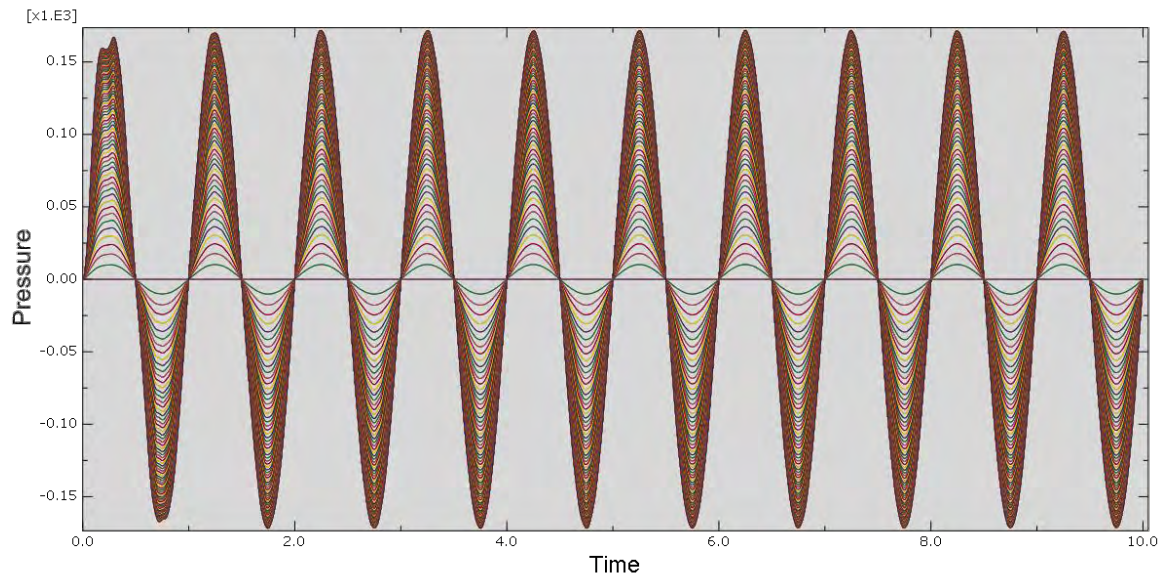


Σχήμα 14 : Κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων σε άκαμπτο κατακόρυφο φράγμα, με διάφορα μήκη ταμιευτήρα (PELECANOS, 2013)



Σχήμα 15 : Κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο κατακόρυφο φράγμα, με διάφορα μήκη ταμιευτήρα (PELECANOS, 2013)

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία των υδροδυναμικών πιέσεων που ασκούνται στο φράγμα, κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης, όπως τελικά προκύπτουν από το προσομοίωμα με ταμιευτήρα μήκους $L = 2H$ και ακουστικά στοιχεία.



Σχήμα 16 Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων (ακουστικά στοιχεία $L=2H$)

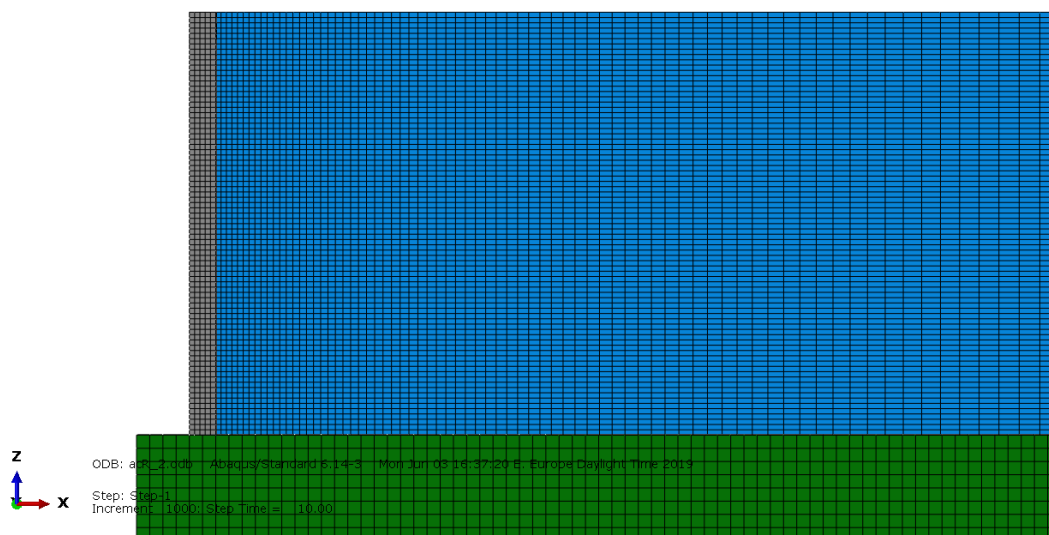
Κεφάλαιο 4: Παραμετρικές Αναλύσεις

4.1. Επίδραση ευκαμψίας βάσης

Προκειμένου να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η ευκαμψία του βράχου της θεμελίωσης τις υδροδυναμικές πιέσεις που δέχεται το φράγμα από τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης κατασκευάστηκαν τρία διαφορετικά προσομοιώματα.

1. Άκαμπτο φράγμα σε άκαμπτο βράχο
2. Εύκαμπτο φράγμα σε άκαμπτο βράχο
3. Εύκαμπτο φράγμα σε εύκαμπτο βράχο

4.1.1. ΆΚΑΜΠΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΑΚΑΜΠΤΟ ΒΡΑΧΟ



Σχήμα 17 : Προσομοίωμα άκαμπτου φράγματος σε άκαμπτο βράχο

Γεωμετρία

Το αριθμητικό προσομοίωμα περιλαμβάνει τρία τμήματα. Όλα τα τμήματα έχουν 1 m βάθος (διάσταση κατά τη διεύθυνση του άξονα y) με σκοπό να συμπεριφέρεται το προσομοίωμα σαν δύο διαστάσεων. Το φράγμα είναι ύψους 80 m και πλάτους 5 m, ο ταμιευτήρας έχει ύψος 80 m και μήκος 160 m και τέλος η θεμελίωση αποτελείται από τμήμα βράχου ύψους 20 m και μήκους 175 m.

Τα τρία αυτά τμήματα ενώνονται μεταξύ τους με συνένωση των αντίστοιχων κόμβων (εντολή *Tie) με εξαίρεση δέσμευσης των βαθμών ελευθερίας που αφορούν περιστροφή. Με αυτό τον τρόπο είναι δεσμευμένη η μετακίνηση αλλά όχι η περιστροφή ανάμεσα σε φράγμα - βράχο, φράγμα – ταμιευτήρα και βράχο –ταμιευτήρα.

Διακριτοποίηση

Τα τμήματα του φράγματος και του βράχου αποτελούνται από τρισδιάστατα, οκτακομβικά, πεπερασμένα στοιχεία μειωμένου βαθμού ολοκλήρωσης C3D8R (8-node linear brick, reduced integration with hourglass control) τα οποία βρίσκονται σε κάρναβο $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ και $2.5\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ αντίστοιχα.

Το τμήμα του ταμιευτήρα αποτελείται από τρισδιάστατα, οκτακομβικά ακουστικά πεπερασμένα στοιχεία AC3D8 (8-node linear acoustic brick), σε κάρναβο με σταθερή πυκνότητα 1 m καθ' ύψος (κατά μήκος του άξονα z) και διαβαθμισμένη πυκνότητα στον οριζόντιο άξονα x έτσι ώστε το πλέγμα να είναι πυκνότερο κοντά στο φράγμα και πιο αδρό σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτό.

Ιδιότητες Υλικών

Το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα είναι σκυρόδεμα με πυκνότητα $\rho = 2.5\text{ t/m}^3$ το οποίο θεωρήθηκε ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό με λόγο Poisson $\nu = 0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 3.1 \cdot 10^7\text{ kPa} = 31\text{ GPa}$.

Το νερό του ταμιευτήρα θεωρήθηκε συμπιεστό με μέτρο συμπιεστότητας (bulk modulus) $K = 2.2 \cdot 10^6\text{ kPa} = 2.2\text{ GPa}$ και πυκνότητα $\rho_w = 1\text{ t/m}^3$.

Το υλικό από το οποίο αποτελείται η θεμελίωση είναι βράχος με πυκνότητα $\rho = 2.6\text{ t/m}^3$. Θεωρήθηκε ομογενής, ισότροπος και γραμμικά ελαστικός με λόγο Poisson $\nu = 0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 2.5 \cdot 10^7\text{ kPa} = 25\text{ GPa}$.

Τόσο στο σκυρόδεμα του φράγματος όσο και στο βράχο της θεμελίωσης προβλέπεται λόγος κρίσιμης απόσβεσης τύπου Rayleigh ίσος προς 5%.

Επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση

Η ανάλυση περιλαμβάνει ένα βήμα δυναμικής ανάλυσης, στο οποίο προβλέπεται μη γραμμικότητας της γεωμετρίας (nlgeom=YES).

Στο βήμα αυτό επιβάλλεται συνημιτονοειδής επιτάχυνση, κατά την οριζόντια διεύθυνση, στη βάση του βράχου, στη κατακόρυφη πλευρά του βράχου κατάντη του φράγματος αλλά και στη κατάντη παρειά του ίδιου του φράγματος. Στόχος είναι να λειτουργήσουν σαν ενιαίο άκαμπτο σώμα το φράγμα και ο βράχος. Δεν επιβάλλεται βαρύτητα και υδροστατικές δυνάμεις προκειμένου οι πιέσεις που υπολογίζονται στα ακουστικά στοιχεία, από τα οποία αποτελείται ο ταμιευτήρας, να οφείλονται αποκλειστικά στις υδροδυναμικές πιέσεις.

Στο Σχήμα 18 απεικονίζεται η χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης ημιτονοειδούς οριζόντιας επιτάχυνσης, με συχνότητα 1 Hz και πλάτος $0.3g = 2.943\text{ m/s}^2$.



Σχήμα 18 : Επιβαλλόμενη οριζόντια επιτάχυνση

Συνοριακές Συνθήκες

Η εκτός επιπέδου κίνηση (κατά τον άξονα y) καθώς και η καθ' ύψος κίνηση (κατά τον άξονα z) δεσμεύεται στη θεμελίωση και στο φράγμα.

Η πίεση των ακουστικών στοιχείων μηδενίζεται στο υψόμετρο $z = 80$ m, που βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

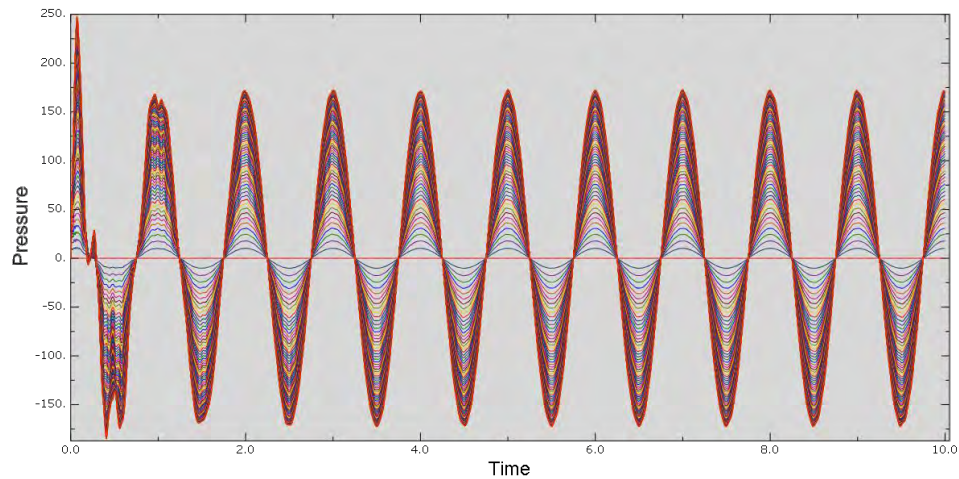
Τέλος, αποτρέπεται η τεχνητή ανάκλαση κυμάτων στο άκρο του ταμιευτήρα που βρίσκεται μακριά από το φράγμα ($x = 160$ m), ενώ επιτρέπεται η διέλευση των προσπιπτόντων κυμάτων πίεσης και η ακτινοβολία κινητικής ενέργειας προς τον εκτός του προσομοιώματος χώρο.

Αποτελέσματα

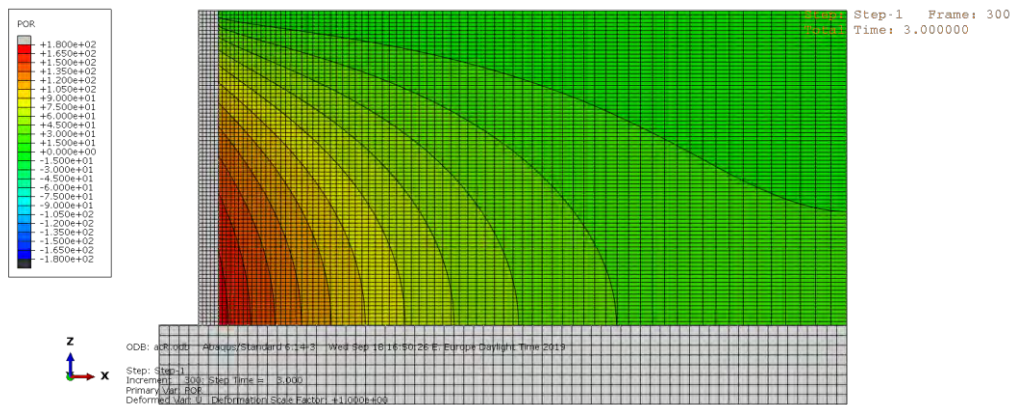
Η χρονοϊστορία της εξέλιξης των υδροδυναμικών πιέσεων για διάφορα σημεία καθ' ύψος της ανάντη κατακόρυφης πλευράς του φράγματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 19. Στο Σχήμα 20 φαίνεται η κατανομή των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων που αναπτύσσονται στο ακουστικό μέσο τη χρονική στιγμή $t = 3.00$ sec, ενώ αντίστοιχα στο Σχήμα 21 των ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή $t = 2.50$ sec

Σε αυτή την ανάλυση, η μέγιστη τιμή υδροδυναμικής πίεσης που παρουσιάστηκε στην ανάντη επιφάνεια του φράγματος ήταν 173 kPa και η ελάχιστη -173 kPa.

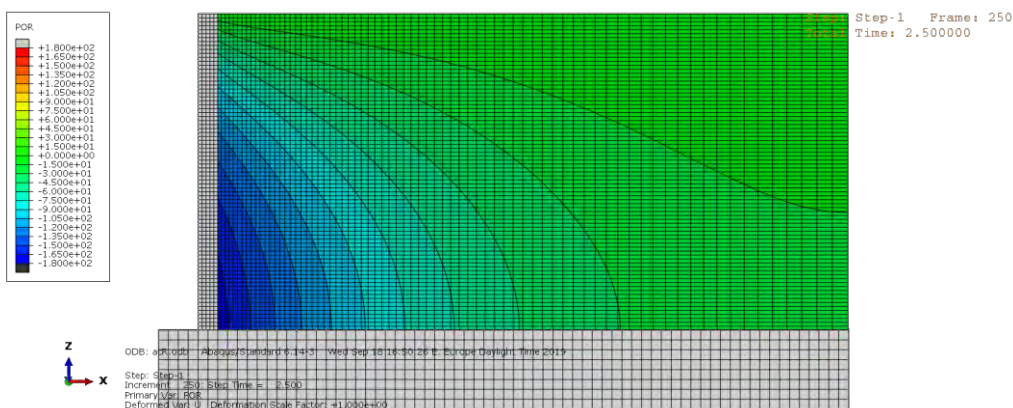
Δεν λαμβάνονται υπόψη οι (μεγαλύτερες) μεταβατικές πιέσεις (έως 248 kPa) που φαίνεται να αναπτύσσονται στιγμιαία πριν σταθεροποιηθεί το σύστημα θεμελίωσης-φράγματος-ταμιευτήρα σε αρμονική ταλάντωση, αλλά αυτές που αντιστοιχούν στην ταλάντωση υπό σταθερή κατάσταση.



Σχήμα 19 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε άκαμπτο φράγμα - άκαμπτο βράχο

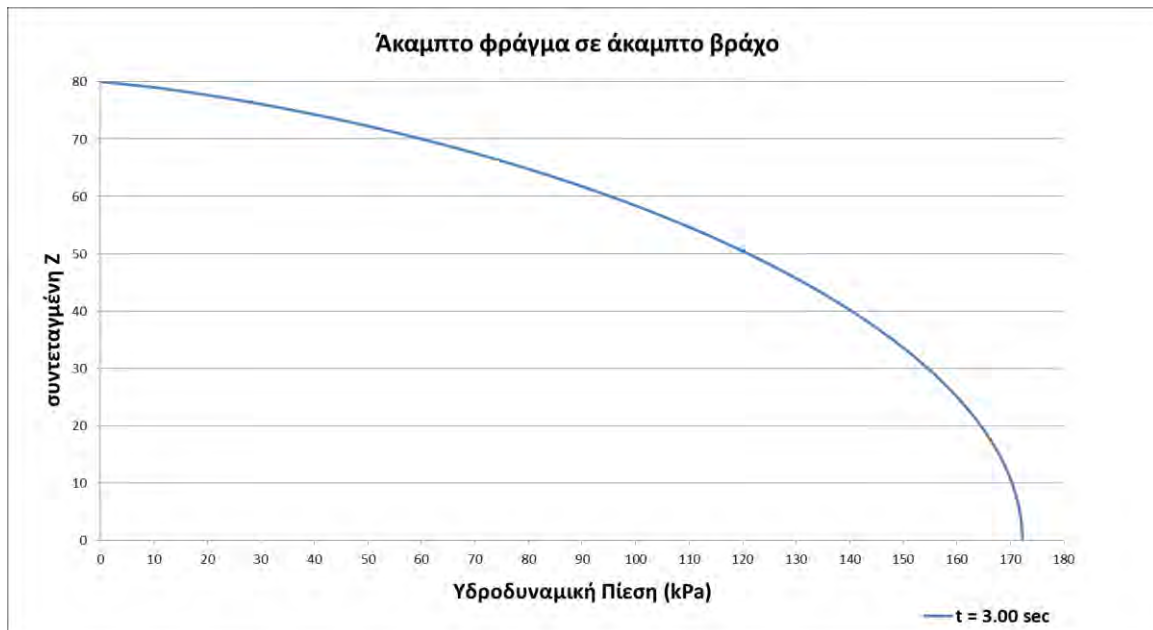


Σχήμα 20 Μέγιστες υδροδυναμικές πιέσεις για άκαμπτο φράγμα - άκαμπτο βράχο (t = 3.00 sec)

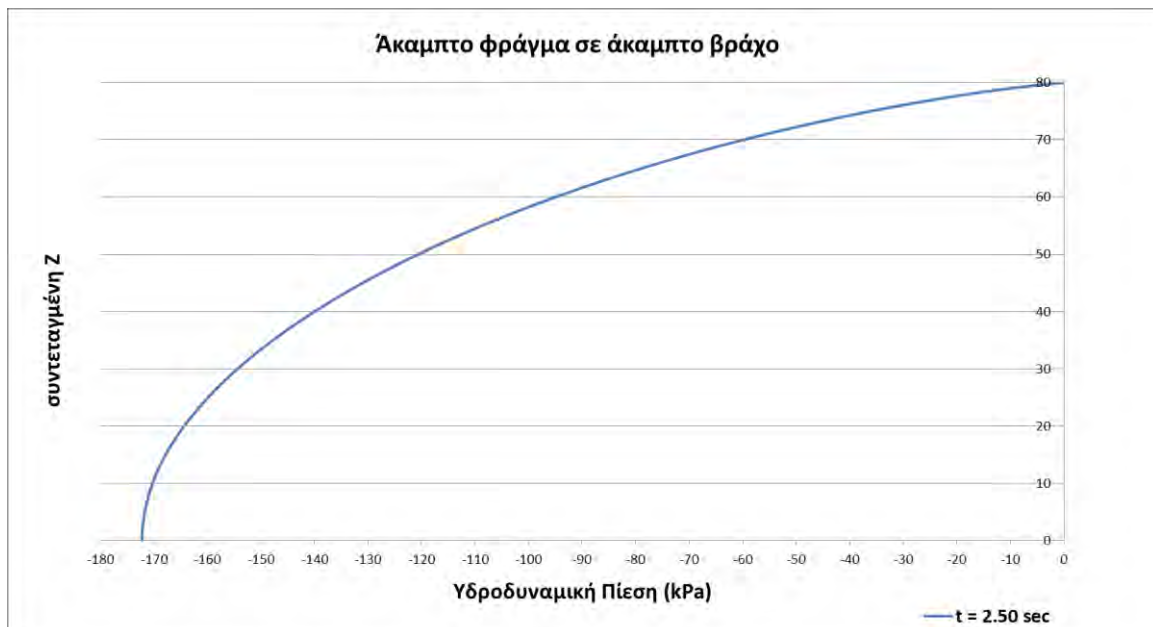


Σχήμα 21 : Ελάχιστες υδροδυναμικές πιέσεις για άκαμπτο φράγμα-άκαμπτο βράχο (t = 2.50 sec)

Στο Σχήμα 22 και Σχήμα 23 φαίνονται οι καθ' ύψος κατανομές των μέγιστων και ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων αντίστοιχα, που ασκούνται από τον ταμιευτήρα στην ανάντη επιφάνεια του φράγματος.



Σχήμα 22 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων



Σχήμα 23 : Καθ' ύψος κατανομή ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων

4.1.2. ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΑΚΑΜΠΤΟ ΒΡΑΧΟ

Η γεωμετρία, η διακριτοποίηση, αλλά και οι ιδιότητες των υλικών σε αυτό το προσομοίωμα είναι ίδια με το προσομοίωμα του άκαμπτου φράγματος σε άκαμπτο βράχο στην παράγραφο 4.1.1. Αυτό που διαφοροποιεί την ανάλυση αυτή είναι τα σημεία εφαρμογής των επιβαλλόμενων επιταχύνσεων καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που έχουν επιλεγθεί.

Επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση

Η ανάλυση περιλαμβάνει ένα βήμα δυναμικής ανάλυσης, στο οποίο προβλέπεται μη γραμμικότητα της γεωμετρίας (nlgeom=YES).

Επιβάλλεται η συνημιτονοειδής επιτάχυνση που φαίνεται στο Σχήμα 18, κατά την οριζόντια διεύθυνση, στη βάση του βράχου και σε μια κατακόρυφη πλευρά του. Σε αυτό το προσομοίωμα η επιτάχυνση επιβάλλεται στο φράγμα μόνο μέσω της θεμελίωσης του. Η συχνότητα της επιτάχυνσης είναι 1 Hz και το μέγιστο μέτρο της είναι $0.3g = 2.943 \text{ m/s}^2$

Δεν επιβάλλεται βαρύτητα και υδροστατικές δυνάμεις προκειμένου οι πιέσεις που υπολογίζονται στα ακουστικά στοιχεία, από τα οποία αποτελείται ο ταμιευτήρας, να οφείλονται αποκλειστικά στις υδροδυναμικές πιέσεις.

Συνοριακές Συνθήκες

Η εκτός επιπέδου κίνηση (κατά τον άξονα y) δεσμεύεται στη θεμελίωση και στο φράγμα.

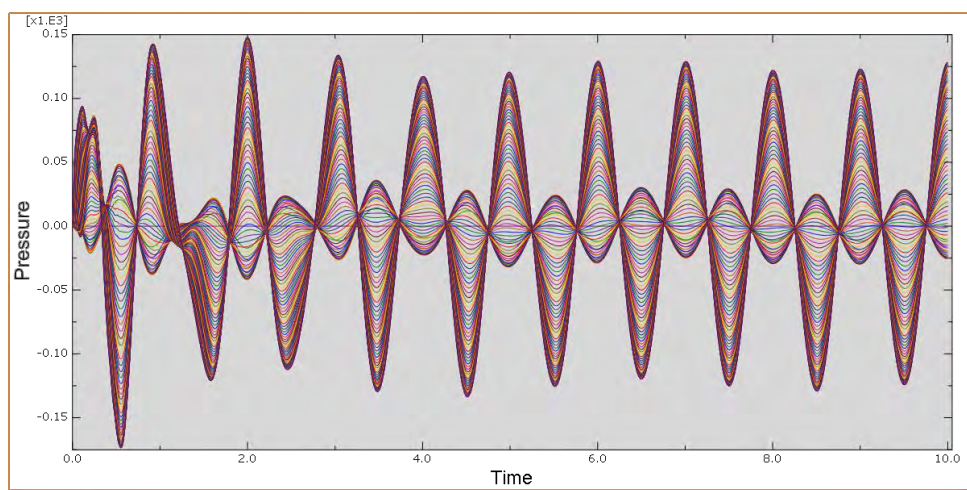
Η καθ' ύψος κίνηση (κατά τον άξονα z) δεσμεύεται μόνο στη θεμελίωση, δηλαδή στη βάση και μία κατακόρυφη πλευρά του βράχου. Με αυτό τον τρόπο, ο βράχος της θεμελίωσης συμπεριφέρεται σαν άκαμπτος ενώ στο φράγμα επιτρέπεται η παραμόρφωση.

Η πίεση των ακουστικών στοιχείων και εδώ μηδενίζεται, στο υψόμετρο $z = 80 \text{ m}$, που βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

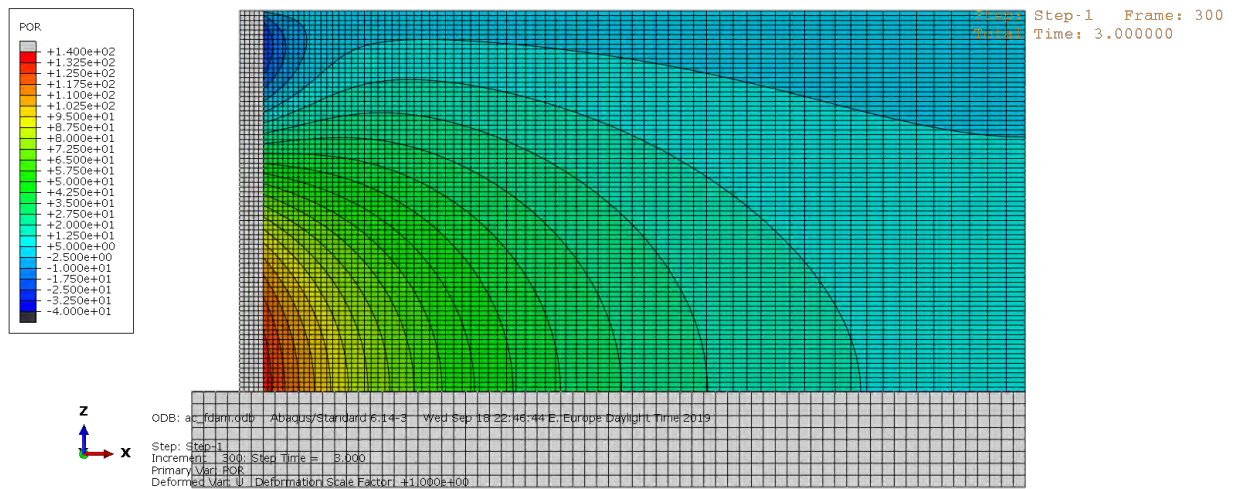
Τέλος, για την αποφυγή τεχνητών ανακλάσεων στο άκρο του ταμιευτήρα που βρίσκεται μακριά από το φράγμα ($x = 160 \text{ m}$) προσδίδεται ιδιότητα μη ανακλαστικής επιφάνειας ακουστικού μέσου σε αυτό το άκρο του ταμιευτήρα (εντολή *Simpedance)

Αποτελέσματα

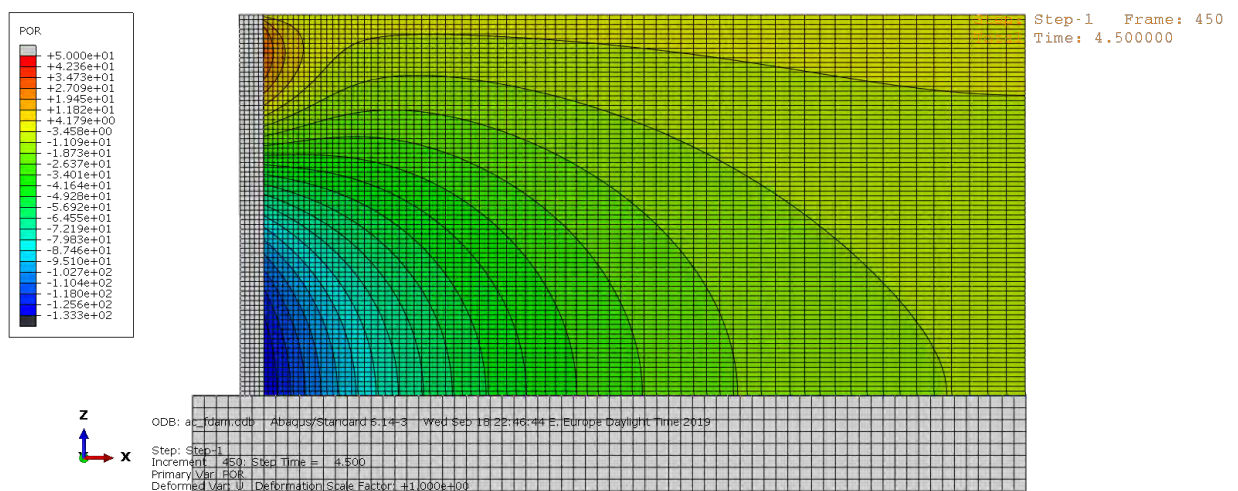
Η χρονοϊστορία των πιέσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 24. Στο Σχήμα 25 φαίνεται η κατανομή των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων που αναπτύσσονται στο ακουστικό μέσο τη χρονική στιγμή $t = 3.00 \text{ sec}$, ενώ αντίστοιχα στο Σχήμα 26 των ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή $t = 4.50 \text{ sec}$



Σχήμα 24 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα - άκαμπτο βράχο



Σχήμα 25 : Κατανομή μέγιστων θετικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 3.00 \text{ sec}$)



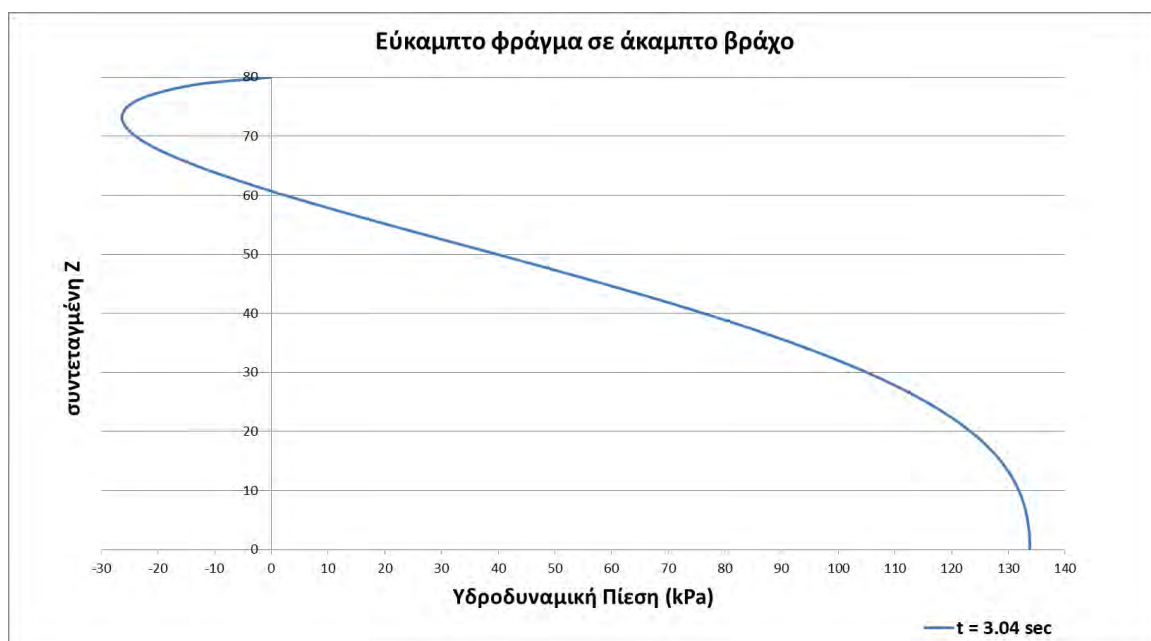
Σχήμα 26 : Κατανομή ελάχιστων αρνητικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 4.5 \text{ sec}$)

Στο Σχήμα 27 παρουσιάζεται η καθ' ύψος κατανομή των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων, που ασκούνται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή πάνω στο φράγμα ($t = 3.04 \text{ sec}$). Στο Σχήμα 28 φαίνεται η ολική πίεση που ασκείται την ίδια χρονική στιγμή και αποτελεί το άθροισμα των υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων.

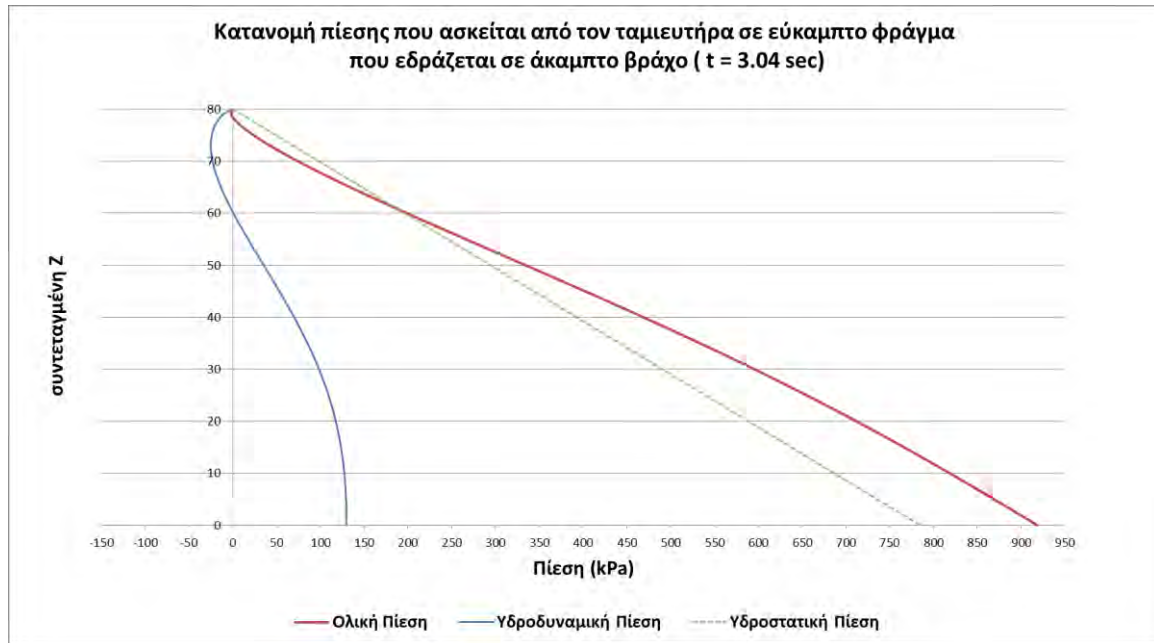
Όπως φαίνεται και στα δύο αυτά σχήματα, τη στιγμή που στη βάση του φράγματος ασκείται η μέγιστη υδροδυναμική πίεση, στη στέψη του φράγματος, η υδροδυναμική πίεση είναι αρνητική. Καθώς όμως ασκείται και η υδροστατική πίεση, τελικά, η ασκούμενη υποπίεση είναι πολύ μικρού μεγέθους και περιορίζεται σε πολύ μικρή έκταση κοντά στη στέψη του φράγματος. Η κατανομή της αρνητικής ολικής πίεσης, της υδροστατικής και της υδροδυναμικής φαίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο Σχήμα 29.

Αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή κατά την οποία στη βάση του φράγματος ασκείται η ελάχιστη υδροδυναμική πίεση, στη στέψη του, ασκούνται θετικές πιέσεις. Στο Σχήμα 30 παρουσιάζεται η καθ' ύψος κατανομή των ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων, που εμφανίζονται τη χρονική στιγμή $t = 4.51 \text{ sec}$, ενώ στο Σχήμα 31 φαίνονται και η ολική και υδροστατική πίεση την ίδια χρονική στιγμή. Σε αυτή τη περίπτωση, δεν υπάρχει καθόλου εμφάνιση υποπίεσεων καθώς οι αρνητικές υδροδυναμικές πιέσεις αναπτύσσονται σε βάθη τέτοια που οι αντίστοιχες υδροστατικές πιέσεις ξεπερνούν κατά πολύ σε μέτρο τις αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές.

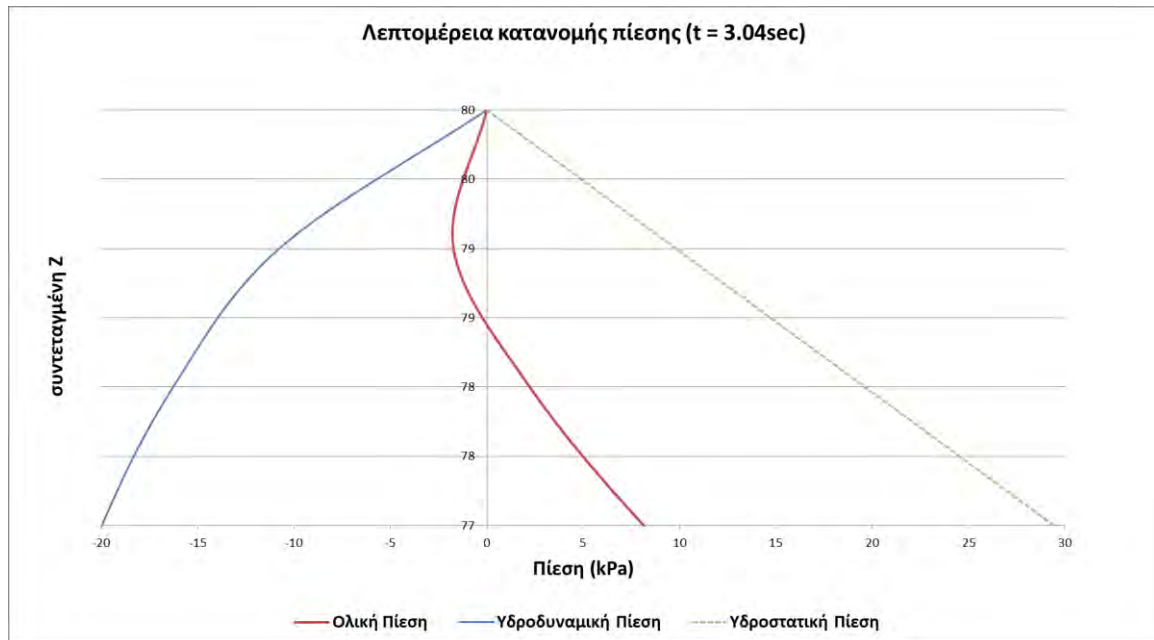
Σε αυτή την ανάλυση, η μέγιστη τιμή υδροδυναμικής πίεσης που εμφανίστηκε ανάντη, στη βάση του φράγματος, ήταν 134 kPa και η ελάχιστη ήταν -134 kPa . Δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπερβολικές πιέσεις (έως 172 kPa) που φαίνεται να αναπτύσσονται στιγμιαία πριν σταθεροποιηθεί το σύστημα θεμελίωσης – φράγματος – ταμιευτήρα σε αρμονική ταλάντωση.



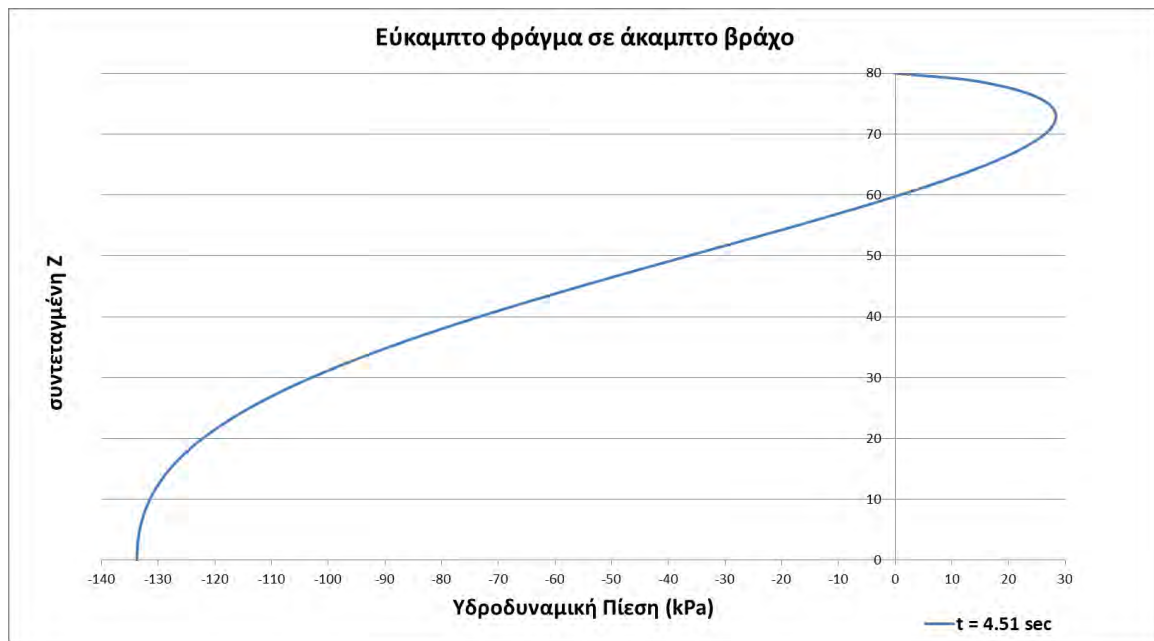
Σχήμα 27 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων



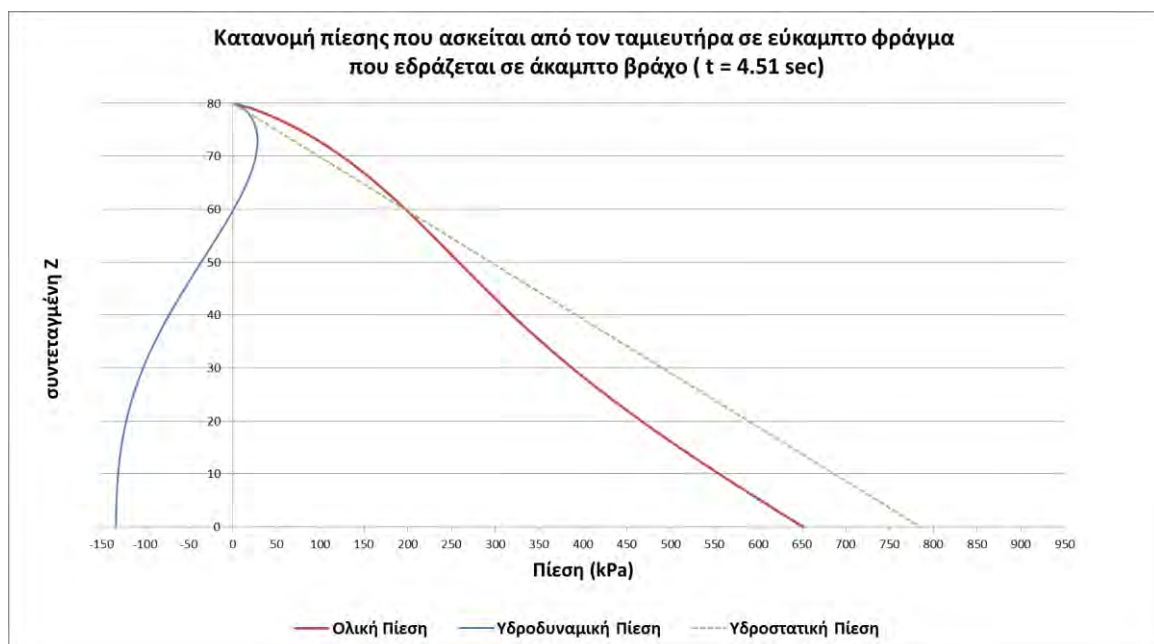
Σχήμα 28 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων



Σχήμα 29 : Λεπτομέρεια κατανομής ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων



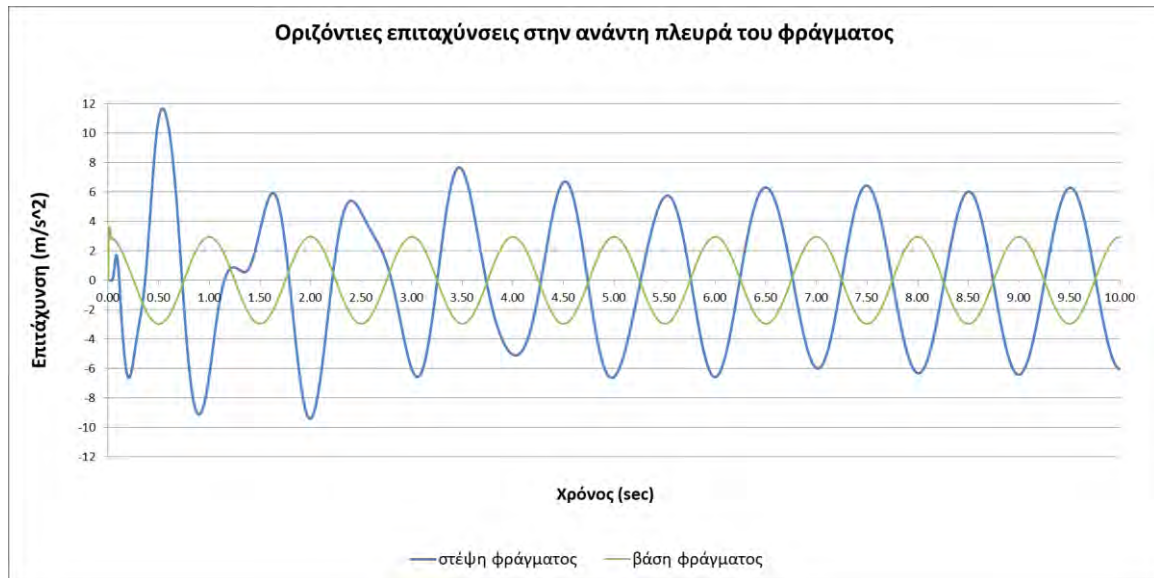
Σχήμα 30 : Καθ' ύψος κατανομή ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων



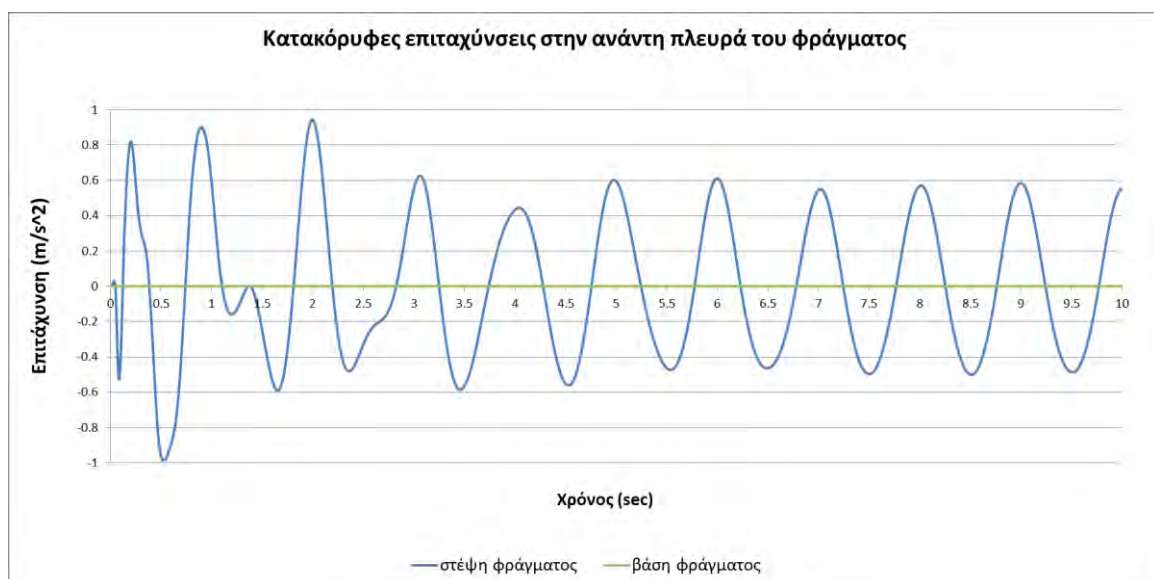
Σχήμα 31 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων

Στο Σχήμα 32, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων επιταχύνσεων που τελικά αναπτύσσονται, κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, σε δύο σημεία του φράγματος, την ανάντη βάση και τη στέψη του, ενώ στο Σχήμα 33, οι αντίστοιχες κατακόρυφες επιταχύνσεις.

Όπως φαίνεται, τη βάση του φράγματος οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις είναι , όπως είναι αναμενόμενο οι επιβαλλόμενες επιταχύνσεις, δηλαδή 0.3g οριζόντια και μηδενική κατακόρυφη επιτάχυνση. Στη στέψη όμως του φράγματος, υπάρχει ενίσχυση των επιταχύνσεων με τις οριζόντιες να φτάνουν 0.8g και τις κατακόρυφες έως 0.06g μετά τη σταθεροποίηση του συστήματος σε αρμονική ταλάντωση.

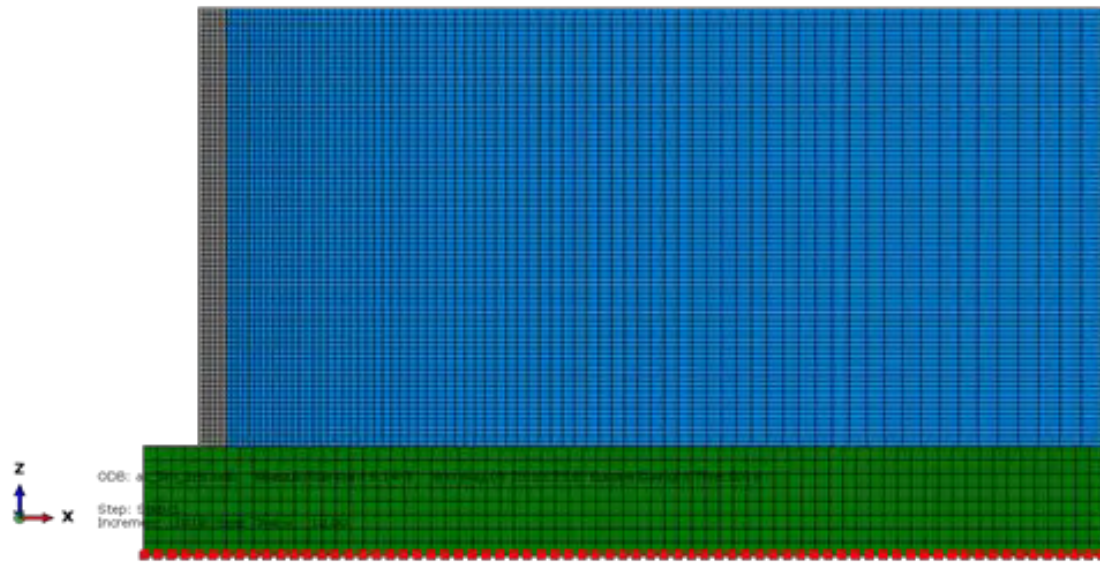


Σχήμα 32 : Χρονοϊστορίες οριζόντιων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος



Σχήμα 33 : Χρονοϊστορίες κατακόρυφων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος

4.1.3. ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΒΡΑΧΟ



Σχήμα 34 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος πλάτους 5 m θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο

Γεωμετρία

Το αριθμητικό προσομοίωμα αυτό, όπως και τα προηγούμενα προσομοιώματα, περιλαμβάνει τρία τμήματα: φράγμα ($5\text{m} \times 1\text{m} \times 80\text{m}$), θεμελίωση ($175\text{m} \times 1\text{m} \times 20\text{m}$) και ταμιευτήρα ($160\text{m} \times 1\text{m} \times 80\text{m}$).

Σε αυτό το προσομοίωμα, γίνεται η παραδοχή ότι φράγμα και ταμιευτήρας εδράζονται πάνω σε ένα ελαστικό ημίχωρο, το βράχο θεμελίωσης. Το άνω τμήμα μόνο του βράχου εντάσσεται στο προσομοίωμα. Ο υπόλοιπος βράχος αποκόπτεται και αντικαθίσταται από αποσβεστήρες (dashpots) που βρίσκονται στη βάση του βράχου και απορροφούν την ενέργεια που αντανακλάται προς τα κάτω. Οι αποσβεστήρες απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 34.

Τα τρία τμήματα του προσομοιώματος ενώνονται μεταξύ τους με συνένωση των κόμβων, πλην των βαθμών ελευθερίας που αφορούν περιστροφή.

Διακριτοποίηση

Τα τμήματα του φράγματος και του βράχου αποτελούνται από τρισδιάστατα, οκτακομβικά, πεπερασμένα στοιχεία μειωμένου βαθμού ολοκλήρωσης C3D8R (8-node linear brick, reduced integration with hourglass control) τα οποία βρίσκονται σε κάνναβο με στοιχεία διαστάσεων $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ και $2.5\text{m} \times 1\text{m} \times 2.5\text{m}$ αντίστοιχα.

Το τμήμα του ταμιευτήρα αποτελείται από τρισδιάστατα, οκτακομβικά ακουστικά πεπερασμένα στοιχεία AC3D8 (8-node linear acoustic brick), σε κάνναβο με σταθερή πυκνότητα 1 m καθ' ύψος (κατά μήκος του άξονα z) και διαβαθμισμένη πυκνότητα

πλέγματος έτσι ώστε το να είναι πυκνότερο κοντά στο φράγμα και πιο αδρό σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτό.

Ιδιότητες Υλικών

Το υλικό από το οποίο αποτελείται το φράγμα είναι σκυρόδεμα ομογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό, με πυκνότητα $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$, λόγο Poisson $\nu = 0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 31 \text{ GPa}$

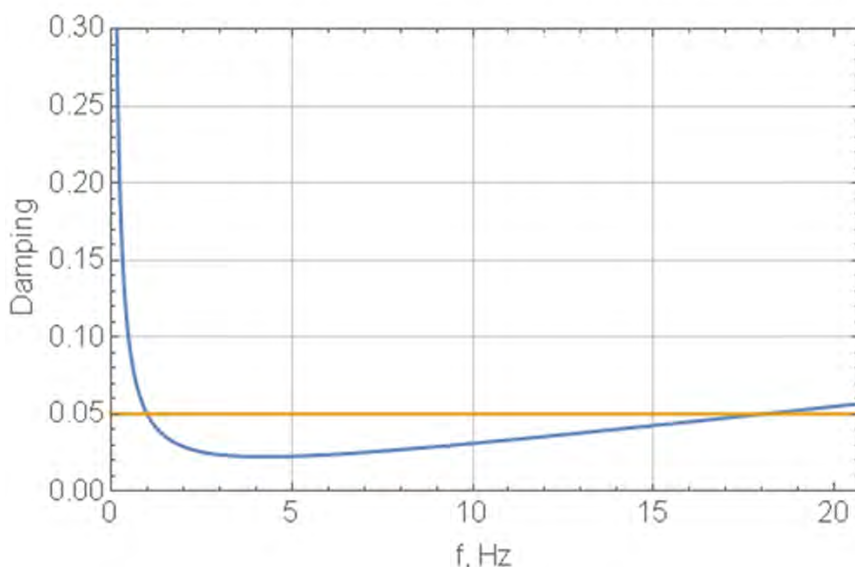
Το νερό του ταμιευτήρα θεωρήθηκε συμπιεστό με μέτρο συμπιεστότητας (bulk modulus) $K = 2.2 \cdot 10^6 \text{ kPa} = 2.2 \text{ GPa}$ και πυκνότητα $\rho_w = 1 \text{ t/m}^3$.

Το υλικό από το οποίο αποτελείται η θεμελίωση είναι βράχος ομογενής, ισότροπος και γραμμικά ελαστικός με πυκνότητα $\rho = 2.6 \text{ t/m}^3$, μέτρο Poisson $\nu = 0.2$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 25 \text{ GPa}$.

Στις ιδιότητες των υλικών του σκυροδέματος, από το οποίο αποτελείται το φράγμα και του βράχου της θεμελίωσης έχει συμπεριληφθεί απόσβεση τύπου Rayleigh. Οι συντελεστές απόσβεσης λόγω μάζας και λόγω δυσκαμψίας έχουν ληφθεί $a_R = 0.59525$ και $b_R = 0.000838$ αντίστοιχα, έτσι ώστε ο λόγος κρίσιμης απόσβεσης και για τα δυο υλικά να μην υπερβαίνει το 5% ($\xi = 0.05$), στο διάστημα συχνοτήτων $1 \div 18 \text{ Hz}$ ($6 \div 113 \text{ rad/sec}$). Η ελάχιστη απόσβεση είναι 2.2% ($\xi_{\min} = 0.022$), και εμφανίζεται στη συχνότητα $f_{\min} = 4.24082 \text{ Hz}$ ($\omega_{\min} = 26.6459 \text{ rad/s}$).

Στο Σχήμα 35 φαίνεται η καμπύλη απόσβεσης Rayleigh έτσι όπως έχει διαμορφωθεί για τα υλικά του σκυροδέματος και βράχου.

Ο λόγος απόσβεσης του νερού δεν έχει συμπεριληφθεί καθώς είναι περίπου 0.5 % και κρίνεται αμελητέος.



Σχήμα 35 : Καμπύλη απόσβεσης Rayleigh για σκυρόδεμα και βράχο

Αποσβεστήρες

Οι σταθερές των αποσβεστήρων έχουν υπολογιστεί με βάση τις εξισώσεις (8), (9), (10), (11) και (12).

Για μέτρο ελαστικότητας του βράχου $E = 2.5 \cdot 10^7 \text{ kPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.2$,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2.5 \cdot 10^7 \text{ kPa}}{2(1+0.2)} = 1.04 \cdot 10^7 \text{ kPa} \quad \text{και}$$

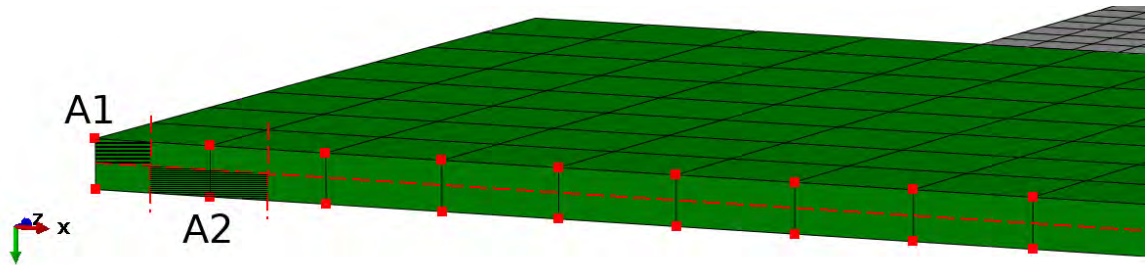
$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2.5 \cdot 10^7 \text{ kPa}(1-0.2)}{(1+0.2)(1-2 \cdot 0.2)} = 2.78 \cdot 10^7 \text{ kPa}$$

Επίσης η πυκνότητα του βράχου έχει ληφθεί $\rho = 2.6 \text{ t/m}^3$ συνεπώς,

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.04 \cdot 10^7 \text{ kPa}}{2.6 \text{ t/m}^3}} = 2001.602 \text{ m/sec}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{D}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.78 \cdot 10^7 \text{ kPa}}{2.6 \text{ t/m}^3}} = 3268.602 \text{ m/sec}$$

Τέλος, το εμβαδό που αφορά τους ακραίους αποσβεστήρες είναι $A1 = \frac{2.5 \text{ m}}{2} \cdot \frac{1 \text{ m}}{2} = 0.625 \text{ m}^2$ και το εμβαδό που αφορά τους μεσαίους αποσβεστήρες είναι $A2 = 2.5 \text{ m} \cdot \frac{1 \text{ m}}{2} = 1.25 \text{ m}^2$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 36.



Σχήμα 36 : Εμβαδό επιρροής αποσβεστήρα για δύο διαφορετικά είδη κόμβων

Έτσι, κατά διεύθυνση του άξονα x οι ακραίοι αποσβεστήρες έχουν σταθερά :

$$C_{x1} = \rho \cdot V_s \cdot A1 = 3252,603 \text{ kN}/\left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)$$

Κατά διεύθυνση του άξονα x οι μεσαίοι αποσβεστήρες έχουν σταθερά :

$$C_{x2} = \rho \cdot V_s \cdot A2 = 6505.206 \text{ kN}/\left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)$$

Αντίστοιχα, κατά διεύθυνση του άξονα z οι ακραίοι αποσβεστήρες έχουν σταθερά :

$$C_{z1} = \rho \cdot V_p \cdot A1 = 5311.479 \text{ kN}/\left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)$$

Τέλος, κατά διεύθυνση του άξονα z οι μεσαίοι αποσβεστήρες έχουν σταθερά :

$$C_{z2} = \rho \cdot V_p \cdot A2 = 10622.957 \text{ kN}/\left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)$$

Επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση

Η ανάλυση περιλαμβάνει ένα βήμα δυναμικής ανάλυσης, στο οποίο προβλέπεται μη γραμμικότητα της γεωμετρίας (nlgeom=YES).

Η σεισμική διέγερση σε αυτό το βήμα, αντί να εισάγεται με επιβολή επιτάχυνσης, εισάγεται μέσω διατμητικών τάσεων στη βάση της θεμελίωσης, οι οποίες υπολογίζονται με βάση την εξίσωση (7) :

$$\tau = (\rho \cdot V_s \cdot A) \cdot \dot{u}$$

Η χρονοϊστορία των επιβαλλόμενων διατμητικών τάσεων φαίνεται στο Σχήμα 37.

Οι τιμές των διατμητικών τάσεων είναι τέτοιες, ώστε να προκύπτει επιτάχυνση αντίστοιχη με αυτή των προσομοιωμάτων άκαμπτου φράγματος σε άκαμπτο βράχο και εύκαμπτου φράγματος σε εύκαμπτο βράχο. Είναι δηλαδή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 38 συνημιτονοειδής επιτάχυνση, κατά την οριζόντια διεύθυνση, συχνότητας 1 Hz και πλάτους $a = 0.3 \text{ g}$. Έτσι, η μέγιστη ταχύτητα που προκύπτει είναι:

$$a = \omega \cdot \dot{u} = 0.3 \text{ g} \Rightarrow \dot{u} = \frac{a}{\omega} = \frac{0.3 \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \left(\frac{1}{\text{sec}}\right)} = 0.468 \text{ m/sec}$$

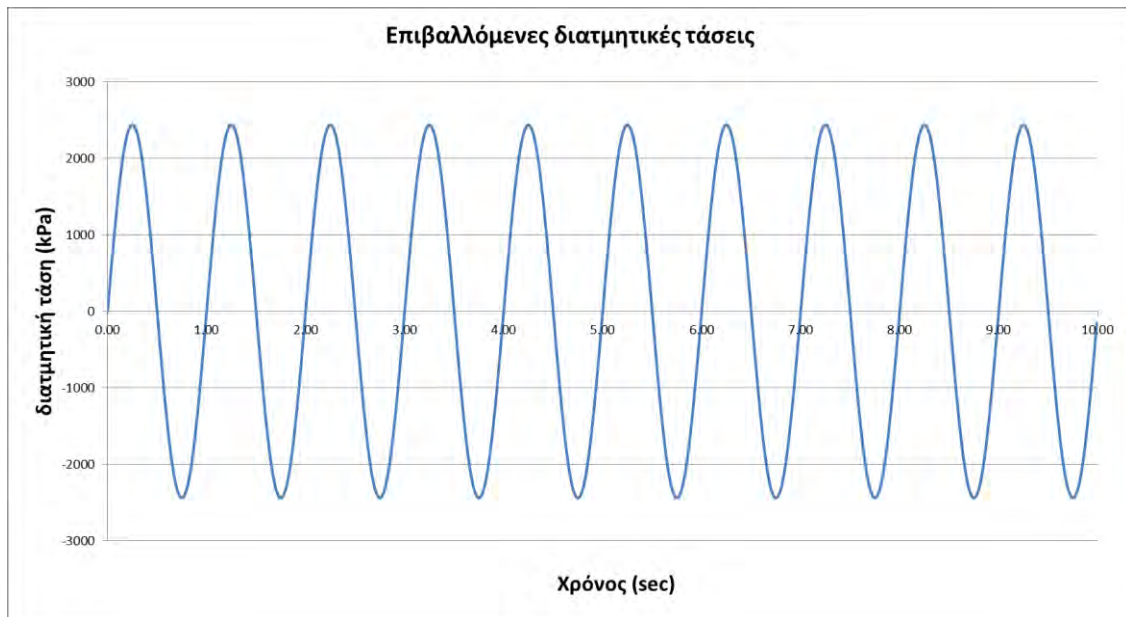
Κατά την ανάλυση, δεν επιβάλλονται ούτε βαρύτητα ούτε υδροστατικές δυνάμεις προκειμένου οι πιέσεις που υπολογίζονται στα ακουστικά στοιχεία του ταμιευτήρα να οφείλονται αποκλειστικά στις υδροδυναμικές πιέσεις.

Συνοριακές Συνθήκες

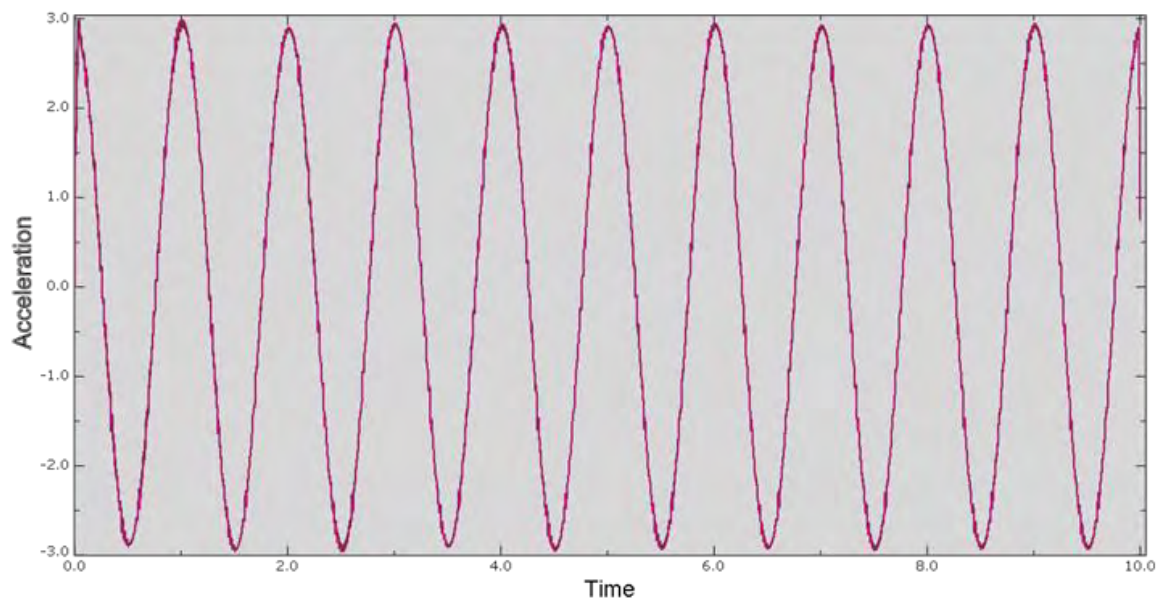
Η εκτός επιπέδου κίνηση (κατά τον άξονα y) δεσμεύεται στη θεμελίωση και στο φράγμα.

Η πίεση των ακουστικών στοιχείων μηδενίζεται, στο υψόμετρο $z = 80 \text{ m}$, που βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

Τέλος, για την αποφυγή τεχνητών ανακλάσεων στο άκρο του ταμιευτήρα που βρίσκεται μακριά από το φράγμα ($x = 160 \text{ m}$) και την αποφυγή της συσσώρευσης ενέργειας κατά τη διάρκεια της επιβολής του δυναμικού φορτίου, ορίζεται συνοριακή συνθήκη μη ανακλαστικής επιφάνειας ακουστικού μέσου στο ανάντη όριο του ταμιευτήρα (εντολή *Simpedance)



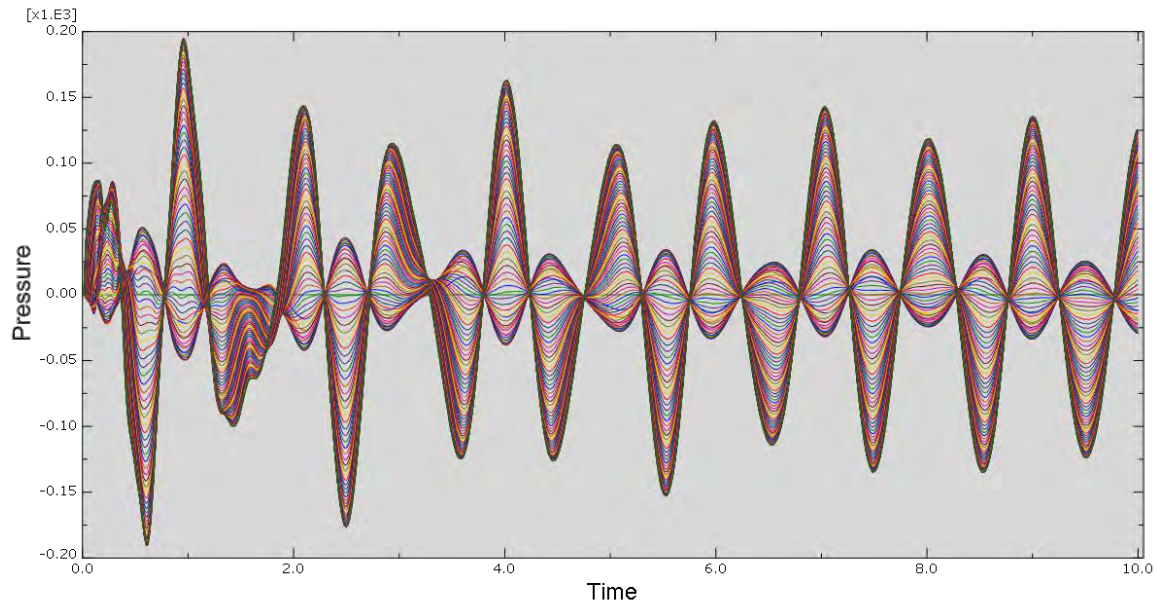
Σχήμα 37 : Επιβαλλόμενες διατμητικές τάσεις στη βάση τη θεμελίωσης



Σχήμα 38 : Χρονοϊστορία αναπτυσσόμενης οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του βράχου θεμελίωσης

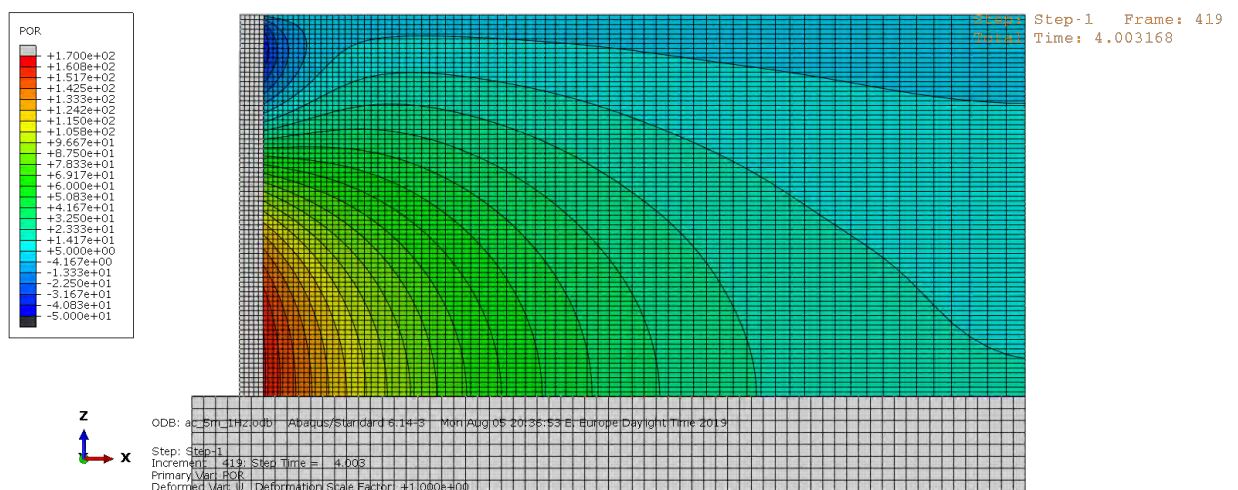
Αποτελέσματα

Η χρονοϊστορία των πιέσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 39.

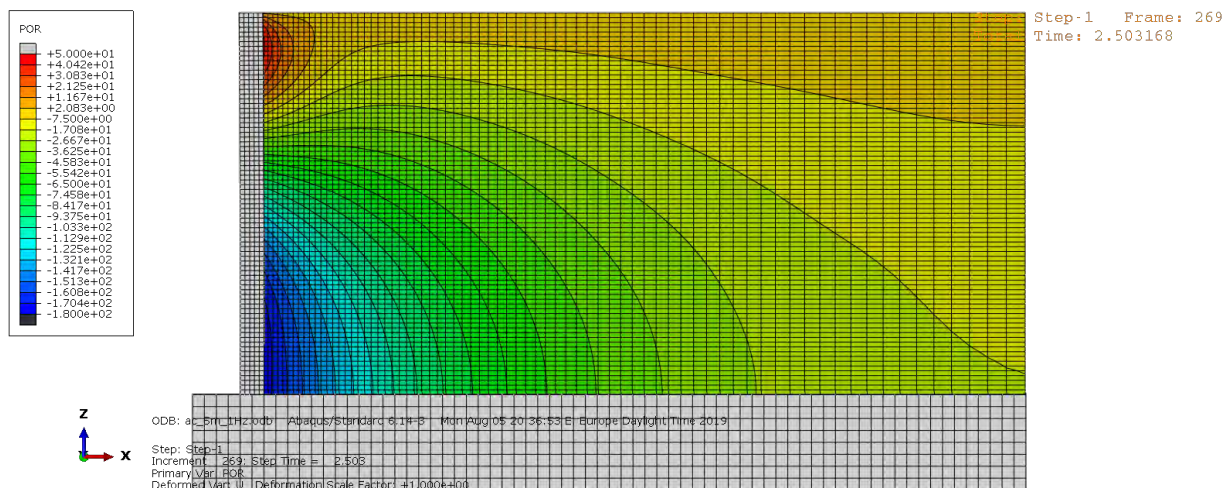


Σχήμα 39 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε διάφορα σημεία καθ' ύψος της ανάντη πλευράς του εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 5 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο

Στο Σχήμα 40 φαίνεται η κατανομή των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων που αναπτύσσονται στο ακουστικό μέσο τη χρονική στιγμή $t = 4.00$ sec, ενώ αντίστοιχα στο Σχήμα 41 των ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή $t = 2.50$ sec.



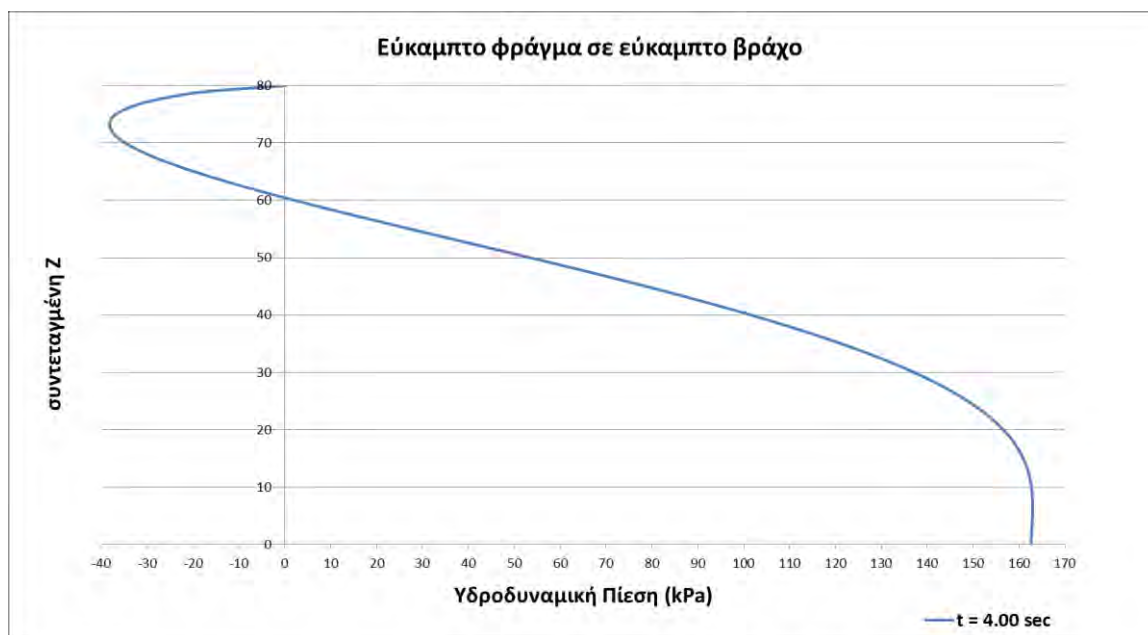
Σχήμα 40 : Κατανομή μέγιστων θετικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 4.00$ sec)



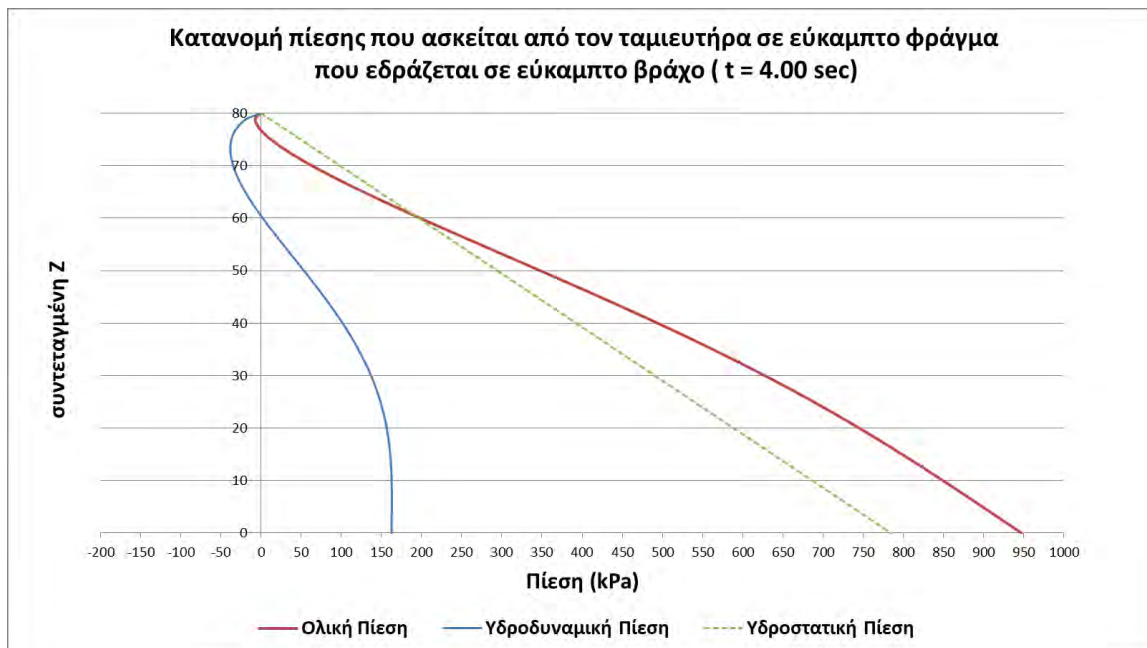
Σχήμα 41 : Κατανομή ελάχιστων αρνητικών υδροδυναμικών πιέσεων ($t = 2.5$ sec)

Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται η καθ' ύψος κατανομή των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων, που ασκούνται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή πάνω στο φράγμα ($t = 4.00$ sec). Στο Σχήμα 43 φαίνεται η ολική πίεση που ασκείται την ίδια χρονική στιγμή και αποτελεί το άθροισμα των υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων.

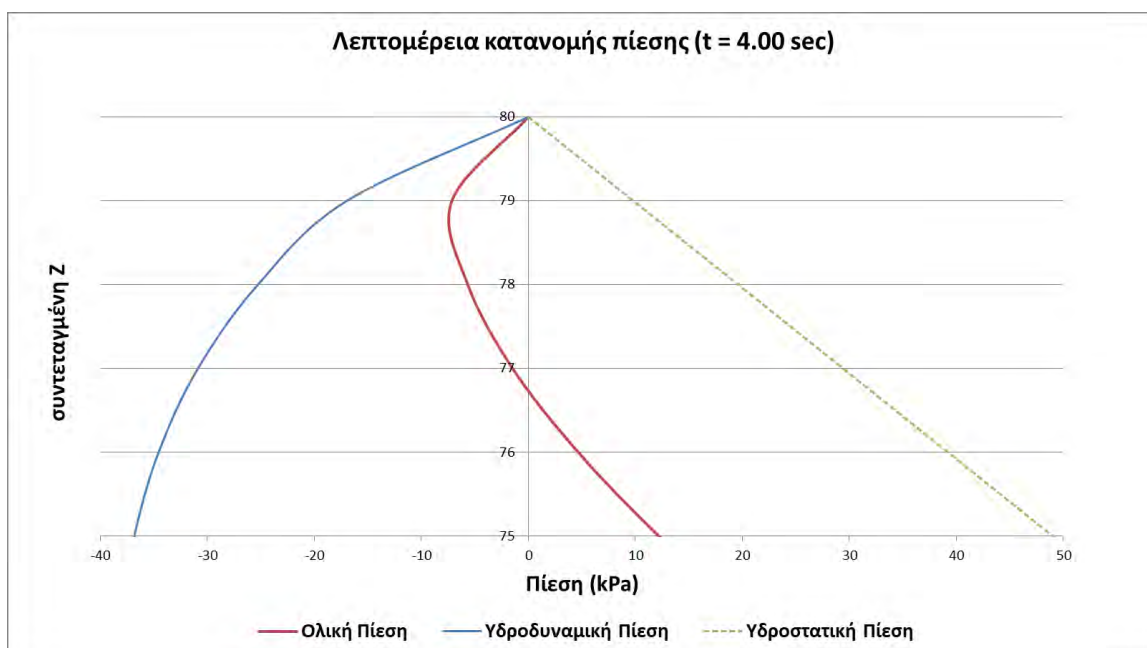
Είναι φανερό ότι τη στιγμή που στη βάση του φράγματος ασκείται η μέγιστη υδροδυναμική πίεση, στη στέψη του φράγματος, η υδροδυναμική πίεση είναι αρνητική. Εξαιτίας όμως της ύπαρξης της υδροστατικής πίεσης, η ολική πίεση παίρνει αρνητικές τιμές σε πολύ μικρή έκταση κοντά στη στέψη του φράγματος. Οι ολικές αυτές υποπίεσες δεν είναι μικρότερες των -10 kPa. Η κατανομή της αρνητικής ολικής πίεσης, της υδροστατικής και της υδροδυναμικής φαίνεται πιο λεπτομερώς στο Σχήμα 44.



Σχήμα 42 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων

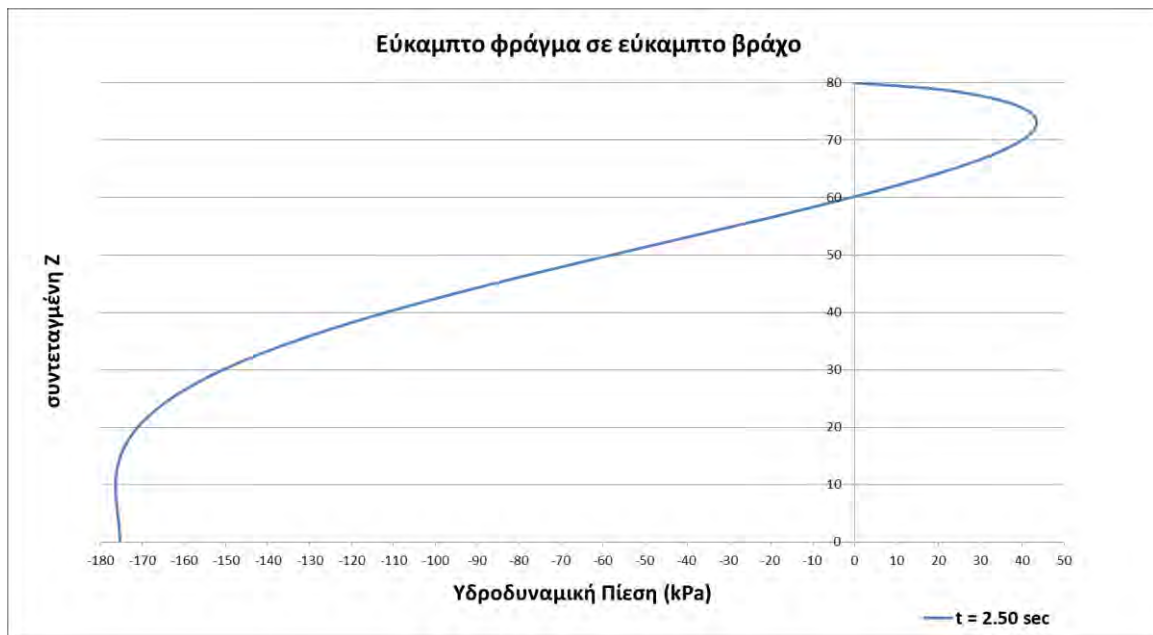


Σχήμα 43: Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων

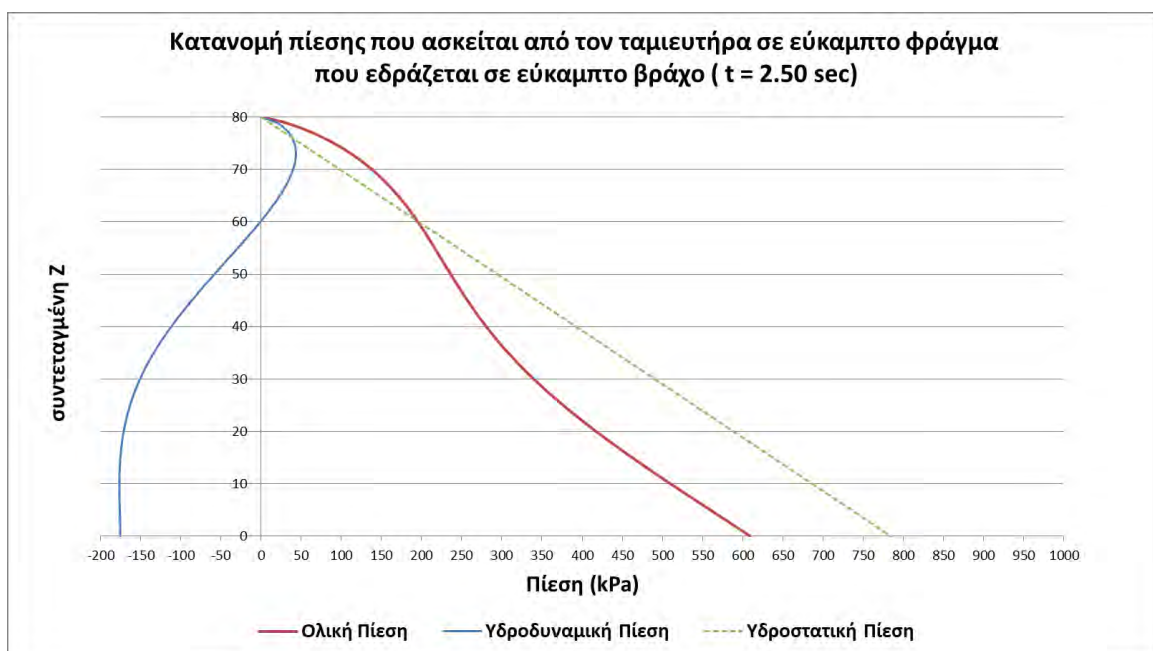


Σχήμα 44: Λεπτομέρεια κατανομής ολικών, υδροστατικών και μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων

Αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή κατά την οποία στη βάση του φράγματος ασκείται η ελάχιστη υδροδυναμική πίεση, στη στέψη του, ασκούνται θετικές πιέσεις. Στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η καθ' ύψος κατανομή των ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων, που εμφανίζονται τη χρονική στιγμή $t = 4.50 \text{ sec}$, ενώ στο Σχήμα 46 φαίνονται και η ολική και υδροστατική πίεση την ίδια χρονική στιγμή. Σε αυτή τη περίπτωση, δεν υπάρχει εμφανίζονται υποπίεσεις καθώς οι αρνητικές υδροδυναμικές πιέσεις αναπτύσσονται σε βάθη τέτοια που οι αντίστοιχες υδροστατικές πιέσεις ξεπερνούν κατά πολύ σε μέτρο τις αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές.



Σχήμα 45 : Καθ' ύψος κατανομή ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων



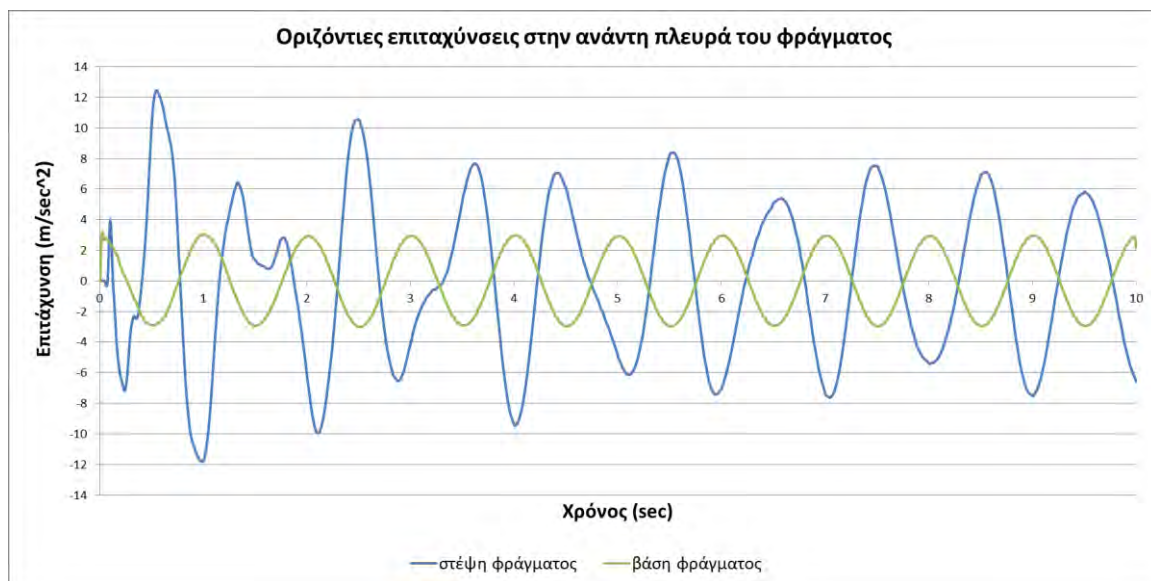
Σχήμα 46 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και ελάχιστων υδροδυναμικών πιέσεων

Σε αυτή την ανάλυση, η μέγιστη τιμή υδροδυναμικής πίεσης που εμφανίστηκε ανάντη, στη βάση του φράγματος, ήταν 163 kPa και η ελάχιστη ήταν -176 kPa. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι αυξημένες μεταβατικές πιέσεις (έως 192 kPa) που αναπτύσσονται στιγμιαία πριν σταθεροποιηθεί το σύστημα θεμελίωσης – φράγματος – ταμιευτήρα σε αρμονική ταλάντωση.

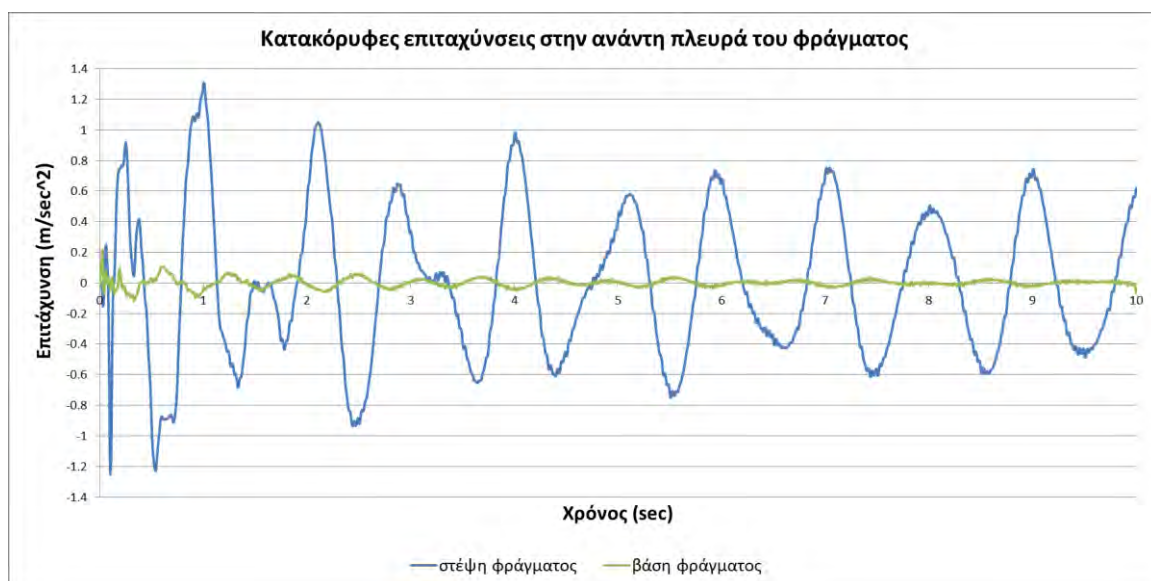
Στο Σχήμα 47, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων επιταχύνσεων που τελικά αναπτύσσονται, κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, σε δύο σημεία του φράγματος,

την ανάντη βάση και τη στέψη του, ενώ στο Σχήμα 48, οι αντίστοιχες κατακόρυφες επιταχύνσεις.

Όπως φαίνεται στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων, στη βάση του φράγματος οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις είναι ελάχιστα ενισχυμένες σε σχέση με τις επιβαλλόμενες (0.3 g), με τη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στο σημείο αυτό να φτάνει το 0.31g, μετά τη σταθεροποίηση του συστήματος σε αρμονική ταλάντωση. Σημαντικά όμως μεγαλύτερη σε σχέση με την επιβαλλόμενη είναι η επιτάχυνση που αναπτύσσεται στη στέψη του φράγματος, όπου η μέγιστη τιμή είναι 1.10g. Στο φράγμα αναπτύσσονται και κάποιες κατακόρυφες επιταχύνσεις, με μέγιστη τιμή στη βάση του φράγματος 0.01g και στη στέψη του 0.11g, μετά τη σταθεροποίηση του συστήματος σε αρμονική ταλάντωση.



Σχήμα 47 : Χρονοϊστορίες οριζόντιων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος



Σχήμα 48 : Χρονοϊστορίες κατακόρυφων επιταχύνσεων στη βάση και τη στέψη του φράγματος

4.1.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ ΒΡΑΧΟΥ

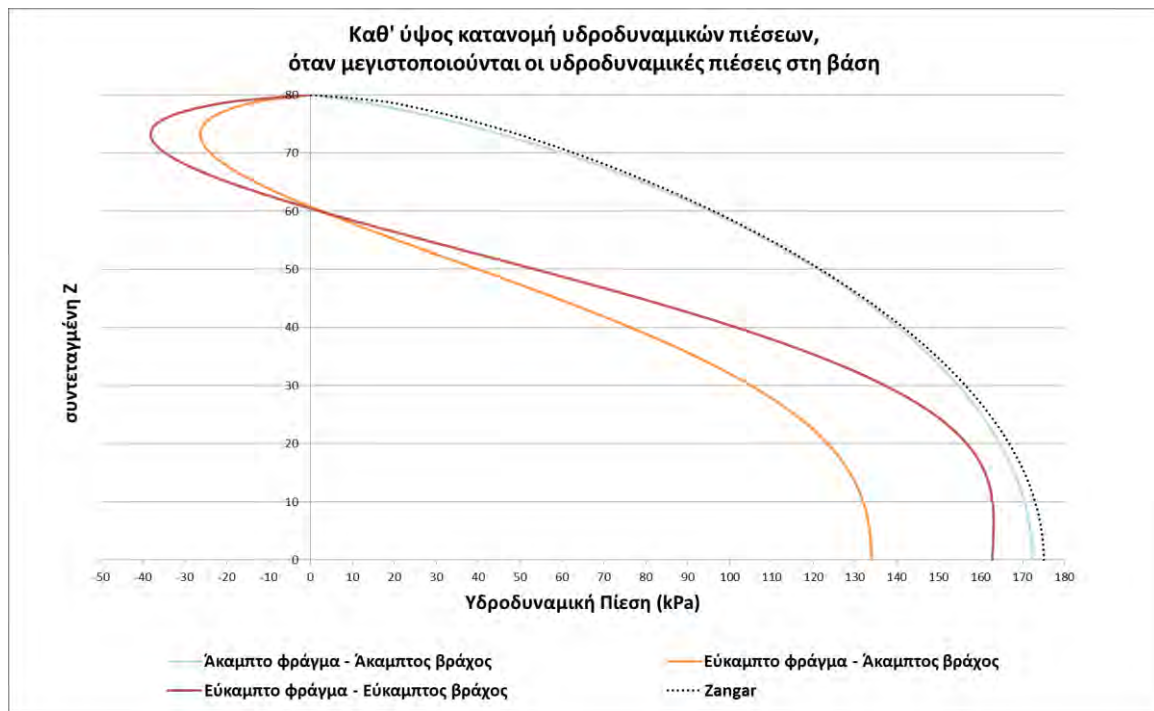
Στον Πίνακα 1, φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των υδροδυναμικών πιέσεων όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις των τριών παραπάνω προσομοιωμάτων, καθώς επίσης και οι μέγιστες οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις που εμφανίζονται στη βάση και τη στέψη των φραγμάτων σε αυτά.

Στο Σχήμα 49, που ακολουθεί, συγκρίνονται οι καθ' ύψος κατανομές των υδροδυναμικών πιέσεων για τα τρία προσομοιώματα που εξετάστηκαν καθώς και οι υπολογισμένες πιέσεις με την αναλυτική μέθοδο Zangar. Ακολουθεί, στο Σχήμα 50, η σύγκριση των σχετικών οριζόντιων μετατοπίσεων της στέψης του κάθε φράγματος σε σχέση με τη βάση του. Από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι όσο πιο μικρές είναι οι σχετικές μετατοπίσεις σε κάθε σημείο του φράγματος, τόσο πιο πολύ πλησιάζει η τιμή της υδροδυναμικής πίεσης, σε αυτό το σημείο στη θεωρητική κατά Zangar. Αυτό συμβαίνει γιατί η λύση Zangar κάνει την παραδοχή ότι το φράγμα είναι τελείως άκαμπτο και συνεπώς δεν εμφανίζει σχετικές μετατοπίσεις.

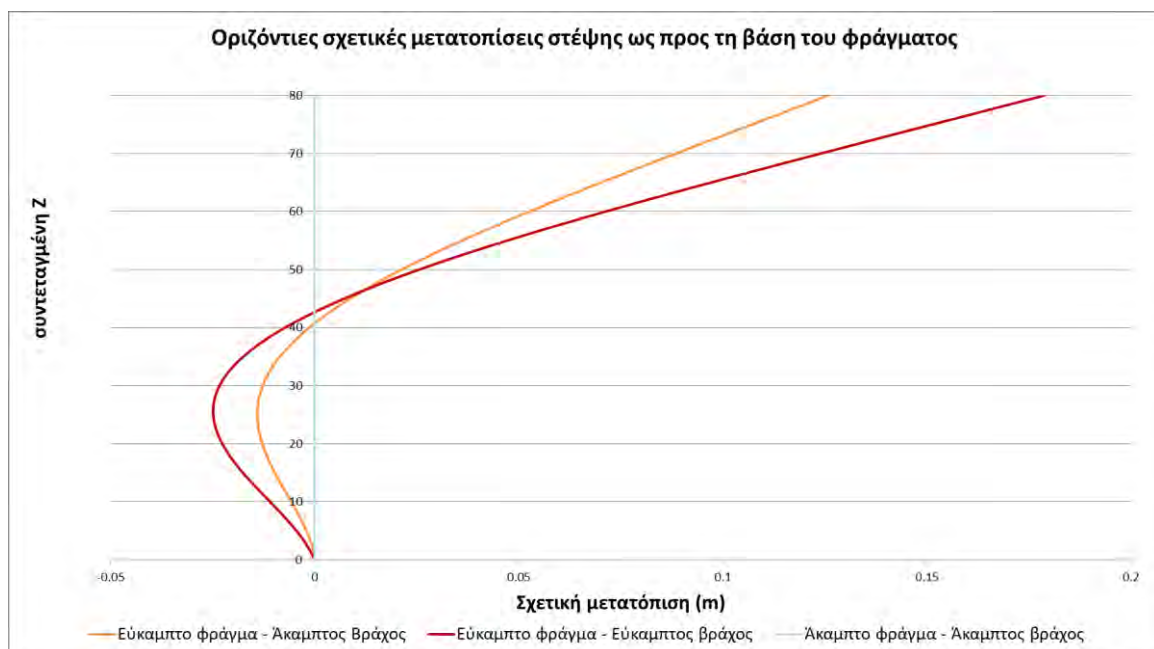
Είναι φανερό ότι η ευκαμψία του βράχου, έχει σημαντική επίδραση στις υδροδυναμικές πιέσεις που ασκούνται από τον ταμιευτήρα στο φράγμα, κατά τη διάρκεια μιας δυναμικής φόρτισης. Η ευκαμψία της θεμελίωσης αυξάνει αφ' ενός τη δυνατότητα μετατόπισης της βάσης αλλά κυρίως αυξάνει τη δυνατότητα να συστραφεί ένα τμήμα του βράχου μαζί με το φράγμα εξ αιτίας της ροπής που αυτό μεταφέρει στη θεμελίωση.

	Άκαμπτο φράγμα σε άκαμπτο βράχο	Εύκαμπτο φράγμα σε άκαμπτο βράχο	Εύκαμπτο φράγμα σε εύκαμπτο βράχο
Μέγιστη υδροδυναμική πίεση (kPa)	173	134	163
Ελάχιστη υδροδυναμική πίεση (kPa)	-173	-134	-176
Οριζόντια επιτάχυνση στέψης (g)	0.3	0.8	1.10
Οριζόντια επιτάχυνση βάσης (g)	0.3	0.3	0.31
Κατακόρυφη επιτάχυνση στέψης (g)	-	0.06	0.11
Κατακόρυφη επιτάχυνση βάσης (g)	-	-	0.01

Πίνακας 1 : Σύγκριση αποτελεσμάτων για τα τρία προσομοιώματα



Σχήμα 49 : Καθ' ύψος κατανομή μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων
(άκαμπτο φράγμα- άκαμπτος βράχος : $t = 2.99$ sec,
άκαμπτο φράγμα - εύκαμπτος βράχος : $t = 3.04$ sec,
εύκαμπτο φράγμα - εύκαμπτος βράχος : $t = 4.01$ sec)



Σχήμα 50 : Σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τη βάση του φράγματος, όταν μεγιστοποιούνται οι υδροδυναμικές πιέσεις στη βάση του φράγματος

4.2. Επίδραση ευκαμψίας φράγματος

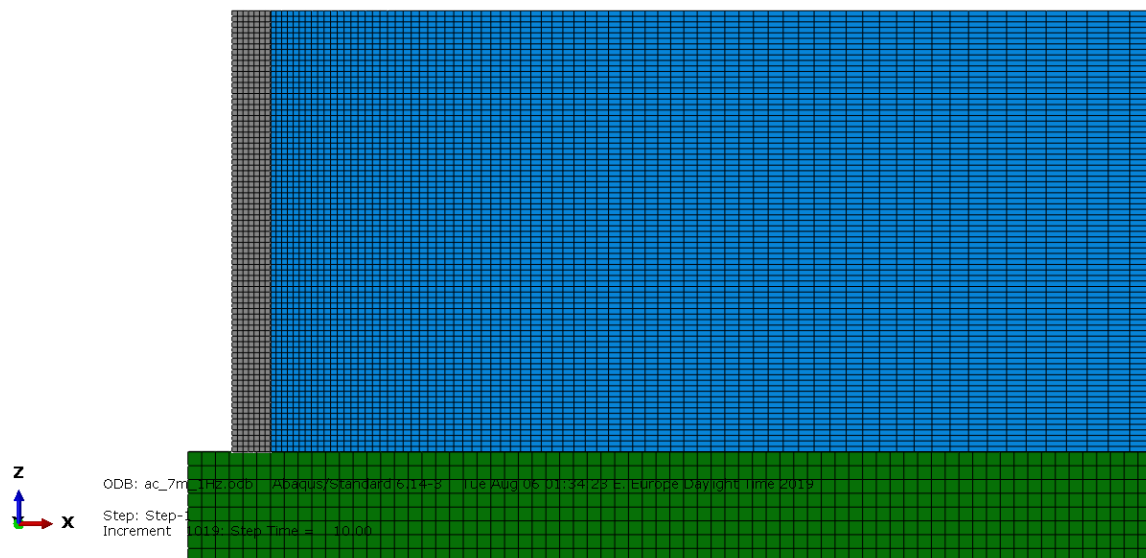
4.2.1. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της ευκαμψίας του ίδιου φράγματος στις υδροδυναμικές πιέσεις που δέχεται από τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης συγκρίθηκαν τέσσερα προσομοιώματα, η μοναδική διαφορά των οποίων είναι το πλάτος του φράγματος.

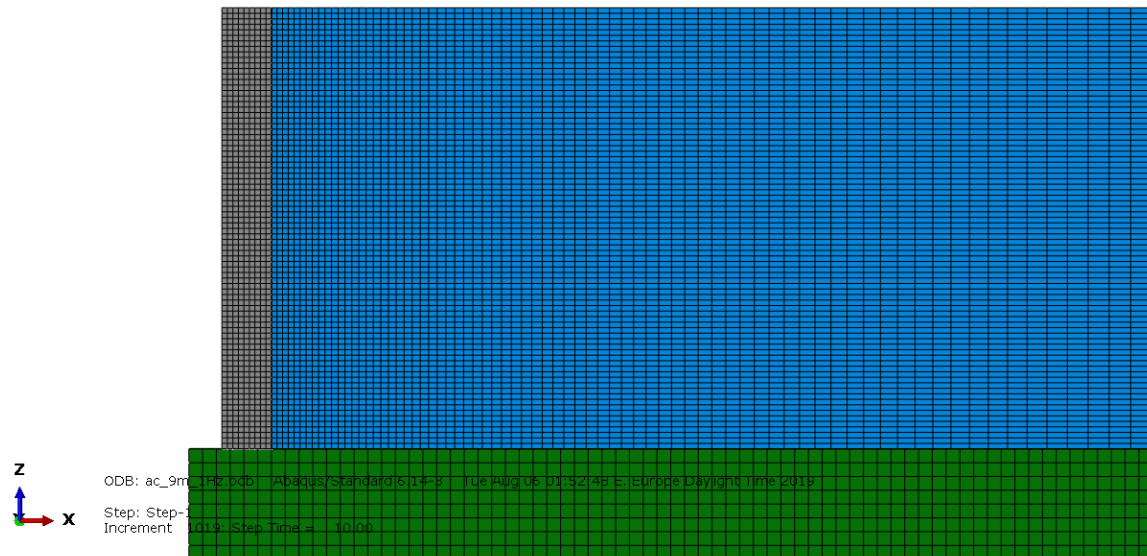
Το αρχικό προσομοίωμα είναι αυτό του εύκαμπτου φράγματος σε εύκαμπτη θεμελίωση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1.3 στη σελίδα 33. Το προσομοίωμα αυτό περιλαμβάνει φράγμα πλάτους 5 m. Δημιουργήθηκαν τρία ακόμα προσομοιώματα με φράγματα πλάτους 7 m, 9 m και 12 m, η γεωμετρία των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 51, Σχήμα 52 και Σχήμα 53, αντίστοιχα.

Το σώμα του φράγματος αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία C3D8R (τρισδιάστατα, οκτακομβικά, μειωμένου βαθμού ολοκλήρωσης), διατεταγμένα σε κάνναβο $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$, όπως σε όλα τα προηγούμενα προσομοιώματα.

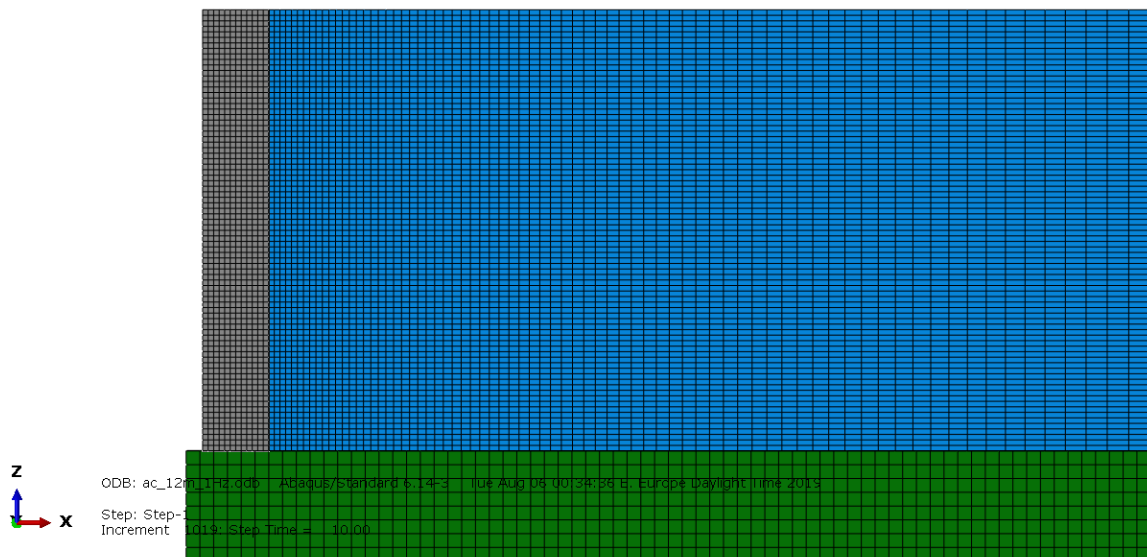
Οι ιδιότητες των υλικών, οι αποσβεστήρες στη βάση του τμήματος της θεμελίωσης, τα βήματα ανάλυσης, οι επιβαλλόμενες τάσεις στη βάση του βράχου και οι συνοριακές συνθήκες παραμένουν σταθερές σε όλα τα προσομοιώματα με διαφορετικό πλάτος φράγματος.



Σχήμα 51 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 7 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο



Σχήμα 52 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 9 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο



Σχήμα 53 : Προσομοίωμα εύκαμπτου φράγματος, πλάτους 12 m, θεμελιωμένου σε εύκαμπτο βράχο

4.2.2. ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ

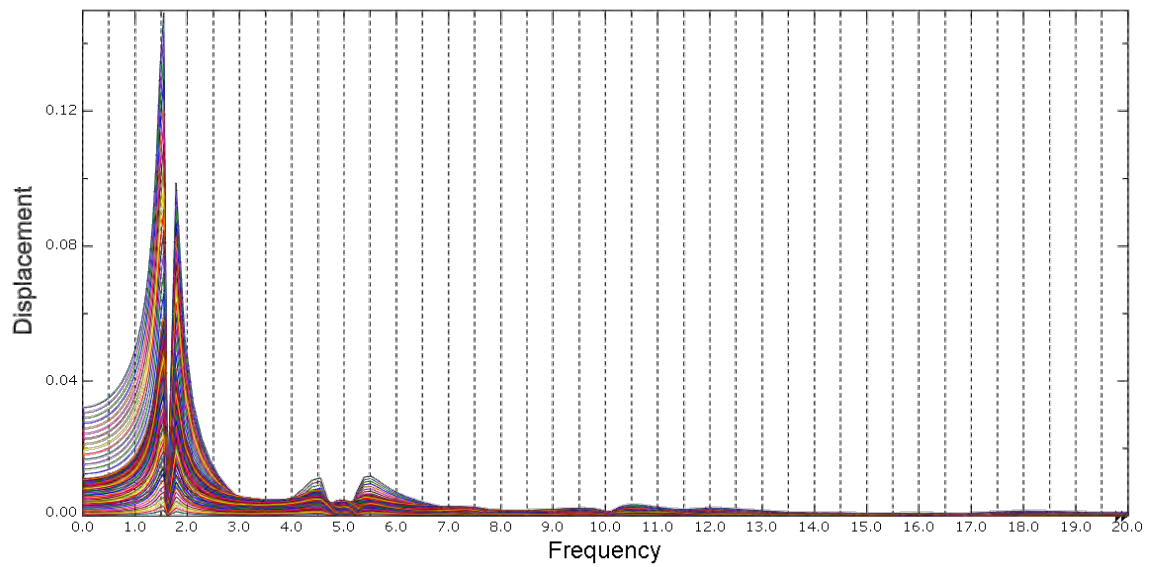
Με σκοπό να ελεγχθεί αν η πρώτη ιδιοσυχνότητα βρίσκεται μέσα στο διάστημα $1\div 18\text{Hz}$, το διάστημα των συχνοτήτων δηλαδή με βάση το οποίο υπολογίστηκαν οι συντελεστές απόσβεσης Rayleigh, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις εύρεσης ιδιοσυχνοτήτων (Natural Frequency Extraction) και αναλύσεις ταλαντώσεων σε σταθερή κατάσταση (Steady State Dynamics), για όλα τα προσομοιώματα διαφορετικού πλάτους φράγματος.

Με τις αναλύσεις ταλαντώσεων σε σταθερή κατάσταση μελετήθηκε η απόκριση του κάθε προσομοιώματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Η απόκριση αυτή εξαρτάται από τις ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες του. Σε αυτές τις αναλύσεις εφαρμόστηκε ένα συγκεντρωμένο οριζόντιο φορτίο στη στέγη του φράγματος και σαν αποτέλεσμα εξήχθησαν οι κατά μέτρο μετατοπίσεις των ανάντη κόμβων του φράγματος, για ένα επιλεγμένο πεδίο συχνοτήτων καθώς και οι κατά μέτρο δυνάμεις αντίδρασης που αναπτύσσονται στο φράγμα, για το ίδιο διάστημα συχνοτήτων. Από τα διαγράμματα αυτά γίνεται φανερό, ποιες είναι οι σημαντικές συχνότητες συντονισμού για το κάθε προσομοίωμα.

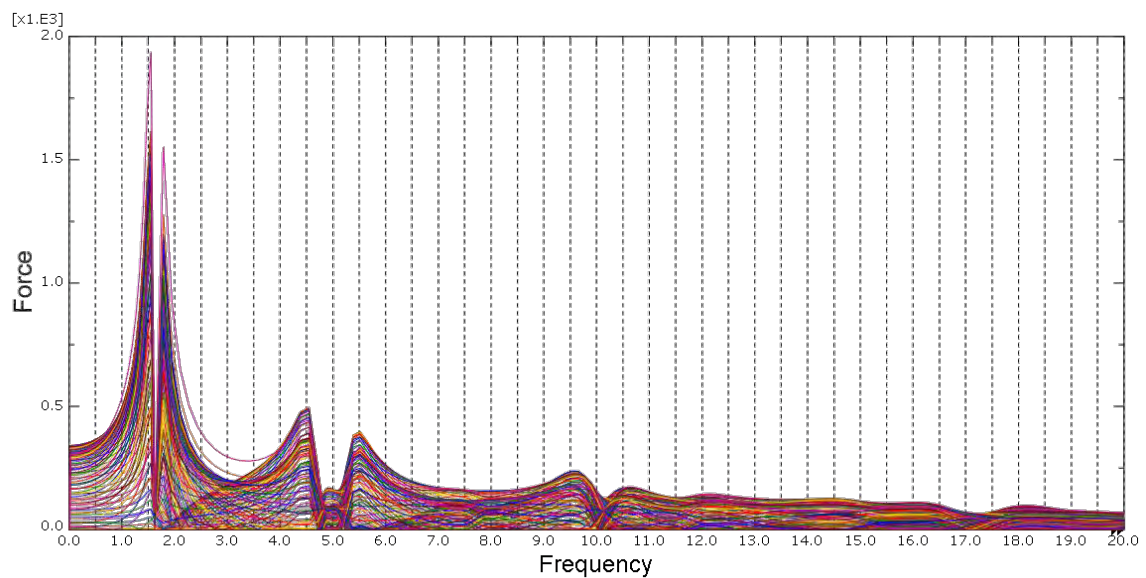
Προσομοίωμα πλάτους 5 m

EIGENVALUE OUTPUT						
MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY		GENERALIZED MASS		COMPOSITE MODAL DAMPING
		(RAD/TIME)	CYCLES/TIME	TOTAL	ACOUSTIC FRACTION	
1	2.9	1.69	0.27	0.313	0.61558	0
2	104.0	10.20	1.62	1.91E-04	0.55753	0
3	876.2	29.60	4.71	4.55E-06	0.72843	0
4	1090.8	33.03	5.26	2.17E-06	0.75011	0
5	2343.3	48.41	7.70	7.34E-07	0.85192	0
6	3964.5	62.96	10.02	5.53E-07	0.28690	0
7	4081.3	63.89	10.17	5.29E-07	0.29830	0
8	5457.4	73.87	11.76	3.28E-07	0.78164	0
9	7474.3	86.45	13.76	2.12E-07	0.98909	0
10	8758.7	93.59	14.90	1.20E-07	0.91062	0
11	9202.7	95.93	15.27	9.38E-08	0.87070	0
12	11084.0	105.28	16.76	1.00E-07	0.75211	0
13	12234.0	110.61	17.60	1.10E-07	0.74153	0
14	15341.0	123.86	19.71	5.20E-08	0.86943	0
15	16030.0	126.61	20.15	7.83E-08	0.89137	0
16	20161.0	141.99	22.60	5.44E-08	0.93507	0
17	20275.0	142.39	22.66	2.59E-08	0.36644	0
18	21340.0	146.08	23.25	3.76E-08	0.79007	0
19	21744.0	147.46	23.47	4.40E-08	0.90077	0
20	22452.0	149.84	23.85	3.95E-08	0.72632	0

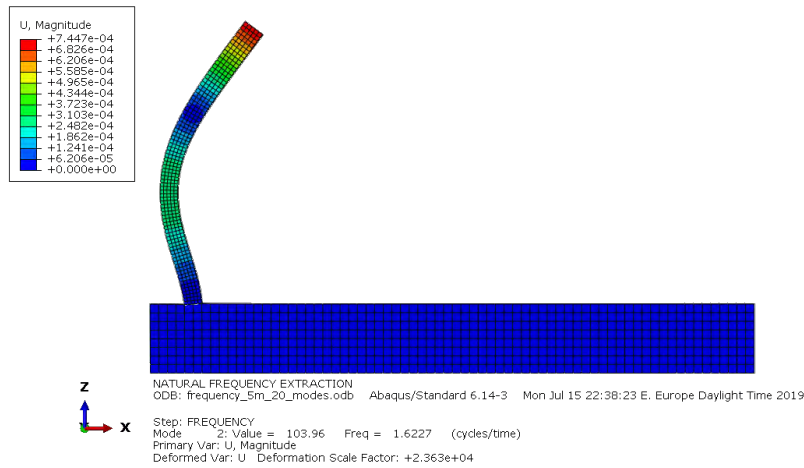
Πίνακας 2 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 5m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.



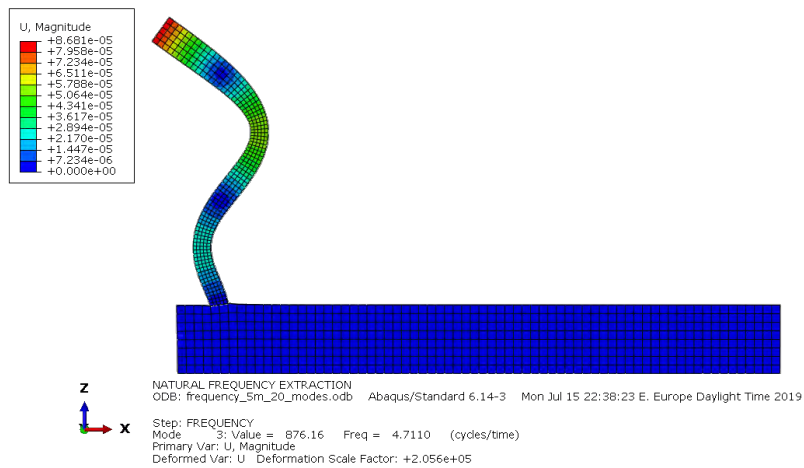
Σχήμα 54 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 5 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



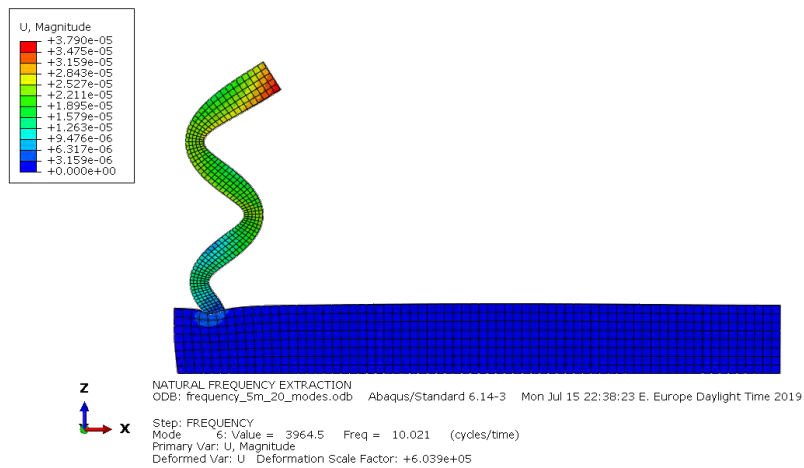
Σχήμα 55 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 5 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



Σχήμα 56 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 5 m ($f_1 = 1.62 \text{ Hz}$)



Σχήμα 57 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 5 m ($f_2 = 4.71 \text{ Hz}$)

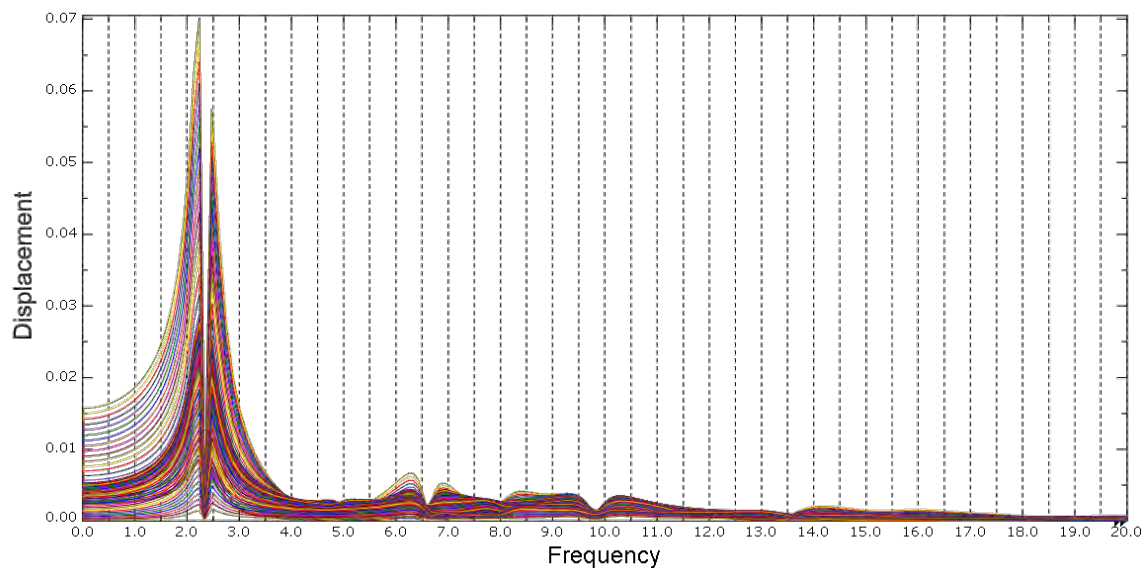


Σχήμα 58 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 5 m ($f_3 = 10.02 \text{ Hz}$)

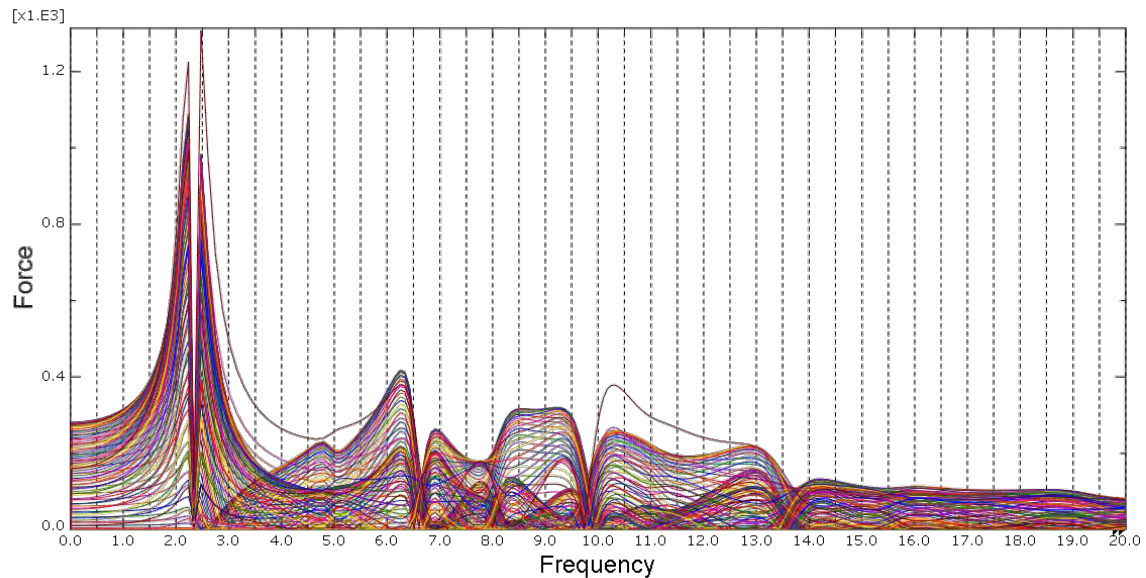
Προσομοίωμα πλάτους 7 m

EIGENVALUE OUTPUT						
MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY		GENERALIZED MASS		COMPOSITE MODAL DAMPING
		(RAD/TIME)	CYCLES/TIME	TOTAL	ACOUSTIC FRACTION	
1	6.4	2.53	0.40	0.0709381	0.53691	0
2	215.7	14.69	2.34	4.48E-05	0.52114	0
3	961.4	31.01	4.93	1.89E-06	0.93443	0
4	1721.2	41.49	6.60	9.05E-07	0.63573	0
5	2575.5	50.75	8.08	8.62E-07	0.72726	0
6	3811.7	61.74	9.83	4.48E-05	0.00212	0
7	4896.0	69.97	11.14	2.65E-07	0.82685	0
8	7232.3	85.04	13.54	1.28E-07	0.68299	0
9	7540.6	86.84	13.82	1.31E-07	0.90376	0
10	8867.5	94.17	14.99	1.19E-07	0.95086	0
11	9615.5	98.06	15.61	1.08E-07	0.77851	0
12	11564.0	107.54	17.12	1.37E-07	0.91129	0
13	14637.0	120.98	19.26	4.50E-08	0.85136	0
14	15518.0	124.57	19.83	6.41E-08	0.89648	0
15	17682.0	132.98	21.16	7.32E-08	0.42431	0
16	20153.0	141.96	22.59	4.98E-08	0.92927	0
17	21120.0	145.33	23.13	3.53E-08	0.79929	0
18	21585.0	146.92	23.38	4.71E-08	0.94241	0
19	22035.0	148.44	23.63	3.36E-08	0.82715	0
20	22912.0	151.37	24.09	8.79E-08	0.34724	0

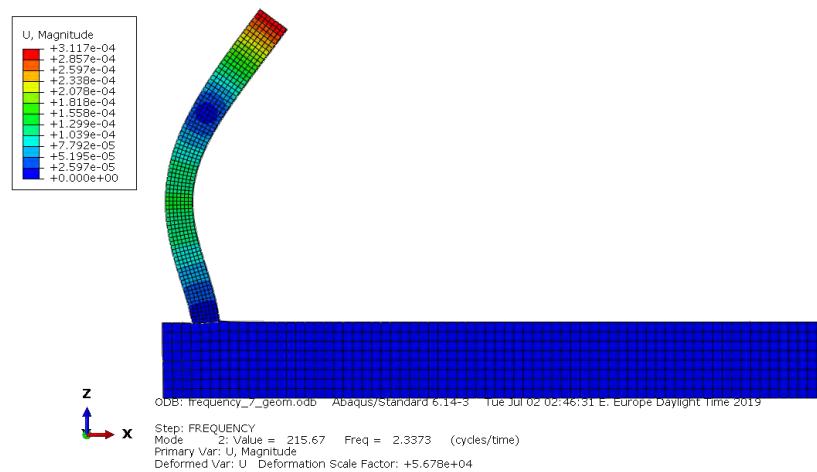
Πίνακας 3 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 7m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος



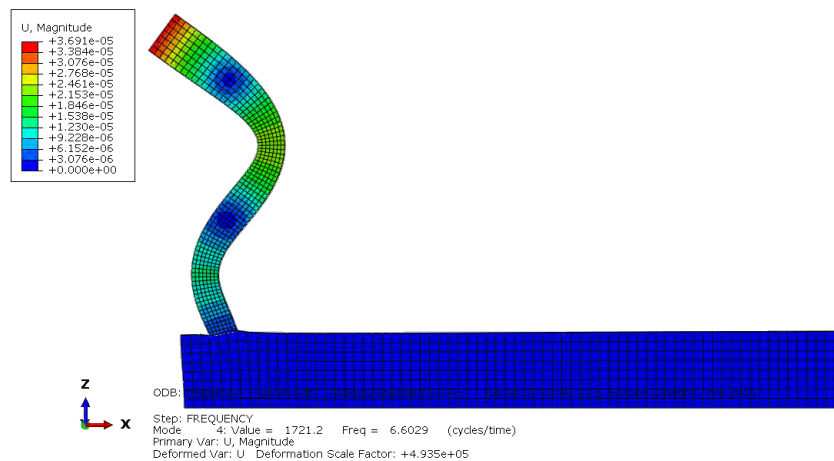
Σχήμα 59 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 7 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



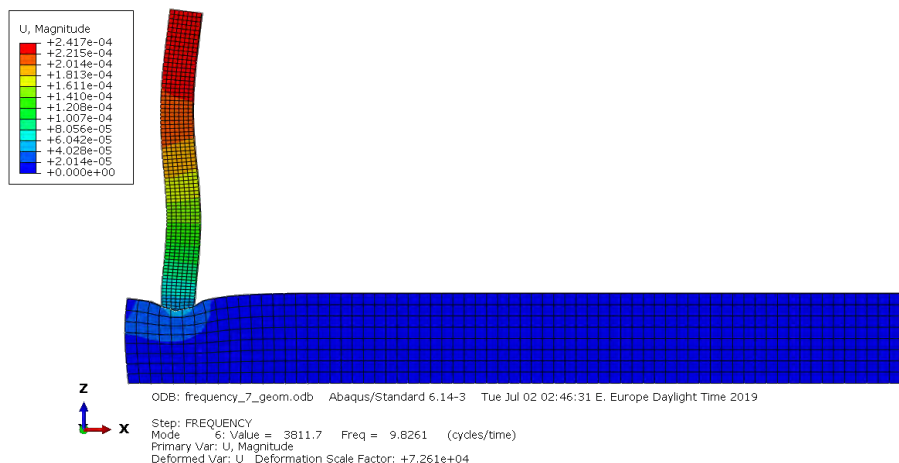
Σχήμα 60 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 7 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



Σχήμα 61 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 7 m ($f_1 = 2.34$ Hz)



Σχήμα 62 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 7 m ($f_2 = 6.60$ Hz)

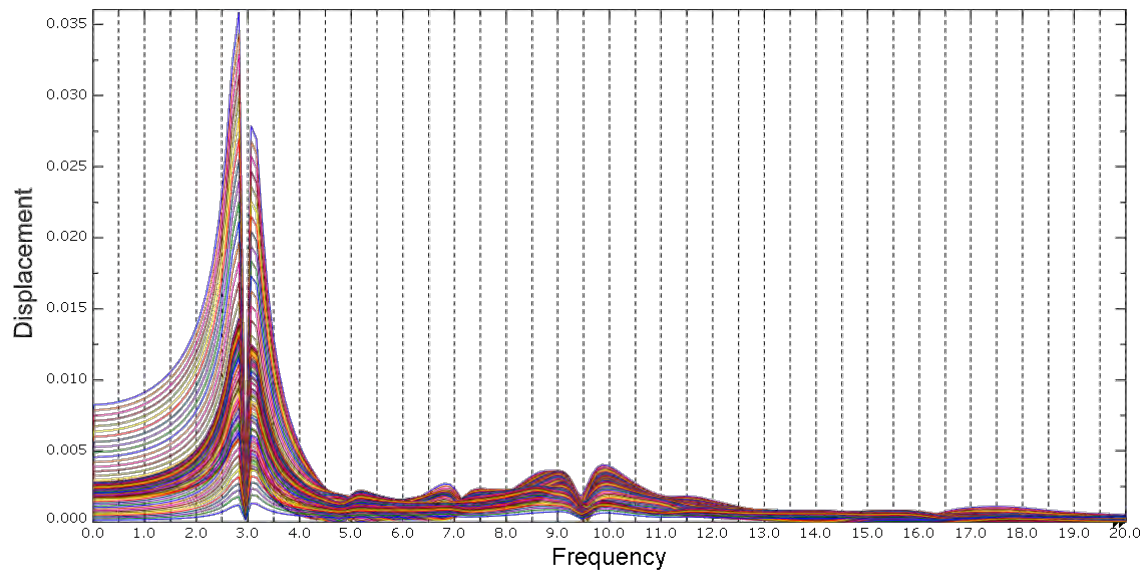


Σχήμα 63 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 7 m ($f_3 = 9.83$ Hz)

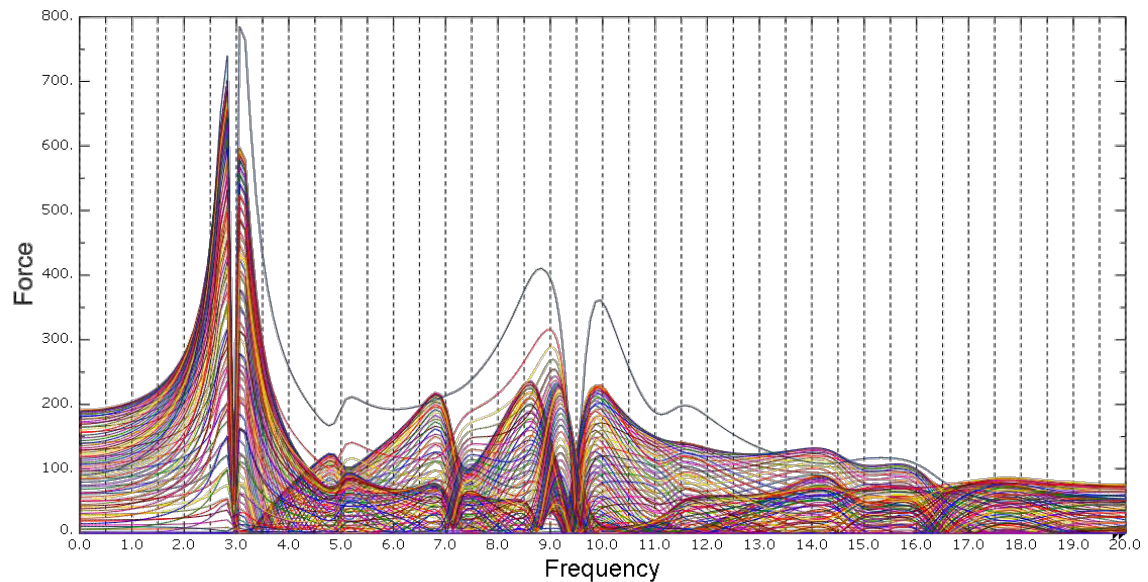
Προσομοίωμα πλάτους 9 m

EIGENVALUE OUTPUT						
MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY		GENERALIZED MASS		COMPOSITE MODAL DAMPING
		(RAD/TIME)	CYCLES/TIME	TOTAL	ACOUSTIC FRACTION	
1	11.1	3.34	0.53	2.64E-02	0.47901	0
2	344.3	18.56	2.95	1.71E-05	0.51836	0
3	978.3	31.28	4.98	1.79E-06	0.92354	0
4	2012.0	44.86	7.14	7.41E-07	0.77830	0
5	3144.9	56.08	8.93	8.67E-07	0.55100	0
6	3546.1	59.55	9.48	5.19E-06	0.05131	0
7	5054.5	71.10	11.32	3.33E-07	0.78967	0
8	7459.4	86.37	13.75	2.22E-07	0.98450	0
9	8492.5	92.16	14.67	7.43E-08	0.82611	0
10	8841.0	94.03	14.97	9.11E-08	0.93482	0
11	10567.0	102.80	16.36	1.14E-07	0.67362	0
12	11813.0	108.69	17.30	1.21E-07	0.78274	0
13	14781.0	121.58	19.35	5.41E-08	0.88477	0
14	15609.0	124.94	19.88	8.06E-08	0.89762	0
15	20145.0	141.93	22.59	4.58E-08	0.91869	0
16	20771.0	144.12	22.94	2.24E-08	0.50907	0
17	20955.0	144.76	23.04	3.63E-08	0.79735	0
18	21537.0	146.75	23.36	5.52E-08	0.94070	0
19	22026.0	148.41	23.62	5.45E-08	0.64216	0
20	22957.0	151.52	24.11	1.00E-07	0.33683	0

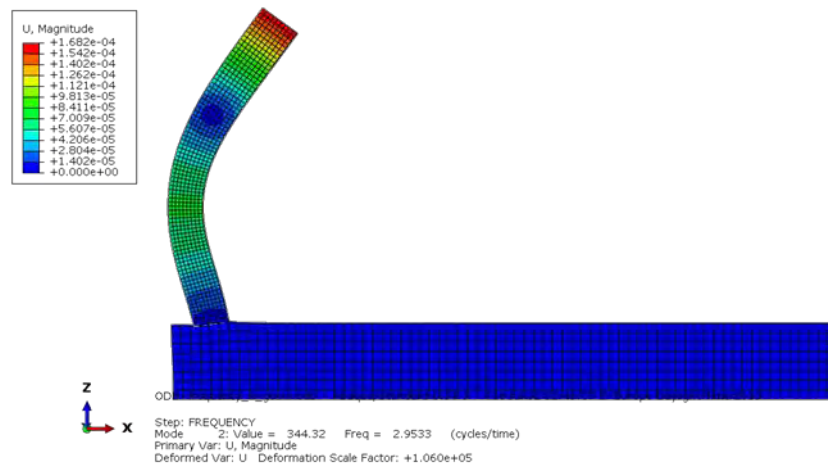
Πίνακας 4 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 9m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.



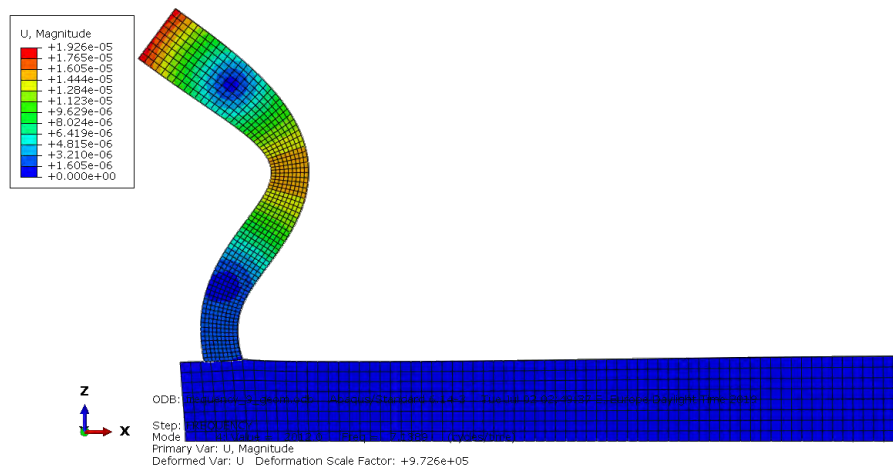
Σχήμα 64 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 9 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



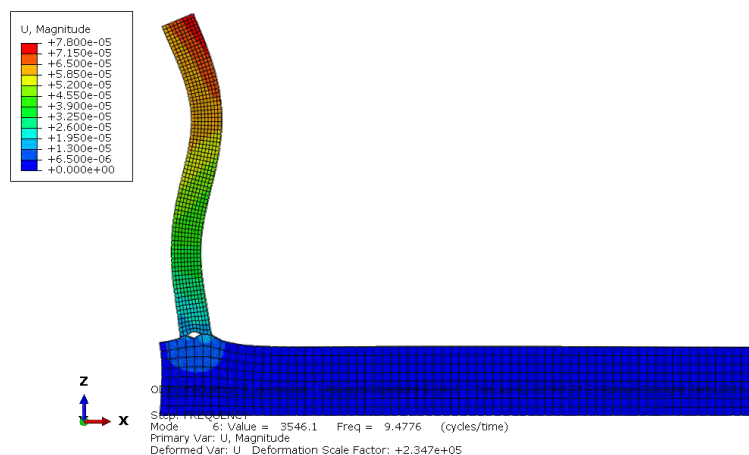
Σχήμα 65 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 9 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



Σχήμα 66 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 9 m ($f_1 = 2.95$ Hz)



Σχήμα 67 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 9 m ($f_2 = 7.14$ Hz)

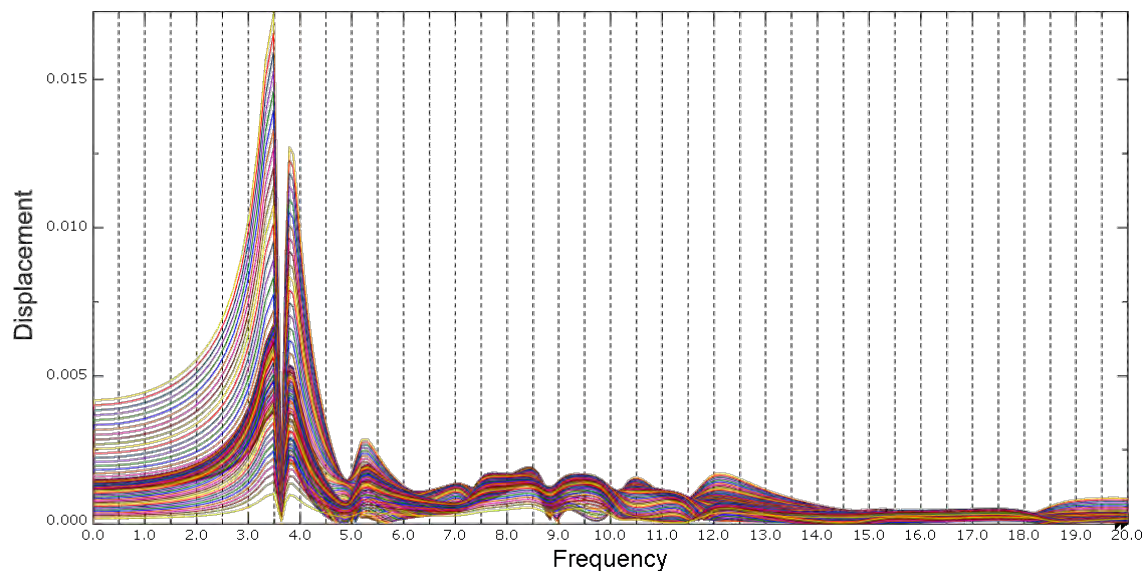


Σχήμα 68 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 9 m ($f_3 = 9.48$ Hz)

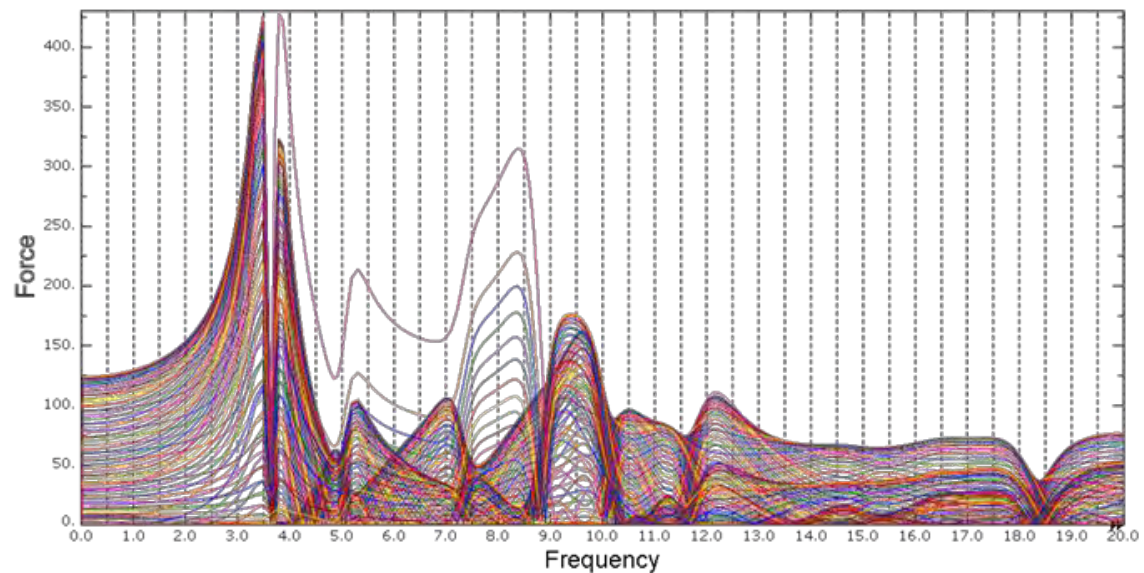
Προσομοίωμα πλάτους 12 m

MODE NO	EIGENVALUE	EIGENVALUE OUTPUT				
		FREQUENCY		GENERALIZED MASS		COMPOSITE MODAL DAMPING
		(RAD/TIME)	CYCLES/TIME	TOTAL	ACOUSTIC FRACTION	
1	19.7	4.44	0.71	9.67E-03	0.41655	0
2	523.6	22.88	3.64	6.82E-06	0.5693	0
3	1015.1	31.86	5.07	1.70E-06	0.87413	0
4	2123.9	46.09	7.33	8.06E-07	0.78821	0
5	3082.8	55.52	8.84	9.71E-06	2.38E-02	0
6	4012.7	63.35	10.08	2.33E-07	0.69671	0
7	5408.0	73.54	11.70	3.93E-07	0.64230	0
8	7474.4	86.45	13.76	1.91E-07	0.98265	0
9	8730.6	93.44	14.87	1.07E-07	0.94504	0
10	8913.5	94.41	15.03	9.33E-08	0.85473	0
11	11243.0	106.03	16.88	1.24E-07	0.89335	0
12	13302.0	115.34	18.36	4.20E-08	0.59516	0
13	14746.0	121.43	19.33	4.89E-08	0.83576	0
14	15643.0	125.07	19.91	7.82E-08	0.80748	0
15	20141.0	141.92	22.59	4.11E-08	0.91647	0
16	20758.0	144.08	22.93	4.62E-08	0.87628	0
17	21438.0	146.42	23.30	2.71E-08	0.92396	0
18	21542.0	146.77	23.36	5.07E-08	0.87925	0
19	22796.0	150.98	24.03	1.08E-07	0.31781	0
20	24408.0	156.23	24.87	6.75E-08	0.8067	0

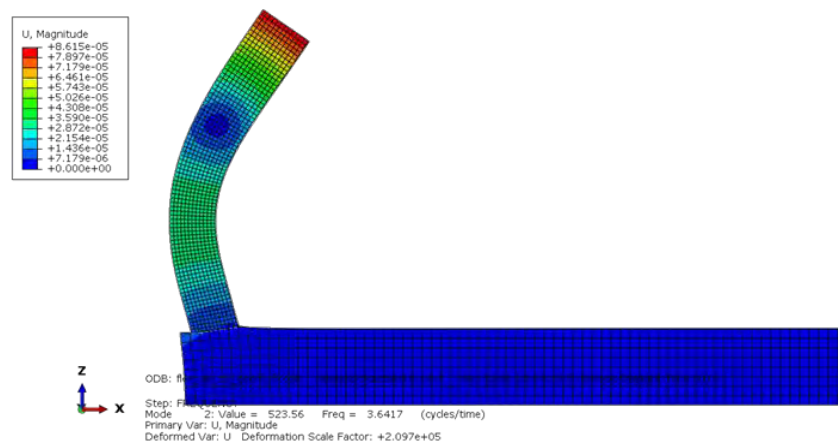
Πίνακας 5 : Ιδιοσυχνότητες για προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 12m. Με έντονους χαρακτήρες δίδονται οι ιδιοσυχνότητες με σημαντική συμμετοχή στην ταλάντωση του φράγματος.



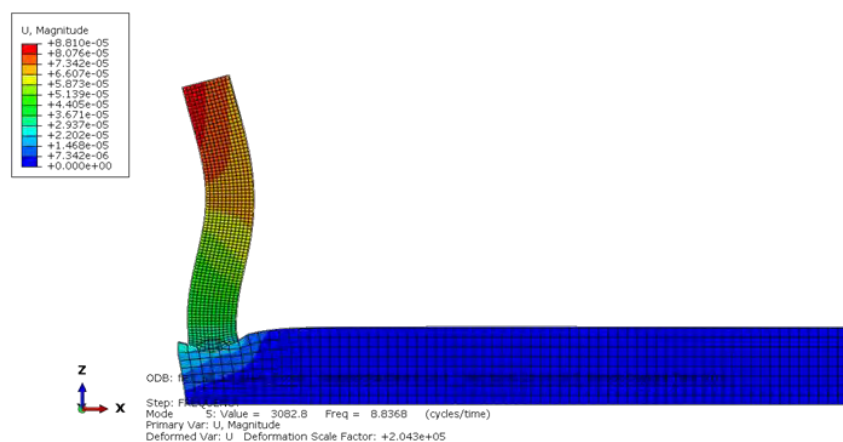
Σχήμα 69 : Μέγεθος μετατόπισης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 12 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



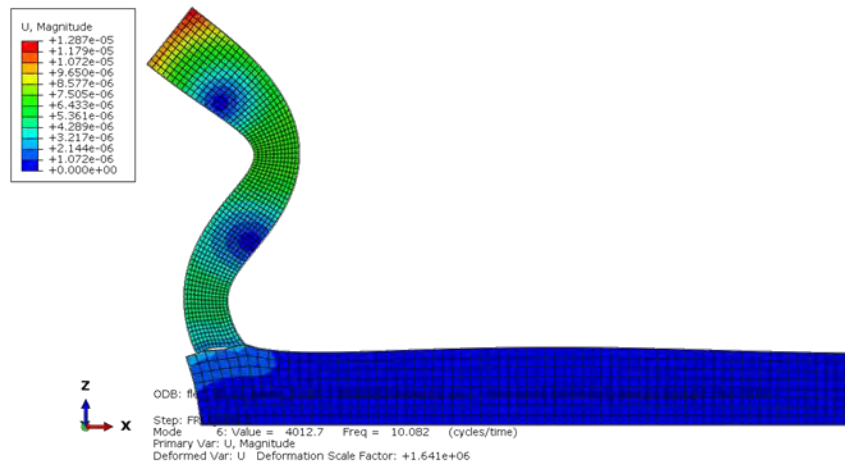
Σχήμα 70 : Μέγεθος δύναμης αντίδρασης των ανάντη κόμβων φράγματος πλάτους 12 m, σε διάστημα συχνοτήτων 0 ÷ 18 Hz



Σχήμα 71 : Μετατόπιση στην 1η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 12 m ($f_1 = 3.64$ Hz)



Σχήμα 72 : Μετατόπιση στην 2η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 12 m ($f_2 = 8.84$ Hz)



Σχήμα 73 : Μετατόπιση στην 3η ιδιομορφή ταλάντωσης του φράγματος πλάτους 12 m ($f_3 = 10.08$ Hz)

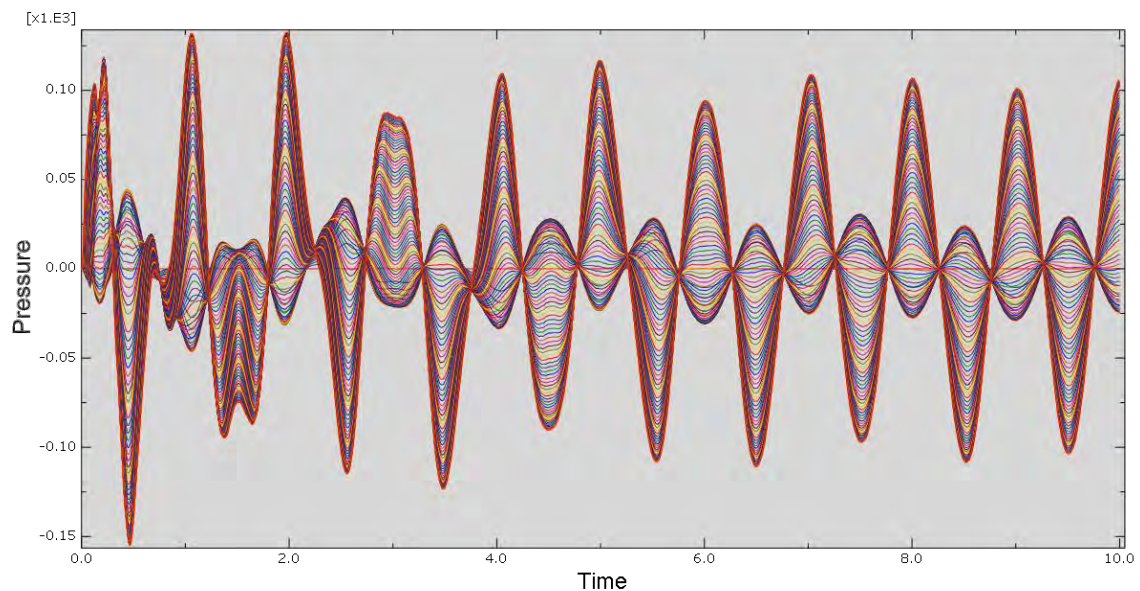
ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (Hz)	5 m	7 m	9 m	12 m
1η ιδιοσυχνότητα	1.62	2.34	2.95	3.64
2η ιδιοσυχνότητα	4.71	6.60	7.14	8.84
3η ιδιοσυχνότητα	10.02	9.83	9.48	10.08

Πίνακας 6: Πρώτες τρεις σημαντικές συχνότητες προσομοιωμάτων

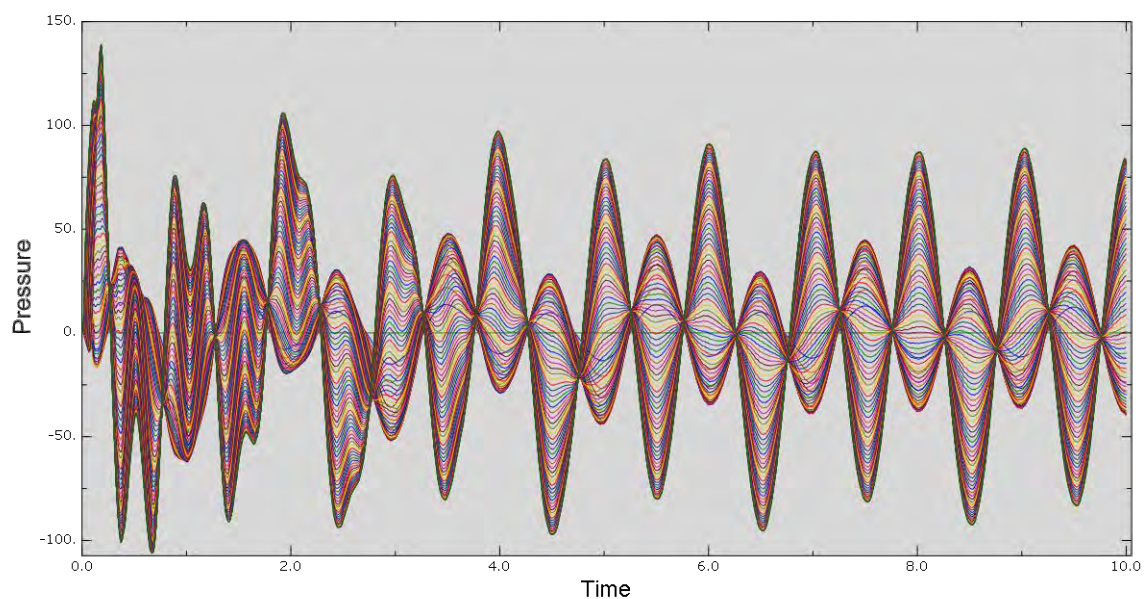
Από τα παραπάνω διαγράμματα και πίνακες φαίνεται ότι το διάστημα $1 \div 18$ Hz στο οποίο η απόσβεση Rayleigh παίρνει τιμές από 2.2% έως 5%, περιλαμβάνει τόσο τη συχνότητα επιβαλλόμενης διέγερσης όσο και τις πρώτες ιδιοσυχνότητες σε όλα τα προσομοιώματα.

4.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ

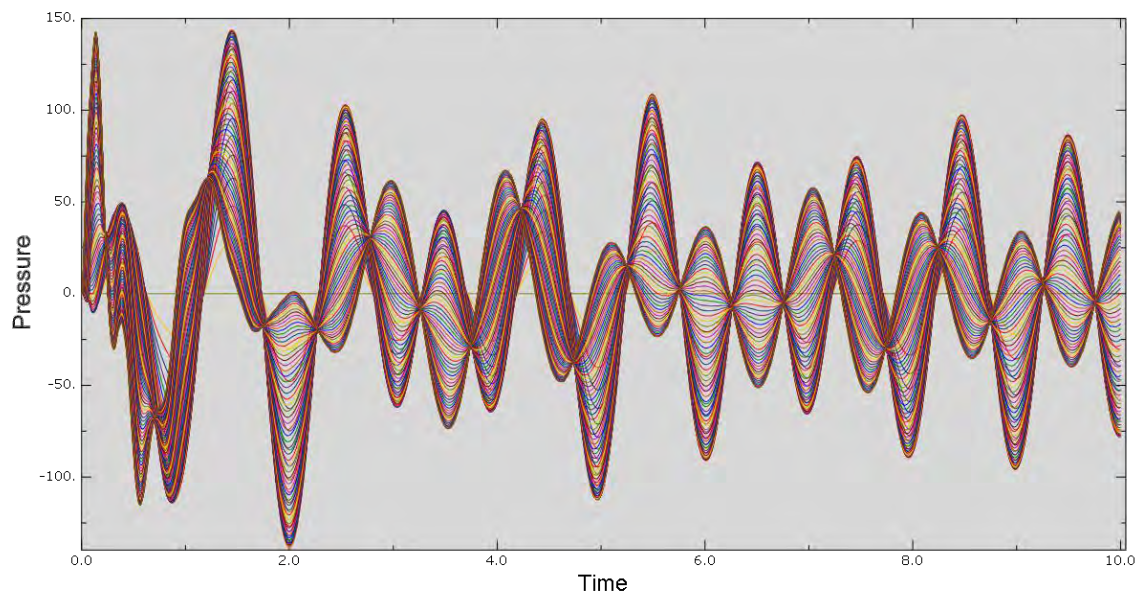
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χρονοϊστορίες των υδροδυναμικών πιέσεων για τις αναλύσεις με φράγματα 7 m, 9 m και 12 m. Η αντίστοιχη χρονοϊστορία για φράγμα 5 m φαίνεται στο Σχήμα 39, στη σελίδα 38.



Σχήμα 74 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 7 m- εύκαμπτο βράχο



Σχήμα 75 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 9 m- εύκαμπτο βράχο

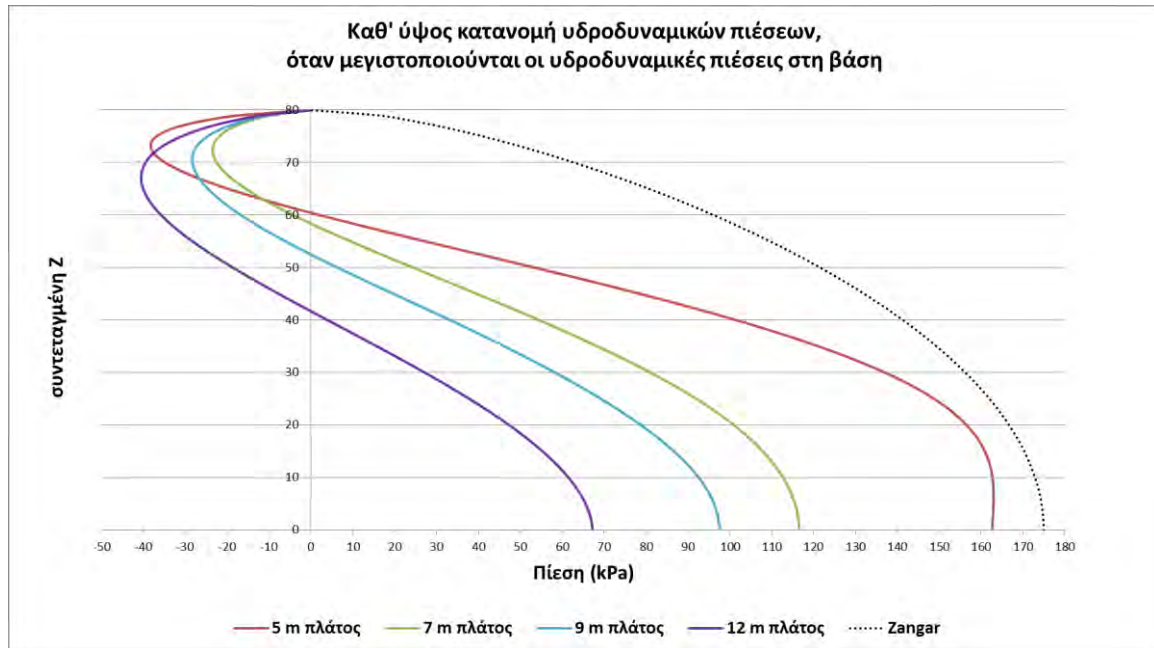


Σχήμα 76 : Χρονοϊστορία υδροδυναμικών πιέσεων σε εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 12 m- εύκαμπτο βράχο

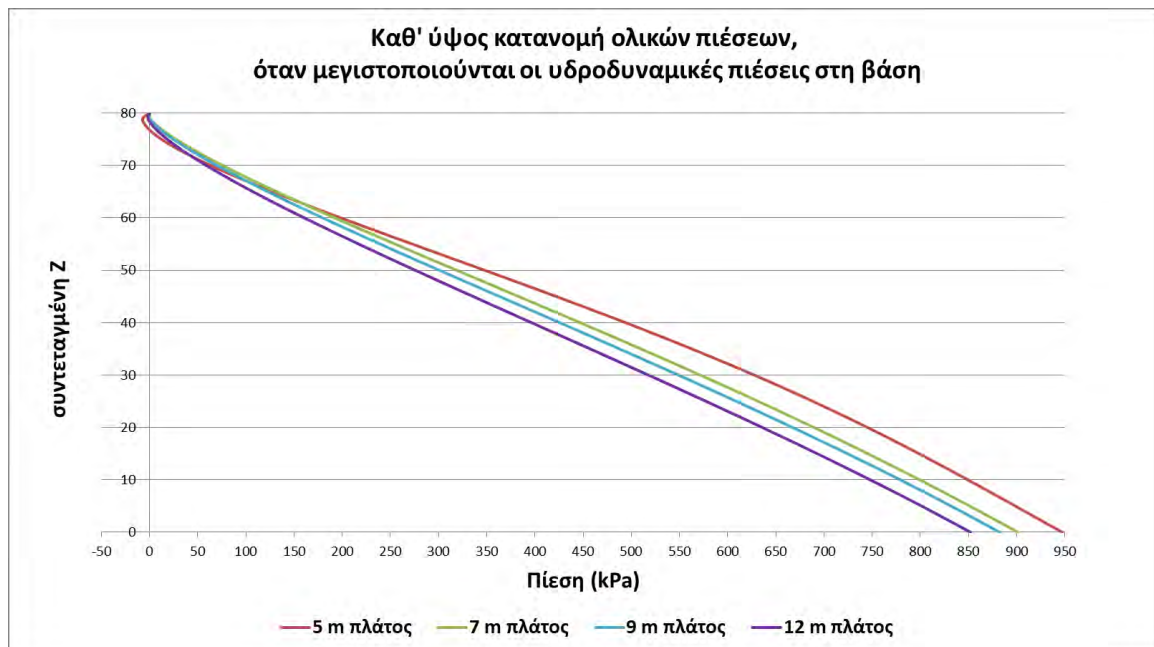
Η υδροδυναμική πίεση δεν παίρνει τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της την ίδια χρονική στιγμή σε κάθε προσομοίωμα, ούτε εμφανίζεται στον ίδιο κόμβο σε όλα τα προσομοιώματα. Στα προσομοιώματα με πλάτος φράγματος 5, 7 και 9 m, οι ακραίες τιμές εμφανίζονται στους κόμβους της βάσης του φράγματος. Στο προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 12 m, οι ακραίες υδροδυναμικές πιέσεις δεν εμφανίζονται στη βάση του φράγματος αλλά πιο κοντά στη στέψη του.

Οι χρονικές στιγμές, κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης, όπου μεγιστοποιείται η υδροδυναμική πίεση στη βάση του φράγματος, είναι αυτές στις οποίες η βάση του φράγματος βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο προς τα κατάντη και ξεκινάει να κινείται προς τον ταμιευτήρα, ενώ αντίθετα η στέψη του φράγματος βρίσκεται στην πιο ανάντη θέση της ταλάντωσης και ξεκινάει να απομακρύνεται από τον ταμιευτήρα.

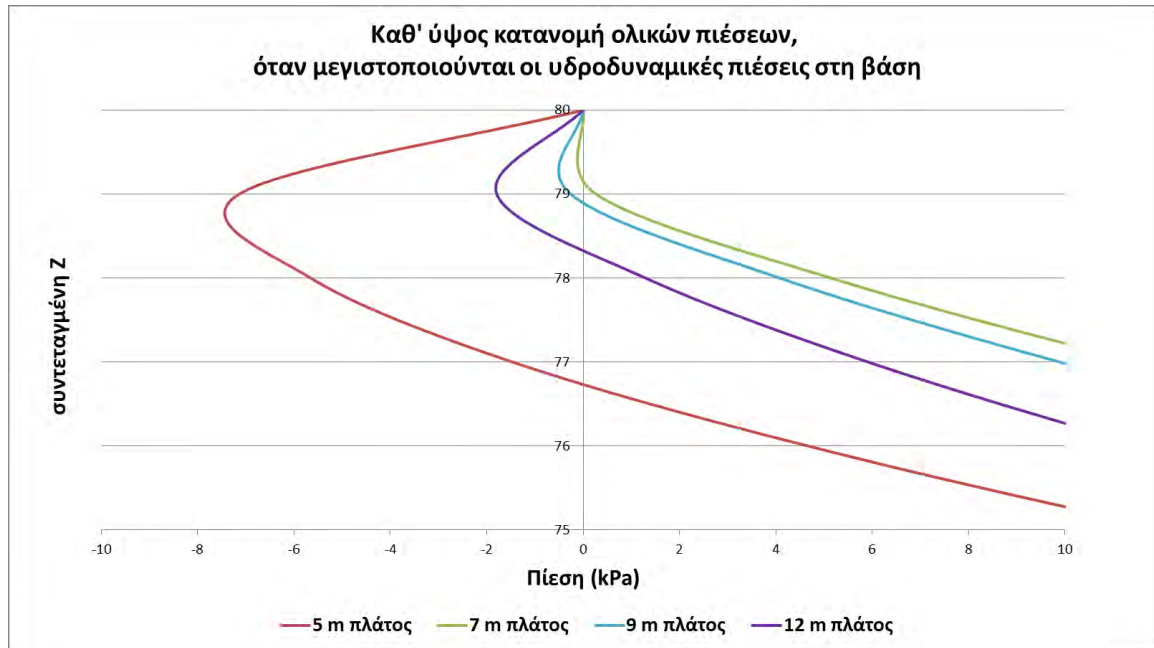
Στο Σχήμα 77, συγκρίνονται οι καθ' ύψος κατανομές των υδροδυναμικών πιέσεων τις χρονικές στιγμές που σε κάθε προσομοίωμα μεγιστοποιείται η πίεση στη βάση του κάθε φράγματος, καθώς και αυτές που υπολογίζονται αναλυτικά κατά Zangar. Οι ολικές πιέσεις που ασκούνται στην σταθερή κατάσταση στο κάθε φράγμα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 78, ενώ το Σχήμα 79 αποτελεί λεπτομέρεια του προηγούμενου, οπου φαίνεται ευκρινώς το μικρό μέγεθος των αναπτυσσόμενων σχετικών υποπιέσεων κοντά στη στέψη του φράγματος. Για τις ίδιες χρονικές στιγμές, στο Σχήμα 80, φαίνονται οι οριζόντιες σχετικές μετατοπίσεις κάθε κόμβου της ανάντη επιφάνειας του φράγματος ως προς τη βάση του φράγματος.



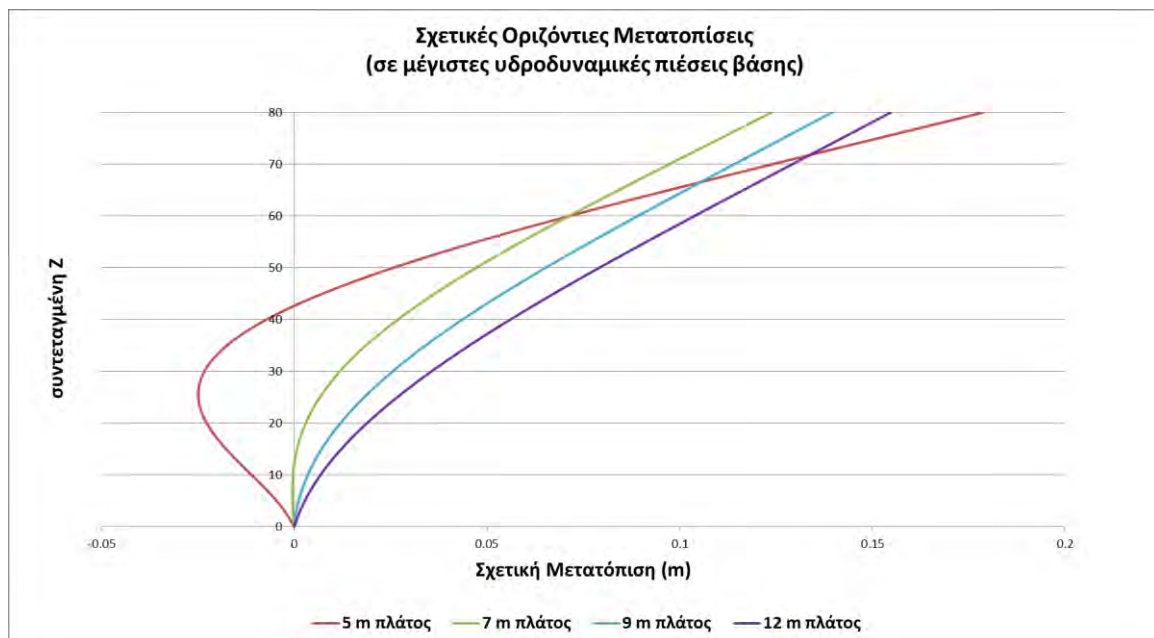
Σχήμα 77 : Καθ' ύψος κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων, όταν μεγιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος ($B = 5 \text{ m} : t = 4.01 \text{ sec}$, $B = 7 \text{ m} : t = 5.00 \text{ sec}$, $B = 9 \text{ m} : t = 3.98 \text{ sec}$, $B = 12 \text{ m} : t = 4.07 \text{ sec}$, όπου B το πλάτος του φράγματος)



Σχήμα 78 : Ολικές πιέσεις, όταν μεγιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος



Σχήμα 79 Λεπτομέρεια ολικών πιέσεων, για μέγιστες πιέσεις βάσης



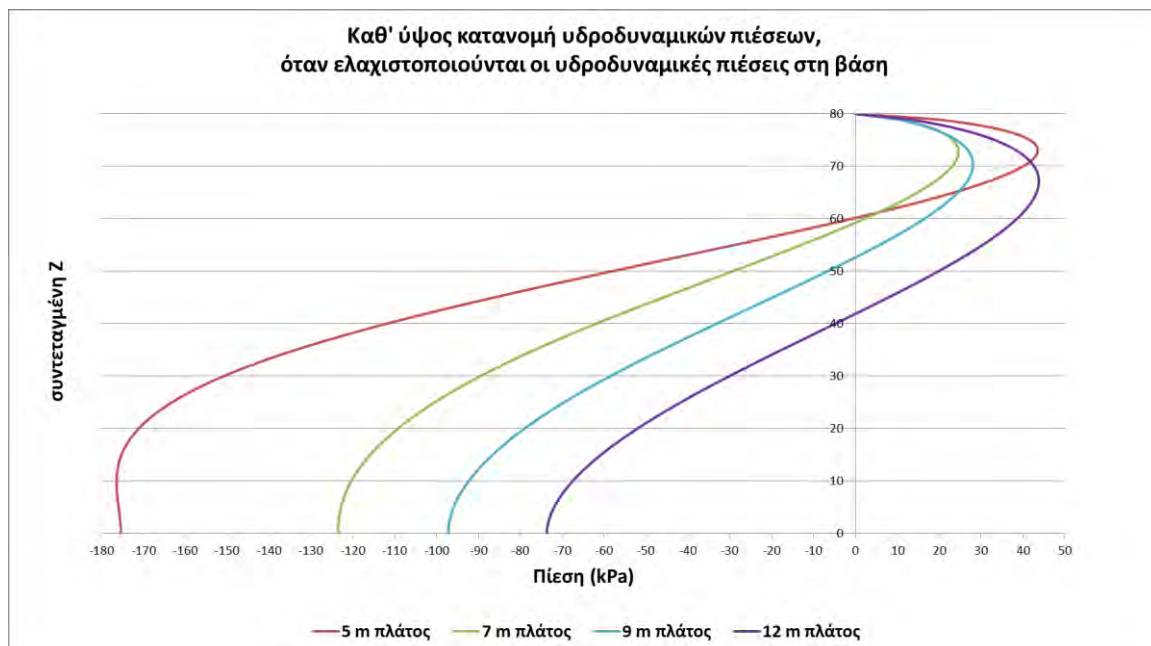
Σχήμα 80 : Σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τη βάση του φράγματος, τη στιγμή εμφάνισης των μέγιστων πιέσεων βάσης

Από τα παραπάνω σχήματα, φαίνεται ότι, σε αυτές τις χρονικές στιγμές το πιο εύκαμπτο φράγμα, πλάτους 5 m, κάμπτεται πολύ περισσότερο από όλα τα υπόλοιπα. Η μέγιστη κάμψη εμφανίζεται χαμηλά στο φράγμα, σε ύψος περίπου στο ένα τρίτο του συνολικού ύψους φράγματος ($20 \div 30$ m). Εξαιτίας της αυξημένης κάμψης που παρουσιάζει, η στροφή στη βάση του είναι αντίθετης φοράς από αυτή των υπόλοιπων τριών φραγμάτων. Αυτός είναι και ο λόγος που η καθ' ύψος κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων διαφοροποιείται στο πλέον εύκαμπτο φράγμα, από αυτές των υπολοίπων. Οι σχετικές μετατοπίσεις στη στέψη του φράγματος είναι μεγαλύτερες από όλα τα υπόλοιπα φράγματα και στο κατώτερο τμήμα του είναι αρνητικές.

Στα υπόλοιπα τρία φράγματα, όσο πιο δύσκαμπτο είναι το φράγμα, τόσο πιο μεγάλη είναι η στροφή που εμφανίζει σε σχέση με το έδαφος, τόσο πιο μεγάλες οι σχετικές μετατοπίσεις που εμφανίζονται και τόσο μικρές οι αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές πιέσεις.

Στο Σχήμα 77, φαίνεται και η κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων όπως υπολογίζονται με τη θεωρητική λύση Zangar. Η λύση αυτή αφορά τελείως άκαμπτο φράγμα, με μηδενικές δηλαδή σχετικές μετατοπίσεις. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, όσο πιο μικρές είναι οι σχετικές μετατοπίσεις, τόσο πιο κοντά είναι και οι τιμές των υδροδυναμικών πιέσεων σε αυτές που υπολογίζεται κατά Zangar.

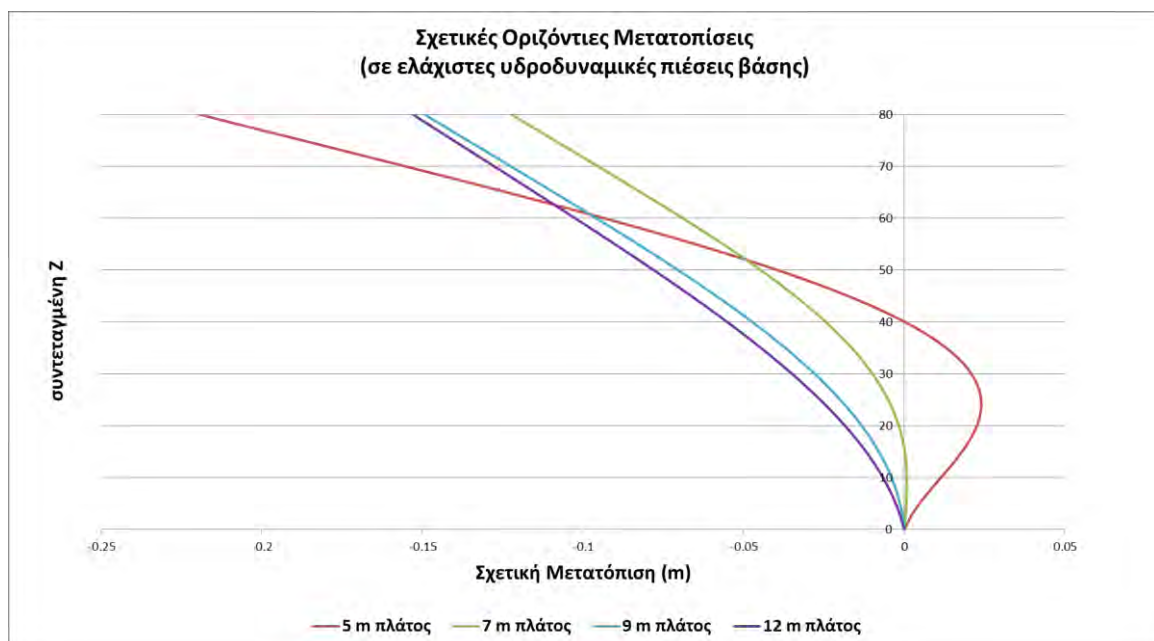
Αντίστοιχα, οι κατανομές καθ' ύψος των υδροδυναμικών πιέσεων, των ολικών πιέσεων και των σχετικών οριζόντιων μετατοπίσεων ως προς τη βάση του φράγματος, για τις χρονικές στιγμές που ελαχιστοποιούνται οι υδροδυναμικές πιέσεις στη βάση του κάθε φράγματος διαφορετικού πλάτους, φαίνονται στο Σχήμα 81, Σχήμα 82 και Σχήμα 83.



Σχήμα 81 : Καθ' ύψος κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων τη στιγμή κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος ($B = 5 \text{ m} : t = 2.49 \text{ sec}$, $B = 7 \text{ m} : t = 3.48 \text{ sec}$, $B = 9 \text{ m} : t = 4.50 \text{ sec}$, $B = 12 \text{ m} : t = 3.52 \text{ sec}$)



Σχήμα 82 : Ολικές πιέσεις τη στιγμή κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος



Σχήμα 83 : Σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τη βάση του φράγματος τη στιγμή κατά την οποία ελαχιστοποιούνται οι πιέσεις στη βάση του φράγματος

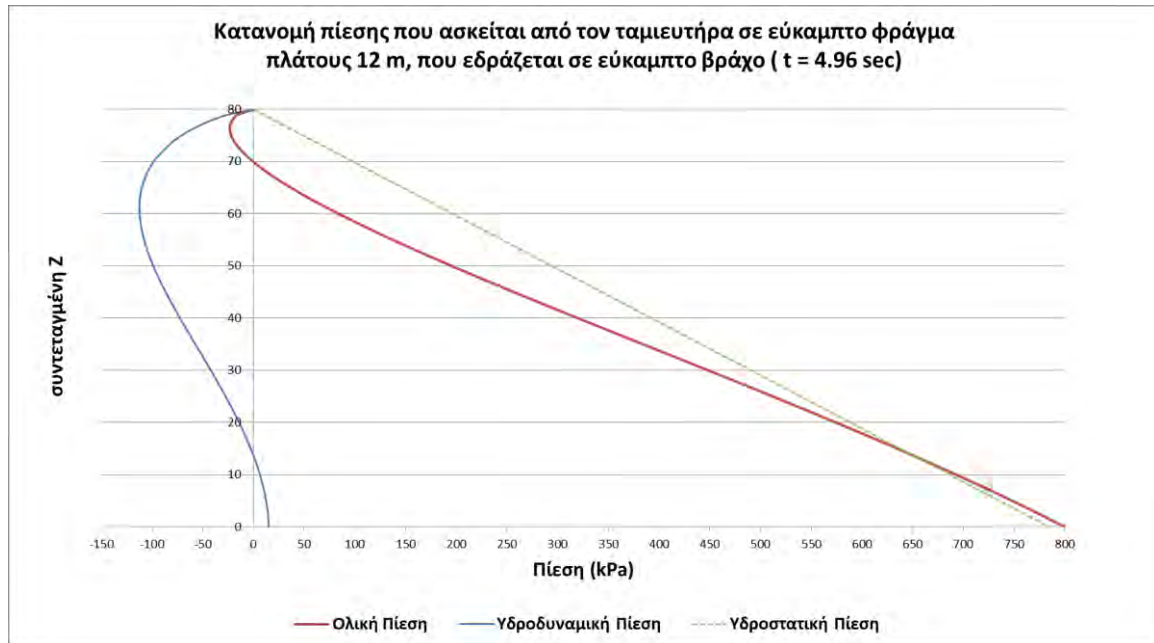
	Άκαμπτο φράγμα - άκαμπτος βράχος	Εύκαμπτο φράγμα - άκαμπτος βράχος	Εύκαμπτο φράγμα- εύκαμπτο βράχος B = 5 m	Εύκαμπτο φράγμα- εύκαμπτο βράχος B = 7 m	Εύκαμπτο φράγμα- εύκαμπτο βράχος B = 9 m	Εύκαμπτο φράγμα- εύκαμπτο βράχος B = 12 m
Μέγιστη υδροδυναμική πίεση (kPa)	173	134	163	117	98	67
Ελάχιστη υδροδυναμική πίεση (kPa)	-173	-134	-176	-123	- 97	-74
Οριζόντια επιτάχυνση στέψης (g)	0.3	0.8	1.10	0.76	0.67	1.04
Οριζόντια επιτάχυνση βάσης (g)	0.3	0.3	0.31	0.31	0.3	0.29
Κατακόρυφη επιτάχυνση στέψης (g)	-	0.06	0.11	0.08	0.09	0.15
Κατακόρυφη επιτάχυνση βάσης (g)	-	-	0.01	0.01	0.01	0.02

Πίνακας 7 : Μέγιστες και ελάχιστες τιμές υδροδυναμικών πιέσεων και επιταχύνσεων εμφανιζόμενες στη βάση του φράγματος

Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των υδροδυναμικών πιέσεων που εμφανίζονται στη βάση του φράγματος. Όπως ήδη αναφέρθηκε, για όλα τα προσομοιώματα εκτός από το προσομοίωμα με φράγμα πλάτους 12 m, αυτές είναι και οι συνολικά μέγιστες και ελάχιστες αναπτυσσόμενες, μετά τα πρώτα δευτερόλεπτα της επιβαλλόμενης διέγερσης.

Στο προσομοίωμα με το φράγμα πλάτους 12 m, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που εμφανίζονται στη βάση του φράγματος είναι 67 kPa και -74 kPa αντίστοιχα, ενώ κοντά στη στέψη του φράγματος, εμφανίζονται οι ακρότατες τιμές της υδροδυναμικής πίεσης. Συγκεκριμένα, στο υψόμετρο $z = 61$ m, εμφανίζεται η ελάχιστη υδροδυναμική πίεση, ίση προς -113 kPa και στο υψόμετρο $z = 62$ m, η μέγιστη, ίση προς 109 kPa, όπως φαίνεται στο Σχήμα 84 και στο Σχήμα 85.

Καθώς, η ελάχιστη υδροστατική πίεση σε αυτό το προσομοίωμα εμφανίζεται σε αρκετά μεγάλο υψόμετρο, άρα σε μικρό βάθος ταμιευτήρα, η υδροστατική πίεση είναι αντίστοιχα μικρή και οδηγεί σε σχετικές υποπίεσεις, (απόλυτες πιέσεις μικρότερες από 1atm). Η ελάχιστη αρνητική ολική πίεση είναι -23.5 k Pa. Η τιμή αυτή είναι μεν σημαντική, αλλά δε φτάνει σε τιμές επικίνδυνες για σπηλαίωση.



Σχήμα 84 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται η ελάχιστη υδροδυναμική πίεση



Σχήμα 85 : Καθ' ύψος κατανομή ολικών, υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων, τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη υδροδυναμική πίεση

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στη διπλωματική αυτή εργασία, έγινε προσπάθεια να μελετηθούν κάποιοι συνήθεις τρόποι υπολογισμού των υδροδυναμικών πιέσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης. Οι πλέον διαδεδομένες προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των πιέσεων αυτών είναι οι αναλυτικές λύσεις προστιθέμενης μάζας, οι οποίες δίνουν σε γενικές γραμμές πιο συντηρητικά αποτελέσματα από τις πιο λεπτομερείς μεθόδους στις οποίες γίνεται χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Η πλέον διαδεδομένη αριθμητική μέθοδος υπολογισμού των υδροδυναμικών πιέσεων είναι μέσω της προσομοίωσης του ταμιευτήρα με χρήση ακουστικών στοιχείων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, ελέγχθηκε το κατά πόσο η προσομοίωση του ταμιευτήρα με ακουστικά στοιχεία, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, δίνει αποτελέσματα παραπλήσια με αυτά των θεωρητικών λύσεων. Τα αριθμητικά προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση αυτή, ακολουθούσαν τις παραδοχές και τους περιορισμούς των αναλυτικών λύσεων.

Από τη σύγκριση που έγινε, φάνηκε ότι η αριθμητική προσέγγιση ήταν σε καλή συμφωνία με τις αναλυτικές λύσεις και κυρίως με τη μέθοδο Zangar (Σχήμα 13, σελίδα 19, όπου γίνεται σύγκριση των υδροδυναμικών πιέσεων όλων των επιλύσεων). Προϋπόθεση για τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων ήταν η ένταξη στο προσομοίωμα επαρκούς μήκους ταμιευτήρα. Το ελάχιστο μήκος ταμιευτήρα που έδινε αποτελέσματα αποδεκτά ήταν ίσο με δύο φορές το ύψος του φράγματος. Σε άλλες πηγές, προτείνεται αρκετά μεγαλύτερο μήκος ταμιευτήρα, για περισσότερο ακριβή αποτελέσματα. (PELECANOS, 2013)

Στη συνέχεια, στη παράγραφο 4.1 Επίδραση ευκαμψίας βάσης, δημιουργήθηκαν και συγκρίθηκαν τρία προσομοιώματα με ίδιες ιδιότητες υλικών, αλλά διαφορετικές συνοριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες ανάγκαζαν τα τμήματα του φράγματος και του βράχου θεμελίωσης, στο πρώτο προσομοίωμα να συμπεριφερθούν ως άκαμπτα σώματα, στο δεύτερο προσομοίωμα επέτρεπαν μόνο στο τμήμα του φράγματος να καμφθεί ελεύθερα, ενώ στο τελευταίο όλα τα τμήματα ήταν ελεύθερα να καμφθούν.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η ευκαμψία της θεμελίωσης και η ευκαμψία του φράγματος παίζουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό των υδροδυναμικών πιέσεων. Μια εύκαμπτη θεμελίωση επιτρέπει στη βάση του φράγματος να μετακινηθεί περισσότερο αλλά κυρίως να καμφθεί περισσότερο. Αυτό συνεπάγεται αύξηση του μεγέθους των υπολογιζόμενων υδροδυναμικών πιέσεων.

Πολύ μεγαλύτερο ρόλο όμως, φαίνεται να παίζει η ευκαμψία του ίδιου του φράγματος, στις αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές πιέσεις. Αρχικά, γιατί επιδρά πιο καθοριστικά στη μορφή της καθ' ύψος κατανομής των πιέσεων. Στο Σχήμα 49 όπου παρουσιάζεται η καθ' ύψος κατανομή των μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων (σελίδα 44), φαίνεται ότι τα δύο προσομοιώματα με εύκαμπτο φράγμα έχουν παρόμοια μορφή κατανομής μέγιστων υδροδυναμικών πιέσεων. Εμφανίζουν τις μέγιστες θετικές στη βάση του

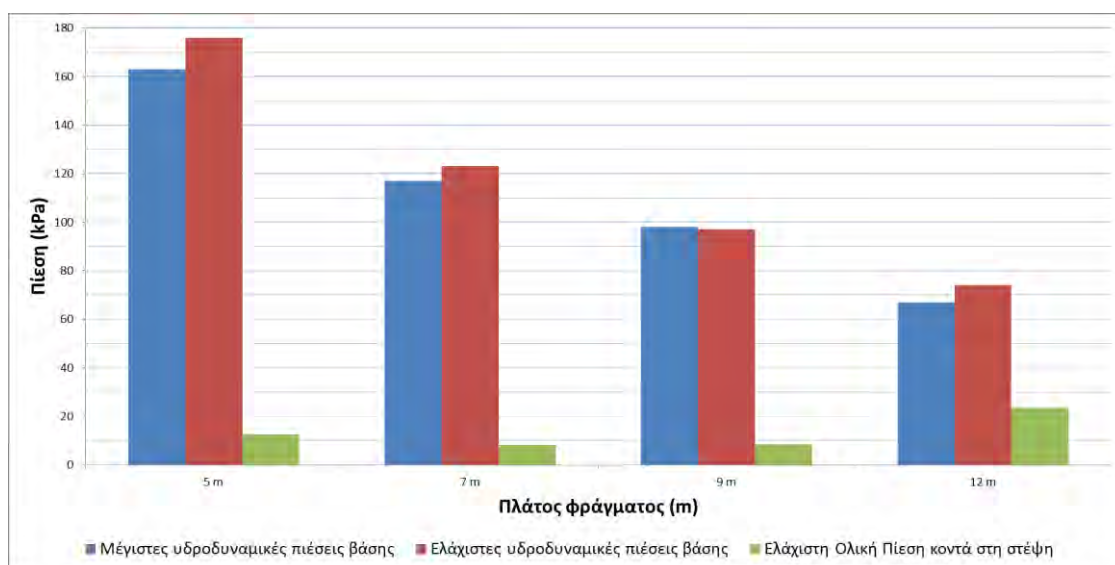
φράγματος αλλά εμφανίζουν και αρνητικές υδροδυναμικές πιέσεις κοντά στη στέψη του φράγματος. Αντίθετα, το προσομοίωμα στο οποίο και το φράγμα συμπεριφέρεται σαν άκαμπτο παρουσιάζει υδροδυναμικές πιέσεις παρόμοιες σε μέτρο και κατανομή με αυτές που υπολογίζονται αναλυτικά κατά Zangar. Σε αυτό το προσομοίωμα δεν εμφανίζονται καθόλου αρνητικές υδροδυναμικές πιέσεις, όταν οι υδροδυναμικές πιέσεις στη βάση είναι θετικές.

Ο δεύτερος λόγος για τον οποίο η επίδραση της ευκαμψίας του φράγματος είναι μεγαλύτερη από αυτή της ευκαμψίας του βράχου θεμελίωσης είναι ότι τα φράγματα σκυροδέματος και ειδικά τα τοξωτά φράγματα κατασκευάζονται σε υγιείς, σχετικά δύσκαμπτους βράχους. Πιο μαλακά εδάφη δε θα μπορούσαν να εδράσουν ούτως ή άλλως τέτοιου τύπου φράγματα.

Σε κάθε περίπτωση όμως, η παράληψη της, έστω και μικρής, ευκαμψίας της θεμελίωσης στη δυναμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, θα αποτελούσε παράβλεψη καθώς μάλλον θα οδηγούσε σε υπολογιζόμενες υδροδυναμικές πιέσεις μικρότερου μέτρου.

Τέλος, στην παράγραφο 4.2 όπου διερευνάται η επίδραση της ευκαμψίας του φράγματος, γίνεται αναλυτικότερη μελέτη της επίδρασης της ευκαμψίας του φράγματος με σύγκριση προσομοιωμάτων εύκαμπτου φράγματος σε εύκαμπτη θεμελίωση, για τέσσερα διαφορετικά πλάτη φράγματος (5 m, 7 m, 9 m και 12 m). Είναι προφανές ότι καθώς όλα τα φράγματα προσομοιώνονται με τις ίδιες ιδιότητες υλικού, η αύξηση της διάστασής του κατά τη φορά της διέγερσης, αυξάνει τη δυσκαμψία του.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι όσο πιο εύκαμπτο, με μικρό πλάτος διατομής, είναι το φράγμα τόσο πιο σημαντική είναι η επίδραση των υδροδυναμικών δυνάμεων πάνω του. Στο Σχήμα 86, φαίνεται ότι οι μέγιστες και ελάχιστες υδροδυναμικές πιέσεις που εμφανίζονται στη βάση του φράγματος μειώνονται κατά μέτρο σχεδόν ανάλογα με την αύξηση του πλάτους του φράγματος.



Σχήμα 86 : Μέγιστες και ελάχιστες υδροδυναμικές πιέσεις βάσης φράγματος και ελάχιστη ολική πίεση για διαφορετικά πλάτη φράγματος

Ένας επιπλέον σημαντικός λόγος, που κάνει απαραίτητο το σωστό υπολογισμό των υδροδυναμικών πιέσεων που δέχεται ένα φράγμα υπό σεισμική διέγερση είναι οι υποπίεσεις που εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα του φράγματος. Οι σημαντικές αρνητικές υδροδυναμικές πιέσεις που εμφανίζονται κοντά στη στέψη του φράγματος, εκεί δηλαδή που η τιμή της υδροστατικής πίεση δεν είναι μεγάλη, οδηγούν σε υποπίεσεις (απόλυτες, ολικές πιέσεις μικρότερες από 1 atm). Ασκούνται συνεπώς, εφελκυστικές δυνάμεις που τείνουν να επιμηκύνουν τη στέψη του φράγματος. Αυτό το φαινόμενο είναι δυνητικά επικίνδυνο ειδικά όταν πρόκειται για τοξωτά φράγματα, καθώς είναι πιθανό να συμβάλει στο άνοιγμα των αρμών στο ανώτερο τμήμα του φράγματος.

Προκειμένου να ελεγχθεί ο βαθμός στον οποίο αυτό το φαινόμενο των αρνητικών ολικών πιέσεων κοντά στη στέψη του φράγματος επηρεάζει τη δυναμική απόκριση και ασφάλεια του φράγματος, είναι απαραίτητη η προσομοίωση του προβλήματος σε τρισδιάστατο μοντέλο. Ειδικά τα τοξωτά φράγματα μεταφέρουν δυνάμεις κατακόρυφα, στη θεμελίωση, λειτουργώντας ως πρόβολοι αλλά και οριζόντια, στα αντερείσματα, με λειτουργία αψίδας. Συνεπώς η συμπεριφορά τους μπορεί να μελετηθεί ορθά μόνο με χρήση τρισδιάστατου προσομοιώματος. Προσομοιώματα δύο διαστάσεων, όπως αυτά της παρούσας διπλωματικής διατριβής, μπορεί να έχουν εφαρμογή μόνο σε φράγμα βαρύτητας με πολύ μεγάλο μήκος στέψης ώστε να μπορεί να θεωρηθεί απειρομήκης.

Σε όλες τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, η δυναμική φόρτιση που έχει επιβληθεί στα προσομοιώματα είναι αρμονική ταλάντωση συχνότητας 1 Hz, κατά την οριζόντια μόνο διεύθυνση. Η αρμονική αυτή ταλάντωση απέχει πολύ από έναν πραγματικό σεισμό, ο οποίος περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων αλλά και κατακόρυφη συνιστώσα. Για πιο ακριβή αποτελέσματα θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων από πραγματικούς σεισμούς ή και συνθετικών χρονοϊστοριών. Οι χρονοϊστορίες μπορούν να διορθωθούν ώστε οι μετατοπίσεις στο τέλος της διέγερσης να είναι μηδενικές (baseline correction). Τα αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων με διεγέρσεις βασισμένες σε καταγεγραμμένους σεισμούς ενδεχομένως να διαφέρουν σε κάποιο βαθμό από αυτά της παρούσας εργασίας, τα οποία αντιστοιχούν σε αρμονικές διεγέρσεις.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε για μελλοντική έρευνα η σύγκριση των αποτελεσμάτων από ένα παρόμοια απλοποιημένο προσομοίωμα, στο οποίο το νερό του ταμιευτήρα θα αποτελούσε υλικό Euler. Η αλληλεπίδραση με τα τμήματα Lagrange της θεμελίωσης και του φράγματος θα ήταν εφικτή με συζευγμένη ανάλυση Euler-Lagrange (Coupled Eulerian Lagrange Analysis - CEL).

Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία

- [1] ABAQUS, (2014), 6.14 Documentation Collection. Providence (Rhode Island): Simulia.
- [2] Akköse, M., et al., (2008), “Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the Lagrangian approach”, Applied Mathematical Modelling 32, 2396-2412
- [3] Γκαζέτας, Γ., (1995), “Σημειώσεις εδαφοδυναμικής”, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [4] Chopra, A. K., (1968), “Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE 94(6), 1475-1500.
- [5] Chopra, A. K. and Gupta, S. (1978), “Hydrodynamic and foundation interaction effects in frequency response functions for concrete gravity dams”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 10(1), 89-106.
- [6] Chopra, A. K., (1995), Dynamics of structures: Theory and application to earthquake engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- [7] Chwang, A. T. and Housner, G. W. (1978), “Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes. Part 1. Momentum method”, Journal of Fluid Mechanics 87(2), 335-341.
- [8] Chwang, A.T. (1978), “Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes. Part2. Exact Theory. Journal of Fluid Mechanics”, vol. 2, part 2, pp. 343-348
- [9] Chwang, (1979), “Hydrodynamic pressure on an accelerating dam and criteria for cavitation”, Netherlands: Journal of Engineering Mathematics.
- [10] Dakoulas, P., (2013), “Seismic Analysis of a Concrete Arch Dam Considering Concrete Heat Generation Damage Effects”, 12th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. International Committee on Large Dams, Graz, Austria, pp. 383-393.
- [11] Hall, J. F. and Chopra, A. K., (1982), “Hydrodynamic Effects in the Dynamic Response of Concrete Gravity Dams”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 10, 333-345.
- [12] ITASCA, FLAC version 5.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Online Manual. US Minneapolis
- [13] Kramer, S. L., (1996), “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice Hall.
- [14] Malm, R. et al., (2013), “Concrete arch dam at seismic loading with fluid structure interaction”, 12th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. International Committee on Large Dams, Graz, Austria, pp. 123-132.

- [15] Maltidis, G. & Stempniewski, L., (2013), “Fluid Structure Interaction Arch Dam – Reservoir at Seismic Loading”, 12th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. International Committee on Large Dams, Graz, Austria, pp. 67-76.
- [16] Muto, Matthew, et al., (2012), “Effective Modeling of Dam-Reservoir Interaction Effects Using Acoustic Finite Elements”, Proceedings of Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management, 32nd Annual USSD Conference, New Orleans, Louisiana, pp. 1161-1168.
- [17] Pelecanos, L., (2013), “Seismic Response and Analysis of Earth Dams”, London: Department of Civil & Environmental Engineering Imperial College of Science, Technology & Medicine.
- [18] Towhata, I., 2008. Geotechnical Earthquake Engineering. Berlin: Springer.
- [19] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, (2006), “State-of-Practice for the Nonlinear Analysis of Concrete Dams at the Bureau of Reclamation”
- [20] Westergaard, H.M., (1933) “ Water Pressure on dam during earthquakes”, Transaction of the American Society of Civil Engineers, vol. 98, pp. 418–433, USA
- [21] Zangar, C., 1952. Hydrodynamic Pressures on Dams due to Horizontal Earthquake Effects, Engineering Monographs No. 11. Denver, Colorado: United States Department of the Interior BUREAU OF RECLAMATION.