



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Π.Μ.Σ. Ανάλυση και Σχεδιασμός Κατασκευών Ενεργειακών Υποδομών

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ**

**ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ**

**ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

**ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**Καρανάσιος Χρήστος**

**Χατζηκυριάκος Χαράλαμπος - Ηλίας**

*Επιβλέπων Καθηγητής: Εφραιμίδης Γεώργιος*

Βόλος, Ιούνιος 2018

## **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Εφραιμίδης Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Καλλιόγλου Πολυξένη

Λέκτορας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Σταυροθεοδώρου Ελένη

Διδάκτωρ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας



© 2018 Καρανάσιος Χρήστος

Χατζηκυριάκος Χαράλαμπος-Ηλίας

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).

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντά μας Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη για την πολύτιμη βοήθειά του και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Θα θέλαμε, επίσης, να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στα μέλη της τριμελούς επιτροπής, την Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και την Διδάκτορα κα. Ελένη Σταυροθεοδώρου για την άμεση ανταπόκριση και την προθυμία τους να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων κατά την εξέλιξη της διατριβής. Παράλληλα, είμαστε ιδιαίτερα ευγνώμονες στον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα για την ουσιαστική συμβολή του στην πραγματοποίηση της εργασίας. Θα θέλαμε, τέλος, να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την αμέριστη υποστήριξή τους όλο αυτό το διάστημα μέχρι την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών.

Βόλος, Ιούνιος 2018

Καρανάσιος Χρήστος

Χατζηκυριάκος Χαράλαμπος - Ηλίας



Μεταπτυχιακή Διατριβή

**ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΣΕ  
ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Καρανάσιος Χρήστος  
Χατζηκυριάκος Χαράλαμπος - Ηλίας

*Επιβλέπων Καθηγητής: Εφραιμίδης Γεώργιος*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η αριθμητική ανάλυση ενός φράγματος κάτω από συνθήκες στατικής και δυναμικής φόρτισης. Το φράγμα που εξετάστηκε είναι ένα εύκαμπτο, λιθόρριπτο φράγμα με κεκλιμένο αργλικό πυρήνα. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων *Abaqus*. Στο πρόγραμμα έγινε προσομοίωση του συστήματος φράγματος, εδαφικών πρανών κοιλιάδας και υποβάθρου θεμελίωσης. Εξετάστηκε, αρχικά, η συμπεριφορά του φράγματος κατά το στάδιο της στατικής φόρτισης, όπου ασκείται σταδιακά το ίδιο βάρος της κατασκευής, ακολουθούμενο από την πλήρωση της λεκάνης του ταμιευτήρα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δύο μη-γραμμικές αναλύσεις για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του φράγματος υπό δυναμική φόρτιση. Και στις δύο αναλύσεις εισήχθη σεισμική επιτάχυνση στον κατακόρυφο και στον κάθετο στη στέψη οριζόντιο άξονα του φράγματος. Τα δεδομένα επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από σεισμούς του ελληνικού χώρου και συγκεκριμένα από αυτόν στον Αλμυρό το 1980 και στην Κεφαλονιά το 2014. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει η σημαντική επίδραση της δυναμικής φόρτισης στις παραμορφώσεις του φράγματος.

**Λέξεις-κλειδιά:** Φράγμα, παραμορφώσεις, πεπερασμένα στοιχεία, στατική φόρτιση, δυναμική φόρτιση.

UNIVERSITY OF THESSALY  
SCHOOL OF ENGINEERING  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
Analysis and Design of Energy Infrastructure Constructions

Postgraduate Thesis

**MECHANICAL BEHAVIOR OF A ROCKFILL DAM AND ITS FOUNDATION UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING CONDITIONS WITH THE FINITE ELEMENT METHOD**

Karanasios Christos  
Chatzikyriakos Charalampos - Ilias

*Supervisor: Efraimidis Georgios*

**ABSTRACT**

The subject of this postgraduate thesis is the numerical analysis of a dam under static and dynamic loading conditions. In particular, a rockfill dam with an inclined clay core is considered. *Abaqus* is the finite element program used to perform the analyses. The whole system of the dam, the valley slopes and the foundation are simulated in a step by step procedure. Initially, the behavior of the dam during the static loading stage is examined, where the self-weight of the structure is progressively applied, followed by the filling of the reservoir. Two non-linear analyses are then performed to evaluate the behavior of the dam under dynamic loading. In both analyses, seismic acceleration is applied in the vertical and the perpendicular to the crest of the dam horizontal direction. The acceleration data used are derived from two induced earthquakes in Greece, namely from Almyros region in 1980 and Kefalonia island in 2014. The results reveal the significant effect of the dynamic loading on the dam deformations.

**Keywords:** Dam, deformations, finite elements, static loading, dynamic loading.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	vi
Abstract.....	vii
Πίνακας Περιεχομένων .....	viii
Κατάλογος Εικόνων .....	x
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	xxvii
Κατάλογος Πινάκων.....	xxx
<b>Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Σκοπός.....	1
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας .....	1
<b>Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο Φραγμάτων .....</b>	<b>2</b>
2.1 Ο ρόλος και η χρήση των φραγμάτων .....	2
2.2 Τύποι φραγμάτων .....	3
2.2.1. Ανάλογα με το μέγεθός τους .....	3
2.2.2. Ανάλογα με τη χρήση τους.....	3
2.2.3. Ανάλογα με τον σκοπό κατασκευής τους.....	3
2.2.4. Ανάλογα με τα υλικά κατασκευής και τη γεωμετρία τους.....	3
2.2.4.1. Άκαμπτα Φράγματα.....	4
2.2.4.2. Εύκαμπτα Φράγματα.....	6
2.2.4.3. Μικτά ή Σύνθετα Φράγματα.....	8
2.3 Κύρια Συνοδά Έργα .....	8
2.3.1. Ανάντη πρόφραγμα (upstream cofferdam) .....	8
2.3.2. Αγωγός προσαγωγής (power or headrace tunnel) .....	9
2.3.3. Σήραγγα εκτροπής (diversion tunnel) .....	9
2.3.4. Σήραγγα ή διώρυγα φυγής (tailrace tunnel/channel) .....	9
2.3.5. Έργο υδροληψίας (intake structure) .....	9
2.3.6. Εκκενωτής πυθμένα (bottom outlet tunnel) .....	9
2.3.7. Υπερχειλιστής ή εκχειλιστής (spillway) .....	9
2.3.8. Λεκάνη ηρεμίας (plunge pool) .....	9
2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη των φραγμάτων.....	10

<b>Κεφάλαιο 3 – Μεθοδολογία Ανάλυσης .....</b>	<b>12</b>
3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	12
3.1.1. Εισαγωγή .....	12
3.1.2. Βασικές εξισώσεις της μεθόδου.....	12
3.1.3. Βασικά στάδια της μεθόδου .....	13
3.2 Το πρόγραμμα ABAQUS.....	14
3.2.1. Εισαγωγή .....	14
3.2.2. Πλεονεκτήματα της χρήσης του προγράμματος ABAQUS .....	14
3.3 Καταστατικά μοντέλα.....	16
3.3.1. Εισαγωγή .....	16
3.3.2. Καταστατικό μοντέλο πλαστικότητας Mohr-Coulomb .....	16
<b>Κεφάλαιο 4 – Περιγραφή Μεθοδολογίας Μοντελοποίησης στο ABAQUS .....</b>	<b>20</b>
4.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον του Abaqus CAE .....	20
4.2 Part Module.....	22
4.3 Property Module .....	73
4.4 Assembly Module.....	98
4.5 Step Module .....	107
4.6 Interaction Module.....	126
4.7 Load Module .....	146
4.8 Mesh Module.....	169
4.9 Job Module.....	186
4.10 Ιδιότητες υλικών .....	192
<b>Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα Αναλύσεων.....</b>	<b>196</b>
5.1 Τάσεις Von Mises .....	197
5.2 Στάδιο Στατικής Φόρτισης.....	204
5.3 Στάδιο Δυναμικής Φόρτισης.....	207
5.3.1 Οριζόντια Μετατόπιση .....	207
5.3.2 Κατακόρυφη Μετατόπιση .....	214
5.3.1 Οριζόντια Επιτάχυνση .....	221
5.4 Καθ' ύψος Κατανομές - Συγκριτικά Διαγράμματα .....	226
<b>Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα - Μελλοντικές Προεκτάσεις .....</b>	<b>238</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>241</b>

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

**Εικόνα 2.2.4.1.1.** Φράγμα Βαρύτητας, Πλατανόβρυση, Δράμα

**Εικόνα 2.2.4.1.2.** Τοξωτό φράγμα Λίμνης Πλαστήρα, Καρδίτσα.

**Εικόνα 2.2.4.1.3.** Αντηριδωτό φράγμα Λάδωνα, Αρκαδία

**Εικόνα 2.2.4.2.1.** Χωμάτινο φράγμα Θησαυρού, Δράμα.

**Εικόνα 2.2.4.2.2.** Λιθόρριπτο φράγμα με ανάντι πλάκα σκυροδέματος, Μεσοχώρα, Τρίκαλα.

**Εικόνα 2.2.4.2.3.** Σύνθετο Φράγμα Keban, Τουρκία.

**Εικόνα 3.3.2.1.** Κύκλος του Mohr, κριτήριο αστοχίας.

**Εικόνα 3.3.2.2.** Επιφάνειες Mohr-Coulomb, Tresca, Rankine, Drucker-Prager και αποκοπής τάσεων

**Εικόνα 4.1.1.** Παράθυρο εκκίνησης προγράμματος.

**Εικόνα 4.1.2.** Επεξήγηση χώρου εργασίας του Abaqus CAE.

**Εικόνα 4.2.1.** Οριζοντιογραφία φράγματος Σμοκόβου.

**Εικόνα 4.2.2.** Κεντρική διατομή φράγματος Σμοκόβου ( $A - A'$ ).

**Εικόνα 4.2.3.** Γεωμετρία διατομής φράγματος που χρησιμοποιήθηκε.

**Εικόνα 4.2.4.** Επιλογή ενότητας Part Module.

**Εικόνα 4.2.5.** Δημιουργία τμήματος φράγματος.

**Εικόνα 4.2.6.** Προσαρμογή μεγέθους καννάβου σχεδίασης.

**Εικόνα 4.2.7.** Προσαρμογή προβολής καννάβου σχεδίασης.

**Εικόνα 4.2.8.** Εκκίνηση σχεδιασμού γεωμετρίας φράγματος.

**Εικόνα 4.2.9.** Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.10.** Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.11.** Απεικόνιση ολοκλήρωσης σχεδιασμού της πρώτης γραμμής.

**Εικόνα 4.2.12.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τρίτου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.13.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τέταρτου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.



**Εικόνα 4.2.14.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τελευταίου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.15.** Ολοκληρωμένη γεωμετρία διατομής φράγματος σε δύο διαστάσεις.

**Εικόνα 4.2.16.** Εισαγωγή τρίτης διάστασης γεωμετρίας φράγματος.

**Εικόνα 4.2.17.** Γεωμετρία διατομής φράγματος στις τρεις διαστάσεις.

**Εικόνα 4.2.18.** Εντολή δημιουργίας βοηθητικών σημείων για τον καθορισμό του πυρήνα.

**Εικόνα 4.2.19.** Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της βάσης του πυρήνα του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.20.** Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της βάσης του πυρήνα του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.21.** Προβολή των δύο σημείων της βάσης του πυρήνα του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.22.** Εντολή διαχωρισμού σώματος.

**Εικόνα 4.2.23.** Καθορισμός σημείων πρώτου διαχωρισμού.

**Εικόνα 4.2.24.** Ολοκλήρωση πρώτου διαχωρισμού.

**Εικόνα 4.2.25.** Επιλογή σώματος για τον δεύτερο διαχωρισμό.

**Εικόνα 4.2.26.** Εντολή διαχωρισμού με επιλογή τριών σημείων.

**Εικόνα 4.2.27.** Επιλογή σημείων δεύτερου διαχωρισμού.

**Εικόνα 4.2.28.** Ολοκλήρωση διαμόρφωσης του πυρήνα του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.29.** Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου XY.

**Εικόνα 4.2.30.** Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο XY.

**Εικόνα 4.2.31.** Ολοκλήρωση δημιουργίας πρώτου βοηθητικού επιπέδου.

**Εικόνα 4.2.32.** Εισαγωγή απόστασης για τη δημιουργία του δεύτερου βοηθητικού επιπέδου.

**Εικόνα 4.2.33.** Ολοκλήρωση δημιουργίας δεύτερου βοηθητικού επιπέδου.

**Εικόνα 4.2.34.** Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου υπό συγκεκριμένη κλίση ως προς ένα άλλο υπάρχον.

**Εικόνα 4.2.35.** Προτροπή επιλογής του υπάρχοντος επιπέδου.

**Εικόνα 4.2.36.** Επιλογή υπάρχοντος επιπέδου για τη δημιουργία του πρώτου επιπέδου κλίσης.

**Εικόνα 4.2.37.** Επιλογή ευθείας γύρω από την οποία θα γίνει η περιστροφή.

**Εικόνα 4.2.38.** Εισαγωγή γωνίας περιστροφής.

**Εικόνα 4.2.39.** Επιλογή υπάρχοντος επιπέδου για τη δημιουργία του δεύτερου επιπέδου κλίσης.

**Εικόνα 4.2.40.** Επιλογή ευθείας και εισαγωγή γωνίας περιστροφής.

**Εικόνα 4.2.41.** Απεικόνιση των δημιουργημένων βοηθητικών επιπέδων.

**Εικόνα 4.2.42.** Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου YZ.

**Εικόνα 4.2.43.** Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο YZ.

**Εικόνα 4.2.44.** Απεικόνιση βοηθητικού επιπέδου YZ.

**Εικόνα 4.2.45.** Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου XZ.

**Εικόνα 4.2.46.** Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο XZ.

**Εικόνα 4.2.47.** Απεικόνιση βοηθητικού επιπέδου XZ.

**Εικόνα 4.2.48.** Προσαρμογή προβολής για τη δημιουργία βοηθητικών αξόνων.

**Εικόνα 4.2.49.** Προσαρμογή προβολής για τη δημιουργία βοηθητικών αξόνων.

**Εικόνα 4.2.50.** Προσαρμοσμένη προβολή για την αποκοπή του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.51.** Εντολή δημιουργίας άξονα στην τομή δύο επιπέδων.

**Εικόνα 4.2.52.** Προτροπή επιλογής πρώτου επιπέδου.

**Εικόνα 4.2.53.** Επιλογή πρώτου και δεύτερου επιπέδου και δημιουργία πρώτου βοηθητικού άξονα.

**Εικόνα 4.2.54.** Επιλογή πρώτου επιπέδου.

**Εικόνα 4.2.55.** Επιλογή δεύτερου επιπέδου και δημιουργία δεύτερου βοηθητικού άξονα.

**Εικόνα 4.2.56.** Επιλογή επιπέδων και δημιουργία τρίτου βοηθητικού άξονα.

**Εικόνα 4.2.57.** Συνολική απεικόνιση των δημιουργημένων βοηθητικών επιπέδων και αξόνων.

**Εικόνα 4.2.58.** Εντολή αποκοπής φράγματος.

**Εικόνα 4.2.59.** Επιλογή επιπέδου αποκοπής φράγματος.

**Εικόνα 4.2.60.** Επιλογή ευθείας για προβολή του προς αποκοπή τμήματος.

**Εικόνα 4.2.61.** Προσαρμογή προβολής για την αποκοπή του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.62.** Εντολή δημιουργίας γραμμών για τον σχεδιασμό των τμημάτων αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.63.** Σχεδιασμός πρώτης γραμμής αριστερού τριγώνου αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.64.** Σχεδιασμός δεύτερης γραμμής αριστερού τριγώνου αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.65.** Σχεδιασμός τρίτης γραμμής αριστερού τριγώνου αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.66.** Σχεδιασμός πρώτης γραμμής δεξιού τριγώνου αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.67.** Σχεδιασμός δεύτερης γραμμής δεξιού τριγώνου αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.68.** Σχεδιασμός τρίτης γραμμής δεξιού τριγώνου αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.69.** Ολοκλήρωση σχεδιασμού τμημάτων αποκοπής του φράγματος.

**Εικόνα 4.2.70.** Πρόσθετες επιλογές αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.71.** Τελική διατομή φράγματος.

**Εικόνα 4.2.72.** Δημιουργία τμήματος υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.73.** Προσαρμογή μεγέθους καννάβου σχεδίασης.

**Εικόνα 4.2.74.** Εκκίνηση σχεδιασμού γεωμετρίας υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.75.** Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.76.** Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.77.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τρίτου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.78.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τέταρτου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.79.** Επιλογή του τελευταίου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.80.** Ολοκληρωμένη γεωμετρία διατομής υπεδάφους σε δύο διαστάσεις.

**Εικόνα 4.2.81.** Εισαγωγή τρίτης διάστασης γεωμετρίας υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.82.** Γεωμετρία διατομής υπεδάφους στις τρεις διαστάσεις.

**Εικόνα 4.2.83.** Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου XZ.

**Εικόνα 4.2.84.** Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο XZ.

**Εικόνα 4.2.85.** Εντολή διαχωρισμού υπεδάφους.

**Εικόνα 4.2.86.** Προτροπή επιλογή επιπέδου διαχωρισμού.

**Εικόνα 4.2.87.** Επιλογή επιπέδου διαχωρισμού.

**Εικόνα 4.2.88.** Τελική διατομή υπεδάφους θεμελίωσης.

**Εικόνα 4.2.89.** Δημιουργία τμήματος πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.2.90.** Προσαρμογή μεγέθους καννάβου σχεδίασης.

**Εικόνα 4.2.91.** Εκκίνηση σχεδιασμού γεωμετρίας πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.2.92.** Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

**Εικόνα 4.2.93.** Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

**Εικόνα 4.2.94.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τρίτου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

**Εικόνα 4.2.95.** Εισαγωγή συντεταγμένων του τέταρτου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

**Εικόνα 4.2.96.** Επιλογή του τελευταίου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

**Εικόνα 4.2.97.** Αρχική γεωμετρία διατομής πρανών σε δύο διαστάσεις.

**Εικόνα 4.2.98.** Εισαγωγή τρίτης διάστασης γεωμετρίας πρανών.

**Εικόνα 4.2.99.** Αρχική διατομή πρανών στις τρεις διαστάσεις (πριν την αποκοπή).

**Εικόνα 4.2.100.** Εντολή αποκοπής πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.2.101.** Επιλογή επιπέδου αποκοπής και ευθείας προβολής αποκοπής πρανών.

**Εικόνα 4.2.102.** Προσαρμογή προβολής για την αποκοπή των πρανών.

**Εικόνα 4.2.103.** Εντολή δημιουργίας γραμμών για τον σχεδιασμό του τμήματος αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.104.** Σχεδιασμός τμήματος αποκοπής των πρανών.

**Εικόνα 4.2.105.** Πρόσθετες επιλογές αποκοπής.

**Εικόνα 4.2.106.** Τελική διατομή πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.1.** Επιλογή ενότητας Property Module.

**Εικόνα 4.3.2.** Εντολή ορισμού νέου υλικού.

**Εικόνα 4.3.3.** Εντολή ορισμού πυκνότητας υλικού.

**Εικόνα 4.3.4.** Ορισμός πυκνότητας υλικού πυρήνα φράγματος.

**Εικόνα 4.3.5.** Εντολή ορισμού ελαστικών ιδιοτήτων υλικού.

**Εικόνα 4.3.6.** Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού πυρήνα φράγματος.

**Εικόνα 4.3.7.** Εντολή ορισμού πλαστικών ιδιοτήτων υλικού (κριτήριο Mohr-Coulomb).

**Εικόνα 4.3.8.** Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού πυρήνα φράγματος.

**Εικόνα 4.3.9.** Ορισμός συνοχής υλικού πυρήνα φράγματος.

**Εικόνα 4.3.10.** Εντολή ορισμού απόσβεσης (Rayleigh) υλικού.

**Εικόνα 4.3.11.** Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού πυρήνα φράγματος.

**Εικόνα 4.3.12.** Ορισμός πυκνότητας υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

**Εικόνα 4.3.13.** Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

**Εικόνα 4.3.14.** Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

**Εικόνα 4.3.15.** Ορισμός συνοχής υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

**Εικόνα 4.3.16.** Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

**Εικόνα 4.3.17.** Ορισμός πυκνότητας υλικού πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.18.** Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.19.** Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.20.** Ορισμός συνοχής υλικού πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.21.** Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.22.** Ορισμός πυκνότητας υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.23.** Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.24.** Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.25.** Ορισμός συνοχής υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.26.** Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.27.** Ορισμός πυκνότητας υλικού κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.28.** Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.29.** Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.30.** Εντολή δημιουργίας διατομής.

**Εικόνα 4.3.31.** Επιλογή τύπου διατομής πυρήνα.

**Εικόνα 4.3.32.** Επιλογή υλικού διατομής πυρήνα.

**Εικόνα 4.3.33.** Επιλογή τύπου διατομής σωμάτων στήριξης.

**Εικόνα 4.3.34.** Επιλογή υλικού διατομής σωμάτων στήριξης.

**Εικόνα 4.3.35.** Επιλογή τύπου διατομής πρανών.

**Εικόνα 4.3.36.** Επιλογή υλικού διατομής πρανών.

**Εικόνα 4.3.37.** Επιλογή τύπου διατομής ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.38.** Επιλογή υλικού διατομής ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.39.** Επιλογή τύπου διατομής κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.40.** Επιλογή υλικού διατομής κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.41.** Εντολή αντιστοίχισης διατομής.

**Εικόνα 4.3.42.** Επιλογή πυρήνα φράγματος.

**Εικόνα 4.3.43.** Αντιστοίχιση διατομής πυρήνα στον πυρήνα του φράγματος.

**Εικόνα 4.3.44.** Επιλογή σωμάτων στήριξης φράγματος.

**Εικόνα 4.3.45.** Αντιστοίχιση διατομής σωμάτων στήριξης στα σώματα στήριξης του φράγματος.

**Εικόνα 4.3.46.** Επιλογή πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.47.** Αντιστοίχιση διατομής πρανών στα πρανή της κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.48.** Επιλογή ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.49.** Αντιστοίχιση διατομής ανώτερης στρώσης στην ανώτερη στρώση του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.50.** Επιλογή κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.51.** Αντιστοίχιση διατομής κατώτερης στρώσης στην κατώτερη στρώση του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.3.52.** Απεικόνιση υλικών φράγματος.

**Εικόνα 4.3.53.** Απεικόνιση υλικού πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.3.54.** Απεικόνιση υλικών υπεδάφους.

**Εικόνα 4.4.1.** Επιλογή ενότητας Assembly Module.

**Εικόνα 4.4.2.** Εντολή δημιουργίας οντότητας.

**Εικόνα 4.4.3.** Επιλογή των τμημάτων του μοντέλου για τη δημιουργία οντοτήτων.

**Εικόνα 4.4.4.** Εντολή μετακίνησης οντότητας.

**Εικόνα 4.4.5.** Επιλογή μετακίνησης πρανών.

**Εικόνα 4.4.6.** Επιλογή πρώτου σημείου διανύσματος μετακίνησης πρανών.

**Εικόνα 4.4.7.** Επιλογή δεύτερου σημείου διανύσματος μετακίνησης πρανών.

**Εικόνα 4.4.8.** Ολοκλήρωση μετακίνησης πρανών.

**Εικόνα 4.4.9.** Επιλογή μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.10.** Επιλογή πρώτου σημείου διανύσματος μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.11.** Επιλογή δεύτερου σημείου διανύσματος μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.12.** Ολοκλήρωση πρώτης μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.13.** Επιλογή (δεύτερης) μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.14.** Εισαγωγή συντεταγμένων πρώτου σημείου διανύσματος (δεύτερης) μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.15.** Εισαγωγή συντεταγμένων δεύτερου σημείου διανύσματος (δεύτερης) μετακίνησης φράγματος.

**Εικόνα 4.4.16.** Συγκεντρωτικό μοντέλο φράγματος – πρανών – υπεδάφους.

**Εικόνα 4.4.17.** Απεικόνιση υλικών συγκεντρωτικού μοντέλου.

**Εικόνα 4.5.1.** Επιλογή ενότητας Step Module.

**Εικόνα 4.5.2.** Εντολή δημιουργίας βήματος.

**Εικόνα 4.5.3.** Δημιουργία πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.4.** Ορισμός χρονικής διάρκειας πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.5.** Ορισμός μεγέθους και αριθμού υποσταδίων πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.6.** Επιλογή μεθόδου επίλυσης εξισώσεων, τρόπου αποθήκευσης μητρώου και τεχνικής επίλυσης πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.7.** Δημιουργία δεύτερου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.8.** Δημιουργία τρίτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.9.** Δημιουργία τέταρτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.10.** Δημιουργία πέμπτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.11.** Δημιουργία έκτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.12.** Δημιουργία έβδομου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.13.** Δημιουργία όγδοου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.14.** Δημιουργία ένατου βήματος ανάλυσης.



**Εικόνα 4.5.15.** Δημιουργία δέκατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.16.** Δημιουργία ενδέκατου βήματος ανάλυσης (πλήρωση ταμιευτήρα).

**Εικόνα 4.5.17.** Ορισμός μεγέθους και αριθμού υποσταδίων ενδέκατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.18.** Δημιουργία δωδέκατου βήματος ανάλυσης (σεισμική διέγερση).

**Εικόνα 4.5.19.** Ορισμός χρονικής διάρκειας και επιλογή μη-γραμμικής ανάλυσης για το δωδέκατο βήμα.

**Εικόνα 4.5.20.** Ορισμός μεγέθους και αριθμού υποσταδίων & συντελεστή ανοχής δωδέκατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.21.** Επιλογή τρόπου αποθήκευσης μητρώου, τεχνικής επίλυσης και χρονικής μεταβολής φορτίου δωδέκατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.22.** Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή βημάτων.

**Εικόνα 4.5.23.** Συγκεντρωτική απεικόνιση των βημάτων της ανάλυσης.

**Εικόνα 4.5.24.** Εντολή δημιουργίας δεδομένων εξόδου πεδίου.

**Εικόνα 4.5.25.** Εντολή δημιουργίας δεδομένων εξόδου ιστορίας.

**Εικόνα 4.5.26.** Δημιουργία δεδομένων εξόδου πεδίου.

**Εικόνα 4.5.26.** Ορισμός μεταβλητών ενδιαφέροντος ως δεδομένα εξόδου.

**Εικόνα 4.5.27.** Ορισμός τάσεων ως δεδομένα εξόδου.

**Εικόνα 4.5.28.** Ορισμός μετακινήσεων ως δεδομένα εξόδου.

**Εικόνα 4.5.29.** Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή δεδομένων εξόδου.

**Εικόνα 4.5.30.** Επεξεργασία δεδομένων εξόδου δωδέκατου βήματος ανάλυσης (σεισμική διέγερση).

**Εικόνα 4.5.31.** Ορισμός επιταχύνσεων ως επιπλέον δεδομένα εξόδου δωδέκατου βήματος ανάλυσης (σεισμική διέγερση).

**Εικόνα 4.6.1.** Επιλογή ενότητας Interaction Module.

**Εικόνα 4.6.2.** Εντολή δημιουργίας περιορισμού.

**Εικόνα 4.6.3.** Δημιουργία πρώτης σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.

**Εικόνα 4.6.4.** Καθορισμός πρώτης περιοχής σύνδεσης με επιλογή επιφάνειας.

**Εικόνα 4.6.5.** Εντολή διαμόρφωσης εμφανιζόμενων τμημάτων στο παράθυρο προβολής.

**Εικόνα 4.6.6.** Επιλογή εμφάνισης μόνο του φράγματος στο παράθυρο προβολής.



**Εικόνα 4.6.7.** Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για την πρώτη σύνδεση (α' μέρος).

**Εικόνα 4.6.8.** Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για την πρώτη σύνδεση (β' μέρος).

**Εικόνα 4.6.9.** Καθορισμός δεύτερης περιοχής σύνδεσης με επιλογή επιφάνειας.

**Εικόνα 4.6.10.** Επιλογή εμφάνισης των πρανών της κοιλάδας στο παράθυρο προβολής.

**Εικόνα 4.6.11.** Επιλογή δεύτερης επιφάνειας σύνδεσης για την πρώτη σύνδεση.

**Εικόνα 4.6.12.** Εντολή εναλλαγής κύριας και δευτερεύουσας επιφάνειας.

**Εικόνα 4.6.13.** Ολοκλήρωση δημιουργίας πρώτης σύνδεσης (φράγματος - πρανών κοιλάδας).

**Εικόνα 4.6.14.** Δημιουργία δεύτερης σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.

**Εικόνα 4.6.15.** Καθορισμός περιοχής σύνδεσης με επιλογή επιφάνειας.

**Εικόνα 4.6.16.** Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για τη δεύτερη σύνδεση.

**Εικόνα 4.6.17.** Επιλογή δεύτερης επιφάνειας σύνδεσης για τη δεύτερη σύνδεση.

**Εικόνα 4.6.18.** Ολοκλήρωση δημιουργίας δεύτερης σύνδεσης (φράγματος – υπεδάφους).

**Εικόνα 4.6.19.** Δημιουργία τρίτης σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.

**Εικόνα 4.6.20.** Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για την τρίτη σύνδεση.

**Εικόνα 4.6.21.** Επιλογή δεύτερης επιφάνειας σύνδεσης για την τρίτη σύνδεση.

**Εικόνα 4.6.22.** Ολοκλήρωση δημιουργίας τρίτης σύνδεσης (πρανών κοιλάδας – υπεδάφους).

**Εικόνα 4.6.23.** Βοηθητικά επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν για την αποκοπή του μοντέλου σε μικρότερα τμήματα.

**Εικόνα 4.6.24.** Τελικό μοντέλο μετά τις αποκοπές των τμημάτων.

**Εικόνα 4.6.25.** Απεικόνιση πρώτης σύνδεσης (φράγματος – πρανών κοιλάδας).

**Εικόνα 4.6.26.** Απεικόνιση δεύτερης σύνδεσης (φράγματος – υπεδάφους).

**Εικόνα 4.6.27.** Απεικόνιση τρίτης σύνδεσης (πρανών κοιλάδας – υπεδάφους).

**Εικόνα 4.6.28.** Εντολή δημιουργίας αλληλεπίδρασης.

**Εικόνα 4.6.29.** Επιλογή τύπου αλληλεπίδρασης και βήματος δημιουργίας της (πρώτο βήμα).

**Εικόνα 4.6.31.** Επιλογή περιοχής αλληλεπίδρασης πρώτου βήματος ανάλυσης (απενεργοποίηση των στρώσεων 2-10 του φράγματος).

**Εικόνα 4.6.32.** Εντολή απενεργοποίησης στρώσεων 2-10 και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.33.** Ενεργοποίηση δεύτερης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης δεύτερου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.34.** Ενεργοποίηση τρίτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης τρίτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.35.** Ενεργοποίηση τέταρτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης τέταρτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.36.** Ενεργοποίηση πέμπτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης πέμπτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.37.** Ενεργοποίηση έκτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης έκτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.38.** Ενεργοποίηση έβδομης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης έβδομου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.39.** Ενεργοποίηση όγδοης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης όγδοου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.40.** Ενεργοποίηση ένατης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης ένατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.6.41.** Ενεργοποίηση δέκατης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης δέκατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.7.1.** Επιλογή ενότητας Load Module.

**Εικόνα 4.7.2.** Εντολή δημιουργίας φόρτισης.

**Εικόνα 4.7.3.** Επιλογή κατηγορίας και τύπου φόρτισης πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.7.4.** Ορισμός μεγέθους και διεύθυνσης φόρτισης & εντολή επιλογής περιοχής φόρτισης πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.7.5.** Επιλογή πρώτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας φόρτισης πρώτου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.7.6.** Δημιουργία φόρτισης δεύτερου βήματος ανάλυσης (δεύτερη στρώση φράγματος).

**Εικόνα 4.7.7.** Δημιουργία φόρτισης τρίτου βήματος ανάλυσης (τρίτη στρώση φράγματος).

**Εικόνα 4.7.8.** Δημιουργία φόρτισης τέταρτου βήματος ανάλυσης (τέταρτη στρώση φράγματος).

**Εικόνα 4.7.9.** Δημιουργία φόρτισης πέμπτου βήματος ανάλυσης (πέμπτη στρώση φράγματος).

**Εικόνα 4.7.10.** Δημιουργία φόρτισης έκτου βήματος ανάλυσης (έκτη στρώση φράγματος).

**Εικόνα 4.7.11.** Δημιουργία φόρτισης έβδομου βήματος ανάλυσης (έβδομη στρώση φράγματος).

**Εικόνα 4.7.12.** Δημιουργία φόρτισης όγδοου βήματος ανάλυσης (όγδοη στρώση φράγματος).

- Εικόνα 4.7.13.** Δημιουργία φόρτισης ένατου βήματος ανάλυσης (ένατη στρώση φράγματος).
- Εικόνα 4.7.14.** Δημιουργία φόρτισης δέκατου βήματος ανάλυσης (δέκατη στρώση φράγματος).
- Εικόνα 4.7.15.** Συνολικά φορτία βαρύτητας φράγματος (βήματα ανάλυσης 1-10).
- Εικόνα 4.7.16.** Εντολή δημιουργίας φόρτισης.
- Εικόνα 4.7.17.** Επιλογή κατηγορίας και τύπου φόρτισης ενδέκατου βήματος ανάλυσης.
- Εικόνα 4.7.18.** Επιλογή επιφάνειας άσκησης υδροστατικής πίεσης (ανάντη πλευρά φράγματος).
- Εικόνα 4.7.19.** Εντολή δημιουργίας κατανομής φόρτισης.
- Εικόνα 4.7.20.** Επιλογή τύπου κατανομής.
- Εικόνα 4.7.21.** Εισαγωγή εξίσωσης κατανομής της υδροστατικής πίεσης.
- Εικόνα 4.7.22.** Επιλογή της κατανομής που δημιουργήθηκε και ορισμός μεγέθους φόρτισης.
- Εικόνα 4.7.23.** Συνολική στατική φόρτιση φράγματος (βήματα ανάλυσης 1-11).
- Εικόνα 4.7.24.** Εντολή δημιουργίας οριακής συνθήκης.
- Εικόνα 4.7.25.** Επιλογή κατηγορίας και τύπου φόρτισης δωδέκατου βήματος ανάλυσης (οριζόντια διεύθυνση X).
- Εικόνα 4.7.26.** Επιλογή επιφάνειας άσκησης της οριζόντιας σεισμικής διέγερσης (βάση υπεδάφους).
- Εικόνα 4.7.27.** Ορισμός μεγέθους οριζόντιας επιτάχυνσης και εντολή ορισμού επιταχυνσιογραφήματος.
- Εικόνα 4.7.28.** Επιλογή εισαγωγής επιταχυνσιογραφήματος με μορφή πίνακα.
- Εικόνα 4.7.29.** Εισαγωγή δεδομένων επιταχυνσιογραφήματος οριζόντιας διεύθυνσης.
- Εικόνα 4.7.30.** Επιλογή του επιταχυνσιογραφήματος που δημιουργήθηκε και ολοκλήρωση εισαγωγής οριζόντιας σεισμικής φόρτισης.
- Εικόνα 4.7.31.** Εισαγωγή δεδομένων επιταχυνσιογραφήματος κατακόρυφης διεύθυνσης.
- Εικόνα 4.7.32.** Ολοκλήρωση εισαγωγής κατακόρυφης σεισμικής φόρτισης.
- Εικόνα 4.7.33.** Συνολικές στατικές και δυναμικές φορτίσεις μοντέλου (βήματα ανάλυσης 1-12).
- Εικόνα 4.7.34.** Εντολή δημιουργίας συνοριακής συνθήκης.

**Εικόνα 4.7.35.** Επιλογή κατηγορίας και τύπου συνοριακής συνθήκης μοντέλου.

**Εικόνα 4.7.36.** Επιλογή επιφανειών εφαρμογής της συνοριακής συνθήκης (όρια μοντέλου).

**Εικόνα 4.7.37.** Απαγόρευση μετακίνησης του μοντέλου στις τρεις διευθύνσεις.

**Εικόνα 4.7.38.** Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή συνοριακών συνθηκών.

**Εικόνα 4.7.39.** Εντολή επεξεργασίας συνοριακής συνθήκης δωδέκατου βήματος ανάλυσης.

**Εικόνα 4.7.40.** Αφαίρεση απαγόρευσης μετακίνησης μοντέλου στις δύο διευθύνσεις της σεισμικής φόρτισης.

**Εικόνα 4.7.41.** Συγκεντρωτική απεικόνιση των οριακών συνθηκών του μοντέλου.

**Εικόνα 4.8.1.** Επιλογή ενότητας Mesh Module.

**Εικόνα 4.8.2.** Επιλογή του προς διακριτοποίηση τμήματος (φράγμα).

**Εικόνα 4.8.3.** Εντολή δημιουργίας δεικτών.

**Εικόνα 4.8.4.** Ορισμός μεγέθους κελιού καννάβου διακριτοποίησης φράγματος.

**Εικόνα 4.8.5.** Εντολή προσδιορισμού τύπου στοιχείου διακριτοποίησης.

**Εικόνα 4.8.6.** Ορισμός τύπου στοιχείων διακριτοποίησης.

**Εικόνα 4.8.7.** Εντολή δημιουργίας πλέγματος φράγματος.

**Εικόνα 4.8.8.** Κάνναβος διακριτοποίησης (πλέγμα) φράγματος στις τρεις διαστάσεις.

**Εικόνα 4.8.9.** Κάνναβος διακριτοποίησης (πλέγμα) φράγματος στο επίπεδο ZY.

**Εικόνα 4.8.10.** Κάνναβος διακριτοποίησης (πλέγμα) φράγματος στο επίπεδο XY.

**Εικόνα 4.8.11.** Στοιχεία διακριτοποίησης πρώτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.12.** Στοιχεία διακριτοποίησης δεύτερης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.13.** Στοιχεία διακριτοποίησης τρίτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.14.** Στοιχεία διακριτοποίησης τέταρτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.15.** Στοιχεία διακριτοποίησης πέμπτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.16.** Στοιχεία διακριτοποίησης έκτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.17.** Στοιχεία διακριτοποίησης έβδομης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.18.** Στοιχεία διακριτοποίησης όγδοης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.19.** Στοιχεία διακριτοποίησης ένατης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.20.** Στοιχεία διακριτοποίησης δέκατης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.21.** Εντολή δημιουργίας δεικτών για το τμήμα των πρανών.

**Εικόνα 4.8.22.** Ορισμός μεγέθους κελιού καννάβου διακριτοποίησης πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.8.23.** Εντολή δημιουργίας πλέγματος πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.8.24.** Κάνναβος διακριτοποίησης πρανών κοιλάδας.

**Εικόνα 4.8.25.** Εντολή δημιουργίας δεικτών για το τμήμα του υπεδάφους.

**Εικόνα 4.8.26.** Ορισμός μεγέθους κελιού καννάβου διακριτοποίησης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.8.27.** Εντολή δημιουργίας πλέγματος υπεδάφους.

**Εικόνα 4.8.28.** Κάνναβος διακριτοποίησης υπεδάφους.

**Εικόνα 4.8.29.** Κάνναβος διακριτοποίησης μοντέλου.

**Εικόνα 4.8.30.** Απεικόνιση διακριτοποίησης και υλικών τελικού μοντέλου.

**Εικόνα 4.8.31.** Εντολή ελέγχου διακριτοποίησης και επιλογή ολόκληρου του μοντέλου.

**Εικόνα 4.8.32.** Επιλογή αναλογίας διαστάσεων στοιχείου διακριτοποίησης ως κριτήριο ελέγχου καταλληλότητας στοιχείου.

**Εικόνα 4.8.33.** Επιλογή συντελεστή γεωμετρικής απόκλισης στοιχείου διακριτοποίησης ως κριτήριο ελέγχου καταλληλότητας στοιχείου.

**Εικόνα 4.8.34.** Επιλογή εμφάνισης σφαλμάτων και προειδοποιήσεων κατά τον έλεγχο των στοιχείων διακριτοποίησης.

**Εικόνα 4.8.35.** Απεικόνιση στοιχείων διακριτοποίησης που εμφανίζουν προειδοποιήσεις (κίτρινο χρώμα).

**Εικόνα 4.8.36.** Παρουσίαση αναλυτικών πληροφοριών διακριτοποίησης για το κάθε τμήμα του μοντέλου (αριθμός στοιχείων, ποσοστό σφαλμάτων και προειδοποιήσεων, αναλογία διαστάσεων και συντελεστής γεωμετρικής απόκλισης στοιχείων διακριτοποίησης).

**Εικόνα 4.9.1.** Επιλογή ενότητας Job Module.

**Εικόνα 4.9.2.** Εντολή δημιουργίας εργασίας ανάλυσης.

**Εικόνα 4.9.3.** Επιλογή μοντέλου προς ανάλυση.

**Εικόνα 4.9.4.** Επιλογή πλήρους ανάλυσης.

**Εικόνα 4.9.5.** Ορισμός ποσοστού χρήσης μνήμης υπολογιστή κατά την ανάλυση.

**Εικόνα 4.9.6.** Επιλογή χρήσης πολλαπλών επεξεργαστών κατά την ανάλυση.

**Εικόνα 4.9.7.** Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή εργασιών ανάλυσης.

**Εικόνα 4.9.8.** Επιλογή της εργασίας ανάλυσης που δημιουργήθηκε και υποβολή ανάλυσης.

**Εικόνα 4.9.9.** Εντολή παρακολούθησης ανάλυσης.

**Εικόνα 4.9.10.** Παράθυρο παρακολούθησης ανάλυσης.

**Εικόνα 4.9.11.** Ολοκλήρωση ανάλυσης και επιλογή εμφάνισης αποτελεσμάτων.

**Εικόνα 4.9.12.** Επιλογή ενότητας οπτικοποίησης αποτελεσμάτων (Visualization Module).

**Εικόνα 4.10.1.** Ανάλυση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων μοντέλου για τον υπολογισμό των συντελεστών απόσβεσης.

**Εικόνα 5.1.** Απεικόνιση σημείων κεντρικής διατομής φράγματος (σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος) από τα οποία λήφθηκαν χρονοϊστορίες, σε υψόμετρα 0m, 0.2H=21.8m, 0.4H=43.6m, 0.6H=65.4m, 0.8H=87.2m, H=109m και 0.5H=54.5m (για τα αντερείσματα) από τη βάση του φράγματος.

**Εικόνα 5.1.1.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

**Εικόνα 5.1.2.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

**Εικόνα 5.1.3.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

**Εικόνα 5.1.4.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

**Εικόνα 5.1.5.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού του Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 12.69 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 1.69 sec).

**Εικόνα 5.1.6.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού του Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 12.69 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 1.69 sec).

**Εικόνα 5.1.7.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.1.8.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).



**Εικόνα 5.1.9.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού της Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 15.02 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 4.02 sec).

**Εικόνα 5.1.10.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού της Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 15.02 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 4.02 sec).

**Εικόνα 5.1.11.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.1.12.** Κατανομή τάσεων Von Mises S (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.4.1.** Κατανομή οριζόντιας επιτάχυνσης στο φράγμα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος τη χρονική στιγμή της μέγιστης τιμής της στέψης κατά τον σεισμό του Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 13.48 sec).

**Εικόνα 5.4.2.** Κατανομή οριζόντιας επιτάχυνσης στο φράγμα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος τη χρονική στιγμή της μέγιστης τιμής της στέψης κατά τον σεισμό της Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 15.17 sec).

**Εικόνα 5.4.3.** Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

**Εικόνα 5.4.4.** Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

**Εικόνα 5.4.5.** Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

**Εικόνα 5.4.6.** Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

**Εικόνα 5.4.7.** Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.4.8.** Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.4.9.** Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.4.10.** Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.4.11.** Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

**Εικόνα 5.4.12.** Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

**Εικόνα 5.4.13.** Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

**Εικόνα 5.4.14.** Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).



## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

**Διάγραμμα 4.7.1.** Επιταχυνσιογράφημα οριζόντιας διεύθυνσης σεισμού Αλμυρού.

**Διάγραμμα 4.7.2.** Επιταχυνσιογράφημα κατακόρυφης διεύθυνσης σεισμού Αλμυρού.

**Διάγραμμα 4.7.3.** Επιταχυνσιογράφημα οριζόντιας διεύθυνσης σεισμού Κεφαλλονιάς.

**Διάγραμμα 4.7.4.** Επιταχυνσιογράφημα κατακόρυφης διεύθυνσης σεισμού Κεφαλλονιάς.

**Διάγραμμα 5.2.1.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο στατικής φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.2.2.** Χρονοϊστορία απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.2.3.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο στατικής φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.2.4.** Χρονοϊστορία απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.3.1.1.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.2H (21.8m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.2.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.4H (43.6m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.3.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.6H (65.4m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.4.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.8H (87.2m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.5.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος στο κέντρο της στέψης του κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.6.** Χρονοϊστορία απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο κέντρο της βάσης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.7.** Χρονοϊστορία απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο κέντρο της στέψης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.8.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του αριστερού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.1.9.** Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος

**Διάγραμμα 5.3.2.1.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.2H (21.8m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.2.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.4H (43.6m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.3.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.6H (65.4m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.4.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.8H (87.2m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.5.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος στο κέντρο της στέψης του κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.6.** Χρονοϊστορία απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στο κέντρο της βάσης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.7.** Χρονοϊστορία απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στο κέντρο της στέψης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.8.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του αριστερού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.2.9.** Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.1.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.2H (21.8m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.2.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.4H (43.6m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.3.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.6H (65.4m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.4.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους  $0.8H$  (87.2m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.5.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο κέντρο της στέψης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.6.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο κέντρο της βάσης της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.7.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους  $0.5H$  (54.5m) του αριστερού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.3.3.8.** Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους  $0.5H$  (54.5m) του δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

**Διάγραμμα 5.4.1.** Καθ' ύψος κατανομή σχετικής οριζόντιας μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης.

**Διάγραμμα 5.4.2.** Καθ' ύψος κατανομή σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης.

**Διάγραμμα 5.4.3.** Καθ' ύψος κατανομή οριζόντιας επιτάχυνσης της κεντρικής διατομής του φράγματος στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης.

**Διάγραμμα 5.4.4.** Καθ' ύψος κατανομή σχετικής οριζόντιας μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.4.5.** Καθ' ύψος κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.4.6.** Καθ' ύψος κατανομή σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

**Διάγραμμα 5.4.7.** Καθ' ύψος κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 5.2.1.** Μέγιστες τιμές σχετικής και απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

**Πίνακας 5.2.2.** Μέγιστες τιμές σχετικής και απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

**Πίνακας 5.3.1.1.** Μέγιστες τιμές σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.1.2.** Μέγιστες τιμές απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στη βάση και τη στέψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.1.3.** Μέγιστες τιμές σχετικής ως προς τη βάση του φράγματος και απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο του ύψους του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.2.1.** Μέγιστες τιμές σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.2.2.** Μέγιστες τιμές απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στη βάση και τη στέψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.2.3.** Μέγιστες τιμές σχετικής ως προς τη βάση του φράγματος και απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του ύψους του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.3.1.** Μέγιστες τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

**Πίνακας 5.3.3.2.** Μέγιστες τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης στο μέσο του ύψους του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### **1.1 Σκοπός**

Σκοπός της εργασίας είναι η στατική και δυναμική ανάλυση ενός εύκαμπτου, λιθόρριπτου φράγματος με αργιλικό πυρήνα, μέσω της προσομοίωσής του σαν σύστημα μαζί με το υπόβαθρο θεμελίωσης, σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η γεωμετρία του φράγματος που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από το φράγμα Σμοκόβου της περιοχής των κοινοτήτων Λουτροπηγής και Κτιμένης του Νομού Καρδίτσας, ενώ οι ιδιότητες των υλικών από εδαφοστατική μελέτη του φράγματος στο Δήμο Σούρπης του Νομού Μαγνησίας. Τα δεδομένα των σεισμικών διεγέρσεων της περιοχής του Αλμυρού και της Κεφαλονιάς που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών.

#### **1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας**

Στη συνέχεια της, η εργασία διαμορφώνεται σε πέντε κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ένα θεωρητικό υπόβαθρο των φραγμάτων, γίνεται μια ταξινόμηση των τύπων τους και των συνοδών τους έργων και αναφέρονται τα οφέλη που προσφέρουν, αλλά και οι επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς επίσης και το καταστατικό μοντέλο Mohr – Coulomb, του οποίου έγινε χρήση στην ανάλυση.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του φράγματος και της ευρύτερης κοιλάδας στο πρόγραμμα Abaqus, καθώς και των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει το σύνολο των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν.

Στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη και παράλληλα προτείνονται σχετικές μελλοντικές προεκτάσεις.

Τέλος, δίνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες αυτής της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

#### **2.1 Ο ρόλος και η χρήση των φραγμάτων**

Ο ρόλος των φραγμάτων είναι η αναρρύθμιση της ροής των ποταμών και η χρησιμοποίηση των πολύτιμων υδάτινων πόρων κατά τρόπο οικονομικά αποδοτικότερο και περισσότερο ωφέλιμο. Η κατασκευή τους ξεκίνησε πριν από πολλούς αιώνες πριν ακόμα δημιουργηθούν ερωτήματα κι ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές μεταβολές που προκαλούν και αντιρρήσεις για την ωφελιμιστική τους σκοπιμότητα. Τα πρώτα φράγματα που κατασκευάστηκαν αποσκοπούσαν κυρίως στην παροχή αντιπλημμυρικής προστασίας και την αποθήκευση νερού για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, για ιχθυοκαλλιέργειες, για τουρισμό και αναψυχή. Σήμερα, τα φράγματα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες κατασκευές πολιτικού μηχανικού, έχουν πολύ μεγαλύτερο μέγεθος σε σχέση με το παρελθόν, αξιοποιούν τις γνώσεις της υδρολογίας και της υδρομηχανικής και το μέγεθος των επιπτώσεών τους άμεσων ή έμμεσων, οικονομικών ή μη οικονομικών έχει αυξηθεί.

Το παλαιότερο φράγμα που αναφέρεται στην Ιστορία (4η χιλιετία π.Χ.) βρισκόταν στη Γιάβα της σημερινής Ιορδανίας και χρησίμευε στη συλλογή πόσιμου νερού. Ένα άλλο φράγμα που κατασκευάστηκε την περίοδο 2600-2500 π.Χ., επίσης για τη συλλογή πόσιμου νερού, είναι το Sadd-el-Kafara στο Wadi Garawi της Αιγύπτου. Το γεώφραγμα στον ποταμό Ορόντες της σημερινής Συρίας κατασκευάστηκε περί το 1300 π.Χ. και χρησίμευε στη συλλογή νερού προς άρδευση και πόση, και είναι ακόμα διατηρημένο, γιατί αξιοποιήθηκε και συντηρήθηκε από μεταγενέστερους λαούς. Στα νεότερα χρόνια, σπουδαίο θεωρήθηκε το φράγμα Puentes στην Ισπανία, το οποίο κατασκευάστηκε το έτος 1753 και καταστράφηκε το 1891.

Στη σύγχρονη εποχή, η πλειονότητα των φραγμάτων χρησιμοποιείται για πολλαπλούς σκοπούς. Συγκεκριμένα, παγκοσμίως τα φράγματα χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς (37%), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (16%), για παροχή πόσιμου νερού (12%), για αντιπλημμυρικό έλεγχο (6%), για σκοπούς αναψυχής (3%) και για λοιπούς σκοπούς (4%) ([13]). Τα οφέλη από τη λειτουργία αυτών των φραγμάτων υπήρξαν πολλαπλά, όμως έχουν σε πολλές περιπτώσεις σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [14]. Γενικότερα, η αξιοποίηση των υδάτινων πόρων με τη χρήση φραγμάτων έχει δημιουργήσει πολλές συγκρούσεις και γίνεται όλο και περισσότερο σαφές ότι οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις του θέματος πρέπει να τύχουν ουσιαστικότερης διερεύνησης και κοινωνικής διαβούλευσης [18].



## **2.2 Τύποι φραγμάτων**

Τα φράγματα κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, τα υλικά και τη γεωμετρία κατασκευής τους, τη χρήση τους και τον σκοπό κατασκευής τους [10],[20].

### **2.2.1 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥΣ**

- Πολύ μεγάλα φράγματα. Έχουν ύψος πάνω από 150 μέτρα.
- Μεγάλα φράγματα. Η Διεθνής Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων εντάσσει στα μεγάλα φράγματα αυτά με ύψος  $>15\text{m}$ , αλλά και με ύψος 5-15m και χωρητικότητα ταμιευτήρα μεγαλύτερη των  $3.000.000 \text{ m}^3$ .
- Μικρά φράγματα. Έχουν ύψος έως 15m. Στα μικρά φράγματα περιλαμβάνονται:
  - Τα δασοτεχνικά φράγματα αντι-διαβρωτικής προστασίας της κοίτης υδρορεμάτων και χειμάρρων.
  - Τα πρόχειρα φράγματα που κατασκευάζονται σε διάφορες περιοχές για άρδευση.
  - Οι εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές που κατασκευάζονται κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς [20].

### **2.2.2 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ**

- Αρδευτικά.
- Υδρευτικά.
- Αντιπλημμυρικά.
- Υδροηλεκτρικά.
- Βιομηχανικά.
- Αναψυχής.
- Πολλαπλής σκοπιμότητας [20].

### **2.2.3 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΣΚΟΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ**

- *Συλλογής νερού.*  
Σκοπός τους η διαμόρφωση επιφανειακών ταμιευτήρων-τεχνητών λιμνών.
- *Εκτροπής.*  
Σκοπός τους η εκτροπή της ροής του νερού είτε για παροχέτευσή του σε προκαθορισμένο χώρο η για εκτέλεση εργασιών εν ξηρώ. Διακρίνονται σε μόνιμα και σε προσωρινά.
- *Ανάσχεσης.*  
Σκοπός τους η ανάσχεση της ορμής των ρεμάτων επιφανειακής απορροής π.χ. για την επίτευξη τεχνητού εμπλουτισμού, για την αποφυγή ή μείωση της διάβρωσης κ.α.
- *Ρύθμισης.*  
Σκοπός τους ο έλεγχος και η πρόληψη πλημμύρων και η ελεγχόμενη παροχέτευση του νερού [20].

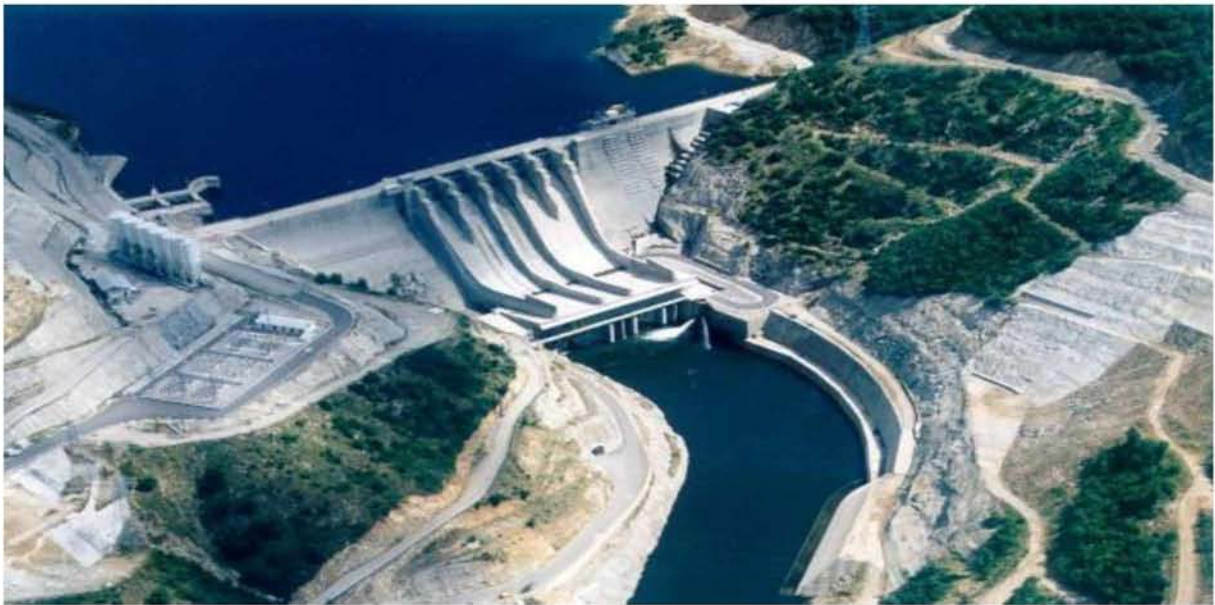
### **2.2.4 ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥΣ**

- *Ακαμπτα:*
  - Βαρύτητας (gravity dams),
  - Τοξωτά (arch dams),
  - Αντηριδωτά (buttress dams).

- *Εύκαμπτα:*  
Χωμάτινα (earth dams),  
Λιθόρριπτα (rockfill dams),  
(με αδιαπέρατη ασφαλική ή σκυρόδετη πλάκα ανάντη).
- *Μικτά ή Σύνθετα:*  
Χωμάτινα (earth dams),  
Λιθόρριπτα (rock fill dams).
- *Άλλον τύπου:*  
Ατσάλινα (steel dams),  
Ξύλινα (timber dams),  
Ελαστικά (rubber dams) [10],[20].

#### 2.2.4.1 Άκαμπτα Φράγματα

- Βαρύτητας (gravity dams).  
Αντιδρούν στις υδροστατικές πιέσεις, στις ανώσεις, στις δυνάμεις ανατροπής και τις σεισμικές με το βάρος τους. Κατασκευάζονται από άοπλο και κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (R.C.C - Roller Compacted Concrete). Παλαιότερα κατασκευάζονταν και λιθόκτιστα. Η τομή τους σχεδιάζεται έτσι ώστε να ασυνιστέονται σε :
  - Ανατροπή και ολίσθηση, συνέπεια των υδροστατικών και των σεισμικών φορτίσεων.
  - Θραύση, συνέπεια διαφορικών καθιζήσεων και εφελκυστικών δυνάμεων, [20].



Εικόνα 2.2.4.1.1. Φράγμα βαρύτητας, Πλατανόβρυση, Δράμα [33].



➤ Τοξωτά (arch dams).

Κατασκευάζονται σε στενές κοιλάδες μεγάλου ύψους αντί των φραγμάτων βαρύτητας. Επιτυγχάνεται οικονομία στον όγκο του απαιτούμενου σκυροδέματος σε ποσοστό έως και 70%.

Κατασκευάζονται από οπλισμένο αλλά και άοπλο σκυρόδεμα.

Ανάλογα του αριθμού των τόξων και γενικότερα τη γεωμετρία τους διακρίνονται σε φράγματα απλής, διπλής ή πολλαπλής καμπυλότητας, αλλά και σε σταθερής και μεταβλητής καμπυλότητας (μείωση με το βάθος από τη στέψη) [20].

Όταν το πάχος τους είναι μεγάλο λειτουργούν εν μέρει ως φράγματα βαρύτητας.

Μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα.

Απαιτείται λεπτομερής διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας των αντρείσμάτων (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας, προσανατολισμός, εύρος, πυκνότητα και μέγεθος των ασυνεχειών).



Εικόνα 2.2.4.1.2. Τοξωτό φράγμα Λίμνης Πλαστήρα, Καρδίτσα [34].

➤ Αντηριδωτά (buttress dams).

Αποτελούνται από μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος η οποία φέρεται σε αντηρίδες μεταβλητού πλάτους. Μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις κυρίως στην επιφάνεια θεμελίωσης και λιγότερο στα αντερείσματα, ενώ σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας επιτυγχάνουν σημαντική οικονομία στον όγκο του απαιτούμενου σκυροδέματος [19],[20].



Εικόνα 2.2.4.1.3. Αντηριδωτό φράγμα Λάδωνα, Αρκαδία [35].

#### 2.2.4.2 Εύκαμπτα Φράγματα

➤ Χωμάτινα (earth dams).

Τα χωμάτινα φράγματα είναι επιχώματα εδαφικών ή αδρανών υλικών. Διακρίνονται σε:

- Ομογενή χωμάτινα: Αποτελούνται από ομοιόμορφα φυσικά εδαφικά υλικά, χαμηλής περατότητας.
- Ετερογενή χωμάτινα: Πρόκειται για ζωνώδεις κατασκευές με υλικά κλιμακούμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στα φράγματα αυτά κατασκευάζεται αδιαπέρατος πυρήνας, από αργίλικα υλικά, για τον έλεγχο των διαρροών.

Μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε κοιλάδα και δεν απαιτούν σχηματισμούς θεμελίωσης εξαιρετικής φέρουσας ικανότητας. Κατανέμουν τα φορτία τους σε μεγάλης έκτασης επιφάνεια θεμελίωσης και είναι ικανά να παραλάβουν διαφορικές καθιζήσεις. Πλήττονται, ωστόσο, από φαινόμενα διασωλήνωσης [20].





Εικόνα 2.2.4.2.1. Χωμάτινο φράγμα Θησαυρού, Δράμα [36].

➤ Λιθόρριπτα (rock fill dams).

Το σώμα στήριξης κατασκευάζεται από χονδροκλαστικά υλικά ποτάμιας προέλευσης ή από βραχώδη υλικά δανειοθαλάμων.

Το αδιαπέρατο στοιχείο του φράγματος μπορεί να είναι ανάντη πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα, ασφαλικός τάπητας κ.α.

Μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε κοιλάδα και δεν απαιτούν σχηματισμούς θεμελίωσης εξαιρετικής ποιότητας [20],[21].



Εικόνα 2.2.4.2.2. Λιθόρριπτο φράγμα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος, Μεσοχώρα, Τρίκαλα [10].



#### 2.2.4.3. Μικτά ή Σύνθετα Φράγματα

Αποτελούν συνδυασμό εύκαμπτων και άκαμπτων (βαρύτητας, χωμάτινα, αντηριδωτά).



Εικόνα 2.2.4.2.3. Σύνθετο φράγμα Keban, Τουρκία [37].

### 2.3 Κύρια Συνοδά Έργα

Η καλή λειτουργία, η πολλαπλή σκοπιμότητα και η ασφάλεια του φράγματος και του ταμιευτήρα απαιτούν μαζί με το σώμα του φράγματος την κατασκευή ενός σημαντικού αριθμού συνοδών έργων [19].

Τα σημαντικότερα συναφή έργα είναι:

- 1) Ανάντη πρόφραγμα (upstream cofferdam).
- 2) Αγωγός προσαγωγής (power or headrace tunnel).
- 3) Σήραγγα εκτροπής (diversion tunnel).
- 4) Σήραγγα ή διώρυγα φυγής (tailrace tunnel/channel).
- 5) Έργο υδροληψίας (intake structure).
- 6) Εκκενωτής πυθμένα (bottom outlet tunnel).
- 7) Υπερχειλιστής ή εκχειλιστής (spillway).
- 8) Πηγάδι ανάπαλσης (surge drum/tank).
- 9) Λεκάνη ηρεμίας (plunge pool) [10],[20].

#### 2.3.1 ΑΝΑΝΤΗ ΠΡΟΦΡΑΓΜΑ (upstream cofferdam)

Πρόκειται για προσωρινή κατασκευή με όλα τα χαρακτηριστικά μικρού χωμάτινου φράγματος, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η διακοπή της ροής του ποταμού, κατά τη φάση κατασκευής του φράγματος, και διοχέτευσή της εκτός της ευρύτερης περιοχής των εργασιών ([22]).

### **2.3.2 ΑΓΩΓΟΣ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ (power or headrace tunnel)**

Πρόκειται για έργο που μεταφέρει το νερό από την λεκάνη κατάκλυσης προκειμένου να αξιοποιηθεί για τη χρήση που προβλέπεται από τον σκοπό του φράγματος, όπως για παράδειγμα μεταφορά στον ΥΗΣ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [20].

### **2.3.3 ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ (diversion tunnel)**

Η σήραγγα εκτροπής εξασφαλίζει την ομαλή παροχέτευση των νερών του ποταμού προς τα κατάντη, προστατεύοντας το εργοτάξιο από ενδεχόμενες πλημμύρες.

Στην περίπτωση ποταμών μεγάλης παροχής συνδυάζεται και με την κατασκευή ανάντη προφράγματος και σε ορισμένες περιπτώσεις και κατάντη προφράγματος [20].

### **2.3.4 ΣΗΡΑΓΓΑ Ή ΔΙΩΡΥΓΑ ΦΥΓΗΣ (tailrace tunnel/channel)**

Είναι το τεχνικό έργο που οδηγεί το νερό από την έξοδο των υδροστροβίλων του σταθμού παραγωγής στον φυσικό αποδέκτη, που μπορεί να είναι τεχνητή λίμνη επόμενου ταμιευτήρα, τεχνητή διώρυγα ή φυσική κοίτη ποταμού [21].

### **2.3.5 ΈΡΓΟ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ (intake structure)**

Είναι το τεχνικό έργο το οποίο συνδέει τον ταμιευτήρα με τον αγωγό ή τους αγωγούς προσαγωγής που μεταφέρουν το νερό στους υδροστροβίλους του σταθμού παραγωγής [21].

### **2.3.6 ΕΚΚΕΝΩΤΗΣ ΠΥΘΜΕΝΑ (bottom outlet tunnel)**

Είναι το τεχνικό έργο που χρησιμεύει στην παροχέτευση νερού προς τα κατάντη ενός φράγματος, από στάθμες χαμηλότερες της στάθμης υδροληψίας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και ανεξάρτητα από τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων.

Ο εκκενωτής πυθμένα χρησιμοποιείται συνήθως για περιβαλλοντικούς σκοπούς για τη διατήρηση κάποιας σταθερής παροχής στα κατάντη και σπάνια σε περιπτώσεις ταχείας εκκένωσης του ταμιευτήρα [21].

### **2.3.7 ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ Ή ΕΚΧΕΙΛΙΣΤΗΣ (spillway)**

Ο υπερχειλιστής παροχετεύει το νερό του ταμιευτήρα προς τα κατάντη αυτόματα, όταν η στάθμη υπερβεί τη μέγιστη στάθμη λειτουργίας (λόγω πλημμυρικών παροχών ή πλούσιου γενικά σε βροχοπτώσεις υδρολογικού έτους). Στην περίπτωση του εκχειλιστή εξασφαλίζεται η ροή της περίσσειας νερού ελεγχόμενα προς τα κατάντη, όχι αυτόματα αλλά μέσω των θυροφραγμάτων [19].

### **2.3.8 ΛΕΚΑΝΗ ΗΡΕΜΙΑΣ (plunge pool)**

Στην απόληξη του υπερχειλιστή υπάρχει λεκάνη η οποία συγκεντρώνει το νερό του υπερχειλιστή και το διαθέτει στην κοίτη του ποταμού με ομαλή ροή. Στόχος είναι να μειώσει την ορμή του νερού και να αποτρέψει τις όποιες διαβρώσεις των αντερεισμάτων και της κοίτης. Συχνά, στο εσωτερικό της λεκάνης κατασκευάζονται τσιμεντένιες εξάρσεις προκειμένου να διασπάται η ορμή του νερού [20].

## **2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη των φραγμάτων**

Η κατασκευή φραγμάτων παρόλο που είχε ως πρωτεύοντα στόχο την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της, αποτελεί πλέον δραστηριότητα πολλαπλής σκοπιμότητας, που καλύπτει ζωτικές ανάγκες ευρύτερης εθνικής σημασίας όπως ύδρευση, άρδευση και αντιπλημμυρική προστασία. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης αυτής επέμβασης και της μετατροπής του φυσικού ποτάμιου συστήματος σε λιμναίου, κυρίαρχη είναι η συμβολή της στη διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας και στη γενικότερη διατήρηση οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας αυτών [23].

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε φράγματος είναι «μοναδικές» και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η δομή του φράγματος και η λειτουργία του, η τοπική υδρολογία, οι ποτάμιες διαδικασίες, ο όγκος των φερτών υλών, οι γεωμορφολογικοί περιορισμοί, το κλίμα και οι βασικές ιδιότητες του τοπικού βιόκοσμου. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των φραγμάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε μακροπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες, επιπτώσεις που βρίσκονται στην εγγύς ή την ευρύτερη περιοχή τους [18].

Μερικές από τις περιβαλλοντικές μεταβολές που προκαλούνται από την κατασκευή ενός φράγματος είναι οι παρακάτω:

- Η λειτουργία των φραγμάτων μεταβάλλει τη διαίτα του ποταμού κατάντη με εκτεταμένα αποτελέσματα στην τοπική υδρολογία και στα κατάντη ρέοντα ύδατα, καθώς και τη μεταφορά των φερτών υλών. Η μεταβολή αυτή μπορεί να προκαλέσει διαβρώσεις στο έδαφος και να μεταβάλει το οικοσύστημα που προϋπήρχε στην περιοχή. Η τεχνητή φραγή των ποταμών αυξάνει τον χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία του νερού, μειώνει τη θολρότητα, τροποποιεί τη θερμική στρωματοποίηση και επομένως ενισχύει συνήθως την φυσική θέση σε πρωταρχική παραγωγή, η οποία έχει επιπτώσεις στον άνθρακα και τη θρεπτική ισορροπία. Η μεταφορά του ιζήματος μέσω της λεκάνης απορροής και κατά μήκος του ποτάμιου συστήματος είναι συνεχής.
- Η δημιουργία του ταμιευτήρα μπορεί να καλύψει αρχαιολογικούς χώρους και χώρους ιστορικής μνήμης, ενώ μπορεί να καλυφθούν χώροι με τοπογραφική, γεωλογική και αισθητική αξία.
- Η συγκράτηση του υδάτινου όγκου εντός του ταμιευτήρα και οι μεταβολές στη ροή του ποταμού που φράσσεται και της ποσότητας των φερτών υλών εμποδίζουν την αναπαραγωγή των ψαριών και επηρεάζουν αρνητικά την πανίδα της κατάντη περιοχής.
- Η θερμοκρασία του νερού, η περιεκτικότητα σε αλάτι και οξυγόνο μπορεί να μεταβληθεί συνεπεία του σχηματισμού του ταμιευτήρα, κάτι που μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στην πανίδα της περιοχής.
- Δημιουργούνται εμπόδια στη διέλευση των ζώων, ενώ προβλήματα προκαλούνται στην «προς τα πάνω» κίνηση των ποτάμιων ψαριών κατά την περίοδο της ωοτοκίας τους, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του πληθυσμού των ποτάμιων ψαριών. Ακόμη, τα ψάρια μπορούν να βλαφθούν περνώντας διαμέσου των υδροφρακτών, των στροβίλων και των αντλιών των μεγάλων φραγμάτων.
- Η εκφόρτιση τοξικών ουσιών (φυτοφάρμακα, τοξικά μέταλλα κλπ) στο ποτάμιο οικοσύστημα και η συμπύκνωσή τους στην τροφική αλυσίδα μπορεί να έχει άμεσες επιπτώσεις σε ευαίσθητα ζώα και ακόμη και όλοι οι οργανισμοί που διαβιούν στο οικοσύστημα μπορεί να απειωθούν, όταν το υδατορεύμα καταστεί ανίκανο να αυτοανακάμψει από τη ρύπανση.



- Το υδατικό καθεστώς της περιοχής του φράγματος μπορεί να αλλάξει ως αποτέλεσμα της καταστροφής της φύσης, απροσδόκητες πλημμύρες μπορούν να εμφανιστούν και συνεπώς η βλάστηση και οι φυσικές δομές στις όχθες των ποταμών μπορούν να υποστούν καταστροφές. Η αύξηση στην εξάτμιση του νερού μπορεί να αναμένεται ως αποτέλεσμα της αύξησης της επιφάνειας ύδατος της περιοχής. Μικροκλιματικές αλλαγές μπορεί να παρατηρηθούν συσχετιζόμενες με τις αλλαγές στο ποσοστό της υγρασίας αέρα, της θερμοκρασίας αέρα, των μετακινήσεων αέρα στη μεγάλη κλίμακα και τις αλλαγές στην τοπογραφία περιοχών που προκαλούνται από τη λιμνάζουσα (στάσιμη), μεγάλης κλίμακας μάζας του νερού.
- Τα φράγματα σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν αυξήσεις στις ασθένειες που οφείλονται στην ύπαρξη στάσιμων νερών, όπως τύφος, τυφοειδής πυρετός, ελονοσία και χολέρα [18].

Η λειτουργία των φραγμάτων όμως προσφέρει και πολλά σημαντικά οφέλη. Η συμβολή των φραγμάτων στην εθνική οικονομία είναι μεγάλη και ποικίλη. Εξυπηρετούν την άρδευση, εξασφαλίζουν πόσιμο νερό, βοηθούν στον έλεγχο των πλημμυρών, εξασφαλίζουν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργούν εστίες αλιείας, βοηθούν τον τουρισμό. Ένα νέο περιβάλλον δημιουργείται από τη λειτουργία του φράγματος, αφού συμβάλλει στην έλευση και την ανάπτυξη μιας άλλης πανίδας στην περιοχή. Τα φράγματα συμβάλλουν όχι μόνο στην οικονομική, αλλά και στην περιφερειακή ανάπτυξη, αφού σε πολλές αναπτυγμένες χώρες, τα φράγματα έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των υπανάπτυκτων περιοχών [18].

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα φράγματα ακολουθούν παρακάτω:

- Έλεγχος των πλημμυρών, μείωση ή εξάλειψη των καταστροφών που προκαλούν.
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μείωση της εξάρτησης κάθε περιοχής από την ενέργεια που παράγεται από ρυπογόνες διαδικασίες (πετρέλαιο, λιθάνθρακας, κλπ.).
- Πιθανά οφέλη που μπορούν να επέλθουν στην περίπτωση που ο ταμιευτήρας ευνοεί τη δημιουργία «υδάτινων οδών».
- Ύδρευση οικισμών και βελτίωση της δημόσιας υγείας, λόγω της χρήσης ελεγχόμενου πόσιμου νερού.
- Αύξηση του εισοδήματος που προέρχεται από τις ιχθυοκαλλιέργειες που μπορούν να αναπτυχθούν εντός του ταμιευτήρα του φράγματος [18].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

#### 3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

##### 3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προβλήματα που δεν μπορούσαν να τα αγγίζουν οι επιστήμονες έως τώρα και τα θεωρούσαν άλυτα, με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y) και των υπολογιστικών μεθόδων όπως των πεπερασμένων στοιχείων τα λύνουν σε μικρό χρόνο. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, στην Ευρώπη και στις ανεπτυγμένες χώρες, η βιομηχανία, ο στρατός και το κράτος χρηματοδοτούν τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα και τις ερευνητικές εταιρείες, με σκοπό την ανάπτυξη προγραμμάτων. Η ανάγκη της βιομηχανίας και των προβλημάτων της πράξης, οδήγησε στην ανάπτυξη γραφικών προγραμμάτων, τα οποία συνοδεύουν την ανάλυση - υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Ο συνδυασμός των γραφικών με την ανάλυση - υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων υψώνουν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική [28].

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο της υπολογιστικής μηχανικής για την αριθμητική επίλυση πολύπλοκων φυσικών προβλημάτων. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε πεπερασμένο αριθμό μικρότερων, συνεχών και γεωμετρικά απλών στοιχείων (elements), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τους λεγόμενους κόμβους (nodes). Τελικός στόχος είναι η επαρκής μοντελοποίηση ενός πολύπλοκου φυσικού συστήματος από γραμμικές και μη γραμμικές μαθηματικές εξισώσεις που είναι ευκολότερο να επιλυθούν [24].

##### 3.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα προβλήματα της μηχανικής προκύπτουν από σχέσεις, όπως οι παρακάτω:

- Σχέσεις ανηγμένων παραμορφώσεων-μετατοπίσεων:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \gamma_{yx} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

- Εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_i}{\partial j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_j}{\partial i^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial i \partial j}, \text{ όπου τα } i, j \text{ είναι } x, y \text{ ή } y, z \text{ ή } z, x.$$

- Εξισώσεις ισορροπίας:

$$\frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + F_i = 0 \text{ όπου τα } i = x, y, z \text{ και } F_i, \text{ οι μαζικές δυνάμεις.}$$



Κάθε πρόβλημα όμως που εκφράζεται με διαφορικές εξισώσεις έχει κάποιες συνοριακές συνθήκες. Έτσι, και στα συγκεκριμένα προβλήματα έχουμε συνοριακές συνθήκες, όπως φυσικές συνοριακές συνθήκες (φορτίσεις κλπ) και βασικές συνοριακές συνθήκες (συνθήκες Dirichlet και Neumann) (δεσμεύσεις, στηρίξεις κλπ.).

Συνοριακές συνθήκες  $\sigma_{ij} * \nu_j = G_j$ , όπου  $\nu$  το σύνορο και  $G_j$  η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας στο σύνορο. Επίσης, εάν  $u_i = F_i$  η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι το διάνυσμα των μετατοπίσεων ορίζεται σε περιοχές του σώματος.

Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η αρχή των δυνατών έργων (virtual works). Έστω  $\sigma_{ij}$  και  $\varepsilon_{ij}$  οι ταυστές των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων αντίστοιχα και  $P_i$ ,  $\delta_i$  τα φορτία και οι δυνατές μετακινήσεις.

Το έργο που προκαλείται από τα φορτία πρέπει να ισούται με το δυνατό έργο των παραμορφώσεων. Δηλαδή:

$$\sum P_i \delta_i = \int \sigma_{ij} * \varepsilon_{ij} dV$$

Προκειμένου να καταστρωθεί το πρόβλημα των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να χωριστεί το πεδίο του προβλήματος -το οποίο καταλαμβάνει κάποιο πεπερασμένο όγκο- σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων απλούστερου σχήματος.

Κάθενα από τα πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία χωρίζεται το πεδίο του προβλήματος, αποτελείται από κάποιο αριθμό κόμβων (π.χ. στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οκτακομβικά εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία). Κάθε κόμβος έχει κάποιους βαθμούς ελευθερίας. Το πρόβλημα, λοιπόν, ανάγεται στην απόδοση τιμών σε αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας. Τα στοιχεία συναρμολογούνται σε κάποιους κοινούς βαθμούς ελευθερίας (ή κόμβους). Έτσι, σε έναν κόμβο μπορεί να συνδέονται 2, 3 ή και παραπάνω στοιχεία. Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$[K] * u = F$$

Όπου  $u$  είναι διάνυσμα διάστασης  $n$ , όπου το  $n$  ισούται με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος. Κάποιοι από τους βαθμούς ελευθερίας είναι δεσμευμένοι και αποτελούν τις συνθήκες Dirichlet. Το  $F$  είναι επίσης διάνυσμα διάστασης  $n$  και περιέχει τις συνοριακές συνθήκες των φορτίσεων, δηλαδή δυνάμεις στους κόμβους, πιέσεις στις πλευρές των στοιχείων και μαζικές δυνάμεις. Ο πίνακας  $[K]$  είναι διάστασης  $n \times n$  και ονομάζεται *πίνακας δυσκαμψίας*.

Ο πίνακας  $[K]$  περιλαμβάνει τη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητες των υλικών του προβλήματος. Ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας διότι δείχνει τη δυσκαμψία του προβλήματος να αντιδράσει σε κάποια εξωτερική φόρτιση – ή αλλιώς δείχνει την απόκριση του συστήματος σε εξωτερικά αίτια. Τελικά, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα, επιλύεται το παραπάνω σύστημα εξισώσεων ως προς  $u$ . Αφού προσδιοριστούν οι τιμές των  $u$  με κατάλληλες αναγωγές μπορούν να προκύψουν και άλλα παράγωγα μεγέθη, όπως οι τάσεις [26].

### 3.1.3 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι:

- Η προσομοίωση (διακεκριμενοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων να συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους.

- Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (άγνωστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
- Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
- Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων, για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
- Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (μετατοπίσεις και τάσεις) με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος [25],[27].

## **3.2 Το πρόγραμμα ABAQUS**

### **3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η προσομοίωση του φράγματος και της ευρύτερης κοιλάδας και οι στατικές και δυναμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος *ABAQUS CAE 6.13*.

Το *ABAQUS* είναι μια ακολουθία από ισχυρά προγράμματα προσομοίωσης εφαρμοσμένης μηχανικής, βασισμένα στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η οποία μπορεί να λύσει προβλήματα που κυμαίνονται από σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις έως τις πιο απαιτητικές μη γραμμικές προσομοιώσεις. Περιέχει μια εκτενή βιβλιοθήκη στοιχείων, τα οποία μπορούν να διαμορφώσουν ουσιαστικά οποιαδήποτε γεωμετρία. Έχει έναν εξίσου εκτενή κατάλογο πρότυπων υλικών, τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των περισσότερων χαρακτηριστικών υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, ελαστικών, πολυμερών, σύνθετων υλικών, οπλισμένου σκυροδέματος, συνθλίψιμους και ελαστικούς αφρούς, και γεωτεχνικών υλικών όπως το έδαφος και ο βράχος.

Σχεδιασμένο ως εργαλείο προσομοίωσης γενικής χρήσης, το *ABAQUS* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετήσει προβλήματα πέρα από τα δομικά (τάσης/μετατόπισης). Μπορεί να προσομοιώσει προβλήματα σε πολλές διαφορετικές περιοχές όπως η μεταφορά θερμότητας, η διάχυση μάζας, η θερμική διαχείριση των ηλεκτρικών τμημάτων (ζεύγη θερμο-ηλεκτρικών αναλύσεων), η ακουστική, η εδαφομηχανική (ζεύγη αναλύσεων ρευστού-πίεσης πόρων) και η πιεζοηλεκτρική ανάλυση [30].

### **3.2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ABAQUS**

Το *ABAQUS* είναι απλό στη χρήση και προσφέρει στον χρήστη ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων. Ακόμη και οι πιο περίπλοκες αναλύσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα. Παραδείγματος χάριν, τα προβλήματα με πολλαπλά συστατικά διαμορφώνονται συνδέοντας τη γεωμετρία κάθε συστατικού με τα κατάλληλα πρότυπα υλικά. Στις περισσότερες προσομοιώσεις, συμπεριλαμβανομένων και των μη γραμμικών, ο χρήστης οφείλει μόνο να δώσει τα κατασκευαστικά δεδομένα, όπως τη γεωμετρία της κατασκευής, τη συμπεριφορά των υλικών της, τις συνοριακές συνθήκες της και τα φορτία που εφαρμόζονται σε αυτήν. Σε μια μη γραμμική ανάλυση, το *ABAQUS* επιλέγει αυτόματα τις κατάλληλες αυξήσεις φορτίων και τις ανοχές σύγκλισης. Όχι μόνο επιλέγει τις τιμές για αυτές τις παραμέτρους, αλλά επίσης τις ρυθμίζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της ανάλυσης για να εξασφαλίσει ότι θα λαμβάνεται μια ακριβής λύση αποτελεσματικά. Ο χρήστης πρέπει σπάνια να καθορίζει τις παραμέτρους για τον έλεγχο της αριθμητικής λύσης του προβλήματος [30].

Μερικά από τα πλεονεκτήματα και τις σημαντικές ιδιότητες του *ABAQUS* φαίνονται παρακάτω:

- Περιέχει εκτεταμένη βιβλιοθήκη με στοιχεία τα οποία μπορούν να μοντελοποιήσουν πρακτικά οποιαδήποτε γεωμετρία.
- Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής γεωμετρίας από πολλά διαφορετικά πακέτα λογισμικού CAD.
- Δυνατότητα χρήσης αρκετών διαφορετικών μοντέλων υλικών για μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πιο τυπικών από αυτά, όπως μέταλλα, ελαστικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα και γεωτεχνικά υλικά όπως είδη εδαφών και βράχοι.
- Είναι σχεδιασμένο ως εργαλείο μοντελοποίησης γενικής χρήσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέραν των προβλημάτων τάσης/παραμόρφωσης. Μπορεί να μοντελοποιήσει προβλήματα σε τομείς όπως μεταφορά θερμότητας, διάχυση μάζας, θερμική διαχείριση σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ακουστική, πιεζοηλεκτρική ανάλυση και προβλήματα γεωλογίας.
- Παρέχει μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για μοντελοποίηση γραμμικών και μη γραμμικών εφαρμογών. Προβλήματα με πολλά μέλη μοντελοποιούνται με το να συσχετιστεί η γεωμετρία ορίζοντας κάθε μέλος με το αντίστοιχο υλικό και διευκρινίζοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μελών. Στη μη γραμμική ανάλυση, το *ABAQUS* επιλέγει αυτόματα τα κατάλληλα επανυζητικά βήματα ανάλυσης και ανοχής για κάθε φορτίο και τα προσαρμόζει συνεχώς κατά την πορεία της ανάλυσης για να επιβεβαιώνει ότι επιτυγχάνεται μια ακριβής επίλυση.
- Έχει δυνατότητα στατικής και δυναμικής ανάλυσης [29], [31].

Το Abaqus σε σχέση με το ANSYS έχει πολύ καλή απόκριση σε μη-γραμμικά και περίπλοκα γεωμετρικά προβλήματα. Κατ' ακρίβειαν, δημιουργήθηκε με σκοπό την επίλυση μη-γραμμικών προβλημάτων. Χρησιμοποιείται περισσότερο στον ακαδημαϊκό τομέα διότι υπάρχει η ευκολία στο να δημιουργήσει ο χρήστης υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες.

Τα άλλα προγράμματα χρησιμοποιούνται περισσότερο στη βιομηχανία, διότι έχουν συγκεκριμένα υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως μέταλλα. Επίσης στο Abaqus υπάρχει η ρουτίνα UEL. Το Abaqus λειτουργεί με στιγμές (instances), δηλαδή τη θέση του κάθε κομματιού της διάταξης σε δεδομένη στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να γίνουν διαφορετικά βήματα ανάλυσης σε κάθε πρόβλημα.

Η Simulia παρέχει πολύ καλή υποστήριξη στους χρήστες σε σχέση με τα άλλα προγράμματα, ενώ υπάρχουν ολοκληρωμένα εγχειρίδια τα οποία επιτρέπουν στον χρήστη πρόσβαση σε οποιαδήποτε πληροφορία ψάχνει. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ενσωμάτωσης κι άλλων προγραμμάτων όπως της πλατφόρμα CATIA για εφαρμογές PLM, αλλάζοντας ουσιαστικά τον τρόπο σχεδίασης, ανάπτυξης και κατασκευής χρησιμοποιώντας τα πακέτα αυτά.

Το Abaqus επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργεί το πρόγραμμα (script) μέσω της γλώσσας Python για δημιουργία μοντέλων. Η Python είναι μία γλώσσα προγραμματισμού ευρείας χρήσης και ανεξάρτητη. Οτιδήποτε μπορεί να δημιουργηθεί στο Abaqus/CAE χρησιμοποιώντας GUI (graphic user interface), μπορεί επίσης να δημιουργηθεί γράφοντας κώδικα. Επιπλέον το Abaqus επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργεί κώδικα γραμμένο στο C++ για γρήγορη επεξεργασία σε δεύτερο στάδιο.

Μειονεκτήματα: υστερεί στο ότι δεν είναι τόσο φιλικό στον χρήστη. Χρειάζεται αρκετά βαθιά κατανόηση μη-γραμμικής ανάλυσης. Τα υλικά πρέπει να ορίζονται πλήρως, όσον αφορά τις ιδιότητες τους, κάτι που καθιστά το ABAQUS λιγότερο εύχρηστο για τη βιομηχανία [31].

### **3.3 Καταστατικά μοντέλα**

#### **3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ένα καταστατικό προσομοίωμα υλικού προκύπτει από μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Η βιβλιοθήκη του *ABAQUS* περιλαμβάνει αρκετά καταστατικά προσομοιώματα για την πρόβλεψη της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών, όπως τα μοντέλα Drucker Prager, Mohr-Coulomb Plasticity, Clay Plasticity, Concrete Damaged Plasticity. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής καταστατικών μοντέλων, τα οποία δεν εμπεριέχονται στη βιβλιοθήκη του προγράμματος.

#### **3.3.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΟHR-COULOMB**

Το προσομοίωμα που επιλέχθηκε στην συγκεκριμένη εργασία για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υλικών του φράγματος, των εδαφικών πρανών της κοιλάδας και της ανώτερης στρώσης του υπεδάφους είναι το μοντέλο πλαστικότητας *Mohr-Coulomb*.

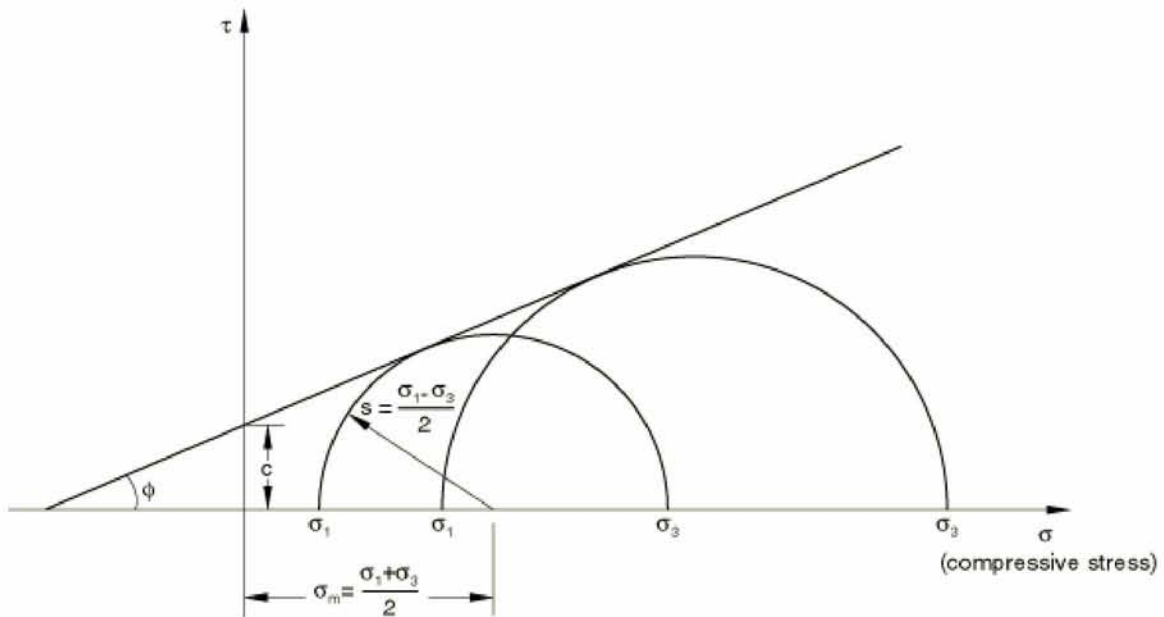
Το μοντέλο πλαστικότητας Mohr-Coulomb:

- Χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση υλικών σύμφωνα με το κλασσικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coloumb.
- Επιτρέπει στο υλικό να σκληρύνει και / ή να μαλακώσει ισότροπα.
- Χρησιμοποιείται με το μοντέλο γραμμικού ελαστικού υλικού.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την επιφάνεια Rankine (αποκοπή τάσης) για να περιοριστεί η χωρητικότητα φορτίου κοντά στην περιοχή εφελκυσμού.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές σχεδιασμού στη γεωτεχνική μηχανική για την προσομοίωση της απόκρισης υλικού υπό μονοτονική φόρτιση [32].

Η επιφάνεια αστοχίας κατά την πλαστική συμπεριφορά περιγράφεται από δύο διαφορετικά κριτήρια: ένα κριτήριο διάτμησης, γνωστό ως επιφάνεια Mohr-Coulomb, και ένα προαιρετικό κριτήριο αποκοπής εντάσεων, που μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας την επιφάνεια Rankine.

Σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση σε οποιοδήποτε σημείο ενός υλικού φτάσει σε μια τιμή που εξαρτάται γραμμικά από την ορθή τάση στο ίδιο επίπεδο. Το μοντέλο Mohr-Coulomb βασίζεται στο γράφημα του κύκλου του Mohr (Εικόνα 3.3.2.1.) για καταστάσεις έντασης με αστοχία στο επίπεδο της μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης. Η γραμμή αστοχίας είναι η ευθεία που εφάπτεται με τους κύκλους του Mohr.





Εικόνα 3.3.2.1. Κύκλος του Mohr, κριτήριο αστοχίας [33].

Το μοντέλο Mohr-Coulomb ορίζεται από τη σχέση:

$$\tau = c - \tan \varphi$$

όπου η τάση  $\sigma$  είναι αρνητική στη θλίψη.

Από τον κύκλο του Mohr προκύπτει ότι:

$$\tau = s \cos \varphi$$

$$\sigma = \sigma_m + s \sin \varphi$$

Αντικαθιστώντας τις  $\tau$  και  $\sigma$ , πολλαπλασιάζοντας και τις δύο πλευρές με  $\cos \varphi$  και αφαιρώντας, προκύπτει ότι το μοντέλο Mohr-Coulomb μπορεί να γραφτεί ως:

$$s + \sigma_m \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 ,$$

όπου η τάση  $s$  ισούται με:

$$s = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3),$$

ίση με το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης κύριας τάσης, και της ελάχιστης κύριας τάσης (και ως εκ τούτου είναι η μέγιστη τάση διάτμησης).

Η τάση  $\sigma_m$  ισούται με:

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3),$$

ίση με τον μέσο όρο των μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων και  $\varphi$  είναι η γωνία τριβής. Για γενικές καταστάσεις έντασης το μοντέλο είναι γραμμένο με όρους τριών μεταβλητών και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F = R_{mc} q - p \tan \varphi - c = 0 ,$$

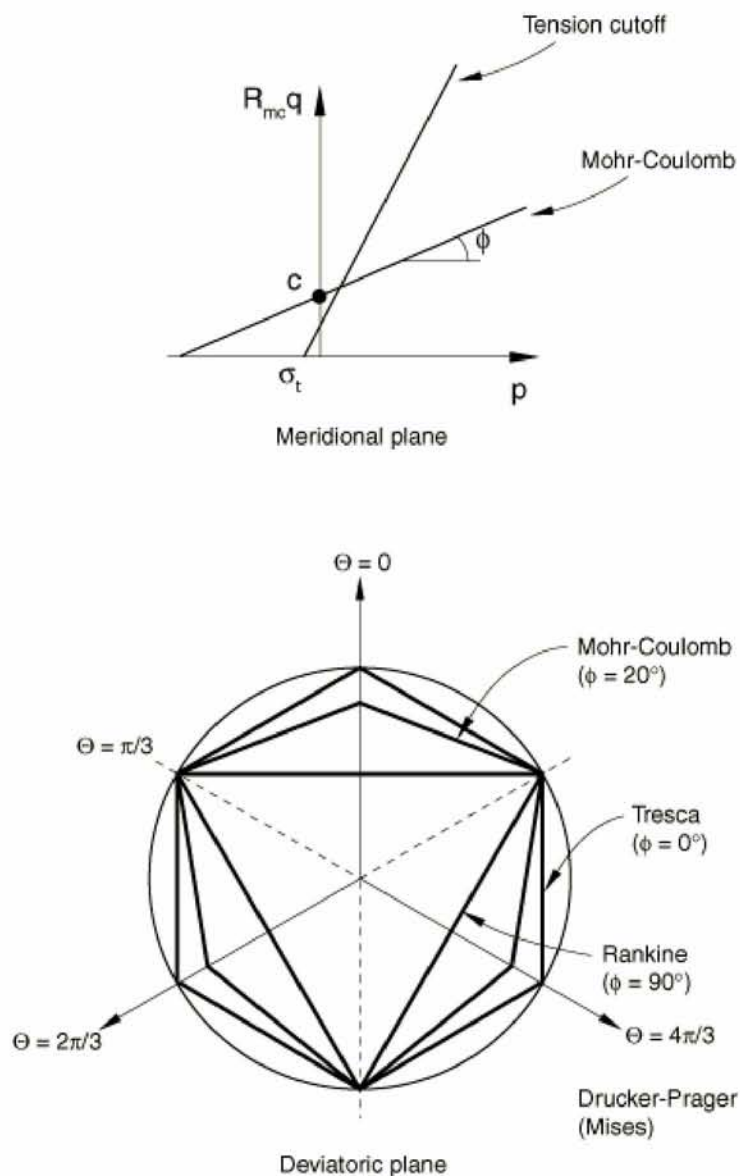
όπου,

$$R_{mc}(\Theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin \left( \Theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left( \Theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi$$

- $\varphi$  είναι η κλίση της επιφάνειας αστοχίας Mohr-Coulomb στο  $p - R_{mc}q$  επίπεδο έντασης (Εικόνα 3.3.2.2.), η οποία συνήθως αναφέρεται ως γωνία τριβής του υλικού και μπορεί να εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τις προκαθορισμένες μεταβλητές του πεδίου,
- $c$  είναι η συνοχή του υλικού,
- $\Theta$  είναι η απόκλιση πολικής γωνίας που ορίζεται ως  $\cos(3\Theta) = \left( \frac{r}{q} \right)^3$ ,
- $p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma)$  είναι η ισοδύναμη τάση πίεσης,
- $q = \sqrt{\frac{3}{2}}(S : S)$  είναι η ισοδύναμη τάση Mises,
- $r = \left( \frac{9}{2} S \cdot S : S \right)^{\frac{1}{3}}$ ,
- $S = \sigma + pI$ .

Η γωνία τριβής  $\varphi$  διαμορφώνει το σχήμα της επιφάνειας αστοχίας όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 3.3.2.2.). Η επιφάνεια αποκοπής της τάσης εμφανίζεται για γωνία  $\Theta=0$ . Το εύρος γωνίας τριβής είναι  $0^0 \leq \varphi < 90^0$ . Στην περίπτωση  $\varphi=0^0$  το μοντέλο Mohr-Coulomb μειώνεται στο ανεξάρτητο από την πίεση μοντέλο Tresca με ένα τέλεια εξαγωνικό τμήμα. Στην περίπτωση  $\varphi=90^0$  το μοντέλο Mohr-Coulomb μειώνεται στο μοντέλο Rankine με "τριγωνικό" τμήμα και  $R_{mc} = \infty$  (η περιοριστική αυτή περίπτωση δεν επιτρέπεται στο μοντέλο Mohr-Coulomb που περιγράφεται παραπάνω).

Όταν χρησιμοποιούνται δοκιμές ενός στοιχείου για την επαλήθευση του μοντέλου, οι μεταβλητές εξόδου SP1, SP2 και SP3 αναφέρονται στις κύριες τάσεις  $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$  αντίστοιχα [32].



Εικόνα 3.3.2.2. Επιφάνειες Mohr-Coulomb, Tresca, Rankine, Drucker-Prager και αποκοπής τάσεων [32].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ABAQUS

Το Abaqus CAE αποτελεί ένα πλήρες περιβάλλον Abaqus και παρέχει έναν απλό και ολοκληρωμένο τρόπο για τη δημιουργία, την υποβολή και την παρακολούθηση μιας ανάλυσης, καθώς και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις σε Abaqus Standard ή Abaqus Explicit. Το Abaqus CAE χωρίζεται σε ενότητες, κάθε μία από τις οποίες συνιστά ένα λογικό τμήμα της διαδικασίας μοντελοποίησης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας δημιουργείται από το πρόγραμμα ένα αρχείο εισόδου σε μορφή *.cae* (*Complete Analysis Environment*) που τελικά υποβάλλεται στο Abaqus Standard ή στο Abaqus Explicit για ανάλυση. Από τη στιγμή που αυτή ξεκινήσει, αποστέλλονται συνεχώς δεδομένα στο Abaqus CAE μέσω των οποίων επιτρέπεται στον χρήστη να παρακολουθεί την πρόοδο της εργασίας, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται μια βάση δεδομένων εξόδου. Τέλος, χρησιμοποιώντας τη λειτουργική μονάδα οπτικοποίησης του Abaqus CAE γίνεται ανάγνωση της βάσης δεδομένων εξόδου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

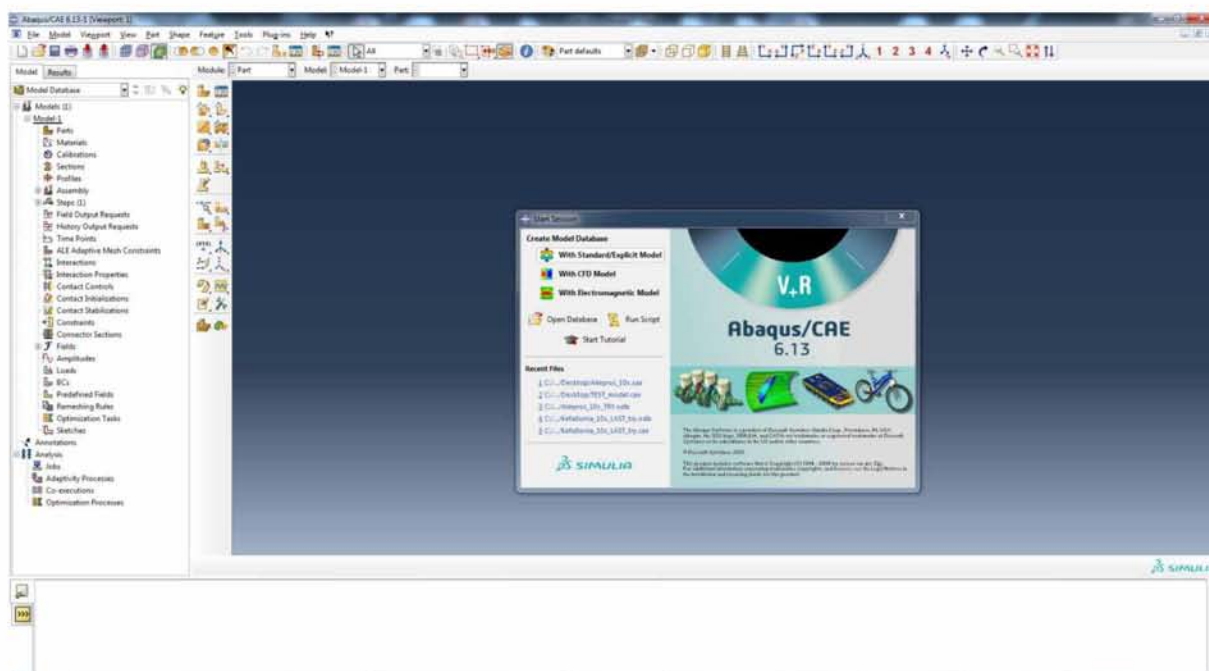
Αναλυτικότερα, η δημιουργία ενός μοντέλου στο Abaqus CAE περιλαμβάνει κάποια βήματα που αναφέρονται ως ενότητες (modules) και είναι οι εξής:

- ✓ **Part Module**: Σχεδιάζεται η γεωμετρία των μελών της διάταξης.
- ✓ **Property Module**: Ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών και αντιστοιχίζονται στη γεωμετρία.
- ✓ **Assembly Module**: Συγκεντρώνονται τα επιμέρους τμήματα σε ένα ενιαίο μοντέλο.
- ✓ **Step Module**: Καθορίζεται το είδος της ανάλυσης και τα βήματα με βάση τα οποία αυτή θα πραγματοποιηθεί. Επιπλέον, προσδιορίζονται τα ζητούμενα αποτελέσματα.
- ✓ **Interaction Module**: Ορίζεται η σύνδεση και οι γενικότερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.
- ✓ **Load Module**: Εισάγονται οι επιθυμητές φορτίσεις και οι απαιτούμενες συνοριακές συνθήκες.
- ✓ **Mesh Module**: Δημιουργείται ο κατάλληλος για το πρόβλημα κάνναβος (διακριτοποίηση) προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας και της ταχύτητας της ανάλυσης.
- ✓ **Job Module**: Ορίζεται και παρακολουθείται η εργασία της ανάλυσης.

Στο Abaqus δεν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μονάδων μέτρησης. Επομένως, ο χρήστης οφείλει να επιλέγει εξ αρχής τις μονάδες που θα χρησιμοποιήσει στον ορισμό των διάφορων μεγεθών. Στην παρούσα εργασία όλες οι μονάδες βασίζονται στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI): *m*, *s*, *N*, *Pa* και *m/s<sup>2</sup>* για το μήκος, τον χρόνο, τις δυνάμεις, την πίεση/τις τάσεις και την επιτάχυνση αντίστοιχα.

#### 4.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον του Abaqus CAE

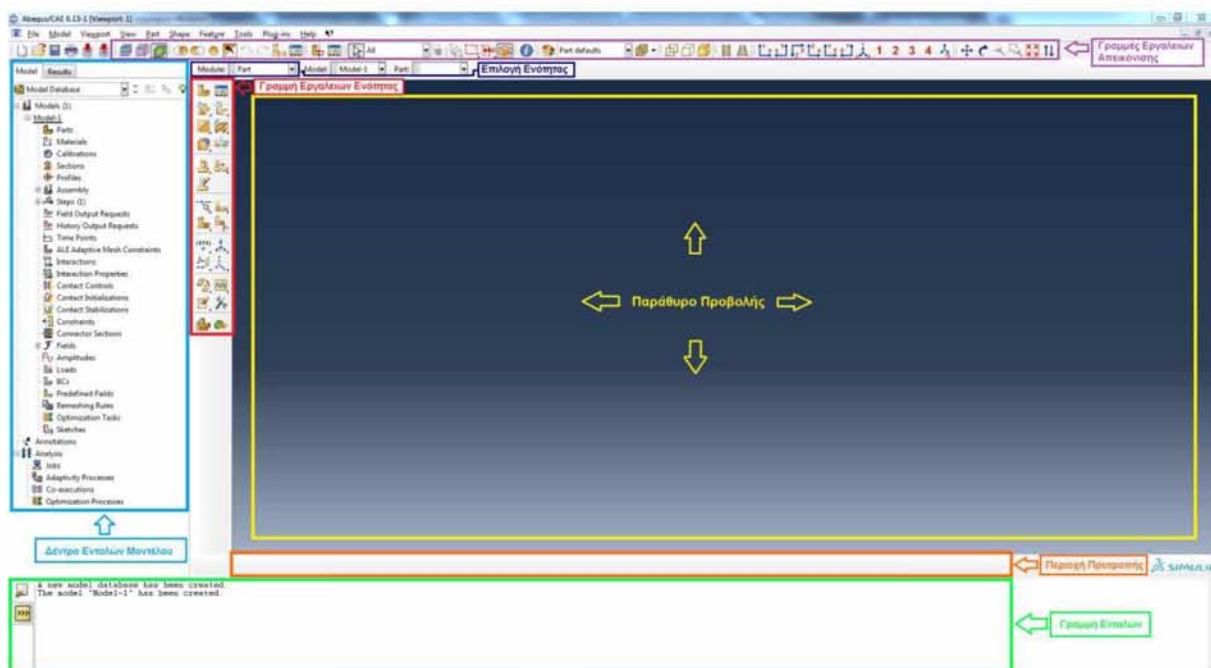
Με την εκκίνηση του προγράμματος, ζητείται από τον χρήστη να επιλέξει το είδος του μοντέλου με βάση το οποίο θα δημιουργηθεί βάση δεδομένων και θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Επιλέγεται **With Standard/Explicit Model**.



Εικόνα 4.1.1. Παράθυρο εκκίνησης προγράμματος.

Ο χώρος εργασίας του Abaqus CAE αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Παράθυρο Προβολής (ViewPort): Η κύρια οθόνη εξόδου του Abaqus CAE στην οποία οπτικοποιούνται τα δεδομένα πριν και μετά την ανάλυση.
- Δέντρο Εντολών Μοντέλου (Model Tree View): Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζονται όλα τα βασικά βήματα μοντελοποίησης με μορφή δέντρου, κάθε κόμβος του οποίου υποδιαιρείται σε διάφορους υποκόμβους. Ο χρήστης μπορεί να επεμβαίνει εύκολα και σε οποιαδήποτε στιγμή σε οποιοδήποτε κομμάτι της μοντελοποίησης και να κάνει τροποποιήσεις.
- Επιλογή Ενότητας (Module): Επιλέγεται κάθε φορά η αντίστοιχη Ενότητα μοντελοποίησης μέχρι να ολοκληρωθεί η δημιουργία του μοντέλου.
- Γραμμή Εργαλείων Ενότητας (Module Toolbar Section): Κάθε Ενότητα μοντελοποίησης (Module) όπως και κάθε κόμβος του Δέντρου Εντολών (Model Tree) αντιστοιχίζονται σε μια σειρά εργαλείων από όπου ο χρήστης έχει πρόσβαση σε πληθώρα επιλογών μορφοποίησης και ενεργειών.
- Περιοχή Προτροπής (Prompt Region): Αμέσως μετά την επιλογή εκτέλεσης μιας συγκεκριμένης λειτουργίας, στην περιοχή αυτή εμφανίζονται -όταν αυτό απαιτείται- επιπλέον εντολές επιλογής ή και οδηγίες από το ίδιο το πρόγραμμα.
- Γραμμή Εντολών (Message Area): Στο συγκεκριμένο πλαίσιο το Abaqus ενημερώνει τον χρήστη για την εκτέλεση ορισμένων λειτουργιών, ενώ παράλληλα παρέχει και τη δυνατότητα εισαγωγής εντολών με τη μορφή μηνυμάτων.
- Γραμμές Εργαλείων Απεικόνισης (View Toolbars): Στην περιοχή αυτή υπάρχουν πρόσθετα εργαλεία για τη μετακίνηση ή την περιστροφή του μοντέλου, την επιλογή μεμονωμένων τμημάτων του και γενικότερα επιλογές για τον επιθυμητό τρόπο απεικόνισης του μοντέλου.



Εικόνα 4.1.2. Επεξήγηση χώρου εργασίας του Abaqus CAE.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους ενοτήτων της διαδικασίας μοντελοποίησης του μελετώμενου συστήματος φράγματος – κοιλάδας – υπεδάφους.

*Το μοντέλο ήταν μεν θεωρητικό, καθώς η δημιουργία του δεν βασίστηκε εξ' ολοκλήρου σε ένα υπάρχον φράγμα, τα δεδομένα όμως που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονταν σε πραγματικές τιμές τόσο από άποψη γεωμετρίας φράγματος και κοιλάδας όσο και από άποψη ιδιοτήτων υλικών.*

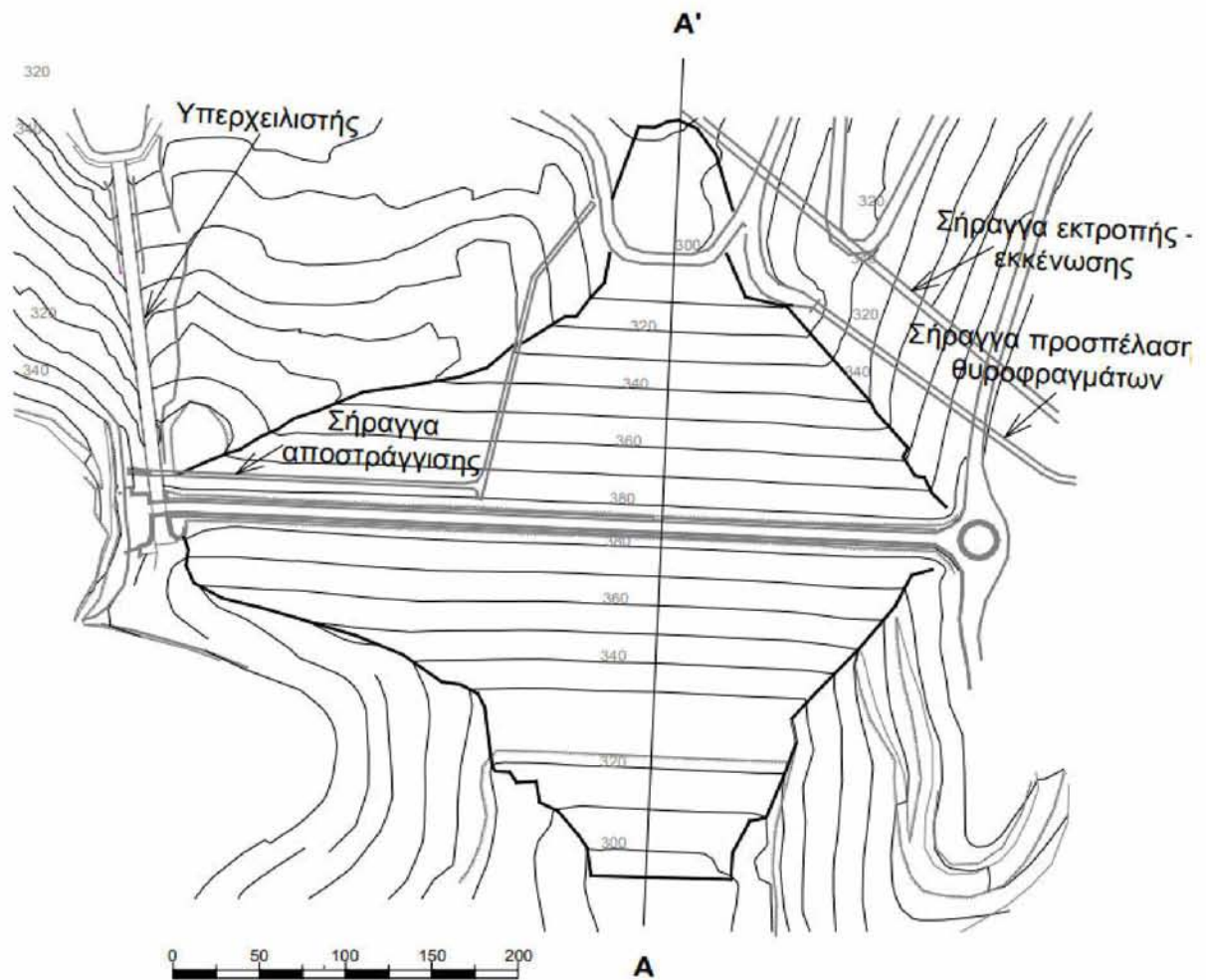
## 4.2 Part Module

Αρχικά, στην ενότητα αυτή σχεδιάζεται η γεωμετρία των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργούνται τρία ανεξάρτητα σώματα: το φράγμα, τα αντερείσματα που αποτελούν τμήμα των πρανών της κοιλάδας και το υπέδαφος θεμελίωσης. Για κάθε τμήμα ξεχωριστά σχεδιάζεται μια διατομή σε δύο διαστάσεις και στη συνέχεια δίνεται ένα βάθος ως τρίτη διάσταση προκειμένου να δημιουργηθεί το αντίστοιχο τρισδιάστατο σώμα. Η συνένωση των επιμέρους τμημάτων σε ενιαίο μοντέλο γίνεται σε επόμενη ενότητα.

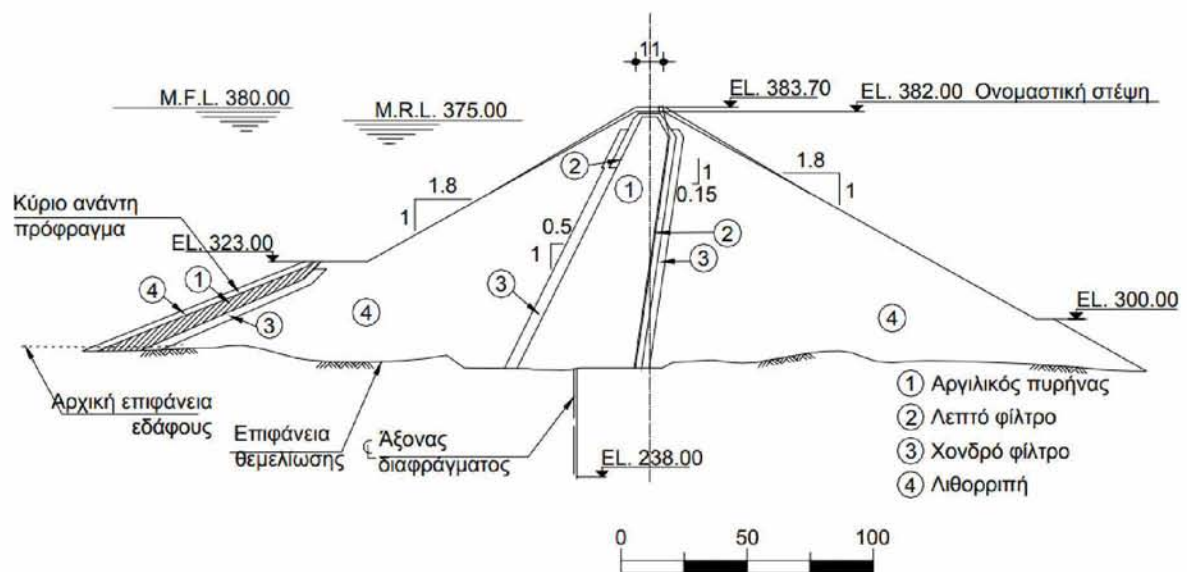
### ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Η γεωμετρία φράγματος που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από το φράγμα Σμοκόβου της περιοχής των κοινοτήτων Λουτροπηγής και Κτιμένης του Νομού Καρδίτσας [8], [39]. Το φράγμα είναι λιθόρριπτο με ελαφρώς κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα. Παρακάτω απεικονίζεται η οριζοντιογραφία, καθώς και μια κεντρική διατομή του φράγματος Σμοκόβου.



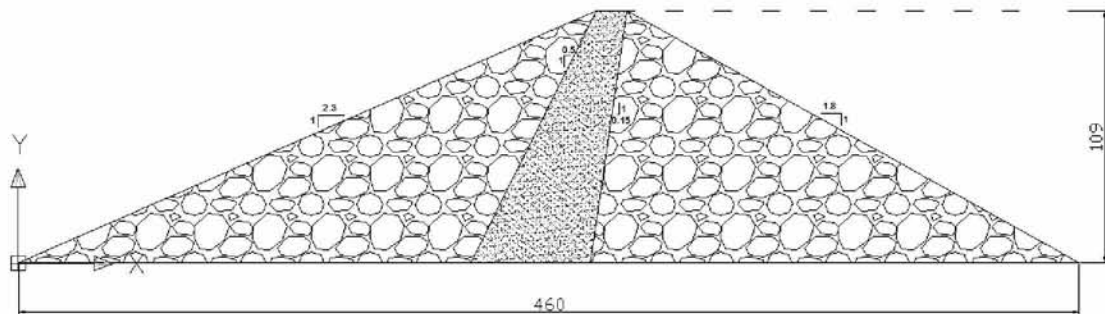


Εικόνα 4.2.1. Οριζοντιογραφία φράγματος Σμοκόβου [39].



Εικόνα 4.2.2. Κεντρική διατομή φράγματος Σμοκόβου (A – A') [39].

Για διευκόλυνση της διαδικασίας, το φράγμα σχεδιάστηκε πρώτα σε Autocad όπως φαίνεται παρακάτω. Η γεωμετρία αποτελεί ελαφρώς απλοποιημένη εκδοχή της γεωμετρίας του φράγματος Σμοκόβου. Δεν χρησιμοποιήθηκαν αναβαθμοί προκειμένου οι κλίσεις των πρανών ανάντη και κατόντη να είναι ενιαίες από τη βάση μέχρι τη στέψη του φράγματος. Συγκεκριμένα για τα ανάντη πρανή επιλέχθηκε κλίση 1:2.3, ενώ για τα κατόντη 1:1.8. Όσον αφορά τον κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα, οι αντίστοιχες κλίσεις είναι 1:0.5 και 1:0.15. Οι συνολικές διαστάσεις του φράγματος είναι 460m, 460m και 109m για το μήκος, το πλάτος και το ύψος του αντίστοιχα.

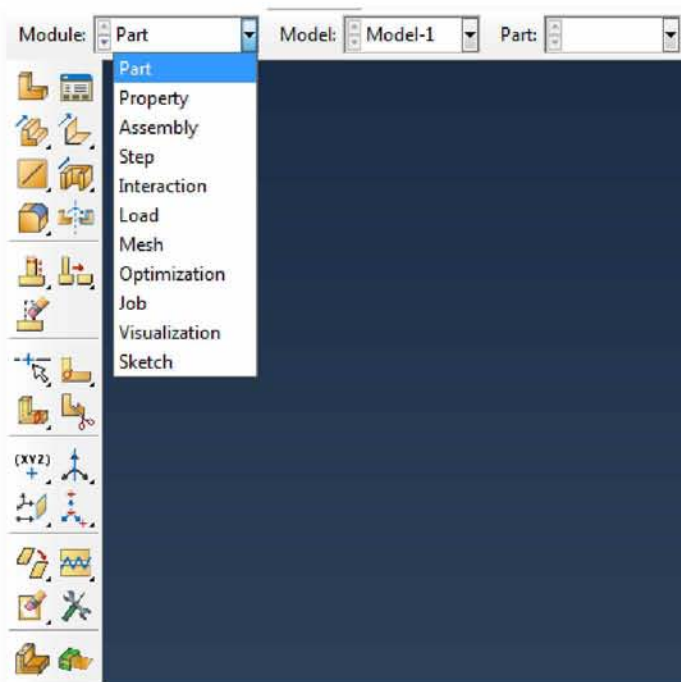


Εικόνα 4.2.3. Γεωμετρία διατομής φράγματος που χρησιμοποιήθηκε.

Οι συντεταγμένες των σημείων της περιμέτρου της διατομής του φράγματος είναι (0,0) , (250.6,109) , (263.8,109) και (460,0) , ενώ οι αντίστοιχες του αργιλικού πυρήνα (196.1,0) , (250.6,109) , (263.8,109) και (247.85,0) .

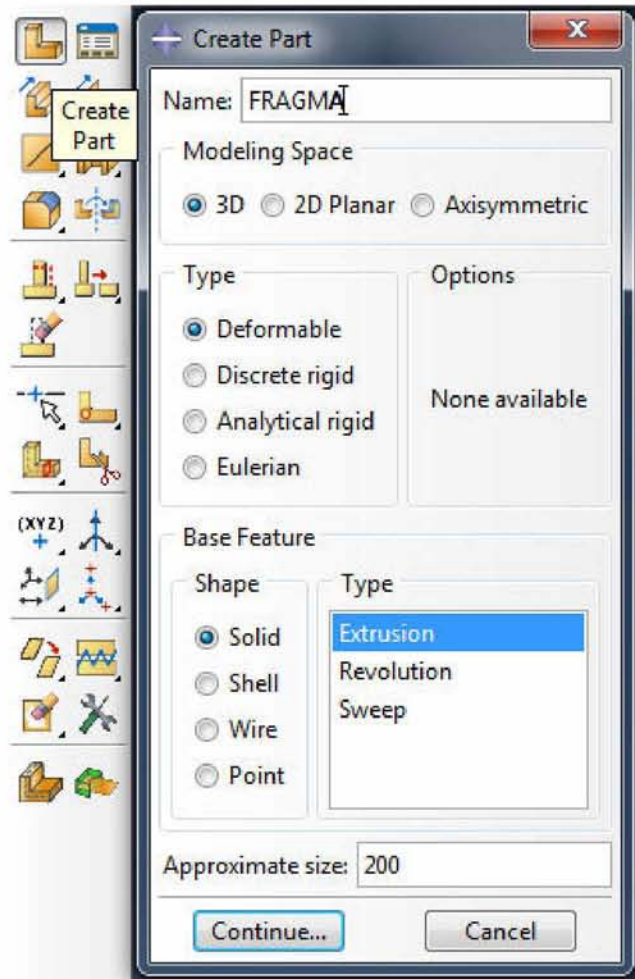
Με δεδομένες πλέον τις συντεταγμένες της γεωμετρίας του φράγματος, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του στο Abaqus.

Επιλέγεται η ενότητα (module) **Part**.



Εικόνα 4.2.4. Επιλογή ενότητας Part Module.

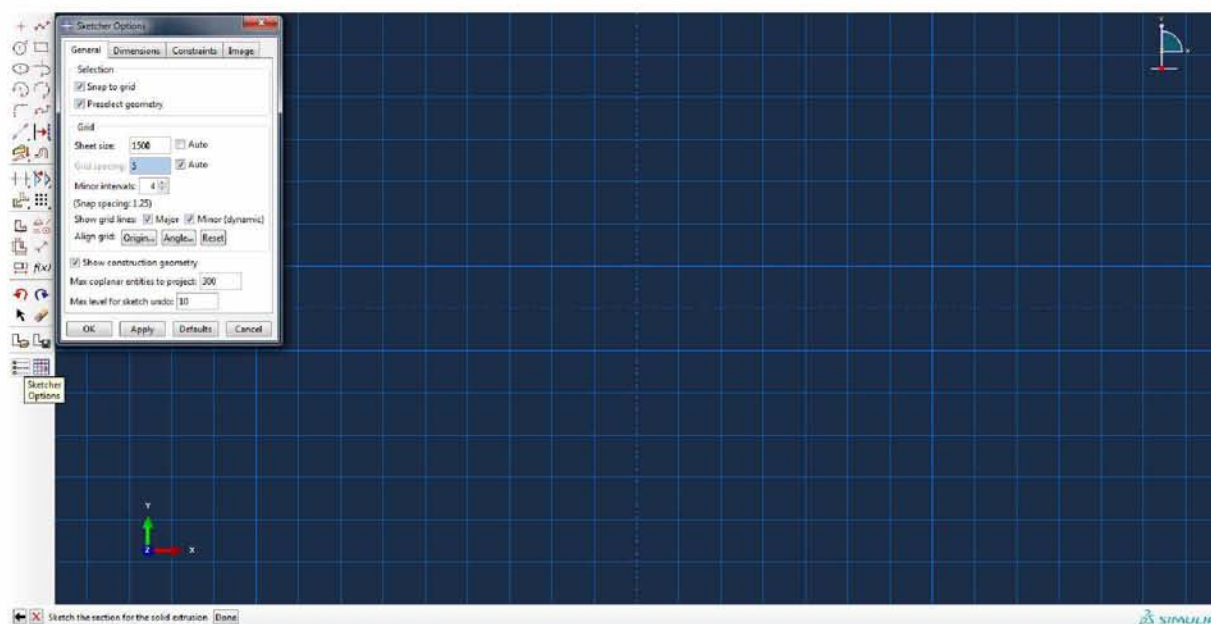
Από τη γραμμή εργαλείων ενότητας επιλέγεται η εντολή **Create Part**. Στο παράθυρο που ανοίγει, αφού δοθεί ονομασία (name) στο συγκεκριμένο τμήμα, επιλέγεται χώρος μοντελοποίησης (**Modeling Space**) τρισδιάστατος (**3D**), τύπος σώματος παραμορφώσιμο (**Deformable**), σώμα συμπαγές (**Solid**) και τύπος δημιουργίας προεκβολή (**Extrusion**). Το κατά προσέγγιση μέγεθος (approximate size) σχετίζεται με την κλίμακα σχεδίασης και διατηρείται 200 ως έχει. Επιλέγεται **Continue**.



Εικόνα 4.2.5. Δημιουργία τμήματος φράγματος.

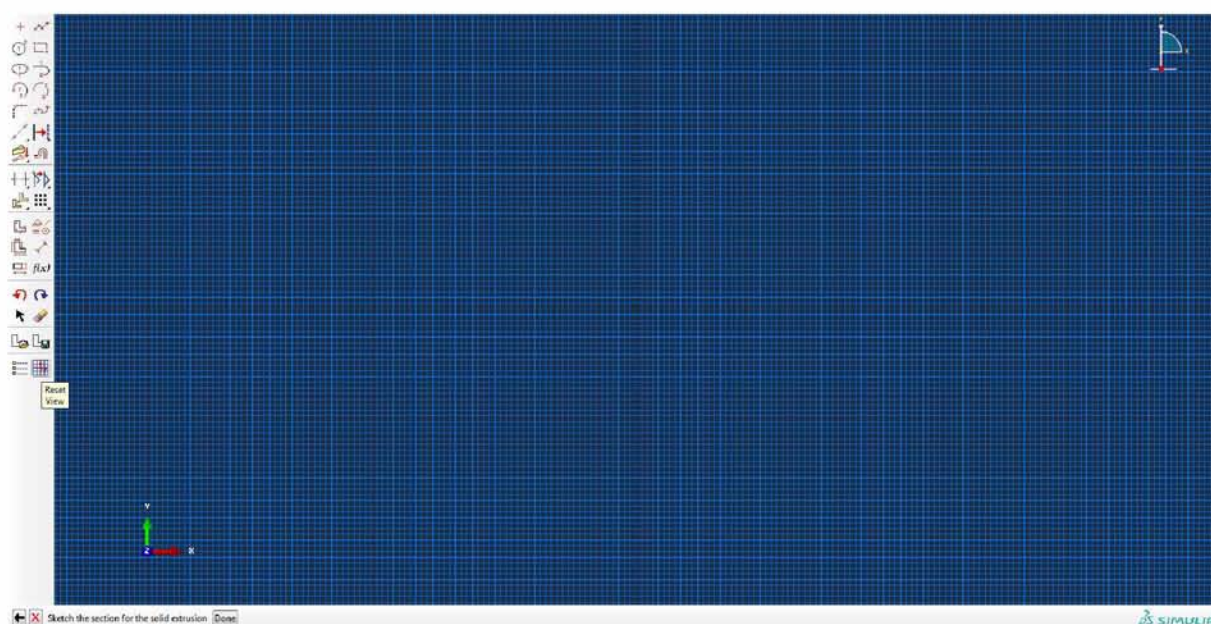
Στη συνέχεια, το πρόγραμμα εμφανίζει τον κάνναβο σχεδίασης της δισδιάστατης γεωμετρίας του τμήματος. Από τη γραμμή εργαλείων ενότητας επιλέγεται η εντολή **Sketcher Options**. Στο παράθυρο που ανοίγει υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του καννάβου σχεδίασης. Στο μέγεθος φύλλου (**Sheet size**) εισάγεται η τιμή 1500 προκειμένου να επαρκεί το μέγεθος του καννάβου για τη σχεδίαση, επιλέγεται **Apply** και **OK**.





Εικόνα 4.2.6. Προσαρμογή μεγέθους καννάβου σχεδίασης.

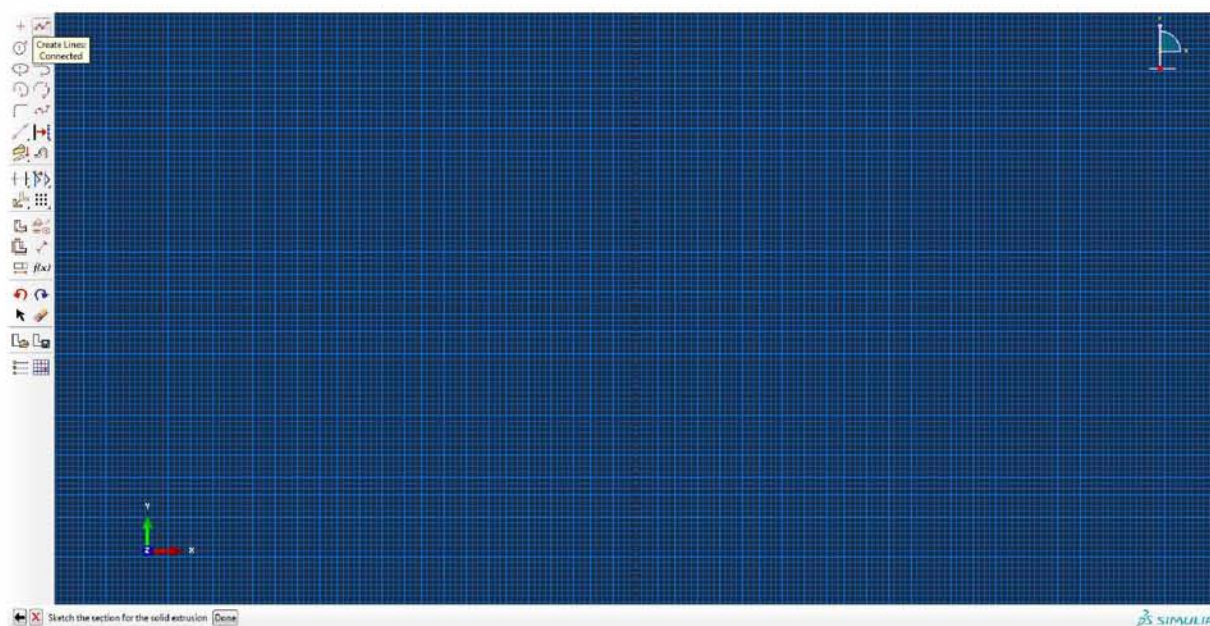
Επιλέγεται η εντολή **Reset View** προκειμένου να εμφανιστεί ολόκληρος ο κάνναβος στο παράθυρο προβολής του προγράμματος. Στην περιοχή προτροπής παρατηρείται ότι ζητείται από το πρόγραμμα να ξεκινήσει η σχεδίαση της γεωμετρίας του συγκεκριμένου τμήματος.



Εικόνα 4.2.7. Προσαρμογή προβολής καννάβου σχεδίασης.

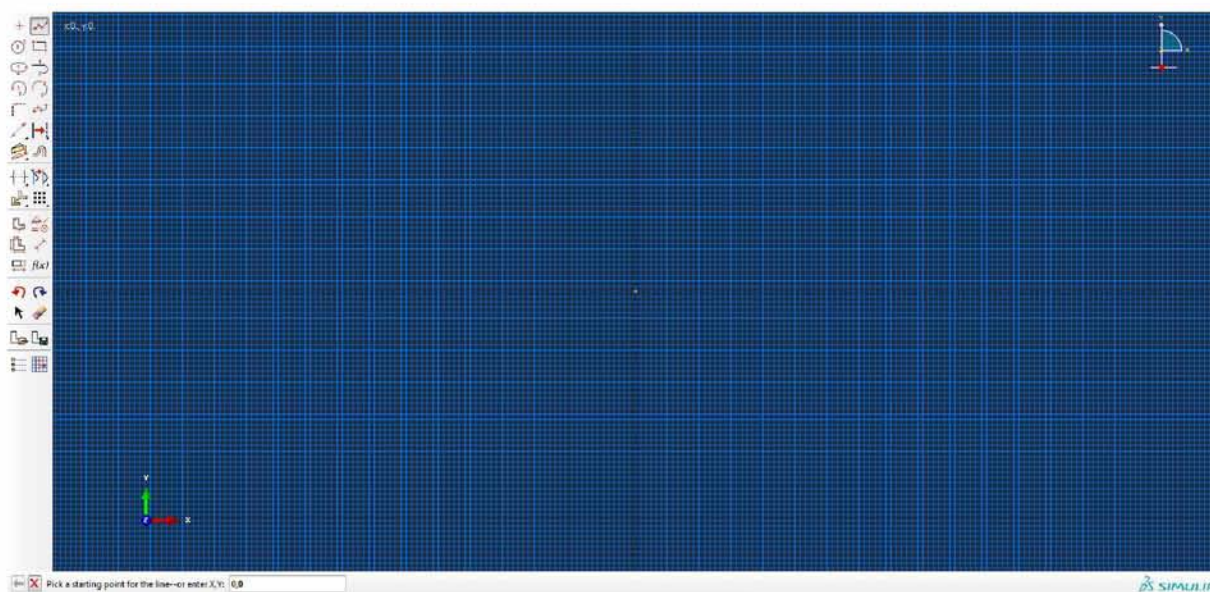
Επιλέγεται η εντολή **Create Lines: Connected** για τη δημιουργία συνεχούς γραμμής.





Εικόνα 4.2.8. Εκκίνηση σχεδιασμού γεωμετρίας φράγματος.

Ζητείται να επιλεγεί το αρχικό σημείο της γραμμής, είτε κλικάροντας σε κάποιο σημείο του καννάβου, είτε εισάγοντας τις συντεταγμένες του X και Y στο ανάλογο πλαίσιο. Στην παρούσα φάση σχεδιάστηκε μόνο η περίμετρος της διατομής του φράγματος και η δημιουργία του πυρήνα έγινε σε επόμενο στάδιο. Χρησιμοποιήθηκαν 4 σημεία με συντεταγμένες  $(0,0)$  ,  $(250.6,109)$  ,  $(263.8,109)$  και  $(460,0)$  αντίστοιχα. Εισάγονται οι συντεταγμένες του πρώτου σημείου  $(0,0)$  και πιέζεται enter.



Εικόνα 4.2.9. Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

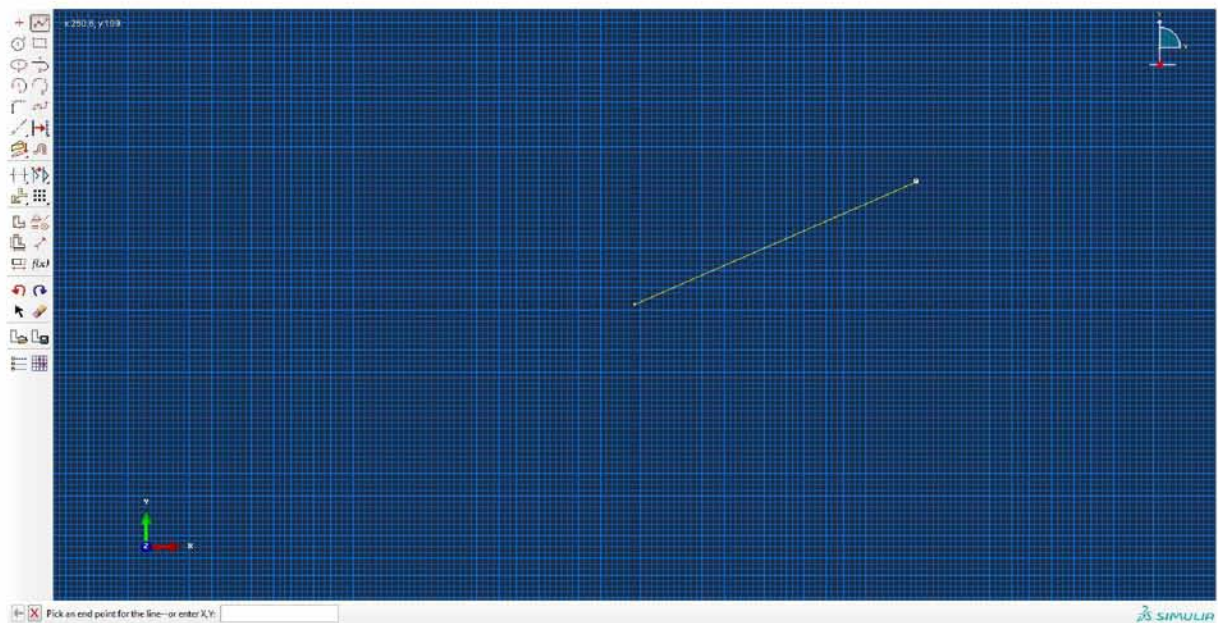
Δημιουργείται το πρώτο σημείο στον κάνναβο και το πρόγραμμα ζητά να εισαχθούν οι συντεταγμένες του δεύτερου σημείου, όπως και γίνεται.





Εικόνα 4.2.10. Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

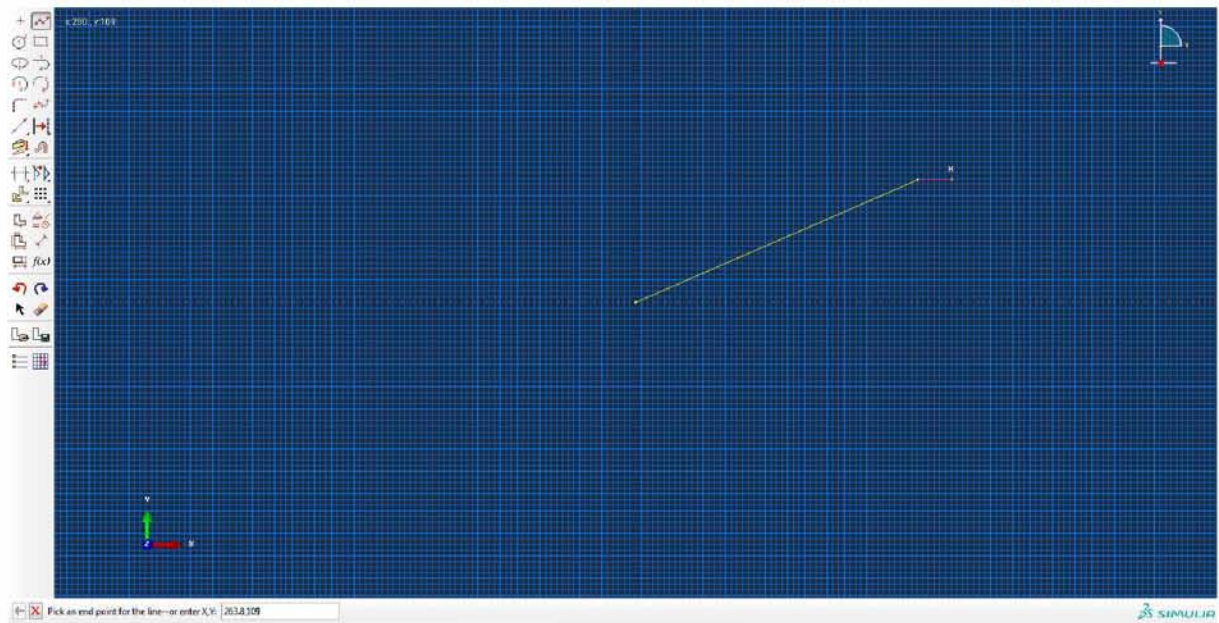
Έχει δημιουργηθεί πλέον μια γραμμή από τα δύο σημεία που εισήχθησαν.



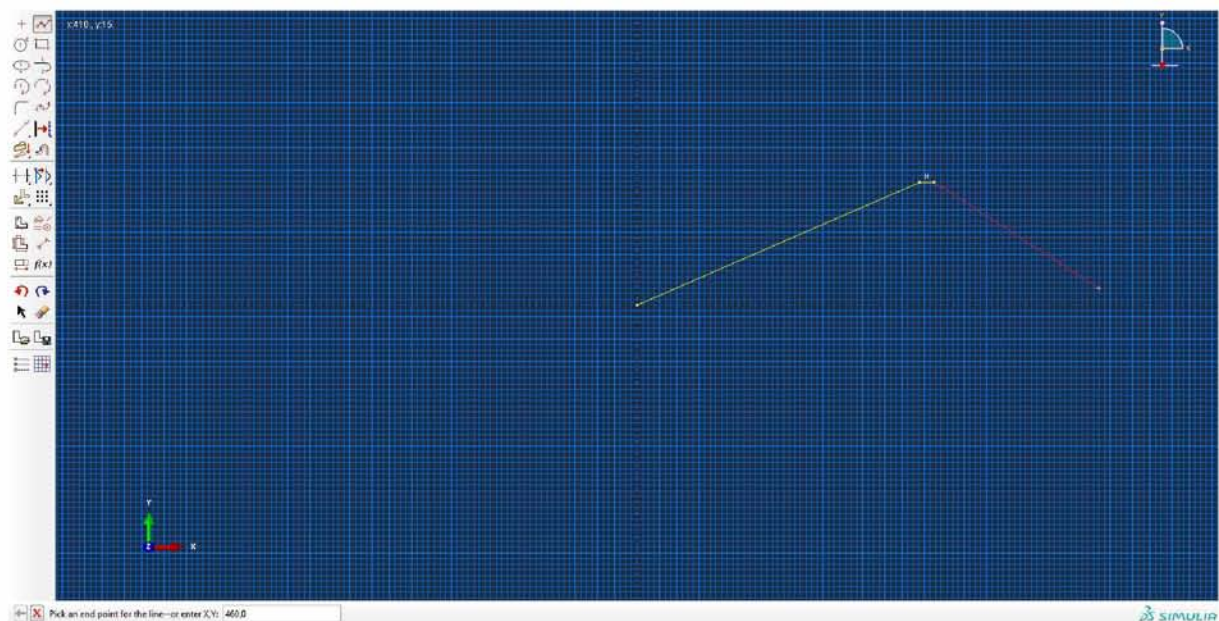
Εικόνα 4.2.11. Απεικόνιση ολοκλήρωσης σχεδιασμού της πρώτης γραμμής.

Με την ίδιο τρόπο εισάγονται και οι συντεταγμένες των υπόλοιπων σημείων.





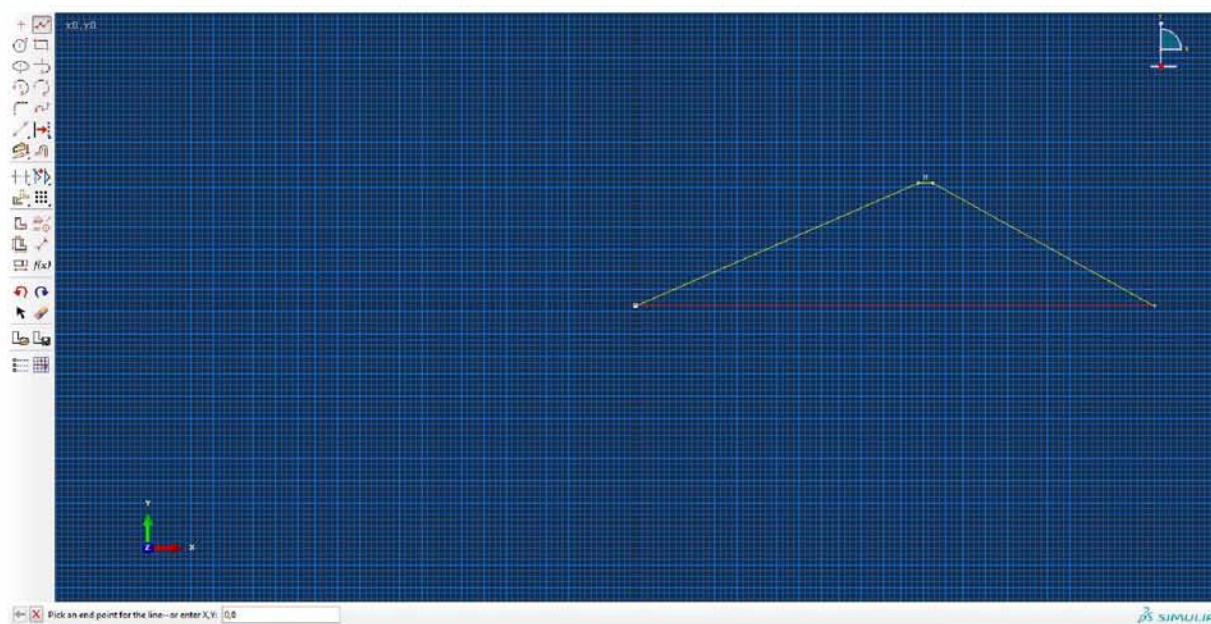
Εικόνα 4.2.12. Εισαγωγή συντεταγμένων του τρίτου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.



Εικόνα 4.2.13. Εισαγωγή συντεταγμένων του τέταρτου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

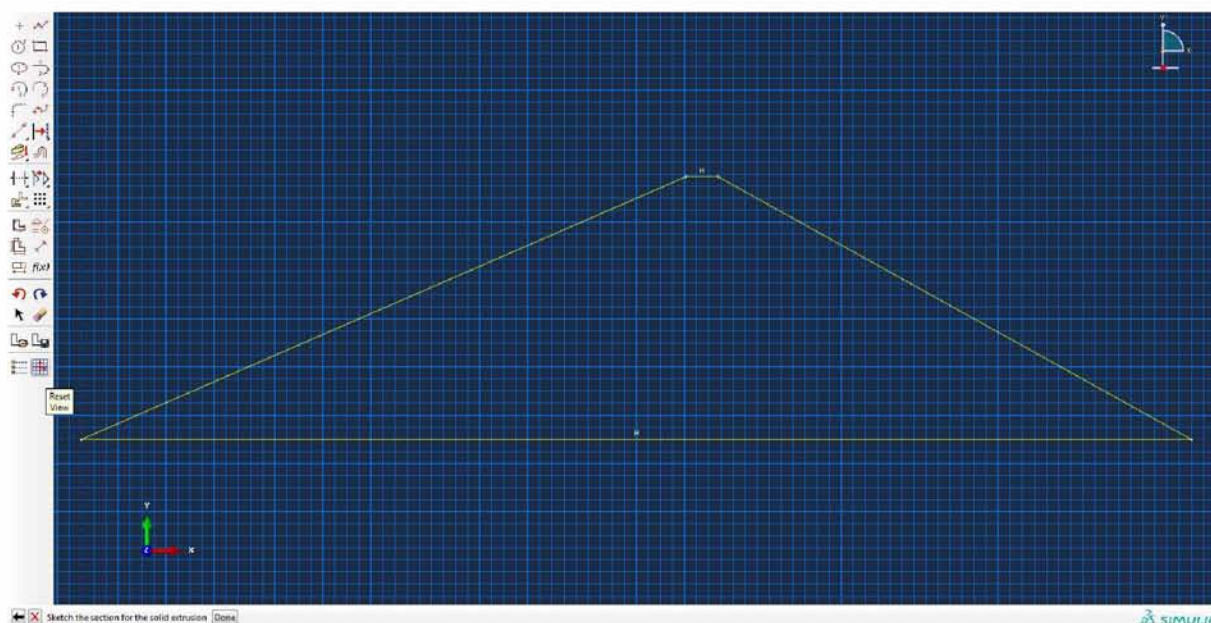
Για το κλείσιμο της γραμμής και τη δημιουργία της διατομής, είτε επιλέγεται το αρχικό σημείο, είτε εισάγονται ξανά οι συντεταγμένες του: (0,0).





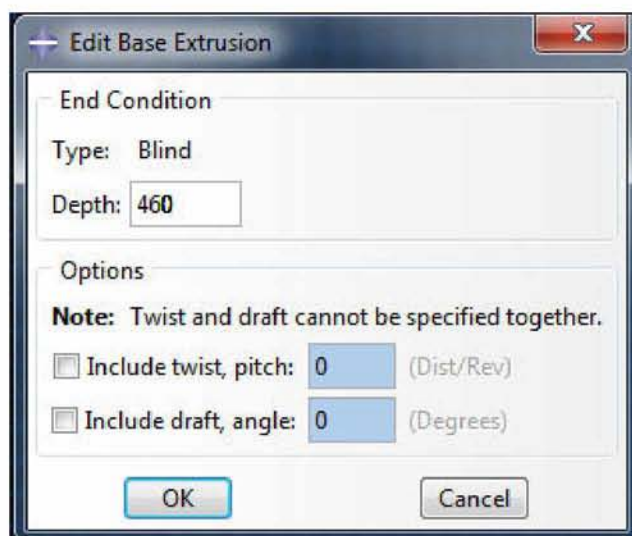
Εικόνα 4.2.14. Εισαγωγή συντεταγμένων του τελευταίου σημείου της γεωμετρίας του φράγματος.

Επιλέγεται **Reset View** και αφού ελεγχθεί ότι η διατομή σχεδιάστηκε σωστά, επιλέγεται από τη γραμμή προτροπής **Done** για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός.



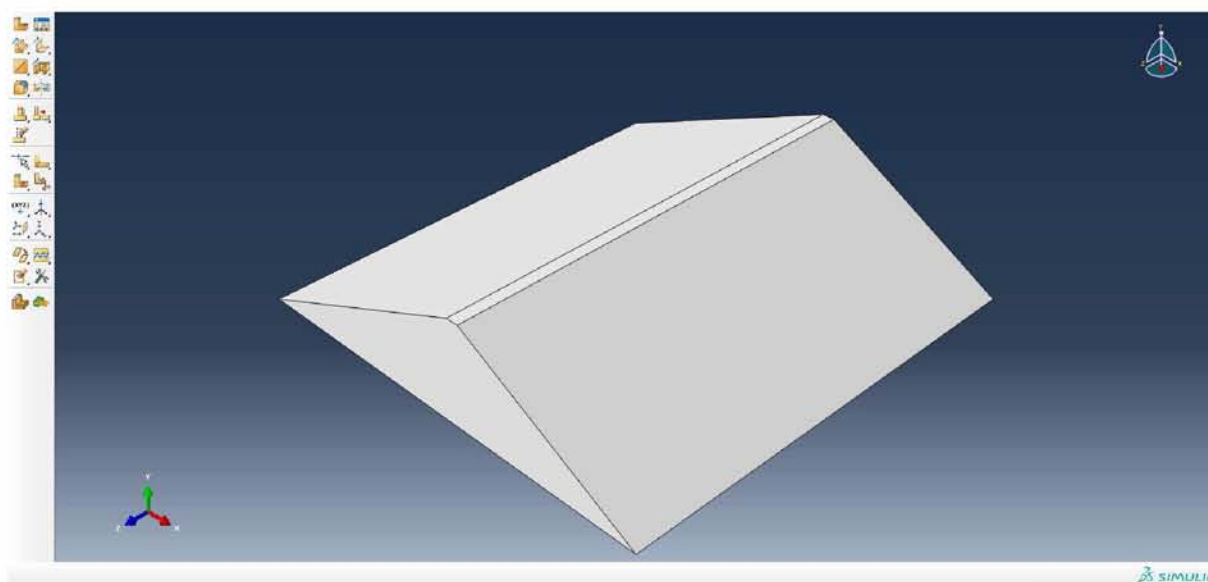
Εικόνα 4.2.15. Ολοκληρωμένη γεωμετρία διατομής φράγματος σε δύο διαστάσεις.

Εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο (**Edit Base Extrusion**), όπου ζητείται να εισαχθεί το βάθος (**Depth**) της γεωμετρίας, δηλαδή η τρίτη διάσταση. Εισάγεται η τιμή 460, όσα μέτρα είναι δηλαδή το μέγιστο μήκος στέψης του φράγματος και επιλέγεται **OK**.



Εικόνα 4.2.16. Εισαγωγή τρίτης διάστασης γεωμετρίας φράγματος.

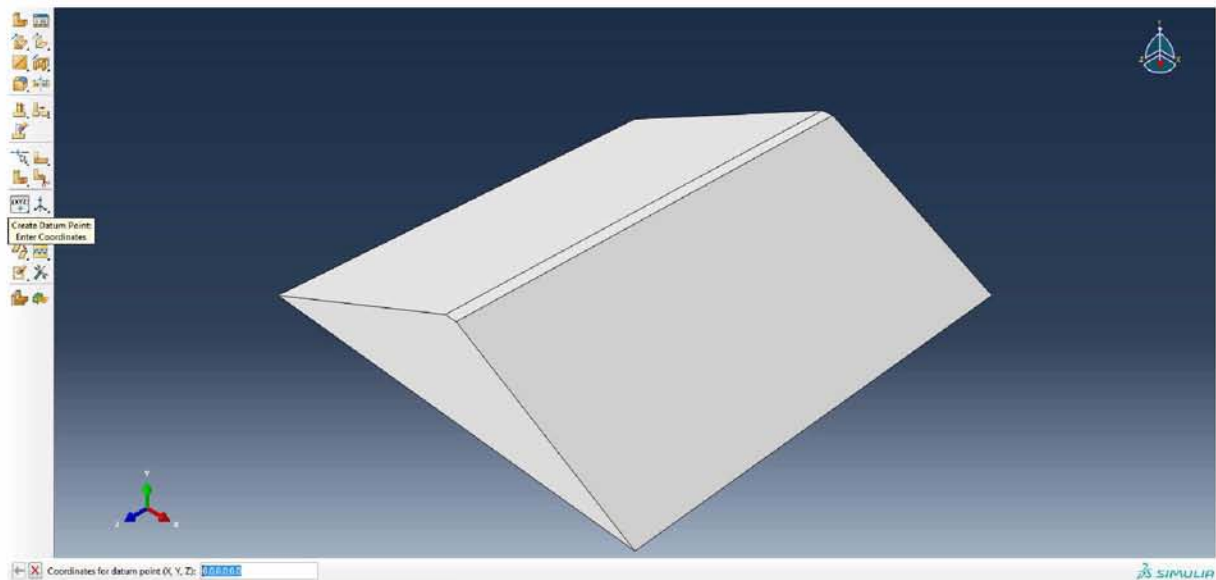
Στο παράθυρο προβολής παρατηρείται η διατομή του φράγματος μετά τον σχεδιασμό.



Εικόνα 4.2.17. Γεωμετρία διατομής φράγματος στις τρεις διαστάσεις.

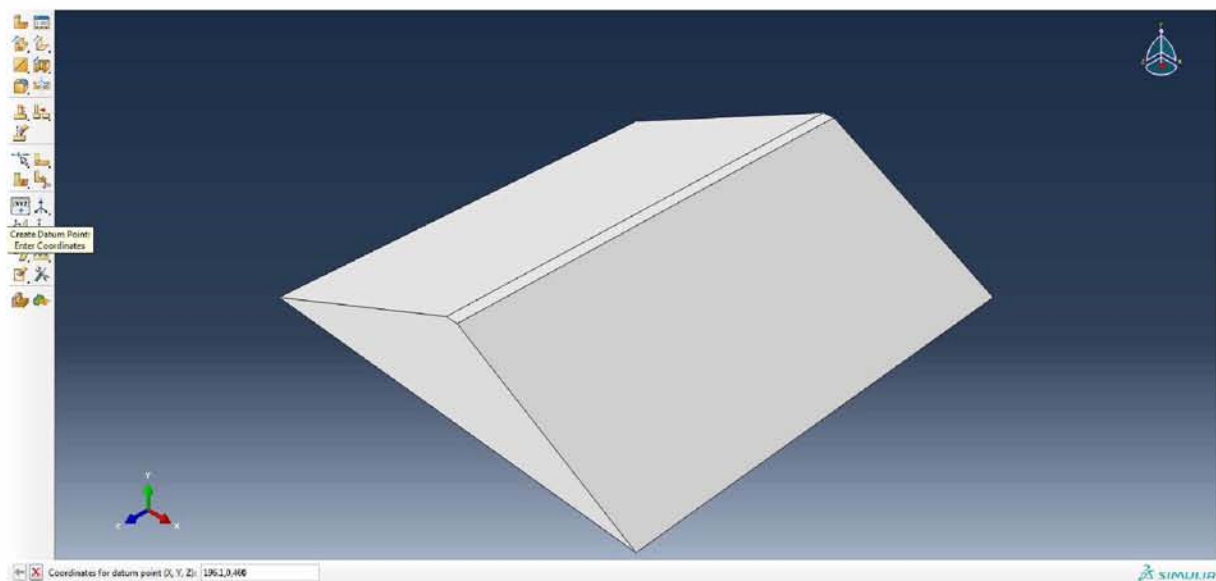
Σε αυτό το σημείο εισάγεται ο αργλικός πυρήνας στη γεωμετρία του φράγματος. Αρχικά, δημιουργούνται δύο σημεία στη βάση της διατομής του φράγματος. Επιλέγεται η εντολή **Create Datum Point: Enter Coordinates** και το πρόγραμμα ζητά τις συντεταγμένες (X,Y,Z) του πρώτου σημείου.





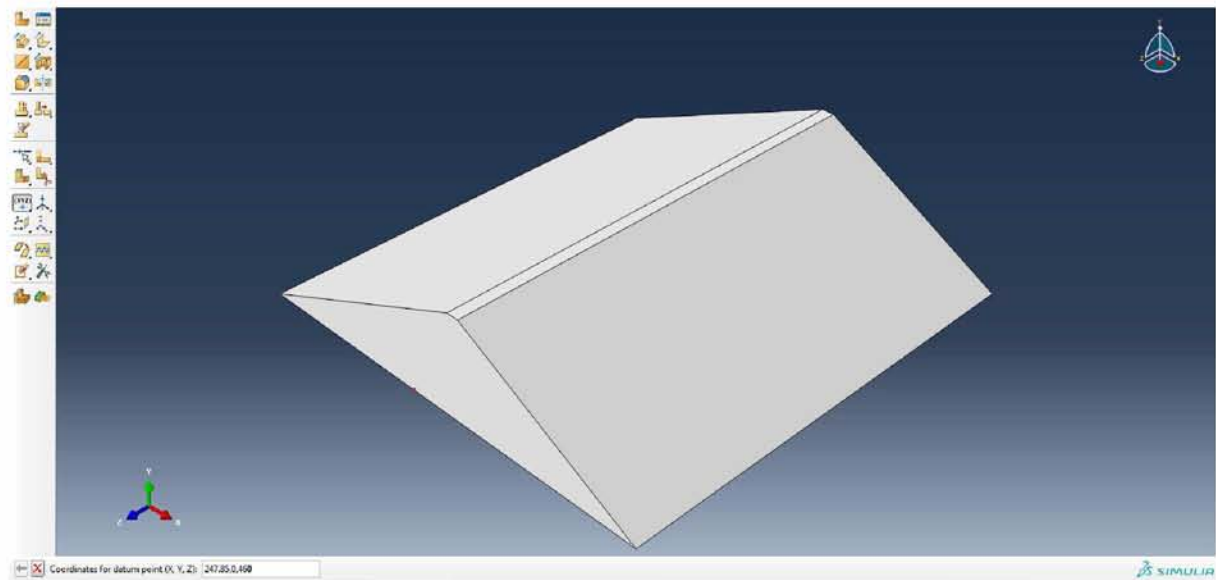
Εικόνα 4.2.18. Εντολή δημιουργίας βοηθητικών σημείων για τον καθορισμό του πυρήνα.

Πληκτρολογούνται οι συντεταγμένες του πρώτου σημείου της βάσης του πυρήνα (196.1,0,460) και πιέζεται enter. Η τιμή 460 (συντεταγμένη Z) αναφέρεται στην μπροστινή όψη του φράγματος, αφού ως αρχή του άξονα Z λήφθηκε η πίσω όψη όπως φαίνεται στο παράθυρο.



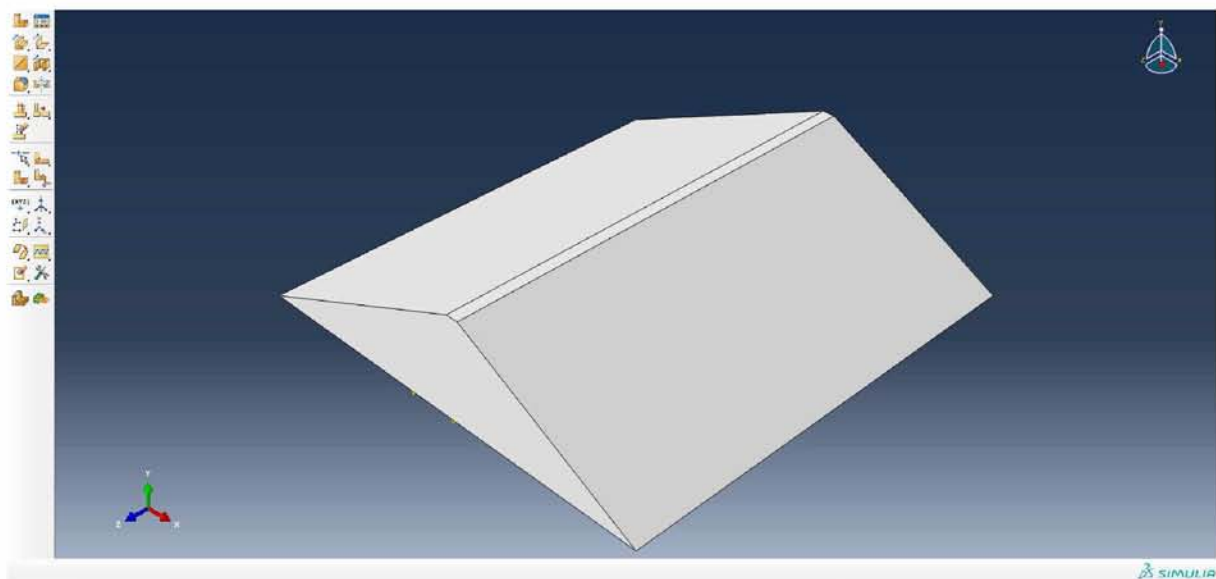
Εικόνα 4.2.19. Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της βάσης του πυρήνα του φράγματος.

Στη συνέχεια εισάγονται οι συντεταγμένες του δεύτερου σημείου της βάσης του πυρήνα (247.85,0,460).



Εικόνα 4.2.20. Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της βάσης του πυρήνα του φράγματος.

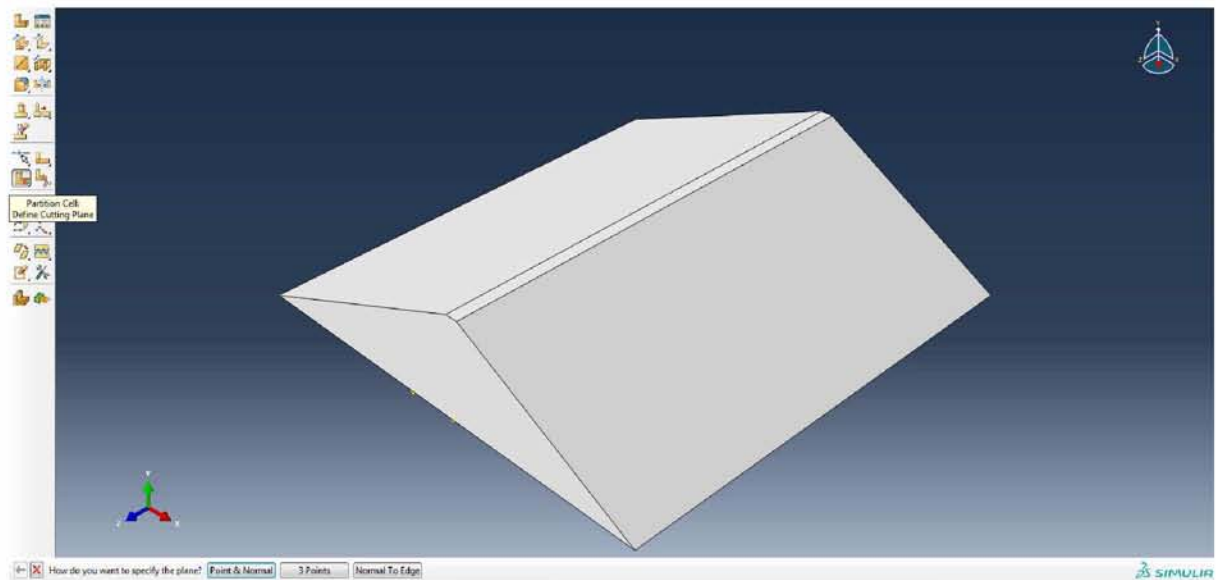
Φαίνονται, πλέον, τα δύο σημεία με βάση τα οποία θα γίνει ουσιαστικά ο διαχωρισμός του σώματος του φράγματος σε τρία μέρη: τον αργιλικό πυρήνα και τα δύο σώματα στήριξης εκατέρωθεν αυτού.



Εικόνα 4.2.21. Προβολή των δύο σημείων της βάσης του πυρήνα του φράγματος.

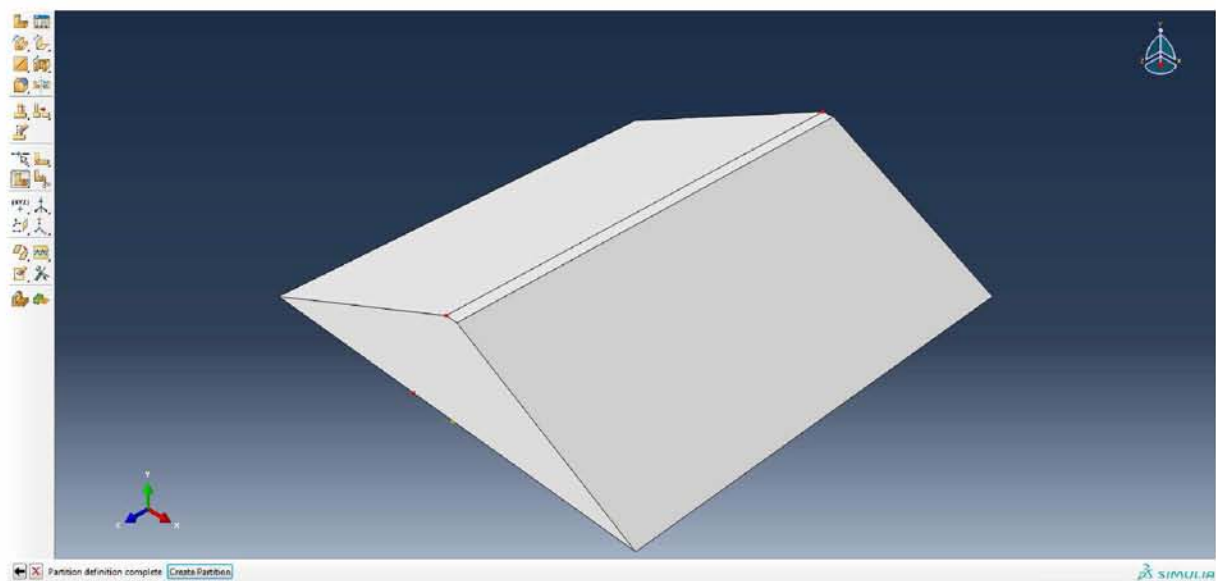
Δίνεται η εντολή **Partition Cell: Define Cutting Plane** και στη συνέχεια από τη γραμμή προτροπής πιέζεται **3 Points**.





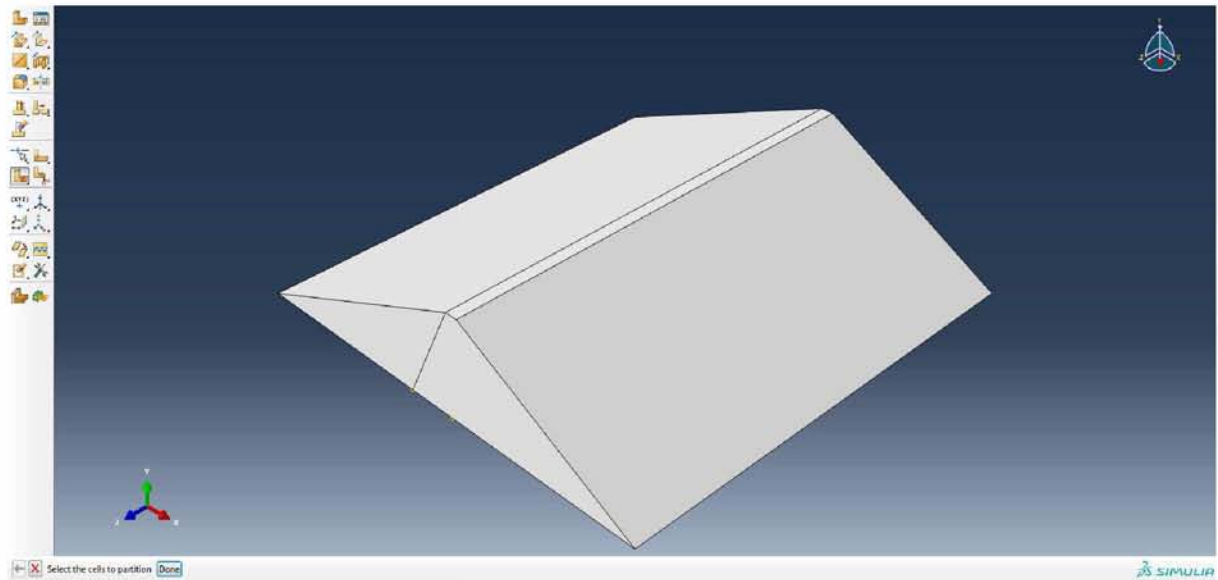
Εικόνα 4.2.22. Εντολή διαχωρισμού σώματος.

Επιλέγονται τα 3 σημεία με βάση τα οποία θα γίνει ο πρώτος διαχωρισμός (2 σημεία στην μπροστινή όψη και 1 σημείο στην πίσω) και στη συνέχεια **Create Partition**.



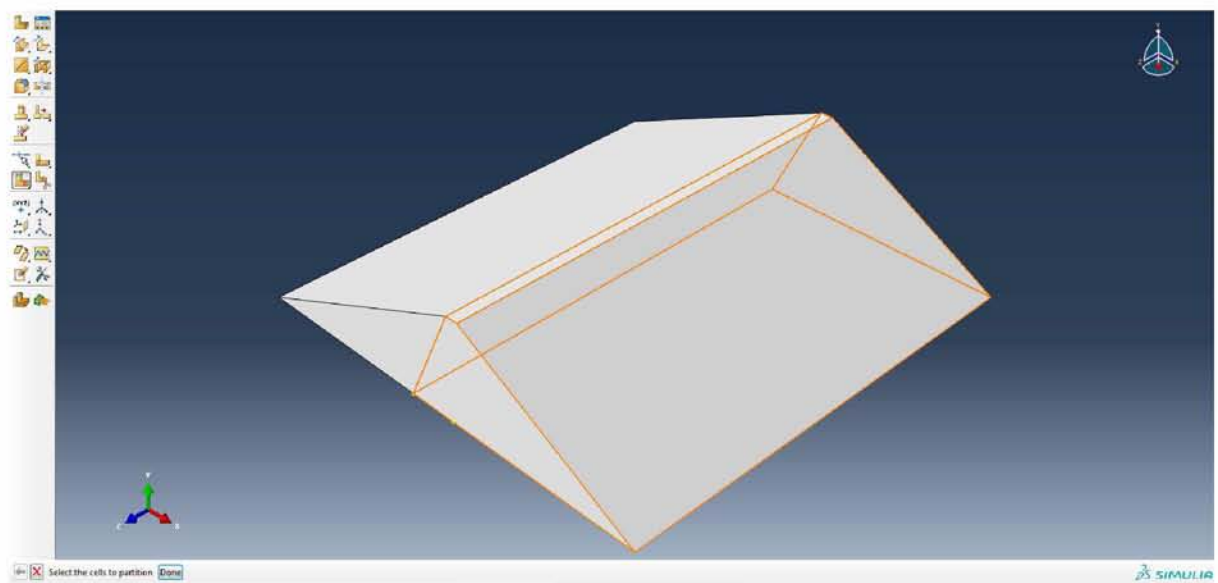
Εικόνα 4.2.23. Καθορισμός σημείων πρώτου διαχωρισμού.

Ο διαχωρισμός του αριστερού σώματος στήριξης έχει πλέον ολοκληρωθεί και ζητείται από το πρόγραμμα να επιλεγεί το τμήμα στο οποίο θα γίνει ο επόμενος διαχωρισμός.



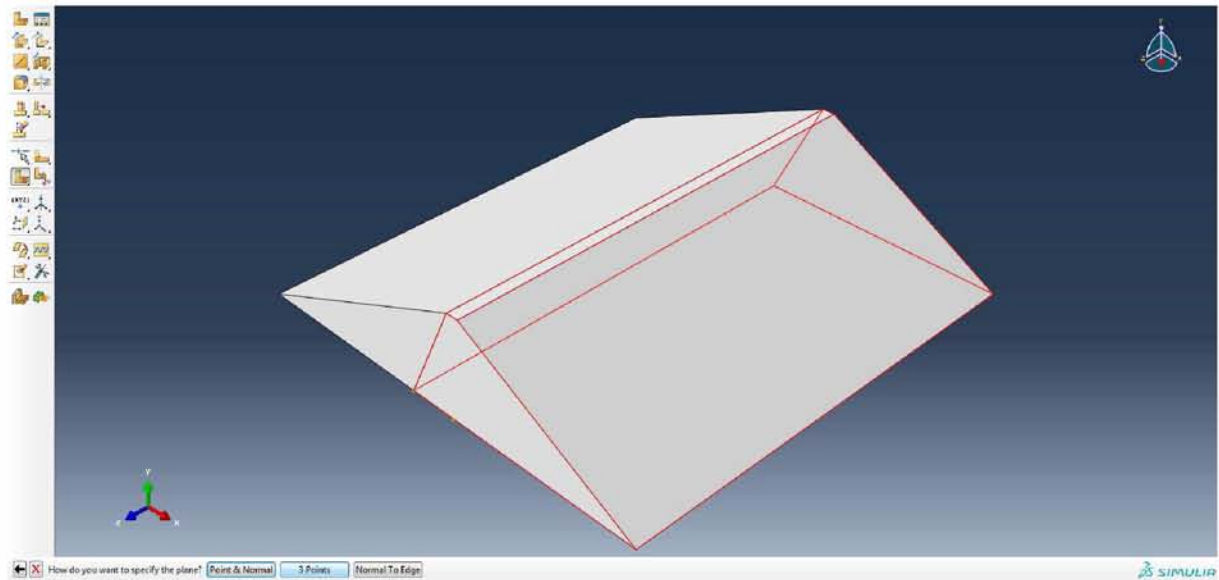
Εικόνα 4.2.24. Ολοκλήρωση πρώτου διαχωρισμού.

Επιλέγεται το δεξί τμήμα του σώματος και στη συνέχεια **Done**.



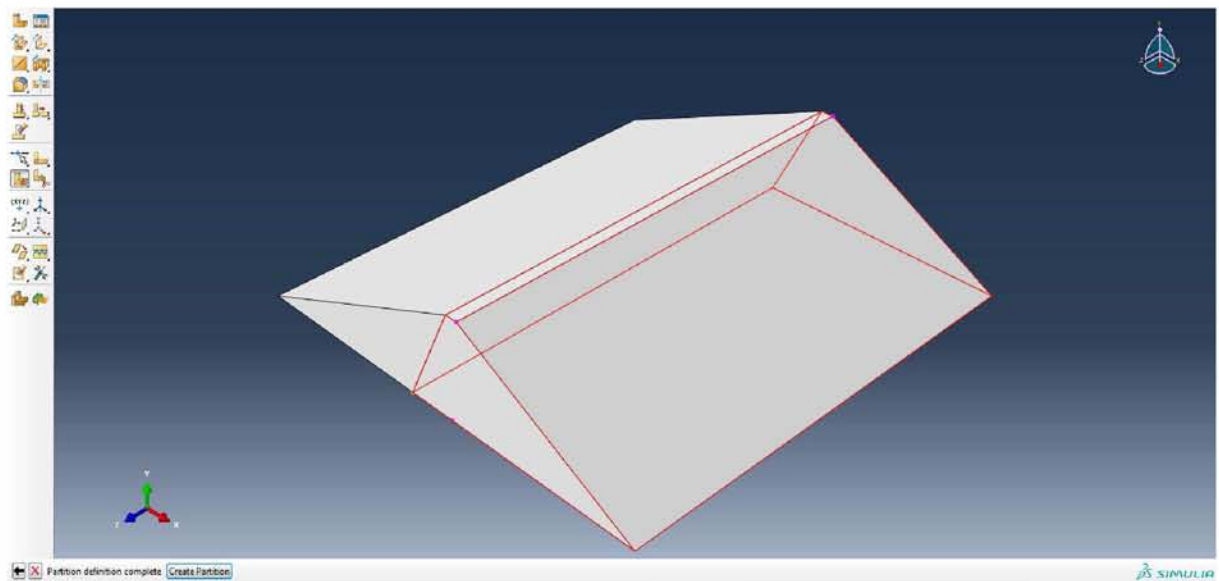
Εικόνα 4.2.25. Επιλογή σώματος για τον δεύτερο διαχωρισμό.

Ζητείται και πάλι ο τρόπος ορισμού του επιπέδου διαχωρισμού, οπότε κλικάρεται ξανά **3 points** (με 3 σημεία).



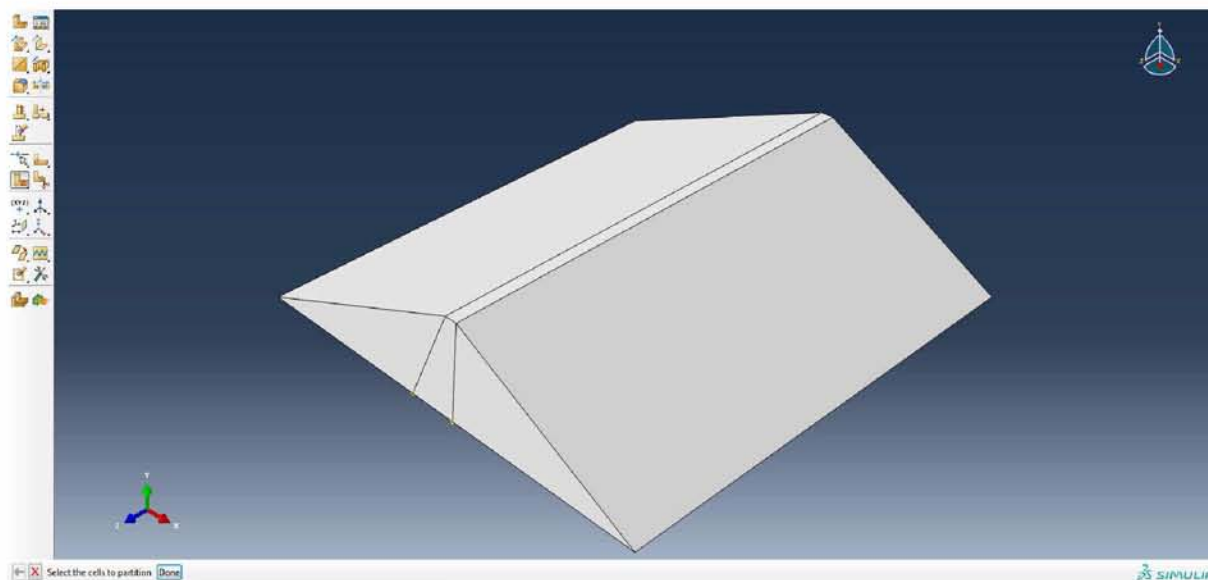
Εικόνα 4.2.26. Εντολή διαχωρισμού με επιλογή τριών σημείων.

Αφού επιλεχθούν τα σημεία, κλικάρεται **Create Partition**.



Εικόνα 4.2.27. Επιλογή σημείων δεύτερου διαχωρισμού.

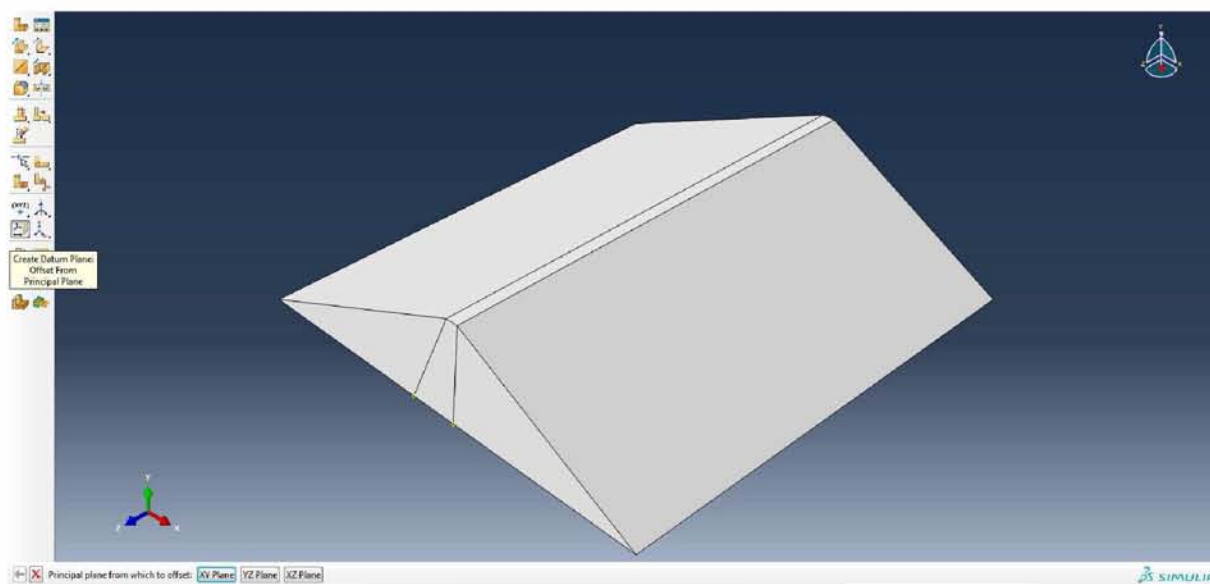
Έτσι δημιουργείται ο πυρήνας του φράγματος.



Εικόνα 4.2.28. Ολοκλήρωση διαμόρφωσης του πυρήνα του φράγματος.

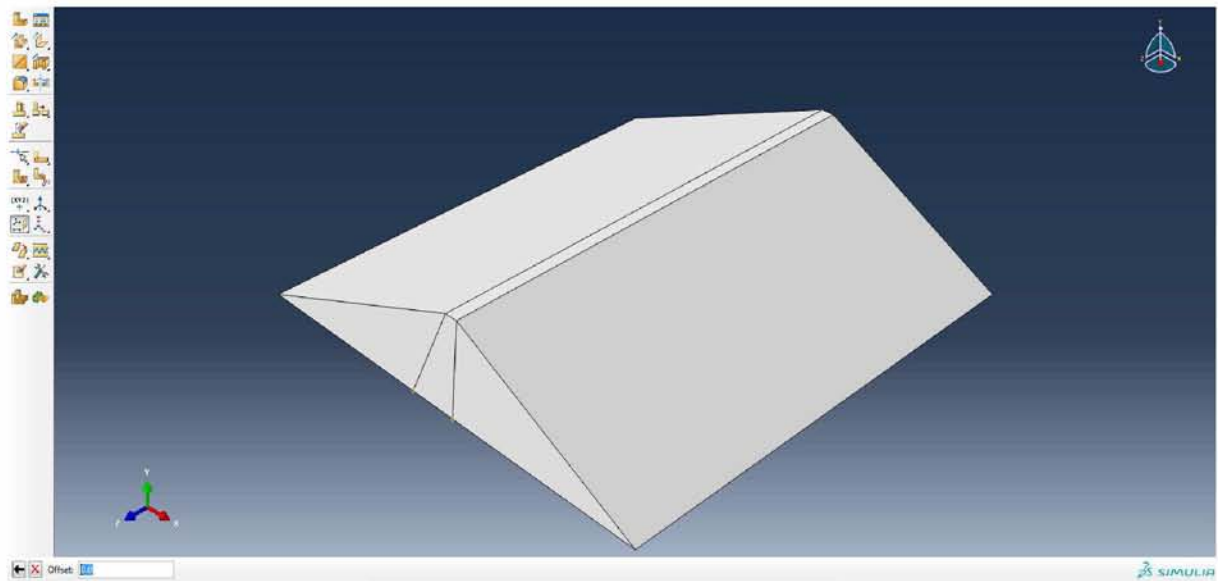
Για να πάρει το φράγμα την τελική του μορφή, πρέπει να αποκοπεί υπό συγκεκριμένες κλίσεις στις δύο μεριές στις οποίες εδράζεται στα πρανή της κοιλάδας και στο υπέδαφος. Προκειμένου να γίνει αυτό, δημιουργούνται κάποια βοηθητικά επίπεδα και άξονες σε κάποιες από τις τομές αυτών των επιπέδων.

Επιλέγεται η εντολή **Create Datum Plane: Offset From Principal Plane** για τη δημιουργία βοηθητικού επιπέδου σε συγκεκριμένη απόσταση από ένα από τα τρία κύρια επίπεδα. Από τη γραμμή προτροπής επιλέγεται **XY Plane**, ώστε να δημιουργηθεί επίπεδο παράλληλο στο κύριο επίπεδο XY.



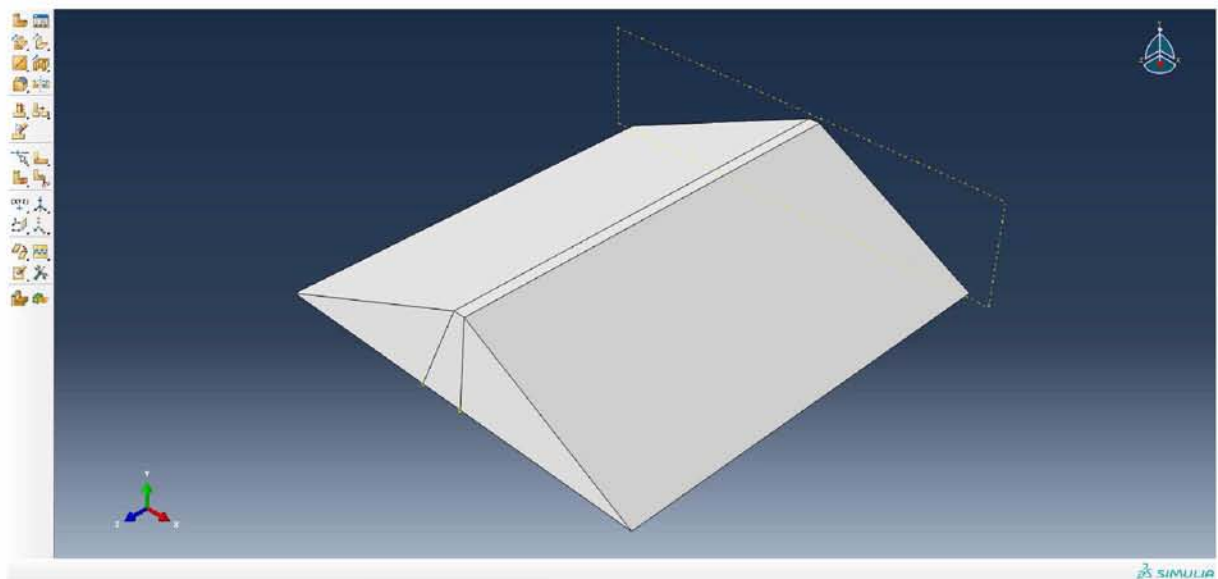
Εικόνα 4.2.29. Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου XY.

Ζητείται να εισαχθεί η απόσταση του νέου επιπέδου από το κύριο επίπεδο, όπου και πληκτρολογείται 0.



Εικόνα 4.2.30. Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο XY.

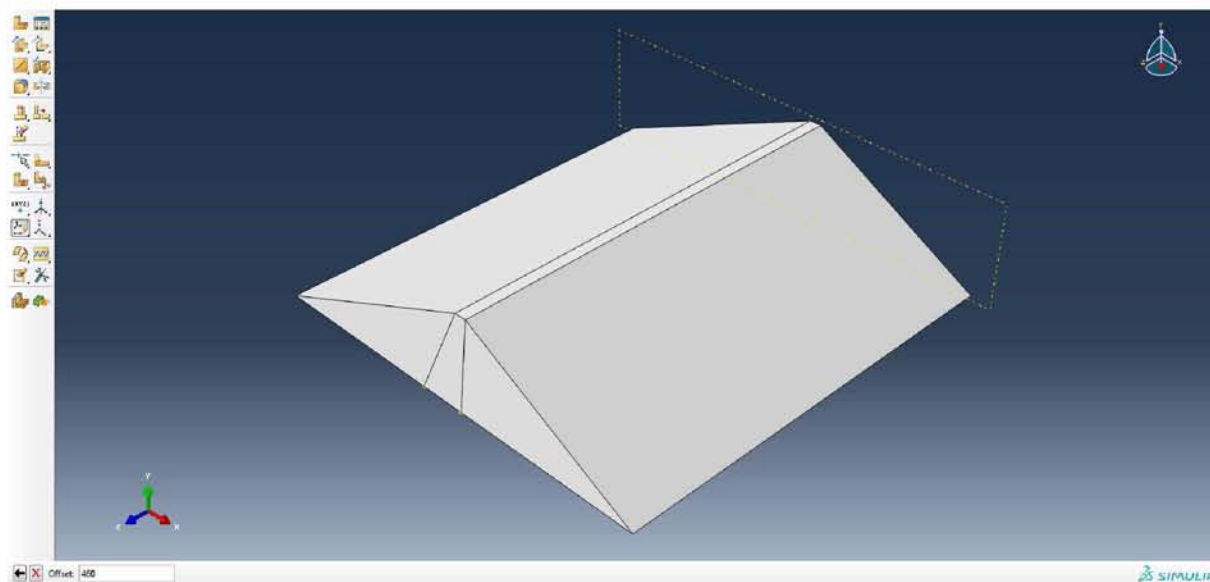
Δημιουργείται έτσι το πρώτο βοηθητικό επίπεδο στην πίσω όψη του φράγματος όπως αυτή απεικονίζεται στο παράθυρο προβολής.



Εικόνα 4.2.31. Ολοκλήρωση δημιουργίας πρώτου βοηθητικού επιπέδου.

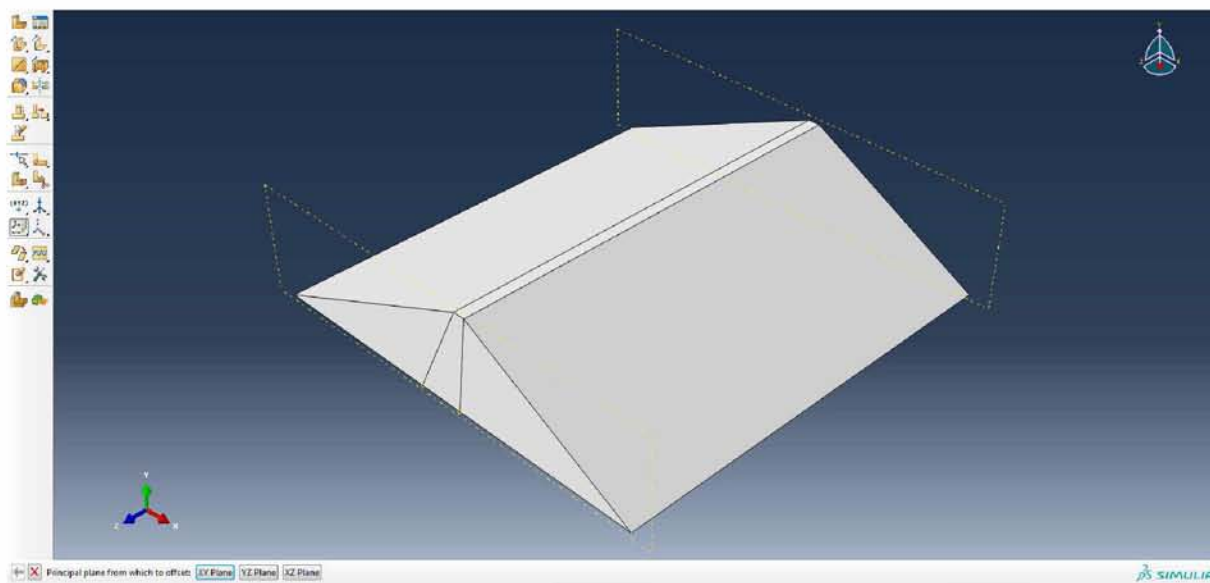
Επιλέγοντας την ίδια εντολή και επίπεδο XY, εισάγεται η τιμή 460.





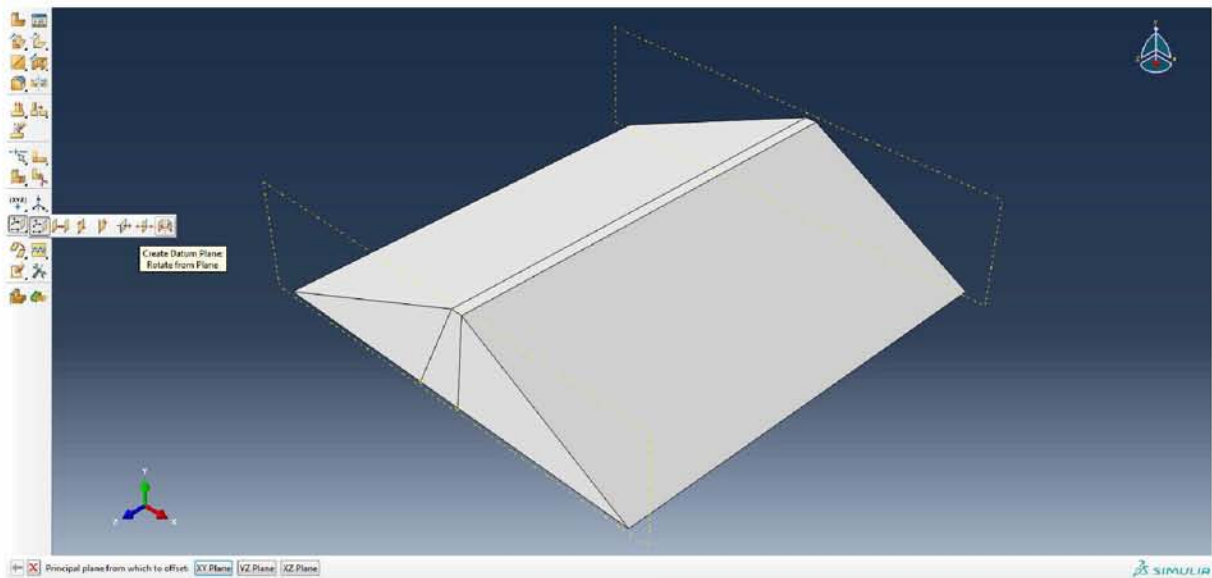
Εικόνα 4.2.32. Εισαγωγή απόστασης για τη δημιουργία του δεύτερου βοηθητικού επιπέδου.

Φαίνεται πλέον και το δεύτερο βοηθητικό επίπεδο στην μπροστινή όψη του φράγματος.



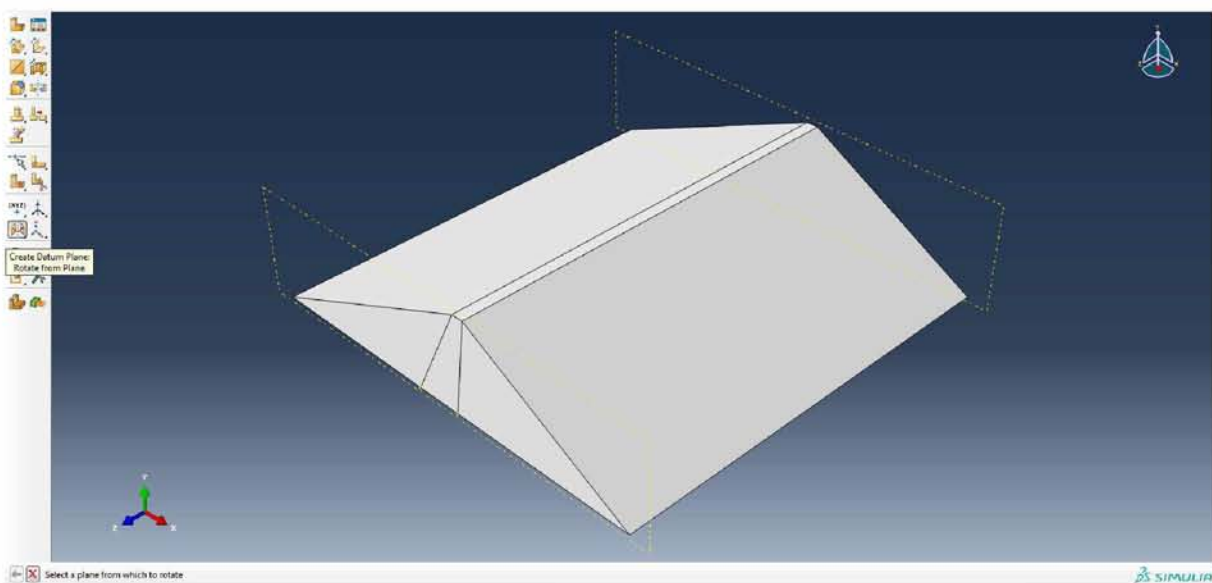
Εικόνα 4.2.33. Ολοκλήρωση δημιουργίας δεύτερου βοηθητικού επιπέδου.

Από τη γραμμή εργαλείων ενότητας κρατώντας πατημένο τον δείκτη του ποντικιού πάνω από την εντολή **Create Datum Plane: Offset From Principal Plane** εμφανίζονται εναλλακτικές για τη δημιουργία επιπέδου. Επιλέγεται η εντολή **Create Datum Plane: Rotate from Plane** με την οποία δημιουργείται επίπεδο υπό συγκεκριμένη κλίση ως προς ένα άλλο υπάρχον επίπεδο και μια ευθεία γραμμή.



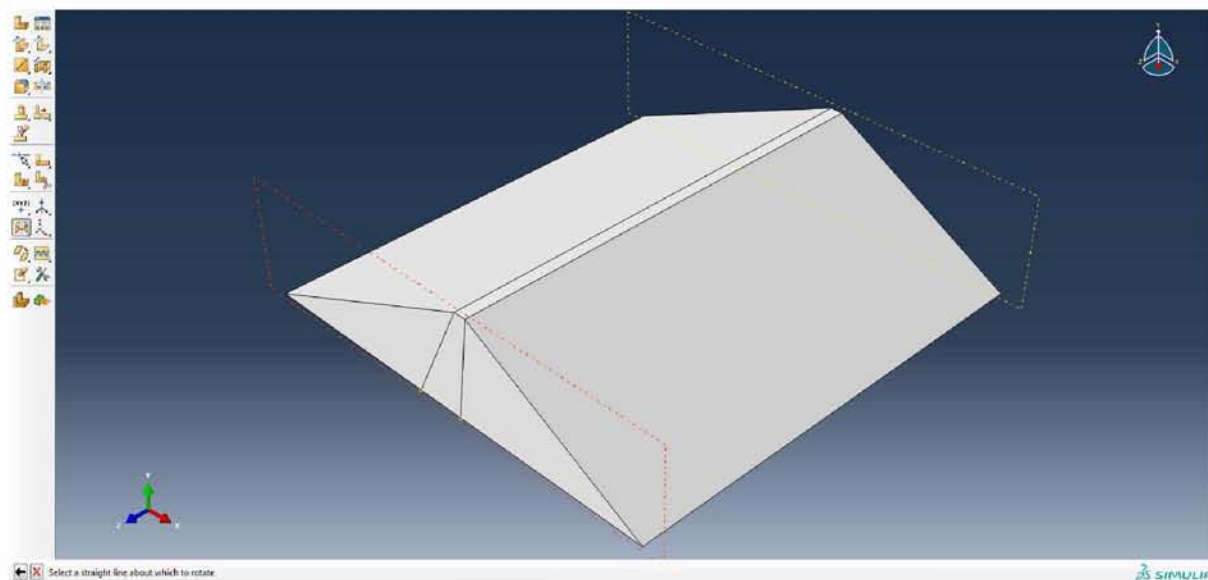
Εικόνα 4.2.34. Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου υπό συγκεκριμένη κλίση ως προς ένα άλλο υπάρχον.

Ζητείται να επιλεγεί το υπάρχον επίπεδο με βάση το οποίο θα δημιουργηθεί το νέο.



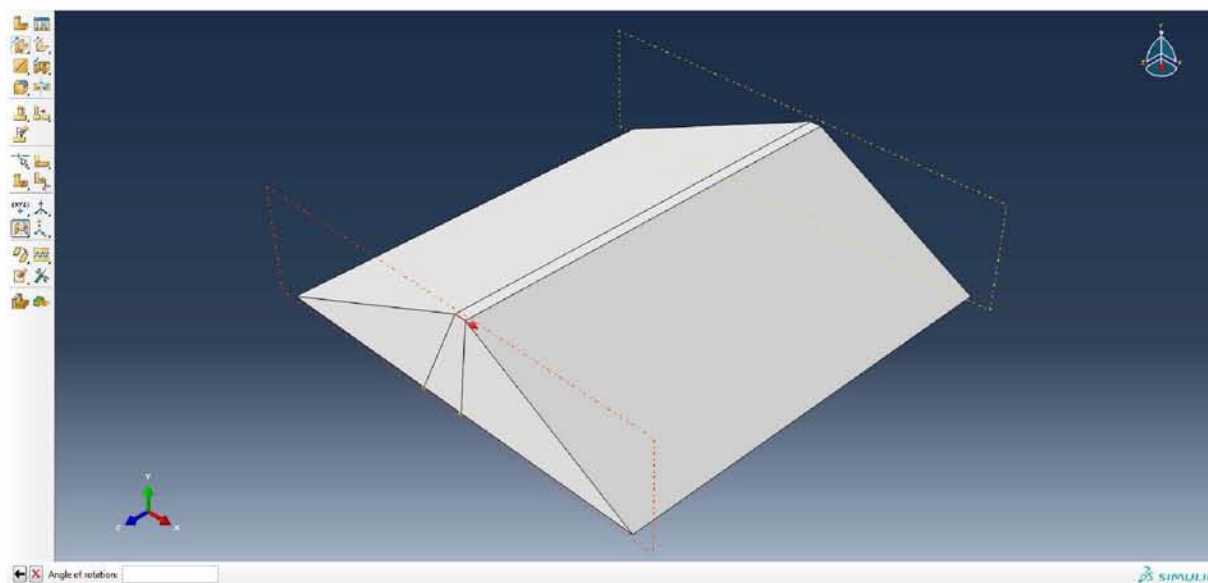
Εικόνα 4.2.35. Προτροπή επιλογής του υπάρχοντος επιπέδου.

Αφού επιλεγεί το επίπεδο της μπροστινής όψης, ζητείται να προσδιοριστεί η ευθεία γύρω από την οποία θα γίνει η περιστροφή.



Εικόνα 4.2.36. Επιλογή υπάρχοντος επιπέδου για τη δημιουργία του πρώτου επιπέδου κλίσης.

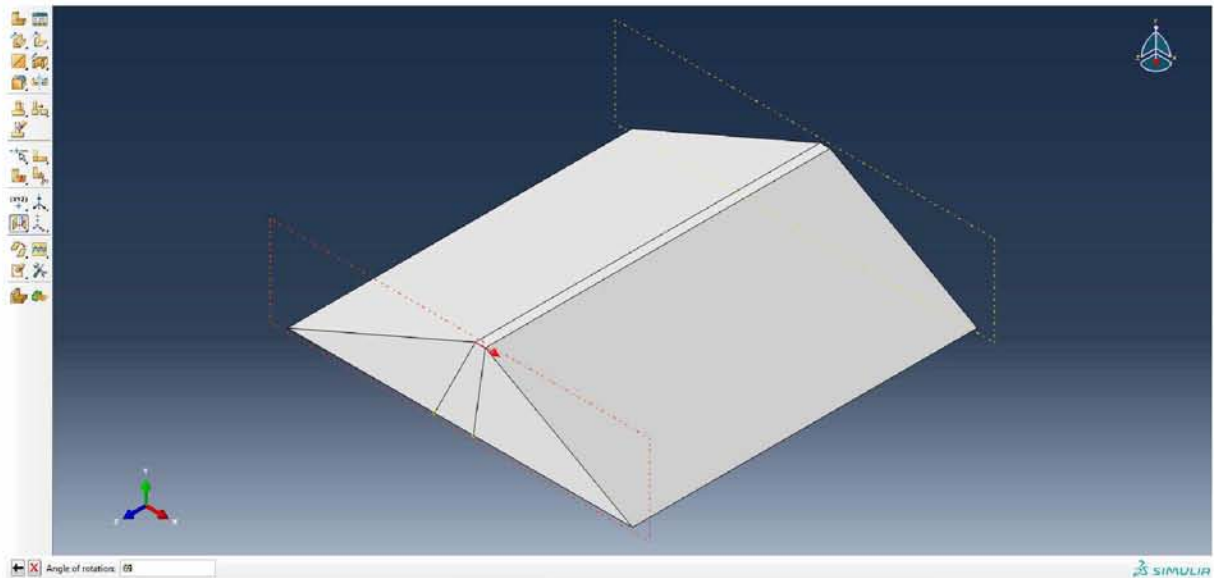
Κλικάρεται το άνω τμήμα της διατομής του πυρήνα στην μπροστινή όψη του φράγματος και για να ολοκληρωθεί η δημιουργία του επιπέδου ζητείται να καθοριστεί η γωνία περιστροφής.



Εικόνα 4.2.37. Επιλογή ευθείας γύρω από την οποία θα γίνει η περιστροφή.

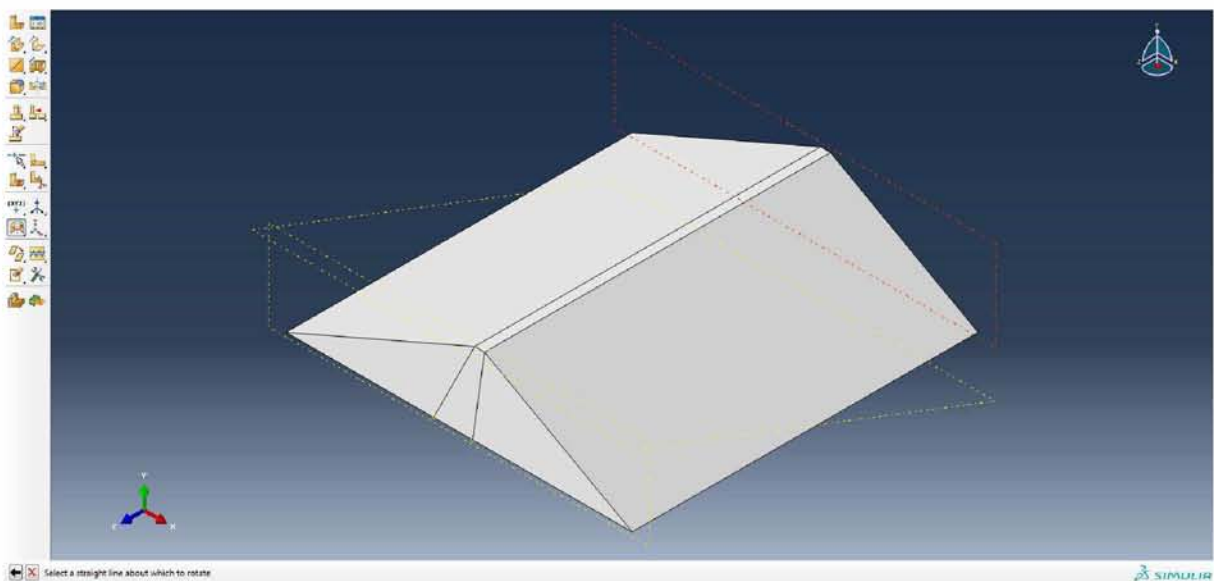
Το φράγμα θα κατασκευαστεί με κλίσεις αντερεισμάτων  $21^\circ$  και  $33^\circ$ , οπότε επιλέγεται η κατάλληλη γωνία περιστροφής ανάλογα με την ευθεία γύρω από την οποία αυτή πραγματοποιείται.

Η κλίση του αντερείσματος που βρίσκεται στην μπροστινή όψη του φράγματος όπως αυτό απεικονίζεται στο παράθυρο (αριστερό αντέρεισμα θέτοντας τη διεύθυνση του άξονα z προς τα αριστερά ή δεξί θέτοντάς την προς τα δεξιά) είναι  $21^\circ$ . Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό εισάγεται στο πλαίσιο του προγράμματος η τιμή 69.



Εικόνα 4.2.38. Εισαγωγή γωνίας περιστροφής.

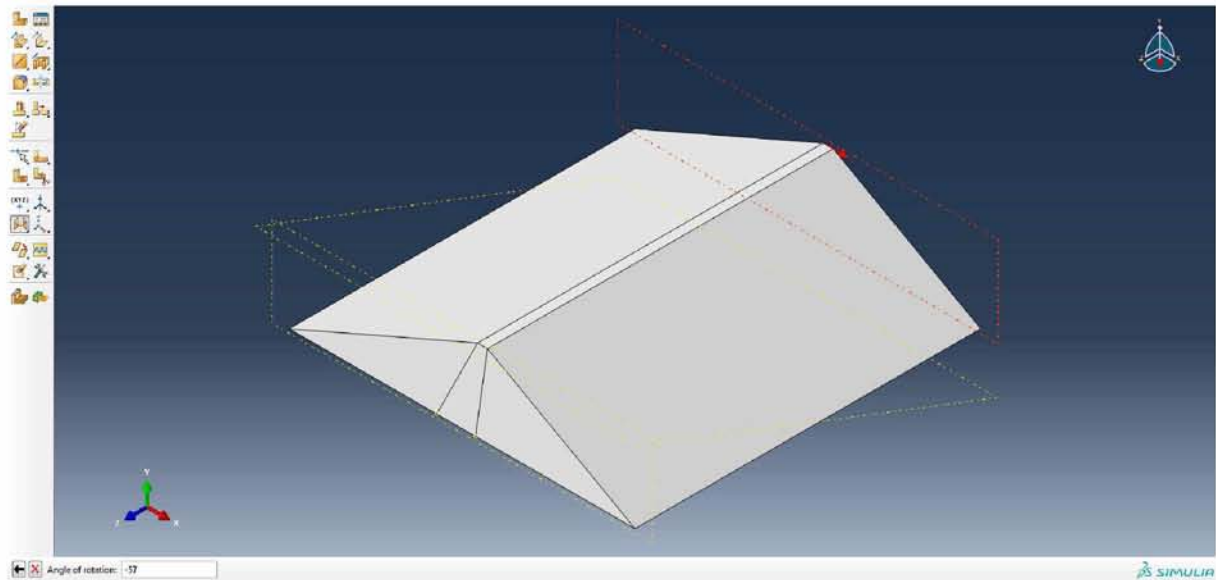
Στη συνέχεια, επιλέγεται το επίπεδο XY της πίσω όψης για να δημιουργηθεί και το βοηθητικό επίπεδο κλίσης του άλλου αντερείσματος.



Εικόνα 4.2.39. Επιλογή υπάρχοντος επιπέδου για τη δημιουργία του δεύτερου επιπέδου κλίσης.

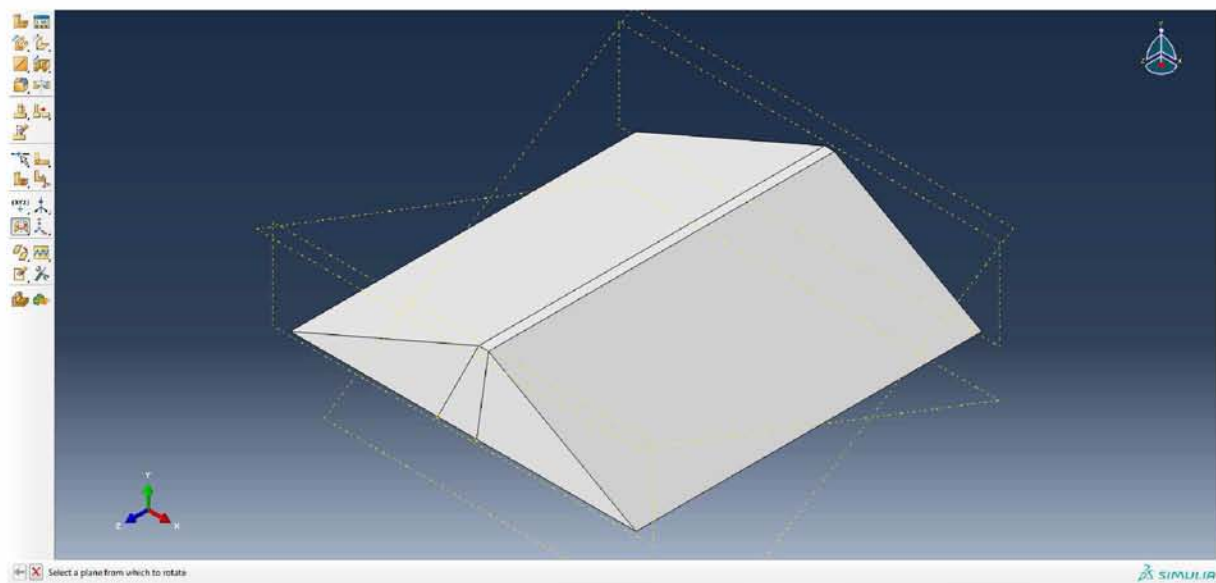
Επιλέγεται το άνω τμήμα της διατομής της πίσω όψης ως ευθεία – οδηγός της περιστροφής και εισάγεται η τιμή  $-57$ , ώστε να επιτευχθεί κλίση αντερείσματος  $33^\circ$ .





Εικόνα 4.2.40. Επιλογή ευθείας και εισαγωγή γωνίας περιστροφής.

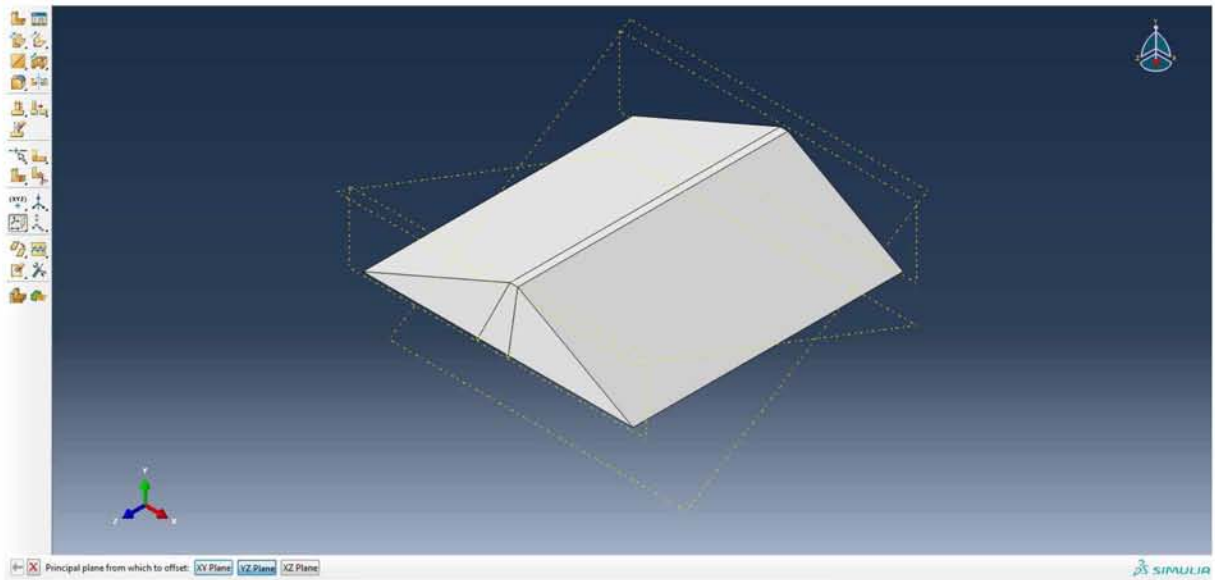
Έχουν δημιουργηθεί έτσι και τα επίπεδα που ορίζουν τις κλίσεις των αντερεισμάτων.



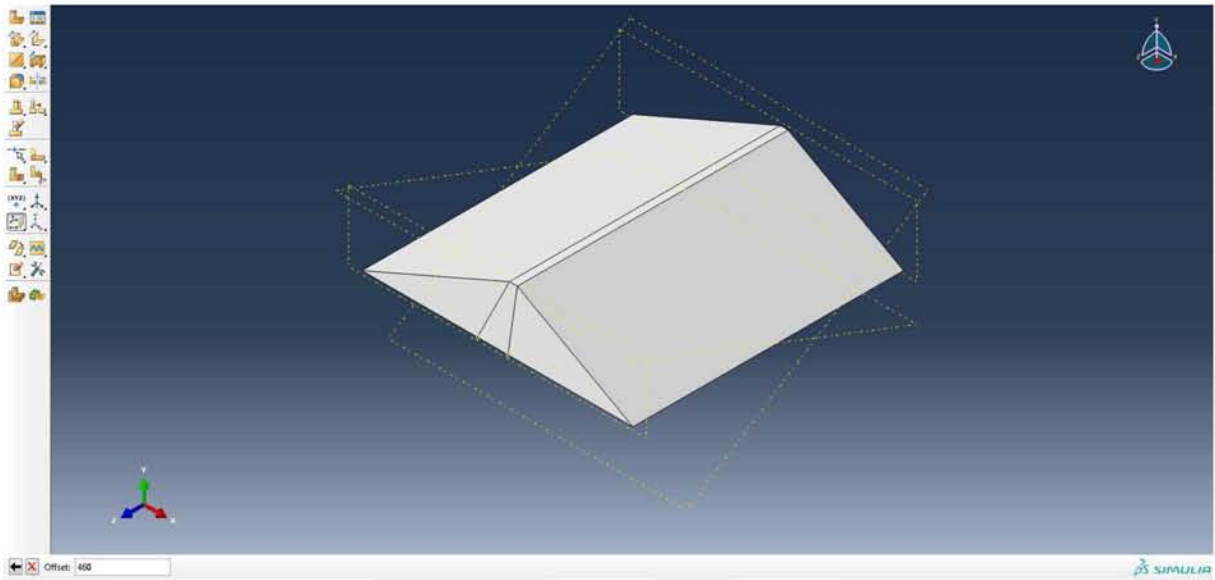
Εικόνα 4.2.41. Απεικόνιση των δημιουργημένων βοηθητικών επιπέδων.

Συνεχίζεται η δημιουργία βοηθητικών επιπέδων με την εντολή **Create Datum Plane: Offset From Principal Plane**. Αυτή τη φορά επιλέγεται **YZ Plane** (επίπεδο YZ) και εισάγεται η τιμή 460 ως απόσταση από το αντίστοιχο κύριο επίπεδο, η οποία αντιστοιχεί στην δεξιά όψη του φράγματος στο παράθυρο προβολής.

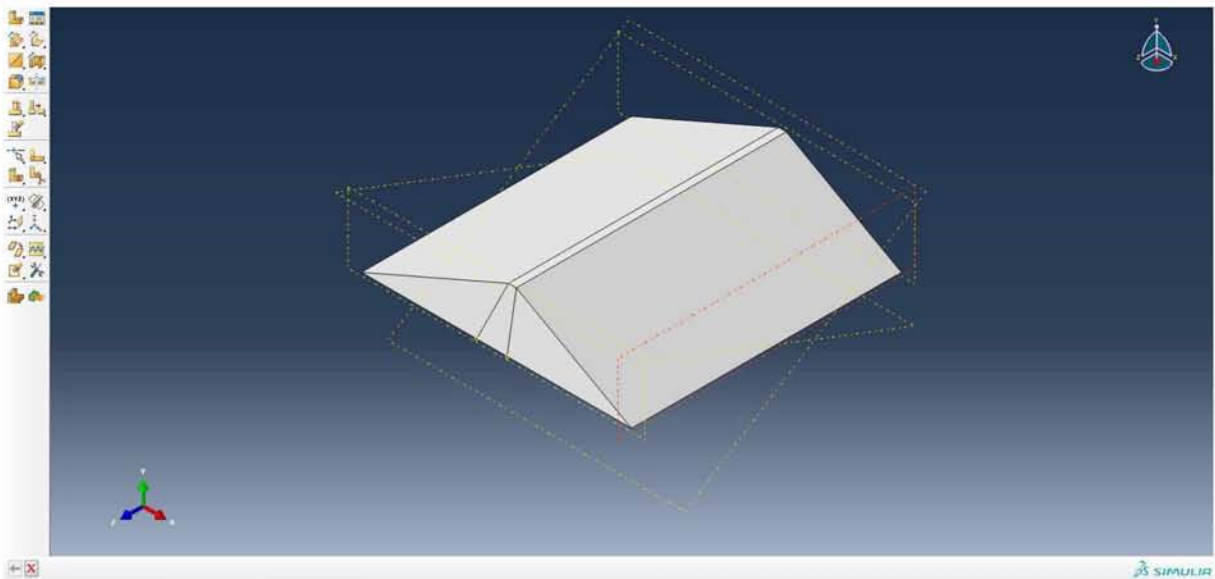




Εικόνα 4.2.42. Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου YZ.

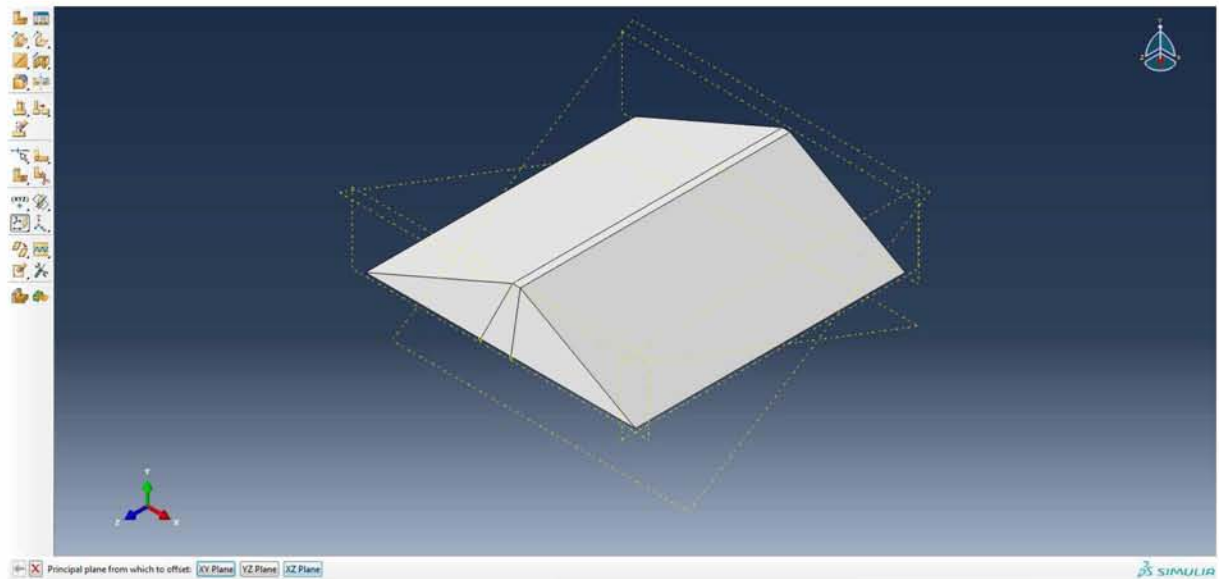


Εικόνα 4.2.43. Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο YZ.

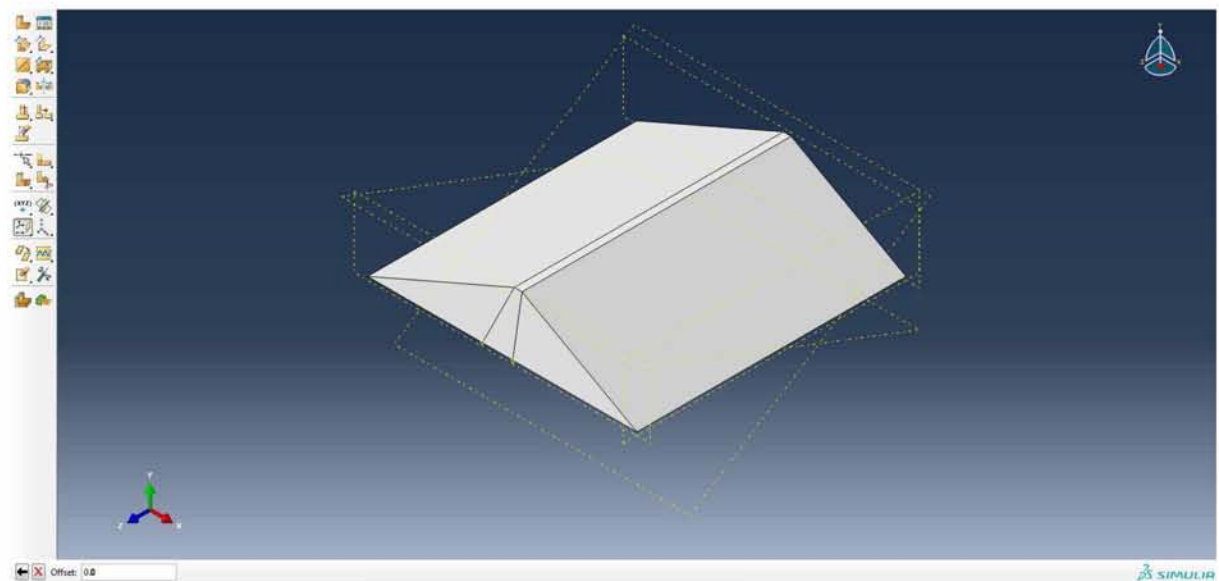


Εικόνα 4.2.44. Απεικόνιση βοηθητικού επιπέδου YZ.

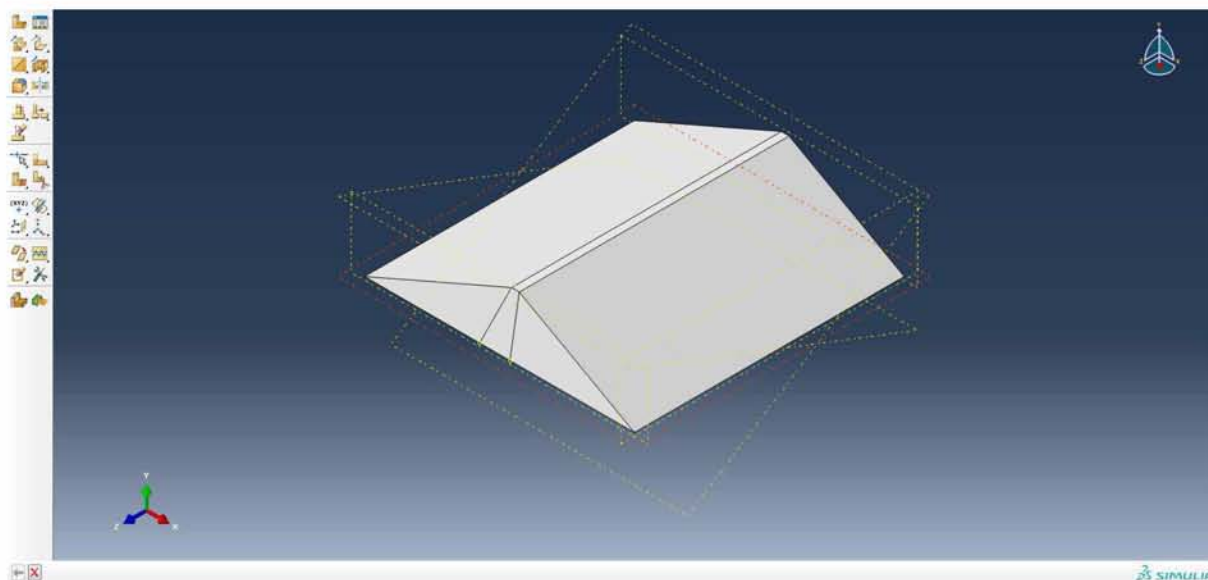
Με παρόμοιο τρόπο επιλέγεται δημιουργία επιπέδου XZ (**XZ Plane**) και στο πλαίσιο ορισμού της απόστασης από το κύριο επίπεδο τίθεται η τιμή 0. Δημιουργείται έτσι ένα βοηθητικό επίπεδο στη βάση του φράγματος.



Εικόνα 4.2.45. Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου XZ.



Εικόνα 4.2.46. Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο XZ.



Εικόνα 4.2.47. Απεικόνιση βοηθητικού επιπέδου XZ.

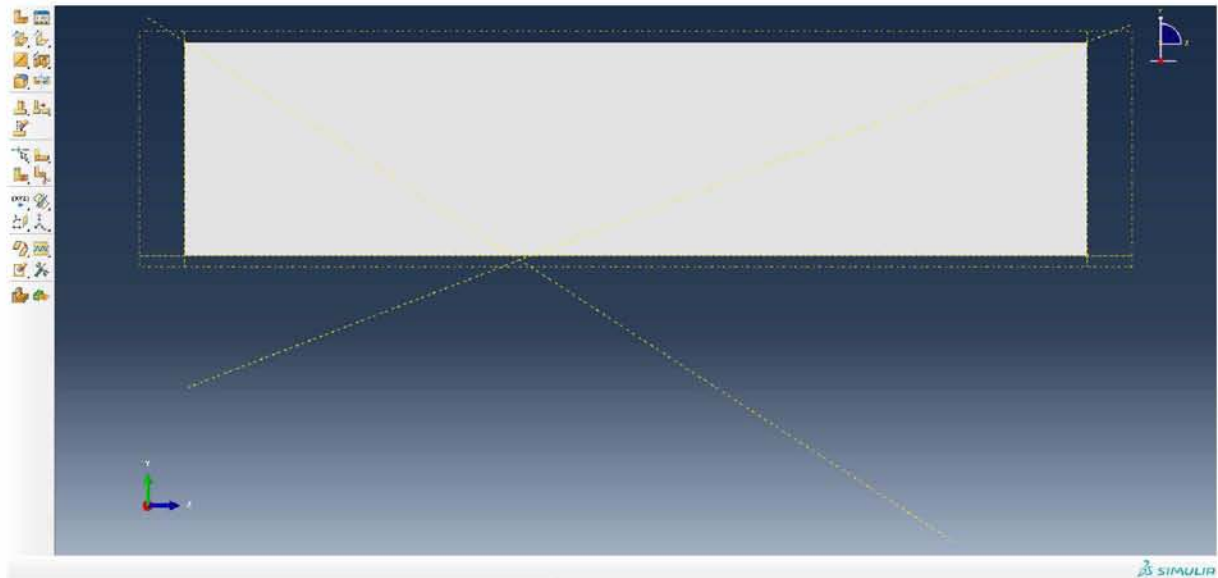
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, θα δημιουργηθούν επίσης βοηθητικοί άξονες στις τομές ορισμένων επιπέδων για διευκόλυνση της διαδικασίας αποκοπής, με την οποία το φράγμα θα λάβει την τελική του μορφή. Από τις γραμμές εργαλείων απεικόνισης κλικάρονται: **Apply Left View** (άξονες Y-Z) και **Turn Perspective Off**.



Εικόνα 4.2.48. Προσαρμογή προβολής για τη δημιουργία βοηθητικών αξόνων.

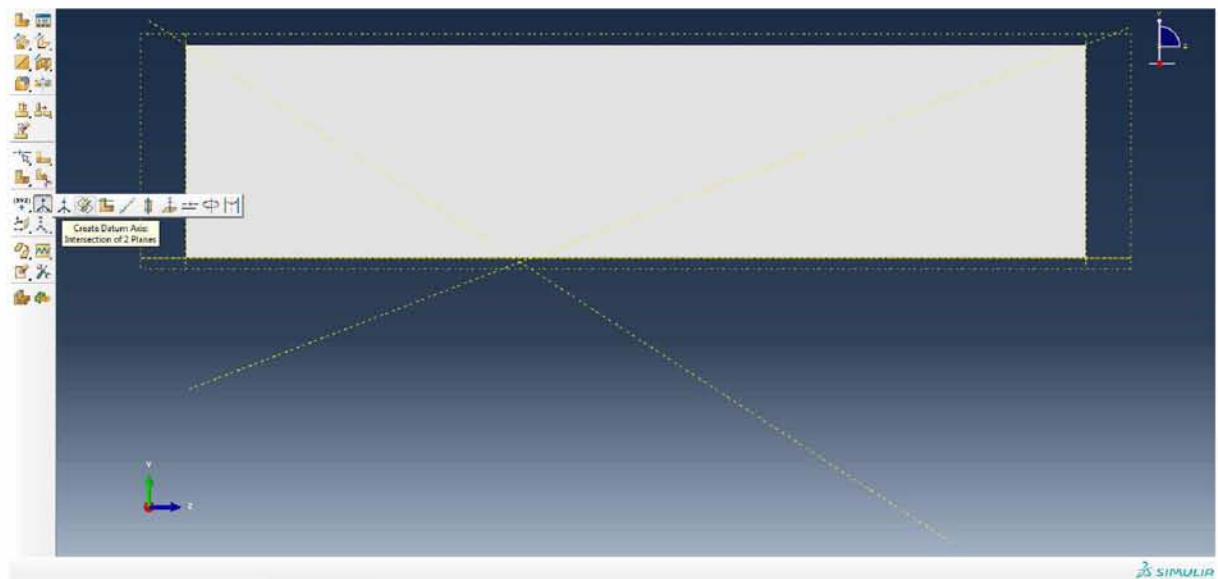


Εικόνα 4.2.49. Προσαρμογή προβολής για τη δημιουργία βοηθητικών αξόνων.



Εικόνα 4.2.50. Προσαρμοσμένη προβολή για την αποκοπή του φράγματος.

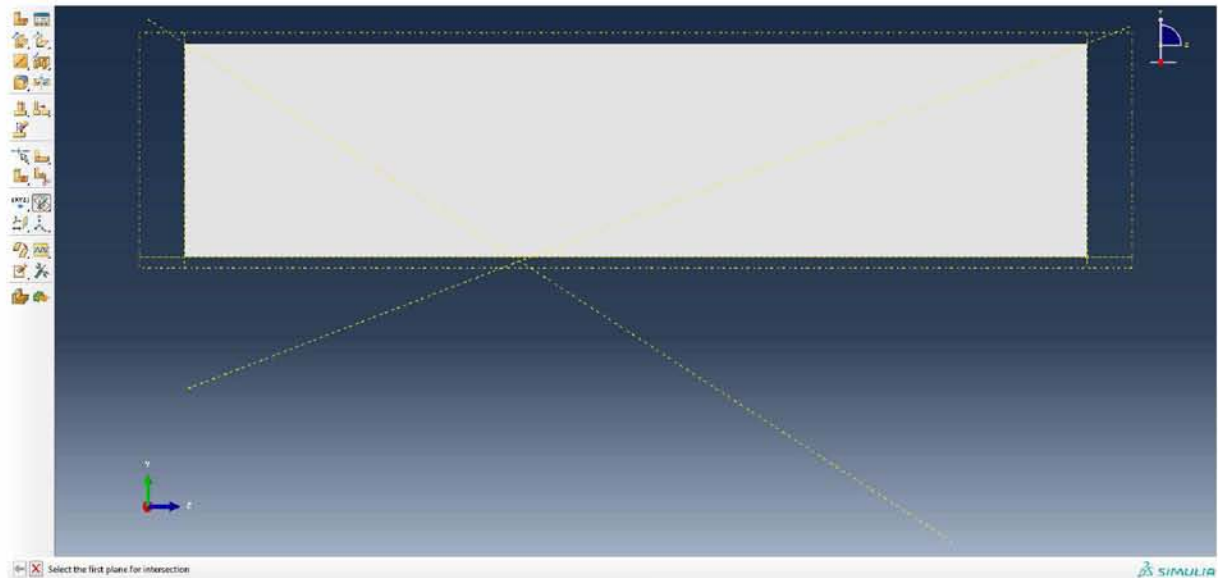
Έχοντας πλέον φέρει το φράγμα στην κατάλληλη (για λόγους ευκολίας επιλογής των επιπέδων) όψη, επιλέγεται η εντολή δημιουργίας άξονα στην τομή 2 επιπέδων (**Create Datum Axis: Intersection of 2 Planes**).



Εικόνα 4.2.51. Εντολή δημιουργίας άξονα στην τομή δύο επιπέδων.

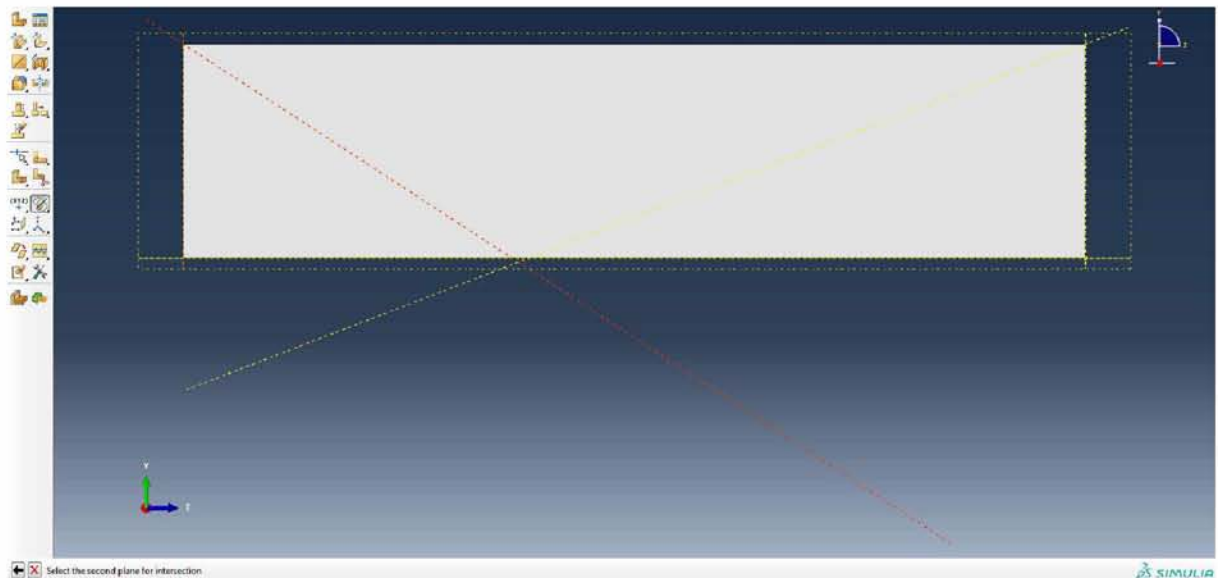
Ζητείται να καθοριστεί το πρώτο επίπεδο.





Εικόνα 4.2.52. Προτροπή επιλογής πρώτου επιπέδου.

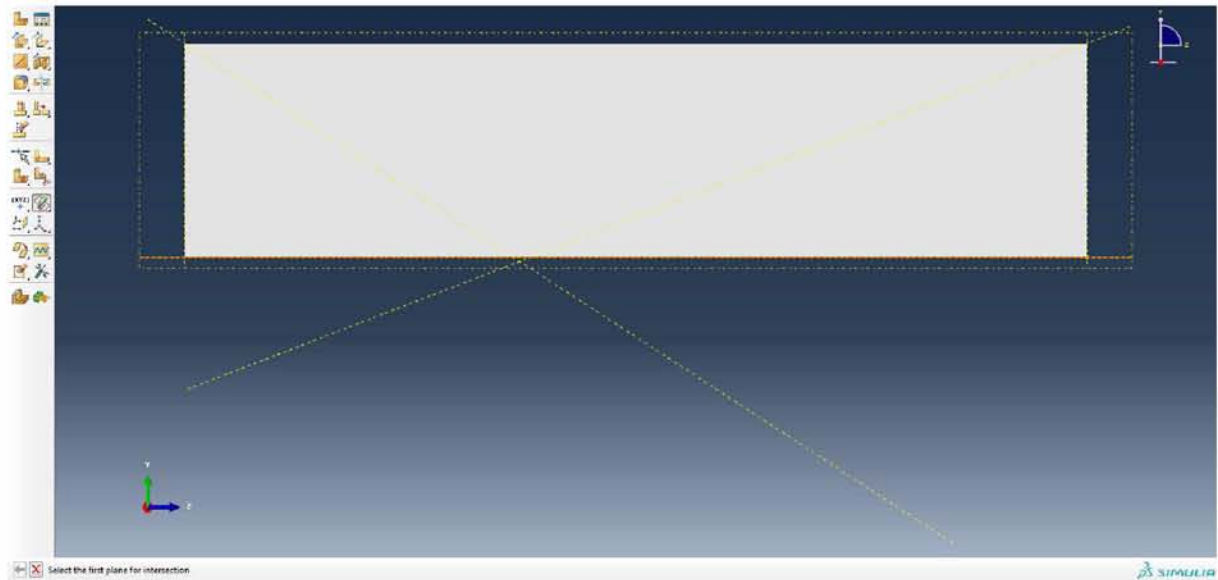
Αφού αυτό επιλεγεί (επίπεδο που ορίζει την κλίση του αριστερού αντερείσματος), ζητείται το δεύτερο επίπεδο, όπως και γίνεται (κατακόρυφο επίπεδο στην αριστερή πλευρά του φράγματος). Έτσι δημιουργείται ο πρώτος βοηθητικός άξονας.



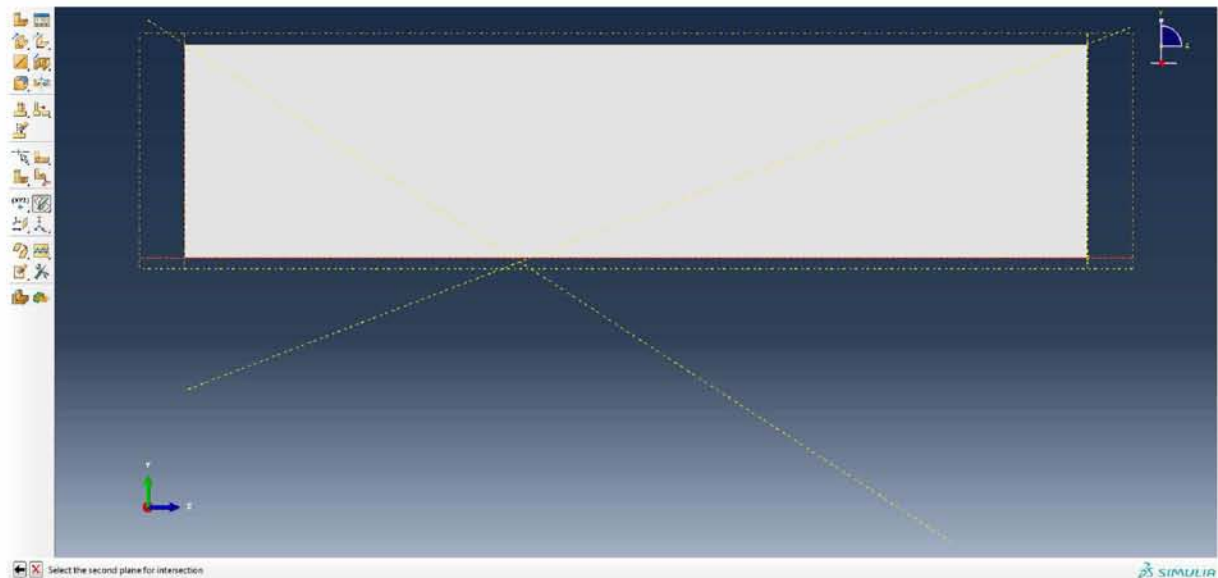
Εικόνα 4.2.53. Επιλογή πρώτου και δεύτερου επιπέδου και δημιουργία πρώτου βοηθητικού άξονα.

Ενώ η ίδια εντολή βρίσκεται σε ισχύ, επιλέγεται ως πρώτο επίπεδο αυτό της βάσης του φράγματος και ως δεύτερο το κατακόρυφο επίπεδο στην αριστερή πλευρά του φράγματος όπως και πριν.



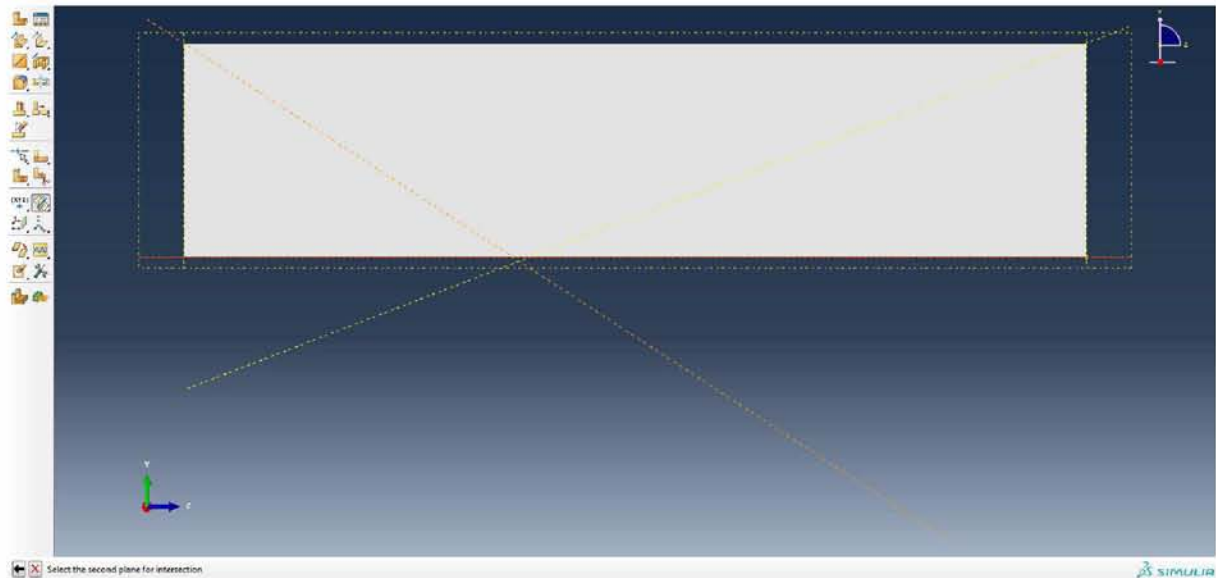


Εικόνα 4.2.54. Επιλογή πρώτου επιπέδου.



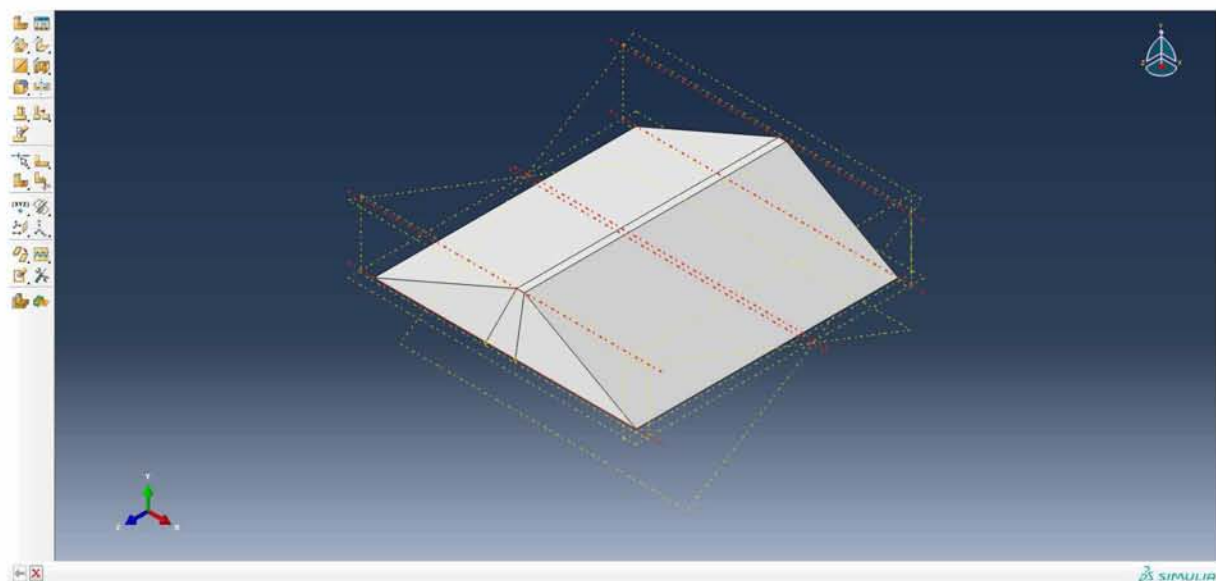
Εικόνα 4.2.55. Επιλογή δεύτερου επιπέδου και δημιουργία δεύτερου βοηθητικού άξονα.

Για τη δημιουργία του επόμενου βοηθητικού άξονα, επιλέγεται το επίπεδο της βάσης και το επίπεδο κλίσης του αριστερού αντερείσματος.



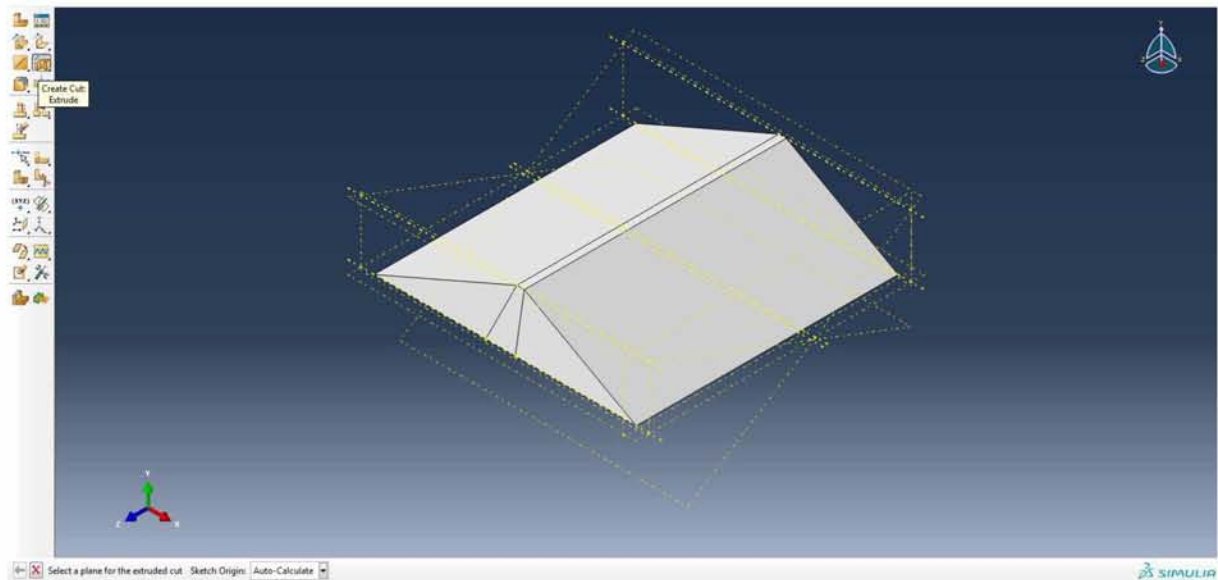
Εικόνα 4.2.56. Επιλογή επιπέδων και δημιουργία τρίτου βοηθητικού άξονα.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία δημιουργούνται 3 επιπλέον άξονες στη δεξιά πλευρά του φράγματος. Έχουν δημιουργηθεί έτσι 6 συνολικά βοηθητικοί άξονες.



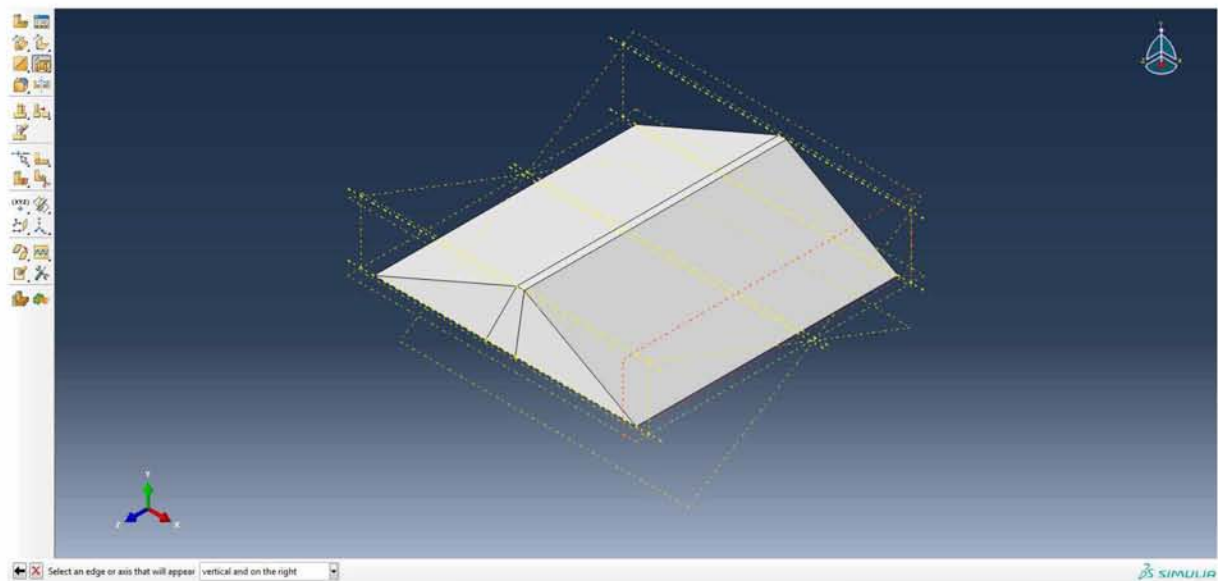
Εικόνα 4.2.57. Συνολική απεικόνιση των δημιουργημένων βοηθητικών επιπέδων και αξόνων.

Ξεκινά πλέον η διαδικασία της αποκοπής. Επιλέγεται **Create Cut: Extrude** και ζητείται το επίπεδο κάθετα στο οποίο θα γίνει η αποκοπή.



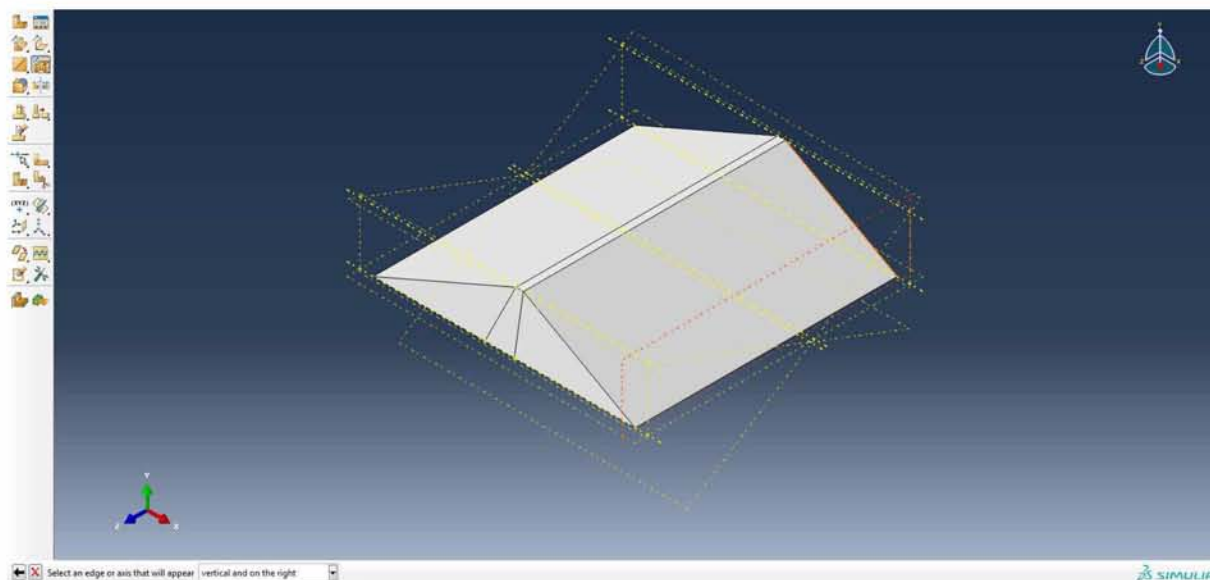
Εικόνα 4.2.58. Εντολή αποκοπής φράγματος.

Επιλέγεται το κατακόρυφο επίπεδο στην δεξιά όψη του φράγματος και ζητείται να προσδιοριστεί μια ακμή ή ευθεία σύμφωνα με την οποία το πρόγραμμα θα εμφανίσει το φράγμα στην κατάλληλη όψη για την αποκοπή.



Εικόνα 4.2.59. Επιλογή επιπέδου αποκοπής φράγματος.

Επιλέγεται η ζητούμενη ευθεία και στη συνέχεια **Apply Left View (Y-Z)**.

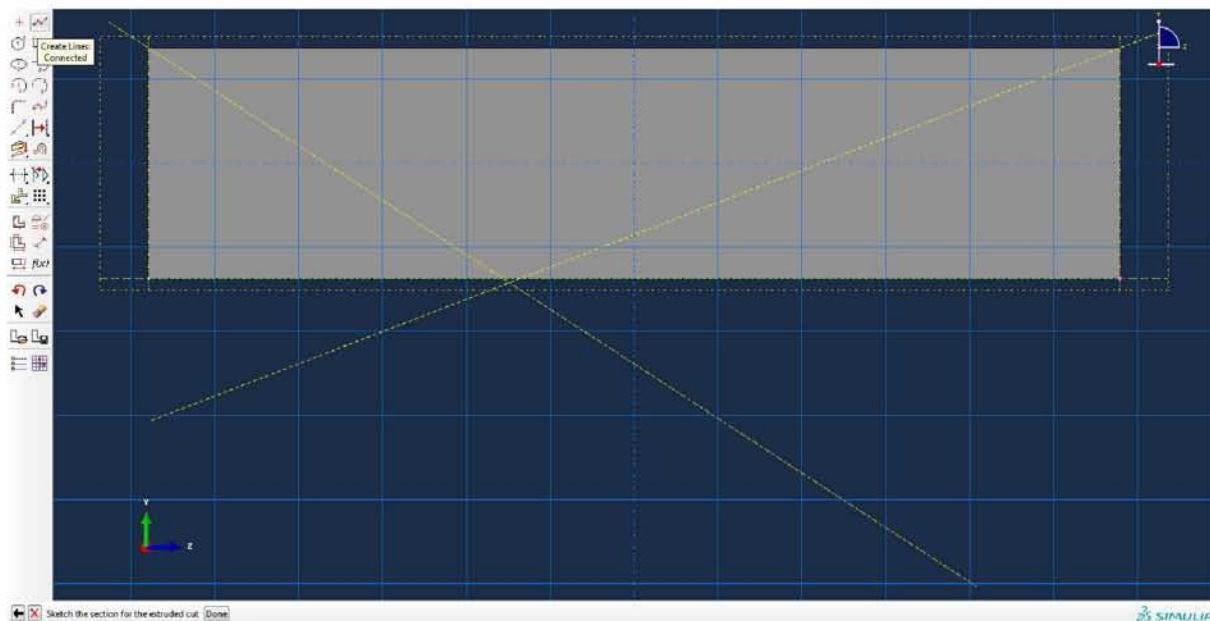


Εικόνα 4.2.60. Επιλογή ευθείας για προβολή του προς αποκοπή τμήματος.



Εικόνα 4.2.61. Προσαρμογή προβολής για την αποκοπή του φράγματος.

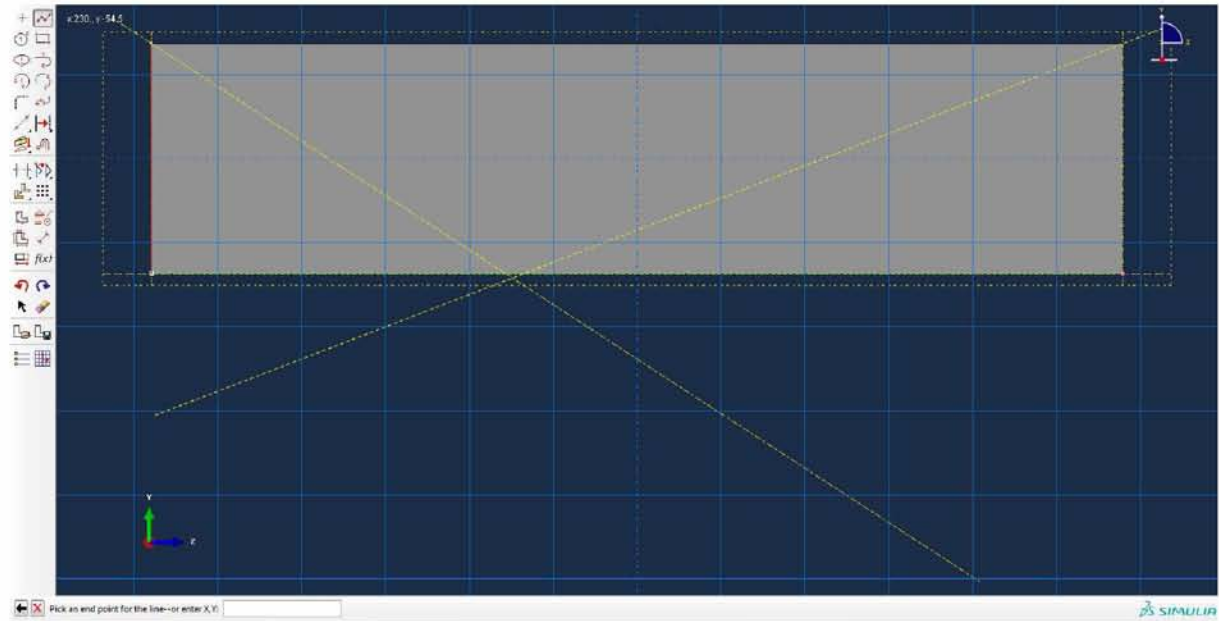
Κλικάρεται **Create Lines: Connected** και δημιουργούνται δύο τρίγωνα, ένα αριστερά και ένα δεξιά, σύμφωνα με τα οποία θα αποκοπεί το φράγμα. Η ακριβής επιλογή των σημείων της γεωμετρίας που ορίζουν τα τρίγωνα είναι εύκολη πλέον λόγω των βοηθητικών αξόνων που δημιουργήθηκαν κάθετα στο επίπεδο προβολής.



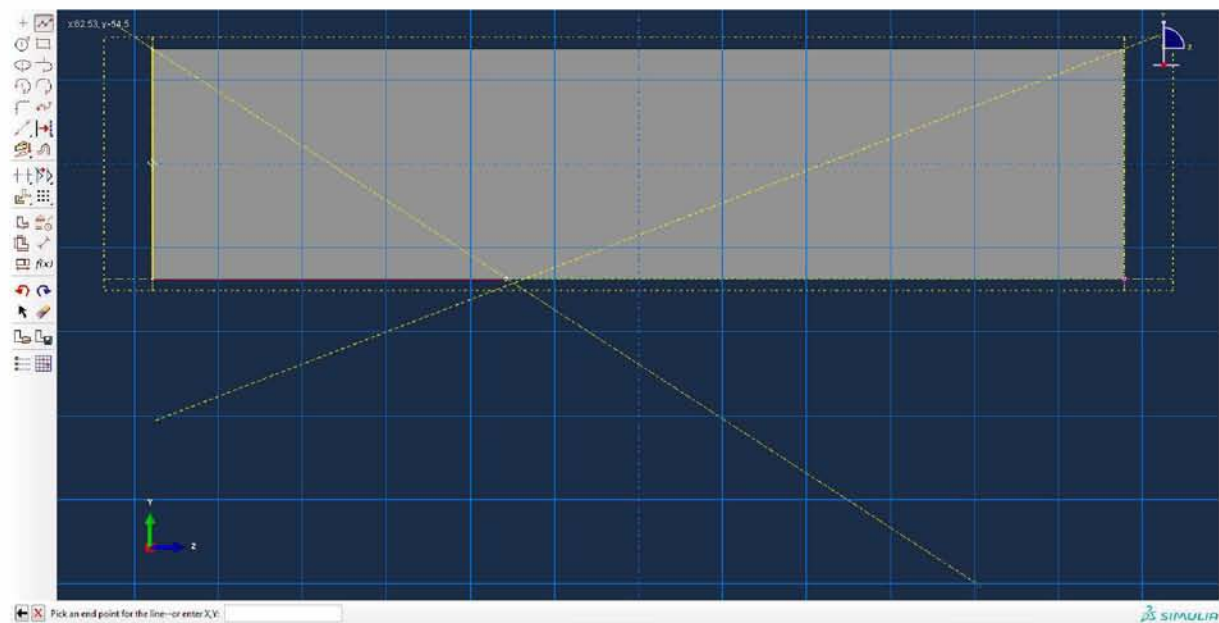
Εικόνα 4.2.62. Εντολή δημιουργίας γραμμών για τον σχεδιασμό των τμημάτων αποκοπής.



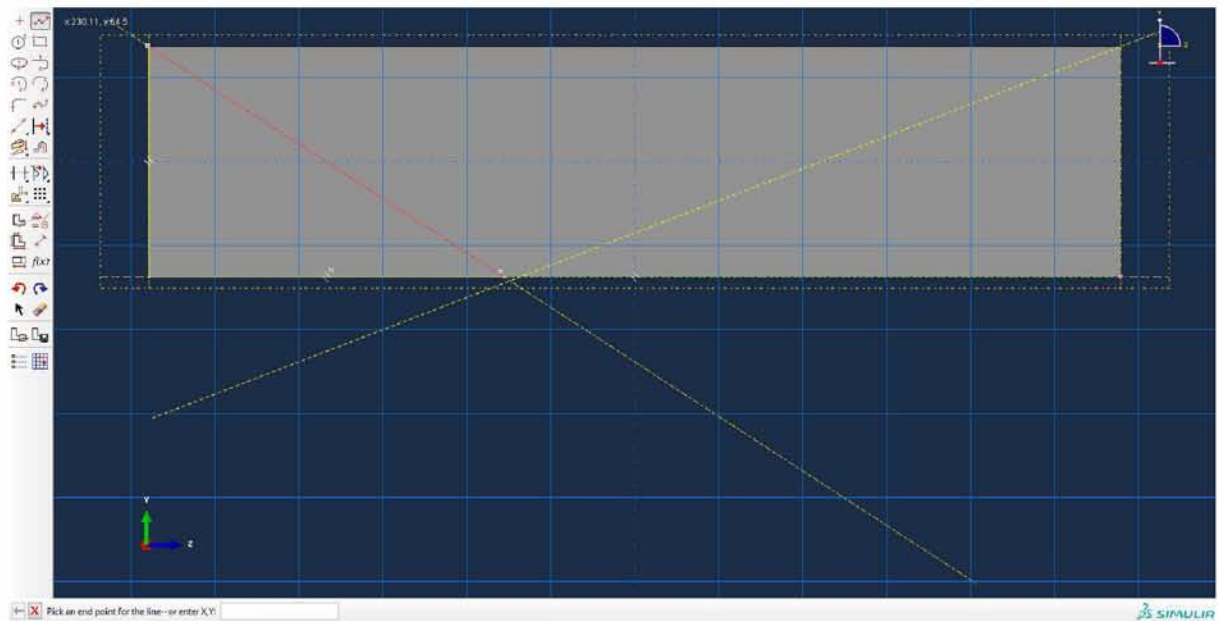
Σχεδιάζεται το αριστερό τρίγωνο αποκοπής.



Εικόνα 4.2.63. Σχεδιασμός πρώτης γραμμής αριστερού τριγώνου αποκοπής.

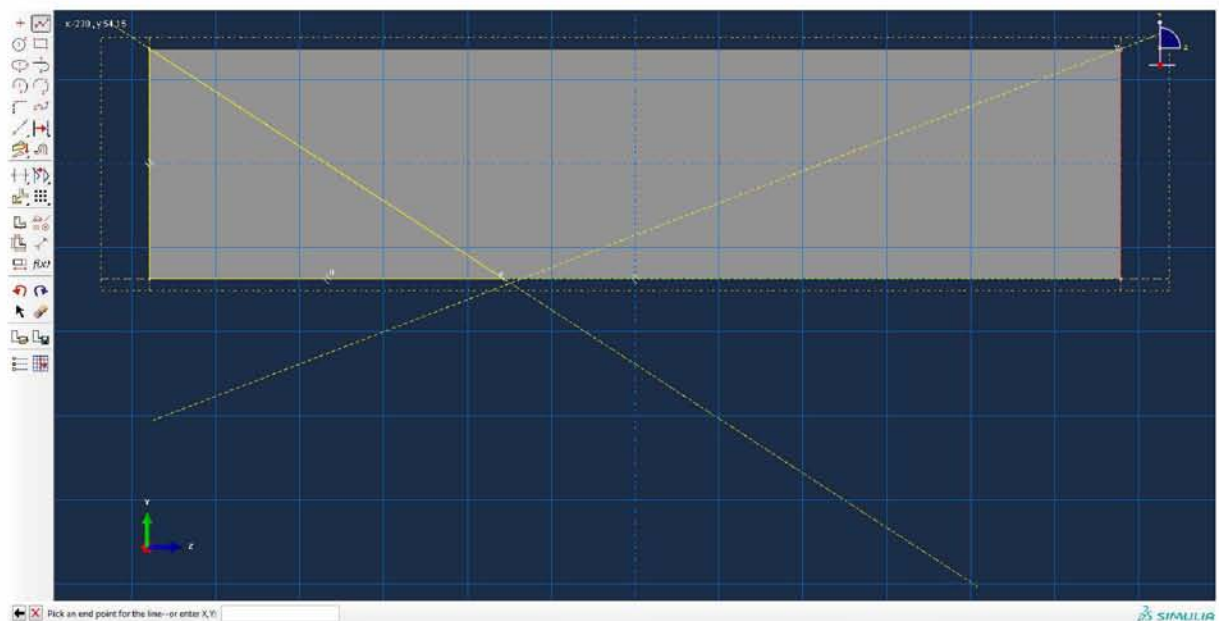


Εικόνα 4.2.64. Σχεδιασμός δεύτερης γραμμής αριστερού τριγώνου αποκοπής.

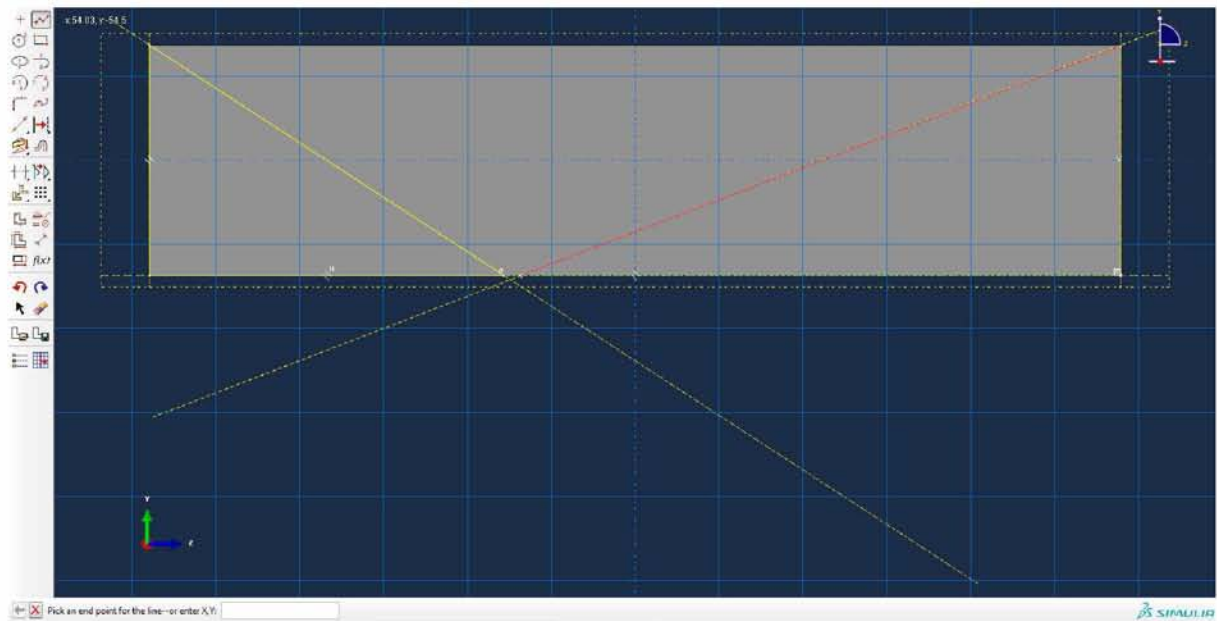


Εικόνα 4.2.65. Σχεδιασμός τρίτης γραμμής αριστερού τριγώνου αποκοπής.

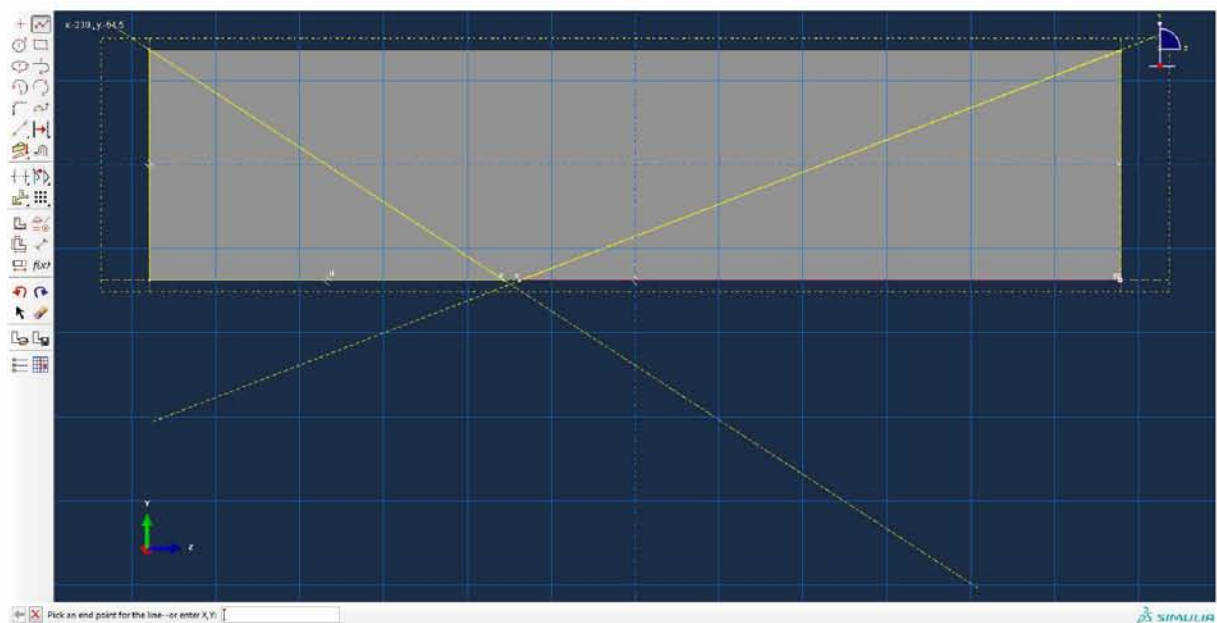
Σχεδιάζεται το δεξί τρίγωνο αποκοπής.



Εικόνα 4.2.66. Σχεδιασμός πρώτης γραμμής δεξιού τριγώνου αποκοπής.

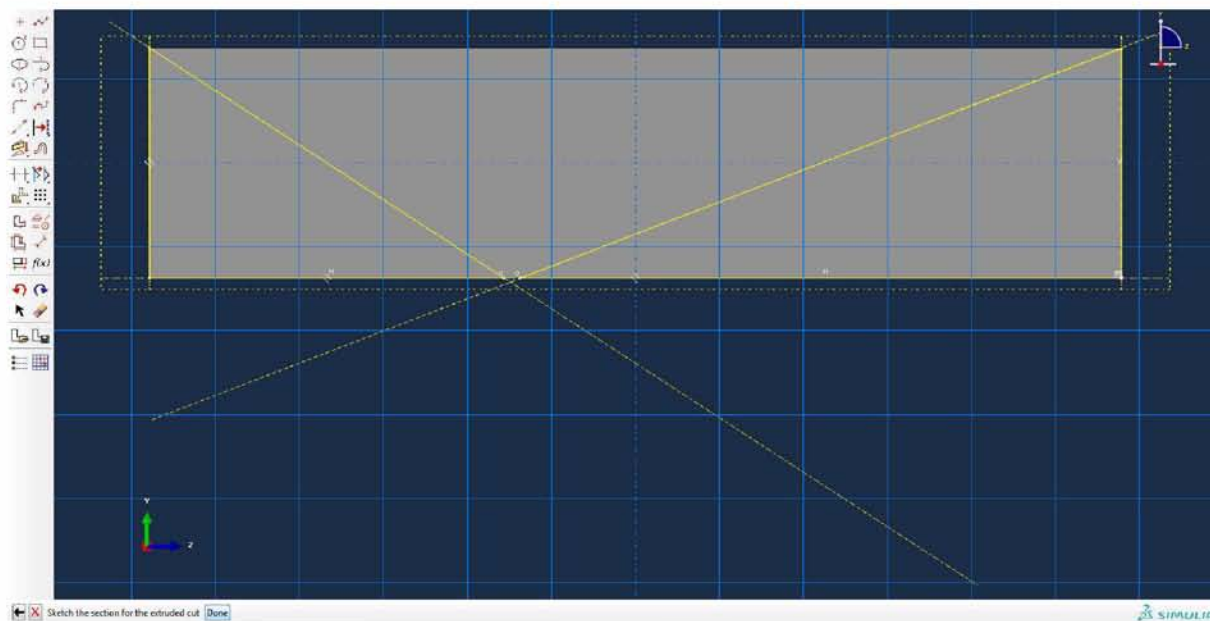


Εικόνα 4.2.67. Σχεδιασμός δεύτερης γραμμής δεξιού τριγώνου αποκοπής.



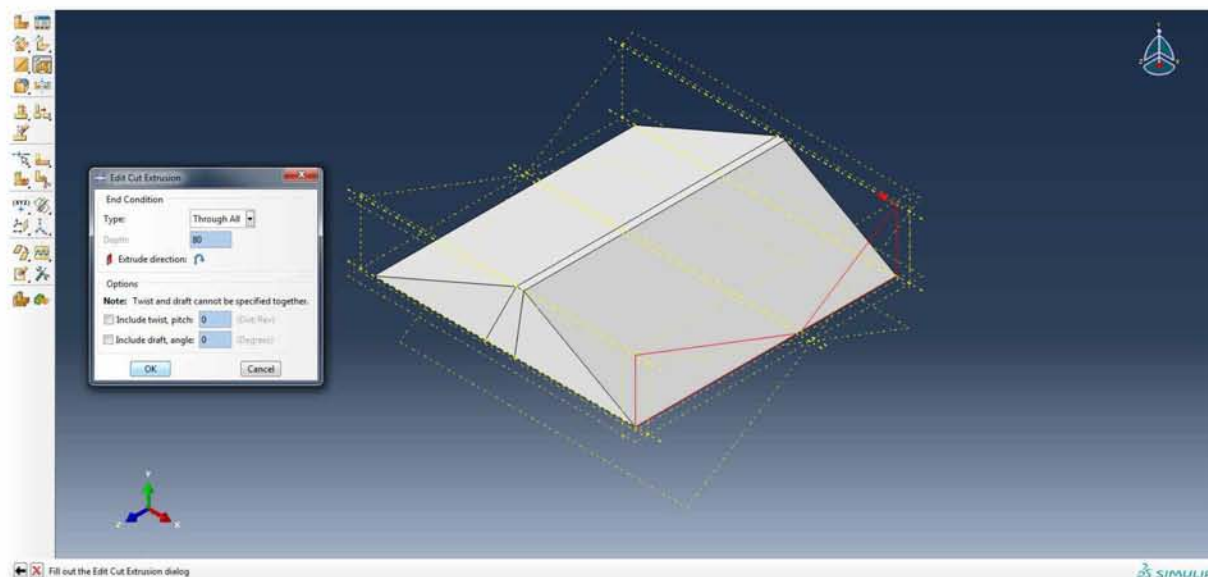
Εικόνα 4.2.68. Σχεδιασμός τρίτης γραμμής δεξιού τριγώνου αποκοπής.

Έχοντας ολοκληρώσει τον σχεδιασμό, κλικάρεται **Done**.



Εικόνα 4.2.69. Ολοκλήρωση σχεδιασμού τμημάτων αποκοπής του φράγματος.

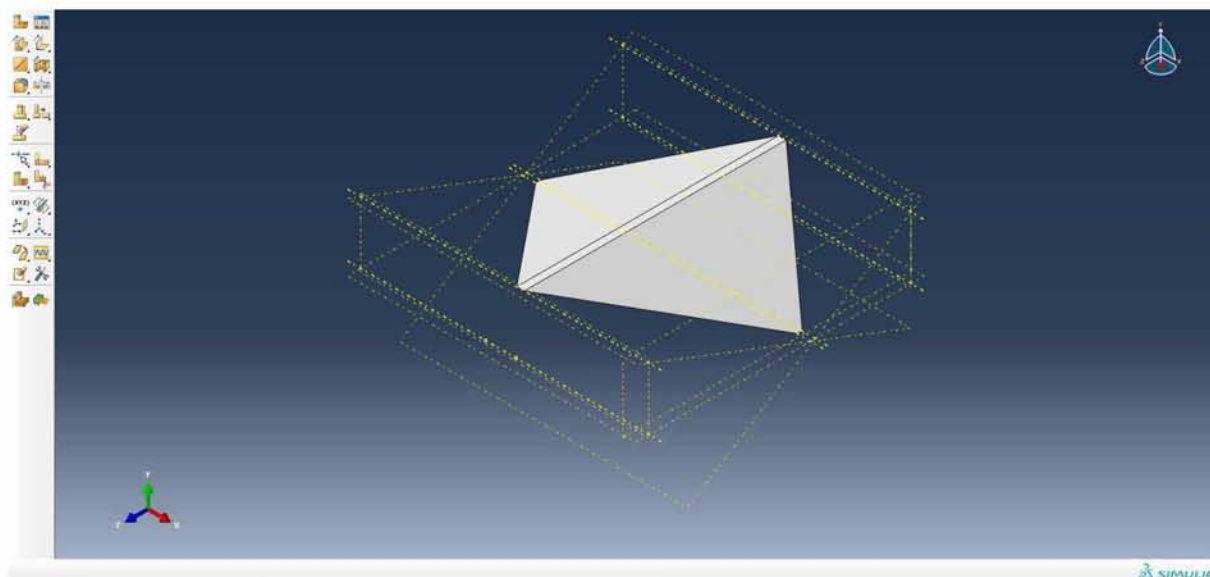
Στο παράθυρο **Edit Cut Extrusion** που εμφανίζεται, επιλέγεται στον τύπο αποκοπής (**Type**) **Through All**, ώστε αυτή να πραγματοποιηθεί σε ολόκληρο το μήκος της τρίτης διάστασης του φράγματος, της κάθετης στο επίπεδο αποκοπής. Παρατηρώντας το βελάκι στο παράθυρο προβολής επαληθεύεται ότι η κατεύθυνση της αποκοπής (**Extrude direction**) είναι η επιθυμητή και πιέζεται **OK**.



Εικόνα 4.2.70. Πρόσθετες επιλογές αποκοπής.

Προκύπτει έτσι η τελική διατομή του φράγματος.

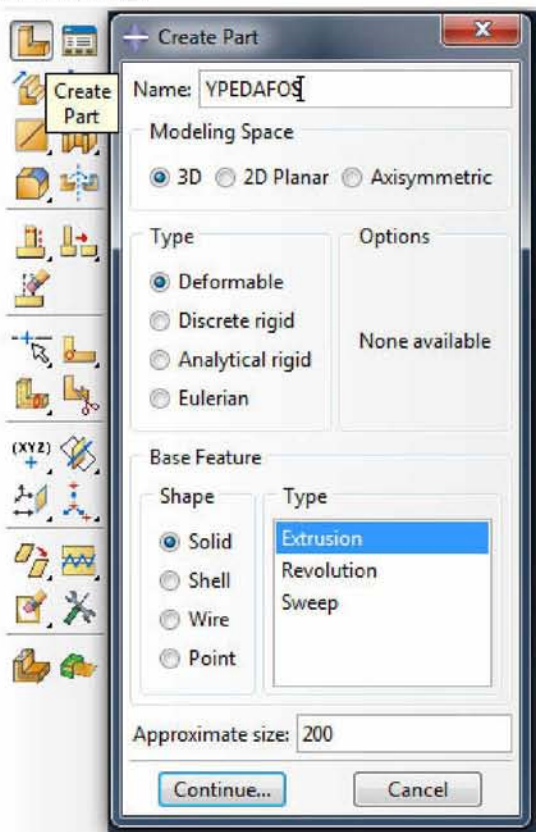




Εικόνα 4.2.71. Τελική διατομή φράγματος.

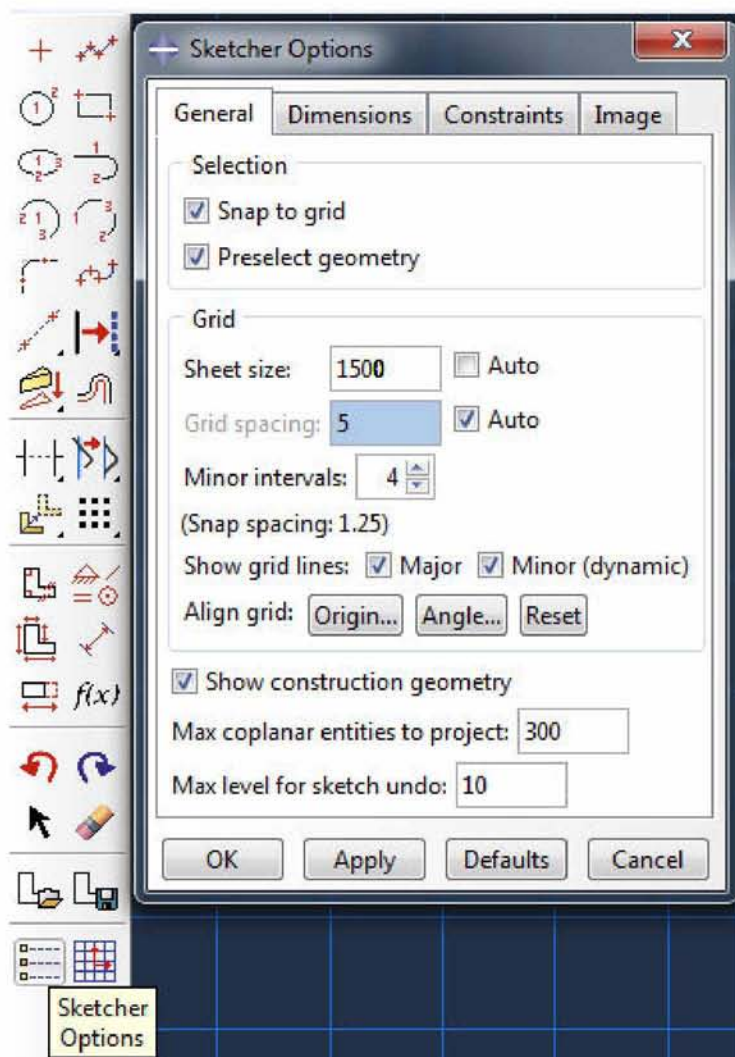
## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Από τη γραμμή εργαλείων ενότητας επιλέγεται και πάλι η εντολή **Create Part**. Στο εμφανιζόμενο παράθυρο ονομάζεται το συγκεκριμένο τμήμα (name), επιλέγεται χώρος μοντελοποίησης (**Modeling Space**) τρισδιάστατος (**3D**), τύπος σώματος (**Type**) παραμορφώσιμο (**Deformable**), μορφή σώματος (**Shape**) συμπαγής (**Solid**) και τύπος δημιουργίας προεκβολή (**Extrusion**).



Εικόνα 4.2.72. Δημιουργία τμήματος υπεδάφους.

Επιλέγεται η εντολή **Sketcher Options** και στο μέγεθος καννάβου (**Sheet size**) εισάγεται η τιμή 1500 προκειμένου να επαρκεί το μέγεθός του για τη σχεδίαση και κλικάρεται **Apply** και **OK**.

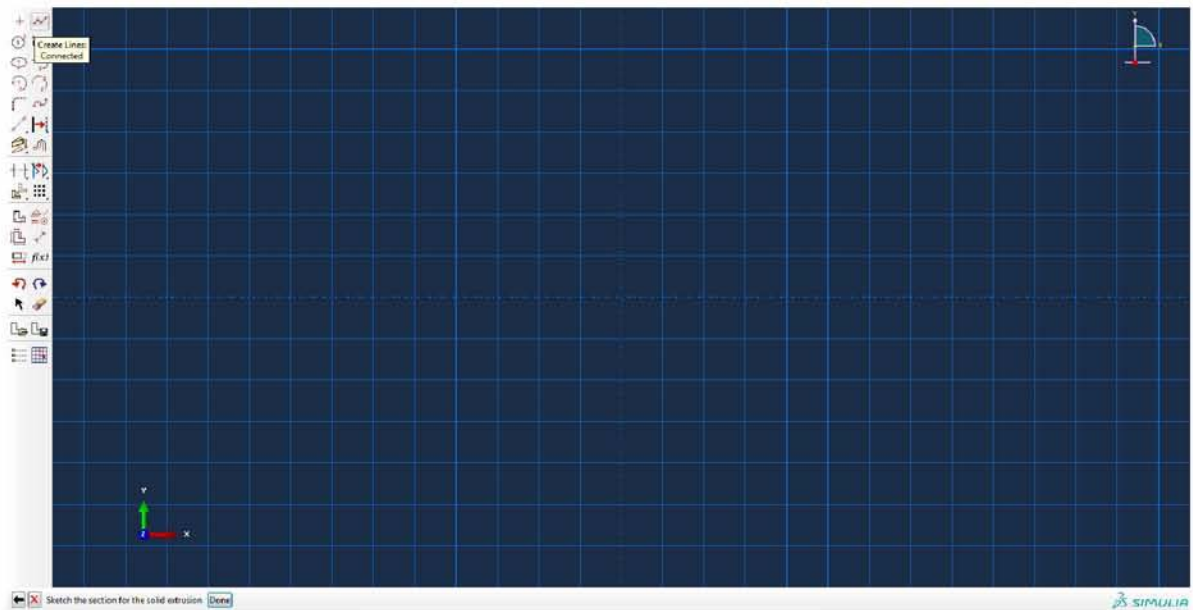


Εικόνα 4.2.73. Προσαρμογή μεγέθους καννάβου σχεδίασης.

Το υπεδάφος θεωρήθηκε ότι εκτείνεται 100m αριστερά και άλλα τόσα δεξιά του φράγματος στην κάθε οριζόντια διεύθυνση X και Z, ενώ σαν ύψος του τέθηκαν τα 150m. Οι συνολικές διαστάσεις του υπεδάφους θα είναι, λοιπόν, 660m, 660m και 150m για το μήκος, το πλάτος και το ύψος του αντίστοιχα.

Επιλέγεται η εντολή **Create Lines: Connected** και εισάγονται οι συντεταγμένες (X,Y) των σημείων που ορίζουν τη γεωμετρία του υπεδάφους:  
(-100,-150) , (-100,0) , (560,0) , (560, -150).

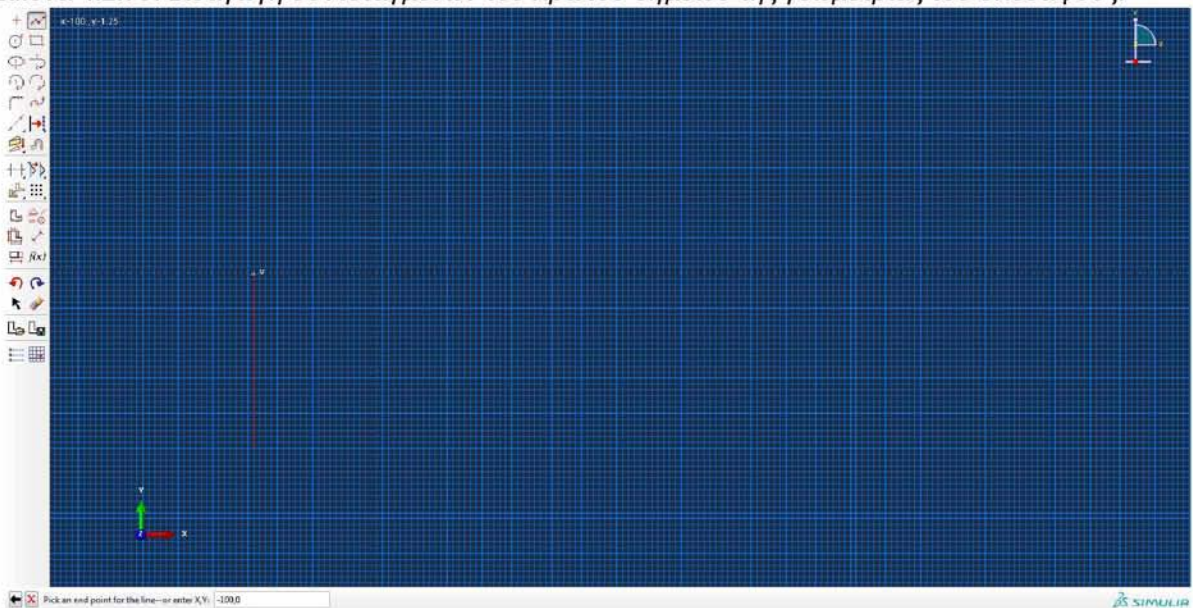




Εικόνα 4.2.74. Εκκίνηση σχεδιασμού γεωμετρίας υπεδάφους.



Εικόνα 4.2.75. Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

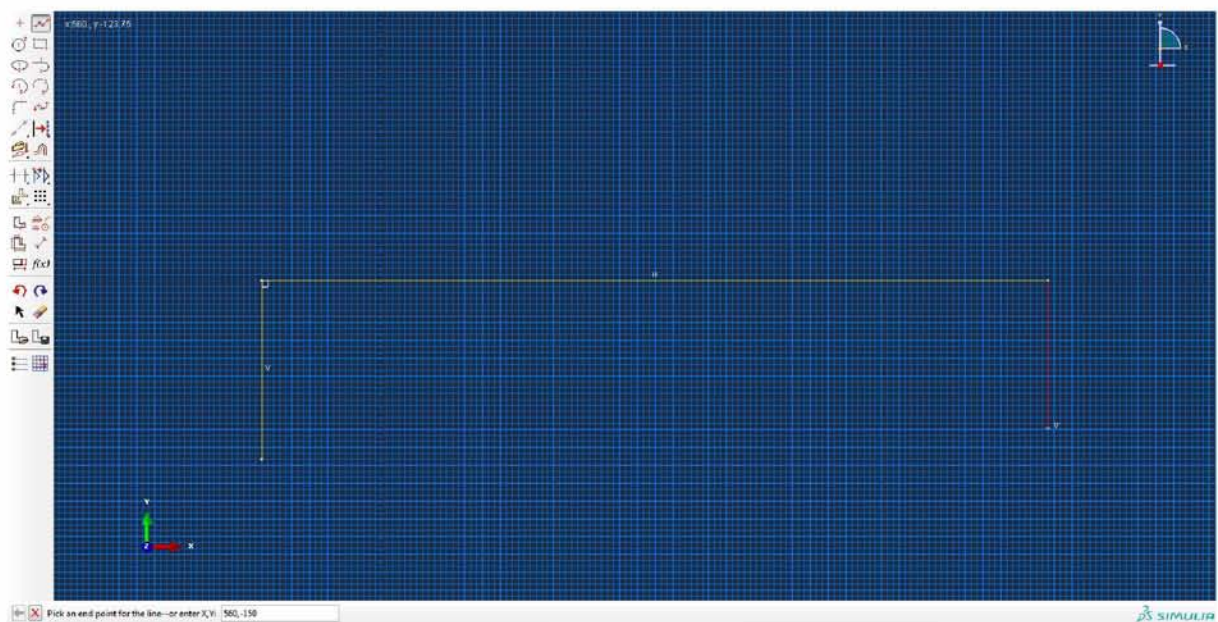


Εικόνα 4.2.76. Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.





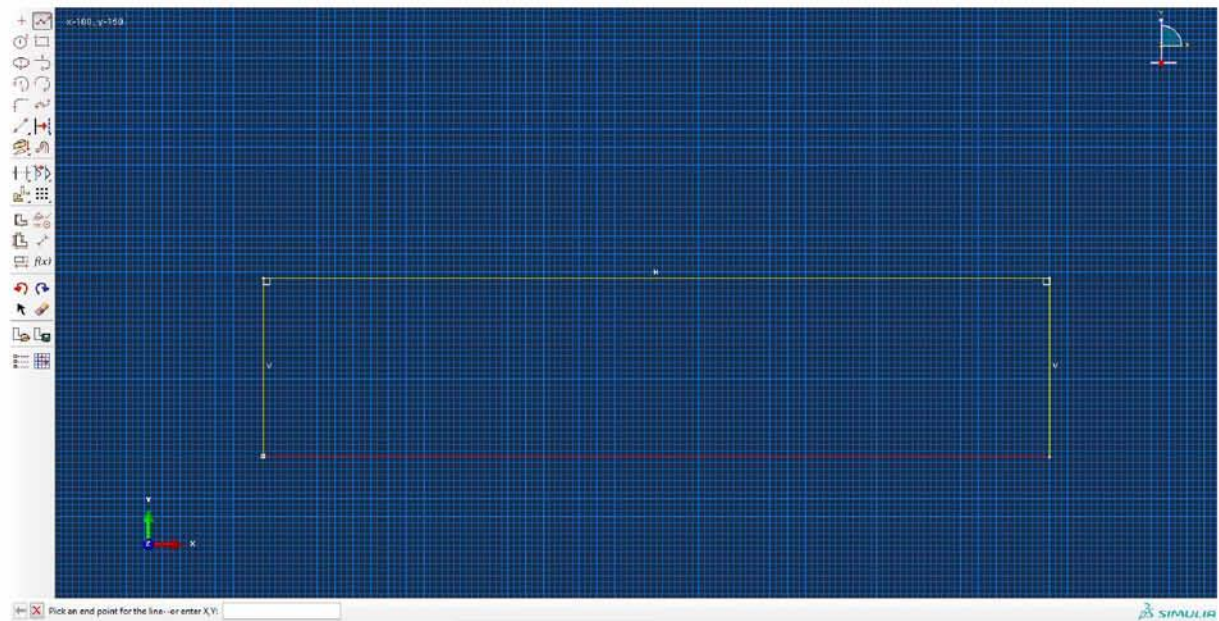
Εικόνα 4.2.77. Εισαγωγή συντεταγμένων του τρίτου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.



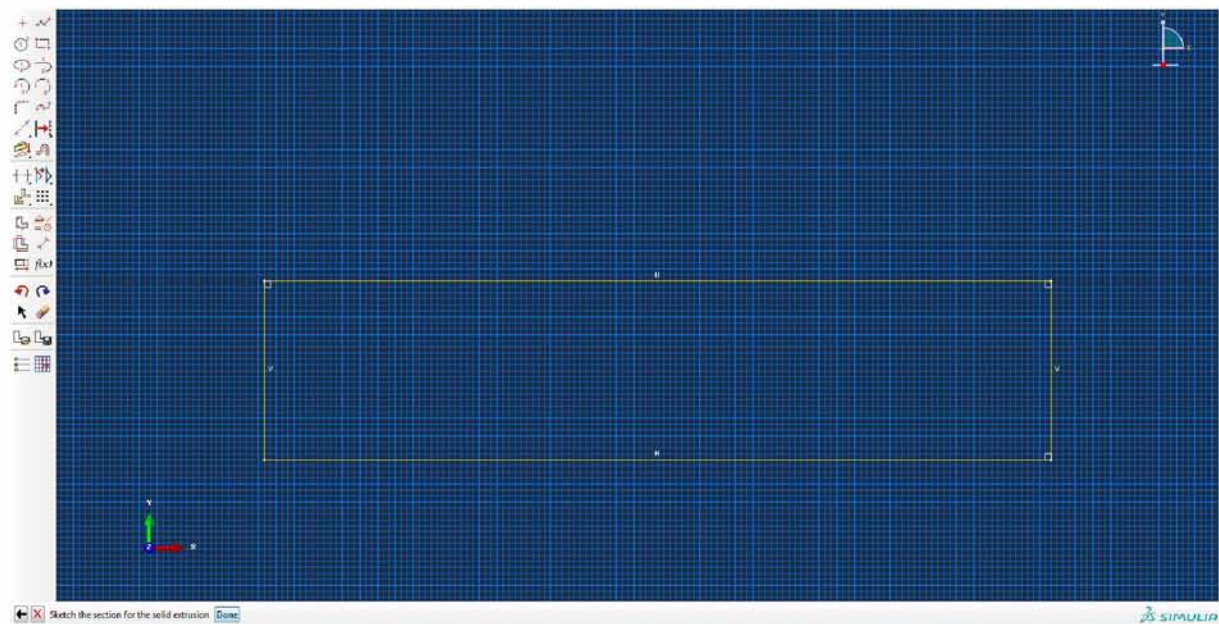
Εικόνα 4.2.78. Εισαγωγή συντεταγμένων του τέταρτου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.

Κλικάρεται, τέλος, το αρχικό σημείο της γεωμετρίας ή επαναεισάγονται οι συντεταγμένες του και από τη γραμμή προτροπής επιλέγεται **Done**.



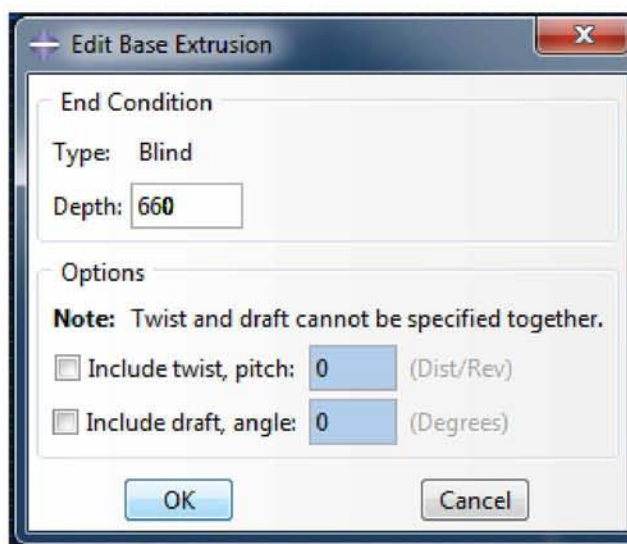


Εικόνα 4.2.79. Επιλογή του τελευταίου σημείου της γεωμετρίας του υπεδάφους.



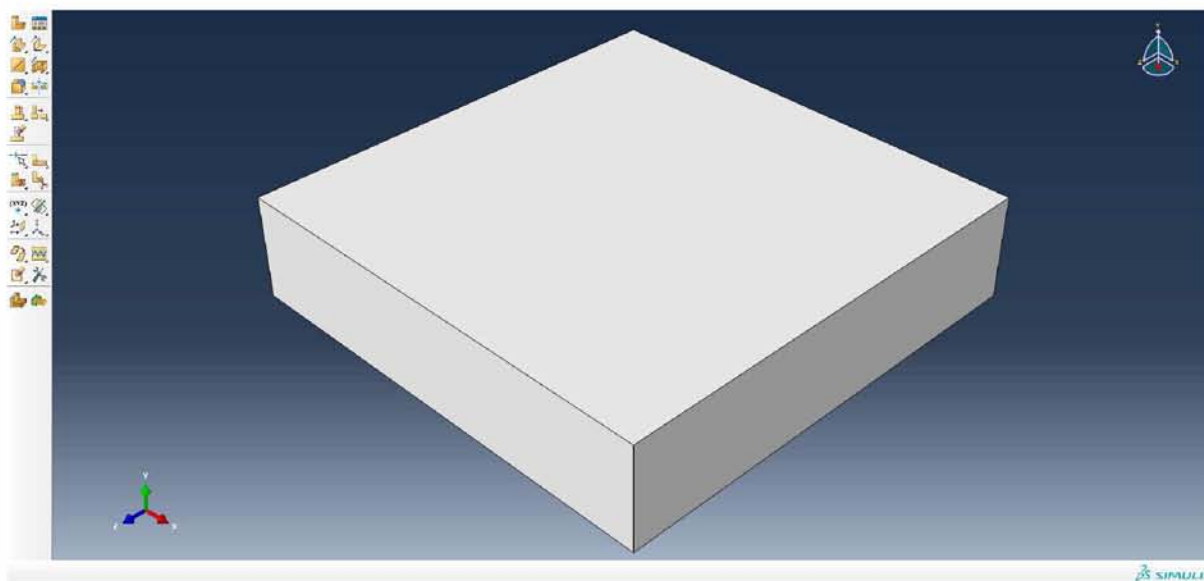
Εικόνα 4.2.80. Ολοκληρωμένη γεωμετρία διατομής υπεδάφους σε δύο διαστάσεις.

Στο παράθυρο που εμφανίζεται εισάγεται η τιμή της τρίτης διάστασης του υπεδάφους (660) και πιέζεται **OK**.



Εικόνα 4.2.81. Εισαγωγή τρίτης διάστασης γεωμετρίας υπεδάφους.

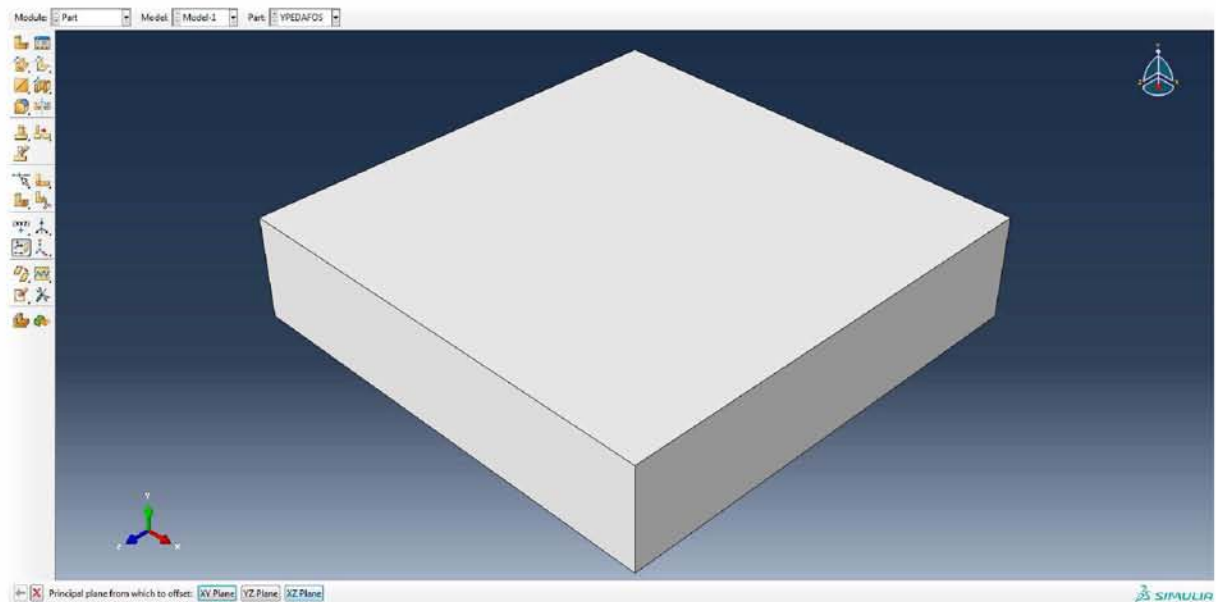
Φαίνεται στο παράθυρο προβολής το σώμα του υπεδάφους ολοκληρωμένο.



Εικόνα 4.2.82. Γεωμετρία διατομής υπεδάφους στις τρεις διαστάσεις.

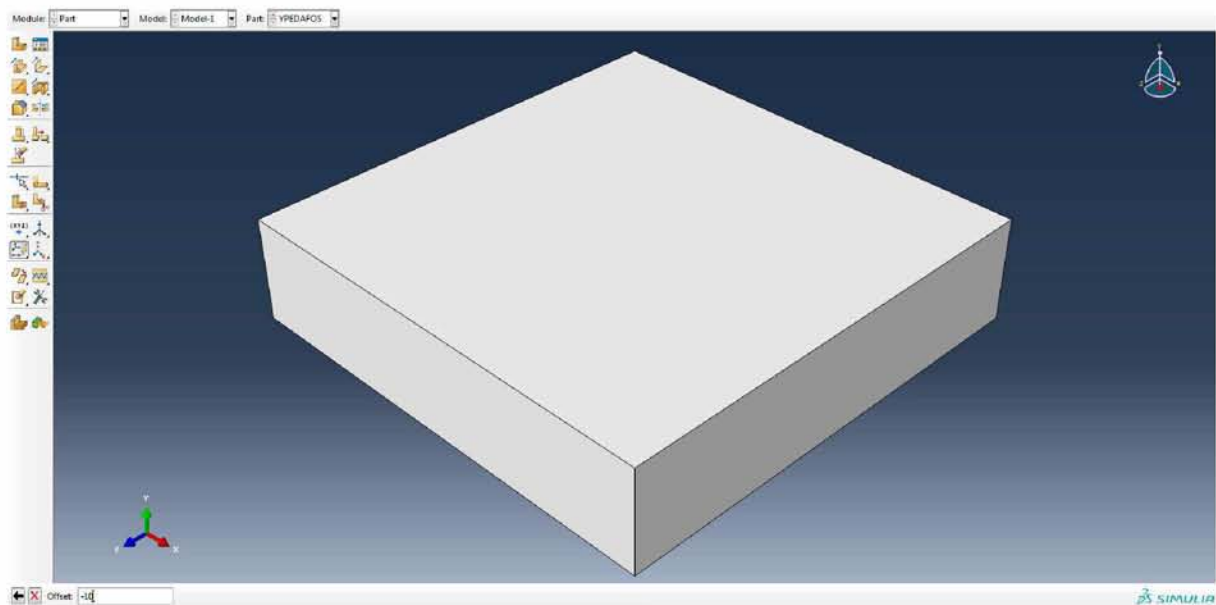
Στη συνέχεια χωρίζεται σε δύο στρώσεις, μια επιφανειακή σχετικά μαλακή στρώση ύψους 10m και μία πρακτικά ασυμπίεστη ύψους 140m. Για τον λόγο αυτό δημιουργείται ένα βοηθητικό επίπεδο. Επιλέγεται **Create Datum Plane: Offset From Principal Plane** και ως κύριο επίπεδο αναφοράς το επίπεδο XZ (**XZ Plane**).





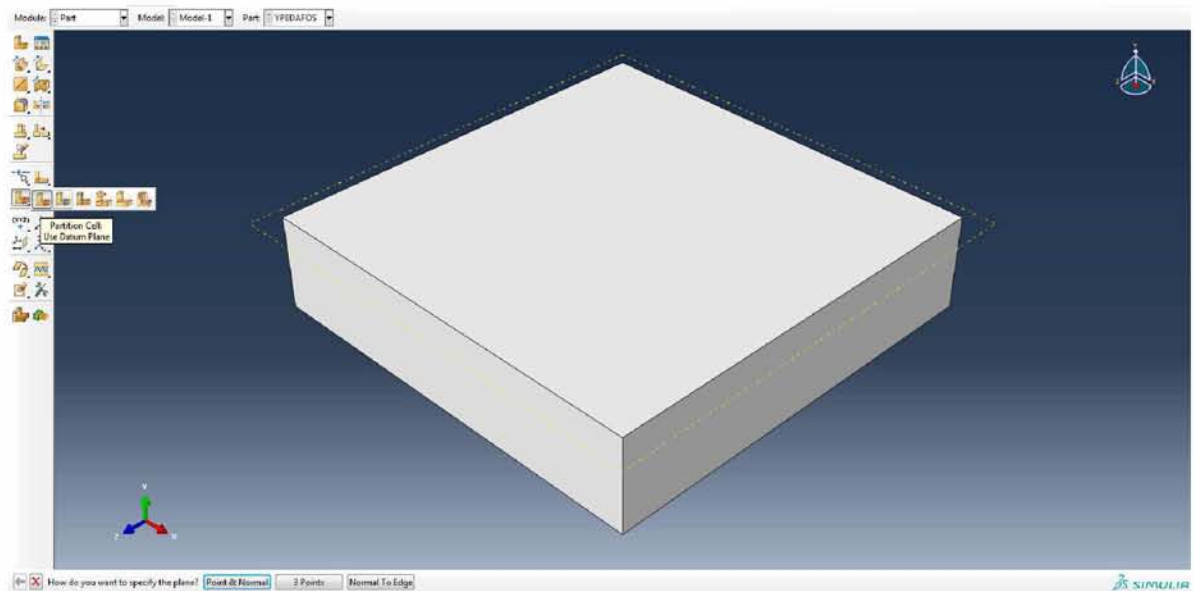
Εικόνα 4.2.83. Εντολή δημιουργίας βοηθητικού επιπέδου XZ.

Στο πλαίσιο εισάγεται η τιμή -10, αφού η ανώτερη επιφάνεια του υπεδάφους βρίσκεται σε ύψος  $Y=0$  και το πάχος της ανώτερης στρώσης θεωρείται 10m.

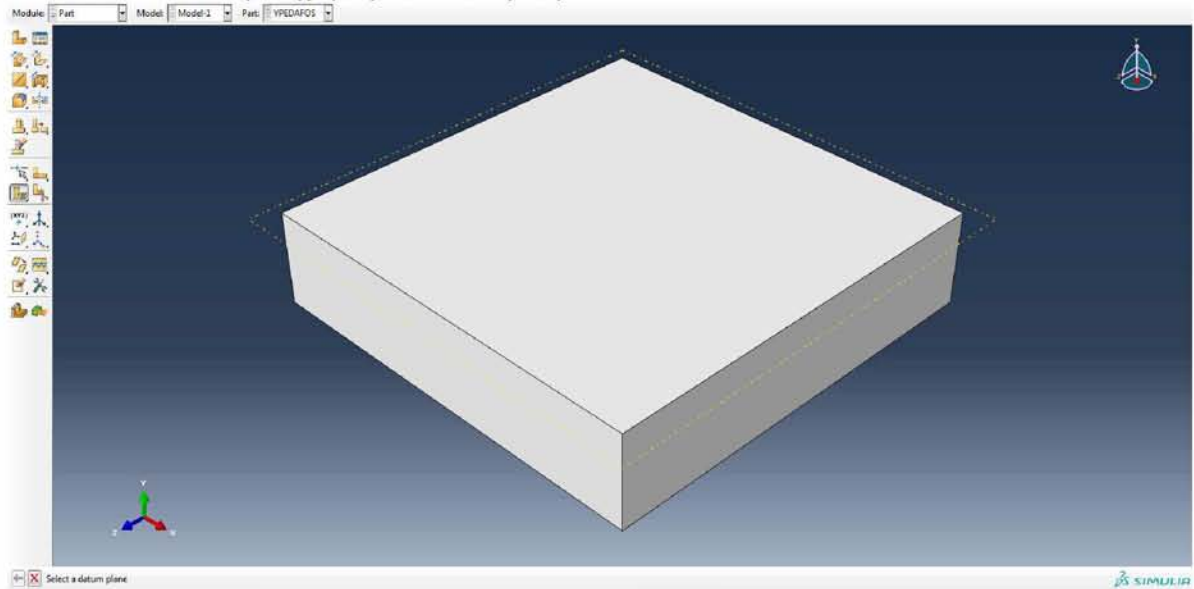


Εικόνα 4.2.84. Εισαγωγή απόστασης από το κύριο επίπεδο XZ.

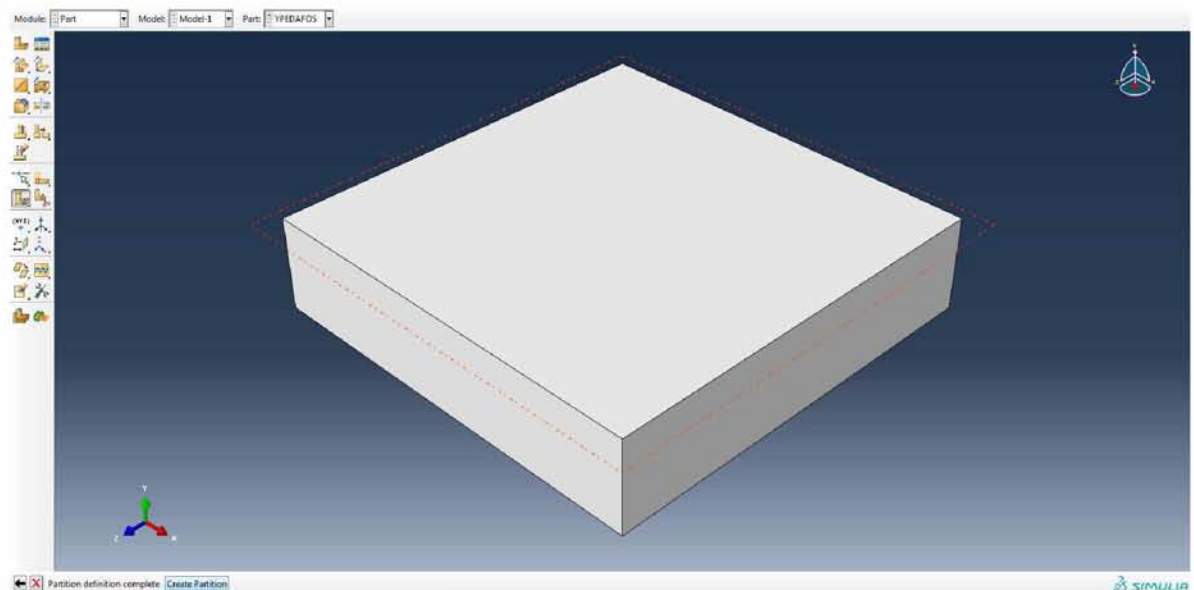
Επιλέγεται η εντολή **Partition Cell: Use Datum Plane** και ακολούθως το επίπεδο που δημιουργήθηκε νωρίτερα. Πιέζοντας **Create Partition** ολοκληρώνεται ο διαχωρισμός του υπεδάφους σε δύο στρώσεις.



Εικόνα 4.2.85. Εντολή διαχωρισμού υπεδάφους.

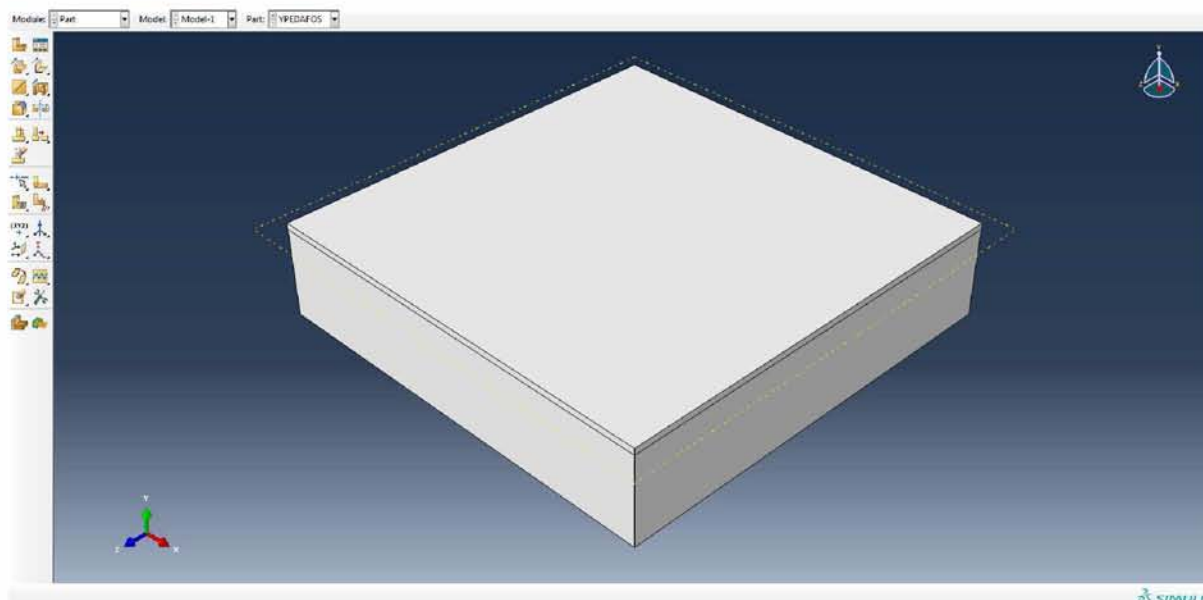


Εικόνα 4.2.86. Προτροπή επιλογής επιπέδου διαχωρισμού.



Εικόνα 4.2.87. Επιλογή επιπέδου διαχωρισμού.

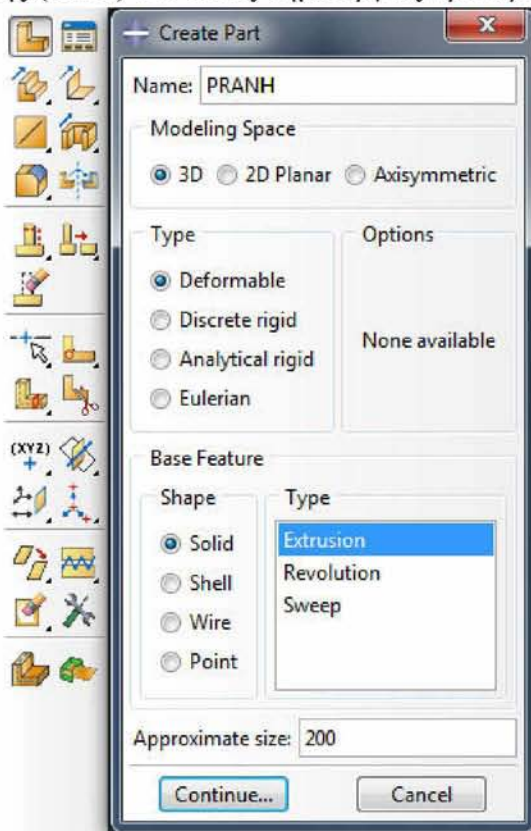




Εικόνα 4.2.88. Τελική διατομή υπεδάφους θεμελίωσης.

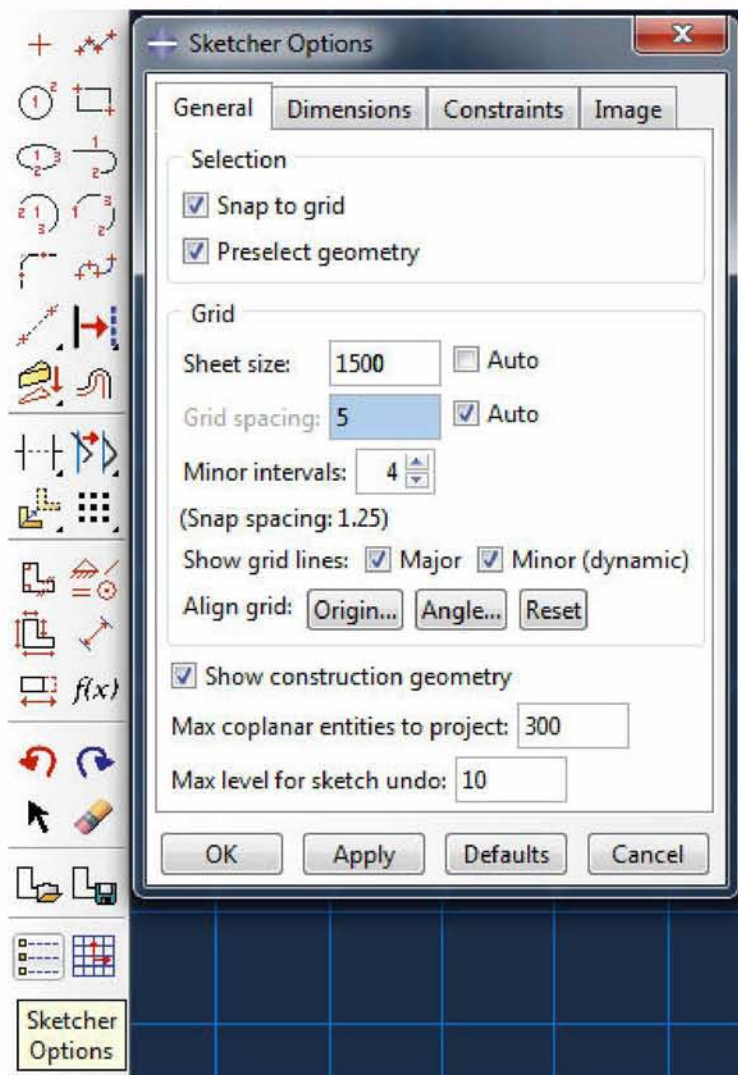
## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΑΝΩΝ ΚΟΙΛΑΔΑΣ

Παρόμοια με πριν, επιλέγεται η εντολή **Create Part**. Στο εμφανιζόμενο παράθυρο ονομάζεται το συγκεκριμένο τμήμα (name), επιλέγεται χώρος μοντελοποίησης (**Modeling Space**) τρισδιάστατος (**3D**), τύπος σώματος (**Type**) παραμορφώσιμο (**Deformable**), μορφή σώματος (**Shape**) συμπαγής (**Solid**) και τύπος δημιουργίας προεκβολή (**Extrusion**).



Εικόνα 4.2.89. Δημιουργία τμήματος πρανών κοιλάδας.

Προσαρμόζεται ο κάρναβος στις επιθυμητές διαστάσεις (**Sheet Size 1500**).



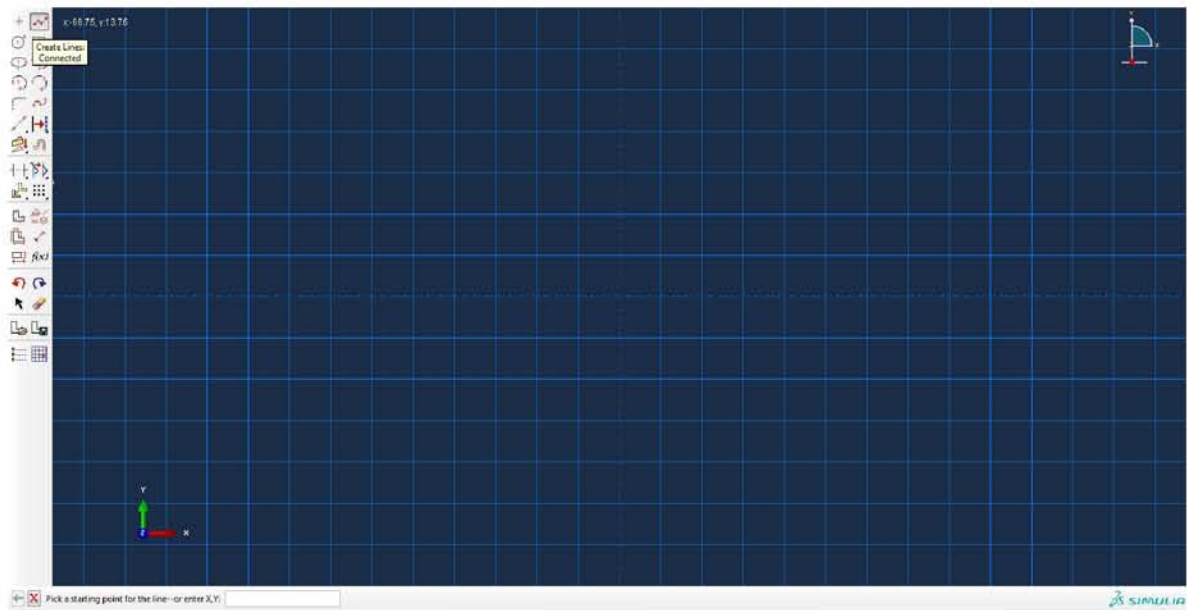
Εικόνα 4.2.90. Προσαρμογή μεγέθους κάρναβου σχεδίασης.

Τα πρηνή θεωρήθηκε ότι εκτείνονται 100m από την κάθε πλευρά του φράγματος και 50m πάνω από το ύψος του. Ως εκ τούτου, οι συνολικές διαστάσεις των πρηνών είναι 660m, 660m και 159m για το μήκος, το πλάτος και το ύψος τους αντίστοιχα.

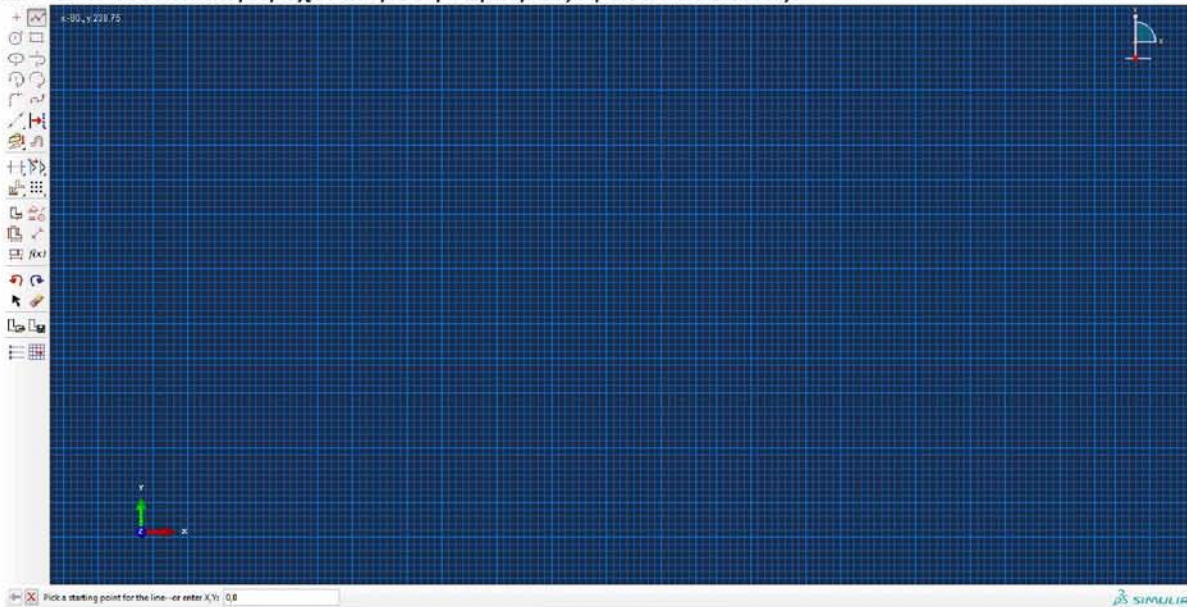
Επιλέγεται η εντολή **Create Lines: Connected** και εισάγονται οι συντεταγμένες (X,Y) των σημείων που ορίζουν τη γεωμετρία των πρηνών:

(0,0) , (0,159) , (660,159) , (660,0).

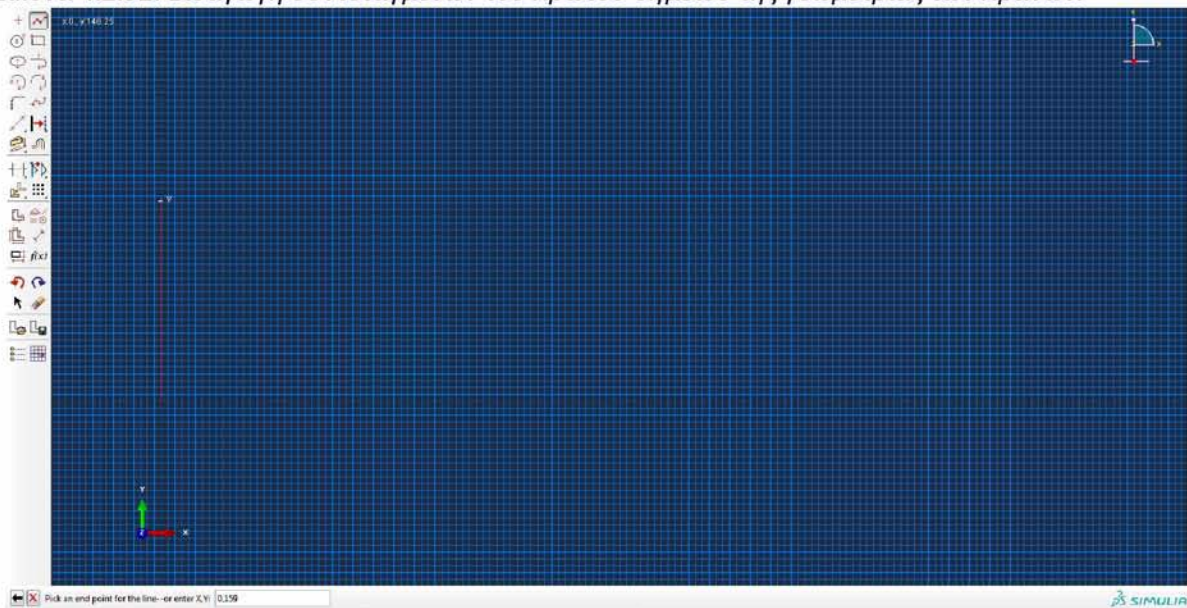




Εικόνα 4.2.91. Εκκίνηση σχεδιασμού γεωμετρίας πρανών κοιλάδας.

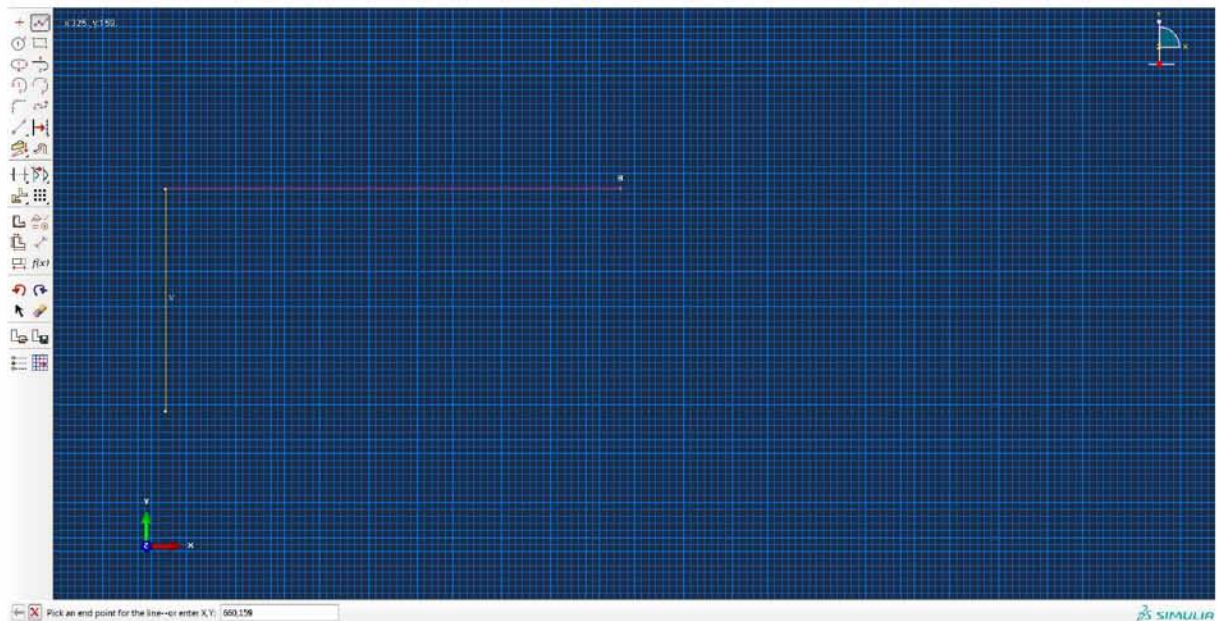


Εικόνα 4.2.92. Εισαγωγή συντεταγμένων του πρώτου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

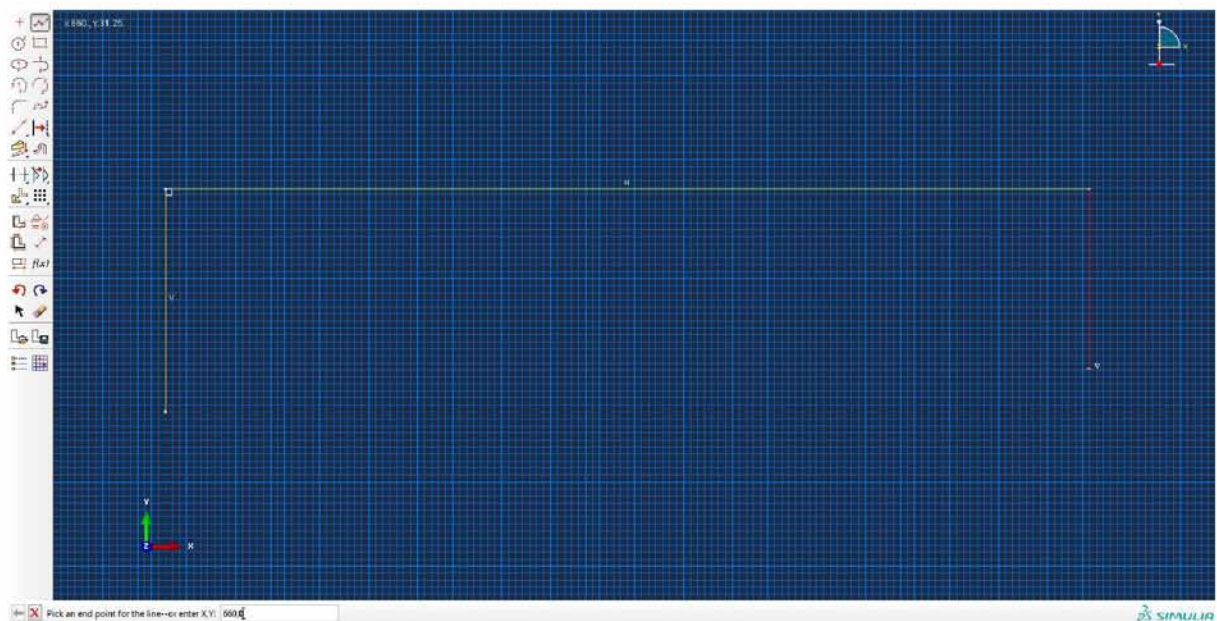


Εικόνα 4.2.93. Εισαγωγή συντεταγμένων του δεύτερου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.





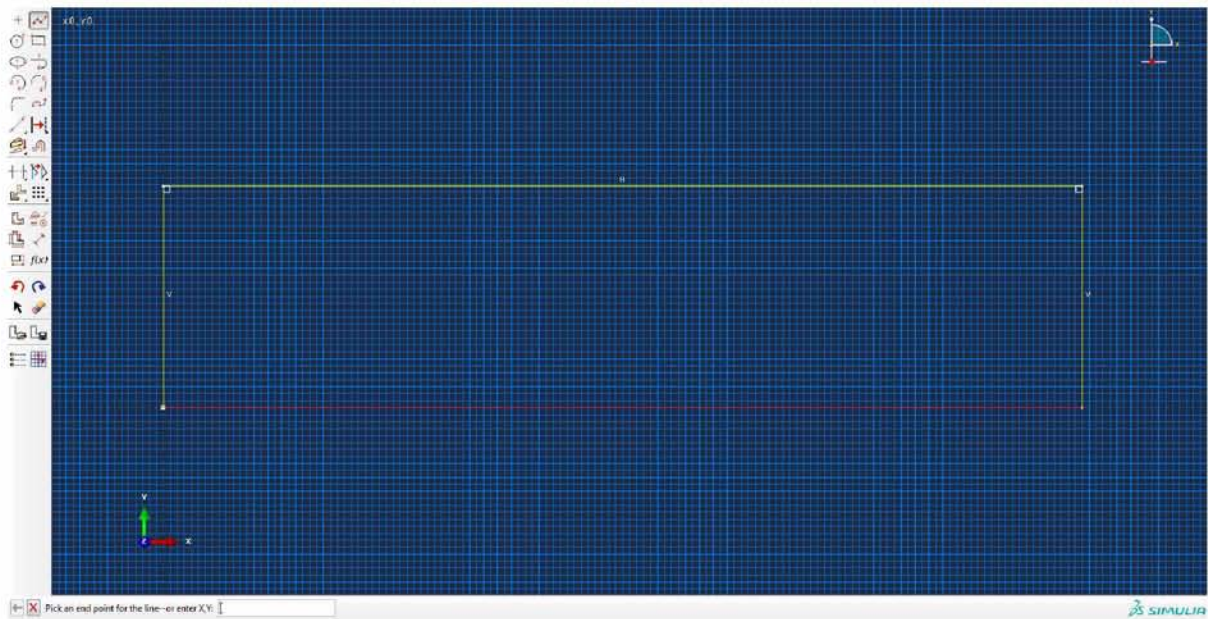
Εικόνα 4.2.94. Εισαγωγή συντεταγμένων του τρίτου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.



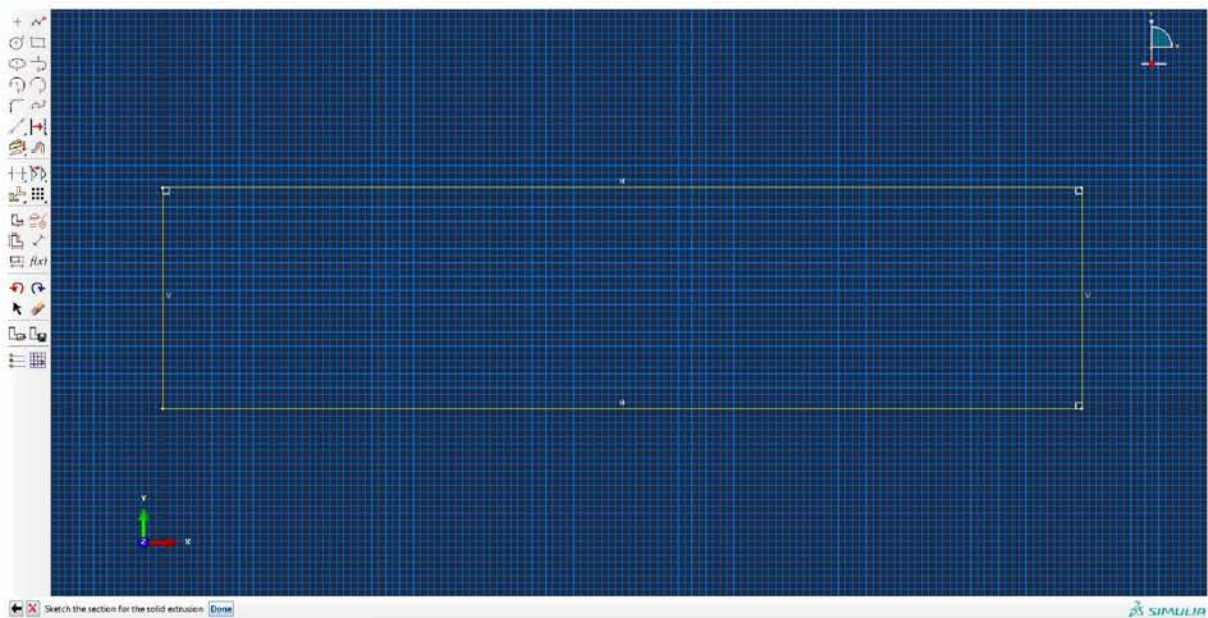
Εικόνα 4.2.95. Εισαγωγή συντεταγμένων του τέταρτου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.

Για να κλείσει η γεωμετρία κλικάρεται το αρχικό σημείο και επιλέγεται **Done**. Στο παράθυρο **Edit Base Extrusion** πληκτρολογείται η τιμή 660 ως βάθος (**Depth**) των πρανών και πιέζεται **OK**.

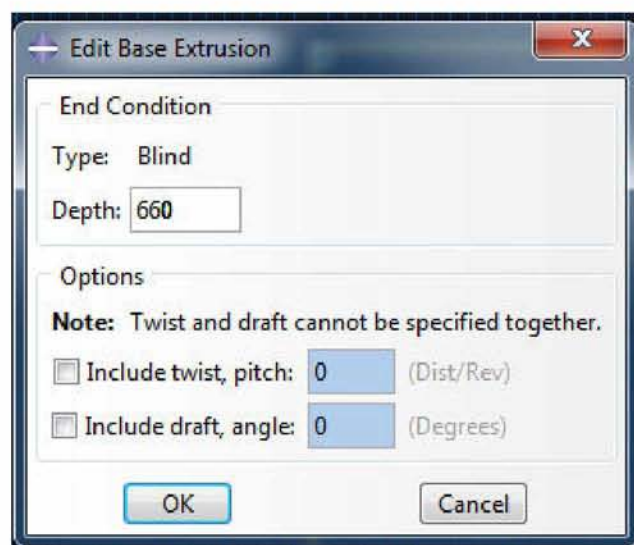




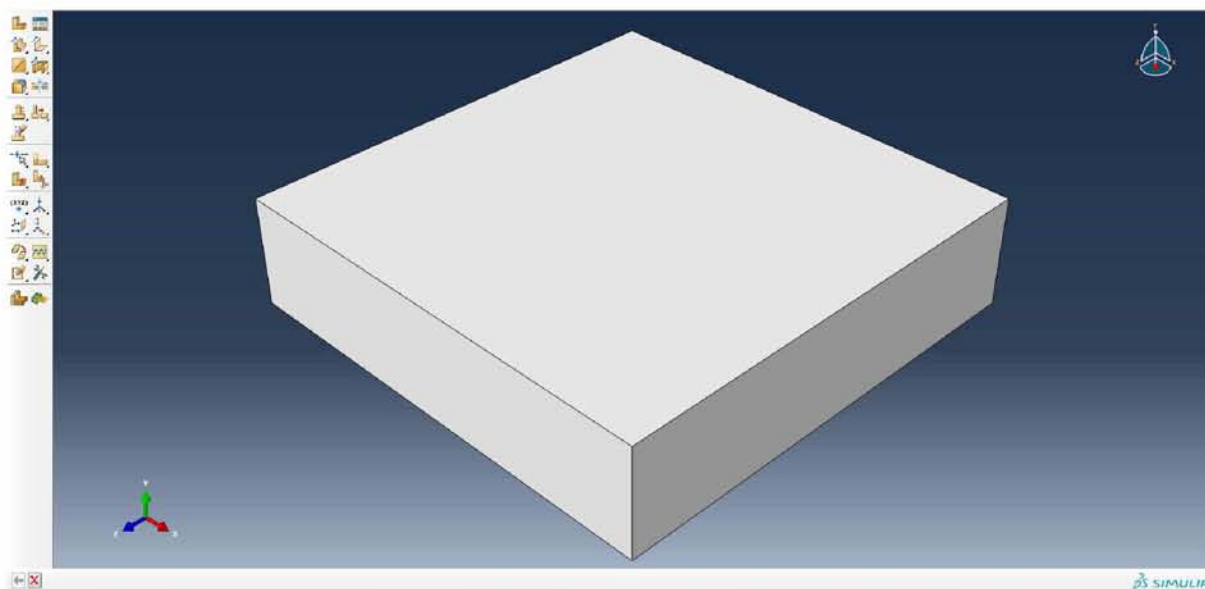
Εικόνα 4.2.96. Επιλογή του τελευταίου σημείου της γεωμετρίας των πρανών.



Εικόνα 4.2.97. Αρχική γεωμετρία διατομής πρανών σε δύο διαστάσεις.



Εικόνα 4.2.98. Εισαγωγή τρίτης διάστασης γεωμετρίας πρανών.

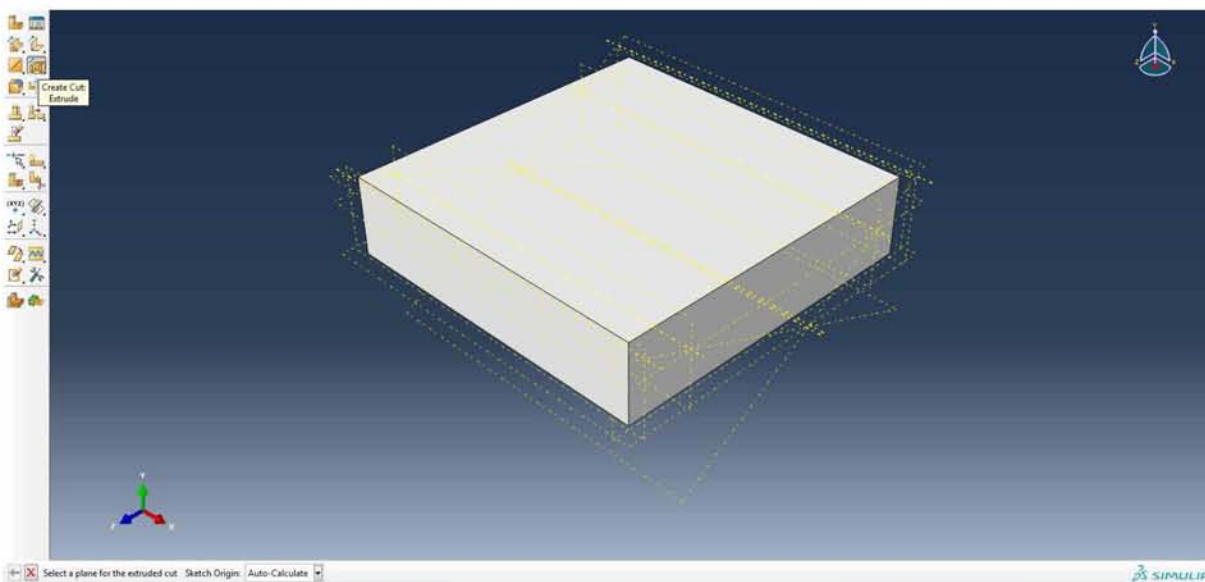


Εικόνα 4.2.99. Αρχική διατομή πρανών στις τρεις διαστάσεις (πριν την αποκοπή).

Επόμενο βήμα η αποκοπή των πρανών στις επιθυμητές κλίσεις, όπως έγινε και με το σώμα του φράγματος, χρησιμοποιώντας τα ίδια βοηθητικά επίπεδα και άξονες με πριν.

Να σημειωθεί ότι η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του συνόλου των βοηθητικών επιπέδων, αξόνων ή σημείων γίνεται από τις βασικές εντολές του προγράμματος στο επάνω μέρος της οθόνης: **View** → **Part Display Options** → Καρτέλα **Datum**. Εναλλακτικά, για μεμονωμένη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση χρησιμοποιείται το Δέντρο Εντολών Μοντέλου (**Model Tree**).

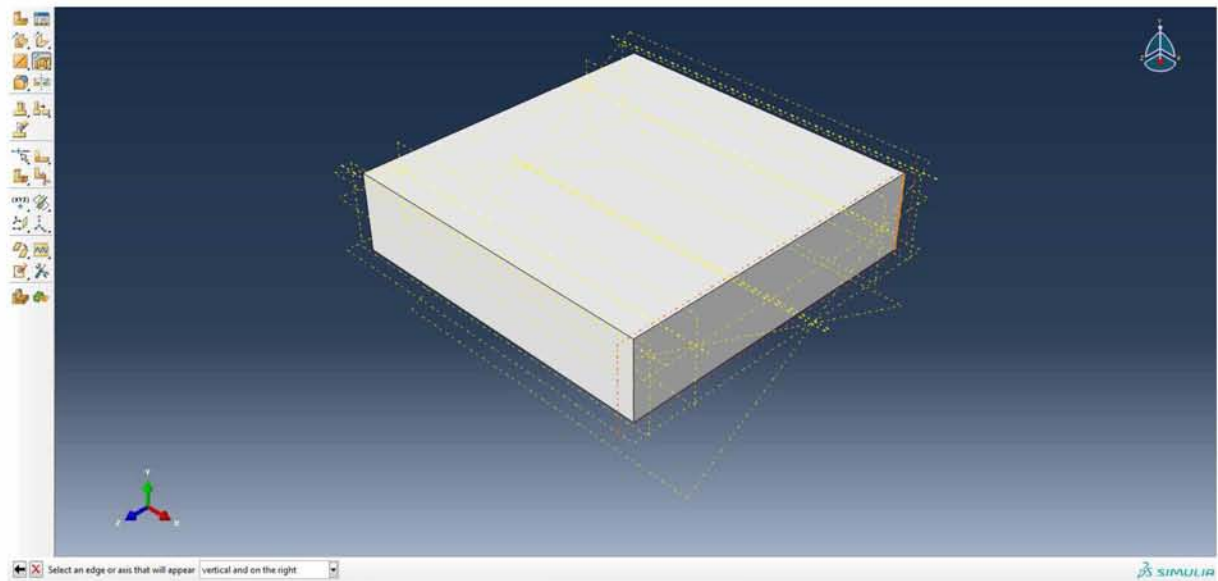
Επιλέγεται η εντολή **Create Cut: Extrude**.



Εικόνα 4.2.100. Εντολή αποκοπής πρανών κοιλάδας.



Προσδιορίζεται το επίπεδο κάθετα στο οποίο θα γίνει η αποκοπή καθώς και η κατάλληλη ευθεία για την επιθυμητή όψη προβολής. Επιλέγεται, επίσης, **Apply Left View (Y-Z)**.

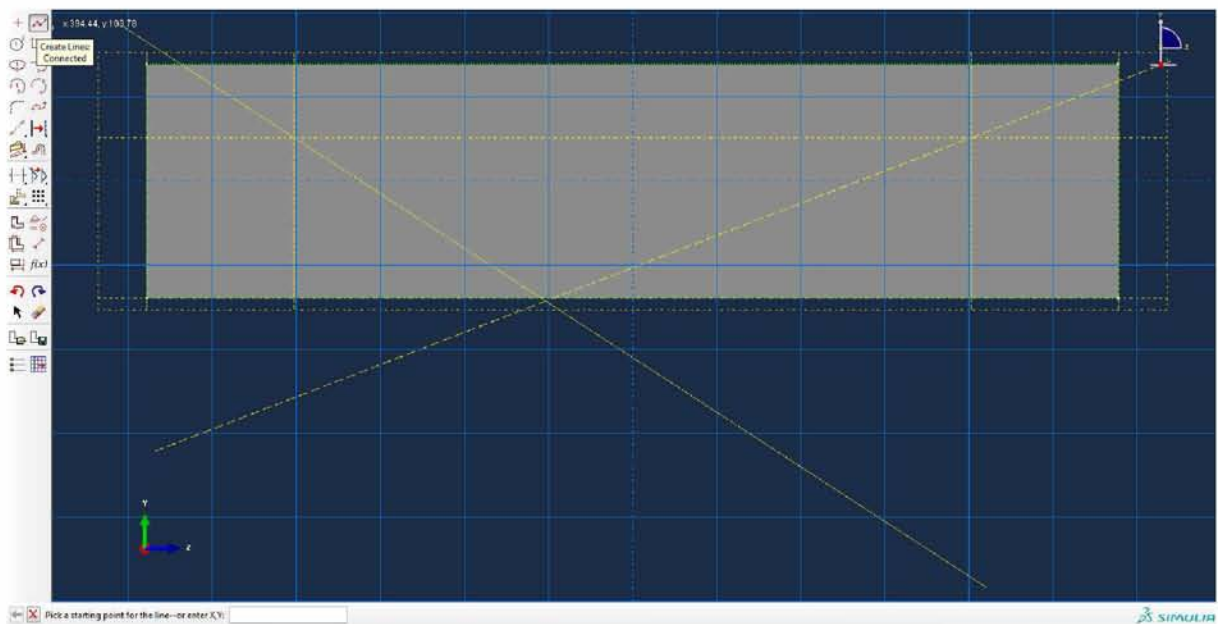


Εικόνα 4.2.101. Επιλογή επιπέδου αποκοπής και ευθείας προβολής αποκοπής πρανών.

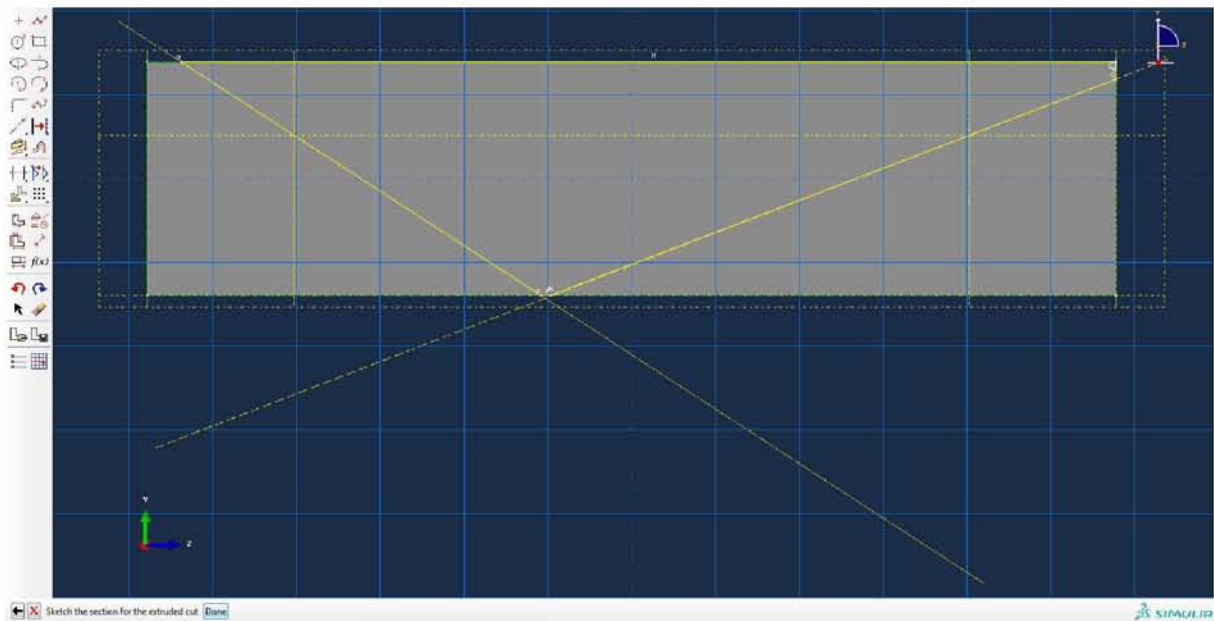


Εικόνα 4.2.102. Προσαρμογή προβολής για την αποκοπή των πρανών.

Κλικάρεται η εντολή **Create Lines: Connected**, σχεδιάζεται το σχήμα (πεντάπλευρο στην προκειμένη) σύμφωνα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η αποκοπή των πρανών και πιέζεται **Done**.

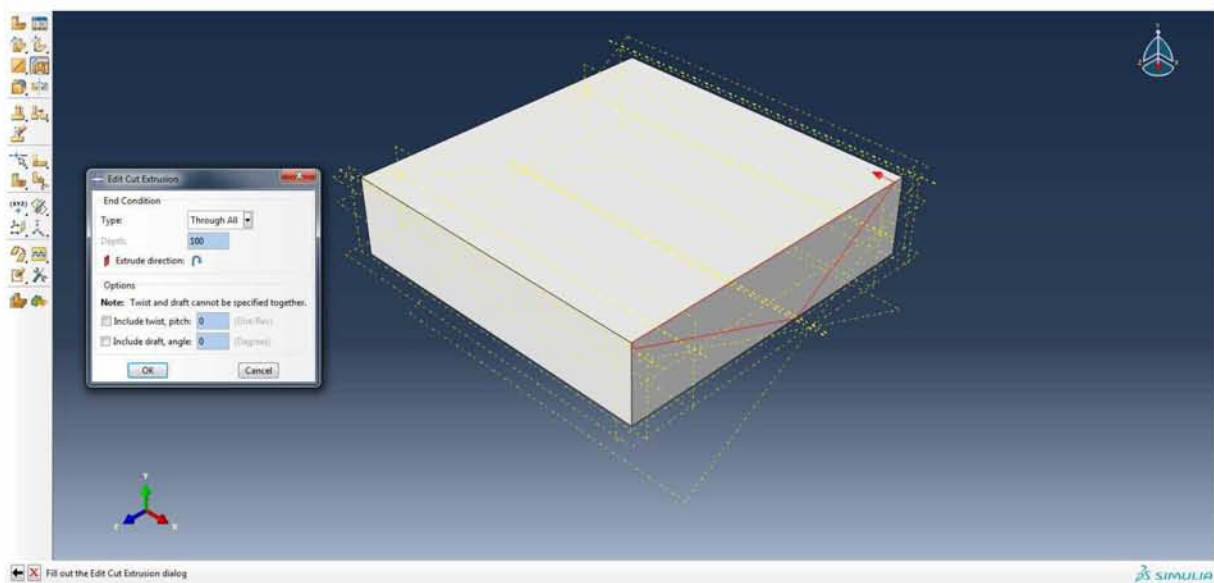


Εικόνα 4.2.103. Εντολή δημιουργίας γραμμών για τον σχεδιασμό του τμήματος αποκοπής.



Εικόνα 4.2.104. Σχεδιασμός τμήματος αποκοπής των πρανών.

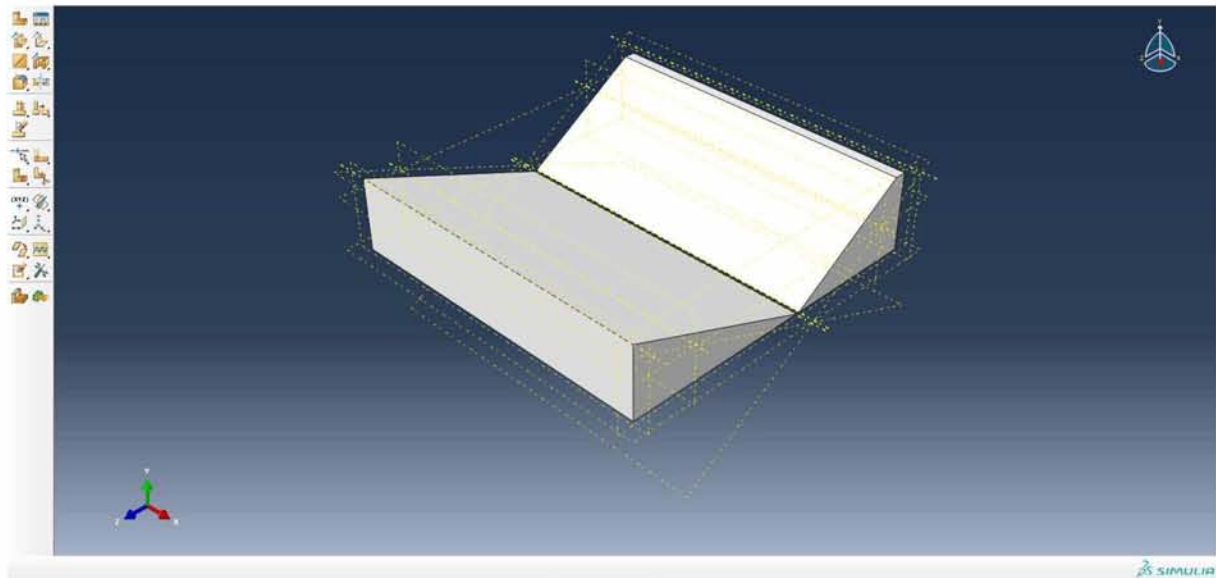
Επιλέγεται να πραγματοποιηθεί αποκοπή σε όλο το μήκος του σώματος (**Type: Through All**) και με κατεύθυνση προς τα μέσα.



Εικόνα 4.2.105. Πρόσθετες επιλογές αποκοπής.

Πιέζοντας **OK**, προκύπτει η τελική μορφή των πρανών της κοιλάδας πάνω στα οποία θα εδραστεί το μεγαλύτερο μέρος του φράγματος.





Εικόνα 4.2.106. Τελική διατομή πρανών κοιλάδας.

### **4.3 Property Module**

Επόμενο στάδιο στη διαδικασία μοντελοποίησης αποτελεί η δημιουργία των υλικών και η αντιστοίχισή τους στα μέρη του μοντέλου.

Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο ορίζονται οι ιδιότητες 5 διαφορετικών υλικών για κάθε ένα από τα εξής μέρη του μοντέλου: πυρήνας φράγματος, σώματα στήριξης φράγματος, πρανή κοιλάδας, ανώτερη (1<sup>η</sup>) στρώση υπεδάφους, κατώτερη (2<sup>η</sup>) στρώση υπεδάφους. Σε δεύτερο στάδιο δημιουργούνται γενικευμένες διατομές (sections) για καθένα από τα παραπάνω υλικά και σε τρίτο στάδιο αντιστοιχίζονται αυτές στο κάθε τμήμα του μοντέλου.

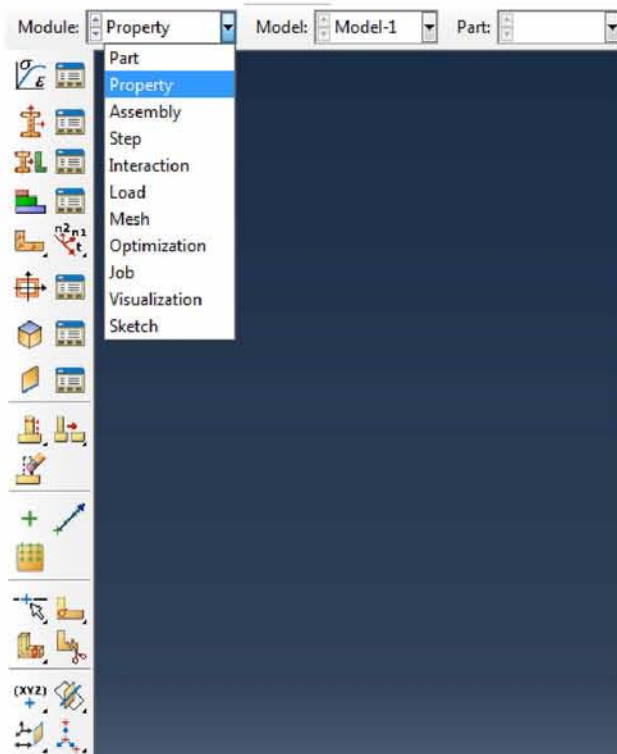
Στην παρούσα ανάλυση, επιλέχθηκε ελαστοπλαστική συμπεριφορά (σύμφωνα με το ελαστικό – τέλεια πλαστικό κριτήριο Mohr – Coulomb) για το σώμα του φράγματος, τα πρανή της κοιλάδας και την ανώτερη (1<sup>η</sup>) στρώση του υπεδάφους πάχους 10m, ενώ για την κατώτερη (2<sup>η</sup>) στρώση του υπεδάφους θεμελίωσης επιλέχθηκε ελαστική συμπεριφορά λόγω του αρκετά υψηλού μέτρου ελαστικότητάς της, που την καθιστά πρακτικά ασυμπίεστη.

*Για την αποτελεσματικότερη προσομοίωση της συμπεριφοράς λιθόρριπτων φραγμάτων έχουν προταθεί διάφορα άλλα ελαστοπλαστικά κριτήρια αστοχίας, τα οποία όμως δεν παρέχονται στην προσφερόμενη βιβλιοθήκη του Abaqus και πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα με ξεχωριστό αρχείο (input file), γεγονός που ξεπερνά τους σκοπούς της παρούσας εργασίας [4], [40], [41], [50], [51].*

Στις ιδιότητες των υλικών οι βασικές τιμές που εισάγονται αφορούν την πυκνότητα του υλικού (**Density**), το μέτρο ελαστικότητας (**Young's Modulus**), τον δείκτη του Poisson (**Poisson's Ratio**), τη γωνία τριβής (**Friction Angle**), την τάση διαρροής (**Cohesion Yield Stress**), καθώς και τους συντελεστές απόσβεσης Rayleigh  $\alpha$  και  $\beta$  (**Damping factors Alpha & Beta**). Εκτενέστερη αναφορά στην επιλογή των τιμών που χρησιμοποιήθηκαν γίνεται σε επόμενο υποκεφάλαιο.

## ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Επιλέγεται η ενότητα (**Module**) **Property**.



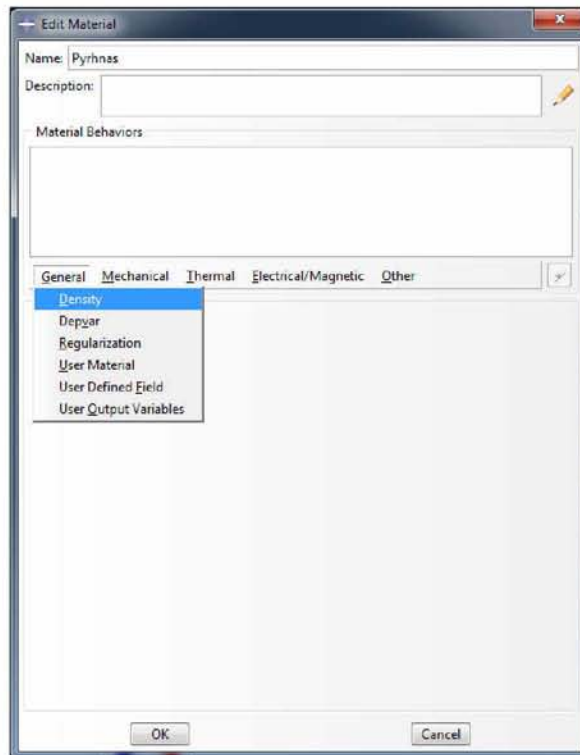
Εικόνα 4.3.1. Επιλογή ενότητας *Property Module*.

Κλικάρεται η εντολή **Create Material**, με την οποία ορίζεται ένα νέο υλικό.



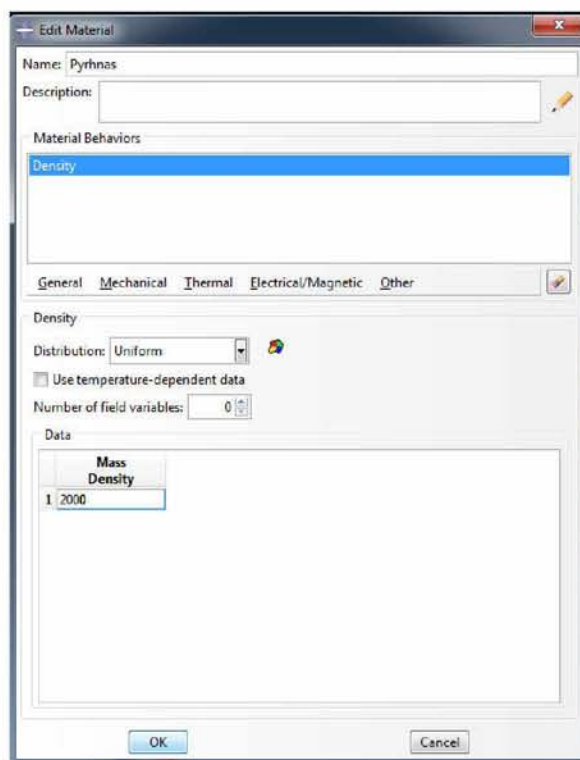
Εικόνα 4.3.2. Εντολή ορισμού νέου υλικού.

Δημιουργείται, αρχικά, το υλικό του πυρήνα. Στο παράθυρο **Edit Material** που εμφανίζεται δίνεται ονομασία στο υλικό και στη συνέχεια επιλέγεται **General** → **Density** για τον ορισμό της πυκνότητάς του.



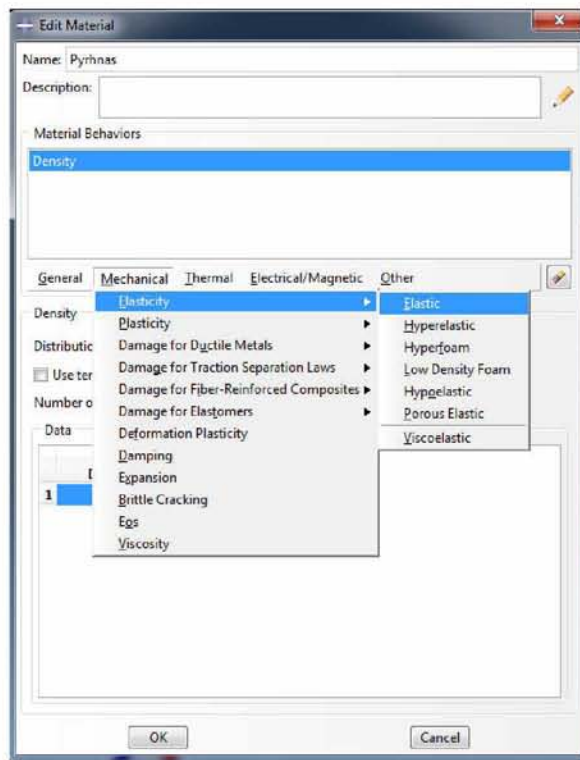
Εικόνα 4.3.3. Εντολή ορισμού πυκνότητας υλικού.

Εισάγεται η τιμή 2000 στο πλαίσιο **Mass Density**.



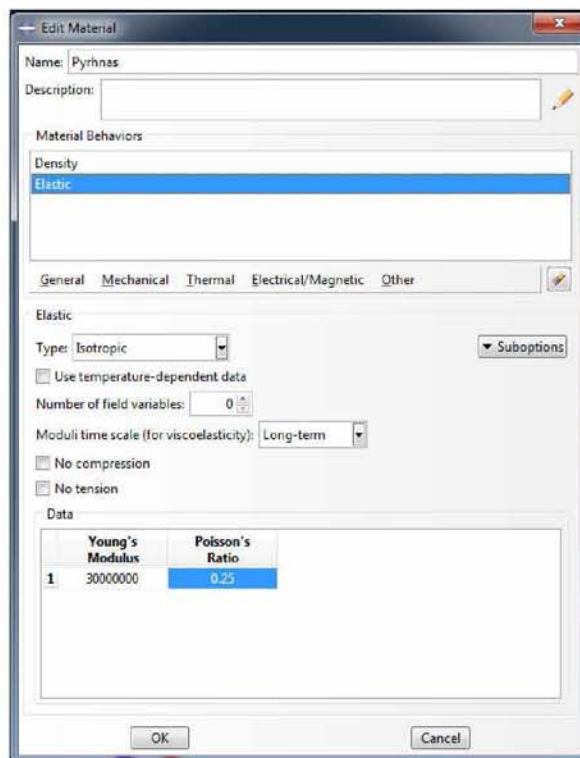
Εικόνα 4.3.4. Ορισμός πυκνότητας υλικού πυρήνα φράγματος.

Επιλέγεται **Mechanical** → **Elasticity** → **Elastic** για τον ορισμό του μέτρου ελαστικότητας και του δείκτη Poisson.



Εικόνα 4.3.5. Εντολή ορισμού ελαστικών ιδιοτήτων υλικού.

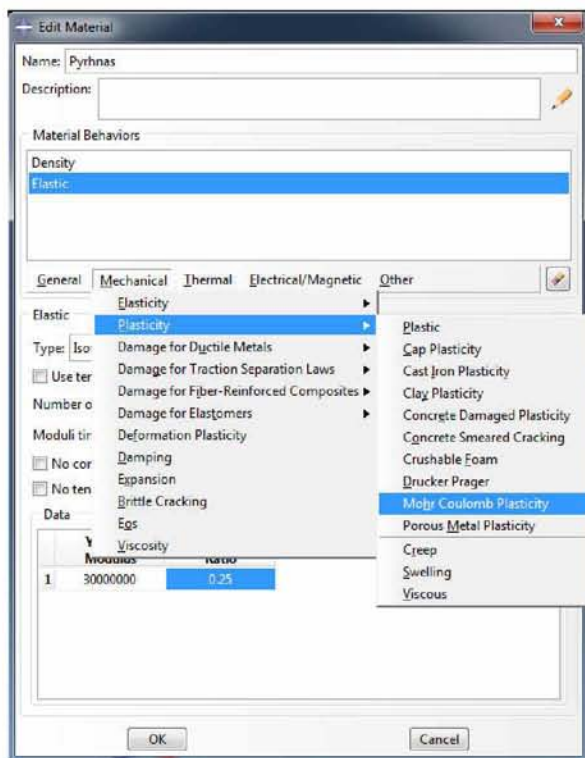
Πληκτρολογείται 30000000 (=30MPa) στο πλαίσιο **Young's Modulus** και 0.25 στο πλαίσιο **Poisson's Ratio**.



Εικόνα 4.3.6. Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού πυρήνα φράγματος.

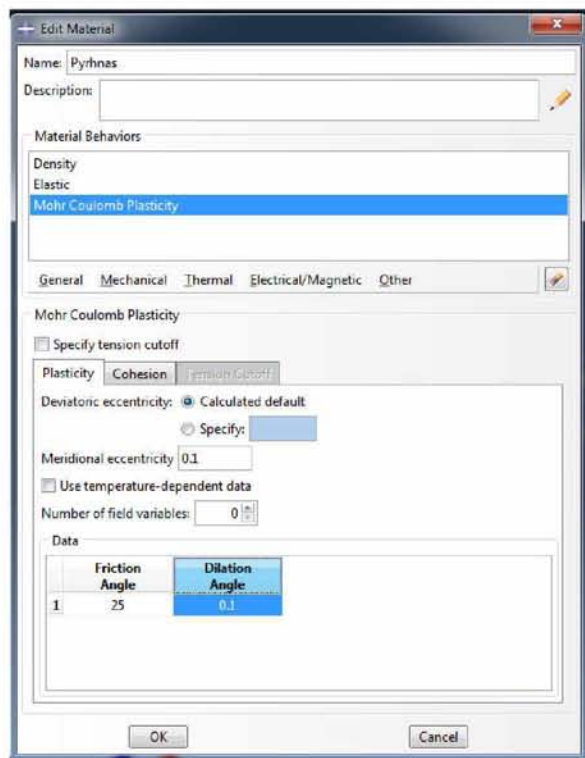


Επιλέγεται **Mechanical** → **Plasticity** → **Mohr Coulomb Plasticity** για τον ορισμό των απαραίτητων για την προσομοίωση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς (Mohr – Coulomb) ιδιοτήτων.



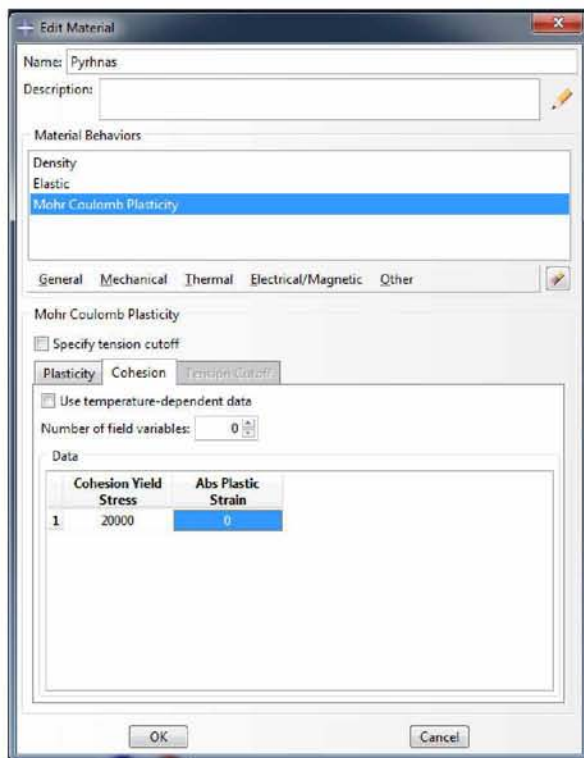
Εικόνα 4.3.7. Εντολή ορισμού πλαστικών ιδιοτήτων υλικού (κριτήριο Mohr-Coulomb).

Στην καρτέλα **Plasticity** εισάγεται στο πλαίσιο **Friction Angle** η τιμή 25 και στο πλαίσιο **Dilation Angle** 0.1.



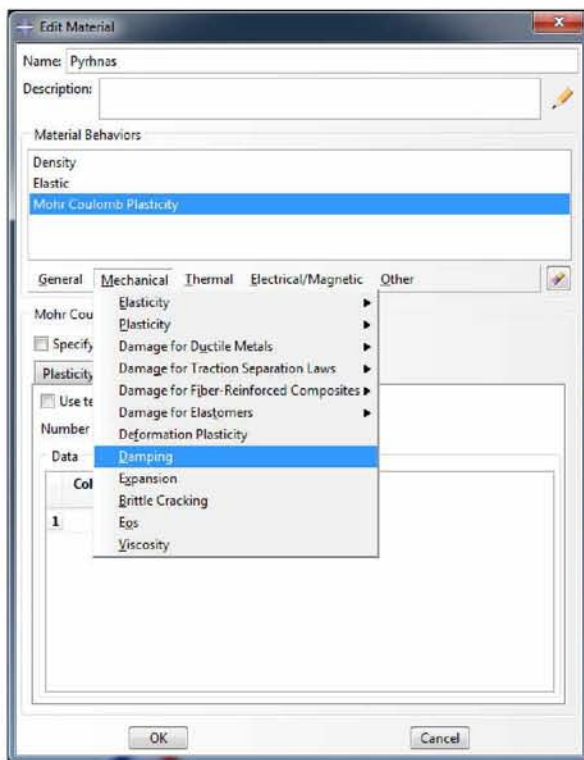
Εικόνα 4.3.8. Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού πυρήνα φράγματος.

Στην καρτέλα **Cohesion** πληκτρολογείται 20000 (=20kPa) στο **Cohesion Yield Stress** και 0 στο **Abs Plastic Strain**.



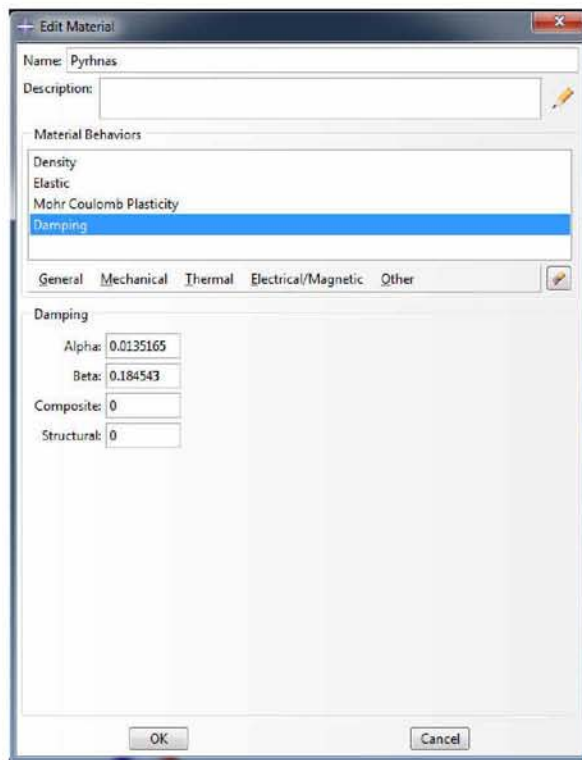
Εικόνα 4.3.9. Ορισμός συνοχής υλικού πυρήνα φράγματος.

Τέλος, για τον ορισμό των συντελεστών απόσβεσης Rayleigh του υλικού του πυρήνα του φράγματος επιλέγεται **Mechanical** → **Damping**.



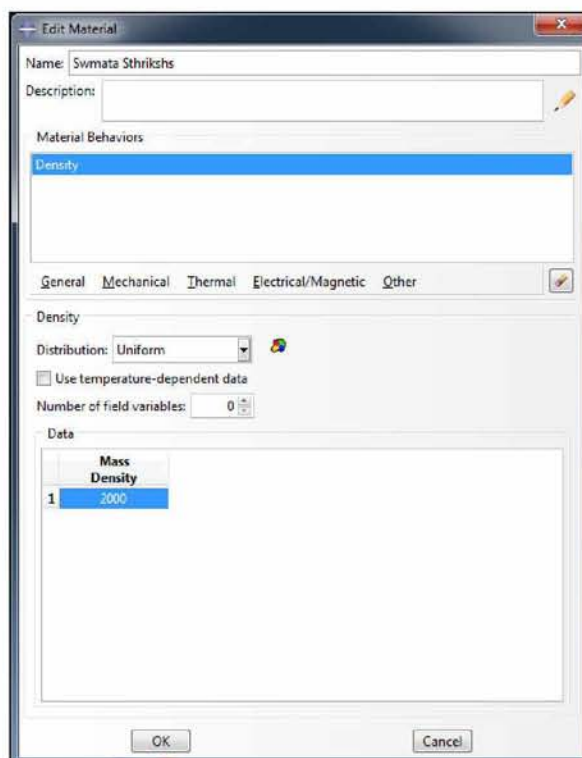
Εικόνα 4.3.10. Εντολή ορισμού απόσβεσης (Rayleigh) υλικού.

Εισάγονται οι τιμές 0.013516528 και 0.184542703 στα πλαίσια **Alpha** και **Beta** αντίστοιχα (στρογγυλοποιούνται από το ίδιο το πρόγραμμα σε 0.0135165 και 0.184543).

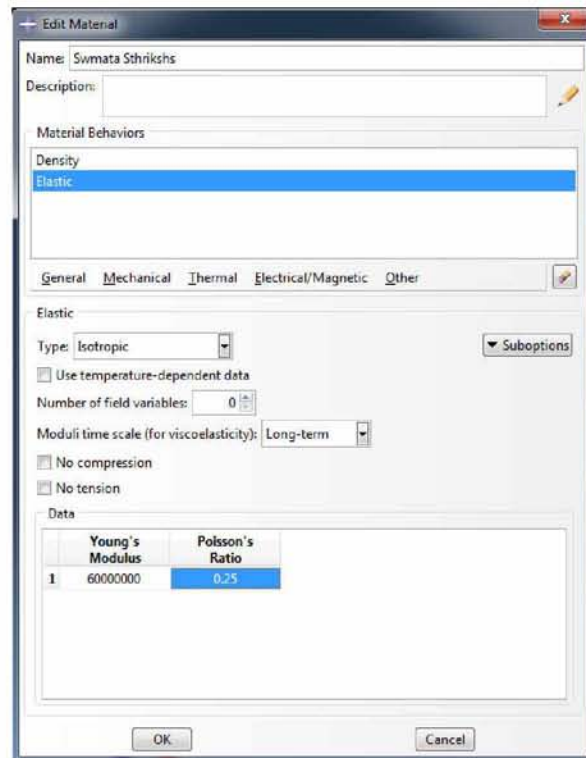


Εικόνα 4.3.11. Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού πυρήνα φράγματος.

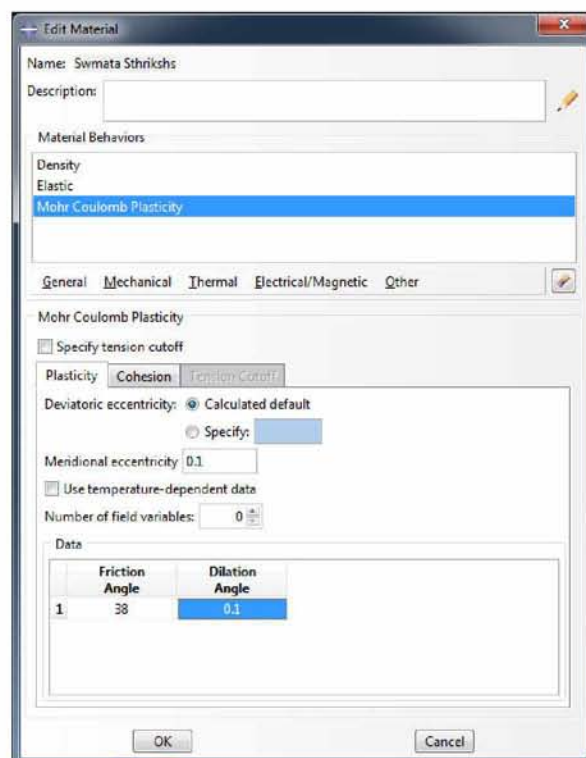
Με παρόμοιο τρόπο δημιουργείται στη συνέχεια το υλικό των σωμάτων στήριξης του φράγματος.



Εικόνα 4.3.12. Ορισμός πυκνότητας υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

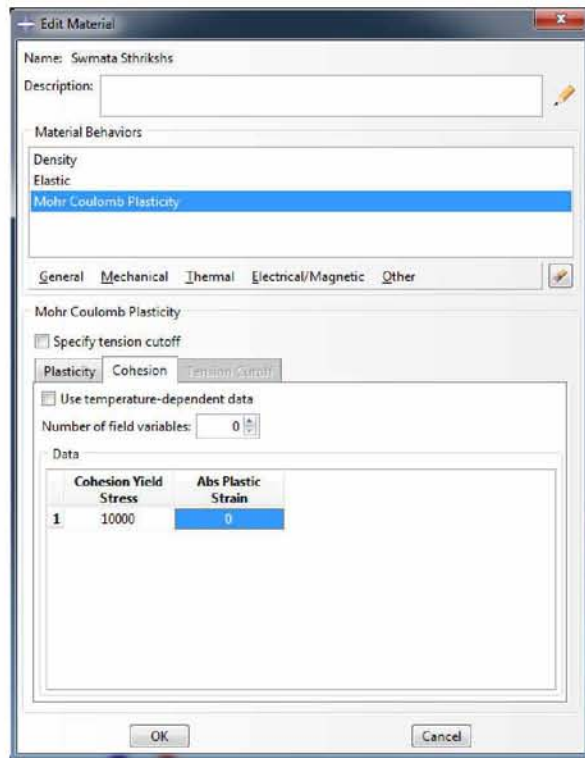


Εικόνα 4.3.13. Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

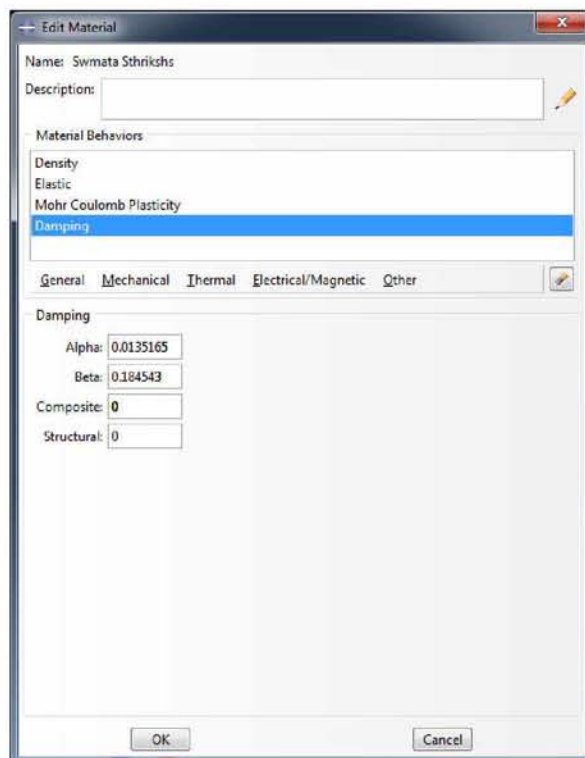


Εικόνα 4.3.14. Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.



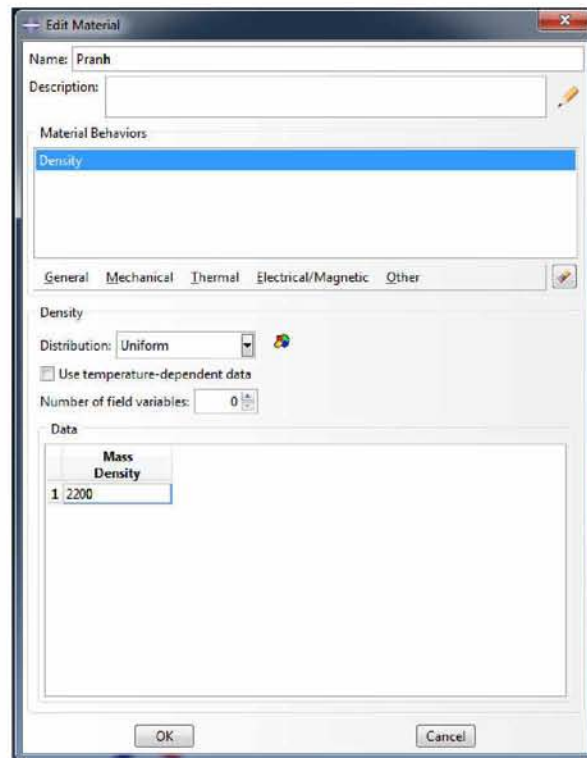


Εικόνα 4.3.15. Ορισμός συνοχής υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

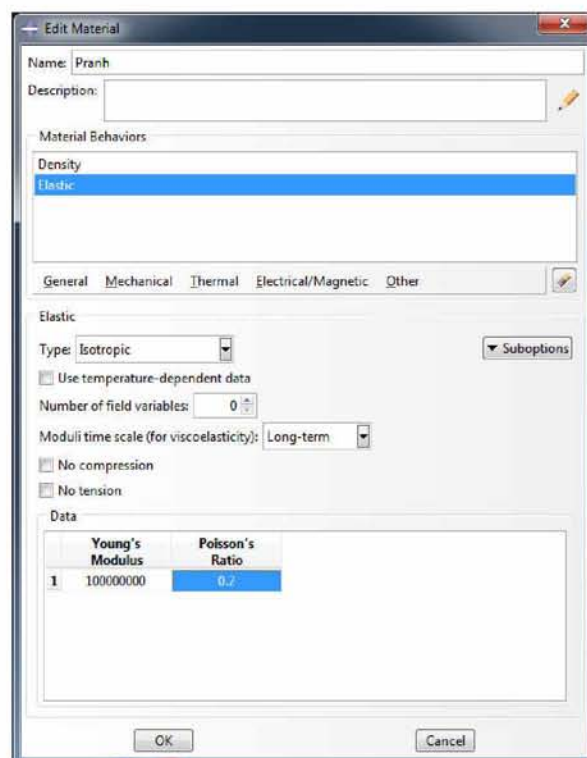


Εικόνα 4.3.16. Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού σωμάτων στήριξης φράγματος.

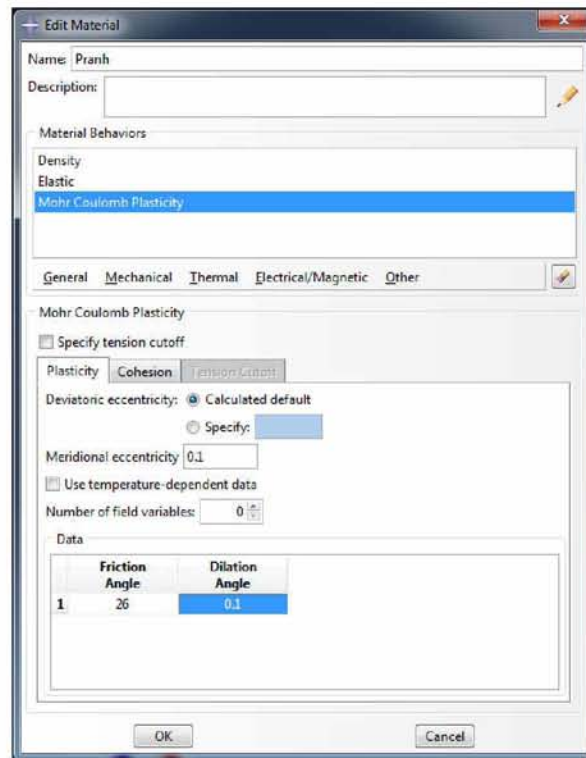
Ακολουθεί το υλικό των πρανών της κοιλάδας.



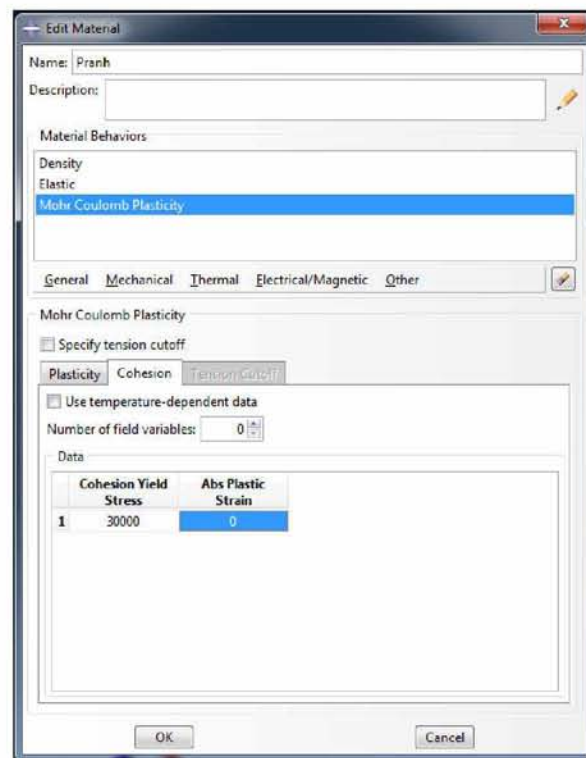
Εικόνα 4.3.17. Ορισμός πυκνότητας υλικού πρανών κοιλάδας.



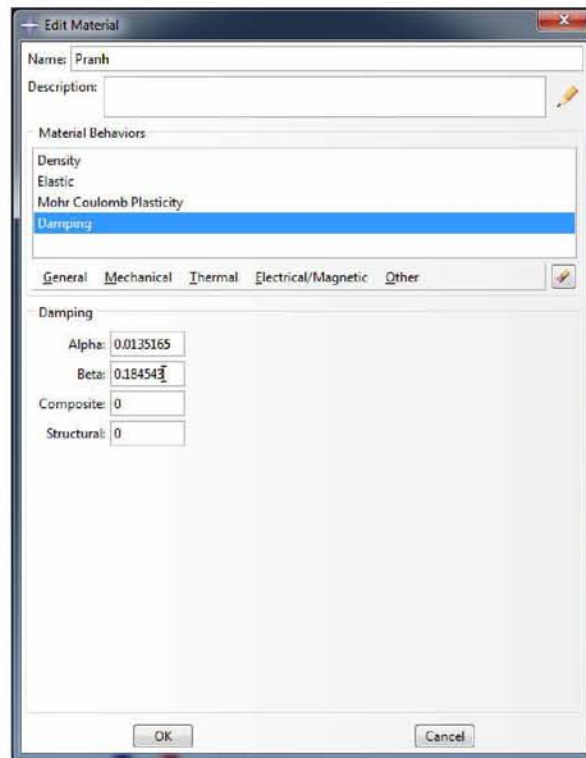
Εικόνα 4.3.18. Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού πρανών κοιλάδας.



Εικόνα 4.3.19. Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού πρανών κοιλάδας.

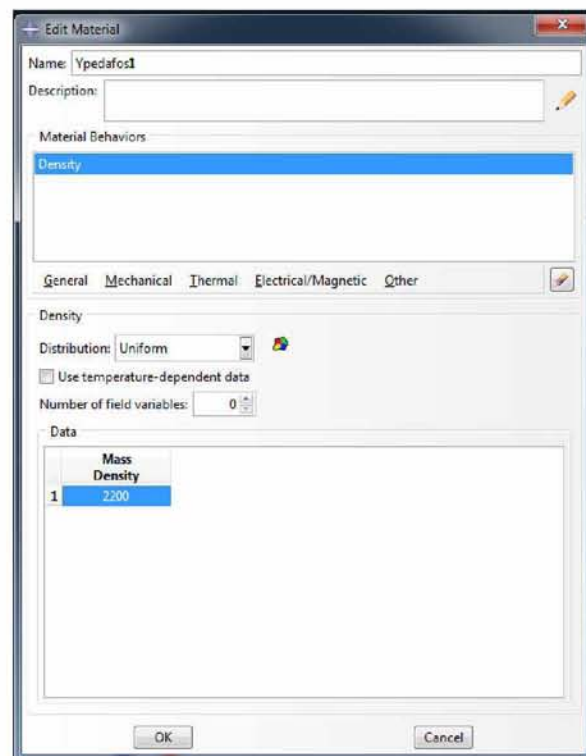


Εικόνα 4.3.20. Ορισμός συνοχής υλικού πρανών κοιλάδας.



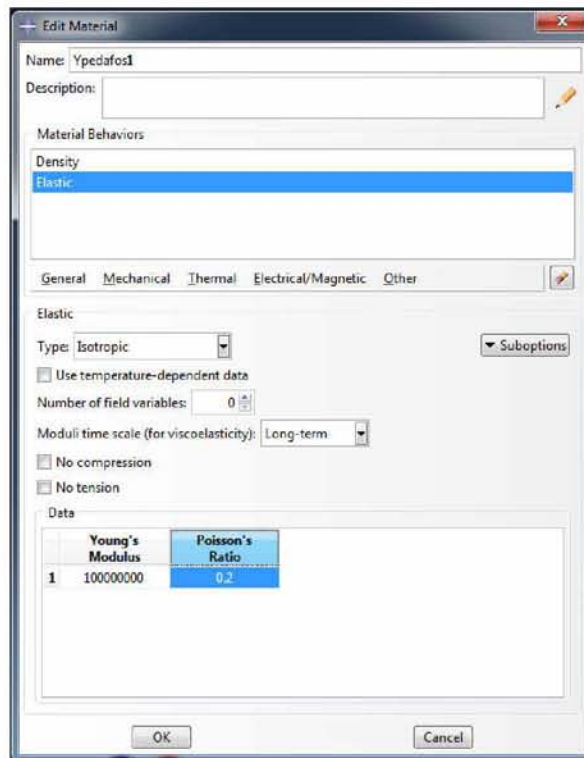
Εικόνα 4.3.21. Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού πρανών κοιλάδας.

Τέλος, ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών των δύο στρώσεων του υπεδάφους θεμελίωσης.

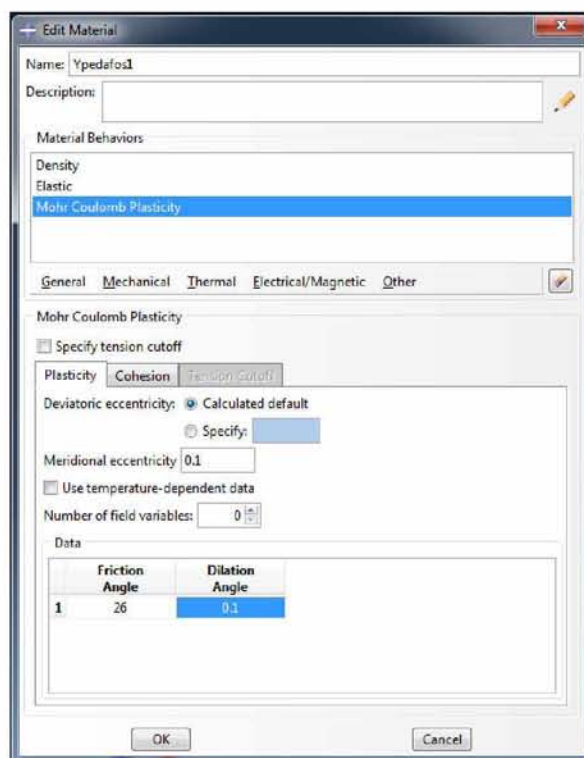


Εικόνα 4.3.22. Ορισμός πυκνότητας υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

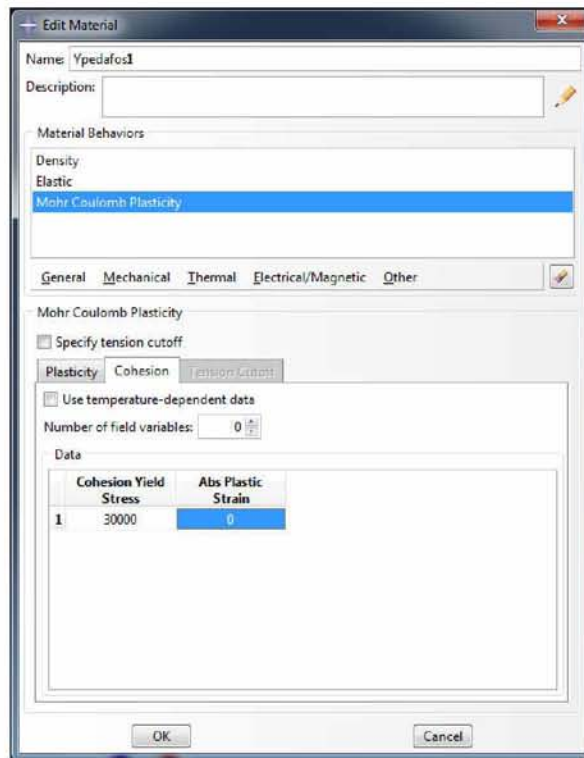




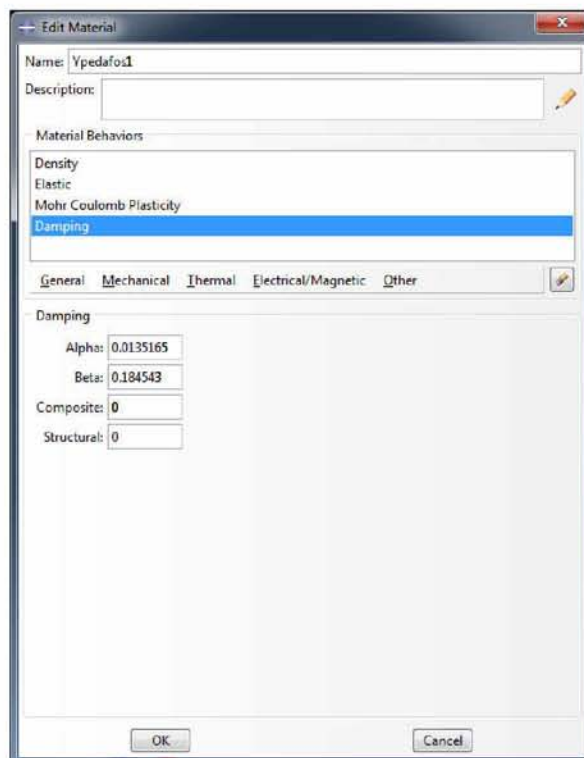
Εικόνα 4.3.23. Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.



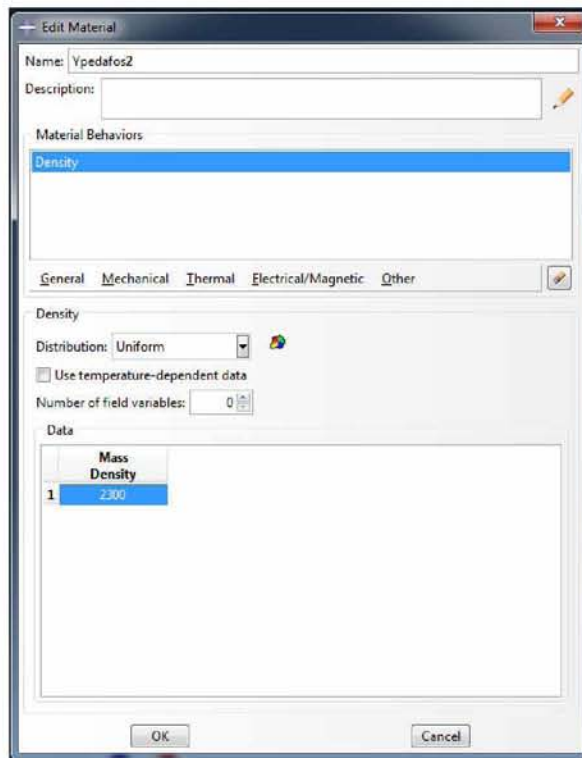
Εικόνα 4.3.24. Ορισμός γωνίας τριβής και γωνίας διαστολής υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.



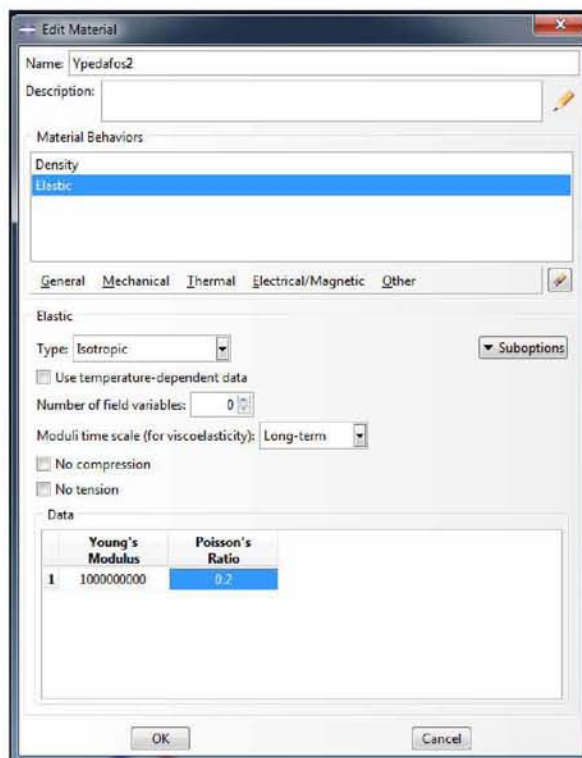
Εικόνα 4.3.25. Ορισμός συνοχής υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.



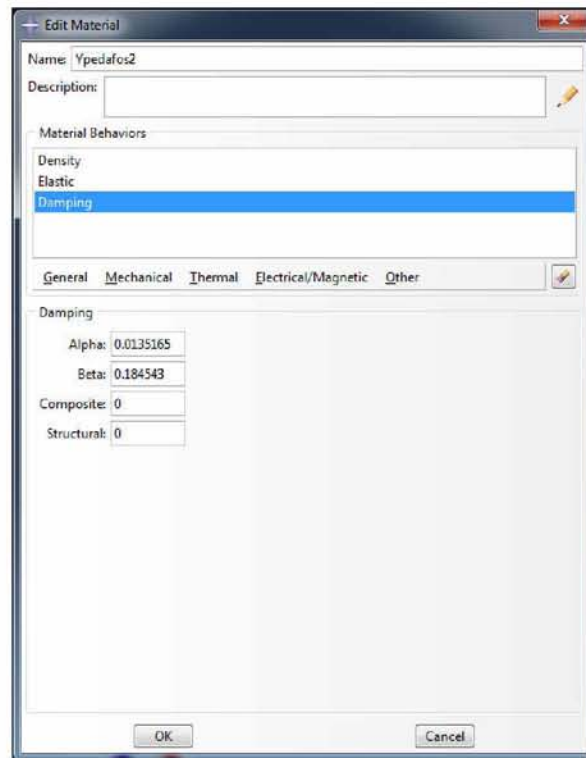
Εικόνα 4.3.26. Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού ανώτερης στρώσης υπεδάφους.



Εικόνα 4.3.27. Ορισμός πυκνότητας υλικού κατώτερης στρώσης υπεδάφους.



Εικόνα 4.3.28. Ορισμός μέτρου ελαστικότητας και δείκτη Poisson υλικού κατώτερης στρώσης υπεδάφους.



Εικόνα 4.3.29. Ορισμός συντελεστών απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  υλικού κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

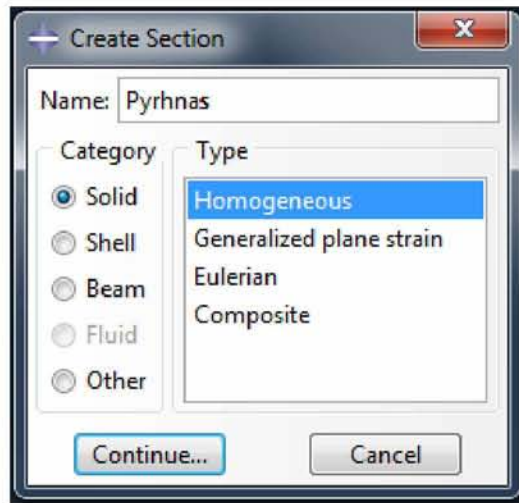
Για τη δημιουργία διατομών επιλέγεται η εντολή **Create Section**.



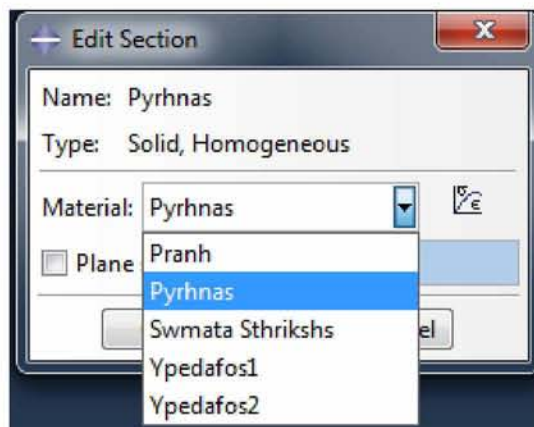
Εικόνα 4.3.30. Εντολή δημιουργίας διατομής.



Στο παράθυρο που εμφανίζεται, αφού ονομαστεί η διατομή, επιλέγεται κατηγορία διατομής (**Category**) συμπαγής (**Solid**) και τύπος διατομής (**Type**) ομοιογενής (**Homogeneous**). Πιέζεται **Continue** και στο παράθυρο **Edit Section** επιλέγεται ως υλικό της διατομής (**Material**) το υλικό του πυρήνα.

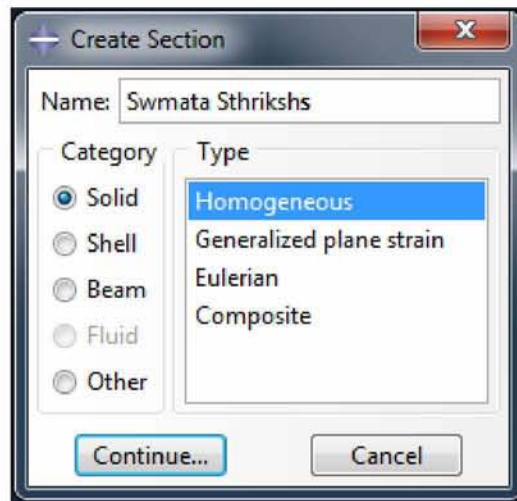


Εικόνα 4.3.31. Επιλογή τύπου διατομής πυρήνα.

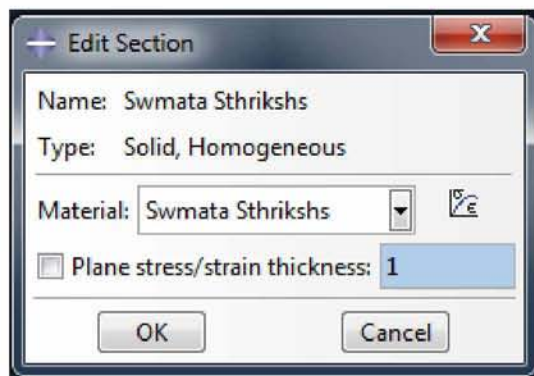


Εικόνα 4.3.32. Επιλογή υλικού διατομής πυρήνα.

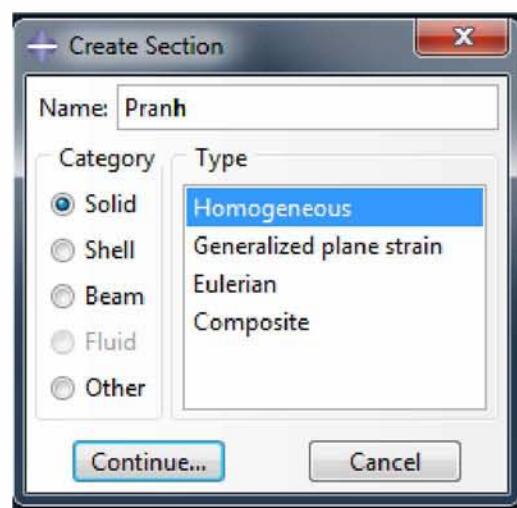
Με την ίδια διαδικασία δημιουργούνται και οι υπόλοιπες διατομές όπως φαίνεται παρακάτω.



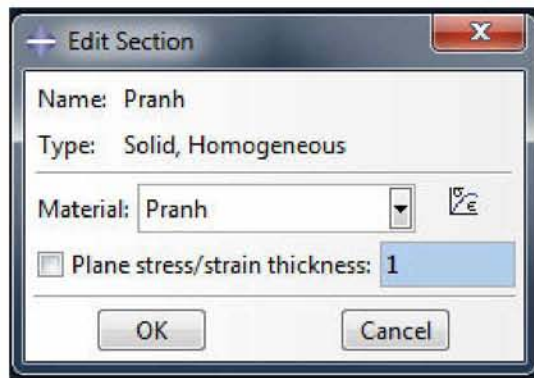
Εικόνα 4.3.33. Επιλογή τύπου διατομής σωμάτων στήριξης.



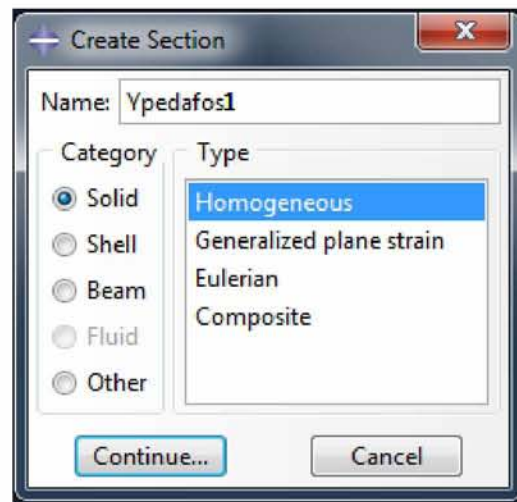
Εικόνα 4.3.34. Επιλογή υλικού διατομής σωμάτων στήριξης.



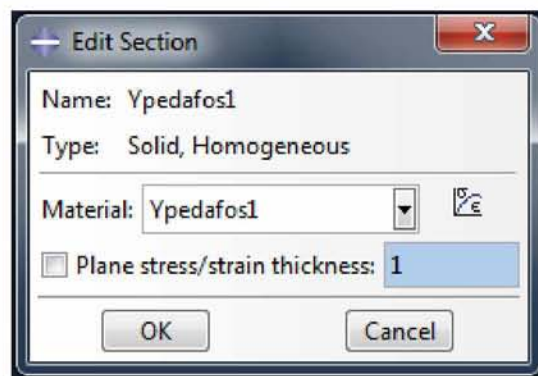
Εικόνα 4.3.35. Επιλογή τύπου διατομής πρανών.



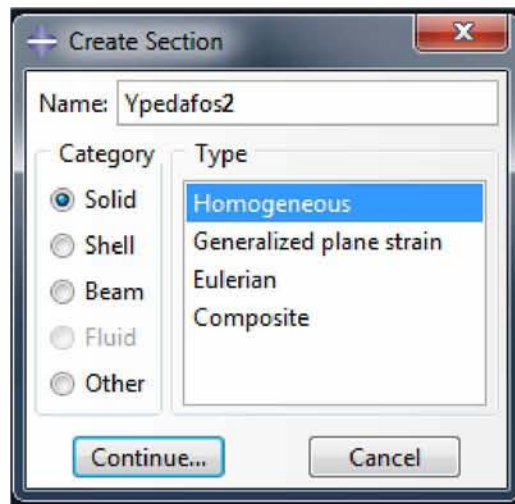
Εικόνα 4.3.36. Επιλογή υλικού διατομής πρανών.



Εικόνα 4.3.37. Επιλογή τύπου διατομής ανώτερης στρώσης υπεδάφους.



Εικόνα 4.3.38. Επιλογή υλικού διατομής ανώτερης στρώσης υπεδάφους.



Εικόνα 4.3.39. Επιλογή τύπου διατομής κατώτερης στρώσης υπεδάφους.



Εικόνα 4.3.40. Επιλογή υλικού διατομής κατώτερης στρώσης υπεδάφους.

## ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΣΤΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

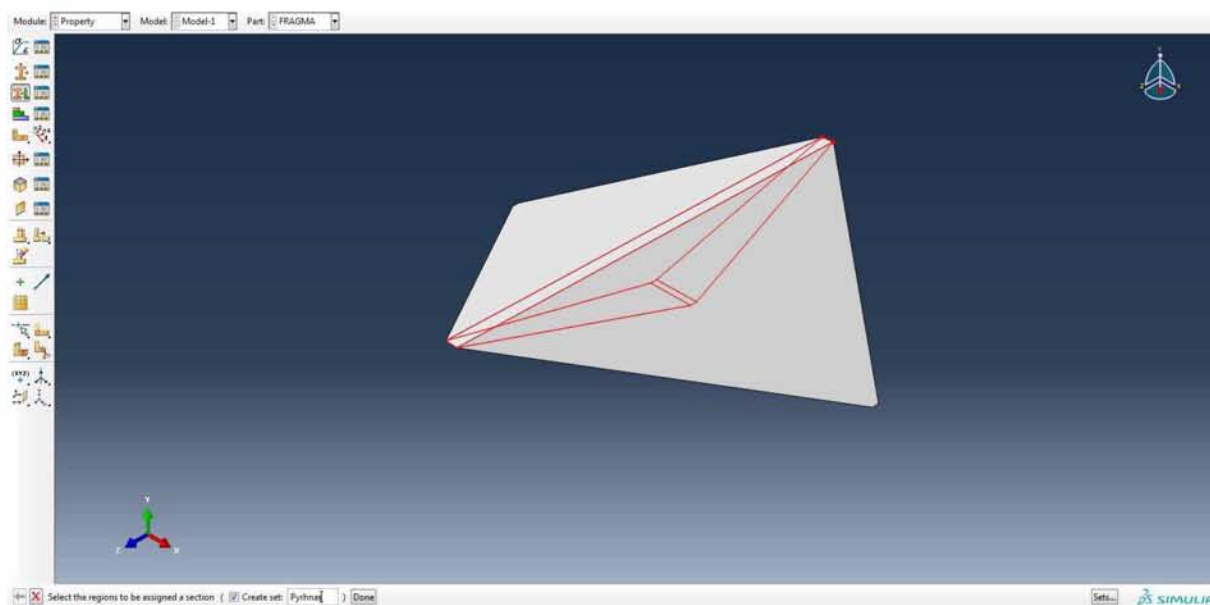
Επιλέγεται η εντολή **Assign Section**.





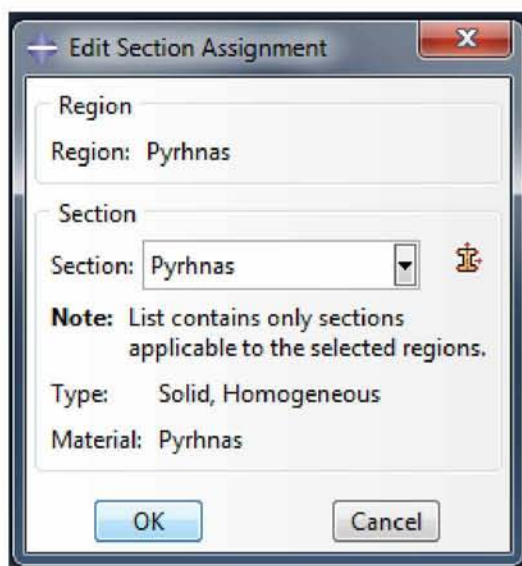
Εικόνα 4.3.41. Εντολή αντιστοίχισης διατομής.

Ζητείται να επιλεγεί η περιοχή η οποία θα λάβει ιδιότητες υλικού. Επιλέγεται ο πυρήνας του φράγματος και (προαιρετικά) τσεκάρεται η επιλογή **Create Set** και στο διπλανό πλαίσιο ονομάζεται το συγκεκριμένο set. Τα sets που δημιουργούνται αποθηκεύονται στο πρόγραμμα, καθιστώντας τη μελλοντική επιλογή συγκεκριμένων τμημάτων του μοντέλου (για τα οποία δημιουργήθηκαν sets) ευκολότερη.



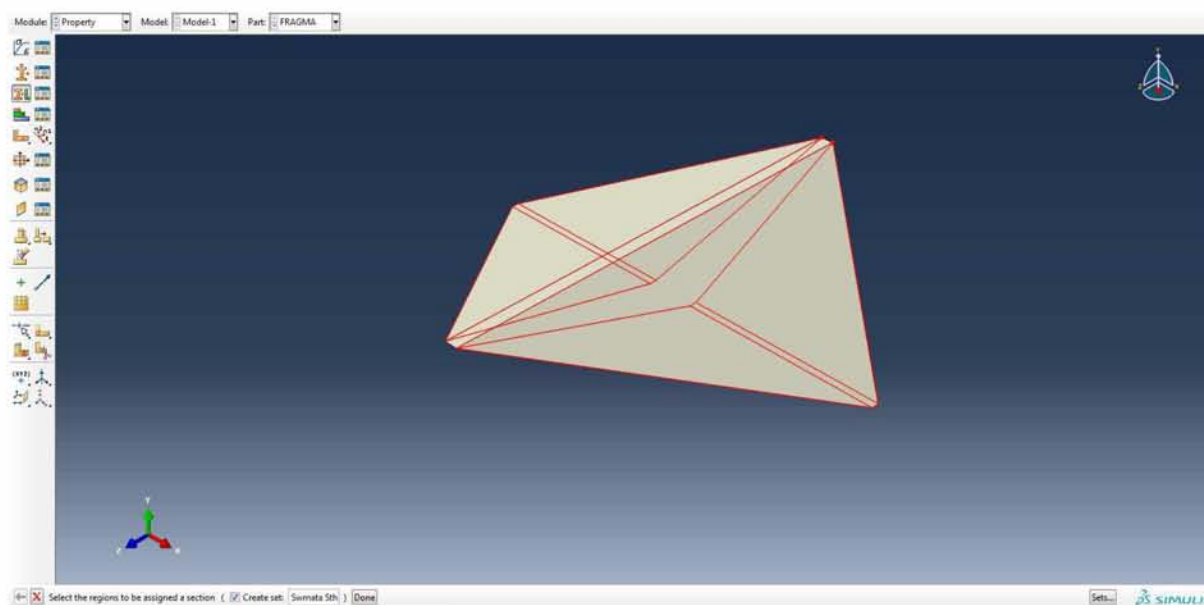
Εικόνα 4.3.42. Επιλογή πυρήνα φράγματος.

Αφού πατηθεί **Done**, εμφανίζεται το παράθυρο **Edit Section Assignment** στο οποίο επιλέγεται η γενικευμένη διατομή (section) με τις ιδιότητες του πυρήνα και κλικάρεται **OK**.

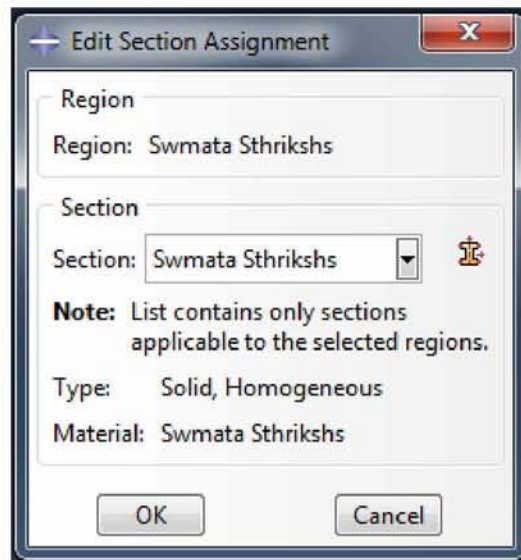


Εικόνα 4.3.43. Αντιστοίχιση διατομής πυρήνα στον πυρήνα του φράγματος.

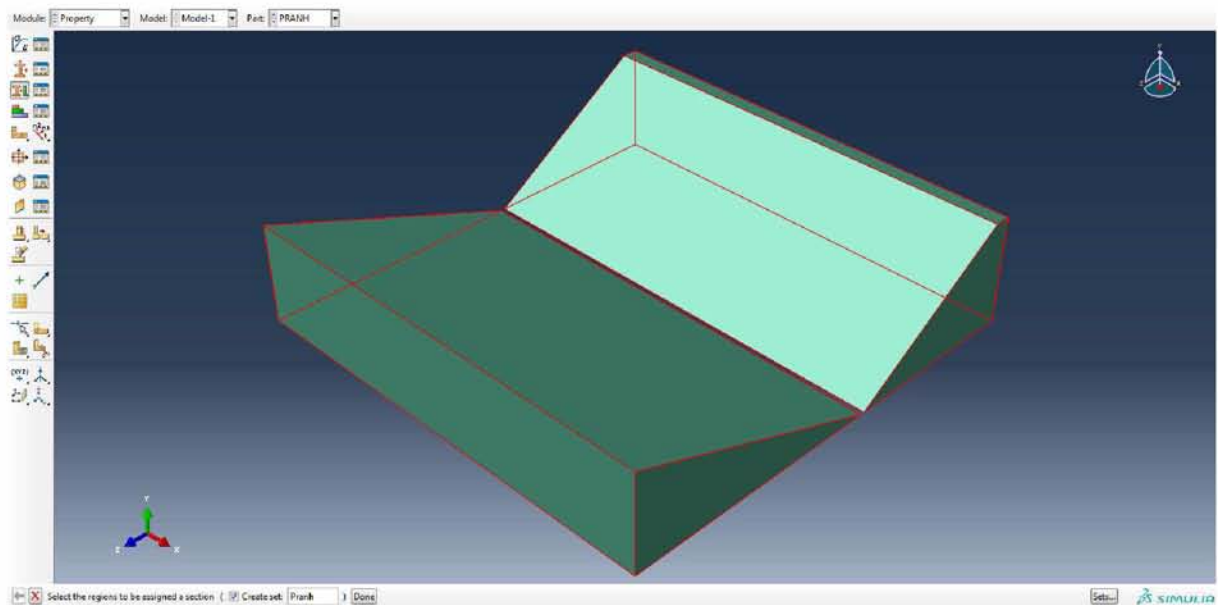
Με τον ίδιο τρόπο αντιστοιχίζονται και οι υπόλοιπες διατομές στα υπόλοιπα τμήματα του μοντέλου.



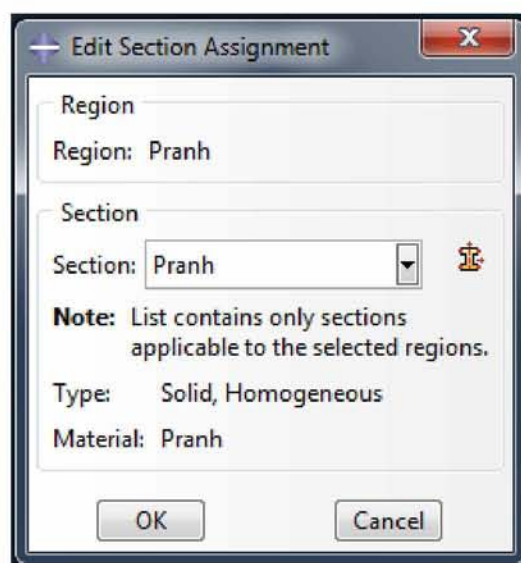
Εικόνα 4.3.44. Επιλογή σωμάτων στήριξης φράγματος.



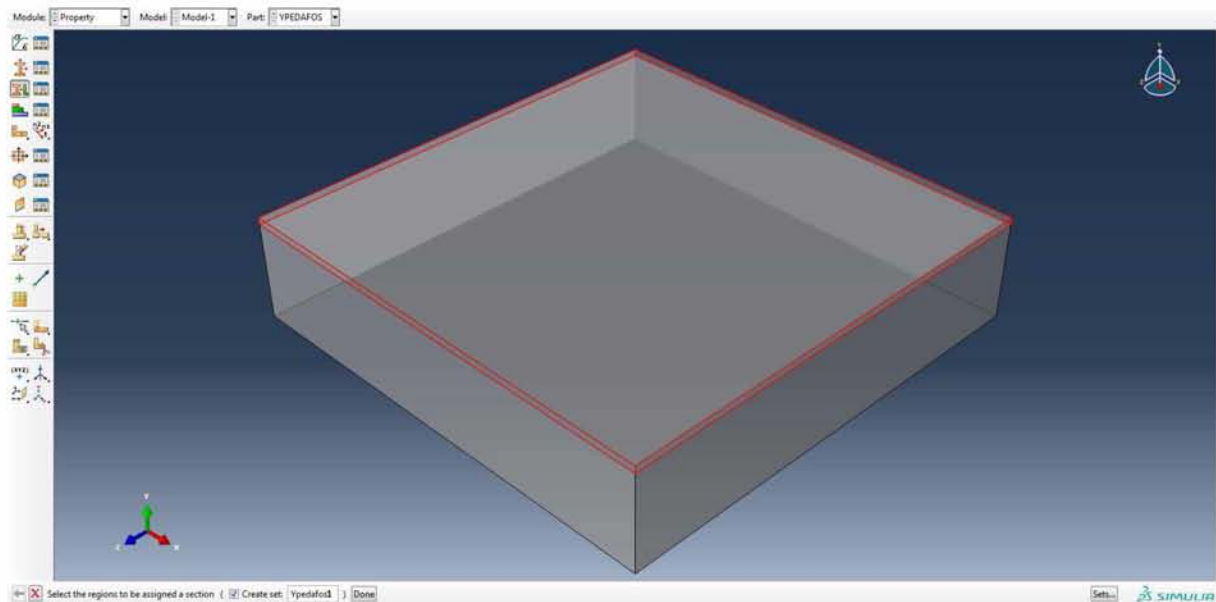
Εικόνα 4.3.45. Αντιστοίχιση διατομής σωμάτων στήριξης στα σώματα στήριξης του φράγματος.



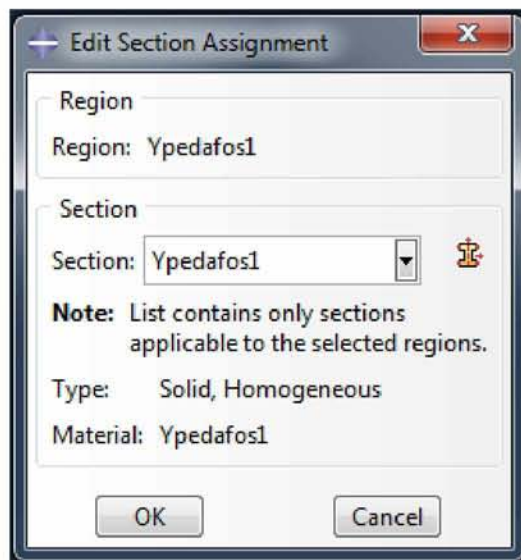
Εικόνα 4.3.46. Επιλογή πρανών κοιλιάδας.



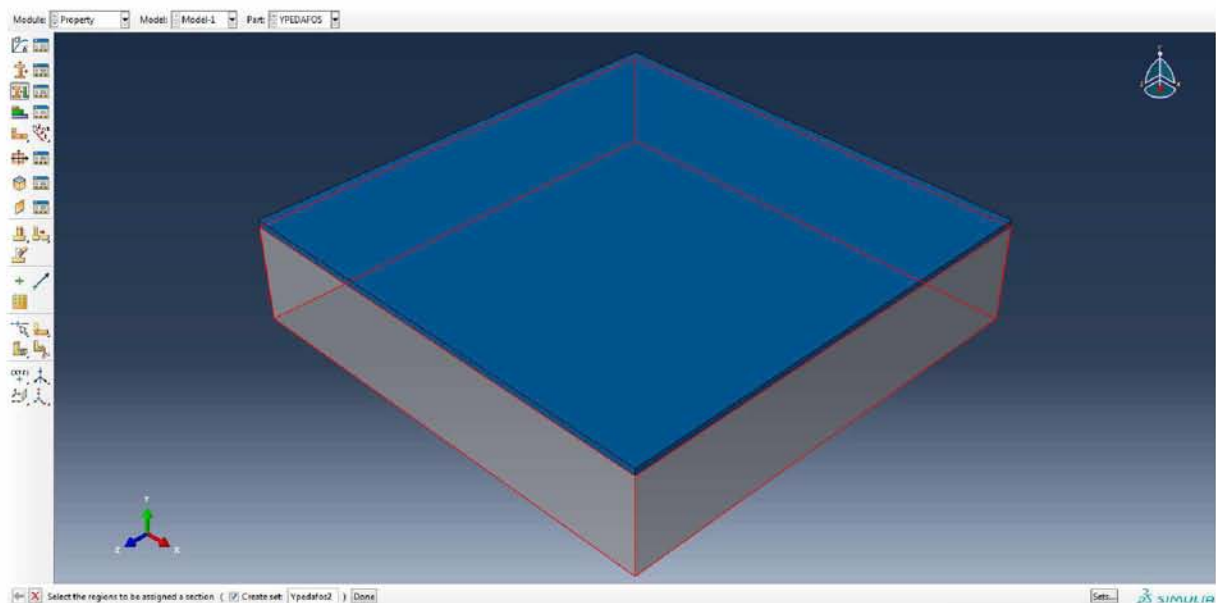
Εικόνα 4.3.47. Αντιστοίχιση διατομής πρανών στα πρανή της κοιλιάδας.



Εικόνα 4.3.48. Επιλογή ανώτερης στρώσης υπεδάφους.

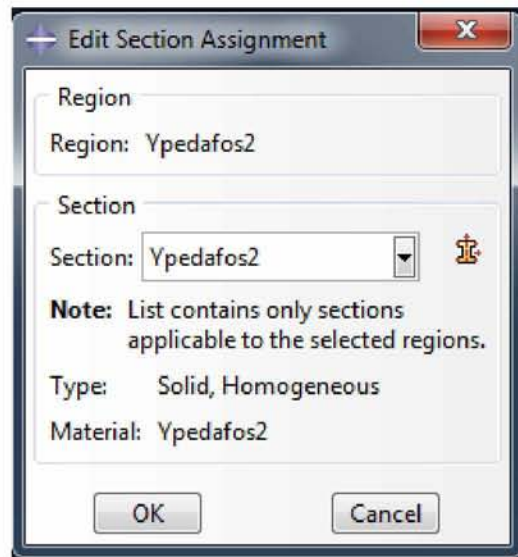


Εικόνα 4.3.49. Αντιστοίχιση διατομής ανώτερης στρώσης στην ανώτερη στρώση του υπεδάφους.



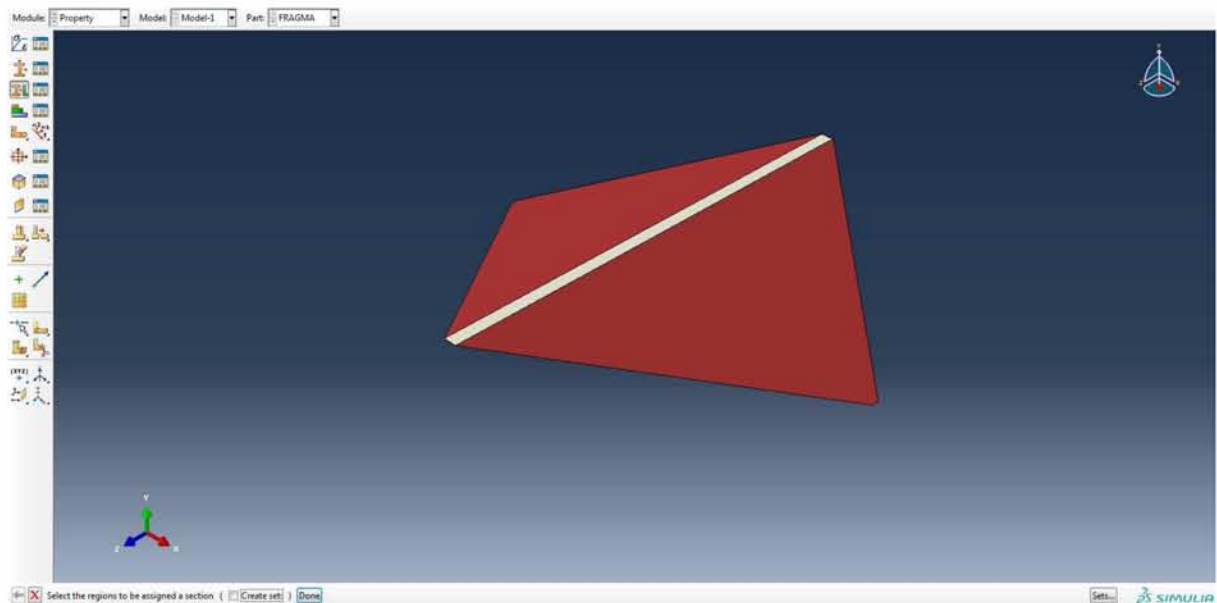
Εικόνα 4.3.50. Επιλογή κατώτερης στρώσης υπεδάφους.



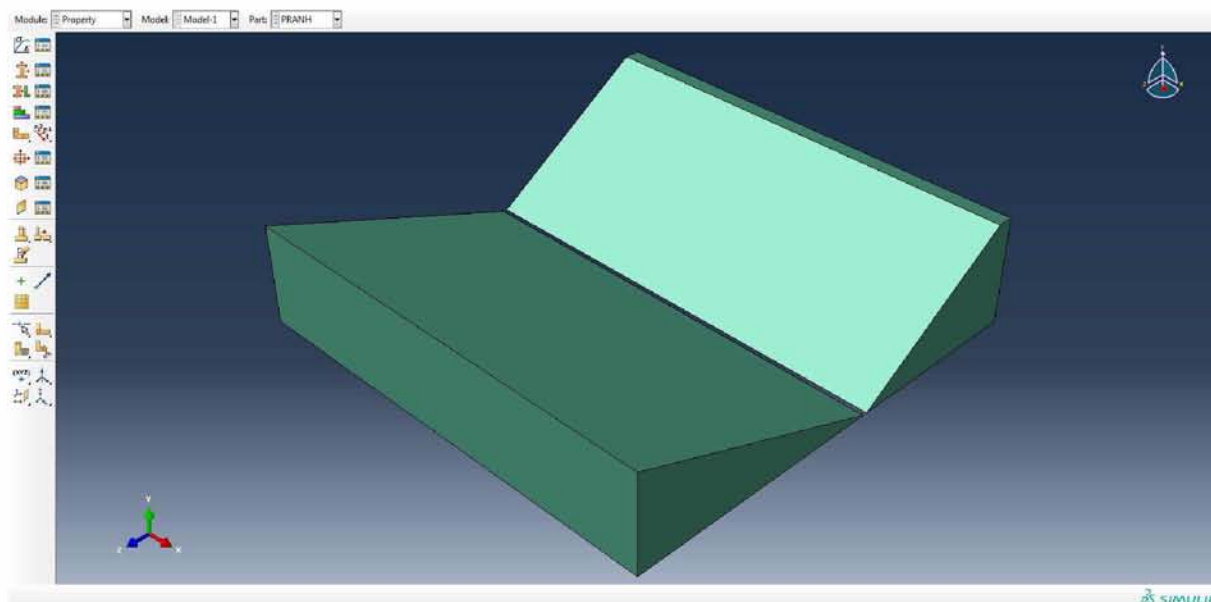


Εικόνα 4.3.51. Αντιστοίχιση διατομής κατώτερης στρώσης στην κατώτερη στρώση του υπεδάφους.

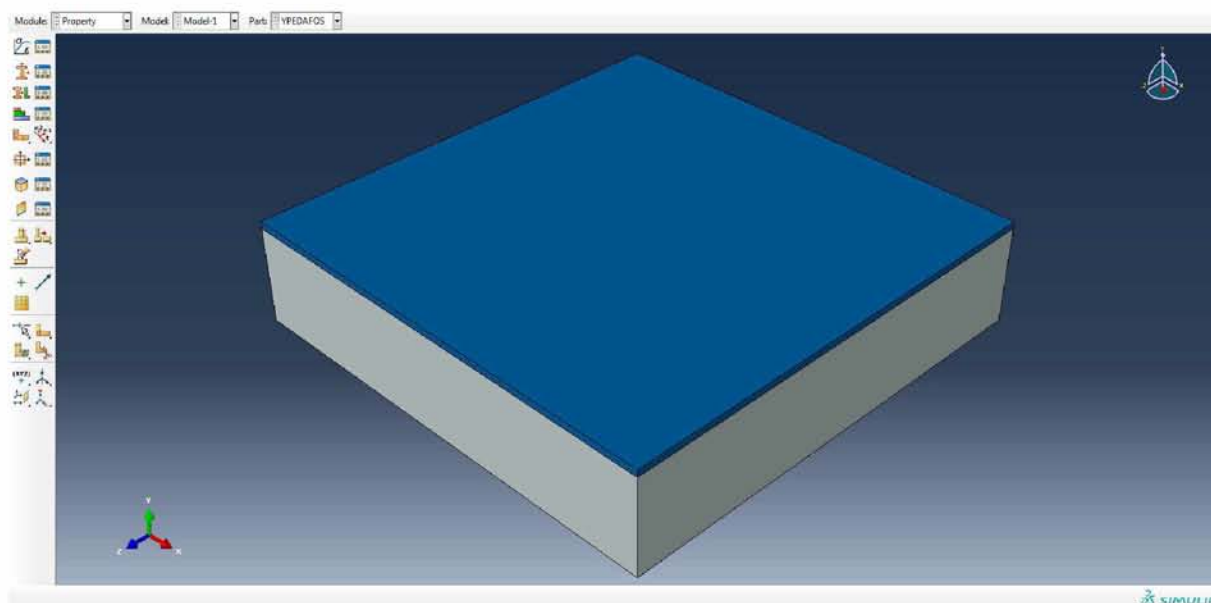
Σε αυτό το σημείο όλα τα τμήματα του μοντέλου διαθέτουν υλικά με τις επιθυμητές ιδιότητες (κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό υλικό).



Εικόνα 4.3.52. Απεικόνιση υλικών φράγματος.



Εικόνα 4.3.53. Απεικόνιση υλικού πρανών κοιλάδας.



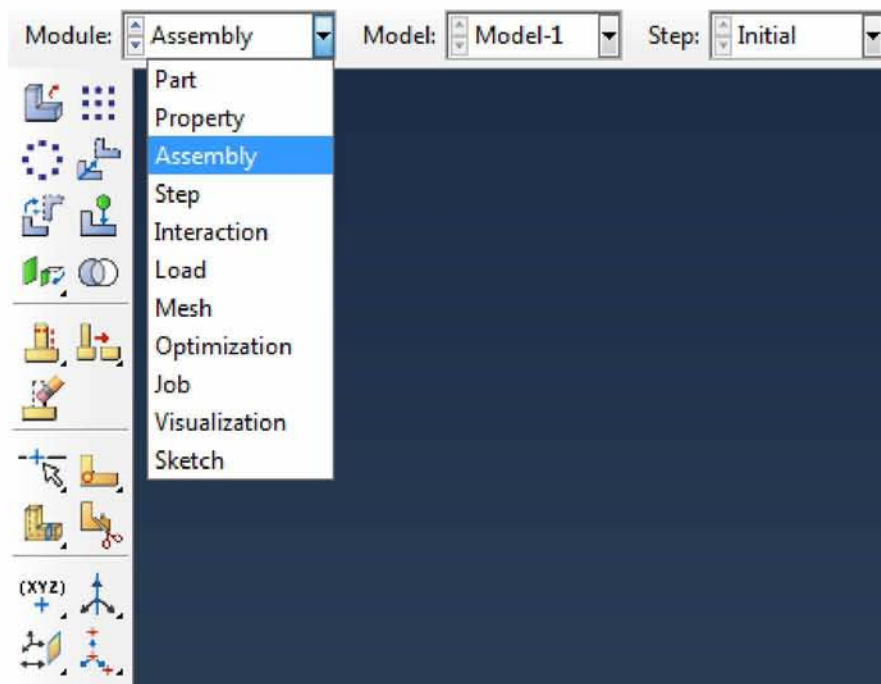
Εικόνα 4.3.54. Απεικόνιση υλικών υπεδάφους.

## **4.4 Assembly Module**

Ένα τμήμα, μετά τη δημιουργία του, υπάρχει στο δικό του σύστημα συντεταγμένων και είναι ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα τμήματα του μοντέλου. Στην παρούσα ενότητα (συναρμολόγησης) συγκεντρώνονται όλα τα τμήματα σε κοινό μοντέλο. Για να γίνει αυτό, δημιουργούνται οντότητες (instances) από τα τμήματα (parts) του μοντέλου, οι οποίες τοποθετούνται σε κοινό σύστημα συντεταγμένων και μετακινούνται η μία σε σχέση με την άλλη, ώστε το τελικό μοντέλο να έχει την επιθυμητή διάταξη. Κάθε οντότητα διατηρεί τη συσχέτισή της με το αρχικό τμήμα από το οποίο δημιουργήθηκε όσον αφορά τη γεωμετρία, δηλαδή ενδεχόμενη αλλαγή στη γεωμετρία του τμήματος μεταφέρεται αυτομάτως από το

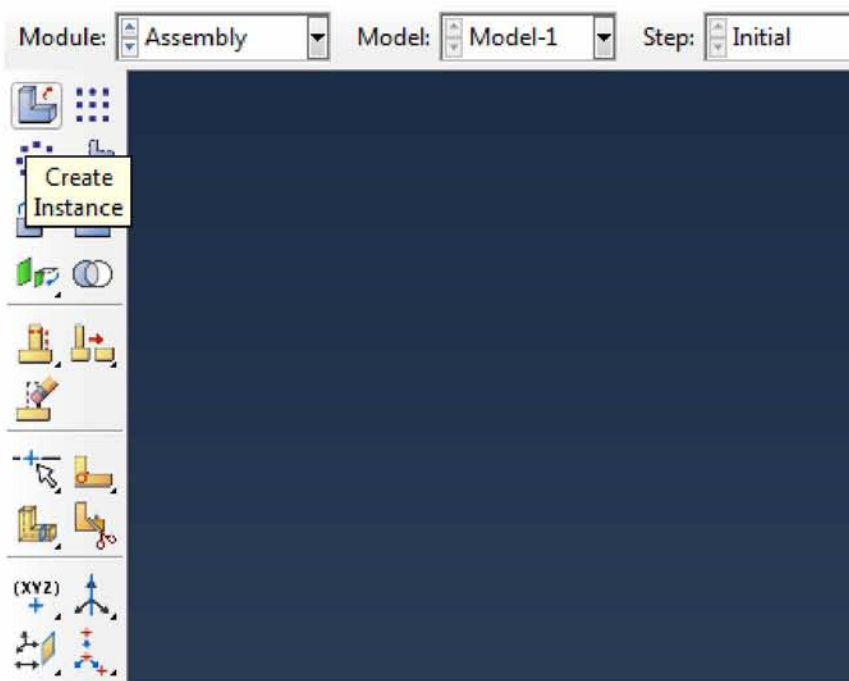
Abaqus και στην αντίστοιχη οντότητα, ενώ η απευθείας επεξεργασία της γεωμετρίας μιας οντότητας δεν είναι δυνατή. Μία οντότητα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανεξάρτητη (independent) ή ως εξαρτημένη (dependent). Μια ανεξάρτητη οντότητα αποτελεί ουσιαστικά ένα αντίγραφο του αρχικού τμήματος και διακριτοποιείται (mesh) ανεξάρτητα από αυτό. Αντίθετα, μια εξαρτημένη είναι απλά ένας δείκτης τους αντίστοιχου τμήματος και η διακριτοποίηση εφαρμόζεται σε αυτό και όχι στην οντότητα. Για λόγους ευκολίας στη διαδικασία της διακριτοποίησης και κυρίως λόγω της δυνατότητας επιλογής διαφορετικών πυκνοτήτων διακριτοποίησης για την κάθε οντότητα, που γίνεται σε επόμενη ενότητα της μοντελοποίησης, στην παρούσα εργασία θεωρήθηκαν εξαρτημένες οντότητες (dependent instances).

Αρχικά, επιλέγεται η ενότητα **Assembly**.



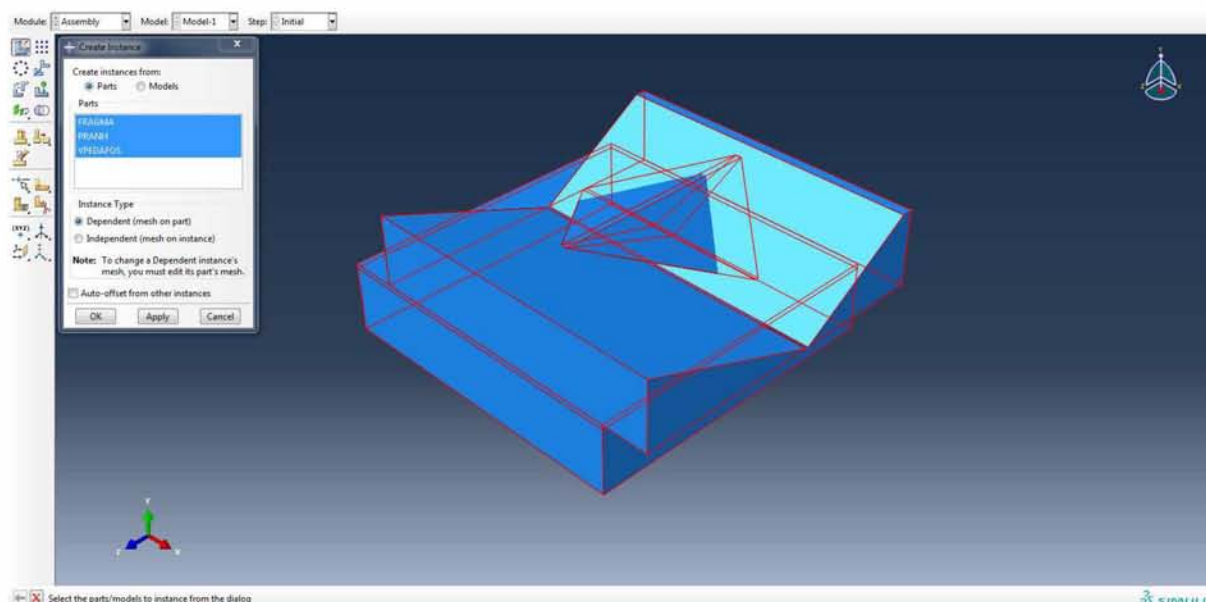
Εικόνα 4.4.1. Επιλογή ενότητας Assembly Module.

Δίνεται η εντολή δημιουργίας οντότητας (**Create Instance**).



Εικόνα 4.4.2. Εντολή δημιουργίας οντότητας.

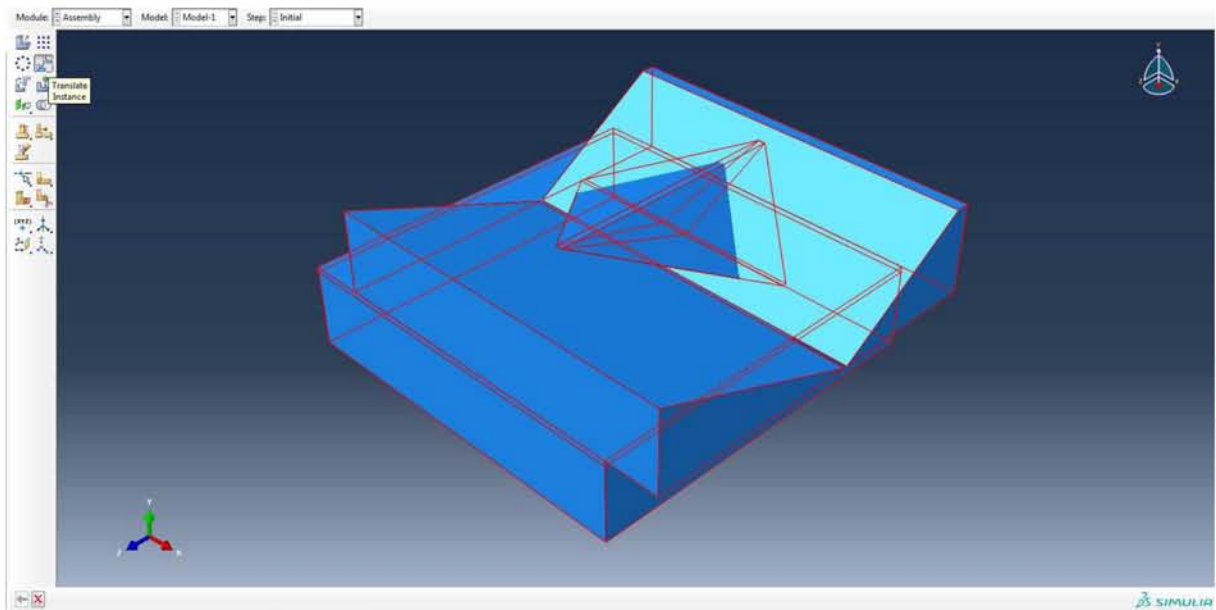
Επιλέγονται και τα 3 τμήματα (**Parts**) του μοντέλου (φράγμα, πρανή κοιλάδας και υπέδαφος), ώστε να δημιουργηθούν απευθείας οι 3 οντότητες του μοντέλου, χωρίς να χρειάζεται να επαναληφθεί η εντολή. Στον τύπο οντότητας (**Instance Type**) επιλέγεται εξαρτημένη (**Dependent**). Στο παράθυρο προβολής οπτικοποιούνται οι αντίστοιχες οντότητες, από τις οποίες θα προκύψει το τελικό μοντέλο.



Εικόνα 4.4.3. Επιλογή των τμημάτων του μοντέλου για τη δημιουργία οντοτήτων.

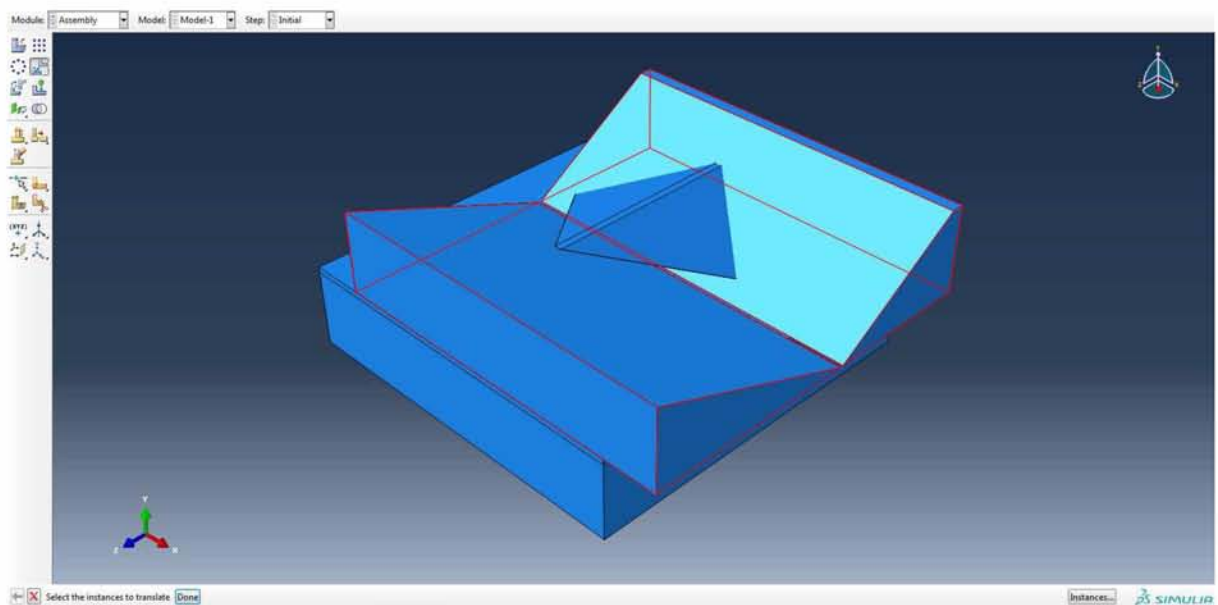
Παρατηρείται ότι απαιτείται μετακίνησή τους, ώστε να έρθουν στις κατάλληλες μεταξύ τους θέσεις. Επιλέγεται η εντολή μετακίνησης οντότητας (**Translate Instance**).





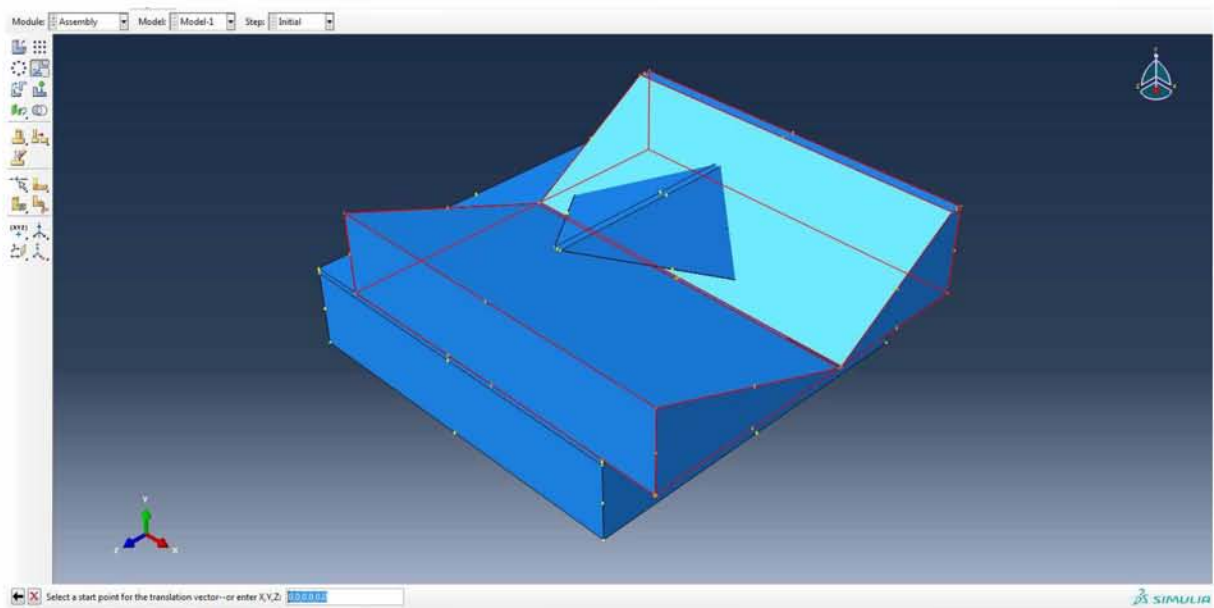
Εικόνα 4.4.4. Εντολή μετακίνησης οντότητας.

Ζητείται να επιλεγεί η οντότητα που πρόκειται να μετακινηθεί. Αρχικά, μετακινούνται τα πρηνή σε σχέση με το υπέδαφος. Κλικάρεται η οντότητα των πρηνών της κοιλάδας και **Done**.

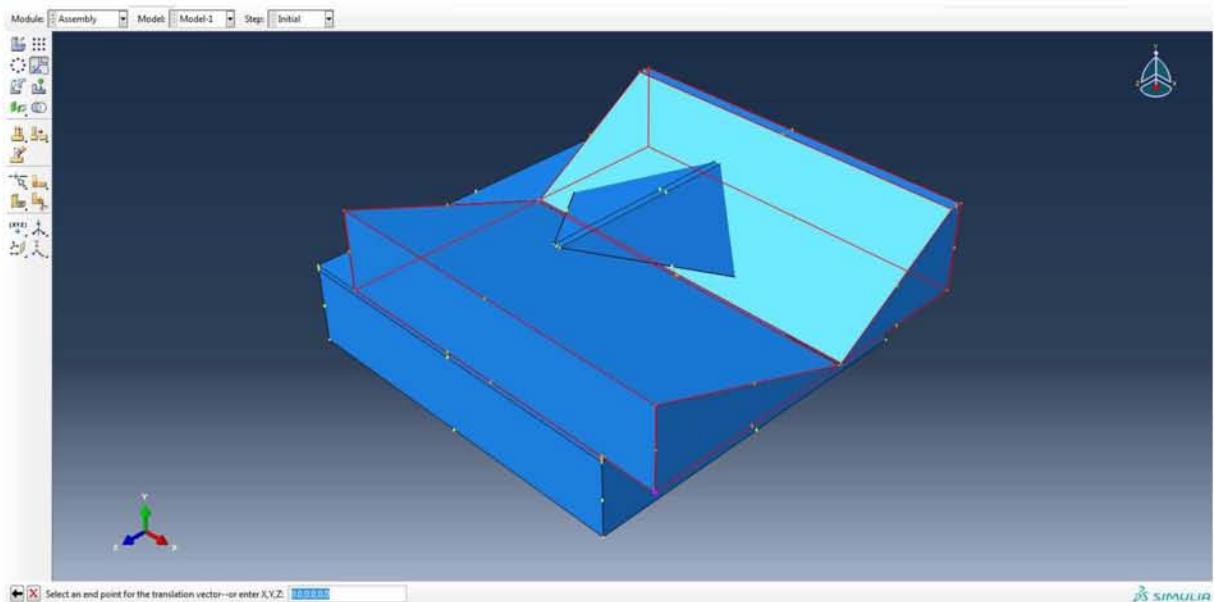


Εικόνα 4.4.5. Επιλογή μετακίνησης πρηνών.

Πρέπει τώρα να επιλεγθούν ή να εισαχθούν οι συντεταγμένες του αρχικού και του τελικού σημείου βάσει των οποίων θα γίνει η μετακίνηση. Κλικάρεται η κατώτερη μπροστινή γωνία της οντότητας των πρηνών ως πρώτο σημείο και η ανώτερη μπροστινή γωνία του υπεδάφους ως δεύτερο σημείο.

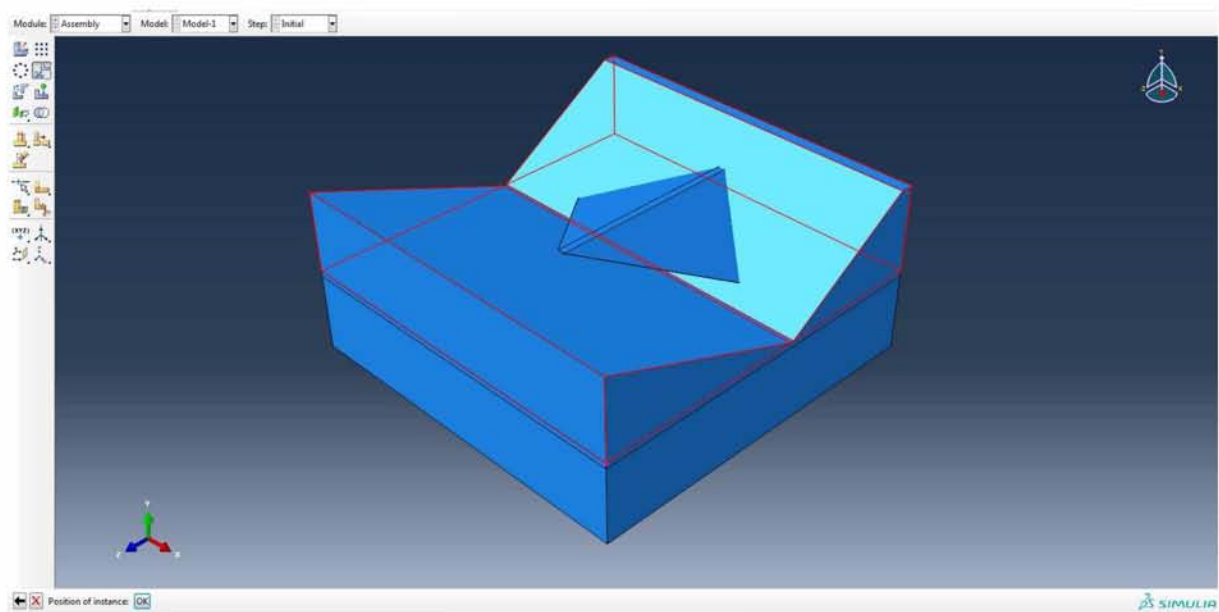


Εικόνα 4.4.6. Επιλογή πρώτου σημείου διανύσματος μετακίνησης πρανών.



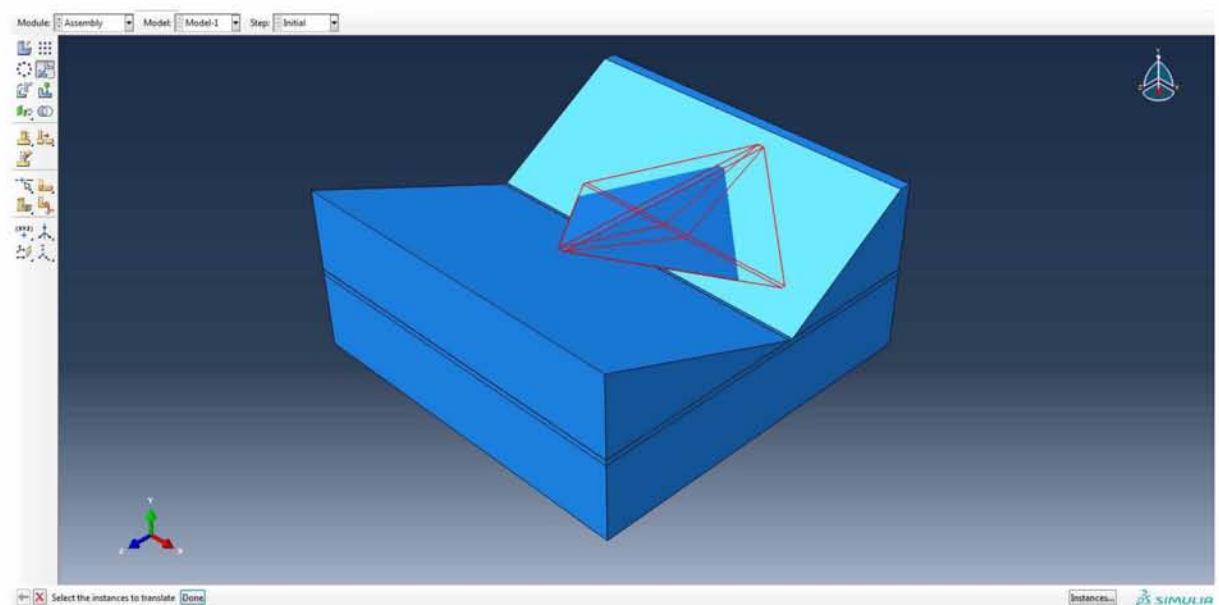
Εικόνα 4.4.7. Επιλογή δεύτερου σημείου διανύσματος μετακίνησης πρανών.

Παρατηρείται ότι τα πρανά και το υπέδαφος βρίσκονται πλέον στην επιθυμητή μεταξύ τους θέση, οπότε πιέζεται **OK**.



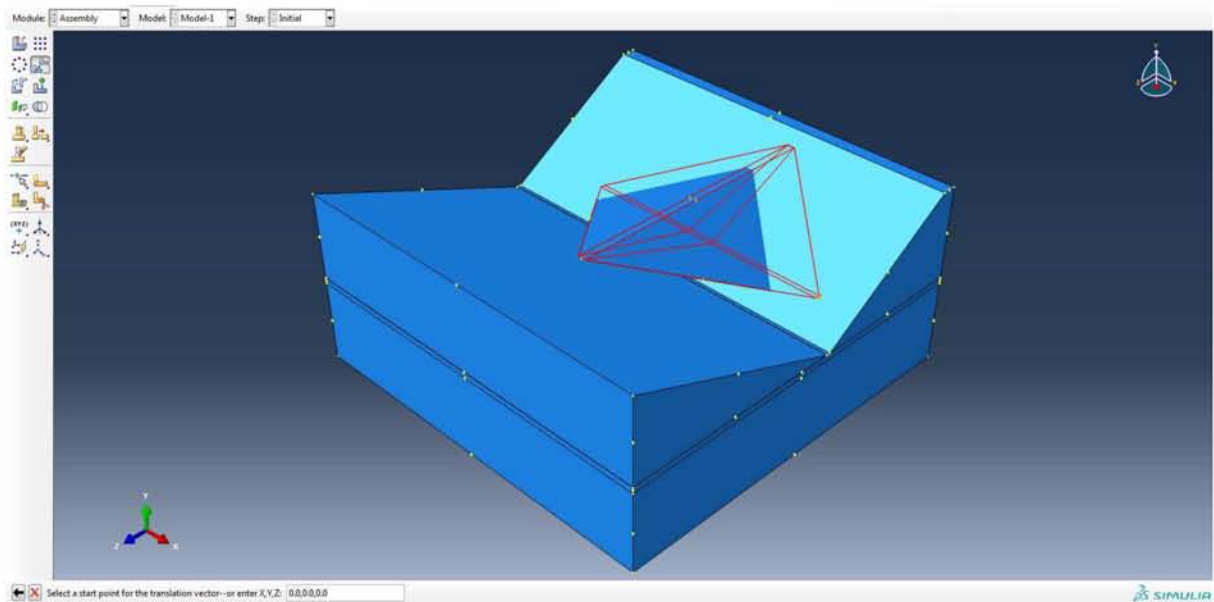
Εικόνα 4.4.8. Ολοκλήρωση μετακίνησης πρανών.

Αυτό που απομένει είναι να μεταφερθεί και το φράγμα στην επιθυμητή θέση. Επιλέγεται η εντολή μετακίνησης οντότητας (**Translate Instance**) και στη συνέχεια η οντότητα του φράγματος και **Done**.

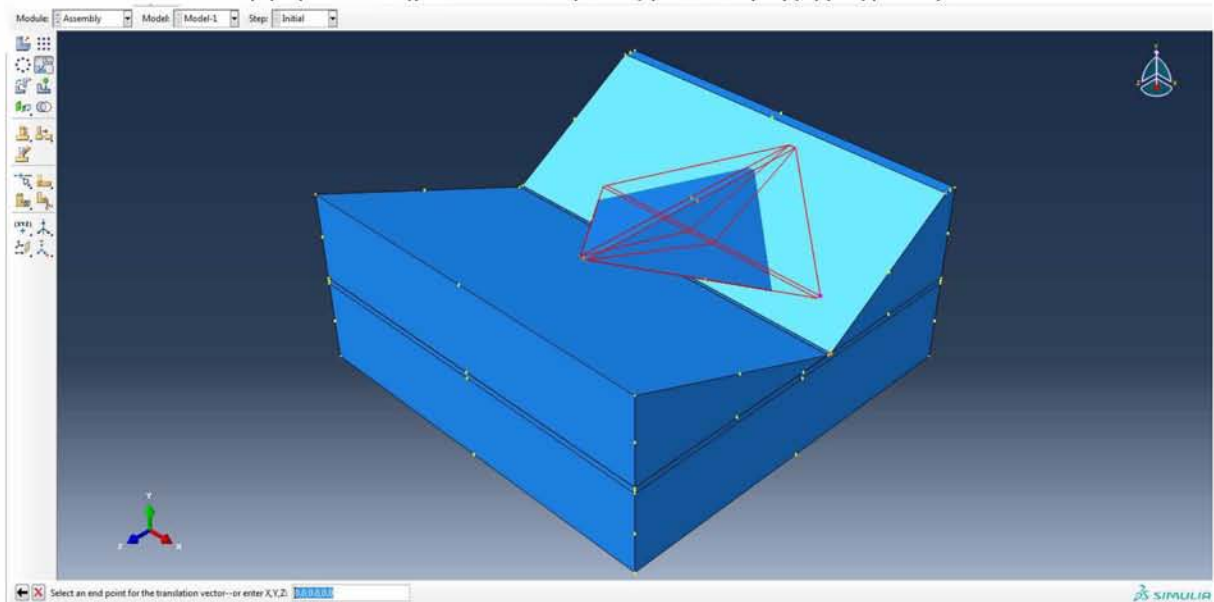


Εικόνα 4.4.9. Επιλογή μετακίνησης φράγματος.

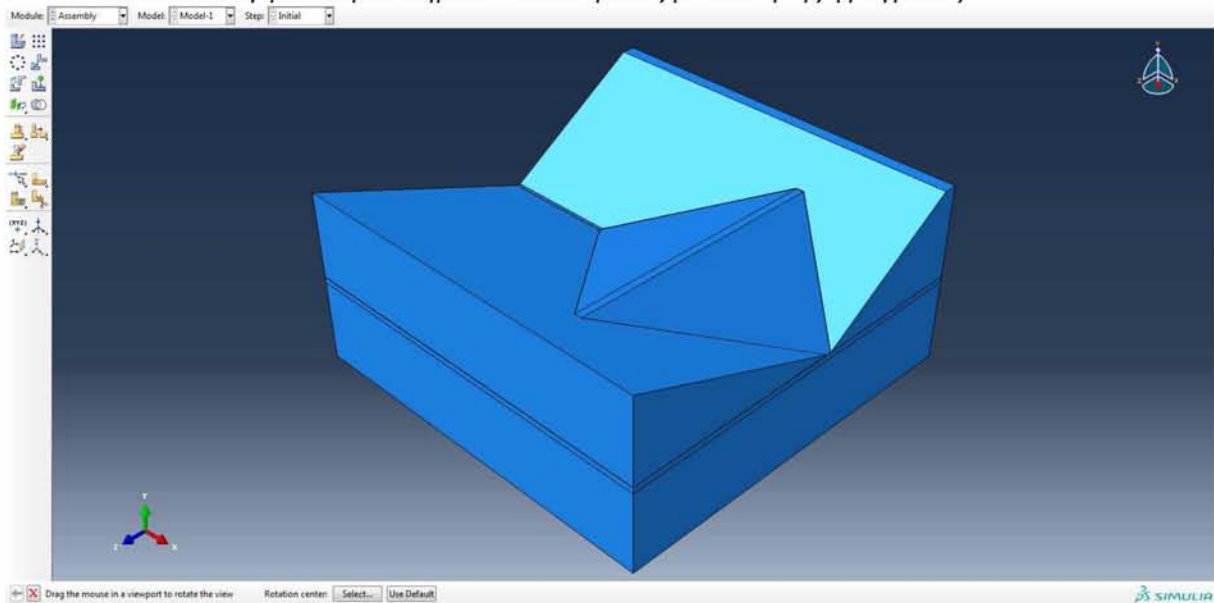
Στη δεξιά όψη του μοντέλου κλικάρεται η δεξιά γωνία της βάσης του φράγματος ως αρχικό σημείο και η δεξιά γωνία της λεπτής λωρίδας του υπεδάφους στην οποία θα εδράζεται το φράγμα ως τελικό σημείο μετακίνησης.



Εικόνα 4.4.10. Επιλογή πρώτου σημείου διανύσματος μετακίνησης φράγματος.



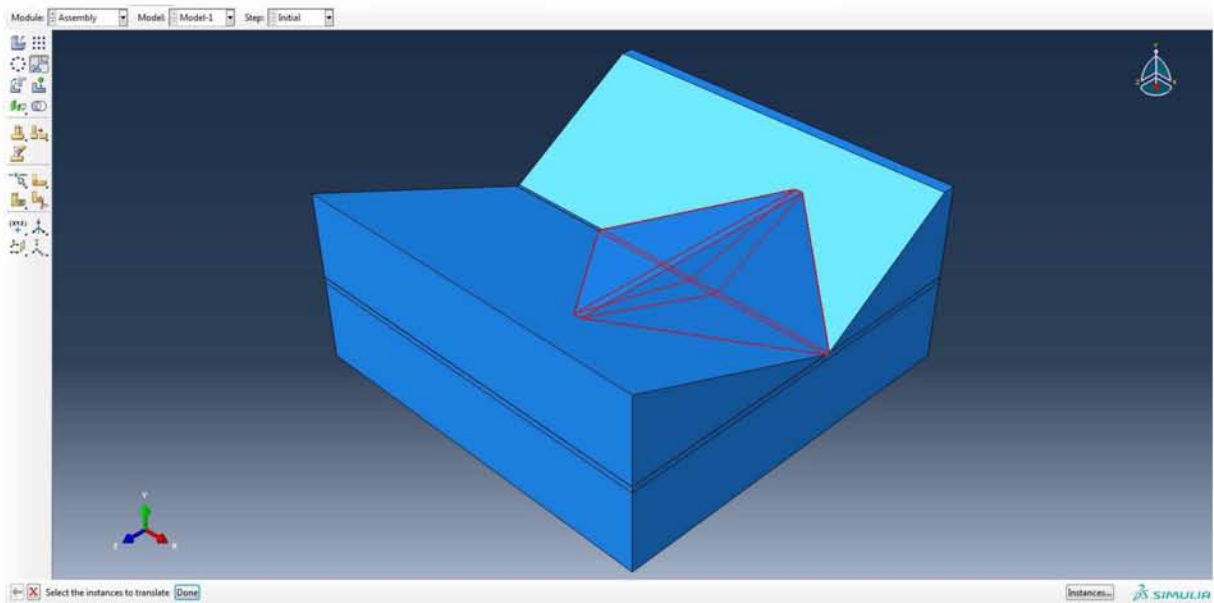
Εικόνα 4.4.11. Επιλογή δεύτερου σημείου διανύσματος μετακίνησης φράγματος.



Εικόνα 4.4.12. Ολοκλήρωση πρώτης μετακίνησης φράγματος.

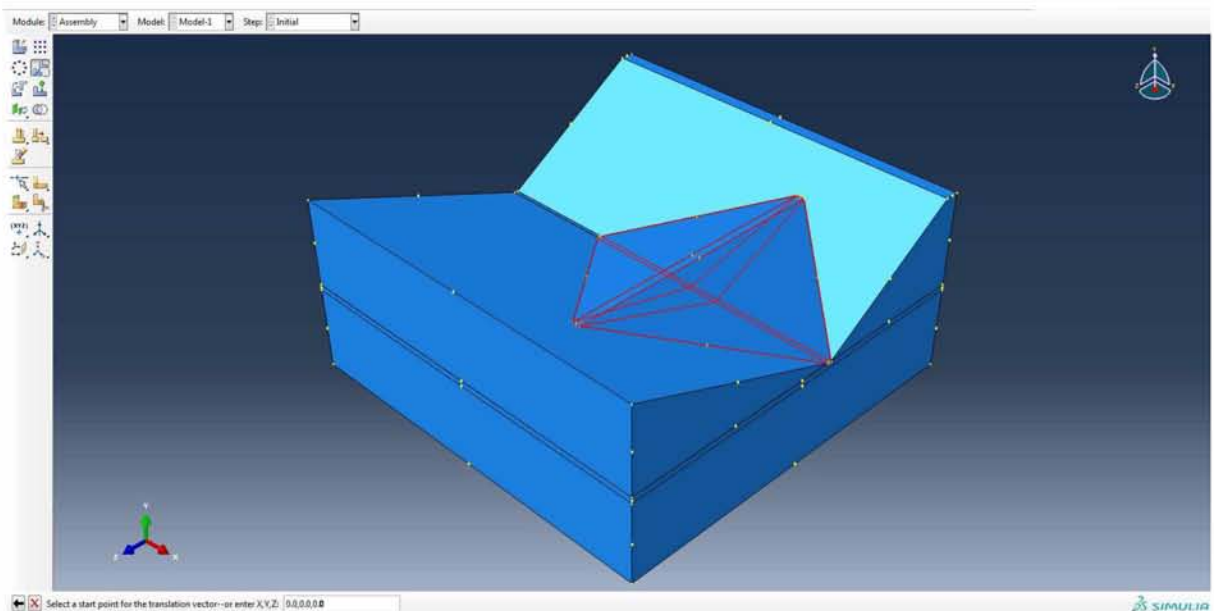


Δίνεται και πάλι η εντολή μετακίνησης οντότητας (**Translate Instance**) και επιλέγεται το φράγμα για το τελικό στάδιο μετακίνησης.

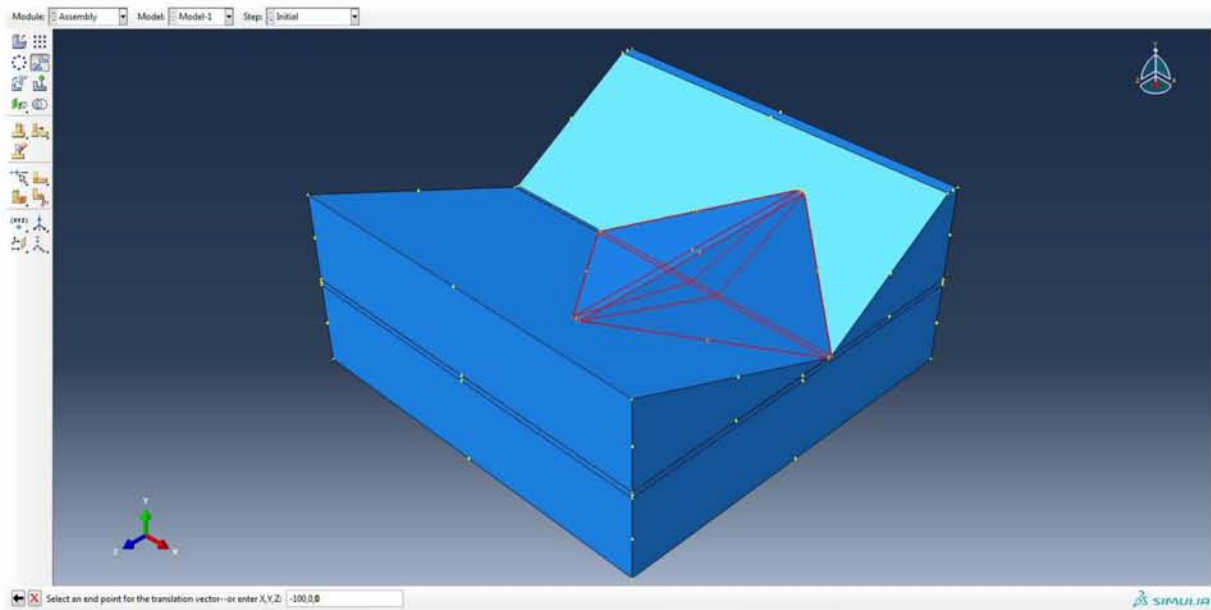


Εικόνα 4.4.13. Επιλογή (δεύτερης) μετακίνησης φράγματος.

Επειδή τα πρηνή και το υπέδαφος εκτείνονται 100m από το φράγμα στην κάθε οριζόντια διεύθυνση, το τελευταίο στάδιο μετακίνησης του φράγματος γίνεται με την εισαγωγή συντεταγμένων. Για το αρχικό σημείο πληκτρολογείται (0,0,0) και για το τελικό (-100,0,0), καθώς η μετακίνηση πρέπει να γίνει 100m κατά τη διεύθυνση του άξονα X και με φορά αντίθετη από αυτή που ορίζεται από το πρόγραμμα ως θετική.

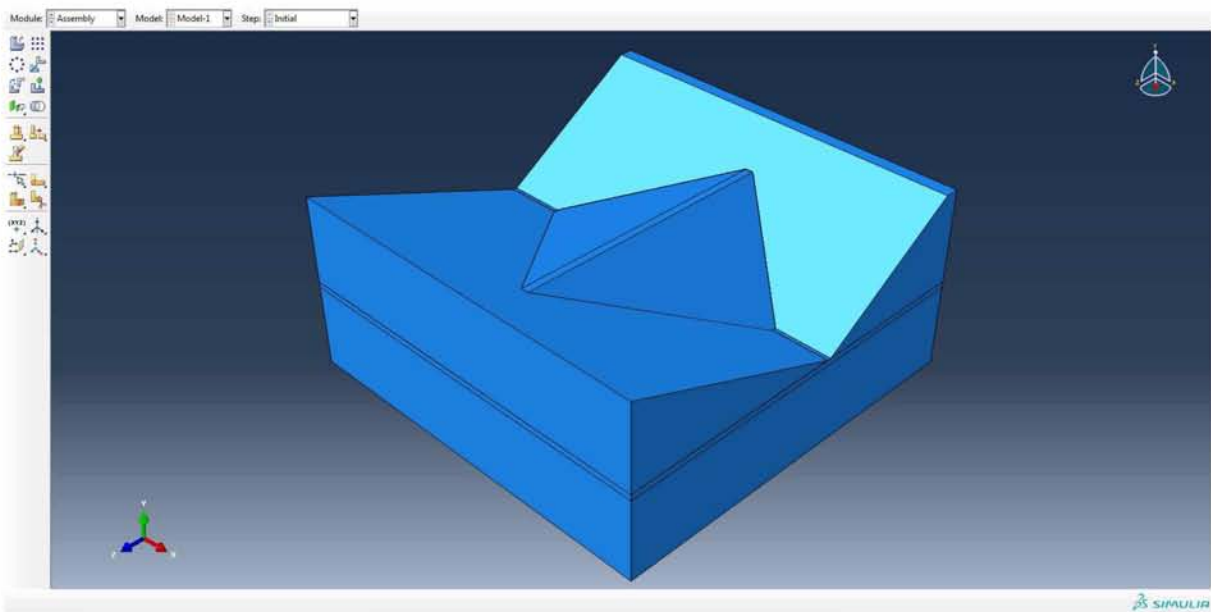


Εικόνα 4.4.14. Εισαγωγή συντεταγμένων πρώτου σημείου διανύσματος (δεύτερης) μετακίνησης φράγματος.

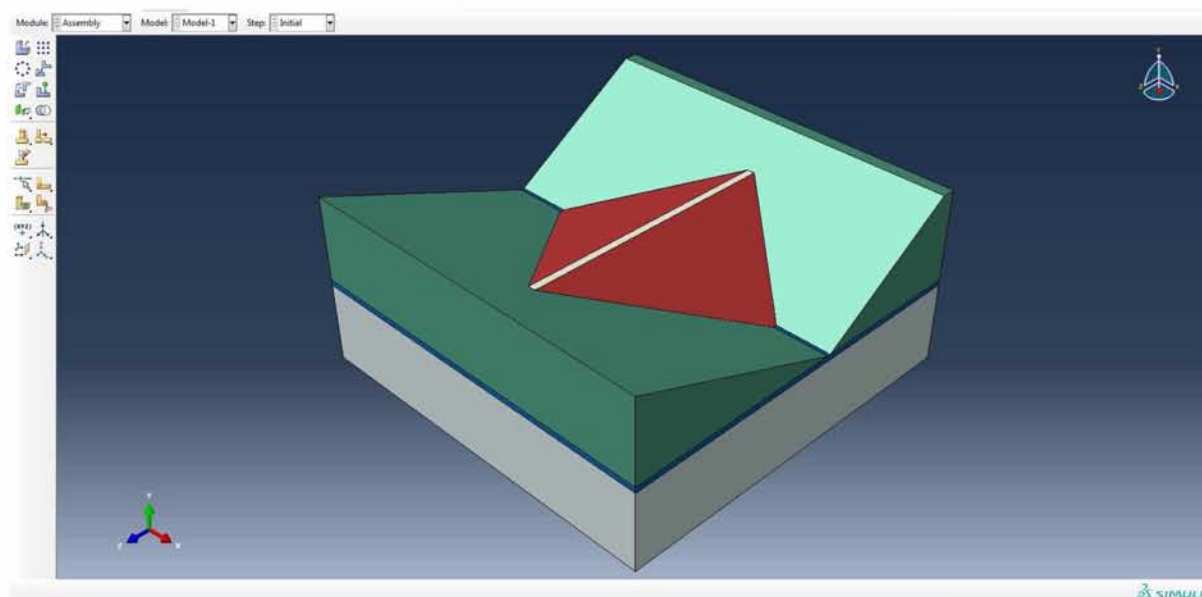


Εικόνα 4.4.15. Εισαγωγή συντεταγμένων δεύτερου σημείου διανύσματος (δεύτερης) μετακίνησης φράγματος.

Έτσι, προκύπτει το συγκεντρωτικό μοντέλο φράγματος – πρανών κοιλάδας – υπεδάφους θεμελίωσης, ενώ δίνεται και μια αναπαράσταση αυτού με διαφορετικούς χρωματισμούς των τμημάτων του ανάλογα με το υλικό τους (επιλογή **Materials** από σχετική λίστα στις γραμμές εργαλείων απεικόνισης).



Εικόνα 4.4.16. Συγκεντρωτικό μοντέλο φράγματος – πρανών – υπεδάφους.



Εικόνα 4.4.17. Απεικόνιση υλικών συγκεντρωτικού μοντέλου.

## **4.5 Step Module**

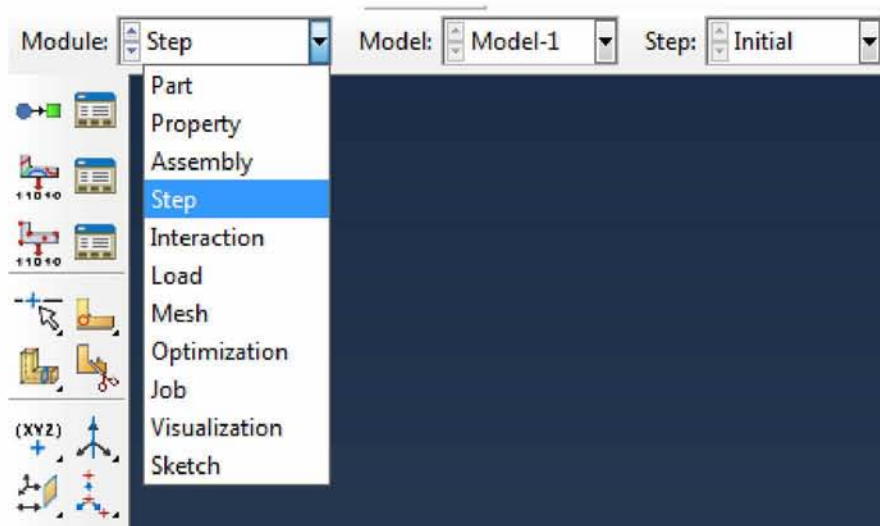
Στην ενότητα αυτή, ορίζεται μια ακολουθία από ένα ή περισσότερα βήματα (steps) με βάση την οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Παρέχεται, έτσι, ένας εύκολος τρόπος καταγραφής αλλαγών στις συνθήκες φόρτισης, στις οριακές συνθήκες, στον τρόπο αλληλεπίδρασης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου, στην προσθήκη ή αφαίρεση τμημάτων και γενικότερα οποιωνδήποτε άλλων αλλαγών μπορεί να προκύψουν στο μοντέλο κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Επιπλέον, στην παρούσα φάση της μοντελοποίησης, καθορίζεται το είδος της ανάλυσης και προσδιορίζονται τα δεδομένα εξόδου, δηλαδή τα ζητούμενα αποτελέσματα, καθώς και διάφορα στοιχεία ελέγχου.

Στην παρούσα μελέτη, τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή είναι το ίδιο βάρος του φράγματος, η υδροστατική πίεση στην ανάντη πλευρά του φράγματος λόγω της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό και η σεισμική διέγερση της κοιλάδας.

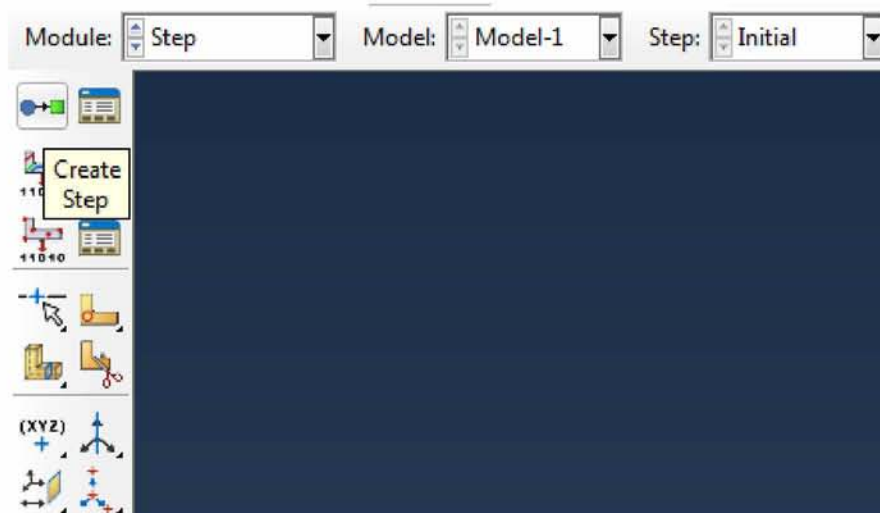
### **ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ (STEP 1-10)**

Η κατασκευή του φράγματος πραγματοποιήθηκε σταδιακά σε 10 βήματα, όπου κάθε βήμα αντιστοιχεί στην κατασκευή μιας από τις δέκα στρώσεις που δημιουργήθηκαν. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα φορτία και τις στρώσεις δίνονται σε επόμενη ενότητα της μοντελοποίησης.

Επιλέγεται η ενότητα (**Module**) **Step** και στη συνέχεια η εντολή δημιουργίας βήματος (**Create Step**).



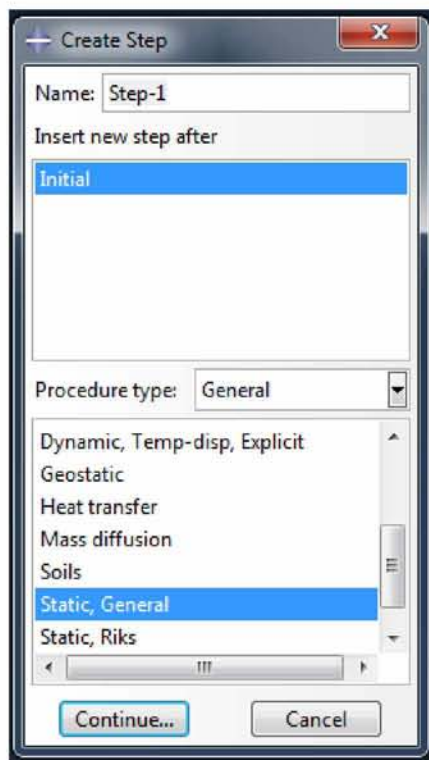
Εικόνα 4.5.1. Επιλογή ενότητας Step Module.



Εικόνα 4.5.2. Εντολή δημιουργίας βήματος.

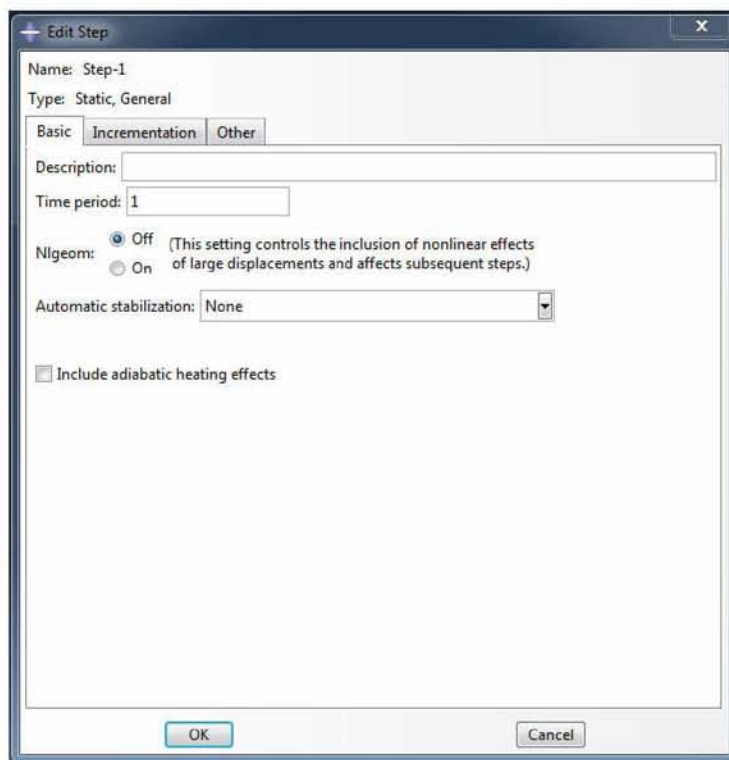
Ονομάζεται το τρέχον βήμα (**Name**) και ορίζεται η θέση του χρονικά σε σχέση με τα υπόλοιπα βήματα (**Insert new step after**). Στον τύπο διαδικασίας ανάλυσης (**Procedure type**) επιλέγεται γενική και στη συνέχεια στατική (**General** → **Static, General**) και πιέζεται **Continue**.





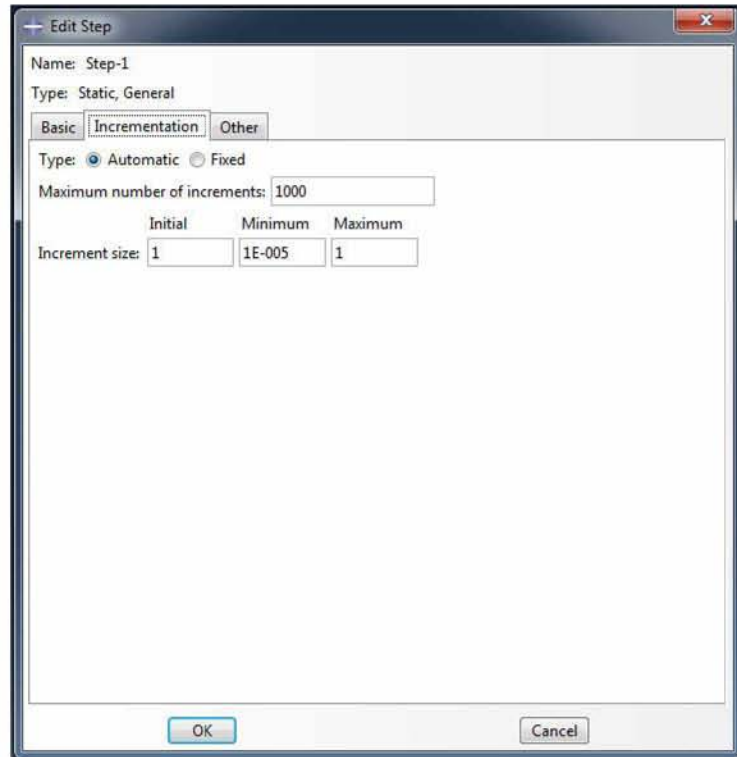
Εικόνα 4.5.3. Δημιουργία πρώτου βήματος ανάλυσης.

Εμφανίζεται το παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων και επεξεργασίας του βήματος (**Edit Step**). Στην καρτέλα **Basic** επιλέγεται χρονική περίοδος διάρκειας βήματος 1 δευτερόλεπτο (**Time period: 1**) και **Nlgeom: off** για γραμμική ανάλυση.



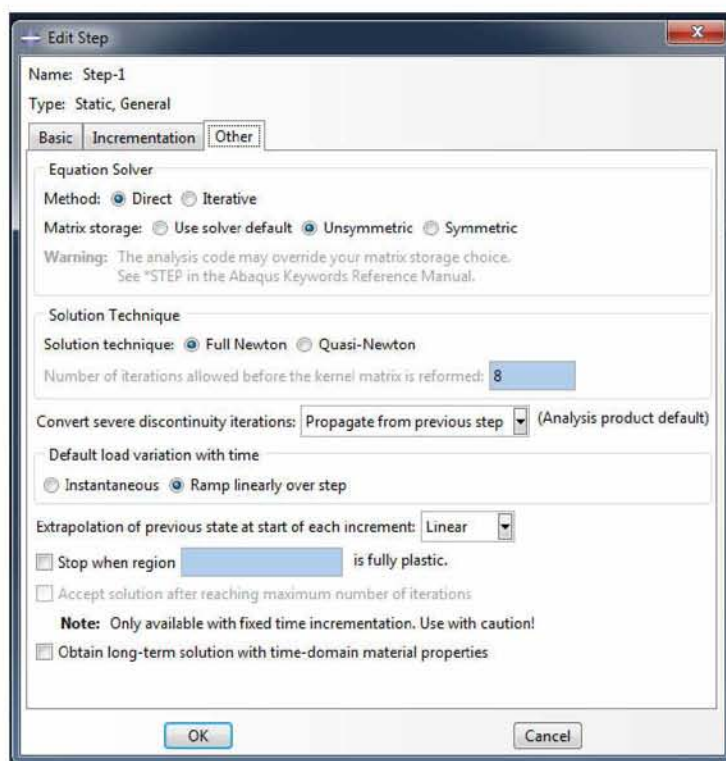
Εικόνα 4.5.4. Ορισμός χρονικής διάρκειας πρώτου βήματος ανάλυσης.

Στην καρτέλα **Incrementation** επιλέγεται τύπος προσαύξησης υποσταδίου αυτόματος (**Type: Automatic**) και ορίζεται ο μέγιστος επιθυμητός αριθμός υποσταδίων (**Maximum number of increments**). Στο μέγεθος υποσταδίου (**Increment size**) τίθεται ως αρχικό (**Initial**) και μέγιστο (**Maximum**) 1, προκειμένου να ασκηθεί το σύνολο του ιδίου βάρους της στρώσης σε ένα υποστάδιο (increment).



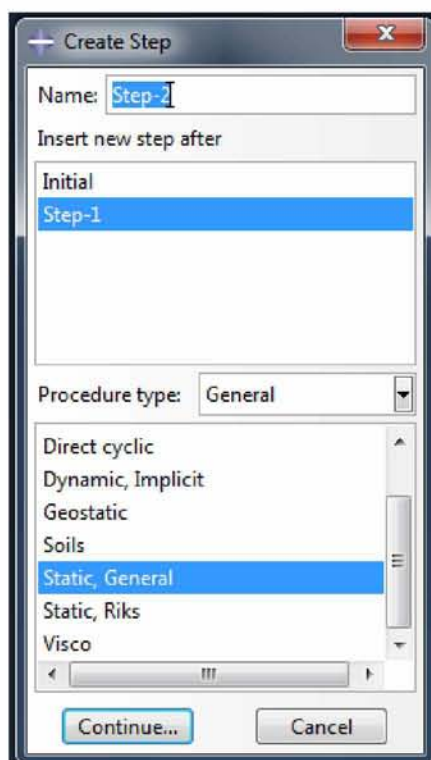
Εικόνα 4.5.5. Ορισμός μεγέθους και αριθμού υποσταδίων πρώτου βήματος ανάλυσης.

Στην καρτέλα **Other** επιλέγεται μέθοδος επίλυσης εξισώσεων άμεση (**Equation Solver Method: Direct**) και τρόπος αποθήκευσης μητρώου μη συμμετρικός (**Matrix storage: Unsymmetric**), μιας και για το συγκεκριμένο μοντέλο και κυρίως λόγω του κριτηρίου Mohr – Coulomb που χρησιμοποιήθηκε, ο συμμετρικός (Symmetric) τρόπος παρατηρήθηκε ότι παρουσίαζε δυσκολίες στην επίλυση. Ως τεχνική επίλυσης επιλέγεται η **Full Newton** και πιέζεται **OK**, ώστε να ολοκληρωθεί ο ορισμός του πρώτου βήματος της ανάλυσης.

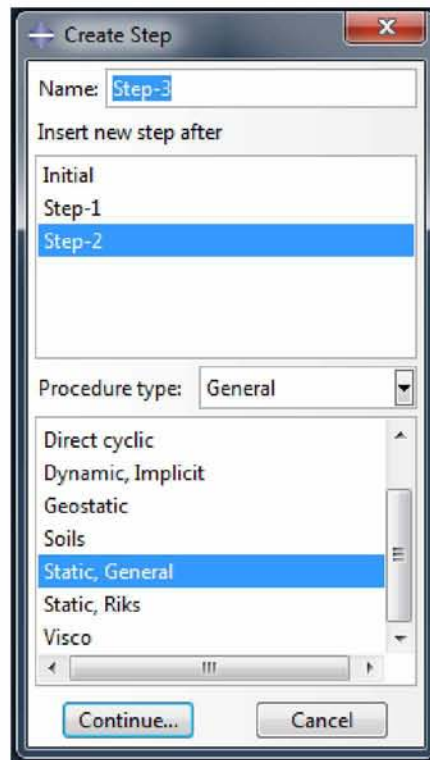


Εικόνα 4.5.6. Επιλογή μεθόδου επίλυσης εξισώσεων, τρόπου αποθήκευσης μητρώου και τεχνικής επίλυσης πρώτου βήματος ανάλυσης.

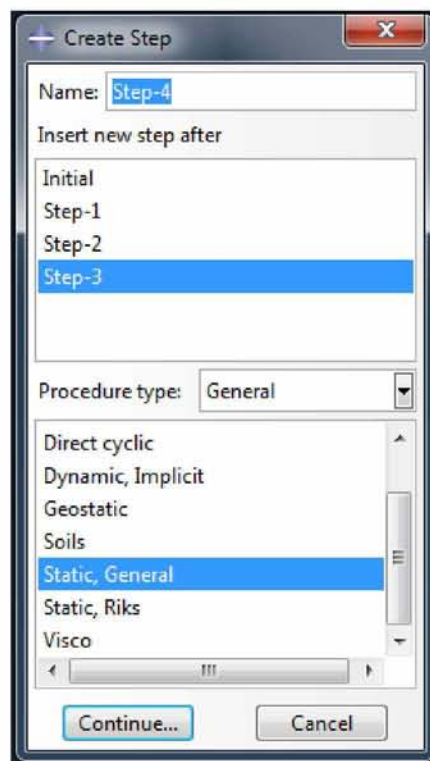
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και ορίζοντας τις ίδιες με το πρώτο βήμα ιδιότητες σε όλες τις καρτέλες του παραθύρου επεξεργασίας βήματος, δημιουργούνται και τα υπόλοιπα 9 βήματα του σταδίου κατασκευής του φράγματος (βήματα 2-10).



Εικόνα 4.5.7. Δημιουργία δεύτερου βήματος ανάλυσης.

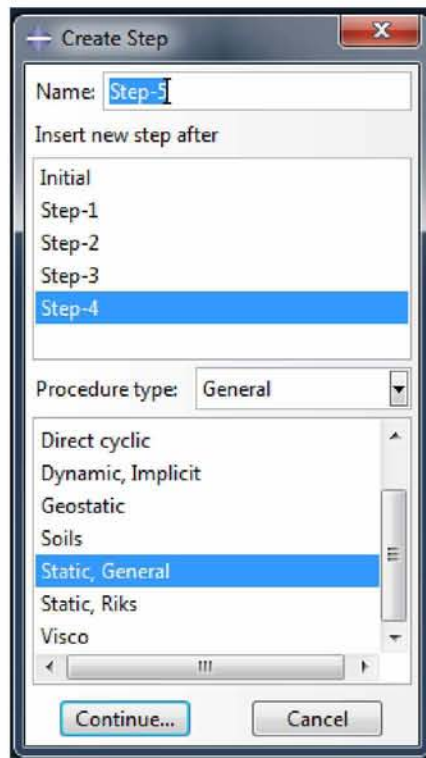


Εικόνα 4.5.8. Δημιουργία τρίτου βήματος ανάλυσης.

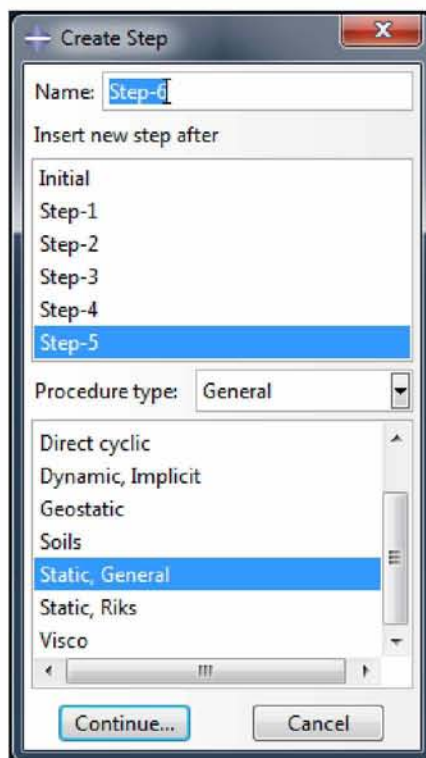


Εικόνα 4.5.9. Δημιουργία τέταρτου βήματος ανάλυσης.

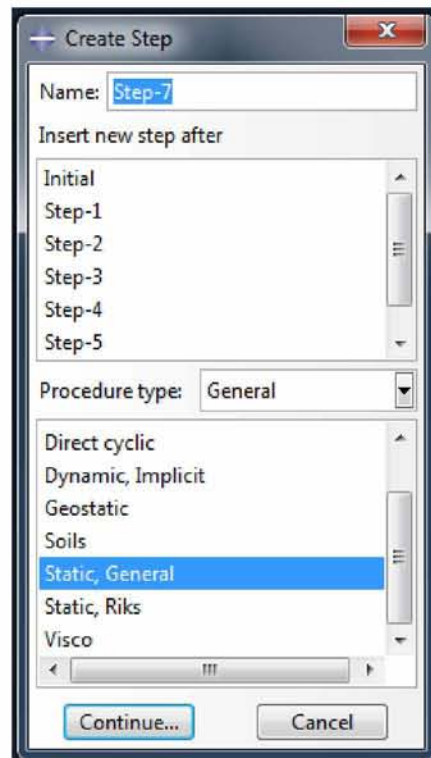




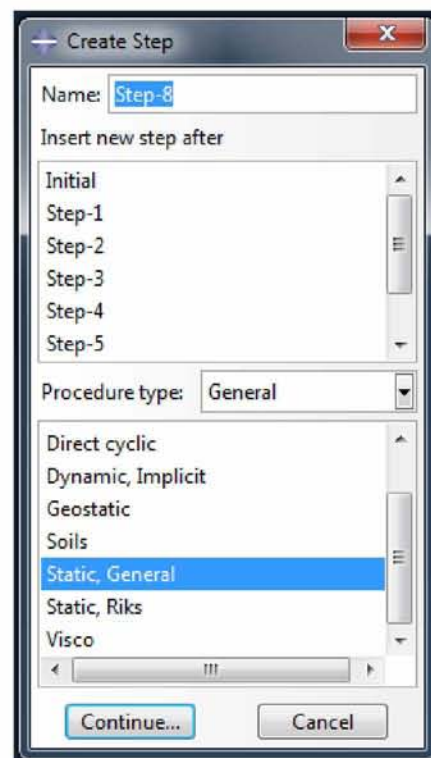
Εικόνα 4.5.10. Δημιουργία πέμπτου βήματος ανάλυσης.



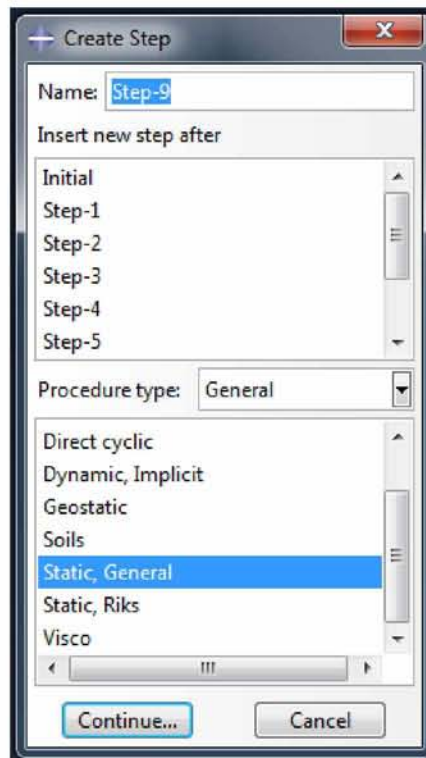
Εικόνα 4.5.11. Δημιουργία έκτου βήματος ανάλυσης.



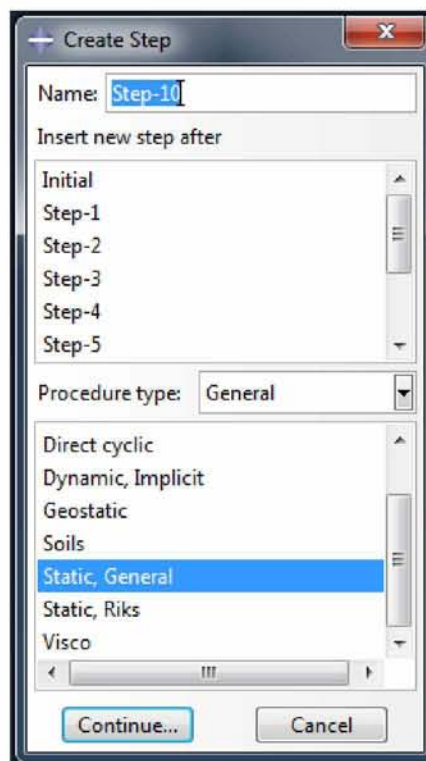
Εικόνα 4.5.12. Δημιουργία έβδομου βήματος ανάλυσης.



Εικόνα 4.5.13. Δημιουργία όγδοου βήματος ανάλυσης.



Εικόνα 4.5.14. Δημιουργία ένατου βήματος ανάλυσης.



Εικόνα 4.5.15. Δημιουργία δέκατου βήματος ανάλυσης.

### ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (STEP 11)

Μετά την κατασκευή του φράγματος ακολουθεί η πλήρωση της λεκάνης με νερό. Δημιουργείται, λοιπόν, ένα βήμα σταδιακής άσκησης της υδροστατικής πίεσης στην ανάντη πλευρά του φράγματος.

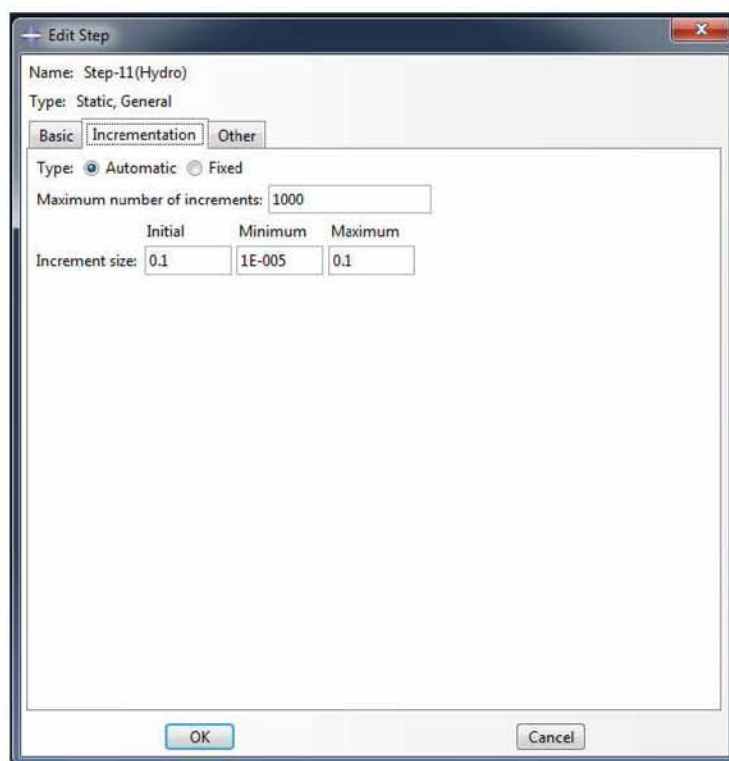
Επιλέγεται η εντολή **Create Step**, δίνεται ονομασία (**Name**) στο βήμα και ορίζεται η θέση του χρονικά αμέσως μετά το βήμα 10 (**Insert new step after: Step-10**). Στον τύπο διαδικασίας ανάλυσης (**Procedure type**) επιλέγεται γενική και στη συνέχεια στατική (**General** → **Static, General**) και πιέζεται **Continue**.



Εικόνα 4.5.16. Δημιουργία ενδέκατου βήματος ανάλυσης (πλήρωση ταμειευτήρα).

Στις καρτέλες **Basic** και **Other** δίνονται οι ίδιες ιδιότητες με τα προηγούμενα βήματα, ενώ στην καρτέλα **Incrementation** επιλέγεται να ασκηθεί η πίεση του νερού σε 10 υποστάδια (increments) με την επιλογή αρχικού και μέγιστου μεγέθους υποσταδίου 0.1 (**Increment size: Initial 0.1 & Maximum 0.1**).



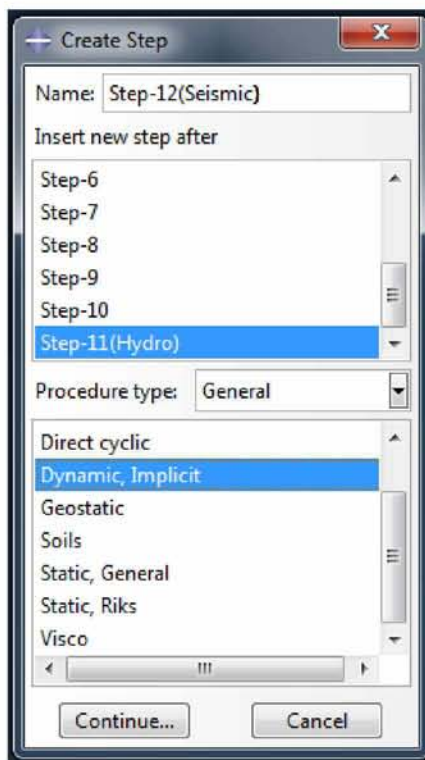


Εικόνα 4.5.17. Ορισμός μεγέθους και αριθμού υποσταδίων ενδέκατου βήματος ανάλυσης.

#### ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΗΜΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (STEP 12)

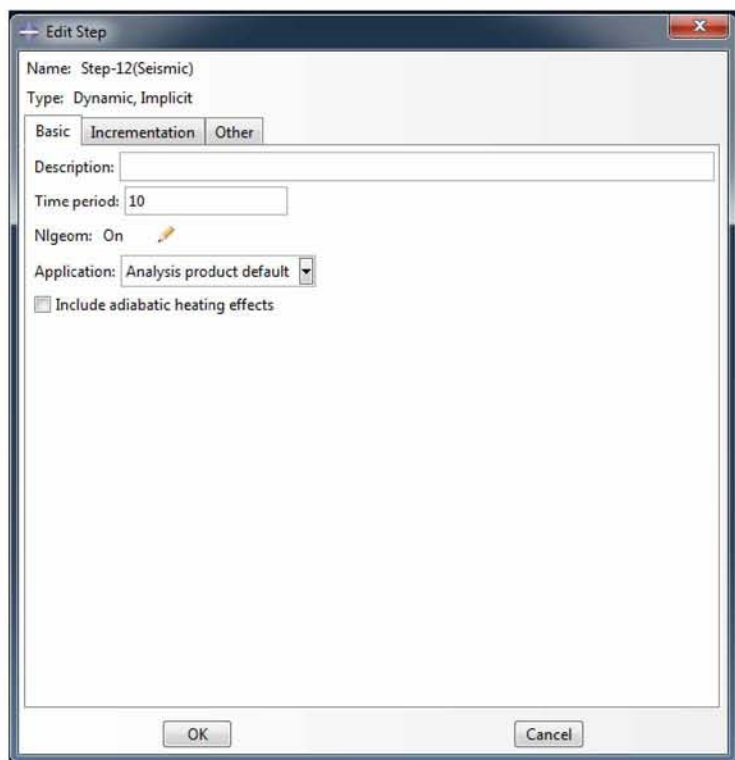
Στο τελευταίο (12<sup>ο</sup>) βήμα της ανάλυσης θα ασκηθεί σεισμική και επομένως δυναμική φόρτιση στην κατασκευή, διάρκειας 10 δευτερολέπτων. Η ανάλυση στο στάδιο αυτό θα είναι μη γραμμική.

Επιλέγεται η εντολή **Create Step**, δίνεται ονομασία (**Name**) στο βήμα και ορίζεται η θέση του χρονικά αμέσως μετά το βήμα 11 (**Insert new step after: Step-11**). Στον τύπο διαδικασίας ανάλυσης (**Procedure type**) επιλέγεται γενική και στη συνέχεια δυναμική (**General** → **Dynamic, Implicit**) και πιέζεται **Continue**.



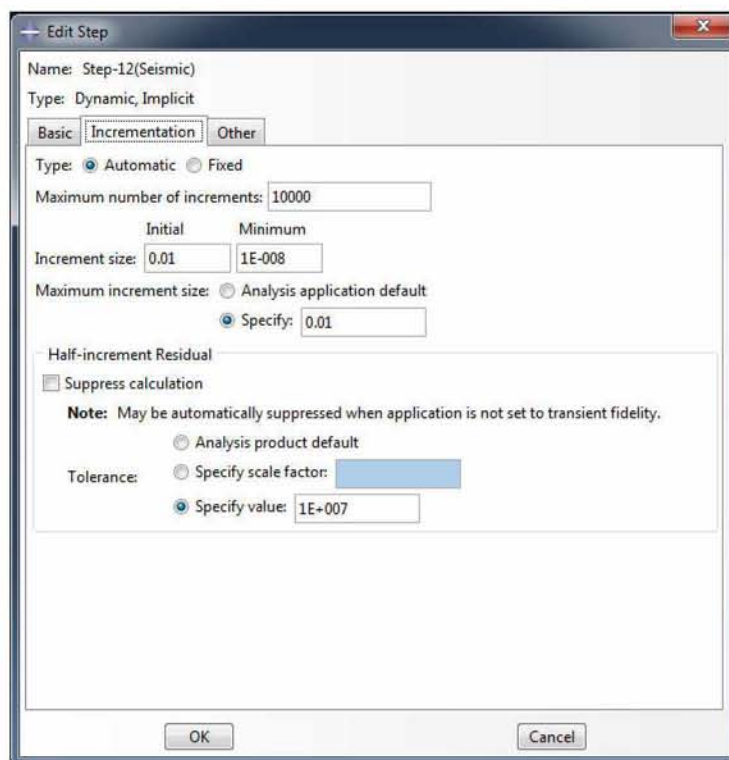
Εικόνα 4.5.18. Δημιουργία δωδέκατου βήματος ανάλυσης (σεισμική διέγερση).

Εμφανίζεται το παράθυρο επεξεργασίας του βήματος (**Edit Step**). Στην καρτέλα **Basic** επιλέγεται χρονική περίοδος διάρκειας βήματος 10 δευτερόλεπτα (**Time period: 10**) και **Nlgeom: on** για μη-γραμμική ανάλυση.



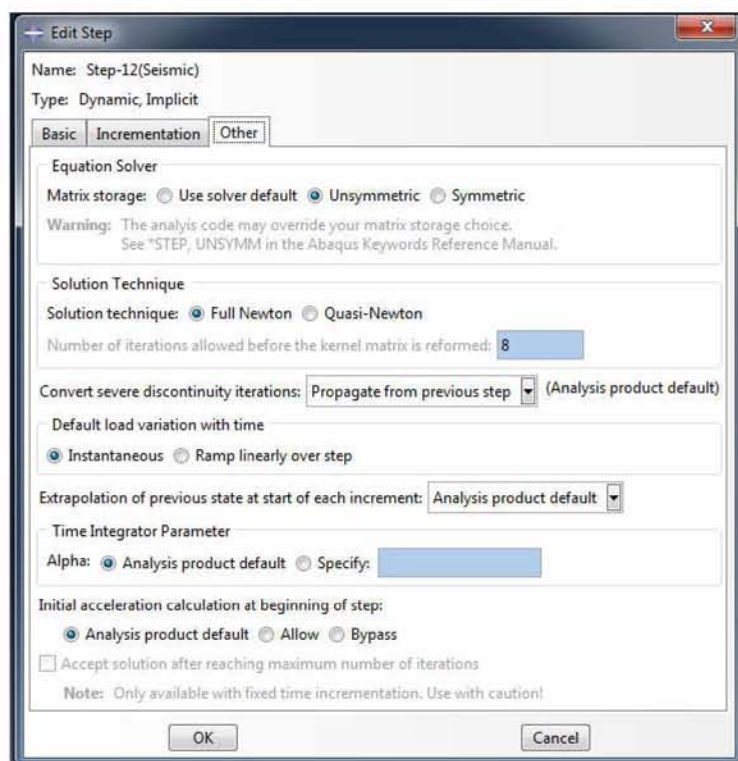
Εικόνα 4.5.19. Ορισμός χρονικής διάρκειας και επιλογή μη-γραμμικής ανάλυσης για το δωδέκατο βήμα.

Στην καρτέλα **Incrementation** επιλέγεται τύπος προσαύξησης υποσταδίου αυτόματος (**Type: Automatic**). Όσον αφορά το μέγεθος υποσταδίου (**Increment size**), αυτό πρέπει να είναι πολύ μικρό, ώστε να προσομοιωθεί με ακρίβεια ο σεισμός. Για τον ίδιο λόγο δίνεται και μεγάλη τιμή στον μέγιστο αριθμό υποσταδίων (**Maximum number of increments**) και συγκεκριμένα 10000. Μιας και στα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού που εισάγονται στο πρόγραμμα οι επιταχύνσεις λαμβάνουν τιμές ανά 0.01 δευτερόλεπτο, τίθεται ως αρχικό (**Initial**) και μέγιστο (**Maximum**) μέγεθος υποσταδίου η τιμή 0.01. Παράλληλα, για την αποφυγή αποκλίσεων κατά τη διάρκεια της επίλυσης δίνεται στο συντελεστή ανοχής (**Tolerance value**) η τιμή  $10^7$ .



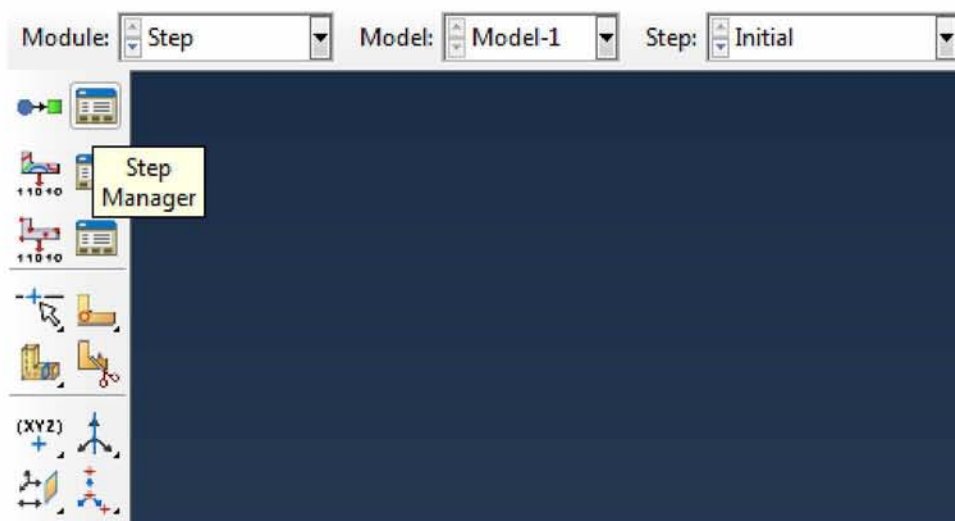
Εικόνα 4.5.20. Ορισμός αριθμού και μεγέθους υποσταδίων & συντελεστή ανοχής δωδέκατου βήματος ανάλυσης.

Τέλος, στην καρτέλα **Other** επιλέγεται ως τρόπος αποθήκευσης μητρώου ο μη συμμετρικός (**Matrix storage: Unsymmetric**), ως τεχνική επίλυσης η **Full Newton**, και ως προεπιλεγμένη μεταβολή φορτίου με το χρόνο η στιγμιαία (**Default load variation with time: Instantaneous**).



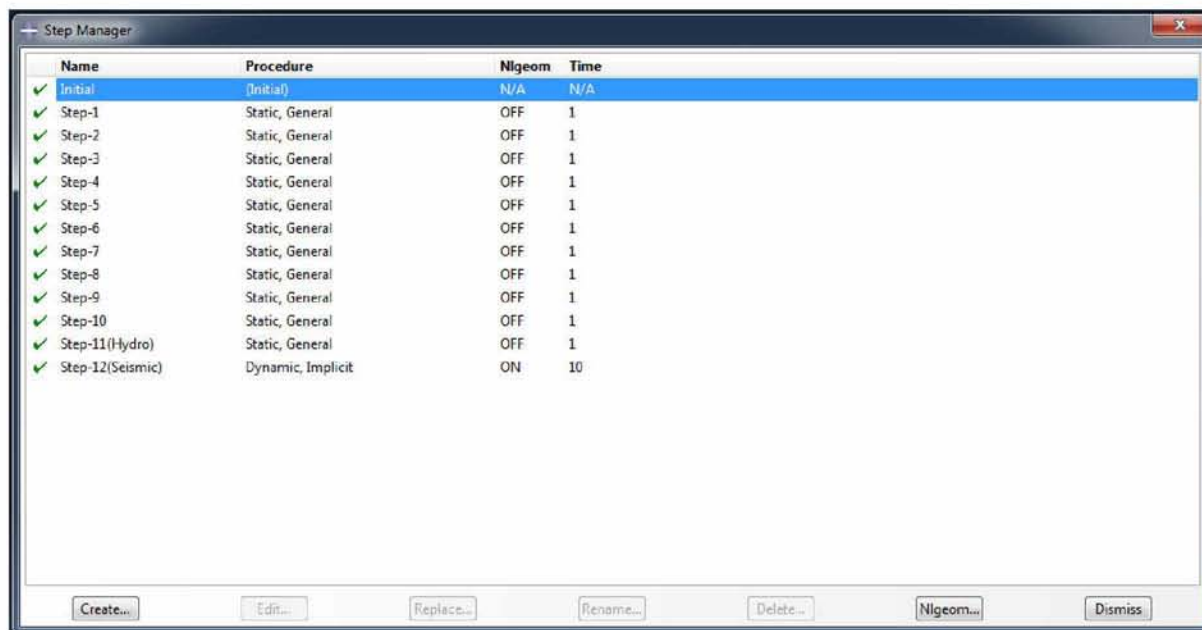
Εικόνα 4.5.21. Επιλογή τρόπου αποθήκευσης μητρώου, τεχνικής επίλυσης και χρονικής μεταβολής φορτίου δωδέκατου βήματος ανάλυσης.

Ολοκληρώνεται, έτσι, ο ορισμός των βημάτων της ανάλυσης και κλικάροντας την εντολή του διαχειριστή βημάτων (**Step Manager**) δίνεται μια συνολική εικόνα των βημάτων που δημιουργήθηκαν.



Εικόνα 4.5.22. Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή βημάτων.



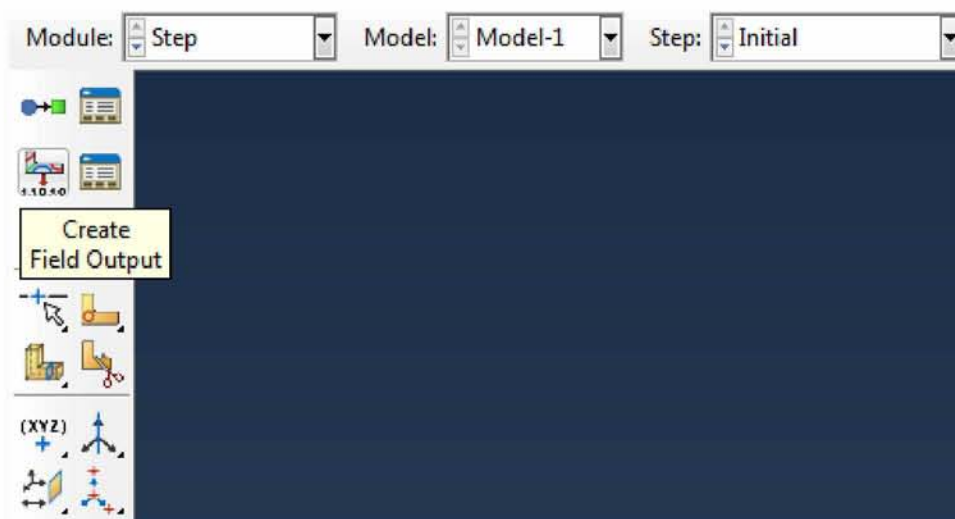


Εικόνα 4.5.23. Συγκεντρωτική απεικόνιση των βημάτων της ανάλυσης.

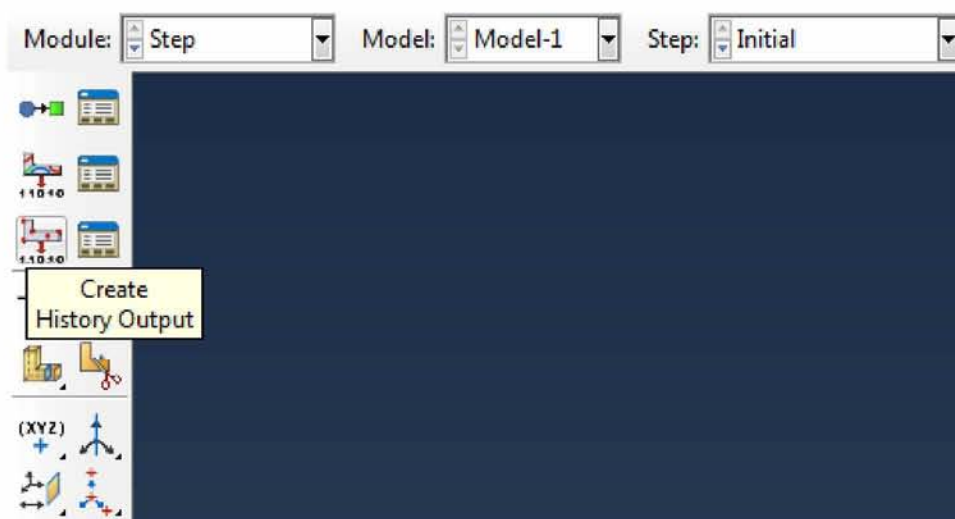
## ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Το Abaqus υπολογίζει τις τιμές πολλών μεταβλητών σε κάθε υποστάδιο ενός βήματος. Στο σημείο αυτό, καθορίζονται τα δεδομένα εξόδου που ο χρήστης επιθυμεί να καταγραφούν στη βάση δεδομένων εξόδου. Αυτό γίνεται με τη δημιουργία αιτήσεων δεδομένων εξόδου (output requests), στις οποίες περιέχονται πληροφορίες για τις μεταβλητές ενδιαφέροντος, την περιοχή του μοντέλου και τα σημεία ολοκλήρωσης από τα οποία θα προέρθουν οι τιμές των δεδομένων εξόδου, αλλά και τον ρυθμό με τον οποίο θα καταγράφονται οι τιμές των μεταβλητών στη βάση δεδομένων εξόδου.

Υπάρχουν δύο τρόποι να ζητηθούν αποτελέσματα από το πρόγραμμα, είτε με την εντολή δημιουργίας δεδομένων εξόδου πεδίου (**Create Field Output**), είτε με την αντίστοιχη δεδομένων εξόδου ιστορίας (**Create History Output**). Η διαφορά τους είναι ότι στην πρώτη περίπτωση το πρόγραμμα παράγει δεδομένα εξόδου από δεδομένα που είναι χωρικά καταναμημένα σε ολόκληρο το μοντέλο ή σε ένα τμήμα αυτού, ενώ στη δεύτερη από δεδομένα σε συγκεκριμένα σημεία του μοντέλου.



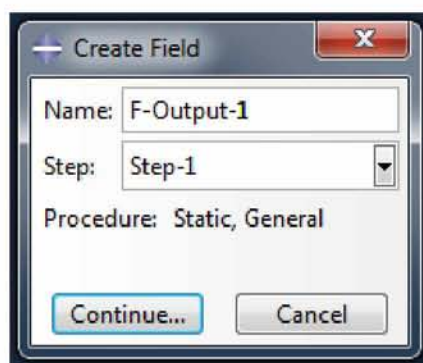
Εικόνα 4.5.24. Εντολή δημιουργίας δεδομένων εξόδου πεδίου.



Εικόνα 4.5.25. Εντολή δημιουργίας δεδομένων εξόδου ιστορίας.

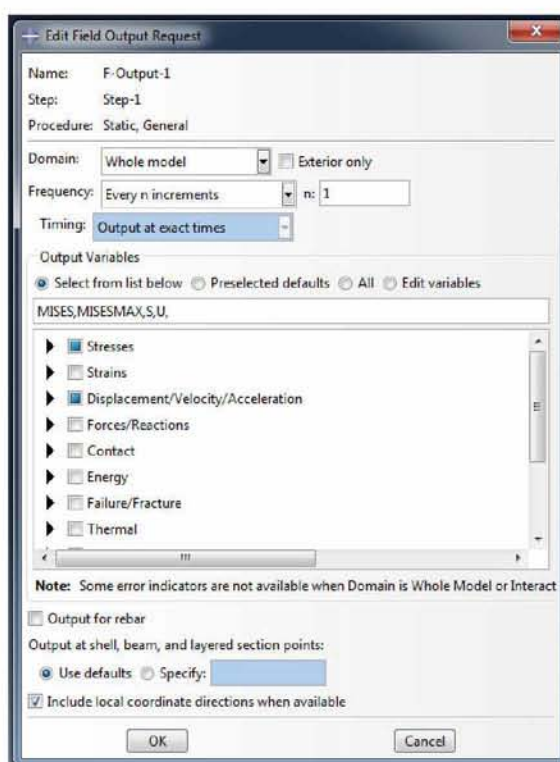
Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν δεδομένα εξόδου πεδίου (field output), που αν και επιβαρύνουν χρονικά την ανάλυση σε σχέση με τα δεδομένα εξόδου ιστορίας (history output), παρουσιάζουν αποτελέσματα για το σύνολο το μοντέλου, από τα οποία μπορεί ο χρήστης σχετικά εύκολα να λάβει αποτελέσματα και σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος στην ενότητα οπτικοποίησης (Visualization Module).

Επιλέγεται η εντολή δημιουργίας δεδομένων εξόδου πεδίου (**Create Field Output**). Δίνεται όνομα και καθορίζεται το αρχικό βήμα (**Step**) στο οποίο θα ζητηθούν τα αποτελέσματα. Το πρόγραμμα από μόνο του ζητά τα ίδια αποτελέσματα και στα επόμενα βήματα.

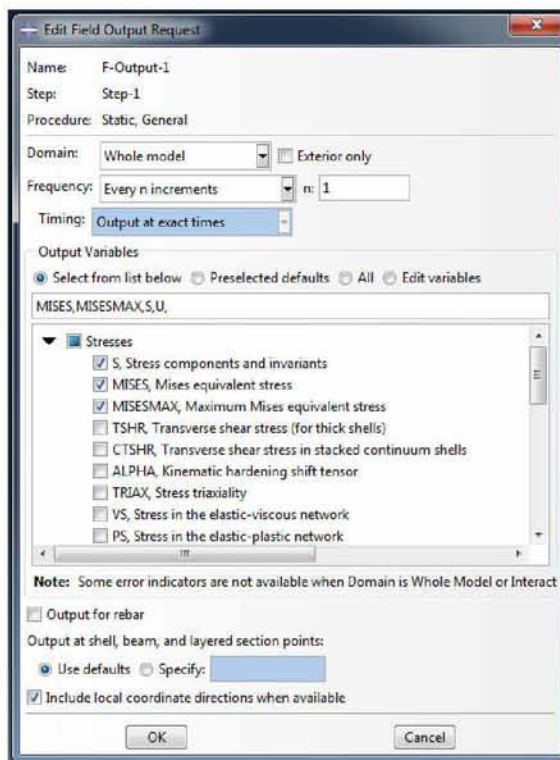


Εικόνα 4.5.26. Δημιουργία δεδομένων εξόδου πεδίου.

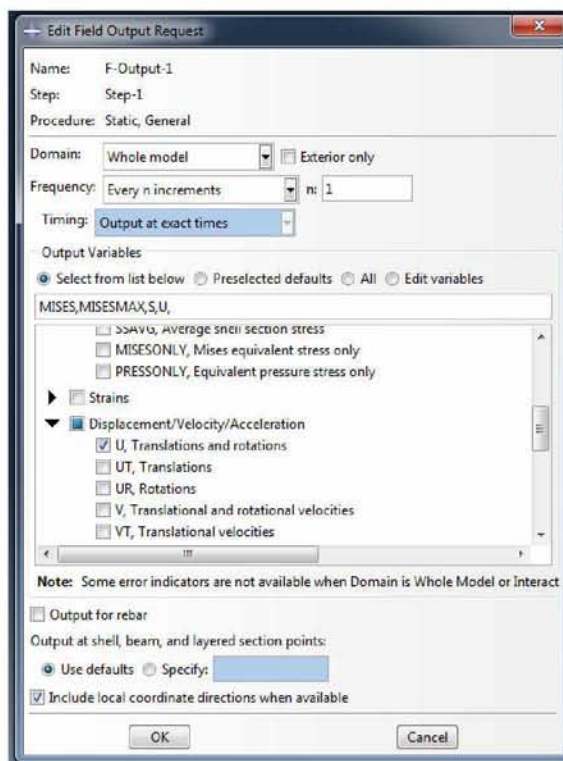
Επιλέγεται ως τομέας ενδιαφέροντος ολόκληρο το μοντέλο (**Domain: Whole model**) και ορίζεται η συχνότητα καταγραφής δεδομένων σε κάθε ένα υποστάδιο (**Frequency: Every n increments & n:1**). Στις μεταβλητές δεδομένων εξόδου (**Output Variables**) κλικάρεται επιλογή από την παρακάτω λίστα (**Select from list below**) και τσεκάρονται οι μεταβλητές ενδιαφέροντος. Ως τέτοιες, επιλέχθηκαν οι τάσεις (**Stresses**) και οι μετακινήσεις (**Displacement**) σε όλα τα βήματα της ανάλυσης.



Εικόνα 4.5.26. Ορισμός μεταβλητών ενδιαφέροντος ως δεδομένα εξόδου.



Εικόνα 4.5.27. Ορισμός τάσεων ως δεδομένα εξόδου.

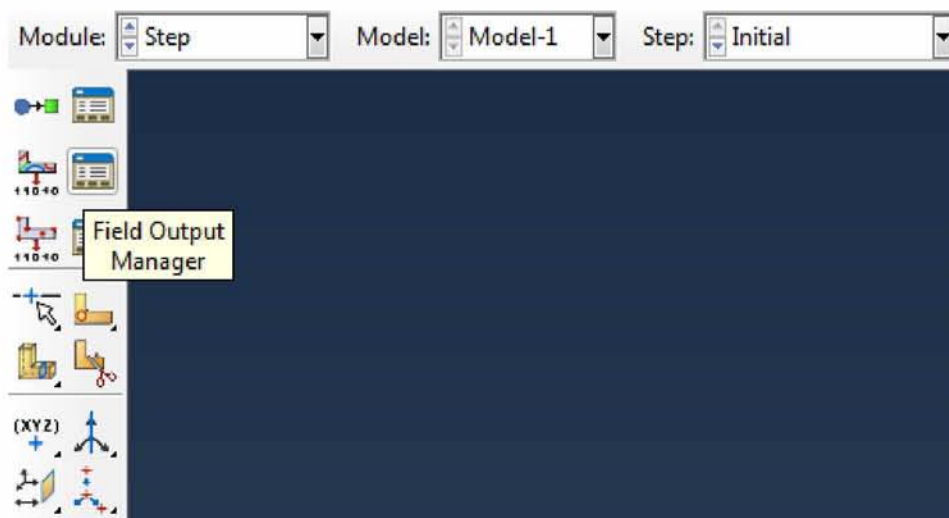


Εικόνα 4.5.28. Ορισμός μετακινήσεων ως δεδομένα εξόδου.

Επιπλέον, ζητήθηκαν οι αναπτυσσόμενες στην κατασκευή επιταχύνσεις (**Accelerations**) στο βήμα του σεισμού.

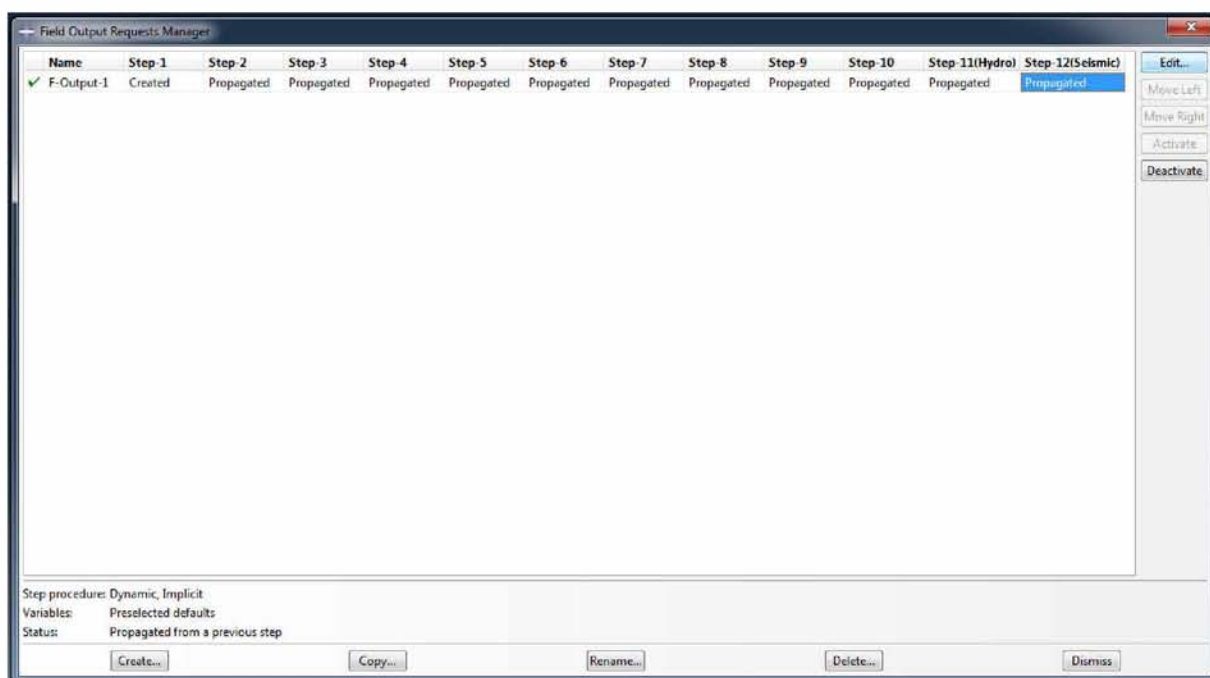


Κλικάρεται η εντολή εμφάνισης του διαχειριστή δεδομένων εξόδου πεδίου (**Field Output Manager**).

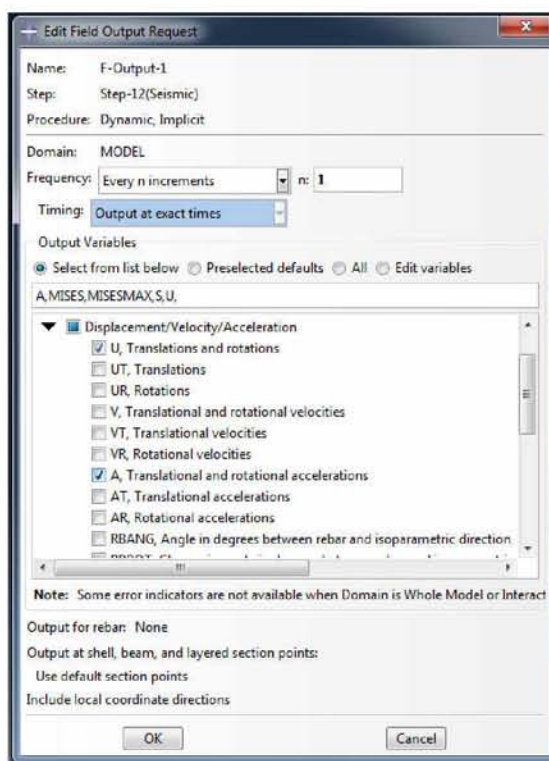


Εικόνα 4.5.29. Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή δεδομένων εξόδου.

Επιλέγεται να επεξεργαστούν τα δεδομένα εξόδου πεδίου στο βήμα του σεισμού (**Step-12: Propagated** → **Edit...**) και στο παράθυρο που ανοίγει τσεκάρεται στο αντίστοιχο κουτάκι η επιτάχυνση (**A**).



Εικόνα 4.5.30. Επεξεργασία δεδομένων εξόδου δωδέκατου βήματος ανάλυσης (σεισμική διέγερση).



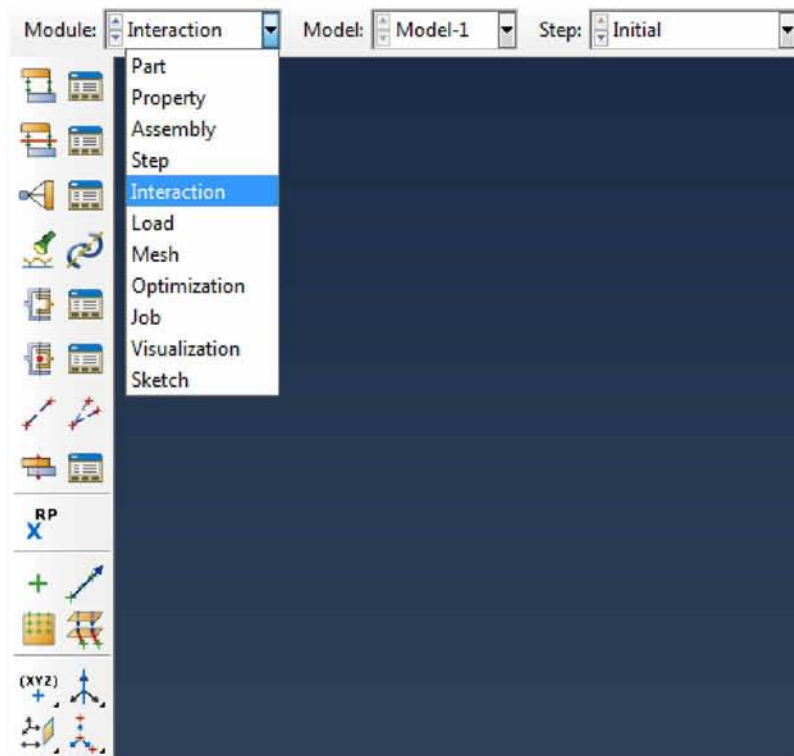
Εικόνα 4.5.31. Ορισμός επιταχύνσεων ως επιπλέον δεδομένα εξόδου δωδέκατου βήματος ανάλυσης (σεισμική διέγερση).

## 4.6 Interaction Module

Στην ενότητα αυτή, ορίζονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιοχών του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται «σύνδεση» (tie) του φράγματος με τα πρανή της κοιλάδας, του φράγματος με το υπέδαφος θεμελίωσης και των πρανών με το υπέδαφος. Για κάθε μία από αυτές τις συνδέσεις γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχει μετακίνηση μεταξύ των δύο τμημάτων που συνδέονται και εντούτοις συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Κάτι τέτοιο έρχεται σε αντίθεση με τις πραγματικές συνθήκες επαφής, αφού υφίσταται πιθανότητα ολίσθησης ή και αποκόλλησης του φράγματος από τη θεμελίωσή του, που όμως αφορά ακραίες περιπτώσεις και κρίνεται σκόπιμο να αγνοηθεί για λόγους απλοποίησης του προβλήματος.

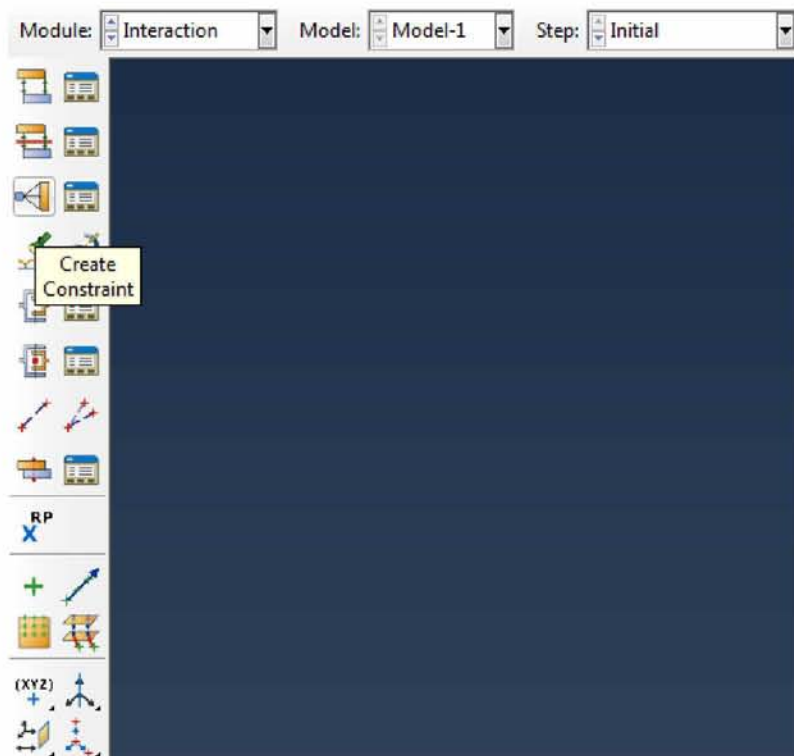
Εκτός αυτών, με τον ορισμό αλληλεπιδράσεων αλλαγής μοντέλου (model change interactions) επιτρέπεται η αφαίρεση ή η επαναενεργοποίηση στοιχείων κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Χρησιμοποιείται, λοιπόν, αυτή η δυνατότητα του προγράμματος για τη σταδιακή ενεργοποίηση της κάθε στρώσης του φράγματος στη φάση κατασκευής του.

Δημιουργούνται, αρχικά, οι συνδέσεις μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου. Επιλέγεται η ενότητα αλληλεπίδρασης (**Module: Interaction**).

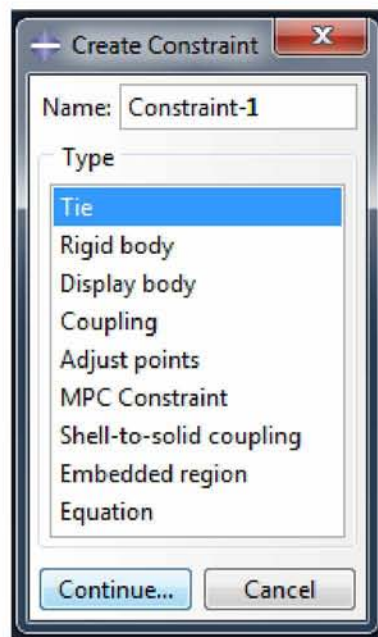


Εικόνα 4.6.1. Επιλογή ενότητας *Interaction Module*.

Κλικάρεται η εντολή δημιουργίας περιορισμού (**Create Constraint**) και στη συνέχεια στον τύπο επιλέγεται σύνδεση (**Type: Tie**).

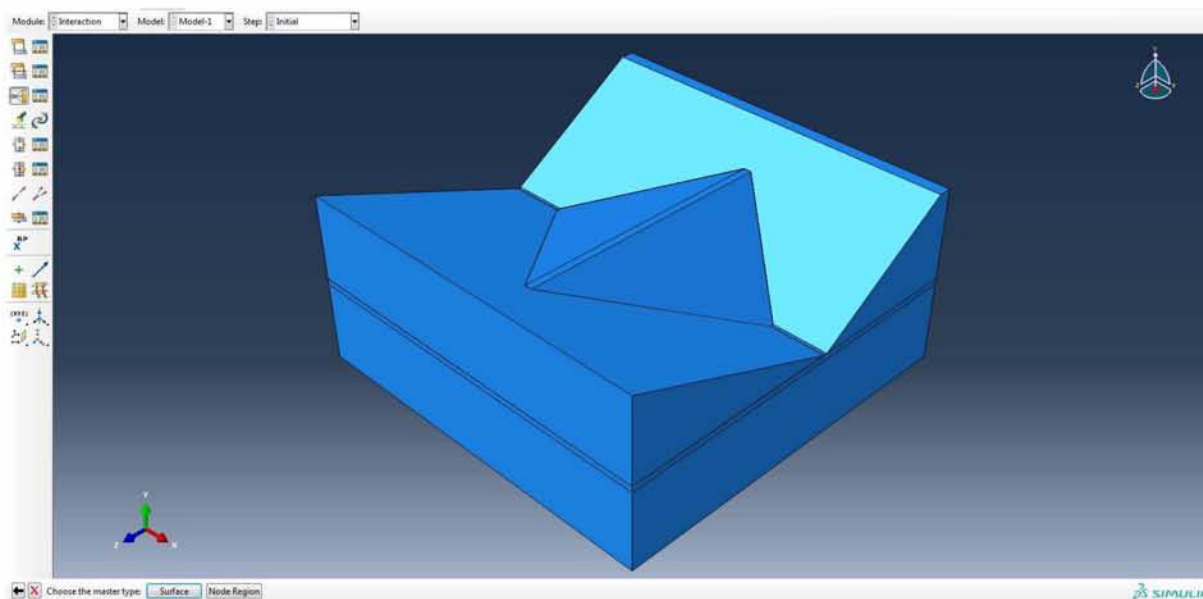


Εικόνα 4.6.2. Εντολή δημιουργίας περιορισμού.



Εικόνα 4.6.3. Δημιουργία πρώτης σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.

Από τη γραμμή προτροπής επιλέγεται να καθοριστεί η κύρια (πρώτη) περιοχή σύνδεσης (**master type**) με επιλογή επιφάνειας (**Surface**).

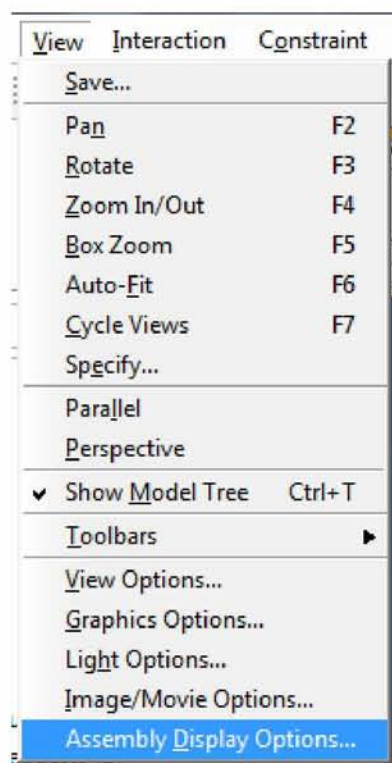


Εικόνα 4.6.4. Καθορισμός πρώτης περιοχής σύνδεσης με επιλογή επιφάνειας.

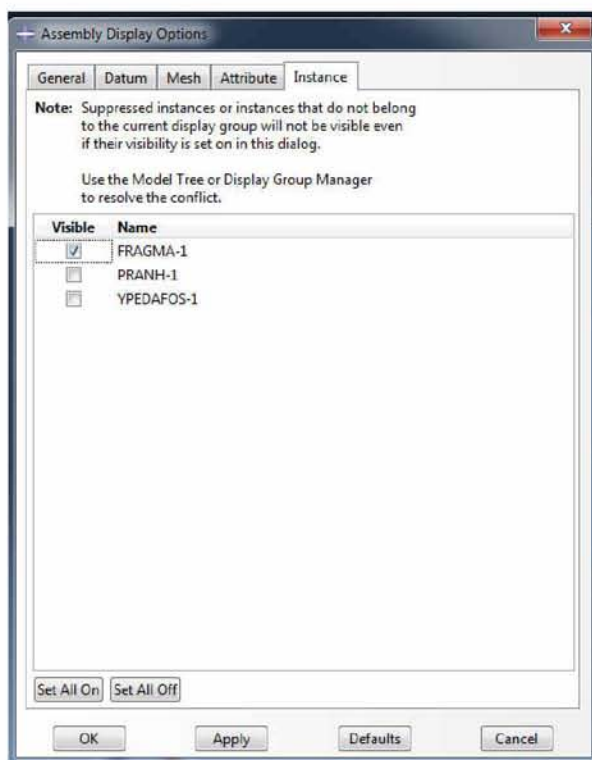
Προκειμένου να καθοριστούν ευκολότερα οι επιφάνειες σύνδεσης, διατηρείται στο παράθυρο προβολής κάθε φορά μόνο το τμήμα στο οποίο ανήκει η ζητούμενη επιφάνεια. Αυτό γίνεται επιλέγοντας από τη γραμμή εντολών **View** → **Assembly Display Options** και στη συνέχεια διατηρώντας επιλεγμένο μόνο το τμήμα ενδιαφέροντος (φράγμα, πρανή ή υπέδαφος).

Διατηρείται στο παράθυρο προβολής μόνο το σώμα του φράγματος.



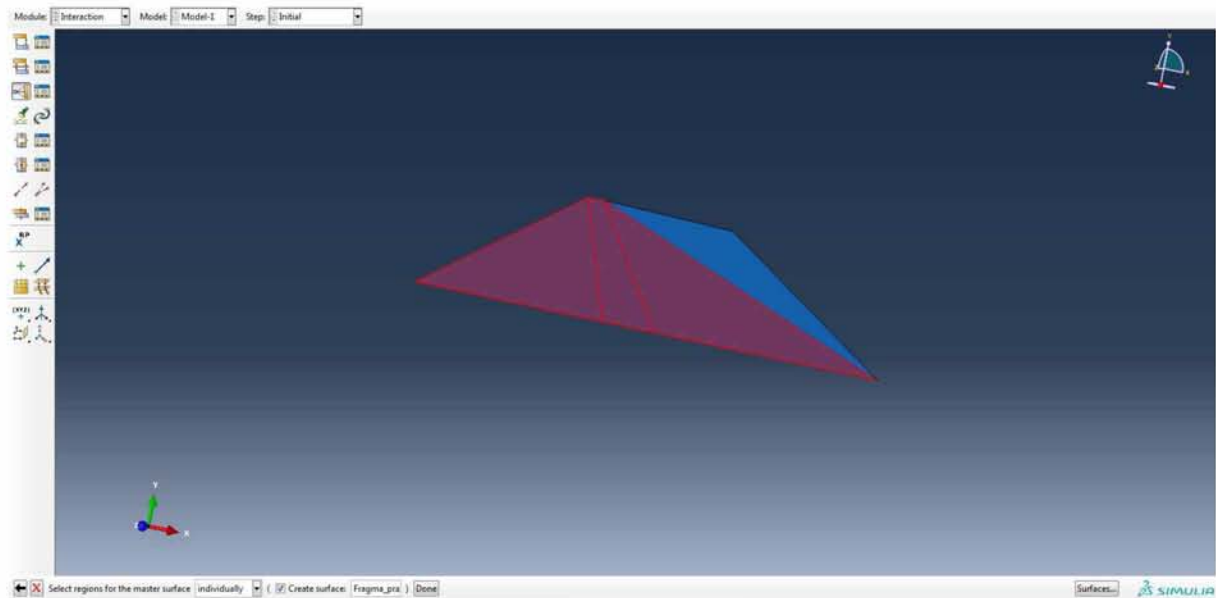


Εικόνα 4.6.5. Εντολή διαμόρφωσης εμφανιζόμενων τμημάτων στο παράθυρο προβολής.

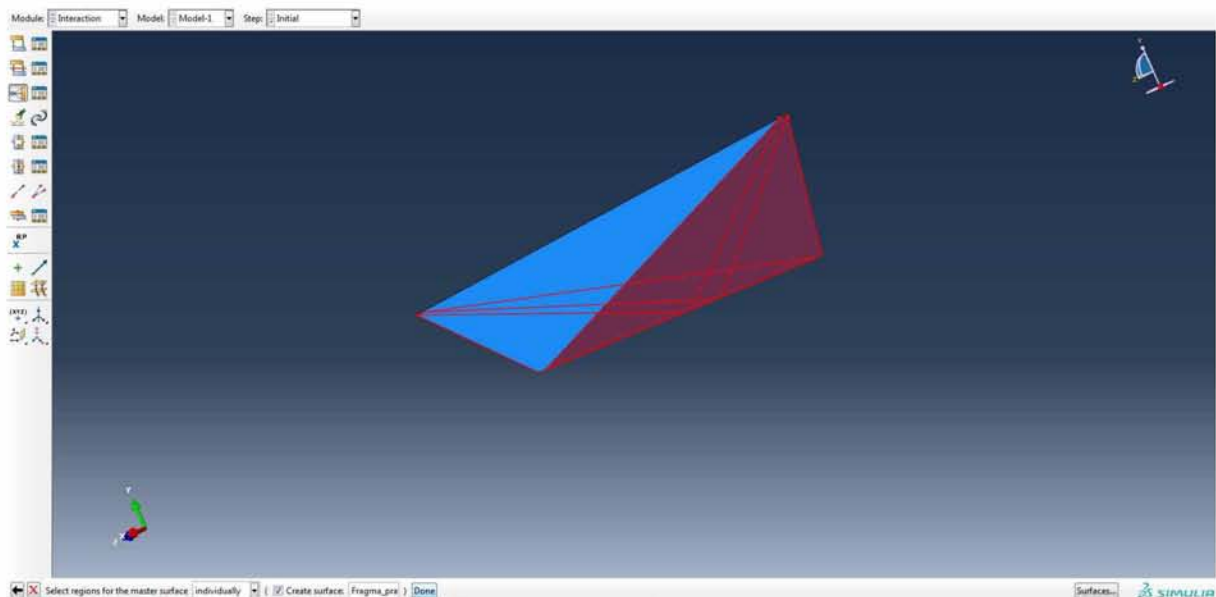


Εικόνα 4.6.6. Επιλογή εμφάνισης μόνο του φράγματος στο παράθυρο προβολής.

Επιλέγονται οι δύο πλευρές έδρασης του φράγματος στα πρηνή της κοιλάδας ως πρώτη επιφάνεια σύνδεσης (**master surface**). Επίσης, αποθηκεύεται η επιφάνεια σε περίπτωση που χρειαστεί να ξαναχρησιμοποιηθεί τσεκάροντας την εντολή δημιουργίας επιφάνειας (**Create surface**) και ονομάζοντάς την. Πιέζεται **Done**.

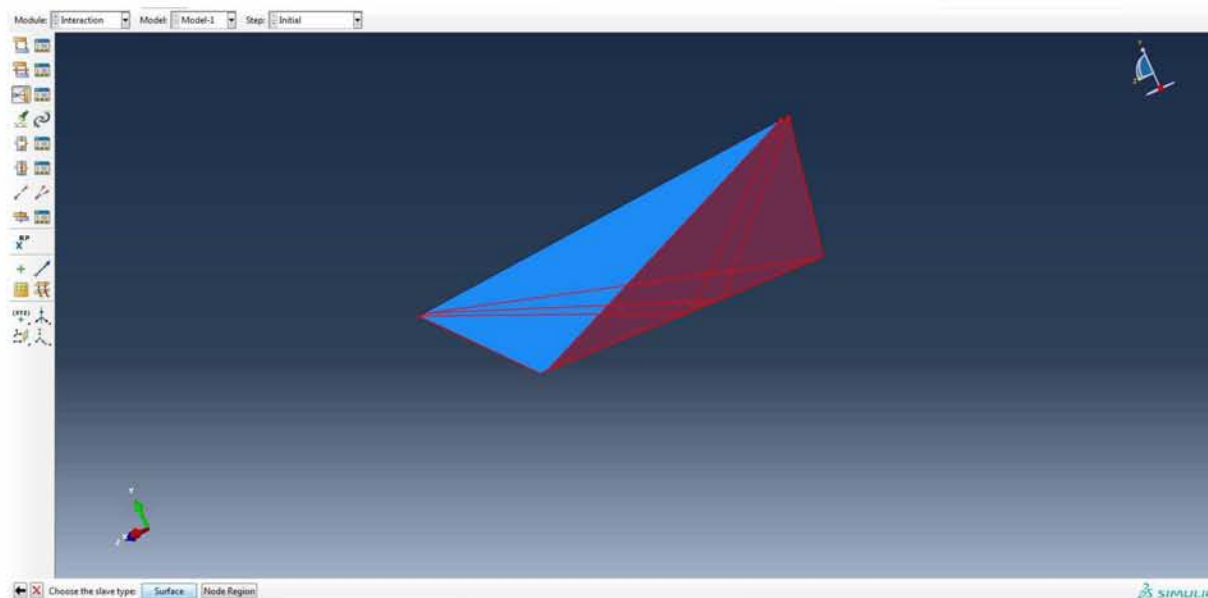


Εικόνα 4.6.7. Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για την πρώτη σύνδεση (α' μέρος).



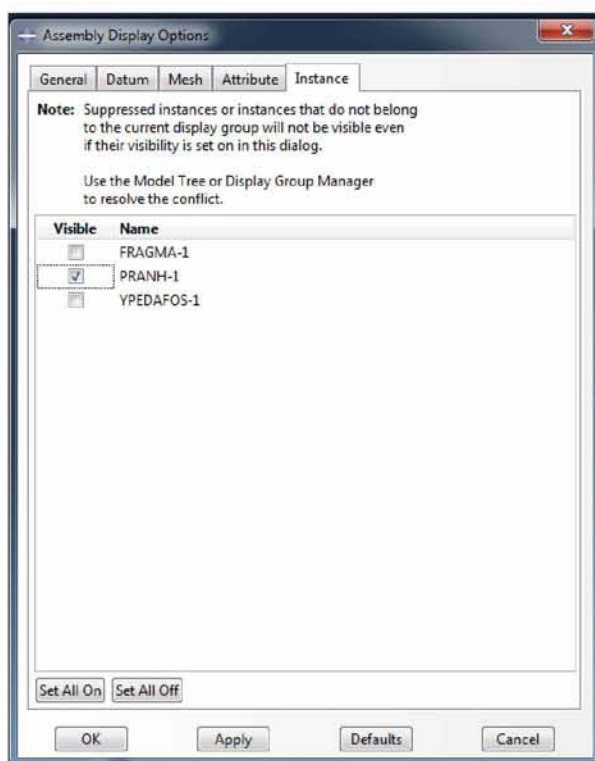
Εικόνα 4.6.8. Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για την πρώτη σύνδεση (β' μέρος).

Επιλέγεται να καθοριστεί και η δευτερεύουσα περιοχή σύνδεσης (**slave type**) με επιλογή επιφάνειας (**Surface**).



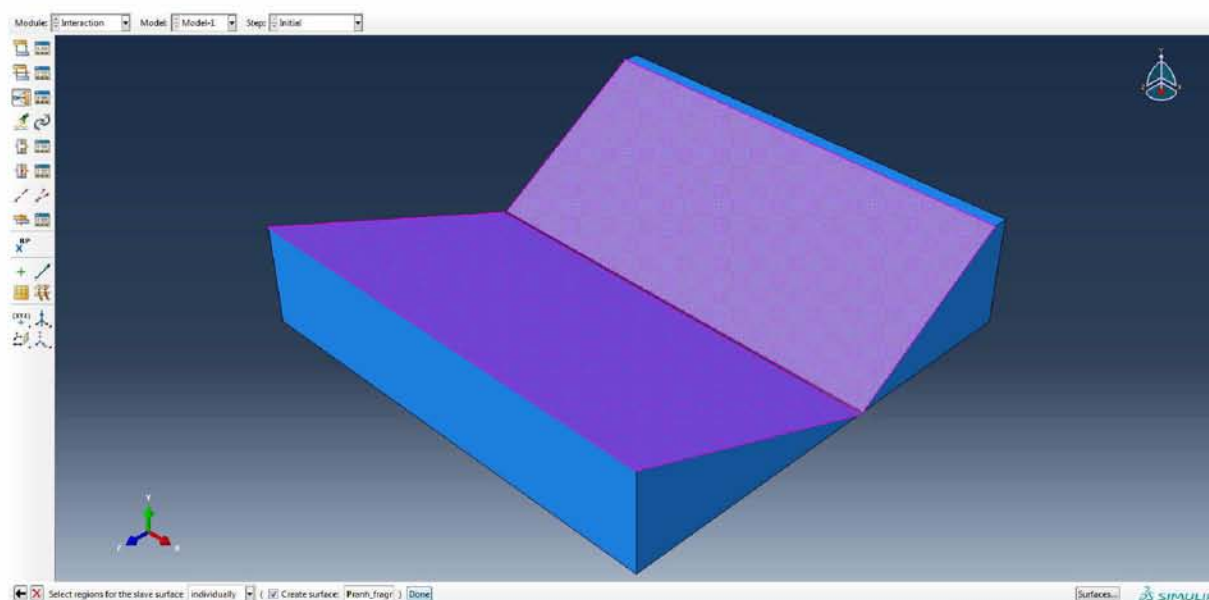
Εικόνα 4.6.9. Καθορισμός δεύτερης περιοχής σύνδεσης με επιλογή επιφάνειας.

Διατηρείται στο παράθυρο προβολής μόνο το τμήμα του μοντέλου που αναφέρεται στα πρηνή της κοιλάδας.



Εικόνα 4.6.10. Επιλογή εμφάνισης των πρηνών της κοιλάδας στο παράθυρο προβολής.

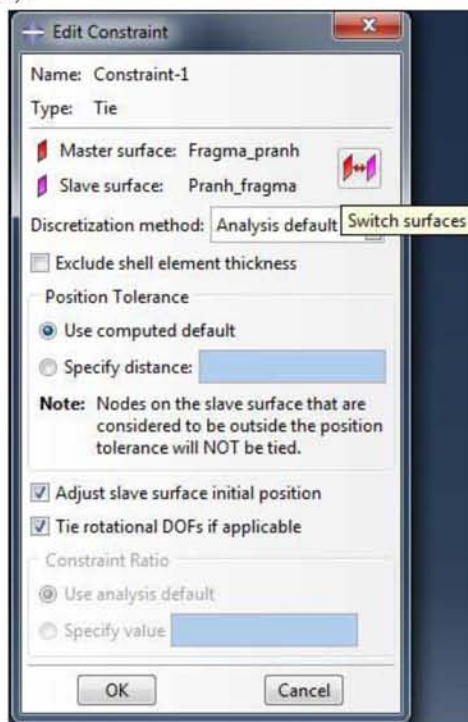
Επιλέγονται ως δεύτερη επιφάνεια σύνδεσης (**slave surface**) οι κεκλιμένες επιφάνειες των πρηνών.



Εικόνα 4.6.11. Επιλογή δεύτερης επιφάνειας σύνδεσης για την πρώτη σύνδεση.

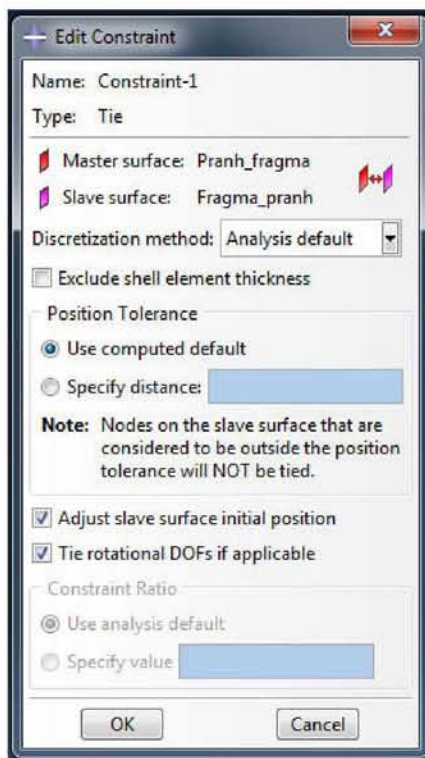
Ο ορισμός μιας επιφάνειας σύνδεσης ως κύρια (*master surface*) ή ως δευτερεύουσα (*slave surface*) δεν θα πρέπει να είναι τυχαίος, καθώς μπορεί να προκληθούν σφάλματα (*warnings*) στην ανάλυση σχετιζόμενα με τη σύνδεση. Για τον λόγο αυτό προτείνεται από το Abaqus i) η κύρια επιφάνεια να είναι αυτή με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία από τις δύο και ii) η επιφάνεια με την πυκνότερη διακριτοποίηση (*finer mesh*) να ορίζεται ως δευτερεύουσα.

Επειδή το φράγμα έχει μικρότερη δυσκαμψία από το πρανή της κοιλάδας, αλλά και πυκνότερη διακριτοποίηση από αυτά (όπως θα δειχθεί σε επόμενη ενότητα της μοντελοποίησης), τίθεται η επιφάνεια του φράγματος ως δευτερεύουσα (*slave surface*) και η αντίστοιχη των πρανών ως κύρια (*master surface*). Αυτό γίνεται με την εντολή εναλλαγής επιφανειών (**Switch surfaces**).



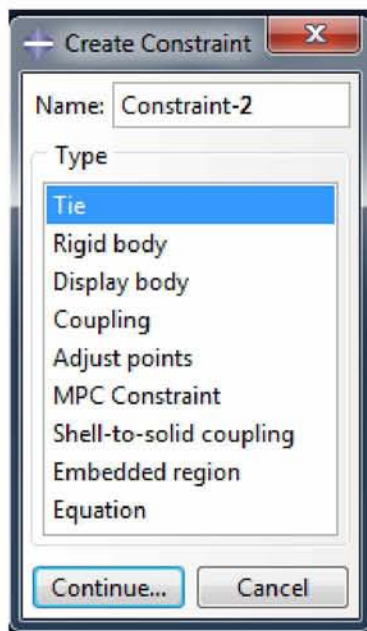
Εικόνα 4.6.12. Εντολή εναλλαγής κύριας και δευτερεύουσας επιφάνειας.





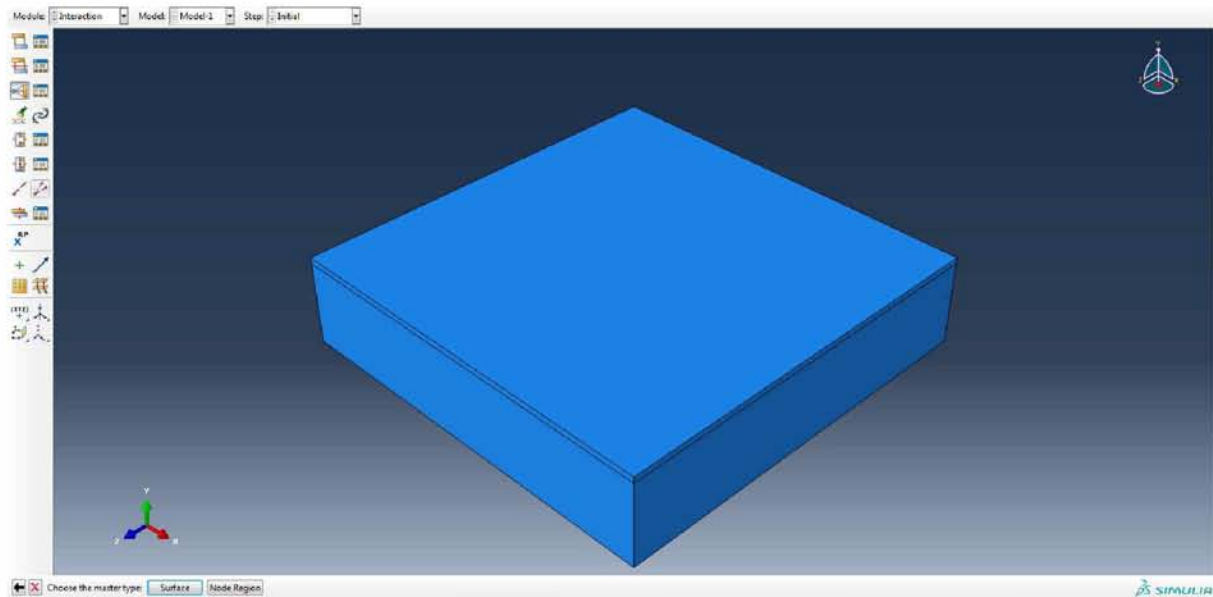
Εικόνα 4.6.13. Ολοκλήρωση δημιουργίας πρώτης σύνδεσης (φράγματος – πρανών κοιλάδας).

Ακολουθεί η δημιουργία σύνδεσης του φράγματος με το υπέδαφος θεμελίωσης. Επιλέγεται και πάλι η εντολή δημιουργίας περιορισμού (**Create Constraint**) και τύπος σύνδεση (**Type: Tie**).

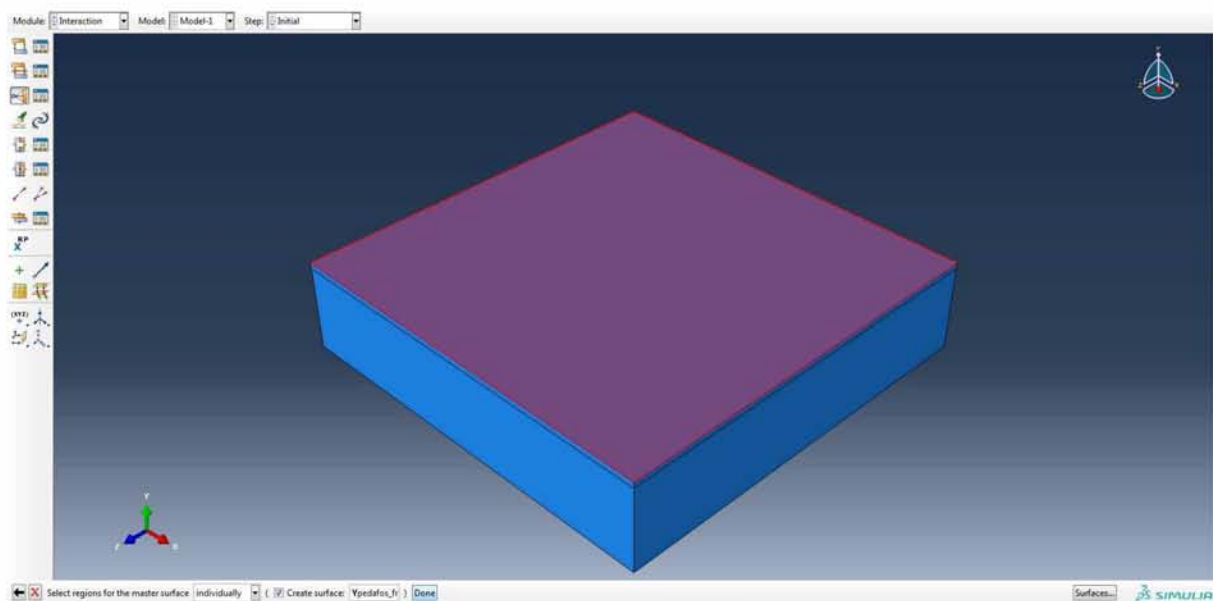


Εικόνα 4.6.14. Δημιουργία δεύτερης σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.

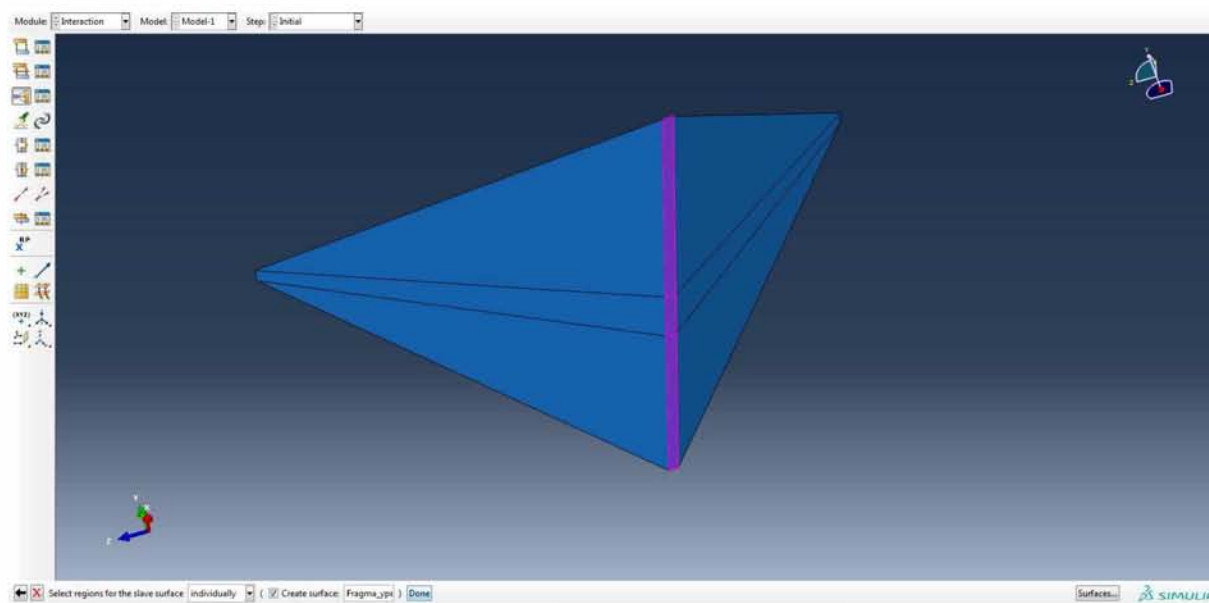
Οι περιοχές σύνδεσης θα καθοριστούν και πάλι με επιλογή επιφανειών (**Surface**). Επιλέγεται η ανώτερη επιφάνεια του υπεδάφους ως κύρια επιφάνεια (**master surface**) και η βάση του φράγματος ως δευτερεύουσα (**slave surface**).



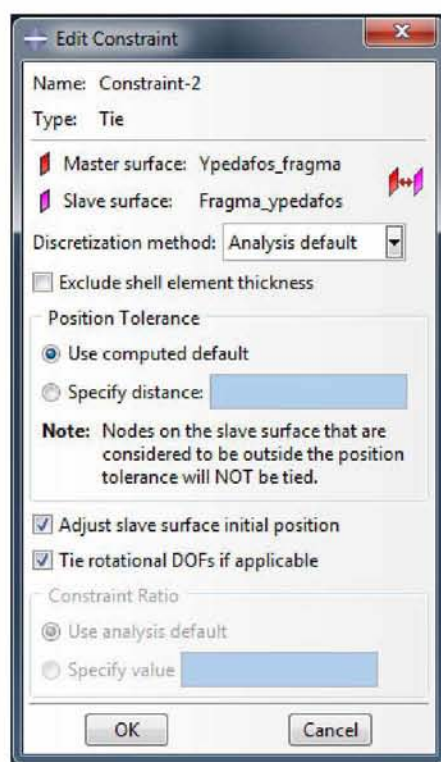
Εικόνα 4.6.15. Καθορισμός περιοχής σύνδεσης με επιλογή επιφάνειας.



Εικόνα 4.6.16. Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για τη δεύτερη σύνδεση.

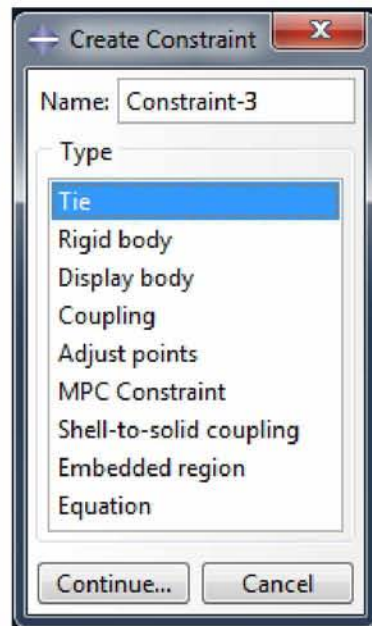


Εικόνα 4.6.17. Επιλογή δεύτερης επιφάνειας σύνδεσης για τη δεύτερη σύνδεση.

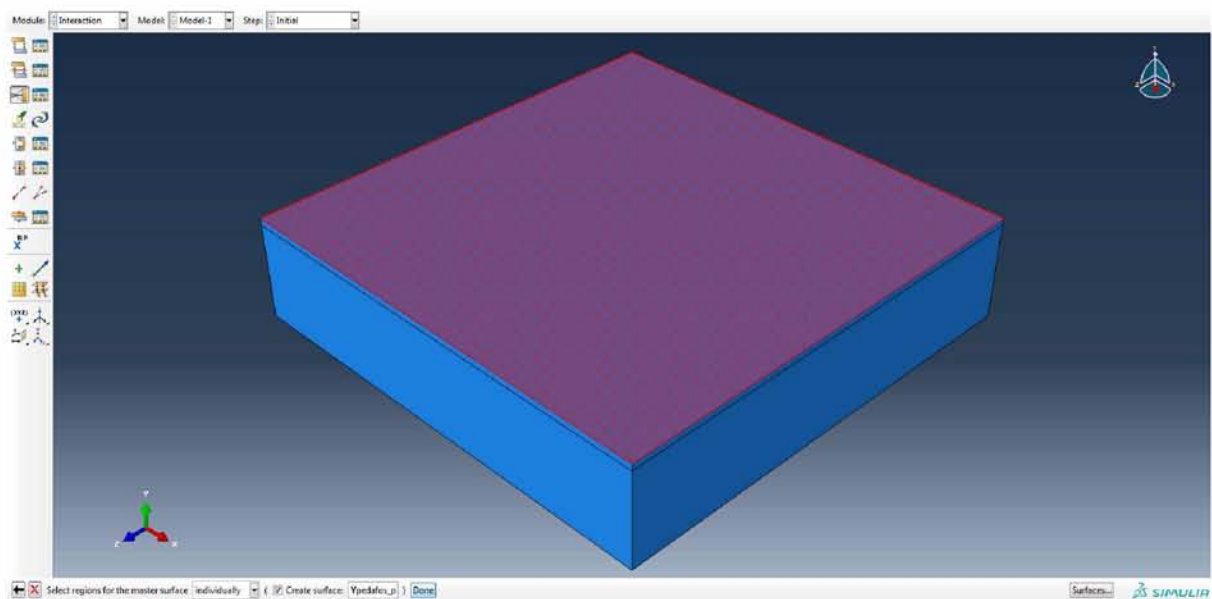


Εικόνα 4.6.18. Ολοκλήρωση δημιουργίας δεύτερης σύνδεσης (φράγματος – υπεδάφους).

Ως τρίτη και τελευταία σύνδεση μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου, ορίζεται αυτή των πρανών της κοιλάδας με το υπέδαφος. Επιλέγεται **Create Constraint** → **Tie** και ορίζεται ως κύρια επιφάνεια η ανώτερη επιφάνεια του υπεδάφους, ενώ ως δευτερεύουσα επιφάνεια η βάση των πρανών.

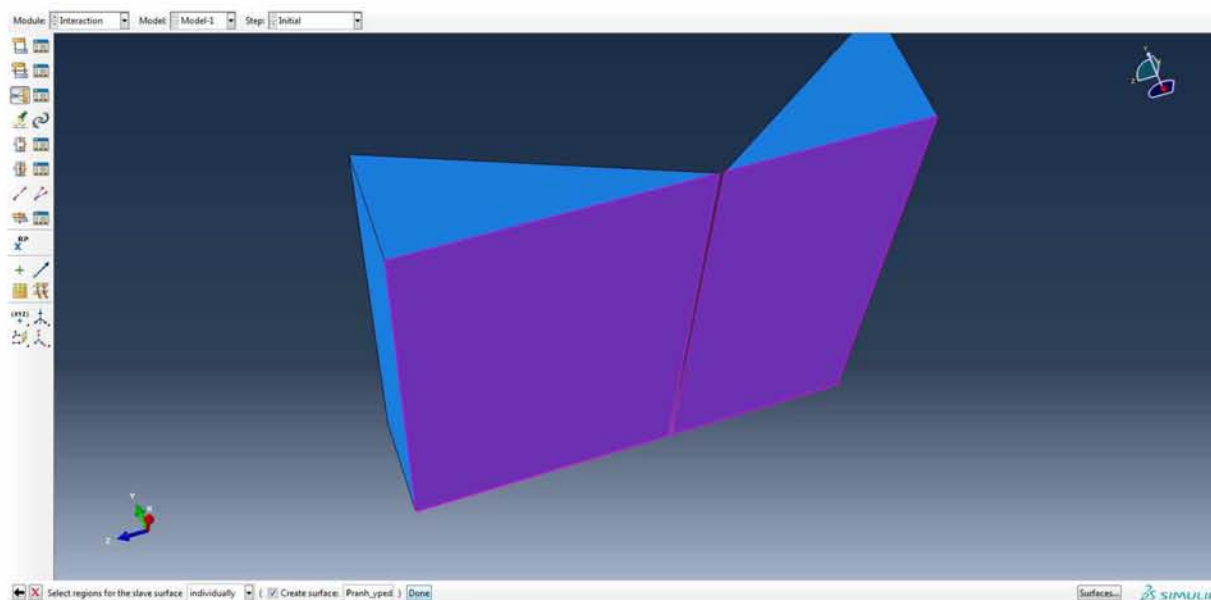


Εικόνα 4.6.19. Δημιουργία τρίτης σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου.

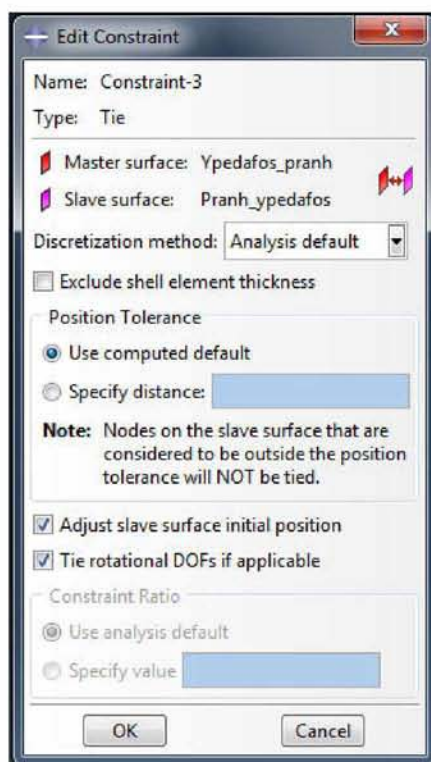


Εικόνα 4.6.20. Επιλογή πρώτης επιφάνειας σύνδεσης για την τρίτη σύνδεση.





Εικόνα 4.6.21. Επιλογή δεύτερης επιφάνειας σύνδεσης για την τρίτη σύνδεση.



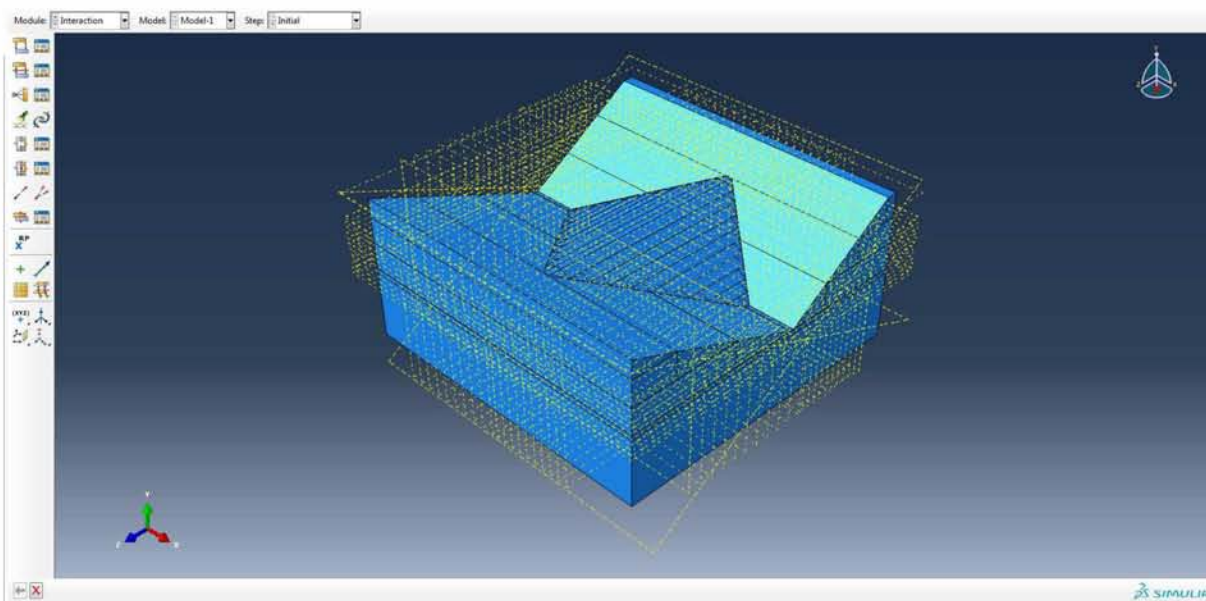
Εικόνα 4.6.22. Ολοκλήρωση δημιουργίας τρίτης σύνδεσης (πρανών κοιλάδας – υπεδάφους).

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα η κατασκευή του φράγματος θα πραγματοποιηθεί σταδιακά σε 10 βήματα, ώστε να είναι πιο ρεαλιστική. Σε αντίθετη περίπτωση, κατασκευής του δηλαδή σε 1 βήμα, υπάρχει περίπτωση να προκύψουν αρκετά λανθασμένες τιμές καθιζήσεων, που δεν θα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

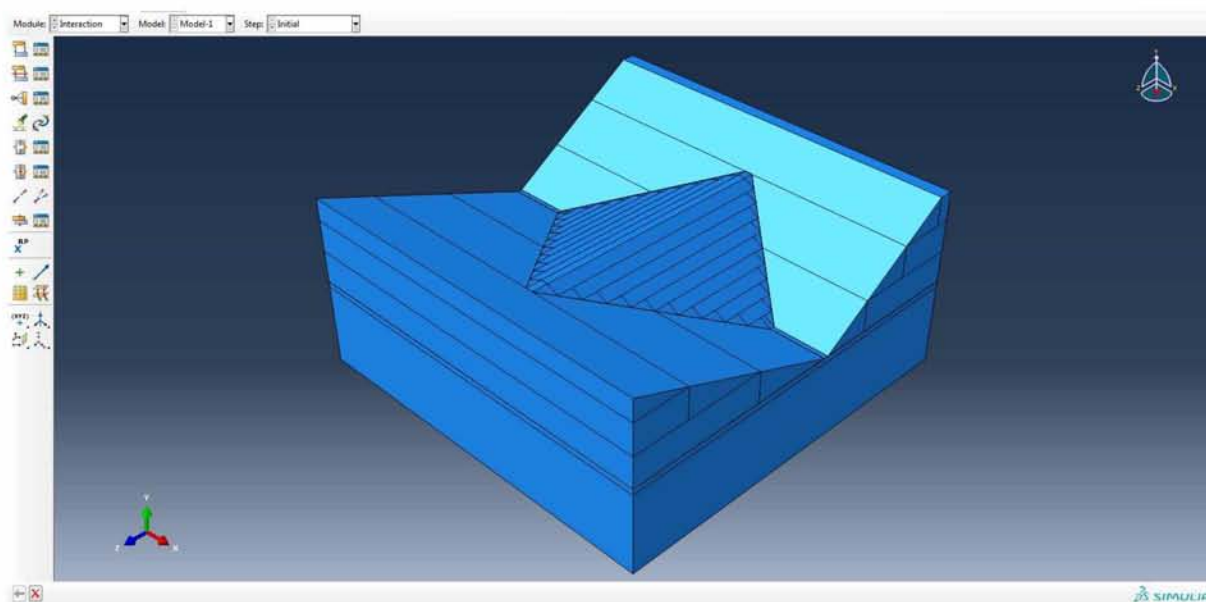
Επιστρέφοντας στην πρώτη ενότητα μοντελοποίησης (**Part Module**) διαιρείται το σώμα του φράγματος σε δέκα ισοϋψείς στρώσεις, δηλαδή το ύψος της κάθε στρώσης ορίζεται σε 10.9m. Εκτός αυτών, τόσο το φράγμα όσο και τα πρανή αποκόπτονται σε μικρότερα τμήματα (*partitions*) με τρόπο τέτοιο ώστε το μεγαλύτερο μέρος τους να αποτελείται από ορθογώνια

παράλληλόγραμμο. Επιτυγχάνεται, έτσι, αποτελεσματικότερη διακριτοποίηση στην αντίστοιχη ενότητα (*Mesh Module*) που αναλύεται στη συνέχεια της εργασίας.

Γίνεται λοιπόν ξανά χρήση βοηθητικών επιπέδων με βάση τα οποία πραγματοποιούνται αποκοπές προκειμένου να διαμορφωθεί κατάλληλα το μοντέλο. Χρησιμοποιούνται οι εντολές δημιουργίας επιπέδου (**Create Datum Plane: Offset From Principal Plane**) και αποκοπής στοιχείου προσδιορίζοντας το επίπεδο αποκοπής (**Partition Cell: Define Cutting Plane**). Παρακάτω φαίνονται τα βοηθητικά επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν και το τελικό μοντέλο, μετά τη δημιουργία στρώσεων και τις αποκοπές.

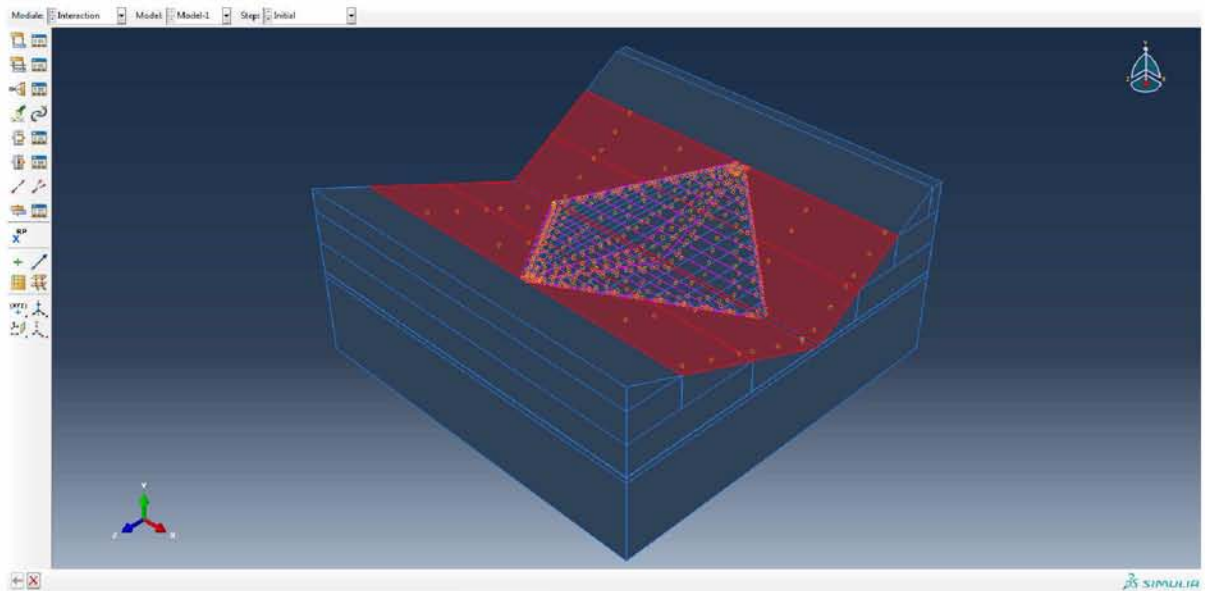


Εικόνα 4.6.23. Βοηθητικά επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν για την αποκοπή του μοντέλου σε μικρότερα τμήματα.

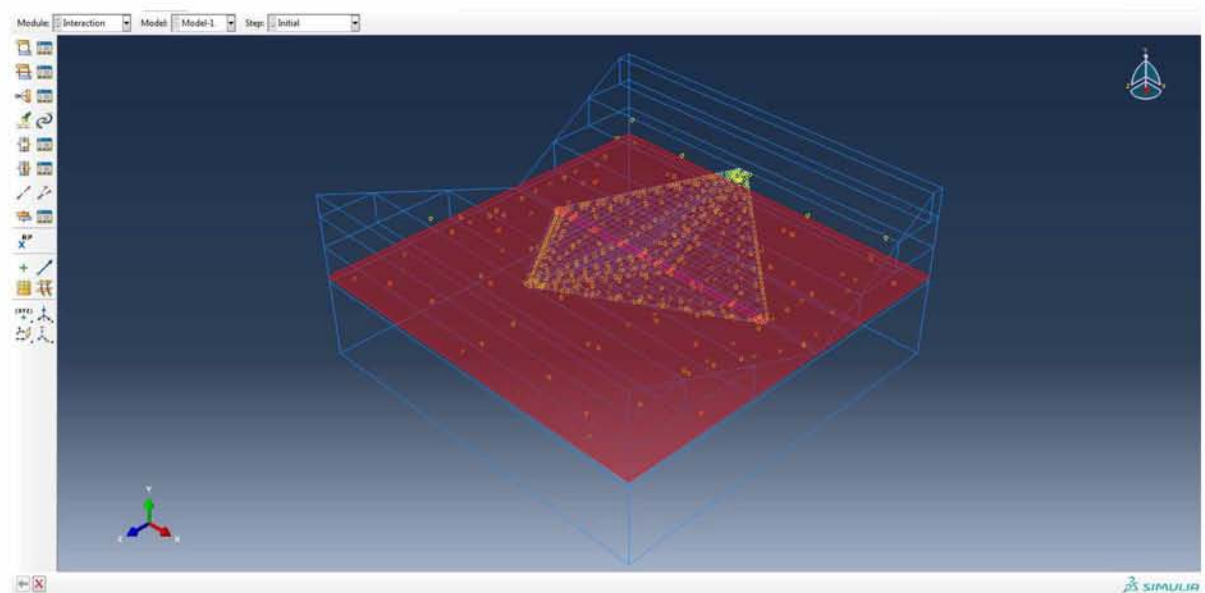


Εικόνα 4.6.24. Τελικό μοντέλο μετά τις αποκοπές των τμημάτων.

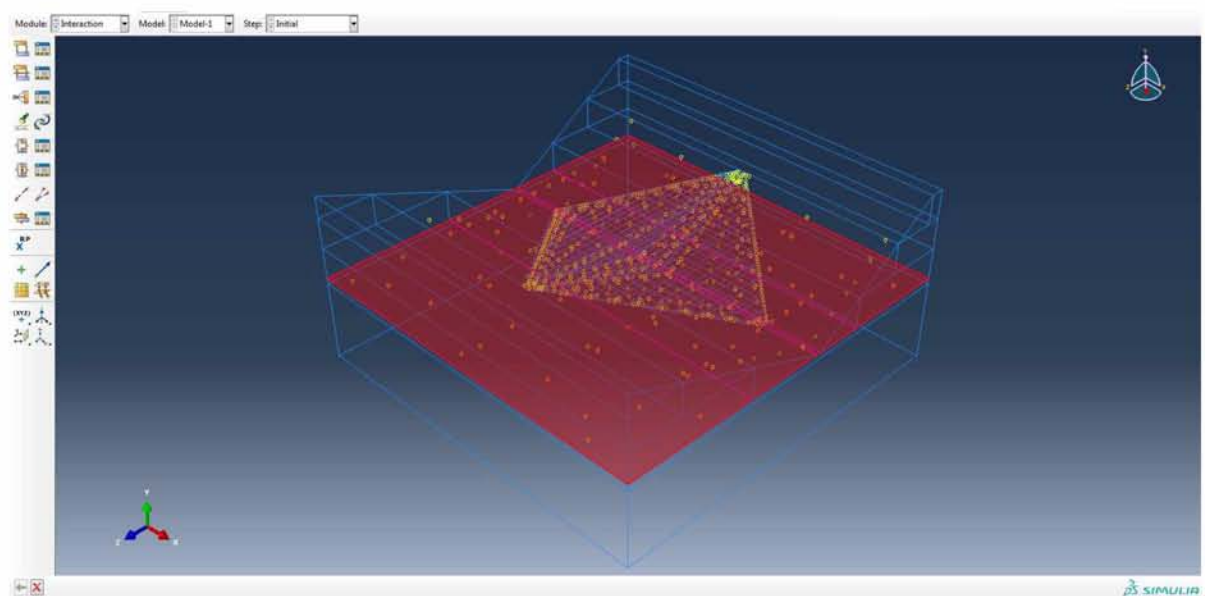
Επίσης, δίνονται απεικονίσεις των 3 συνδέσεων μεταξύ των τμημάτων για το τελικό μοντέλο.



Εικόνα 4.6.25. Απεικόνιση πρώτης σύνδεσης (φράγματος – πρανών κοιλάδας).



Εικόνα 4.6.26. Απεικόνιση δεύτερης σύνδεσης (φράγματος – υπεδάφους).

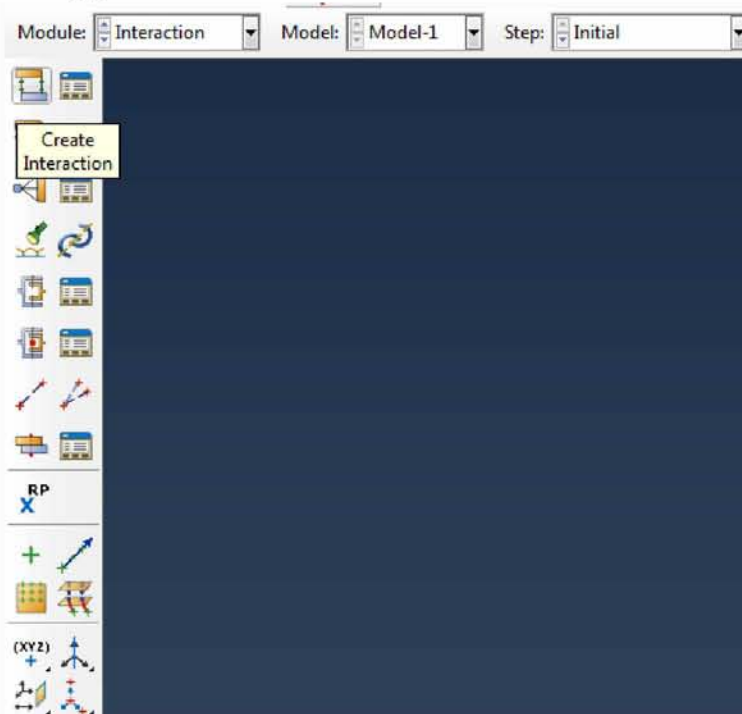


Εικόνα 4.6.27. Απεικόνιση τρίτης σύνδεσης (πρανών κοιλάδας – υπεδάφους).

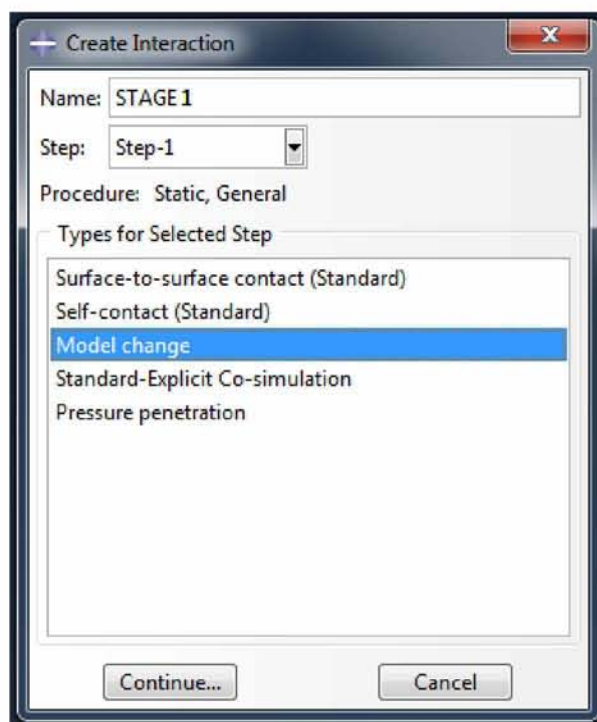


Στην ενότητα των αλληλεπιδράσεων, τέλος, γίνεται μεμονωμένη επιλογή της κάθε στρώσης του φράγματος και ορίζεται το βήμα στο οποίο η καθεμία κατασκευάζεται.

Επιλέγεται η εντολή δημιουργίας αλληλεπίδρασης (**Create Interaction**) και στη συνέχεια αφού ονομαστεί, επιλέγεται το βήμα 1 (**Step-1**) και σαν τύπος αλληλεπίδρασης η αλλαγή μοντέλου (**Model change**).



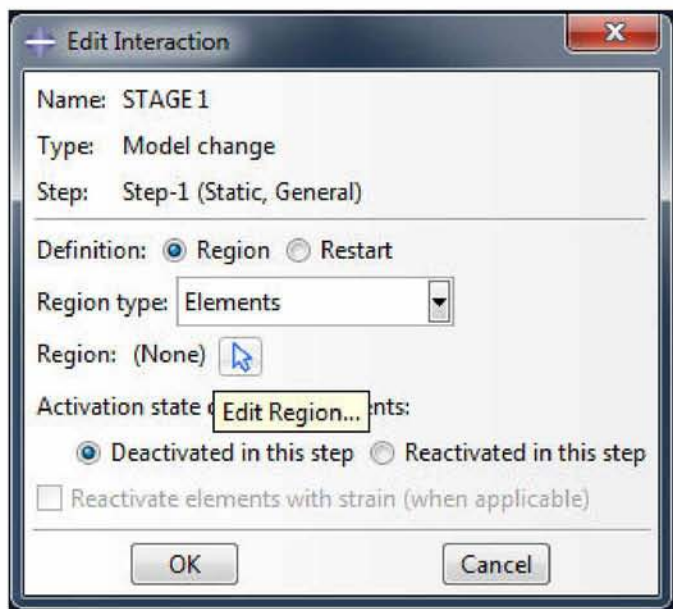
Εικόνα 4.6.28. Εντολή δημιουργίας αλληλεπίδρασης.



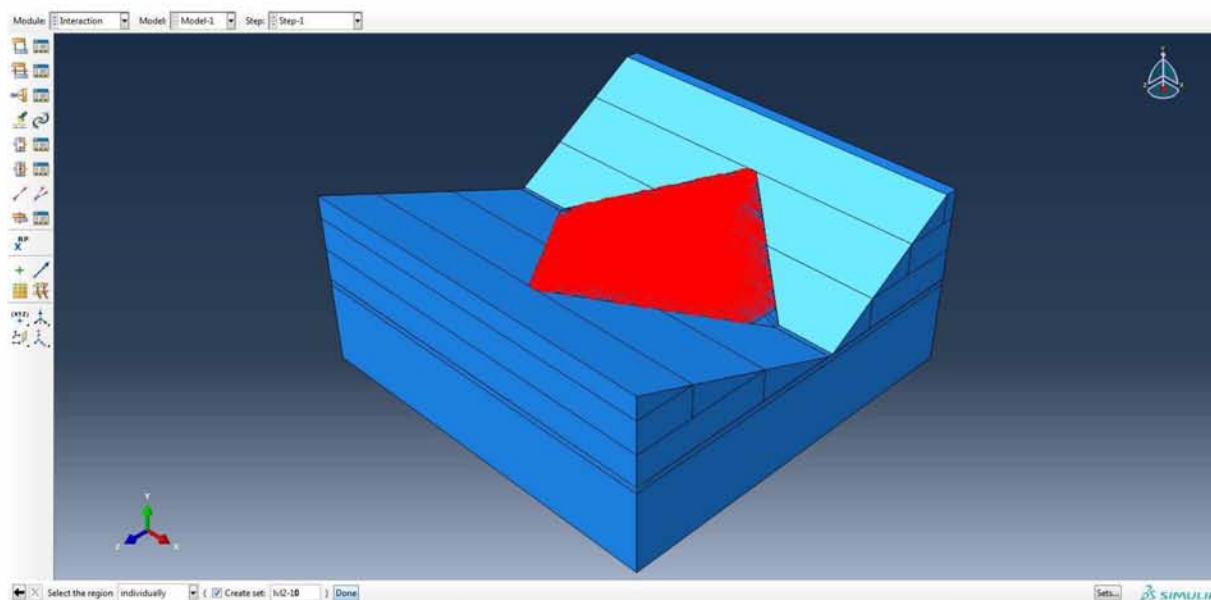
Εικόνα 4.6.29. Επιλογή τύπου αλληλεπίδρασης και βήματος δημιουργίας της (πρώτο βήμα).



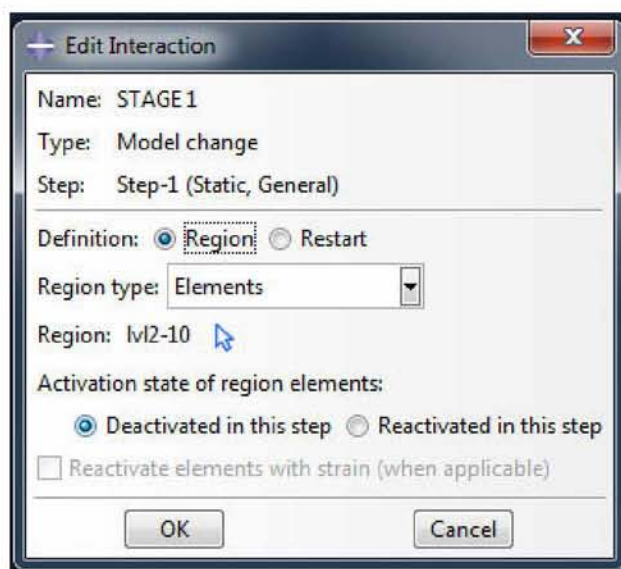
Κλικάρεται ορισμός με επιλογή περιοχής (**Definition: Region**) και στον τύπο περιοχής (**Region type**) επιλέγεται με στοιχεία (**Elements**). Στη συνέχεια, κλικάρεται το βελάκι επεξεργασίας περιοχής (**Edit Region...**), επιλέγονται από το παράθυρο οι στρώσεις 2-10 του φράγματος και δίνεται εντολή απενεργοποίησής τους στο τρέχον βήμα (**Activation state of region elements: Deactivated in this step**). Στο πρώτο βήμα δηλαδή διατηρείται (ουσιαστικά κατασκευάζεται) η πρώτη στρώση του φράγματος και απενεργοποιούνται οι υπόλοιπες.



Εικόνα 4.6.30. Επιλογή τύπου περιοχής και εντολή επεξεργασίας περιοχής αλληλεπίδρασης.



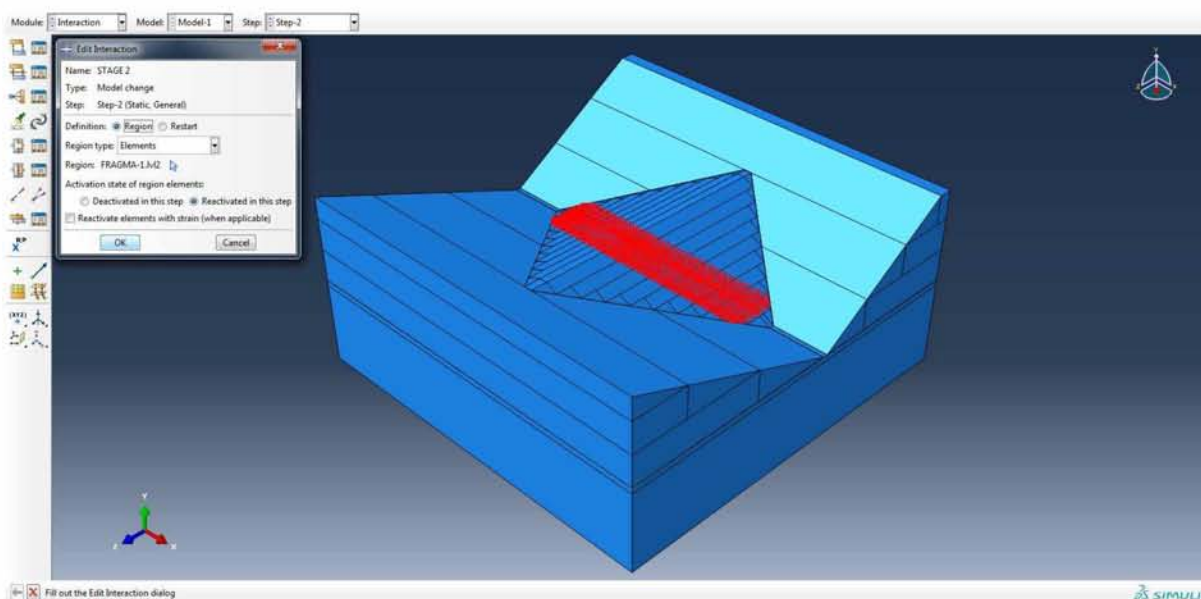
Εικόνα 4.6.31. Επιλογή περιοχής αλληλεπίδρασης πρώτου βήματος ανάλυσης (απενεργοποίηση των στρώσεων 2-10 του φράγματος).



Εικόνα 4.6.32. Εντολή απενεργοποίησης στρώσεων 2-10 και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης πρώτου βήματος ανάλυσης.

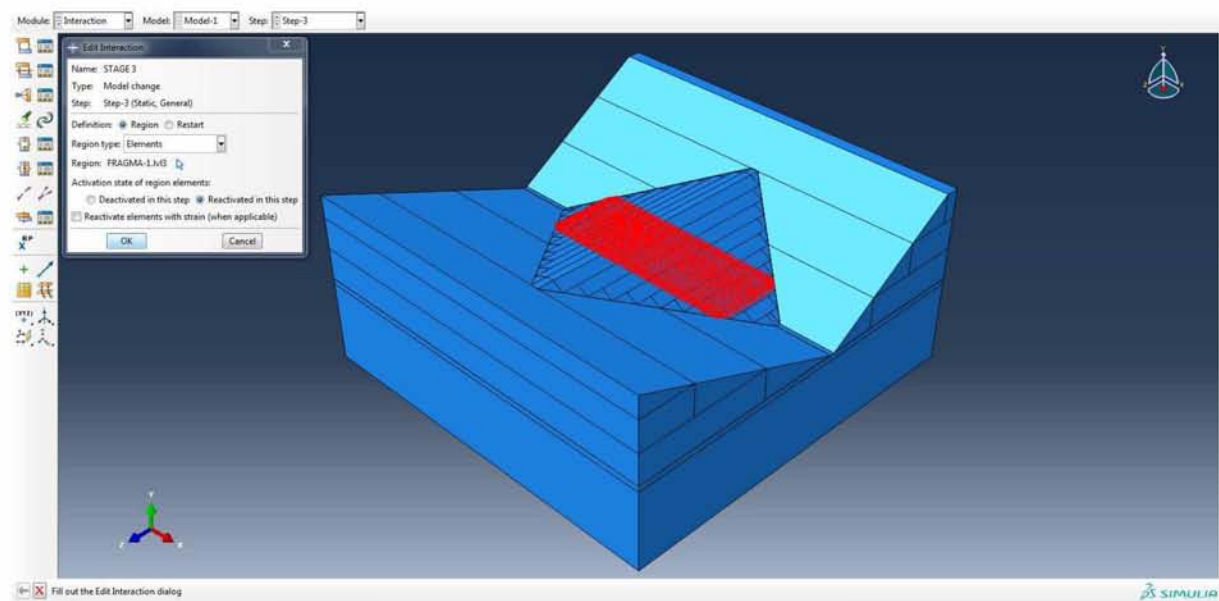
Στον τύπο περιοχής (Region Type) το πρόγραμμα προσφέρει αρχικά μόνο τη δυνατότητα επιλογής περιοχής με βάση τη γεωμετρία του μοντέλου (Geometry). Για να είναι δυνατή η επιλογή με στοιχεία (Elements), πρέπει να έχει προηγηθεί διακριτοποίηση (mesh) του συγκεκριμένου τμήματος στην αντίστοιχη ενότητα (Mesh Module). Η επιλογή περιοχής με στοιχεία προτιμάται έναντι αυτής με γεωμετρία, καθώς προσφέρει υψηλότερη ακρίβεια ανάλυσης.

Επαναλαμβάνεται η εντολή δημιουργίας αλληλεπίδρασης αλλαγής μοντέλου (**Create Interaction → Model change**) για το βήμα 2 (**Step-2**), επιλέγοντας αυτή τη φορά ως περιοχή (**Region**) τη δεύτερη στρώση του φράγματος και επαναενεργοποιώντας την στο βήμα αυτό (**Activation state of region elements: Reactivated in this step**).

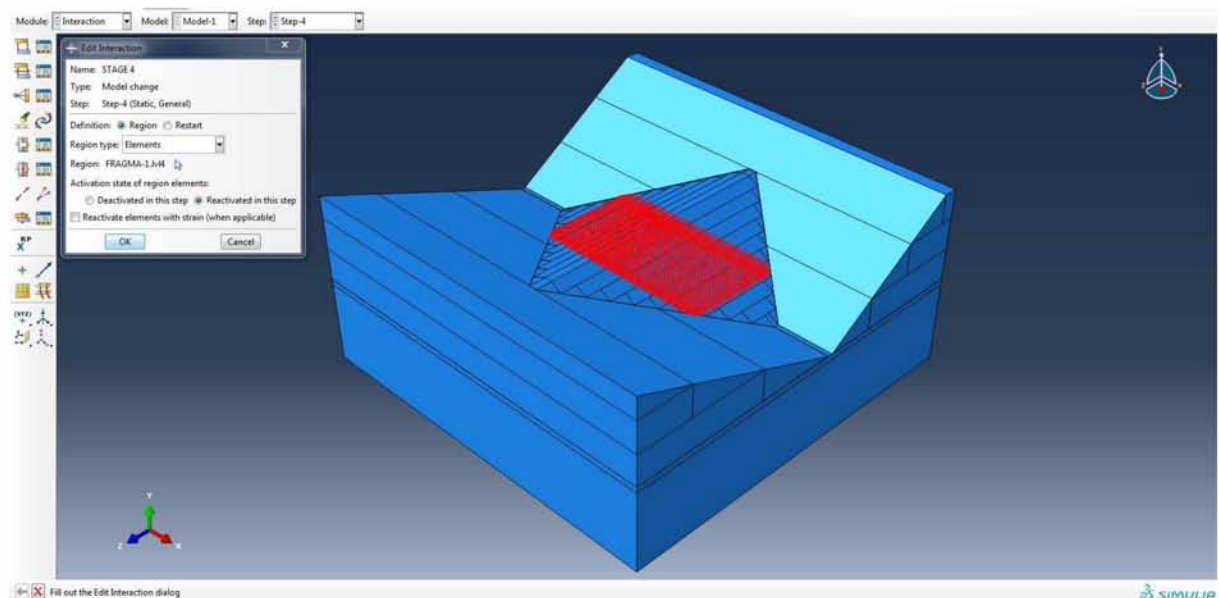


Εικόνα 4.6.33. Ενεργοποίηση δεύτερης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης δεύτερου βήματος ανάλυσης.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία επαναενεργοποιούνται οι στρώσεις 3-10 στα αντίστοιχα βήματα.

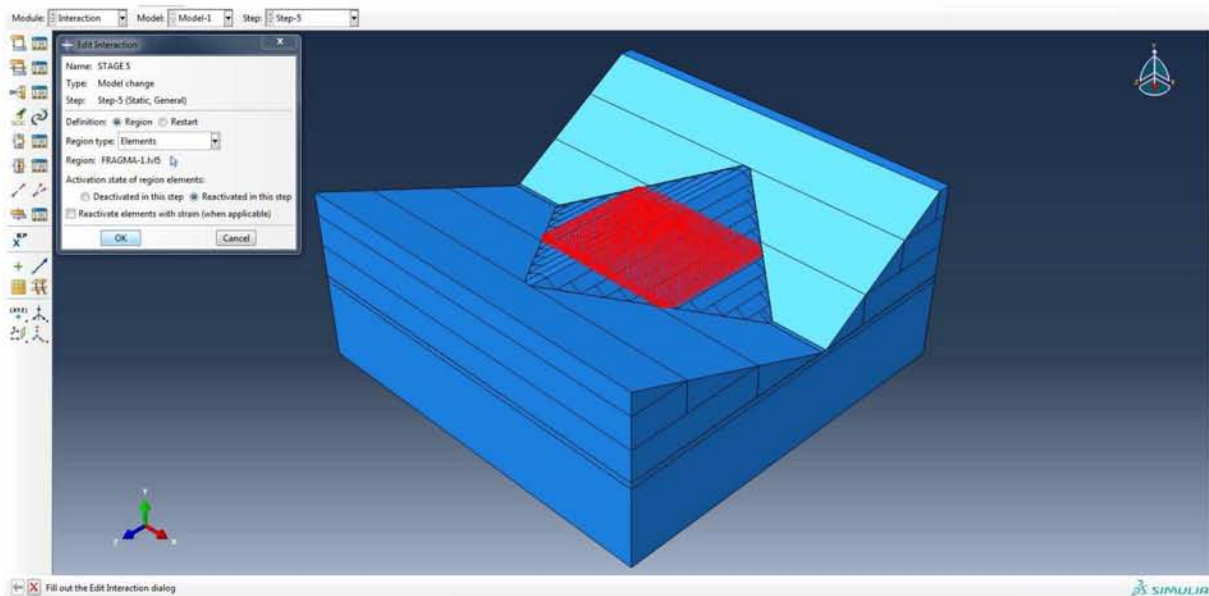


Εικόνα 4.6.34. Ενεργοποίηση τρίτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης τρίτου βήματος ανάλυσης.

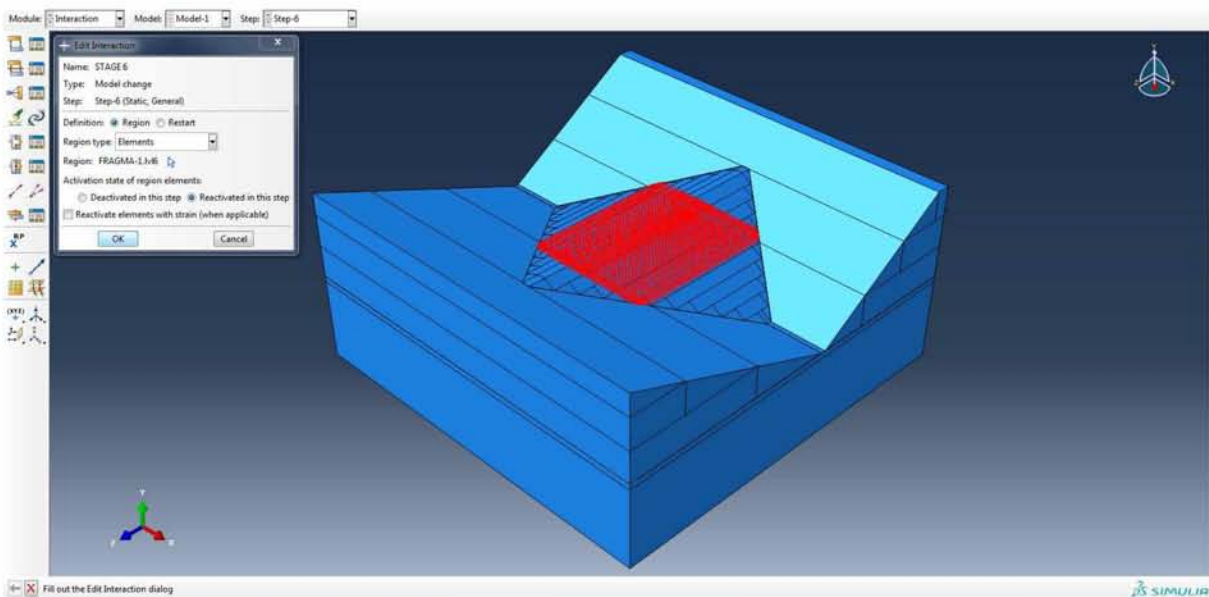


Εικόνα 4.6.35. Ενεργοποίηση τέταρτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης τέταρτου βήματος ανάλυσης.



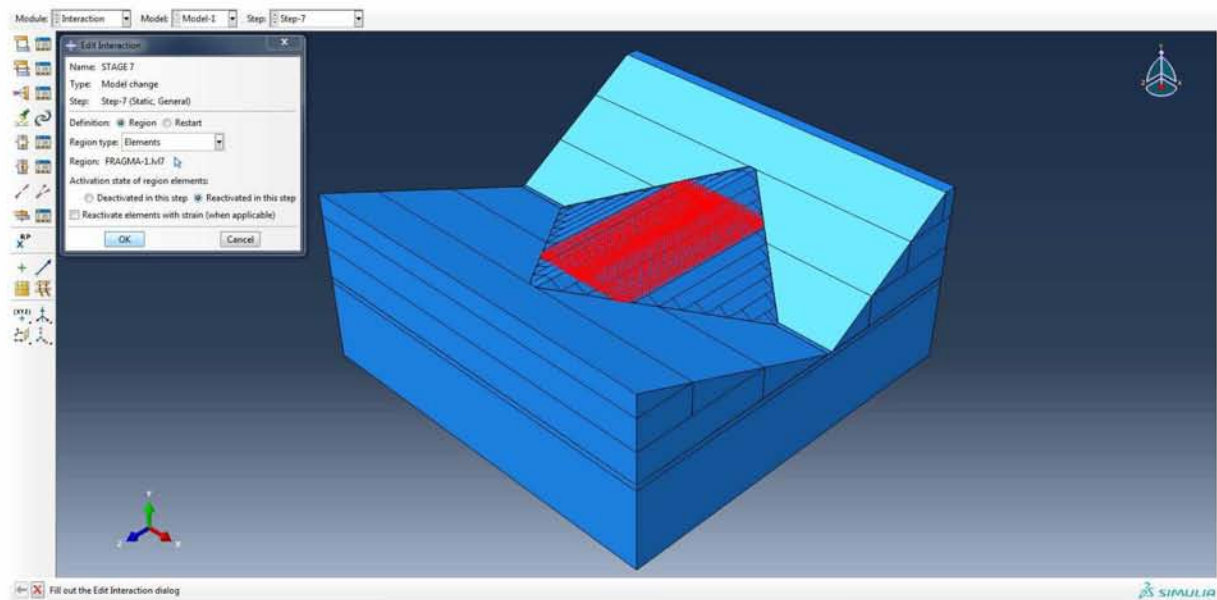


Εικόνα 4.6.36. Ενεργοποίηση πέμπτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης πέμπτου θήματος ανάλυσης.

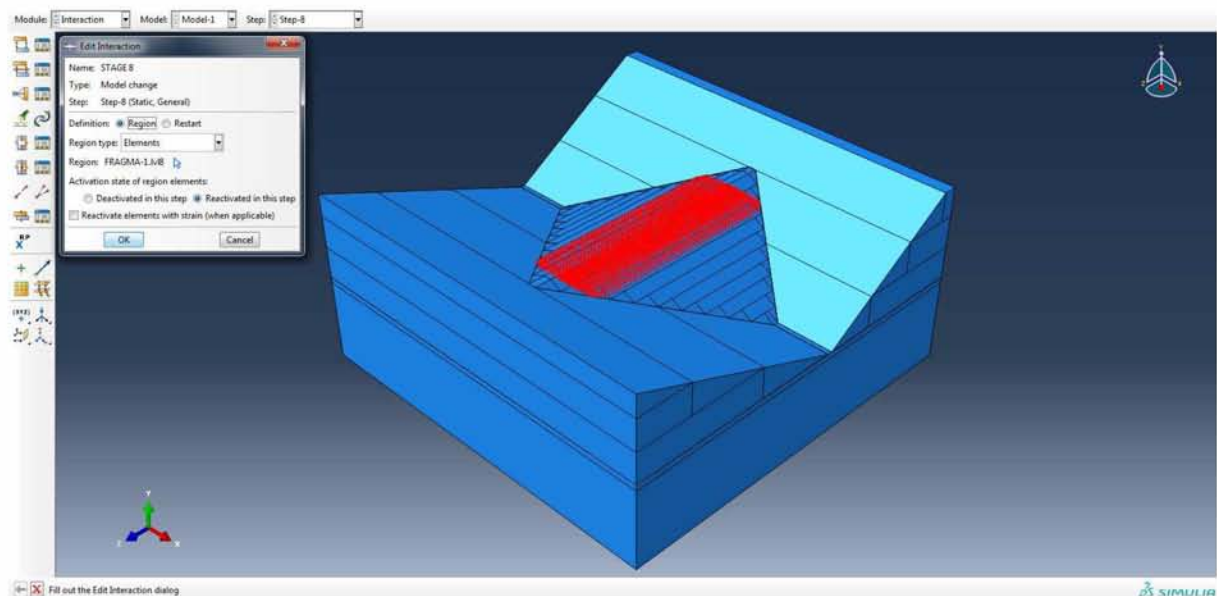


Εικόνα 4.6.37. Ενεργοποίηση έκτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης έκτου θήματος ανάλυσης.

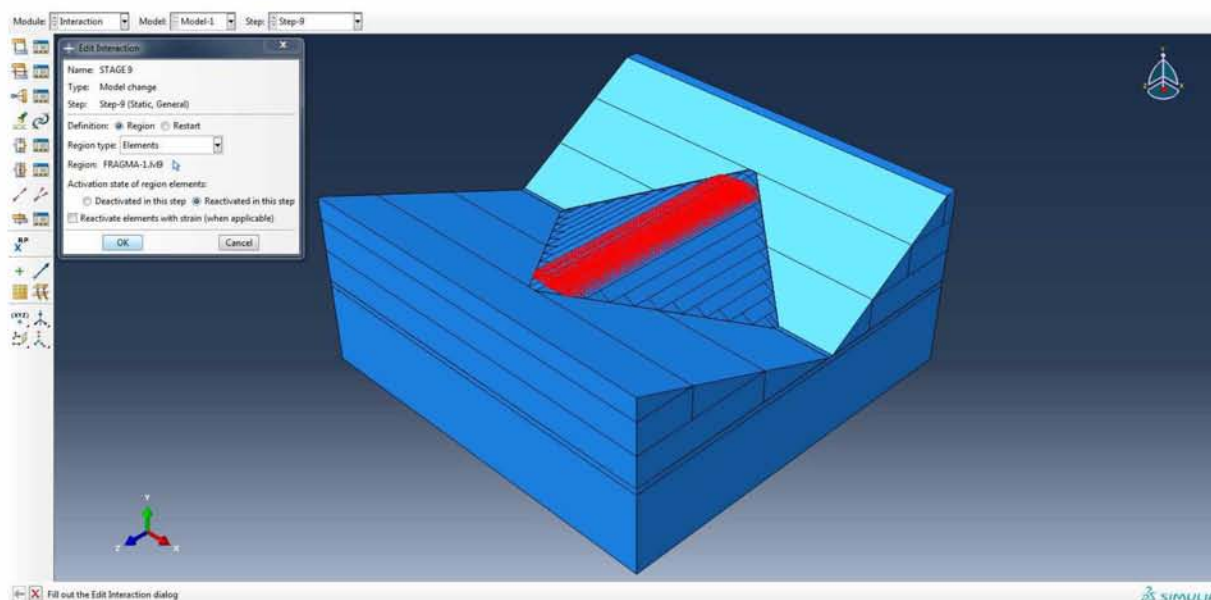




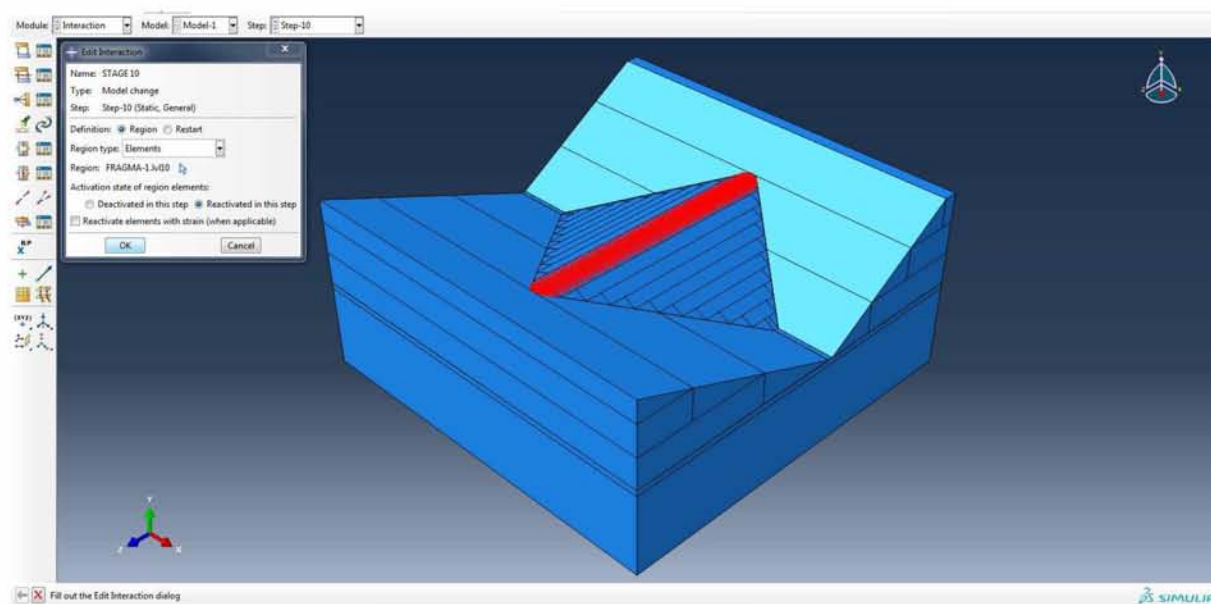
Εικόνα 4.6.38. Ενεργοποίηση έβδομης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης έβδομου θήματος ανάλυσης.



Εικόνα 4.6.39. Ενεργοποίηση όγδοης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης όγδοου θήματος ανάλυσης.



Εικόνα 4.6.40. Ενεργοποίηση ένατης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης ένατου βήματος ανάλυσης.



Εικόνα 4.6.41. Ενεργοποίηση δέκατης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας αλληλεπίδρασης δέκατου βήματος ανάλυσης.

## 4.7 Load Module

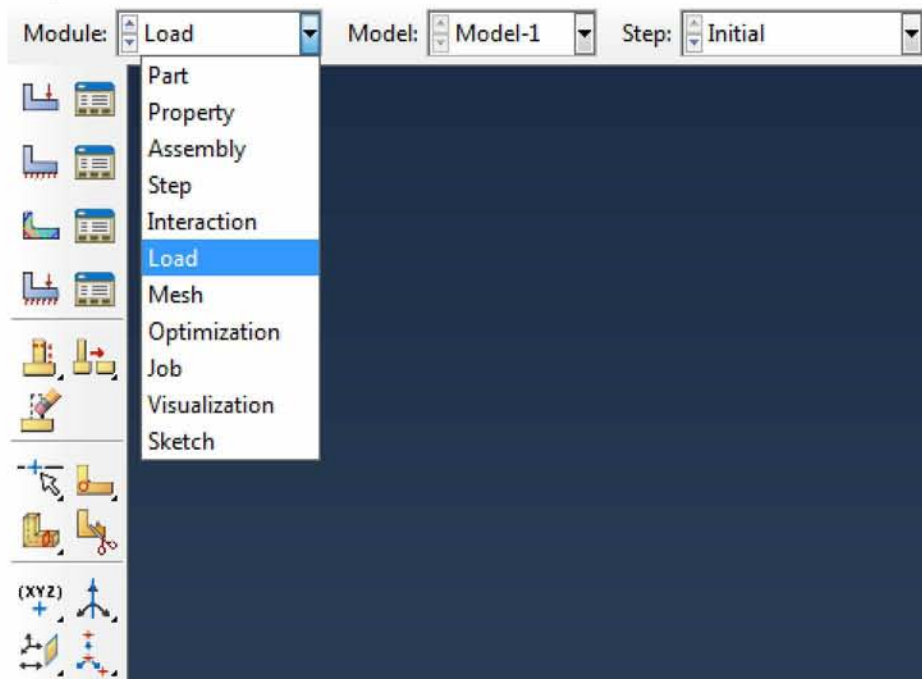
Στην ενότητα αυτή ορίζονται οι συνθήκες φόρτισης (loads) και οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) του μοντέλου. Οι συνθήκες αυτές εξαρτώνται άμεσα από τα βήματα, το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να καθοριστούν το βήμα ή τα βήματα στα οποία γίνονται ενεργές, ενώ σε περίπτωση διαγραφής ενός βήματος διαγράφονται και όλες οι σχετιζόμενες με αυτό συνθήκες.

## ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

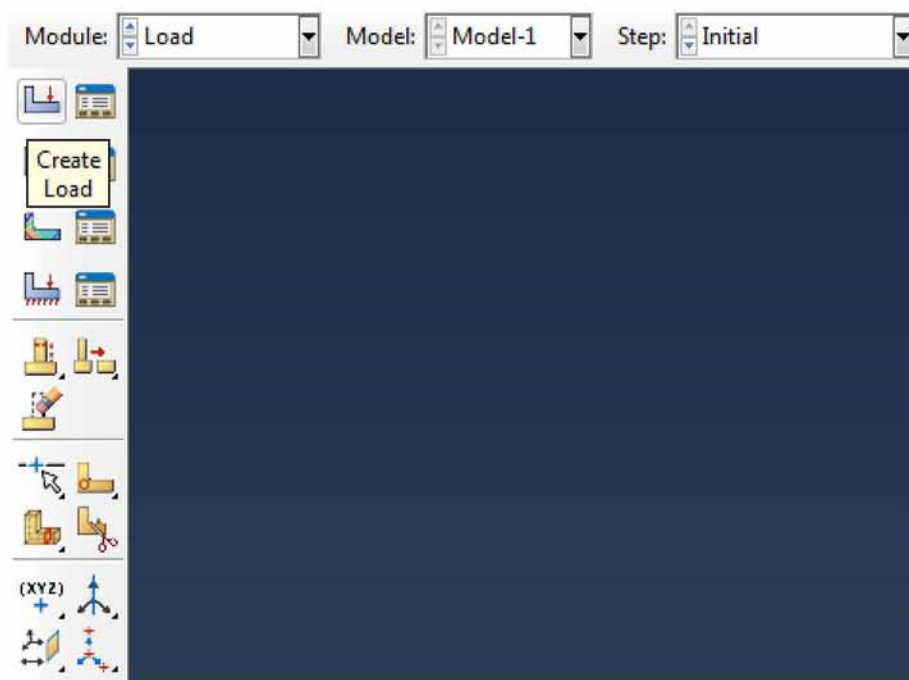
### ➤ ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Αρχικά, ασκείται το ίδιο βάρος του υλικού στην κάθε στρώση του φράγματος μέσω της επιτάχυνσης της βαρύτητας, στο βήμα στο οποίο κατασκευάζεται η κάθε στρώση.

Επιλέγεται η ενότητα φορτίσεων (**Module: Load**) και στη συνέχεια η δημιουργία φόρτισης (**Create Load**).



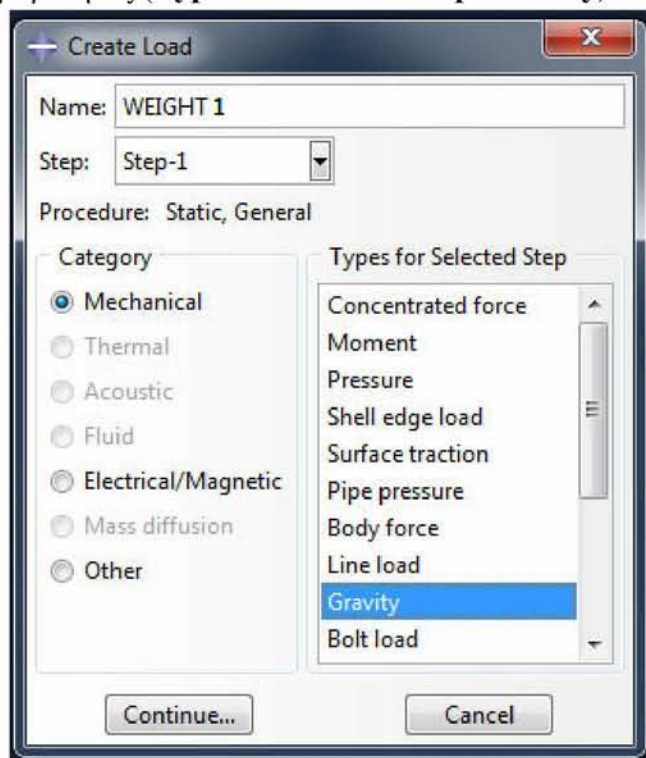
Εικόνα 4.7.1. Επιλογή ενότητας Load Module.



Εικόνα 4.7.2. Εντολή δημιουργίας φόρτισης.

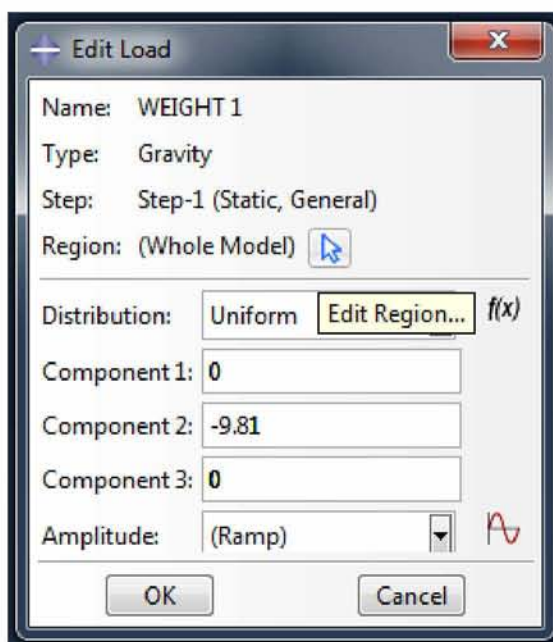


Ονομάζεται η φόρτιση της πρώτης στρώσης (**Name: WEIGHT 1**), επιλέγεται ως βήμα δημιουργίας της το βήμα 1 (**Step-1**), στο είδος φορτίου μηχανικό (**Category: Mechanical**) και ως τύπος φορτίο βαρύτητας (**Types for Selected Step: Gravity**).



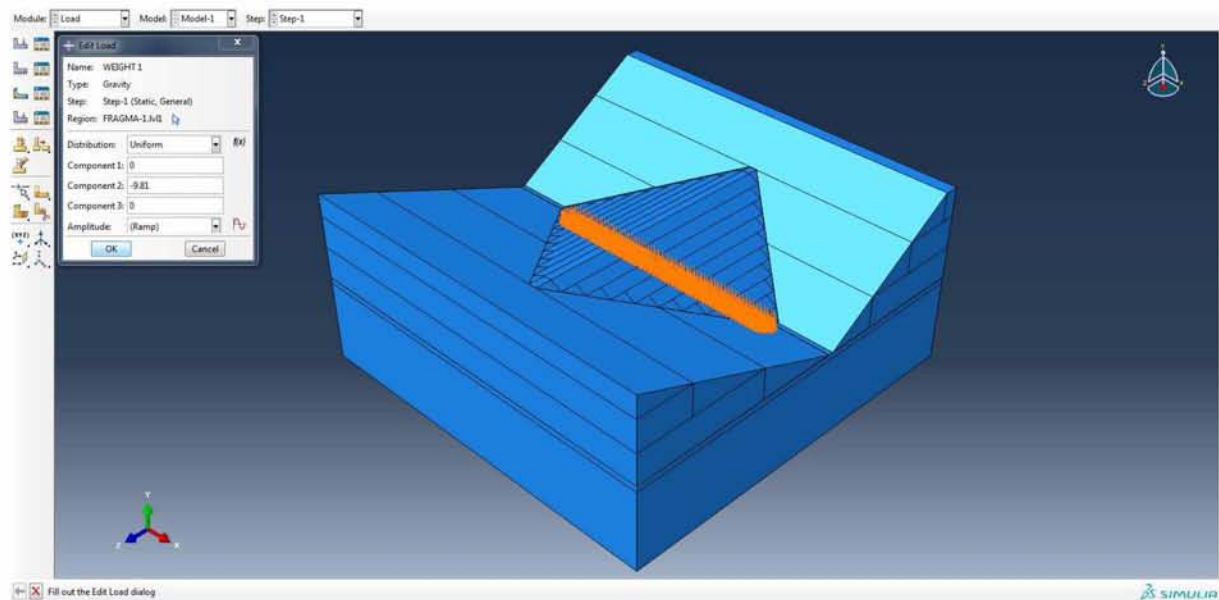
Εικόνα 4.7.3. Επιλογή κατηγορίας και τύπου φόρτισης πρώτου βήματος ανάλυσης.

Εισάγεται η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9.81\text{m/s}^2$ ) στην κατακόρυφη διεύθυνση (συνιστώσα 2 στο συγκεκριμένο μοντέλο) και με φορά προς τα κάτω (**Component 2: -9.81**) και αφού κλικαριστεί το βελάκι επιλογής περιοχής (**Edit Region...**) επιλέγεται από το παράθυρο προβολής η πρώτη στρώση του φράγματος και κλικάρεται **OK**.



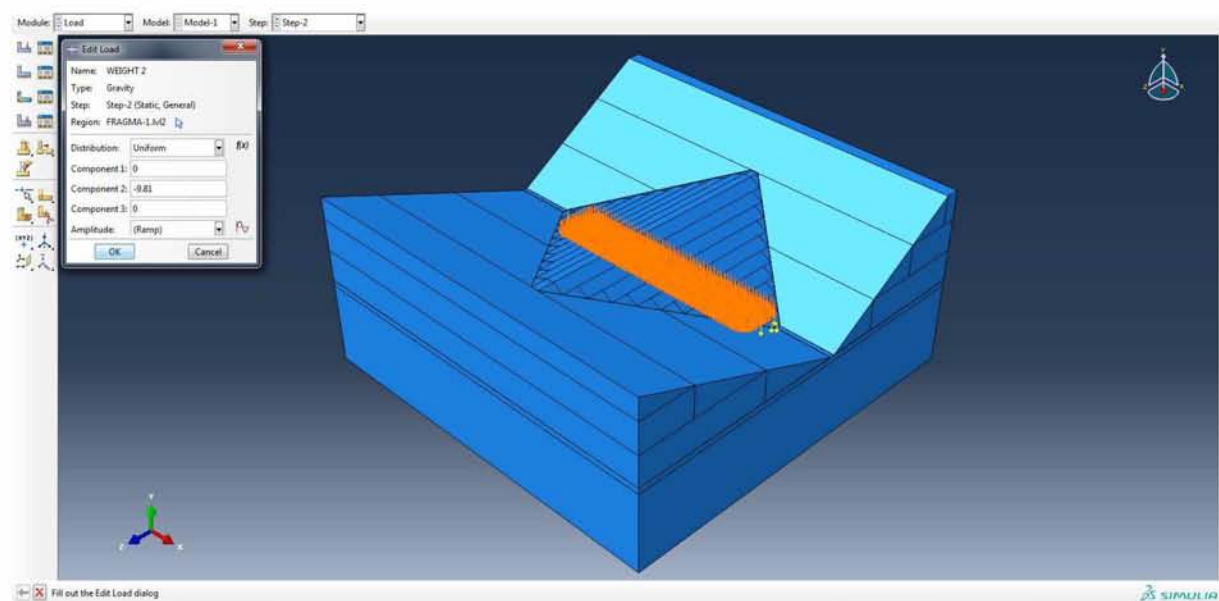
Εικόνα 4.7.4. Ορισμός μεγέθους και διεύθυνσης φόρτισης & εντολή επιλογής περιοχής φόρτισης πρώτου βήματος ανάλυσης.



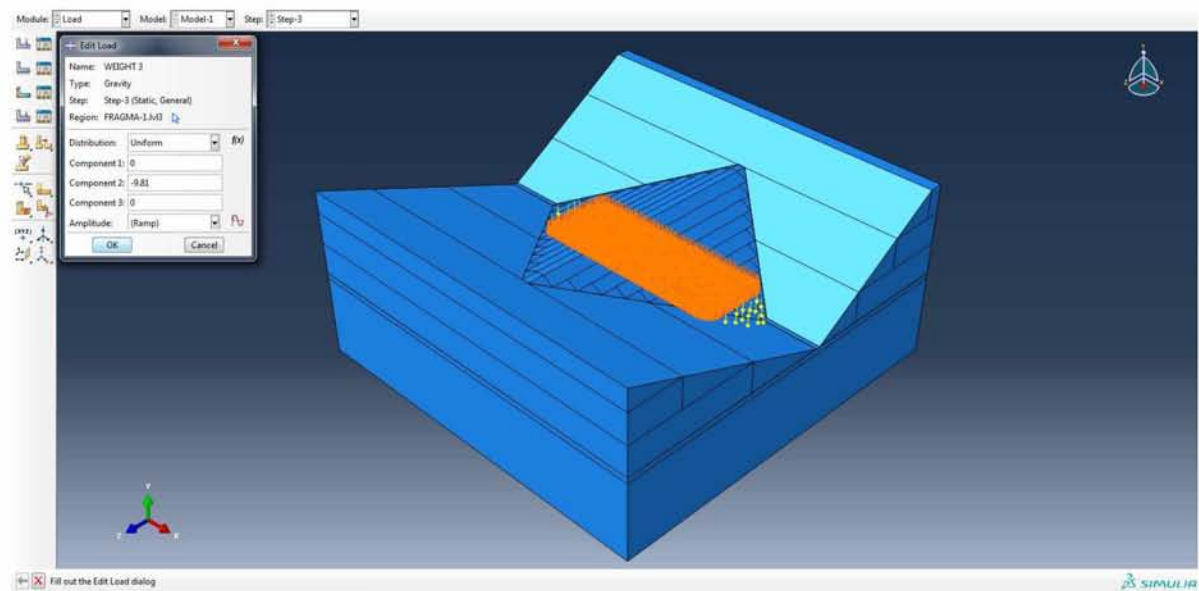


Εικόνα 4.7.5. Επιλογή πρώτης στρώσης φράγματος και ολοκλήρωση δημιουργίας φόρτισης πρώτου βήματος ανάλυσης.

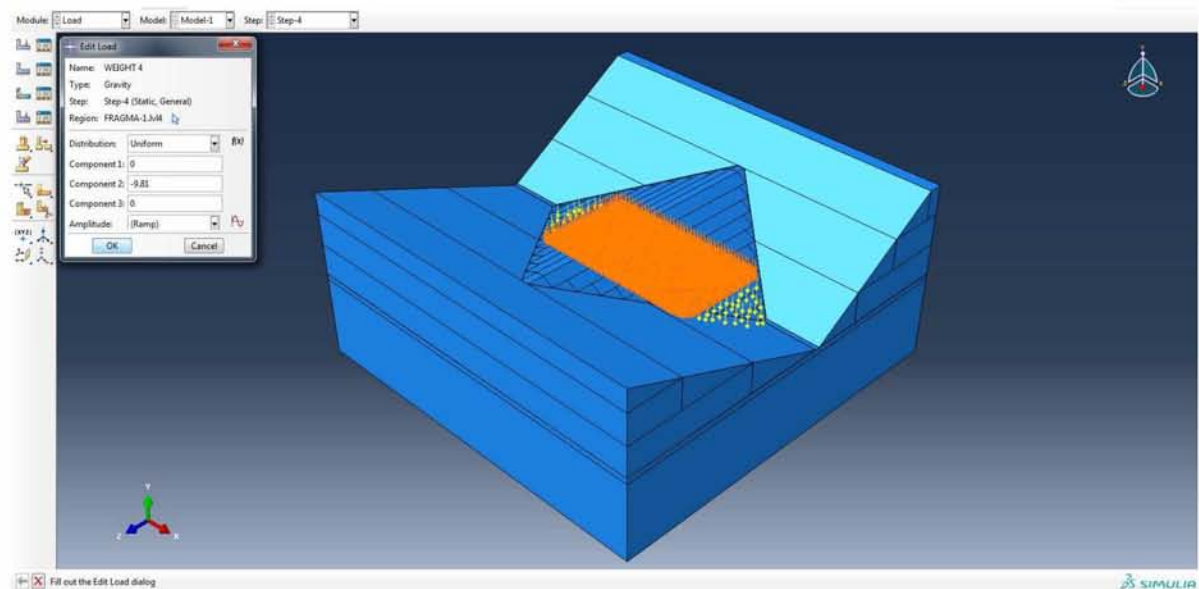
Με τον ίδιο τρόπο και χρησιμοποιώντας κάθε φορά την εντολή δημιουργίας φορτίου (**Create Load**), ορίζονται και τα φορτία βαρύτητας στις υπόλοιπες στρώσεις του φράγματος.



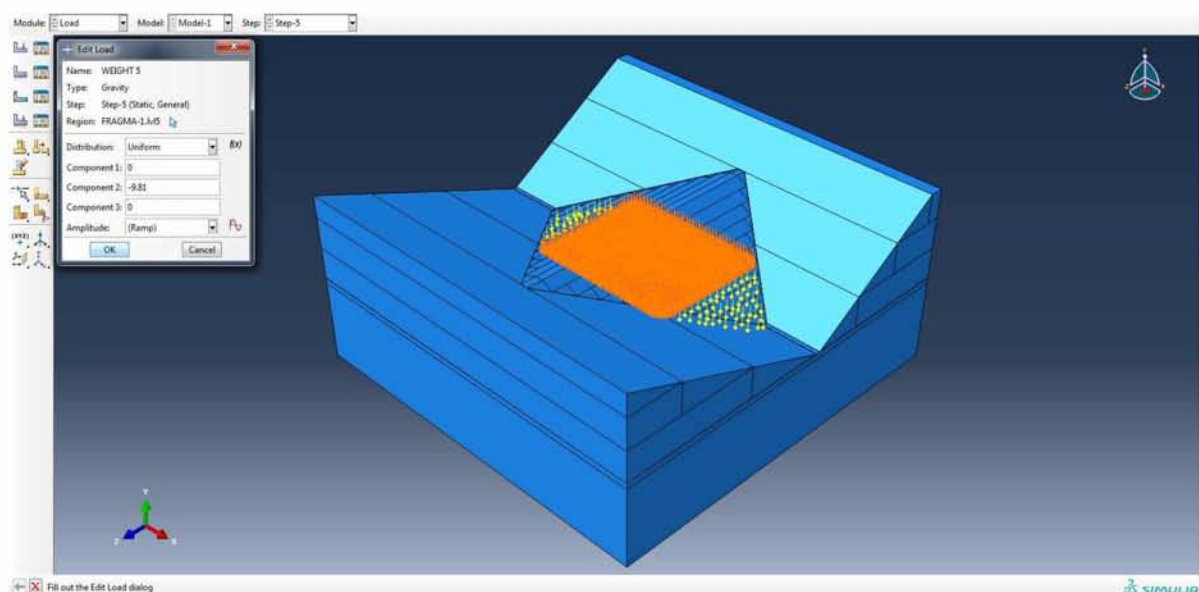
Εικόνα 4.7.6. Δημιουργία φόρτισης δεύτερου βήματος ανάλυσης (δεύτερη στρώση φράγματος).



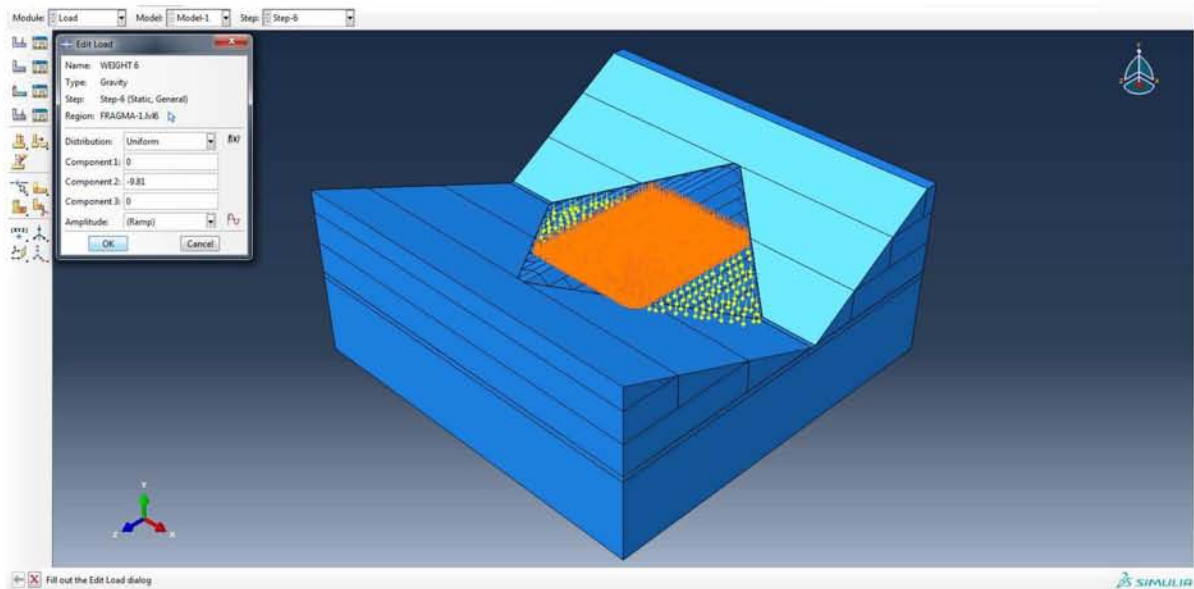
Εικόνα 4.7.7. Δημιουργία φόρτισης τρίτου βήματος ανάλυσης (τρίτη στρώση φράγματος).



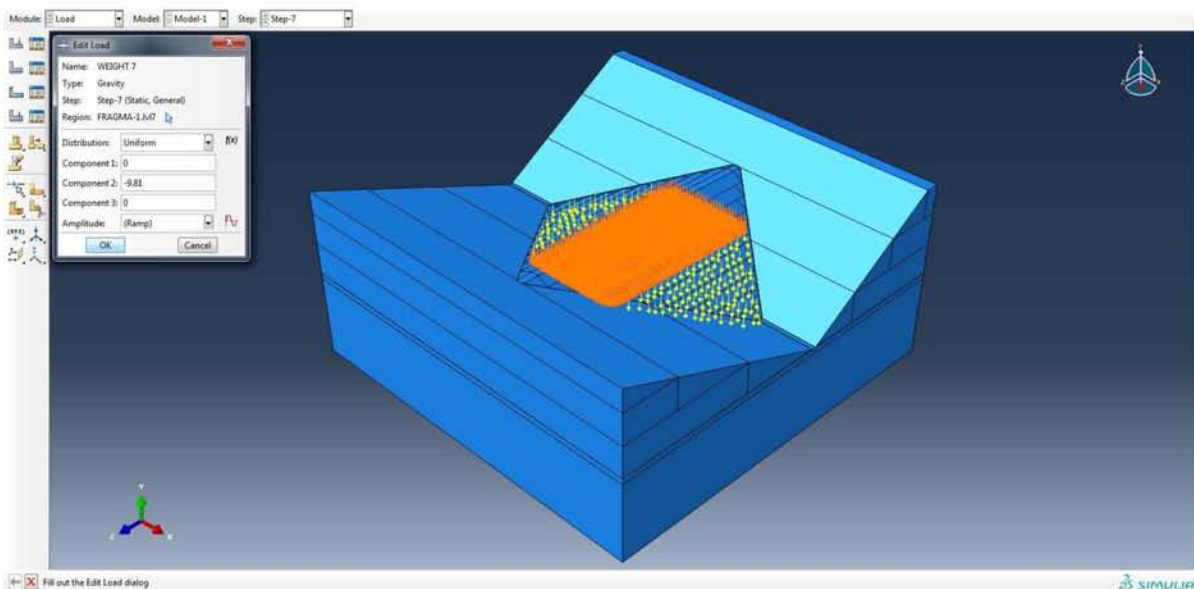
Εικόνα 4.7.8. Δημιουργία φόρτισης τέταρτου βήματος ανάλυσης (τέταρτη στρώση φράγματος).



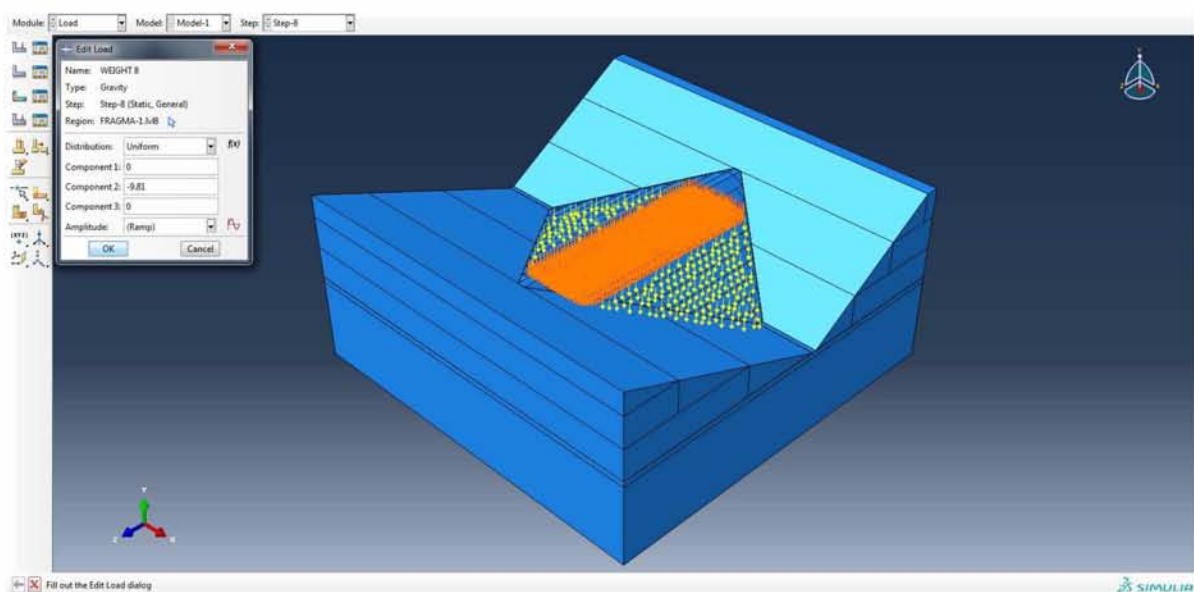
Εικόνα 4.7.9. Δημιουργία φόρτισης πέμπτου βήματος ανάλυσης (πέμπτη στρώση φράγματος).



Εικόνα 4.7.10. Δημιουργία φόρτισης έκτου βήματος ανάλυσης (έκτη στρώση φράγματος).

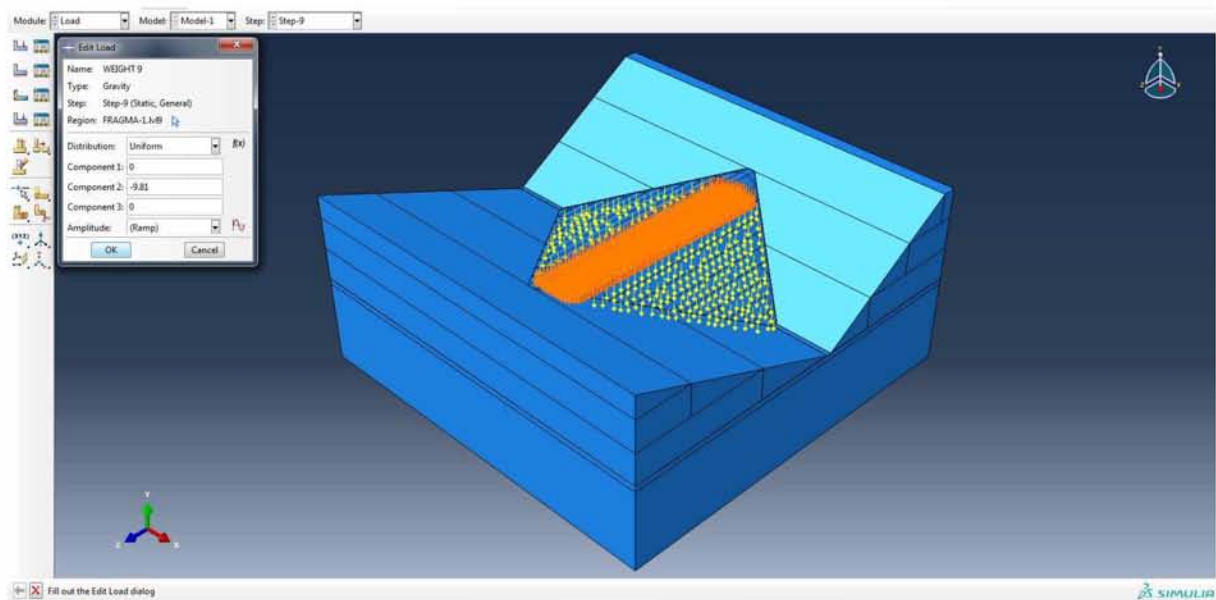


Εικόνα 4.7.11. Δημιουργία φόρτισης έβδομου βήματος ανάλυσης (έβδομη στρώση φράγματος).

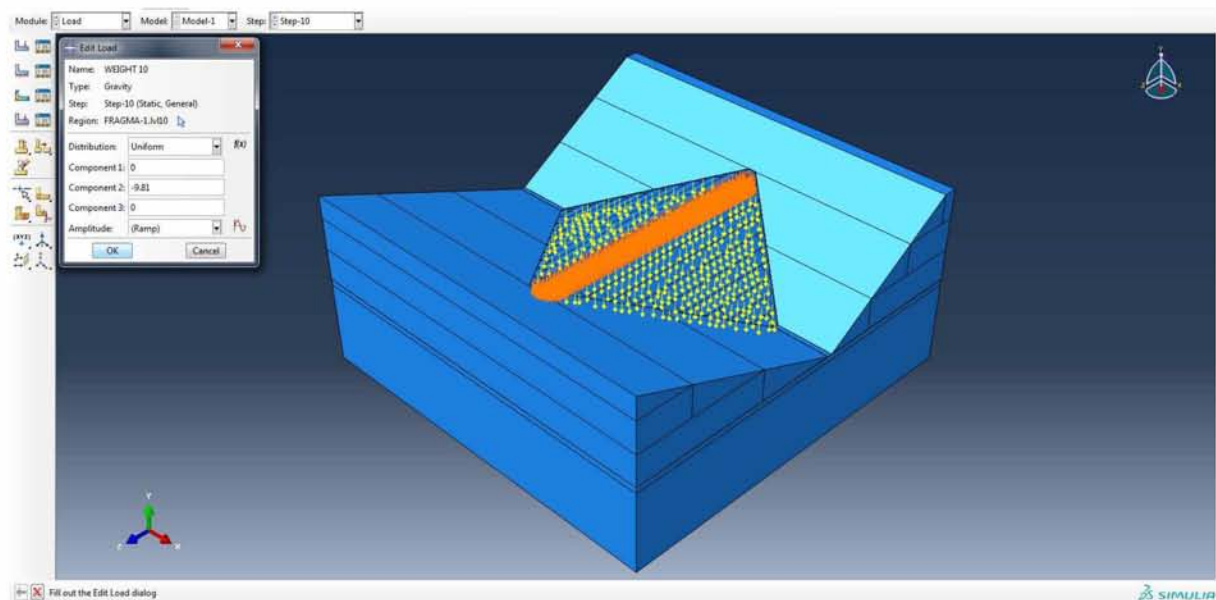


Εικόνα 4.7.12. Δημιουργία φόρτισης όγδοου βήματος ανάλυσης (όγδοη στρώση φράγματος).





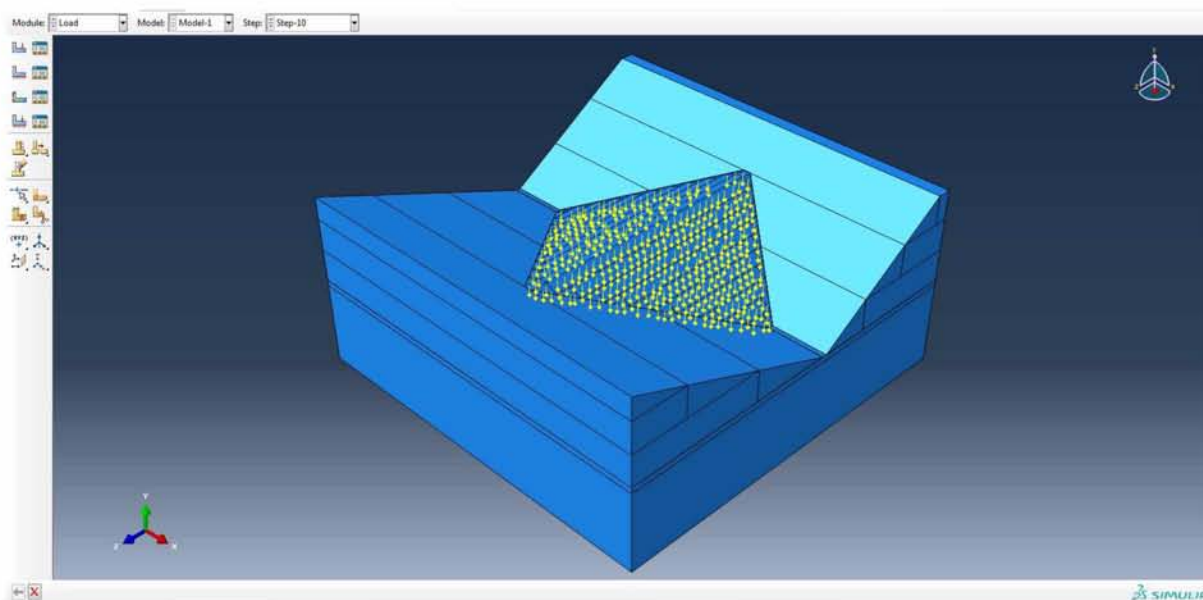
Εικόνα 4.7.13. Δημιουργία φόρτισης ένατου βήματος ανάλυσης (ένατη στρώση φράγματος).



Εικόνα 4.7.14. Δημιουργία φόρτισης δέκατου βήματος ανάλυσης (δέκατη στρώση φράγματος).

Παρακάτω φαίνονται τα συνολικά φορτία βαρύτητας του φράγματος.





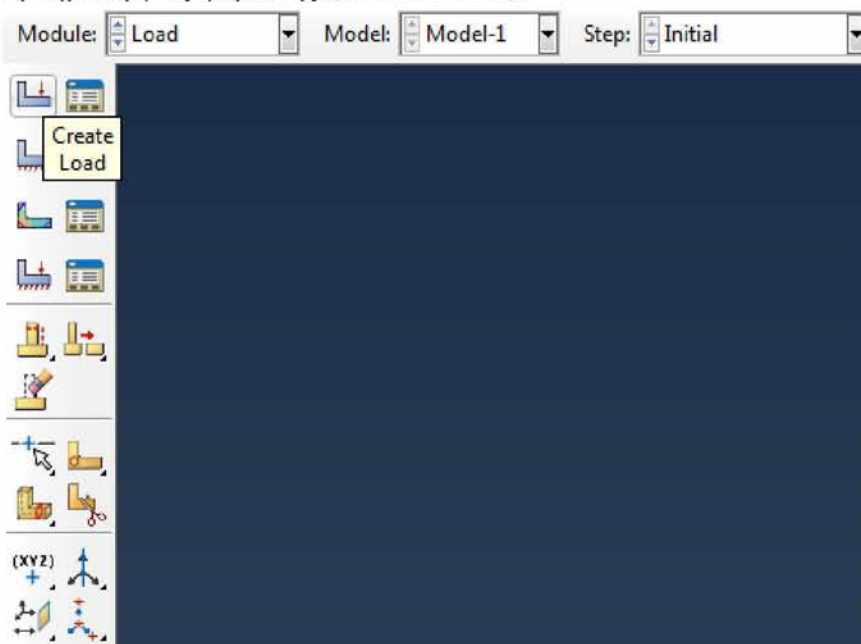
Εικόνα 4.7.15. Συνολικά φορτία βαρύτητας φράγματος (βήματα ανάλυσης 1-10).

#### ➤ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

Στο αμέσως μετά την κατασκευή του φράγματος βήμα (βήμα 11), εφαρμόζεται η πίεση του νερού από την πλήρωση του ταμιευτήρα στην ανάντη πλευρά του φράγματος.

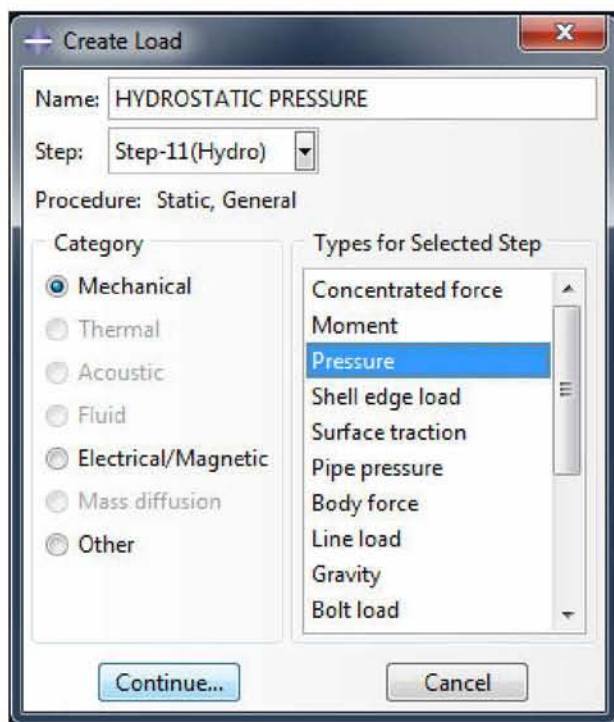
Η υδροστατική πίεση είναι γραμμικό κατανεμημένο φορτίο αυξανόμενο με το βάθος, δηλαδή η τιμή της είναι μηδενική στη στέψη του φράγματος, ενώ λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στη βάση του.

Δίνεται εντολή δημιουργίας φόρτισης (**Create Load**).



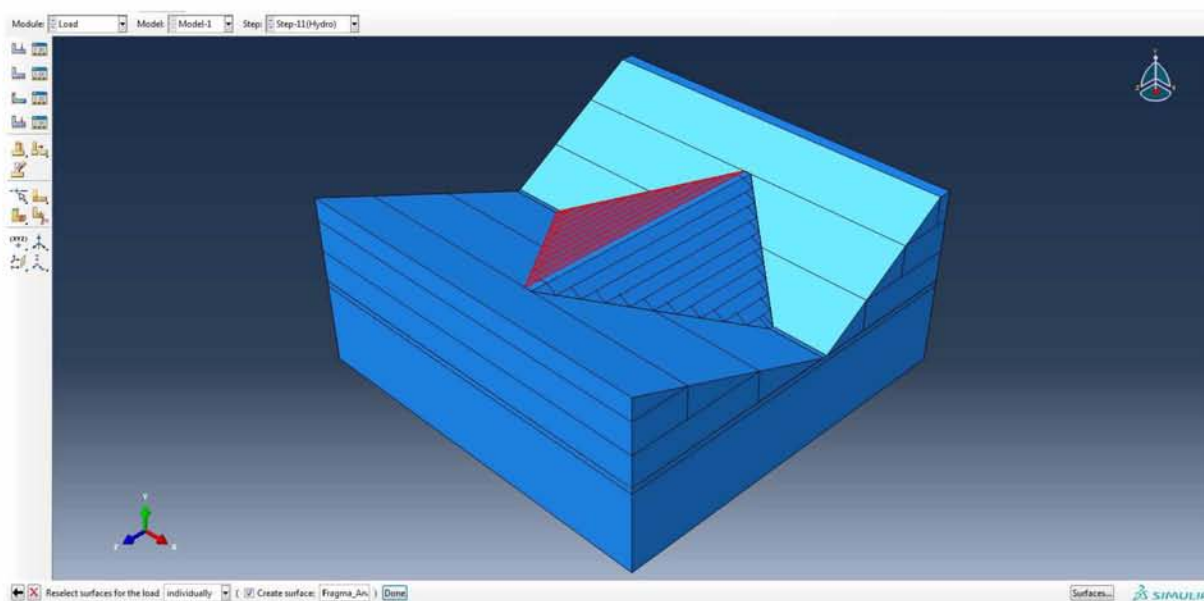
Εικόνα 4.7.16. Εντολή δημιουργίας φόρτισης.

Ονομάζεται το φορτίο, επιλέγεται ως βήμα δημιουργίας του το βήμα 11 (**Step-11**), στο είδος φορτίου μηχανικό (**Category: Mechanical**) και στον τύπο φορτίο πίεσης (**Types for Selected Step: Pressure**).

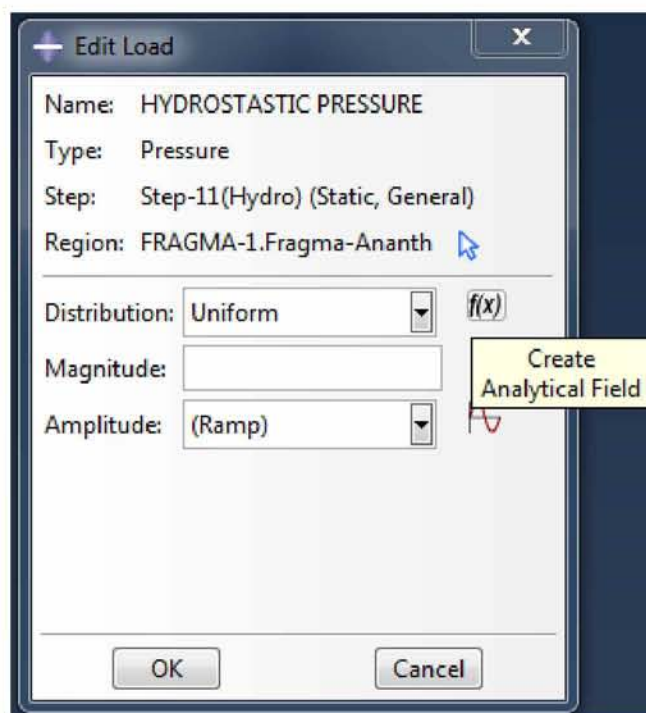


Εικόνα 4.7.17. Επιλογή κατηγορίας και τύπου φόρτισης ενδέκατου βήματος ανάλυσης.

Επιλέγεται ως επιφάνεια άσκησης του φορτίου η ανάντη πλευρά του φράγματος και για να οριστεί η κατανομή (**Distribution**) της πίεσης κλικάρεται το εικονίδιο δημιουργίας αναλυτικού πεδίου  $f(x)$  (**Create Analytical Field**).

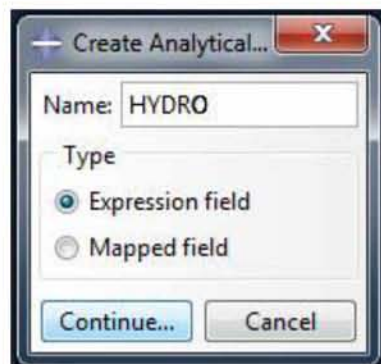


Εικόνα 4.7.18. Επιλογή επιφάνειας άσκησης υδροστατικής πίεσης (ανάντη πλευρά φράγματος).



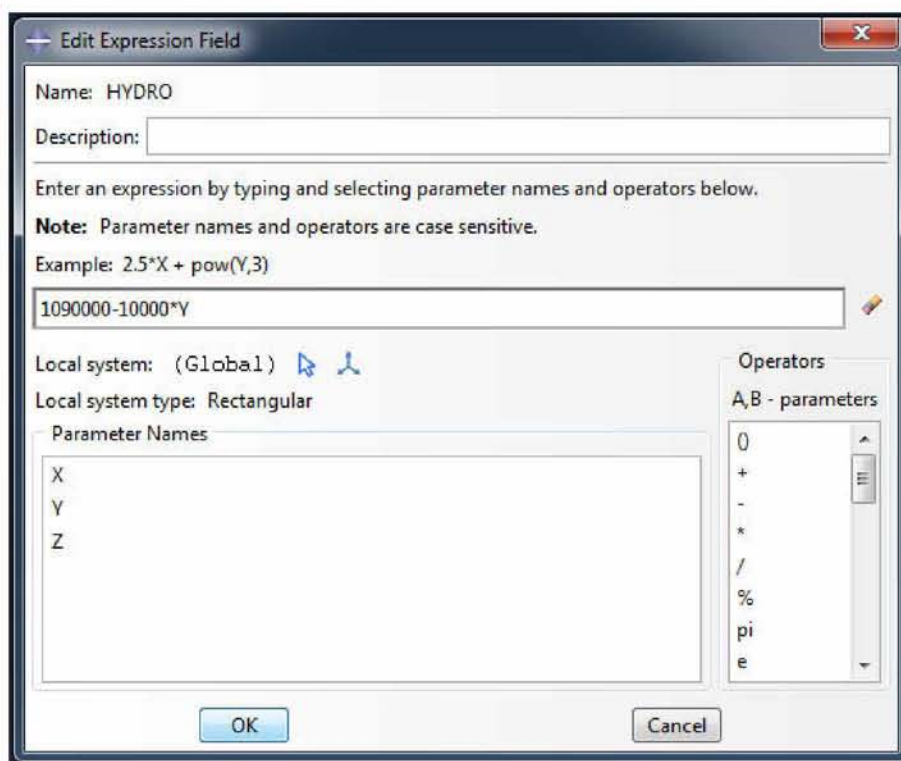
Εικόνα 4.7.19. Εντολή δημιουργίας κατανομής φόρτισης.

Ονομάζεται (**Name: HYDRO**), επιλέγεται τύπος (**Type: Expression field**) και κλικάρεται **Continue**.

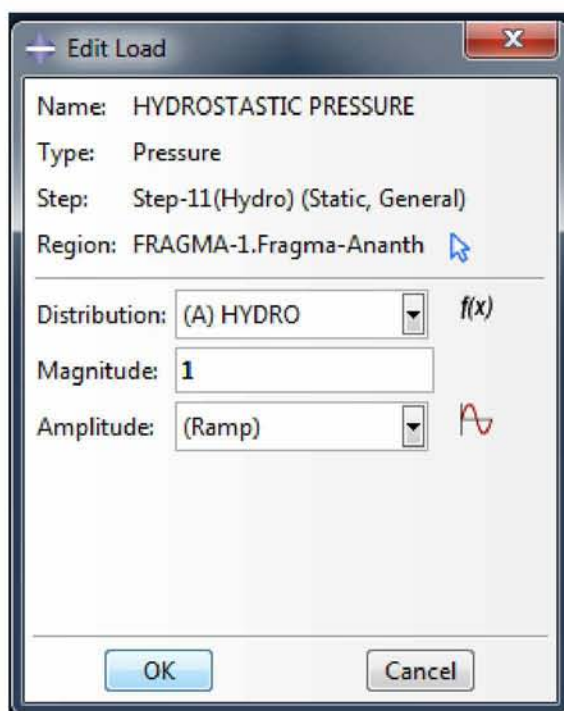


Εικόνα 4.7.20. Επιλογή τύπου κατανομής.

Στο κενό πλαίσιο πληκτρολογείται η εξίσωση της κατανομής  $f(x) = 1090000 - 10000 \cdot Y$ , όπου  $Y$  ο κατακόρυφος άξονας του μοντέλου και πρίζεται **OK**. Επιλέγεται η κατανομή που δημιουργήθηκε (**Distribution: (A) HYDRO**) και τίθεται μέγεθος 1 (**Magnitude: 1**).



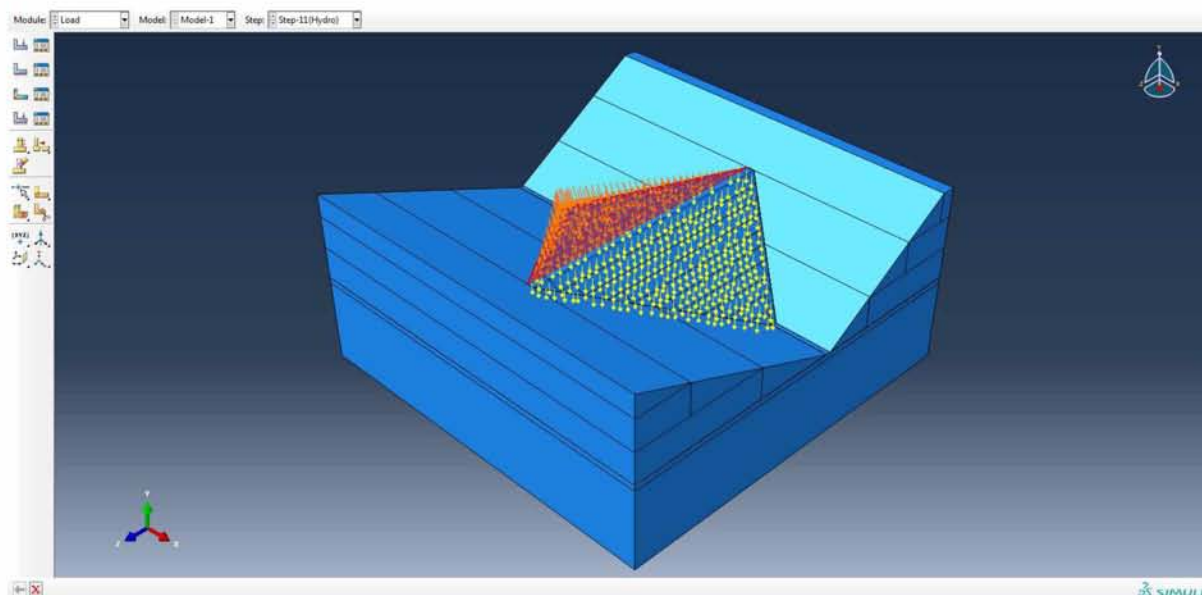
Εικόνα 4.7.21. Εισαγωγή εξίσωσης κατανομής της υδροστατικής πίεσης.



Εικόνα 4.7.22. Επιλογή της κατανομής που δημιουργήθηκε και ορισμός μεγέθους φόρτισης.

Πλέον στο παράθυρο προβολής απεικονίζεται, εκτός από το ίδιο βάρος του φράγματος, και η υδροστατική πίεση στην ανάντη πλευρά του.



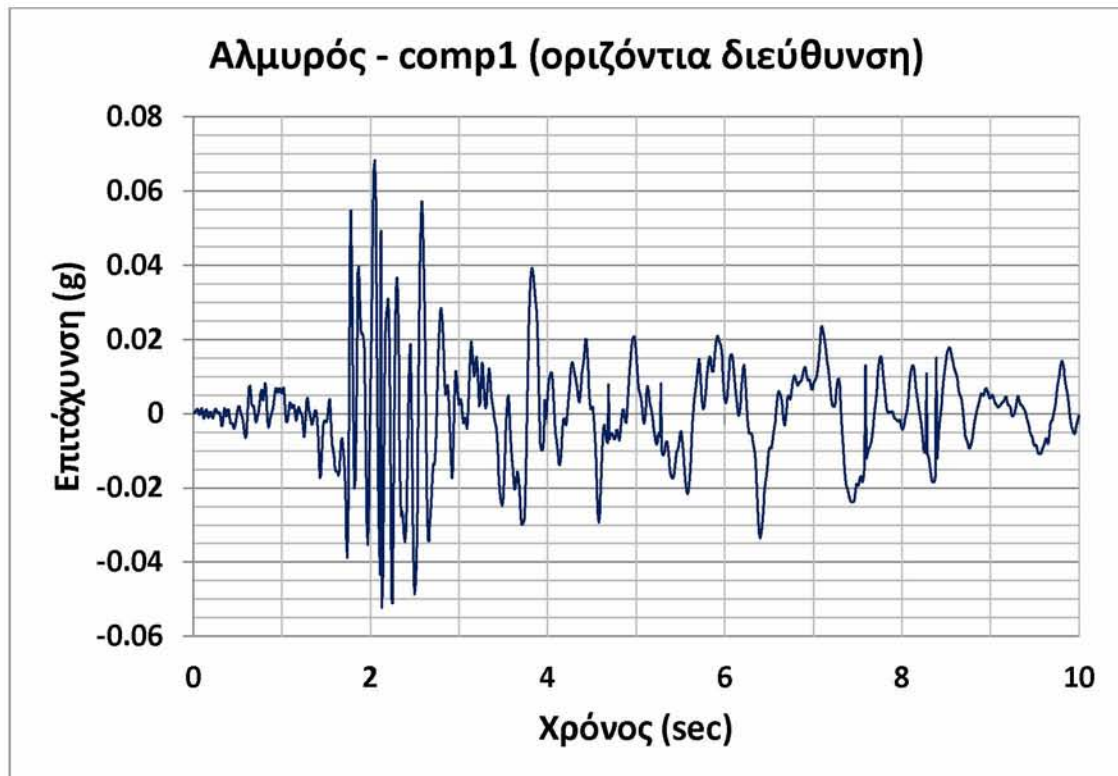


Εικόνα 4.7.23. Συνολική στατική φόρτιση φράγματος (βήματα ανάλυσης 1-11).

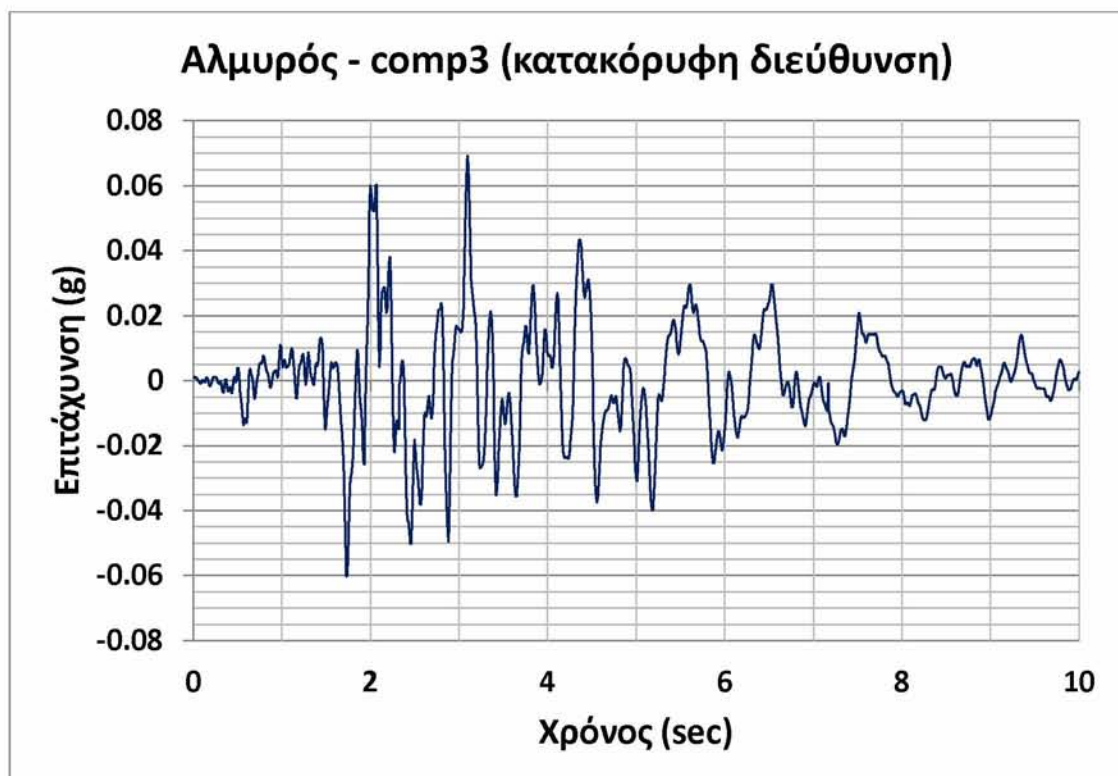
#### ➤ ΦΟΡΤΙΑ ΣΕΙΣΜΟΥ

Στη συνέχεια εισάγεται η σεισμική διέγερση στο μοντέλο. Η εισαγωγή αυτή γίνεται με τη μορφή σεισμικής επιτάχυνσης στη βάση του υπεδάφους θεμελίωσης σε δύο διευθύνσεις: στην οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη στη στέψη και στην κατακόρυφη, δηλαδή στις X και Y αντίστοιχα του παρόντος μοντέλου. Στη διεύθυνση Z του μοντέλου δεν εισήχθη σεισμική φόρτιση.

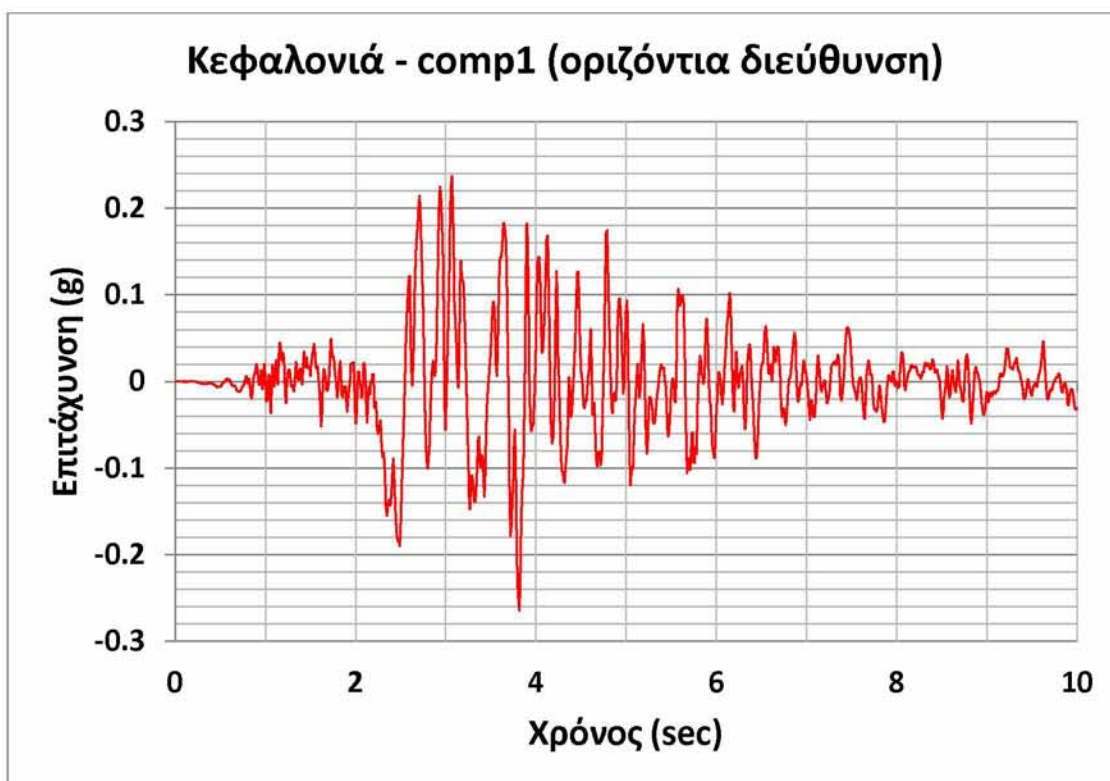
Θα πραγματοποιηθούν διαφορετικές αναλύσεις με βάση τα δεδομένα δύο σεισμών, τα αποτελέσματα των οποίων θα συγκριθούν σε επόμενο κεφάλαιο, ώστε να δοθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της σεισμικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού του Αλμυρού Μαγνησίας (11/08/1980, με επίκεντρο 15.67km και ένταση  $M=5.3$ ) και του σεισμού της Κεφαλονιάς (02/03/2014, με επίκεντρο 14.88km και ένταση  $M=6.1$ ) [42], [43]. Επειδή για να προσομοιωθεί ολόκληρος ο σεισμός (σε όλη τη διάρκειά του) απαιτείται υπερβολικά μεγάλος χρόνος ανάλυσης, επιλέγεται να εισαχθεί μόνο ένα μέρος του κάθε σεισμού στο μοντέλο και συγκεκριμένα 10 δευτερόλεπτα. Από τον σεισμό του Αλμυρού εισάγονται τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα και από τον σεισμό της Κεφαλονιάς το χρονικό κομμάτι από το δευτερόλεπτο 23.01 μέχρι το 33.00, όπου παρατηρείται η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (peak ground acceleration). Για τον πρώτο σεισμό αυτή παίρνει τιμή  $pga \approx 0.068g$  στη διεύθυνση X (οριζόντια διεύθυνση) και  $pga \approx 0.069g$  στη διεύθυνση Y (κατακόρυφη διεύθυνση), ενώ για τον σεισμό της Κεφαλονιάς ισχύει  $pga \approx 0.26g$  στην οριζόντια και  $pga \approx 0.17g$  στην κατακόρυφη διεύθυνση. Παρακάτω δίνονται τα κομμάτια των επιταχυνσιογραφημάτων που εισήχθησαν στην ανάλυση για την κάθε διεύθυνση των δύο σεισμών.



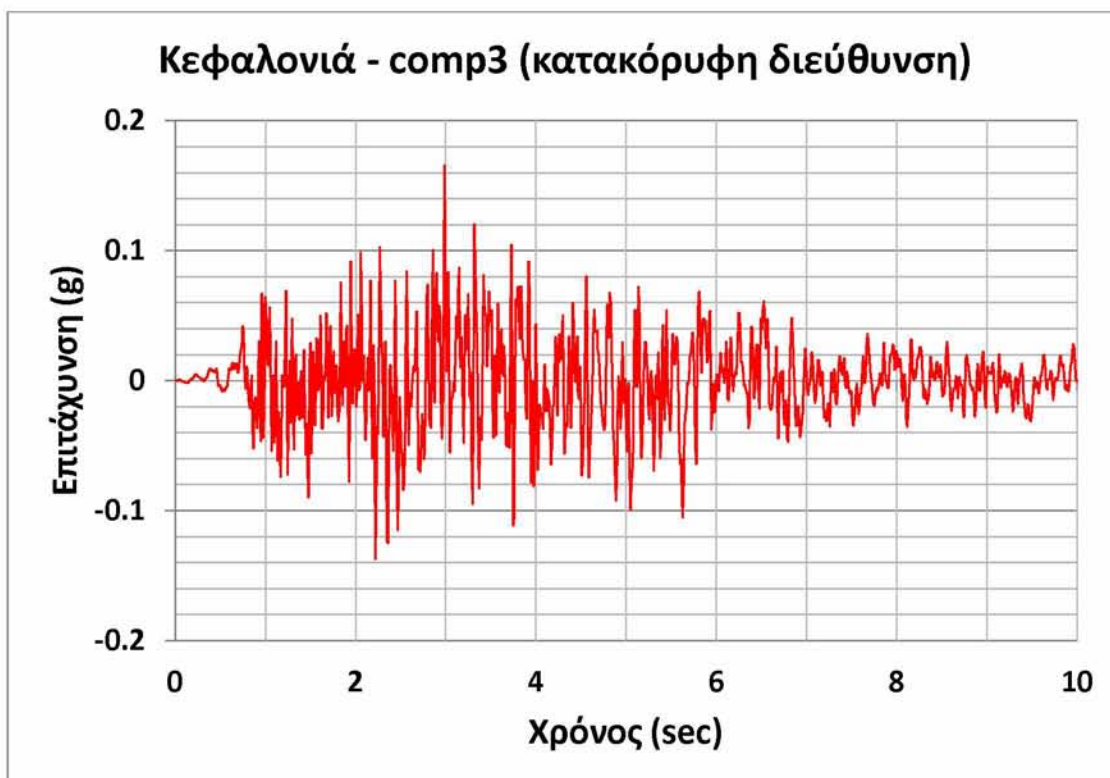
Διάγραμμα 4.7.1. Επιταχυνσιογράφημα οριζόντιας διεύθυνσης σεισμού Αλμυρού [42].



Διάγραμμα 4.7.2. Επιταχυνσιογράφημα κατακόρυφης διεύθυνσης σεισμού Αλμυρού [42].



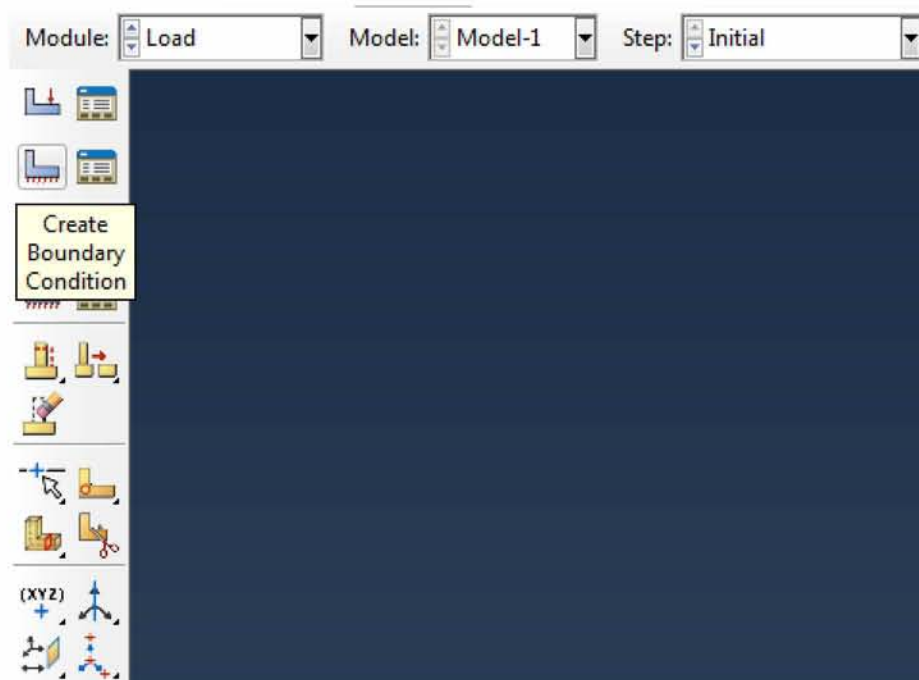
Διάγραμμα 4.7.3. Επιταχυνσιογράφημα οριζόντιας διεύθυνσης σεισμού Κεφαλονιάς [43].



Διάγραμμα 4.7.4. Επιταχυνσιογράφημα κατακόρυφης διεύθυνσης σεισμού Κεφαλονιάς [43].

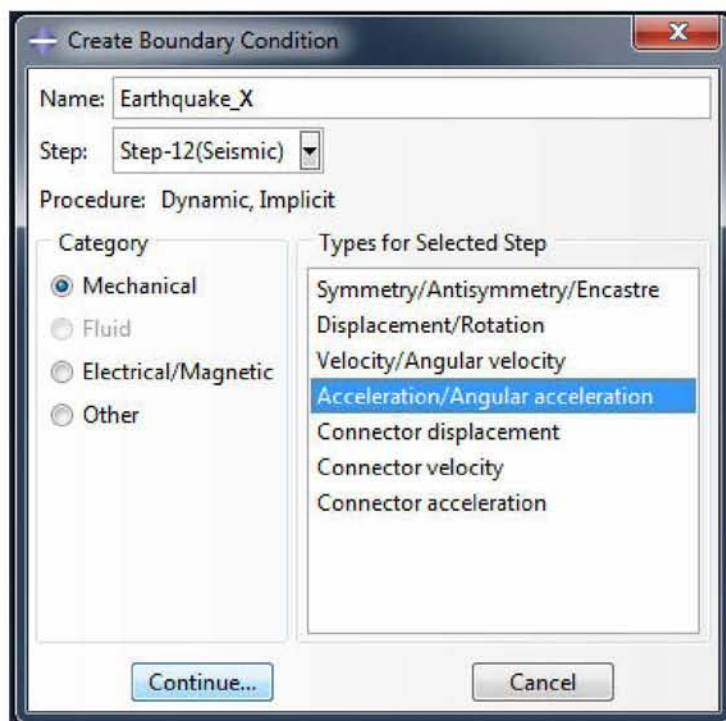
Όπως αναφέρθηκε, η σεισμική διέγερση εισάγεται με τη μορφή σεισμικής επιτάχυνσης μέσω οριακής συνθήκης. Επιλέγεται η εντολή δημιουργίας οριακής συνθήκης (**Create Boundary Condition**).





Εικόνα 4.7.24. Εντολή δημιουργίας οριακής συνθήκης.

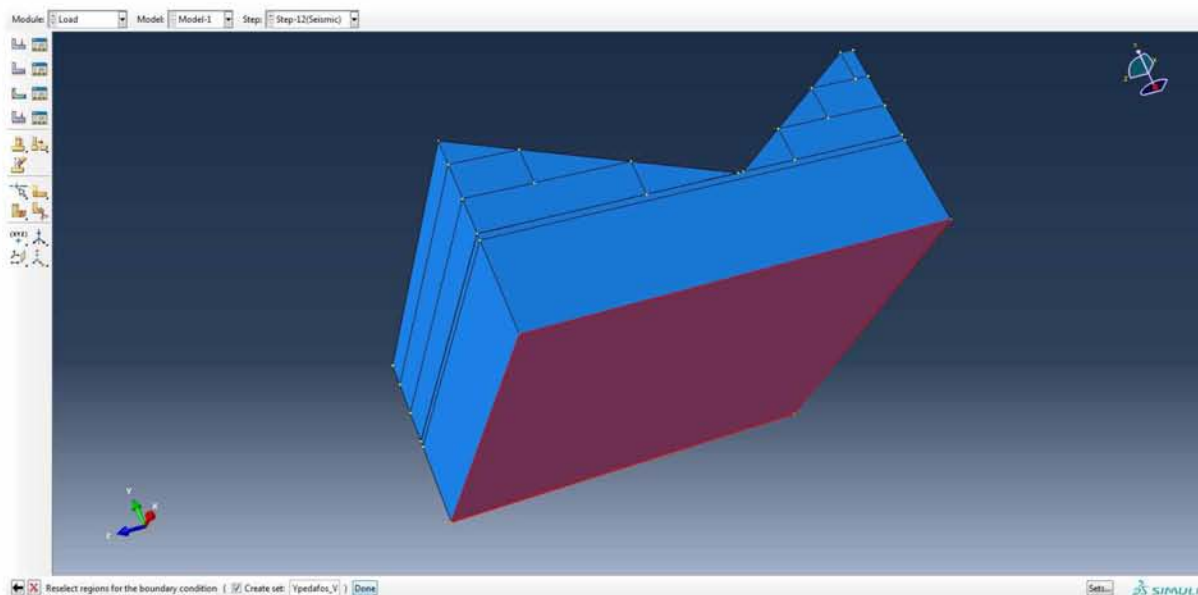
Ονομάζεται ο σεισμός για τη διεύθυνση X (**Name: Earthquake\_X**), ορίζεται ως βήμα άσκησης του το βήμα 12 (**Step-12**), στην κατηγορία φορτίου μηχανικό (**Category: Mechanical**) και στον τύπο φορτίου επιτάχυνση (**Types for Selected Step: Acceleration/Angular acceleration**).



Εικόνα 4.7.25. Επιλογή κατηγορίας και τύπου φόρτισης δωδέκατου βήματος ανάλυσης (οριζόντια διεύθυνση X).

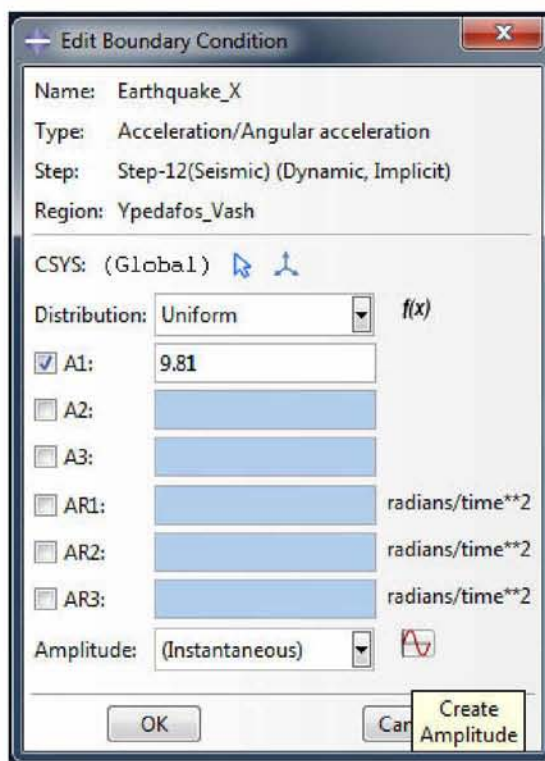


Επιλέγεται η βάση του υπεδάφους ως περιοχή εφαρμογής και πιέζεται **Done**.



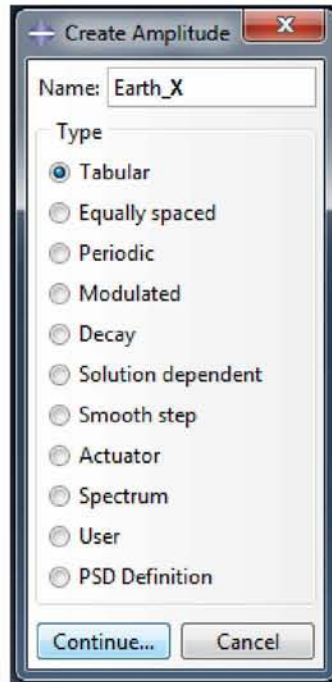
Εικόνα 4.7.26. Επιλογή επιφάνειας άσκησης της οριζόντιας σεισμικής διέγερσης (βάση υπεδάφους).

Τσεκάρεται η συνιστώσα της επιτάχυνσης κατά τη διεύθυνση X και τίθεται ως τιμή της η επιτάχυνση της βαρύτητας  $9.81\text{m/s}^2$  (**A1: 9.81**). Για να δοθεί η μορφή του επιταχυνσιογραφήματος στην οριζόντια διεύθυνση κλικάρεται το εικονίδιο **Create Amplitude**.



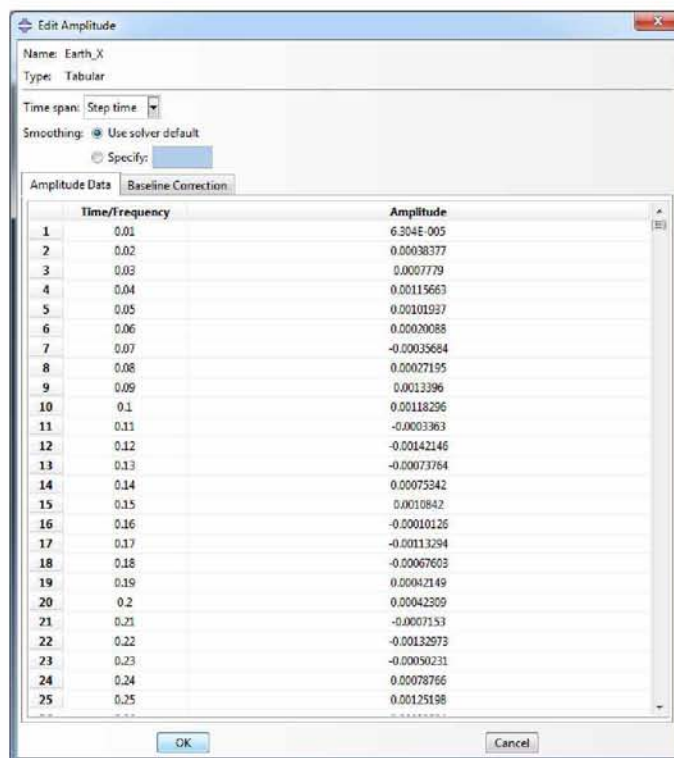
Εικόνα 4.7.27. Ορισμός μεγέθους οριζόντιας επιτάχυνσης και εντολή ορισμού επιταχυνσιογραφήματος.

Ονομάζεται (**Name: Earth\_X**) και στον τύπο επιλέγεται εισαγωγή με μορφή πίνακα (**Type: Tabular**).



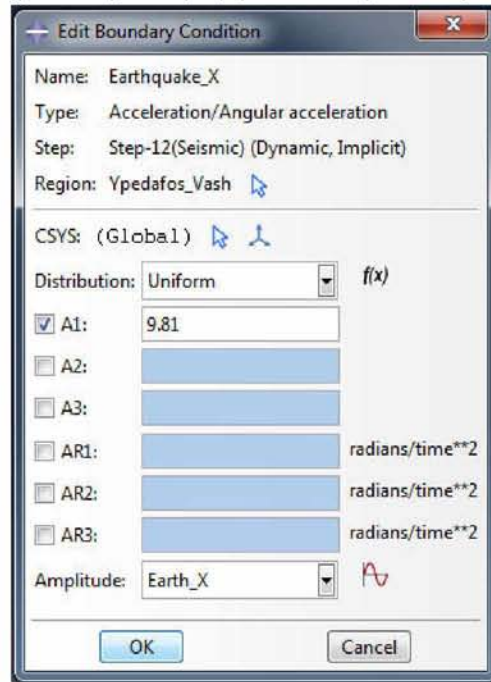
Εικόνα 4.7.28. Επιλογή εισαγωγής επιταχυνσιογραφήματος με μορφή πίνακα.

Εισάγονται στην καρτέλα δεδομένων (**Amplitude Data**) στην πρώτη στήλη (**Time/Frequency**) οι χρονικές στιγμές και στη δεύτερη (**Amplitude**) οι τιμές της επιτάχυνσης σε  $\text{m/s}^2$ .



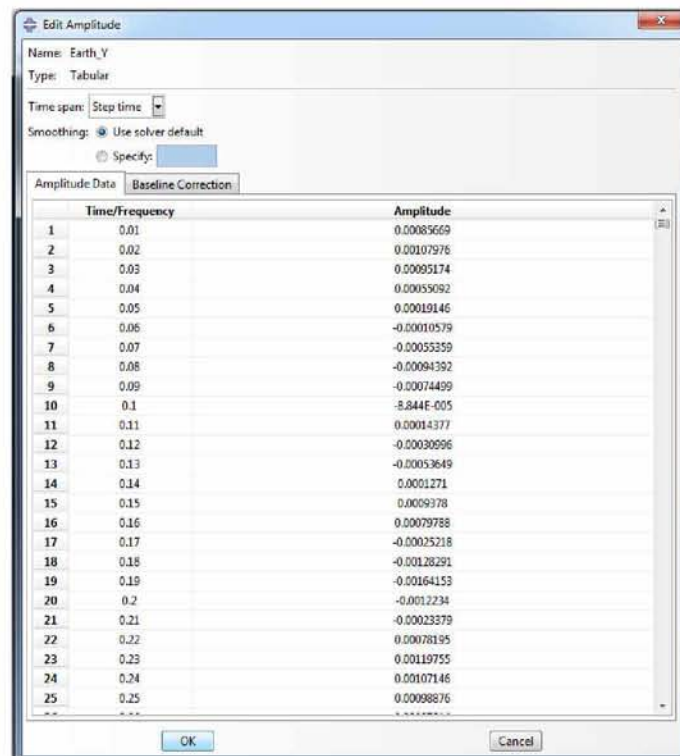
Εικόνα 4.7.29. Εισαγωγή δεδομένων επιταχυνσιογραφήματος οριζόντιας διεύθυνσης.

Επιλέγεται το επιταχυνσιογράφημα που δημιουργήθηκε (**Amplitude: Earth\_X**) και πιέζεται **OK** προκειμένου να ολοκληρωθεί η εισαγωγή του σεισμού στην οριζόντια διεύθυνση.

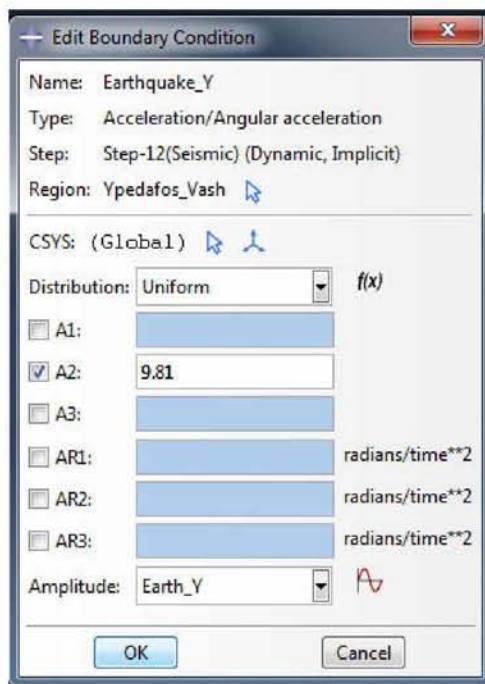


Εικόνα 4.7.30. Επιλογή του επιταχυνσιογραφήματος που δημιουργήθηκε και ολοκλήρωση εισαγωγής οριζόντιας σεισμικής φόρτισης.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και δημιουργώντας πρώτα το επιταχυνσιογράφημα στη διεύθυνση Y εισάγοντας τις αντίστοιχες τιμές, εφαρμόζεται και ο κατακόρυφος σεισμός στην βάση του υπεδάφους.



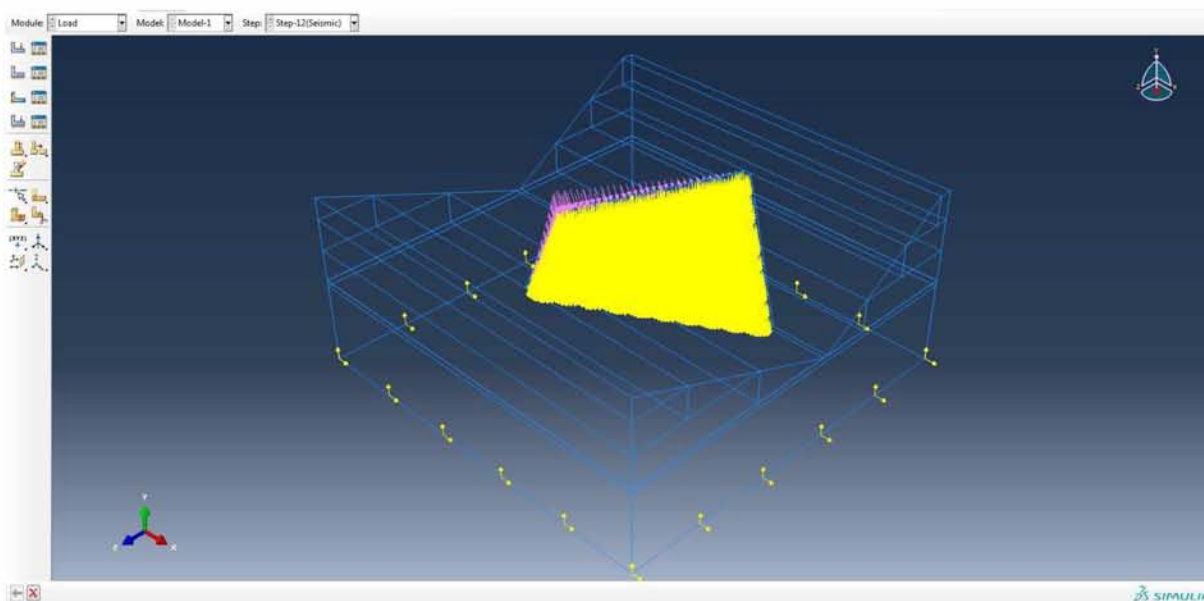
Εικόνα 4.7.31. Εισαγωγή δεδομένων επιταχυνσιογραφήματος κατακόρυφης διεύθυνσης.



Εικόνα 4.7.32. Ολοκλήρωση εισαγωγής κατακόρυφης σεισμικής φόρτισης.

Παραπάνω φαίνεται η εισαγωγή του πρώτου σεισμού στο μοντέλο (σεισμός Αλμυρού). Η εισαγωγή του δεύτερου σεισμού (της Κεφαλονιάς) γίνεται με τον ίδιο τρόπο, στη βάση του υπεδάφους και δίνοντας πρώτα τη μορφή των αντίστοιχων επιταχυνσιογραφημάτων. Γίνεται έπειτα δεύτερη ανάλυση, είτε στο ίδιο αρχείο απενεργοποιώντας τον πρώτο σεισμό από το δέντρο εντολών, είτε δημιουργώντας ξεχωριστό αρχείο το οποίο περιέχει μόνο τα φορτία του δεύτερου σεισμού.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συνολικά φορτία που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο.



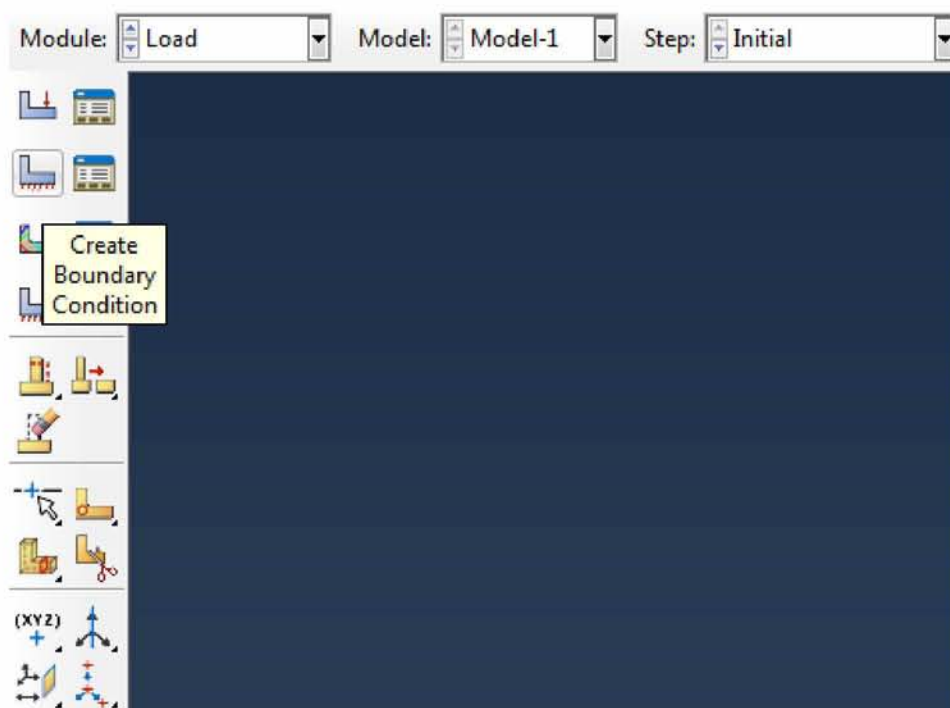
Εικόνα 4.7.33. Συνολικές στατικές και δυναμικές φορτίσεις μοντέλου (βήματα ανάλυσης 1-12).



## ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

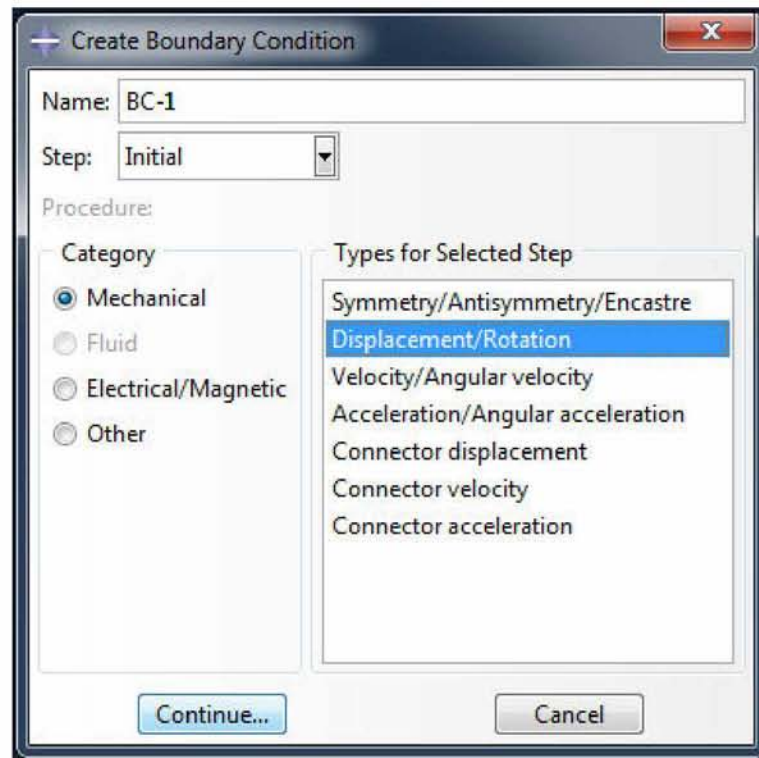
Μετά την εισαγωγή των φορτίων εισάγονται και οι απαιτούμενες συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο. Για την ακρίβεια, δεσμεύονται οι μετακινήσεις των εξωτερικών ορίων του μοντέλου και στις τρεις διευθύνσεις από το αρχικό βήμα, καθώς αυτό αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης κοιλάδας. Αν και θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στοιχεία άπειρου μήκους (infinite elements) στα όρια του μοντέλου, ώστε να προσομοιώνεται πιο ρεαλιστικά η έκταση της κοιλάδας, η λύση αυτή δεν προτιμήθηκε λόγω του υπερβολικά υψηλού απαιτούμενου χρόνου ανάλυσης. Τέλος, στο βήμα της σεισμικής διέγερσης (βήμα 12) αφαιρέθηκαν οι περιορισμοί μετακίνησης στις δύο διευθύνσεις που εφαρμόστηκε σεισμική επιτάχυνση, για να μπορέσει να προσομοιωθεί σωστά ο σεισμός.

Επιλέγεται η εντολή δημιουργίας συνοριακής συνθήκης (**Create Boundary Condition**).



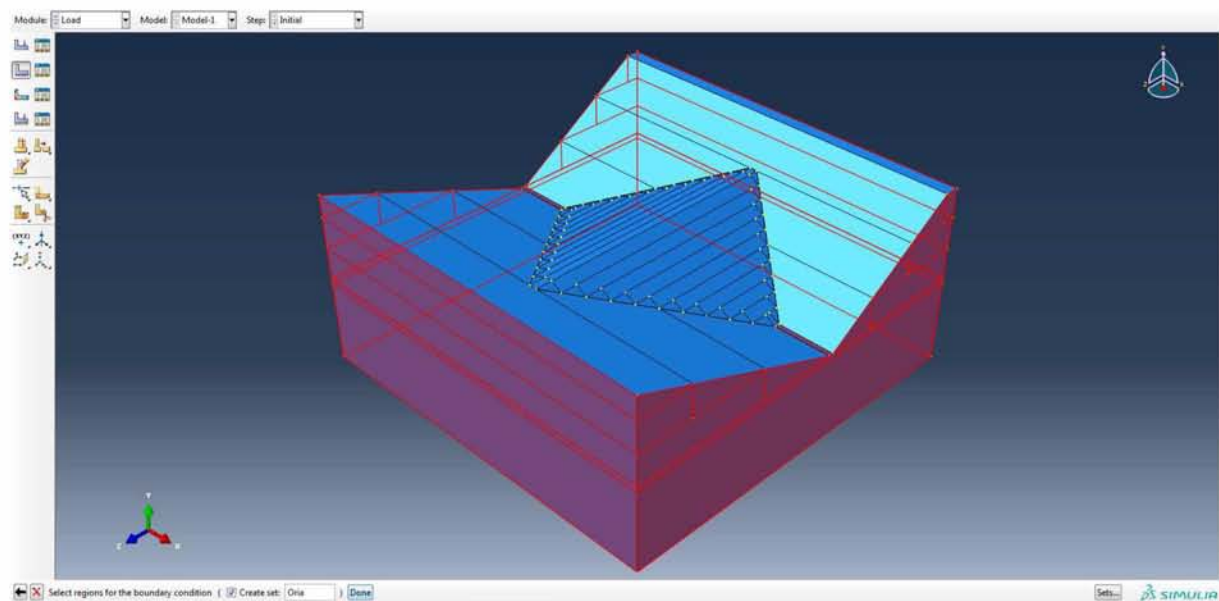
Εικόνα 4.7.34. Εντολή δημιουργίας συνοριακής συνθήκης.

Ονομάζεται και επιλέγεται να εφαρμοστεί από την αρχή της ανάλυσης (**Step: Initial**). Στην κατηγορία επιλέγεται μηχανική (**Category: Mechanical**) και στον τύπο μετακίνηση (**Types for Selected Step: Displacement/Rotation**).



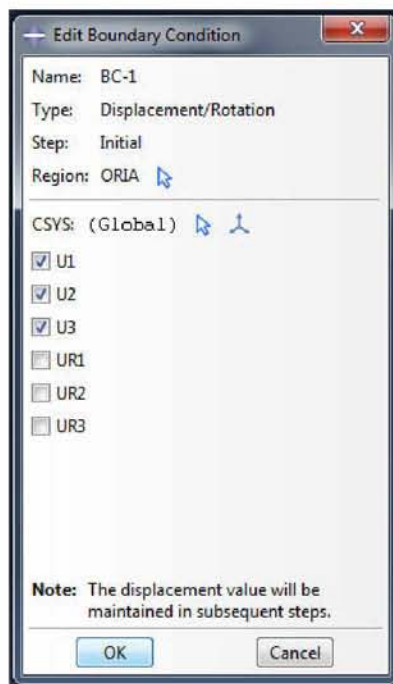
Εικόνα 4.7.35. Επιλογή κατηγορίας και τύπου συνοριακής συνθήκης μοντέλου.

Επιλέγονται όλες οι εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου και πιέζεται **Done**.



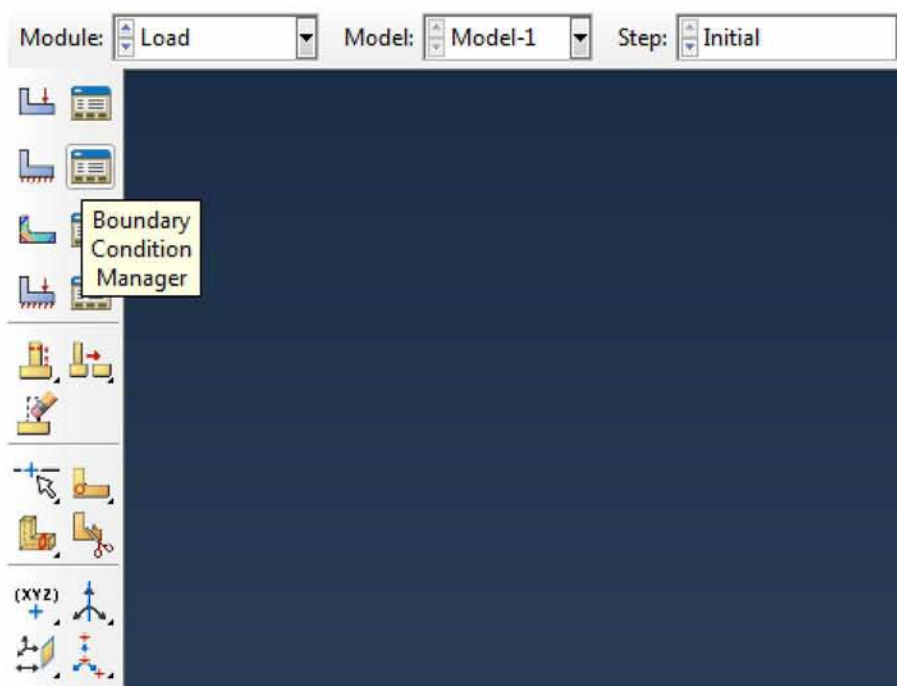
Εικόνα 4.7.36. Επιλογή επιφανειών εφαρμογής της συνοριακής συνθήκης (όρια μοντέλου).

Κλικάρονται οι μετακινήσεις και στις τρεις διευθύνσεις (**U1**, **U2**, **U3**) και πιέζεται **OK** προκειμένου να εφαρμοστεί ο περιορισμός.



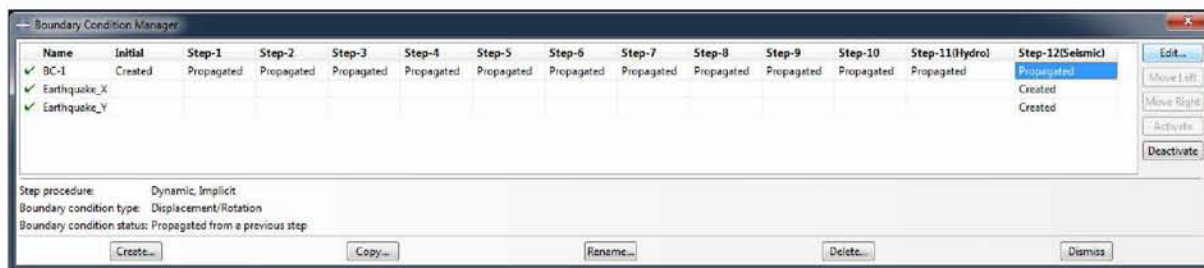
Εικόνα 4.7.37. Απαγόρευση μετακίνησης του μοντέλου στις τρεις διευθύνσεις.

Για να αφαιρεθεί η απαγόρευση μετακίνησης στο βήμα του σεισμού στις διευθύνσεις X και Y που αυτός εφαρμόζεται, δίνεται εντολή εμφάνισης του διαχειριστή συνοριακών συνθηκών (**Boundary Condition Manager**).



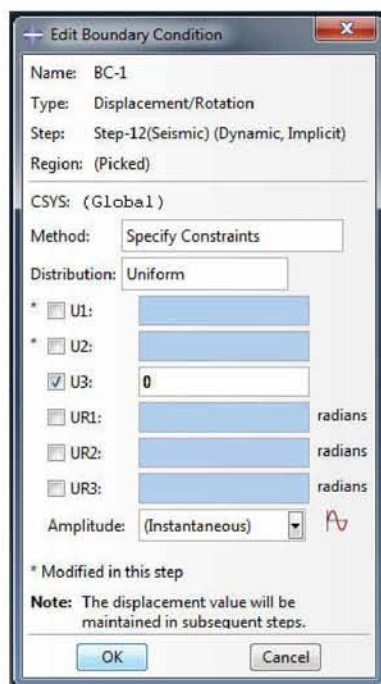
Εικόνα 4.7.38. Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή συνοριακών συνθηκών.

Πηγαίνοντας στο δωδέκατο βήμα της συνοριακής συνθήκης που δημιουργήθηκε (**BC-1: Step-12**) δίνεται εντολή επεξεργασίας της (**Edit...**).



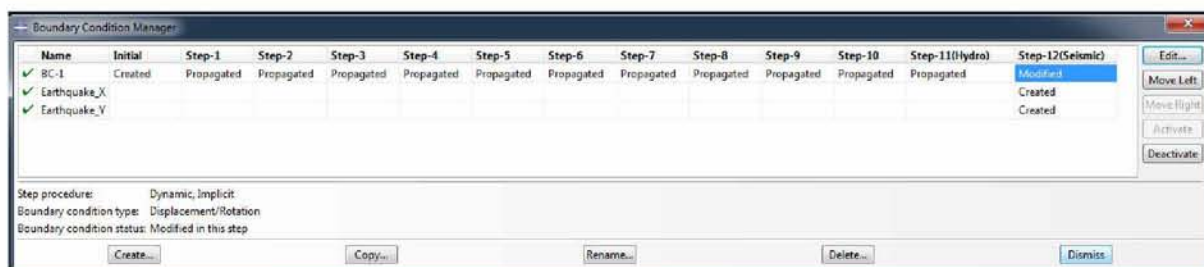
Εικόνα 4.7.39. Εντολή επεξεργασίας συνοριακής συνθήκης δωδέκατου βήματος ανάλυσης.

Αφαιρούνται οι περιορισμοί στις δύο διευθύνσεις (**U1**, **U2**) κλικάροντας δίπλα από αυτές και πιέζεται **OK**.



Εικόνα 4.7.40. Αφαίρεση απαγόρευσης μετακίνησης μοντέλου στις δύο διευθύνσεις της σεισμικής φόρτισης.

Έτσι ολοκληρώνεται ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών.



Εικόνα 4.7.41. Συγκεντρωτική απεικόνιση των συνοριακών συνθηκών του μοντέλου.



## **4.8 Mesh Module**

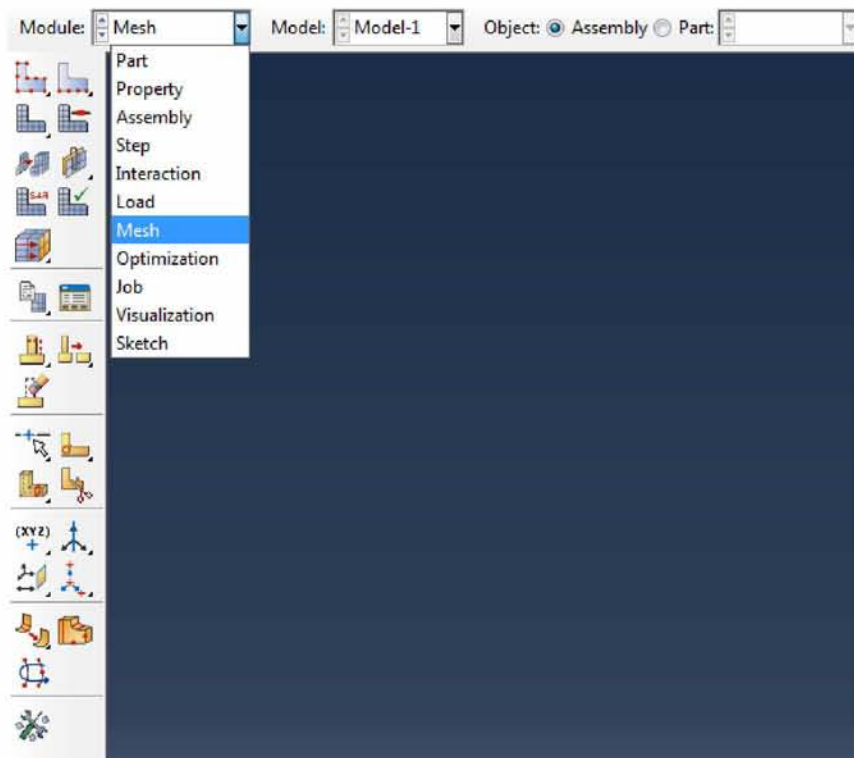
Στην ενότητα αυτή προσδιορίζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, με βάση το οποίο θα επιλυθεί το πρόβλημα. Το πρόγραμμα ουσιαστικά υποδιαιρεί το μοντέλο σε μικρότερους τομείς που ονομάζονται στοιχεία (elements), πάνω στα οποία επιλύεται ένα σύνολο εξισώσεων από τις οποίες τελικά εξάγεται για το κάθε στοιχείο μια τιμή για το κάθε ζητούμενο μέγεθος. Το Abaqus προσφέρει διάφορα επίπεδα αυτοματοποίησης και ελέγχου, ώστε η τελική διακριτοποίηση να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της ανάλυσης. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού διαφορετικών χαρακτηριστικών πλέγματος ανάλογα με την περιοχή του μοντέλου όπως η πυκνότητα, το σχήμα και ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν.

Η ακρίβεια της επίλυσης σχετίζεται άμεσα με το πλέγμα που επιλέχτηκε. Ένα αραιό πλέγμα (coarse mesh), δηλαδή με στοιχεία σχετικά μεγάλου μεγέθους συγκριτικά με αυτό του τμήματος που διακριτοποιείται, προσφέρει μικρό υπολογιστικό χρόνο ανάλυσης έναντι μειωμένης υπολογιστικής ακρίβειας. Ένα πυκνό πλέγμα (fine mesh) οδηγεί αντίθετα σε αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας, απαιτεί όμως υψηλότερο χρόνο ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό, με βάση την εμπειρία του αλλά και με τη βοήθεια δοκιμών (mesh refinement process), ο χρήστης επιλέγει το αποτελεσματικότερο από άποψης πυκνότητας πλέγμα, έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία υπολογιστικής ακρίβειας και συνολικού χρόνου ανάλυσης.

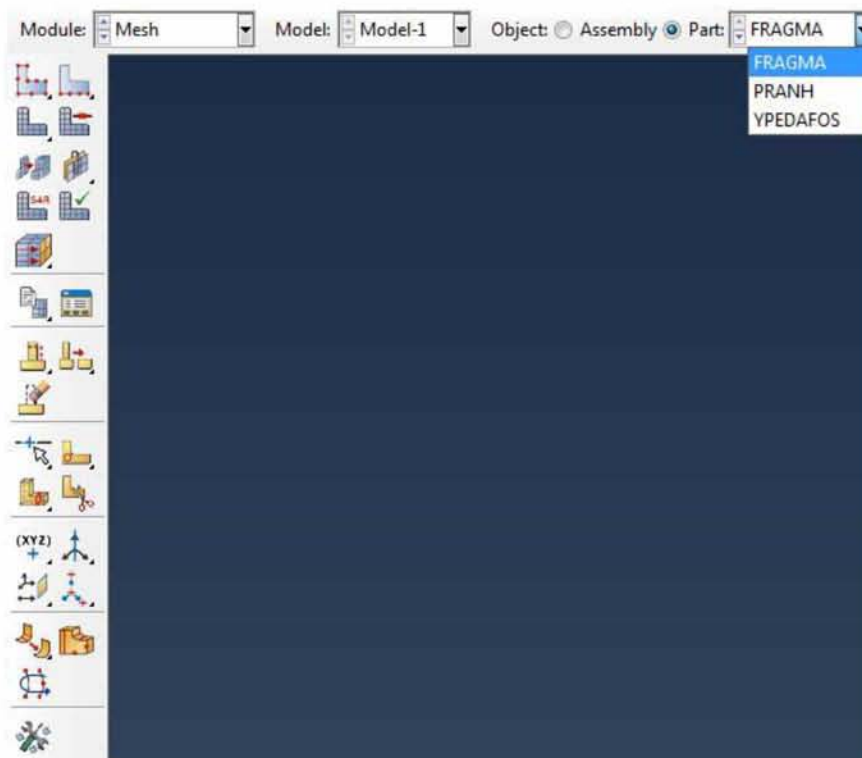
Με βάση τα παραπάνω, δημιουργήθηκαν ξεχωριστά πλέγματα για καθένα από τα τρία κύρια τμήματα (parts) του μοντέλου (φράγμα, πρηνή κοιλάδας, υπέδαφος), που όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα ήταν και ο λόγος που είχαν οριστεί εξαρτημένες οντότητες (dependent instances). Ειδικότερα, στο φράγμα επιλέγεται πυκνότερη διακριτοποίηση, καθώς αποτελεί την κύρια περιοχή ενδιαφέροντος του μοντέλου και επομένως απαιτείται υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων.

### **ΠΛΕΓΜΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**

Σε πρώτη φάση, δημιουργείται ο κάρναβος επίλυσης για το σώμα του φράγματος. Επιλέγεται η ενότητα διακριτοποίησης (**Module: Mesh**) και στο τμήμα (**Part**) επιλέγεται το φράγμα.

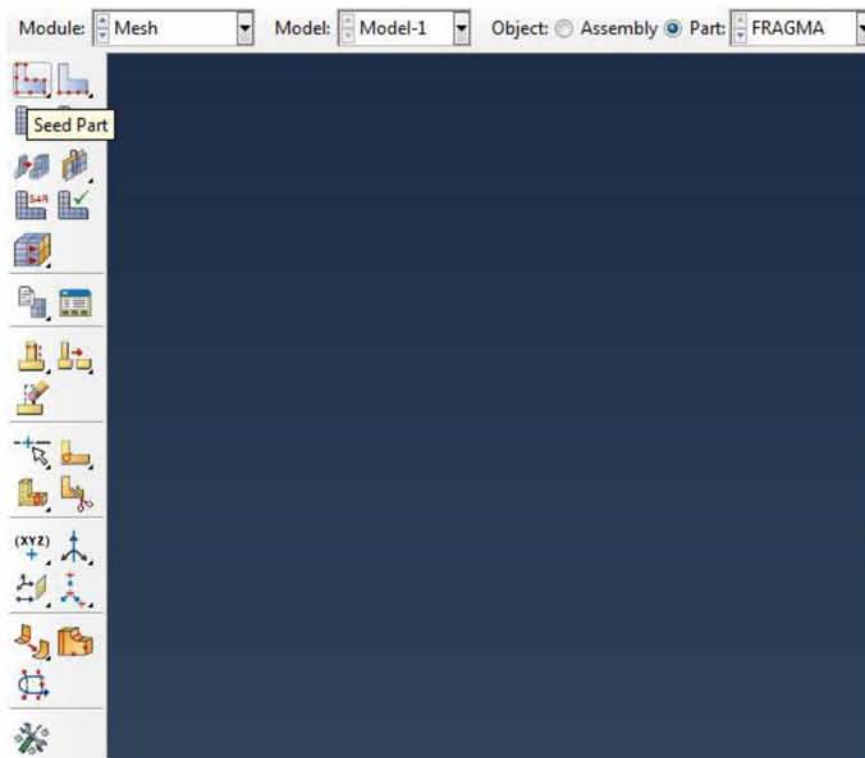


Εικόνα 4.8.1. Επιλογή ενότητας Mesh Module.



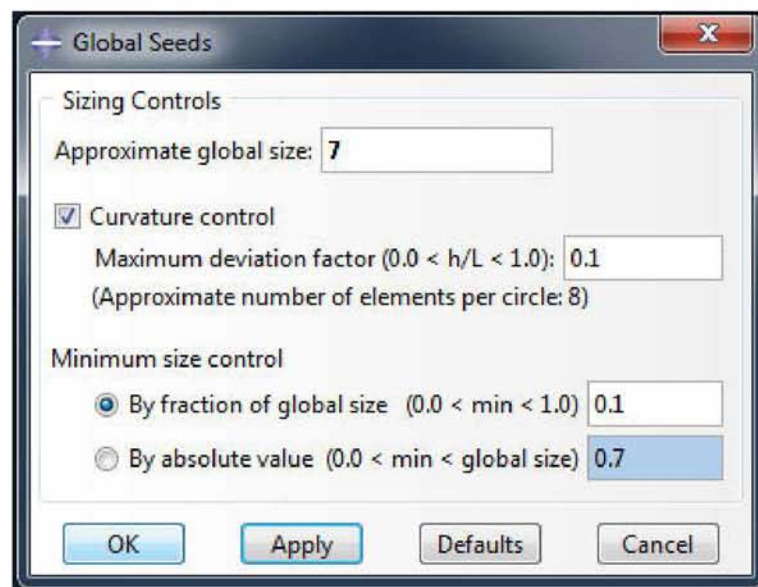
Εικόνα 4.8.2 Επιλογή του προς διακριτοποίηση τμήματος (φράγμα).

Κλικάρεται η εντολή δημιουργίας δεικτών (**Seed Part**) κατά μήκος των πλευρών του φράγματος, με βάση τους οποίους θα δημιουργηθεί το πλέγμα.



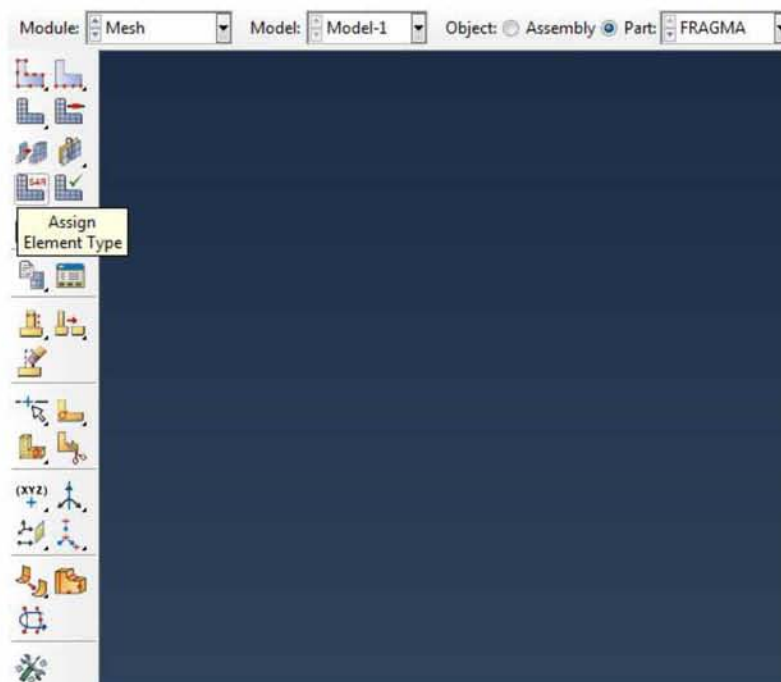
Εικόνα 4.8.3. Εντολή δημιουργίας δεικτών.

Πληκτρολογείται στο μέγεθος κελιού του καννάβου η τιμή 7 (**Approximate global size: 7**) και κλικάρεται **OK**.



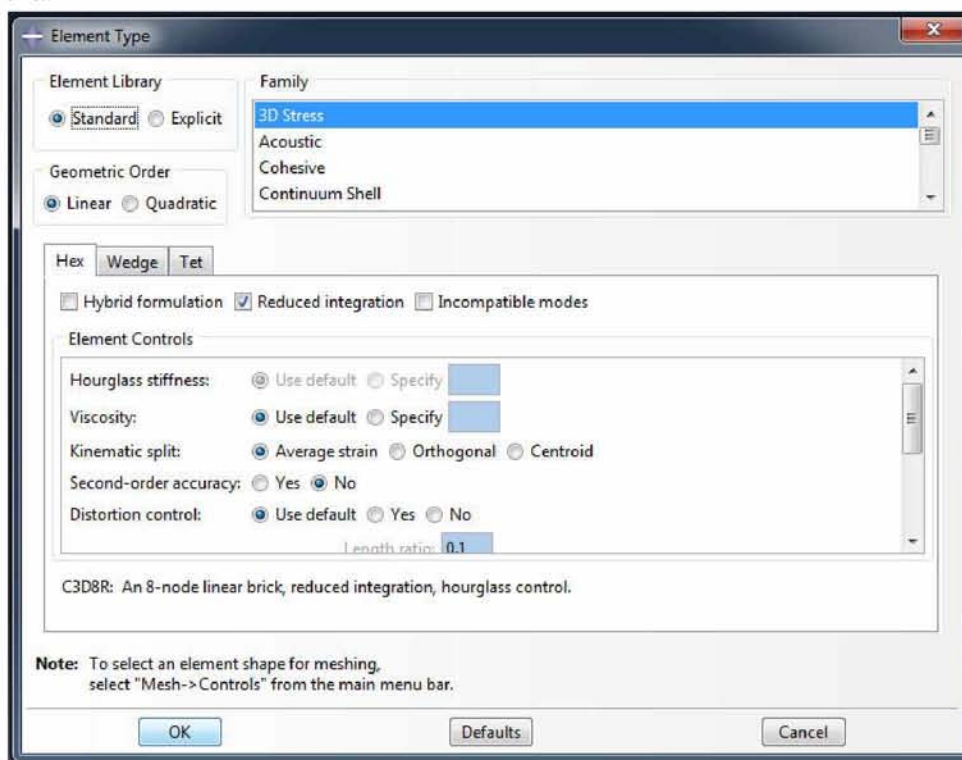
Εικόνα 4.8.4. Ορισμός μεγέθους κελιού καννάβου διακριτοποίησης φράγματος.

Κλικάρεται η εντολή προσδιορισμού τύπου στοιχείου (**Assign Element Type**).



Εικόνα 4.8.5. Εντολή προσδιορισμού τύπου στοιχείου διακριτοποίησης.

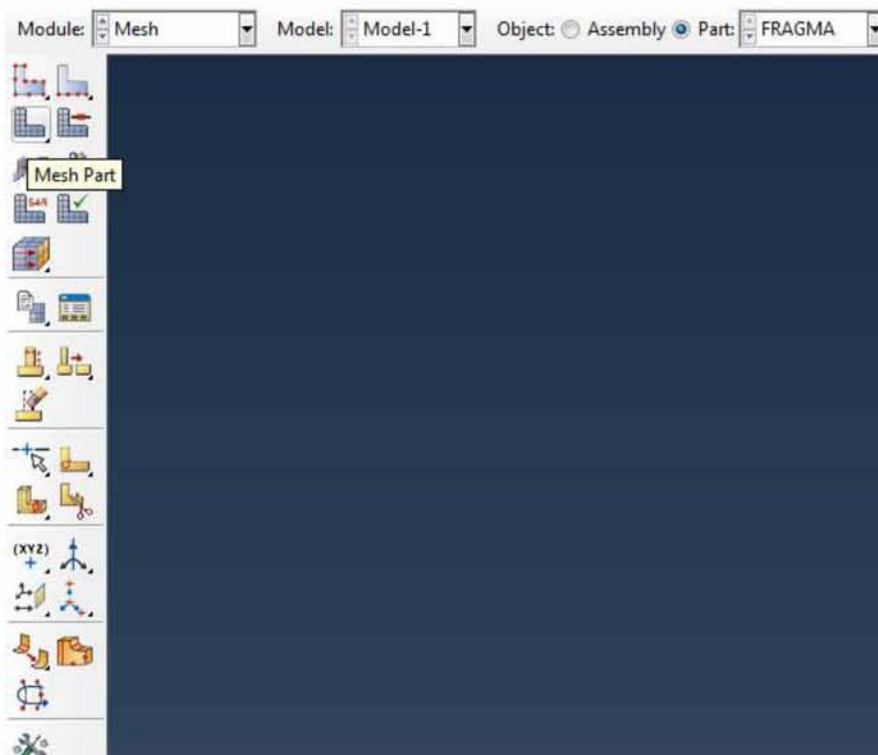
Στο μενού που εμφανίζεται επιλέγεται στη βιβλιοθήκη στοιχείου κανονική (Element Library: Standard), γεωμετρική τάξη γραμμική (Geometric Order: Linear), οικογένεια στοιχείου καταπονούμενο στις 3 διαστάσεις (**Family: 3D Stress**). Στον τύπο στοιχείου επιλέγονται εξαεδρικά με 8 κόμβους (**Hex - C3D8R**), καθώς προσφέρουν καλύτερο συνδυασμό ακρίβειας υπολογισμού και ταχύτητας επίλυσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, συγκριτικά με τα τετραεδρικά.



Εικόνα 4.8.6. Ορισμός τύπου στοιχείων διακριτοποίησης.

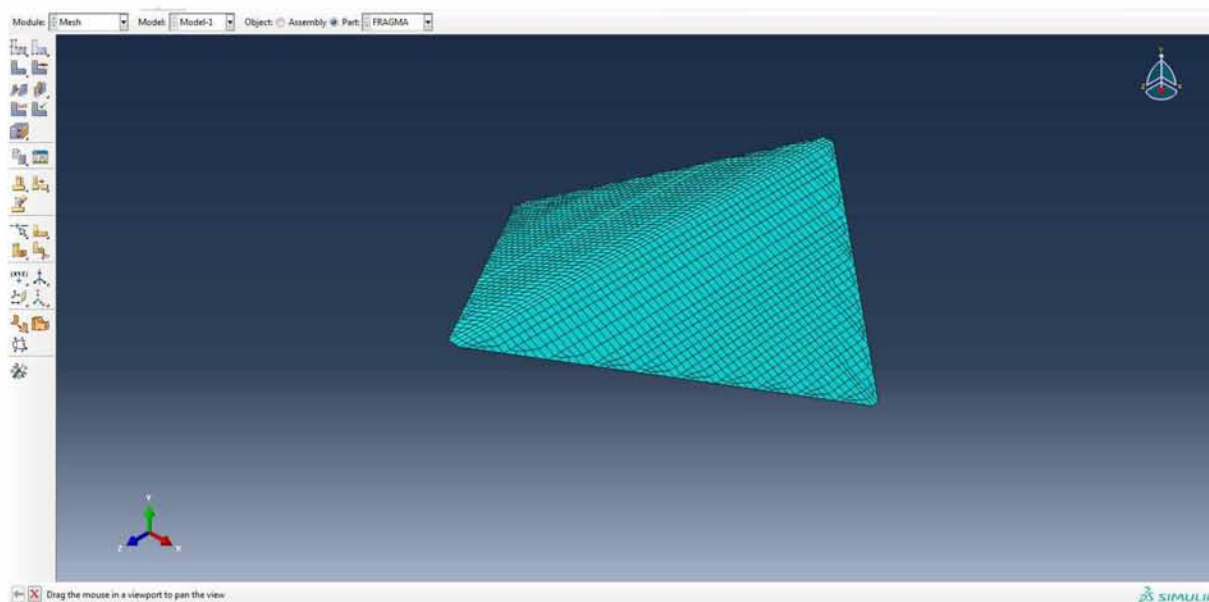


Δίνεται η εντολή δημιουργίας του πλέγματος για το συγκεκριμένο τμήμα (**Mesh Part**).

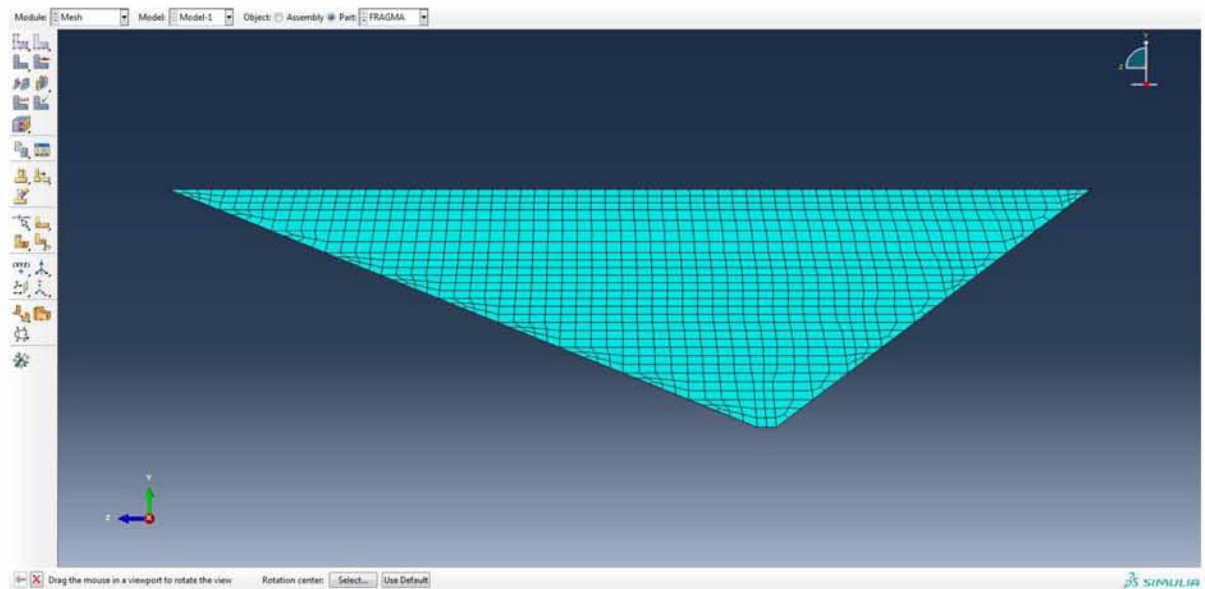


Εικόνα 4.8.7. Εντολή δημιουργίας πλέγματος φράγματος.

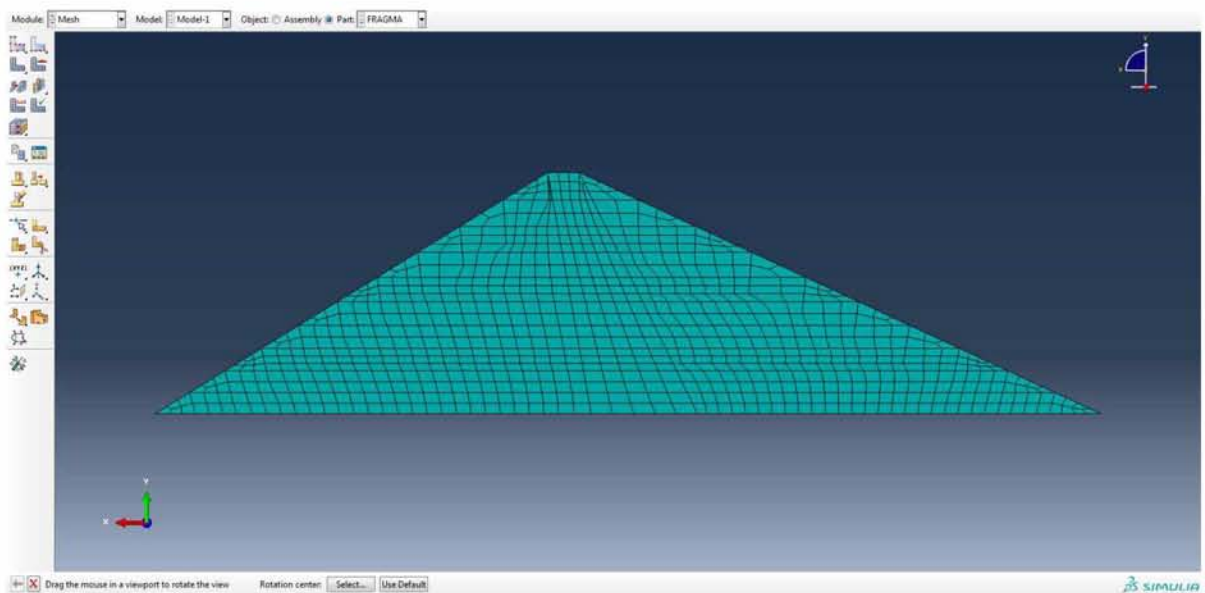
Στο παράθυρο προβολής απεικονίζεται ο κάνναβος του φράγματος σε διαφορετικές όψεις και τα στοιχεία (με κόκκινο χρώμα) καθεμιάς από τις δέκα στρώσεις στις οποίες αυτό χωρίστηκε.



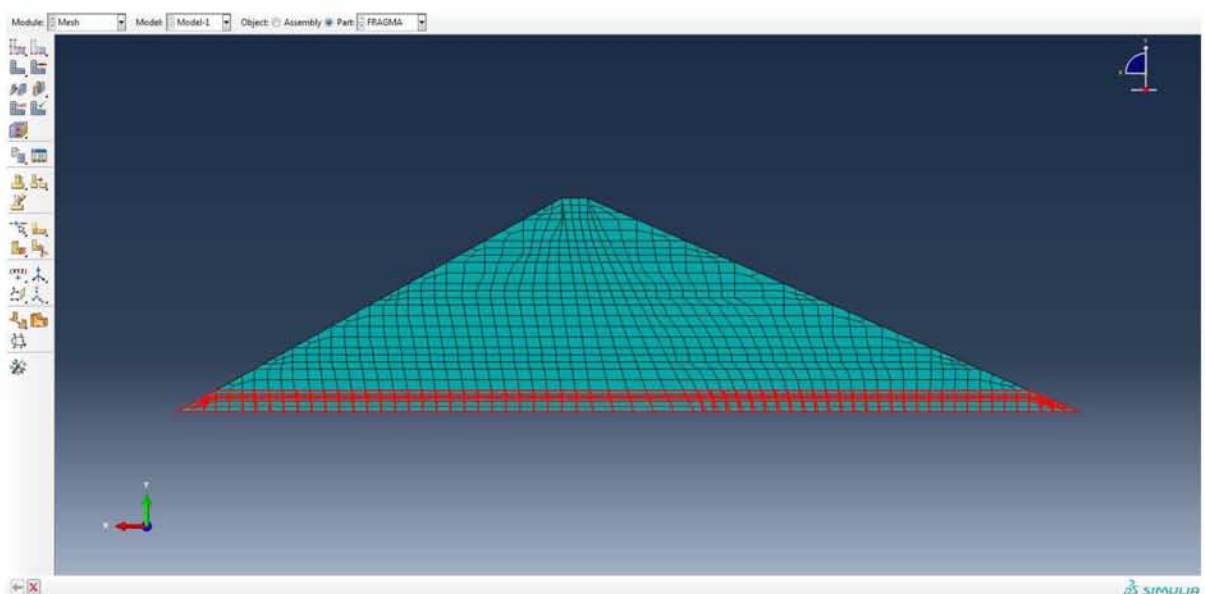
Εικόνα 4.8.8. Κάνναβος διακριτοποίησης (πλέγμα) φράγματος στις τρεις διαστάσεις.



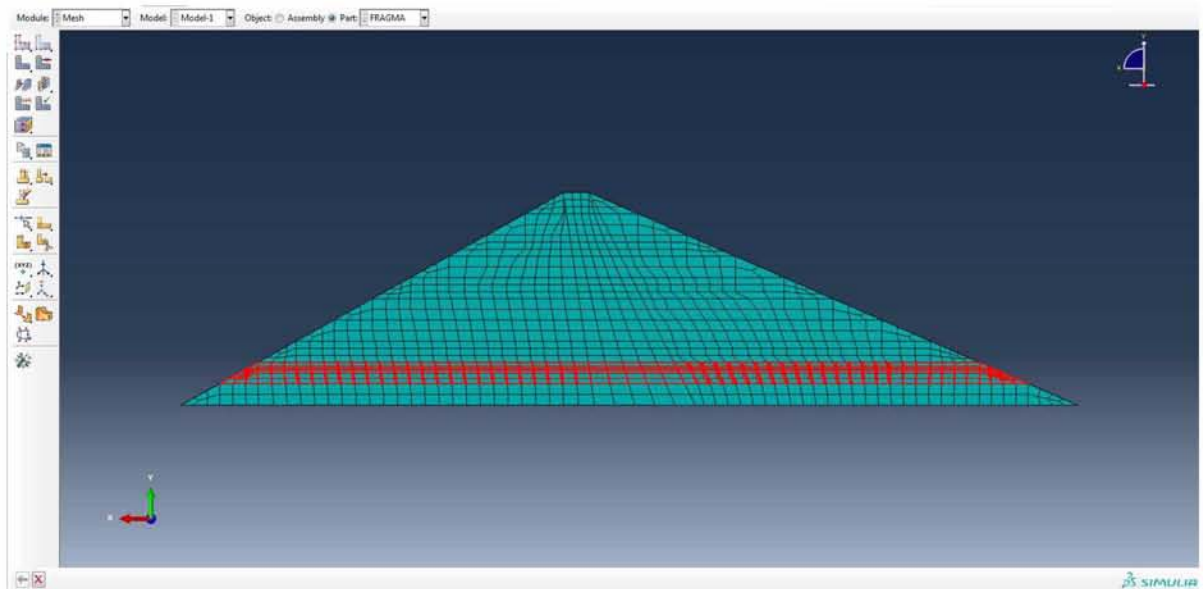
Εικόνα 4.8.9. Κάνναβος διακριτοποίησης (πλέγμα) φράγματος στο επίπεδο ZY.



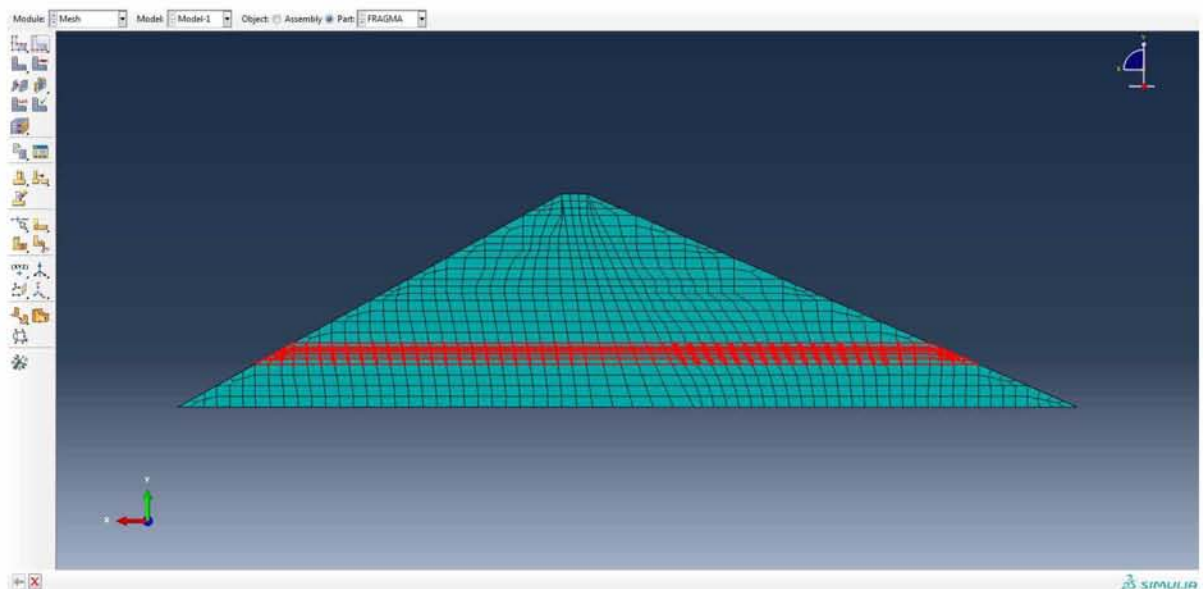
Εικόνα 4.8.10. Κάνναβος διακριτοποίησης (πλέγμα) φράγματος στο επίπεδο XY.



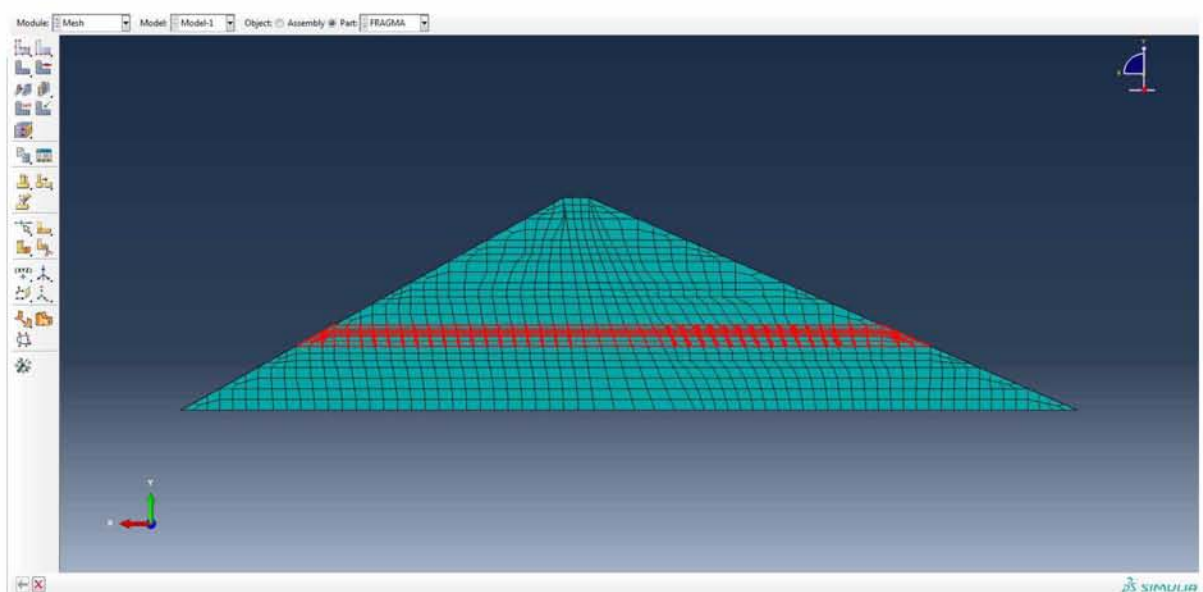
Εικόνα 4.8.11. Στοιχεία διακριτοποίησης πρώτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).



Εικόνα 4.8.12. Στοιχεία διακριτοποίησης δεύτερης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

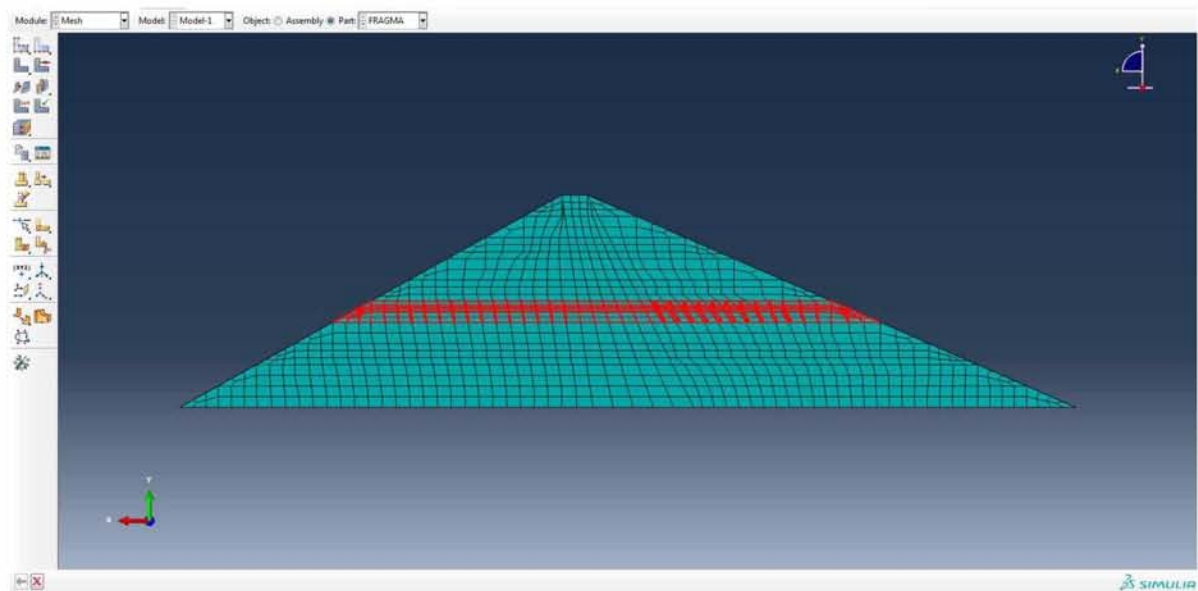


Εικόνα 4.8.13. Στοιχεία διακριτοποίησης τρίτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

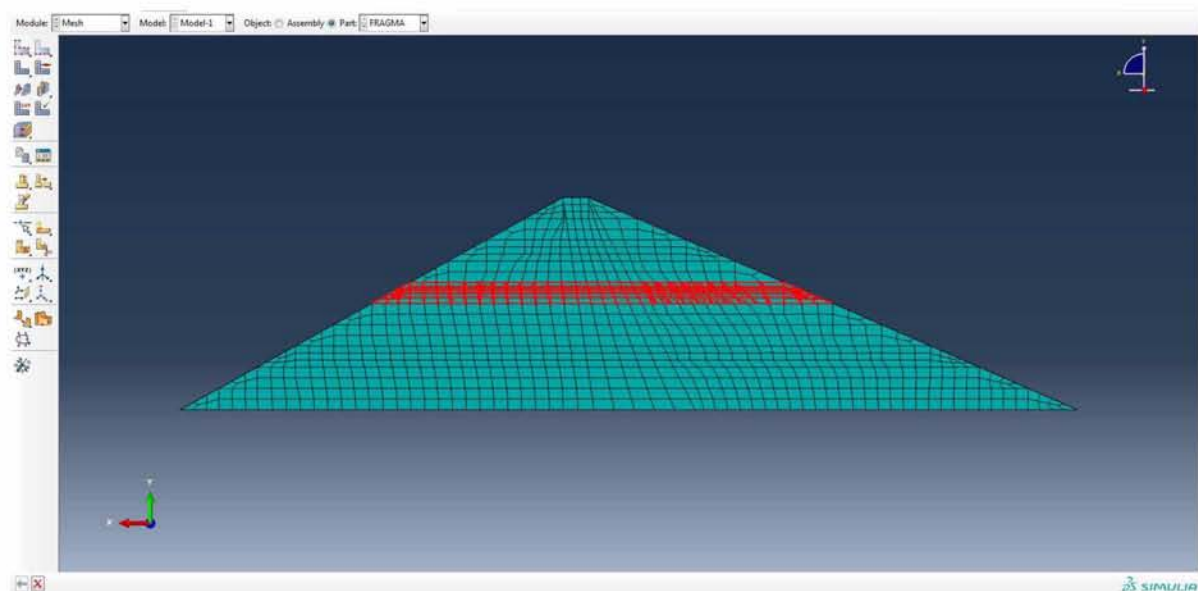


Εικόνα 4.8.14. Στοιχεία διακριτοποίησης τέταρτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

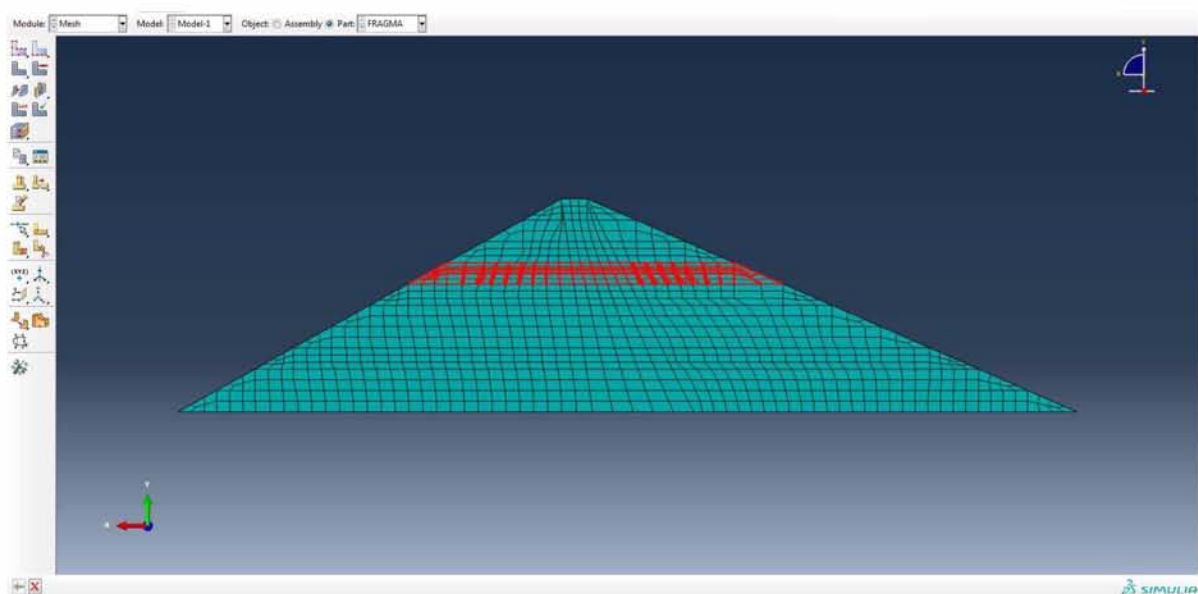




Εικόνα 4.8.15. Στοιχεία διακριτοποίησης πέμπτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

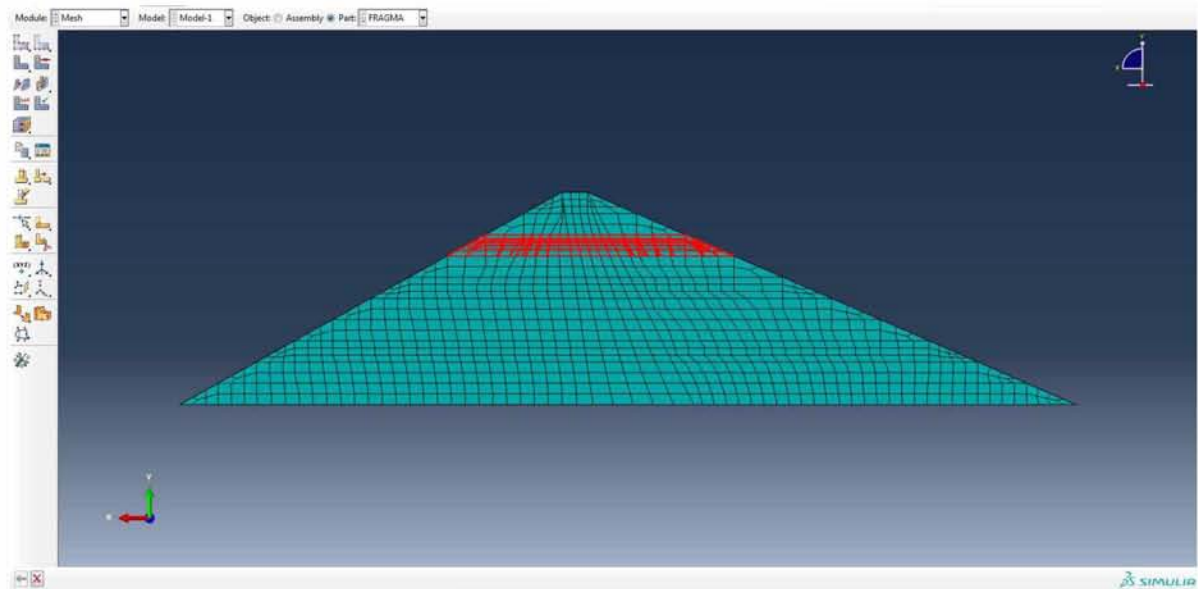


Εικόνα 4.8.16. Στοιχεία διακριτοποίησης έκτης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

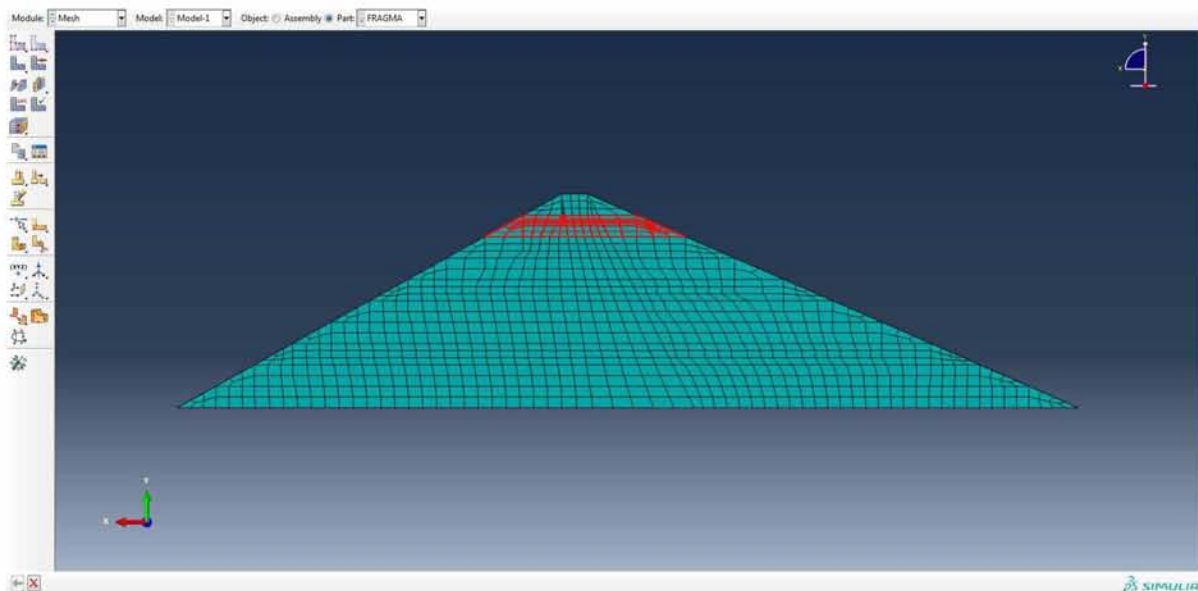


Εικόνα 4.8.17. Στοιχεία διακριτοποίησης έβδομης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

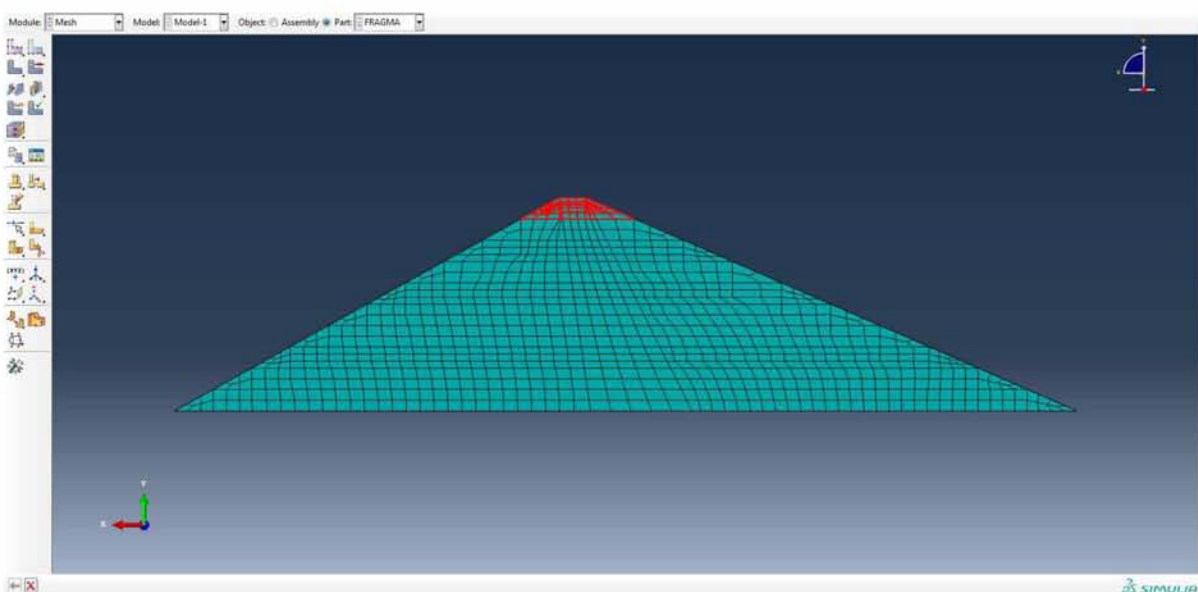




Εικόνα 4.8.18. Στοιχεία διακριτοποίησης όγδοης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).



Εικόνα 4.8.19. Στοιχεία διακριτοποίησης ένατης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).



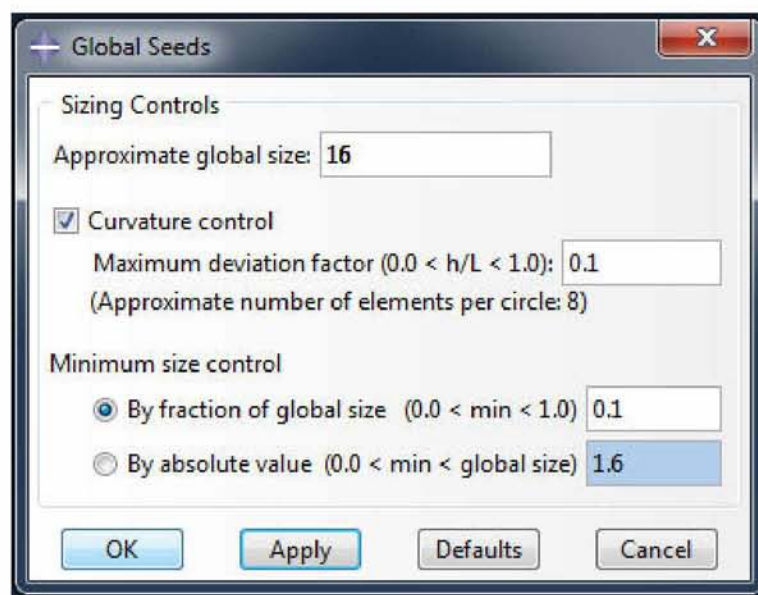
Εικόνα 4.8.20. Στοιχεία διακριτοποίησης δέκατης στρώσης φράγματος (κόκκινο χρώμα).

## ΠΛΕΓΜΑ ΠΡΑΝΩΝ

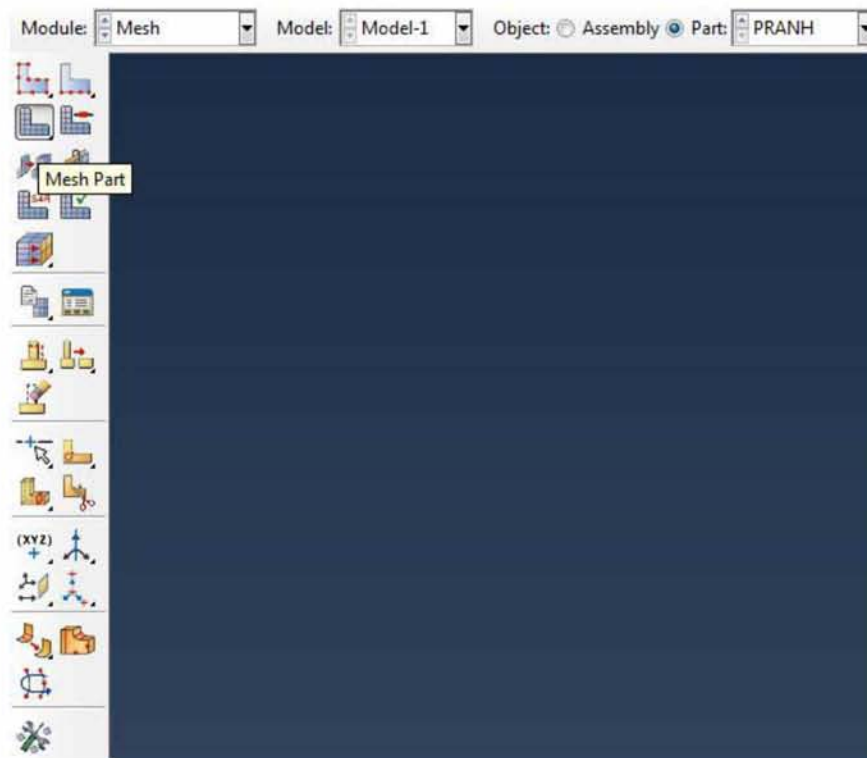
Σε δεύτερη φάση, επιλέγεται το τμήμα (**Part**) των πρανών της κοιλάδας. Δίνεται εντολή ορισμού δεικτών (**Seed Part**) κατά μήκος των πλευρών των πρανών, εισάγεται η τιμή 16 στο μέγεθος κελιού του καννάβου (**Approximate global size: 16**), κλικάρεται **OK** και επιλέγεται δημιουργία πλέγματος (**Mesh Part**).



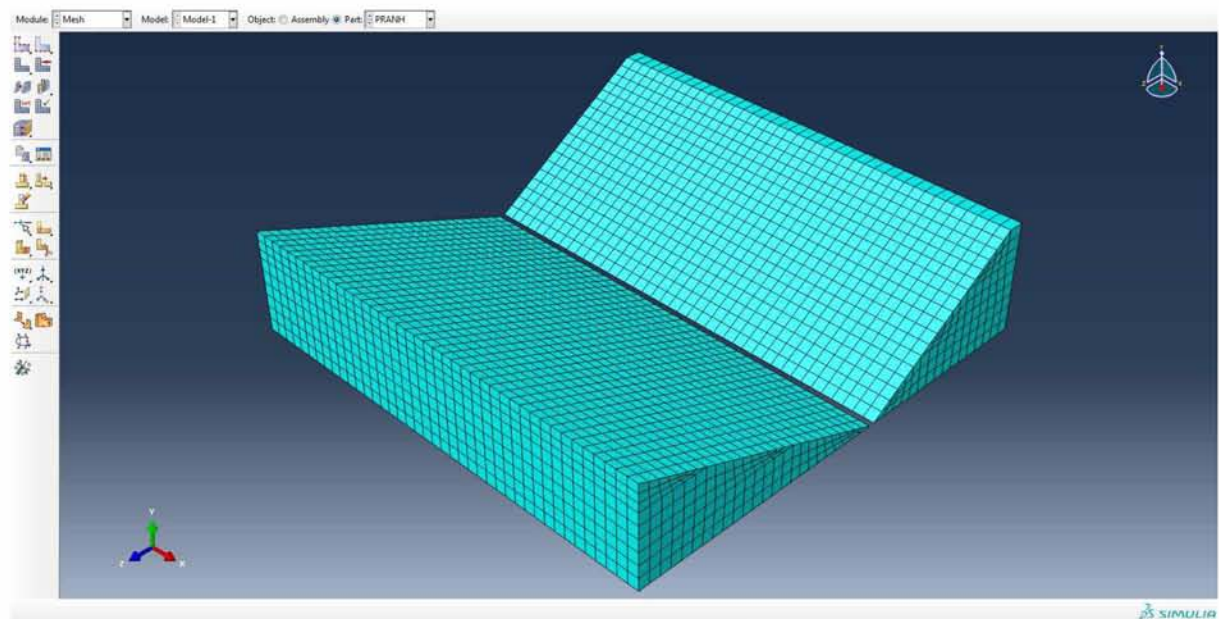
Εικόνα 4.8.21. Εντολή δημιουργίας δεικτών για το τμήμα των πρανών.



Εικόνα 4.8.22. Ορισμός μεγέθους κελιού καννάβου διακριτοποίησης πρανών κοιλάδας.



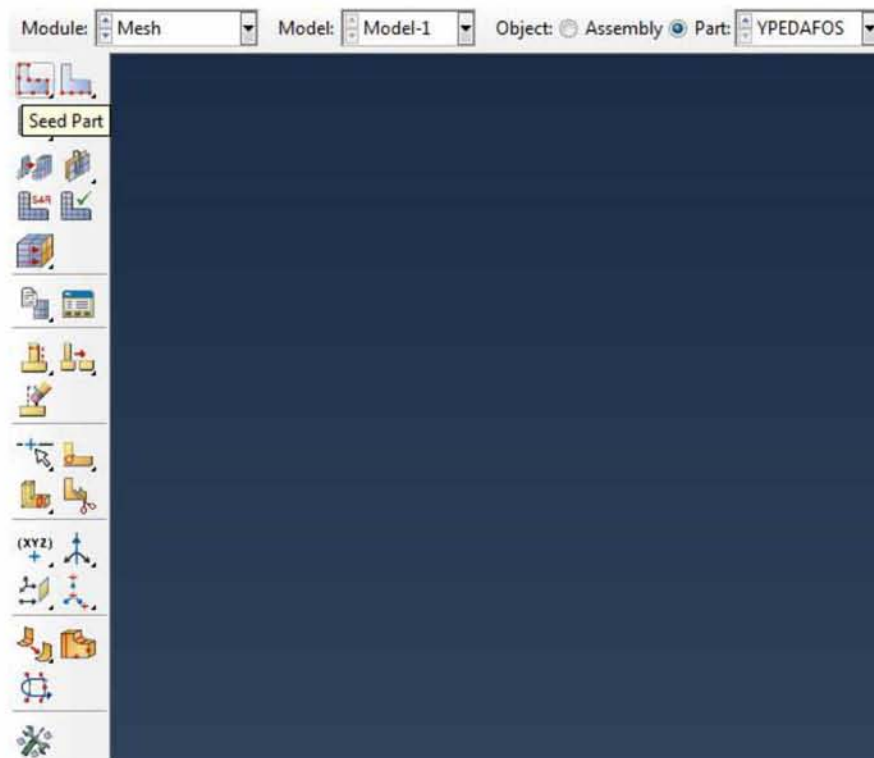
Εικόνα 4.8.23. Εντολή δημιουργίας πλέγματος πρανών κοιλάδας.



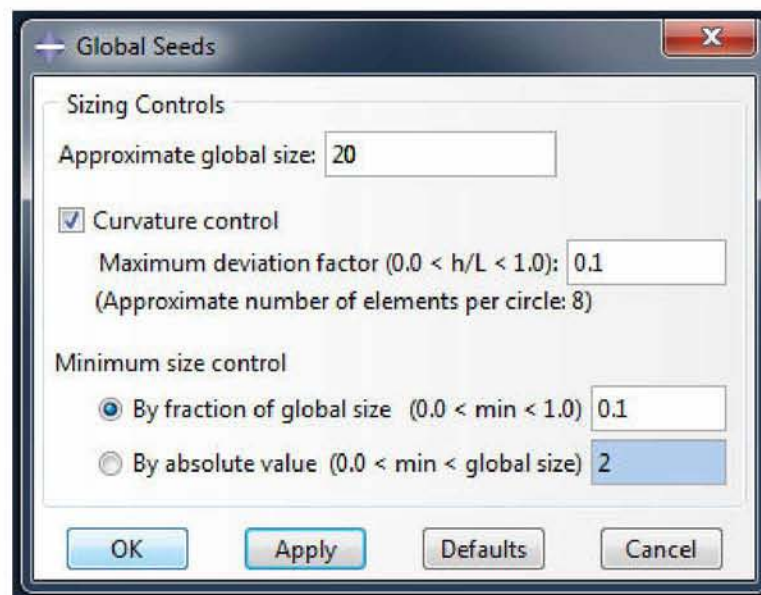
Εικόνα 4.8.24. Κάνναβος διακριτοποίησης πρανών κοιλάδας.

## ΠΛΕΓΜΑ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

Με τον ίδιο τρόπο σχηματίζεται και το πλέγμα του υπεδάφους με μέγεθος κελιού καννάβου 20 (Approximate global size: 20).

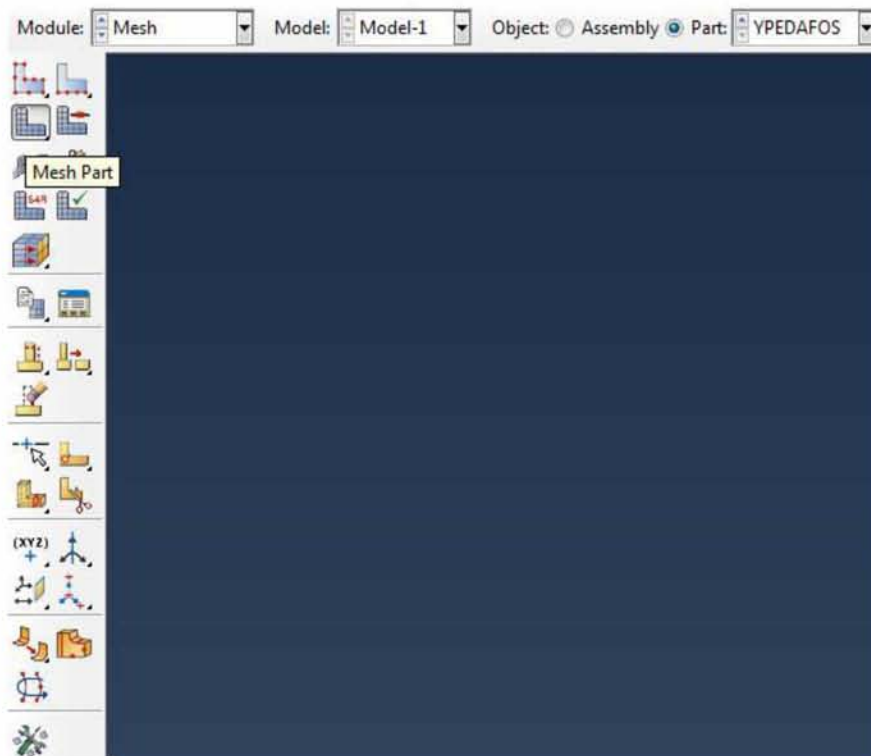


Εικόνα 4.8.25. Εντολή δημιουργίας δεικτών για το τμήμα του υπεδάφους.

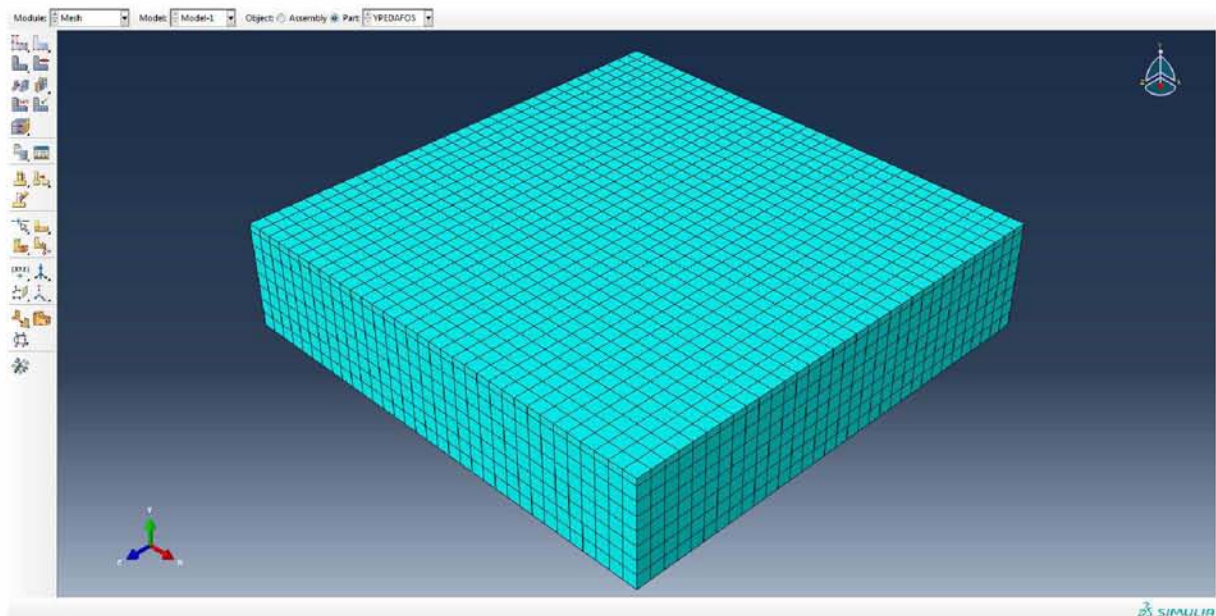


Εικόνα 4.8.26. Ορισμός μεγέθους κελιού καννάβου διακριτοποίησης υπεδάφους.



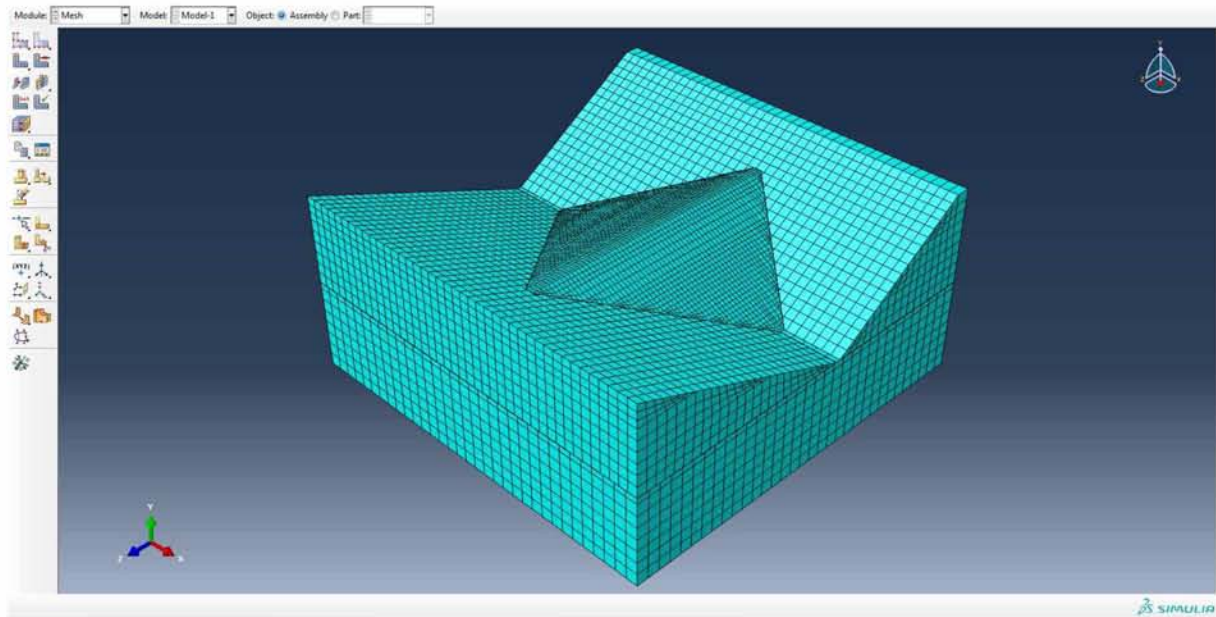


Εικόνα 4.8.27. Εντολή δημιουργίας πλέγματος υπεδάφους.

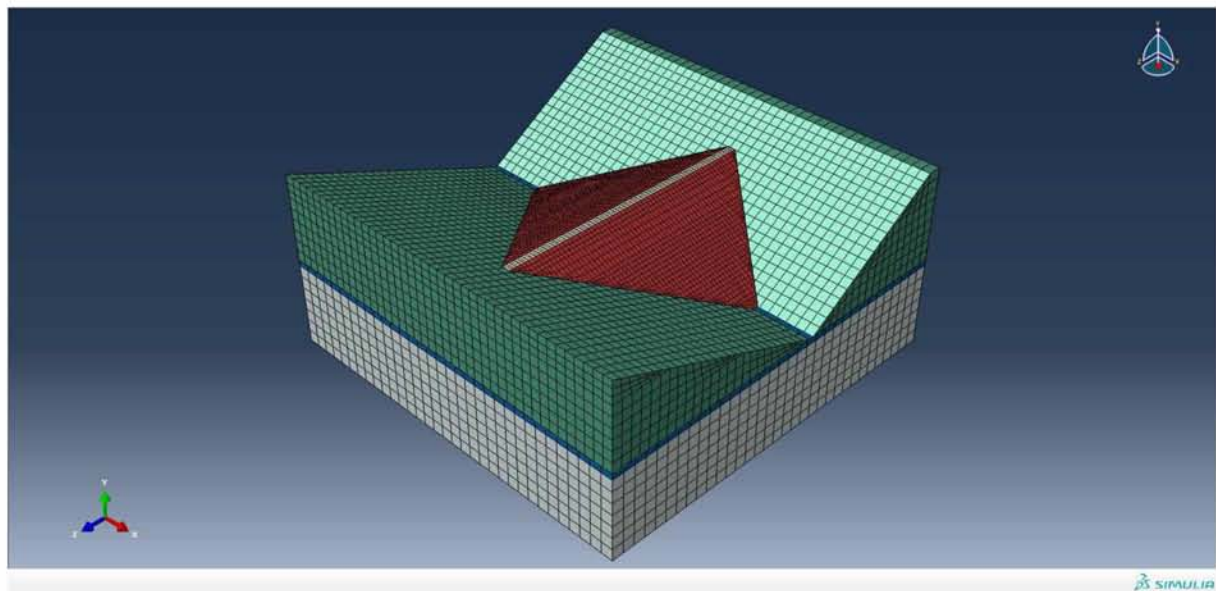


Εικόνα 4.8.28. Κάνναβος διακριτοποίησης υπεδάφους.

Παρατηρείται το μοντέλο μετά τη διακριτοποίηση.



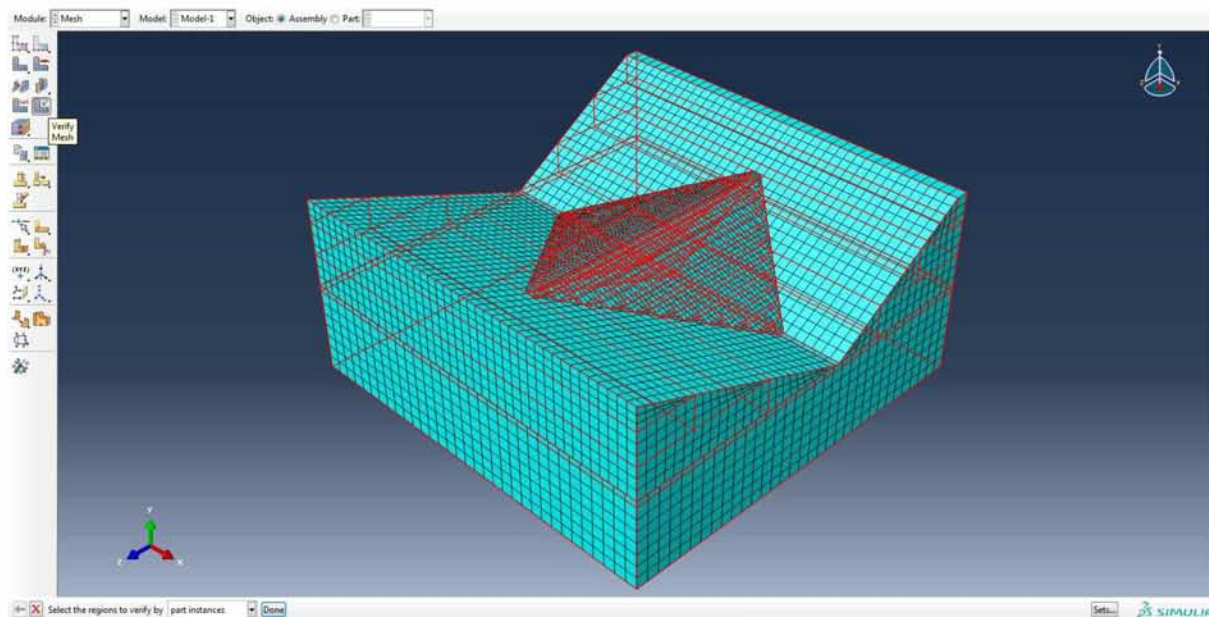
Εικόνα 4.8.29. Κάνναβος διακριτοποίησης μοντέλου.



Εικόνα 4.8.30. Απεικόνιση διακριτοποίησης και υλικών τελικού μοντέλου.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία διακριτοποίησης, το Abaqus παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για τον έλεγχο της ποιότητας του πλέγματος, την επισήμανση στοιχείων με πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων ή μειωμένης ακρίβειας στην ανάλυση και την εμφάνιση γενικότερων πληροφοριών σχετικά με τους κόμβους και τα στοιχεία του πλέγματος.

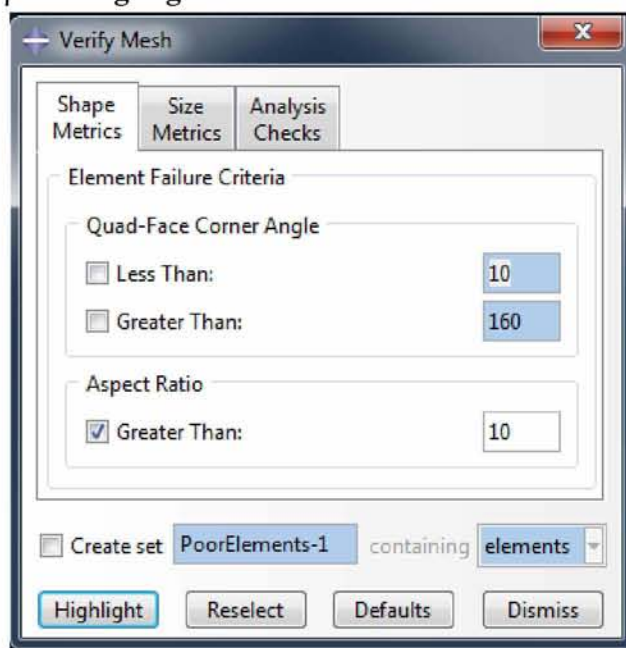
Δίνεται εντολή ελέγχου του πλέγματος (**Verify Mesh**), επιλέγεται ολόκληρο το μοντέλο και κλικάρεται **Done**.



Εικόνα 4.8.31. Εντολή ελέγχου διακριτοποίησης και επιλογή ολόκληρου του μοντέλου.

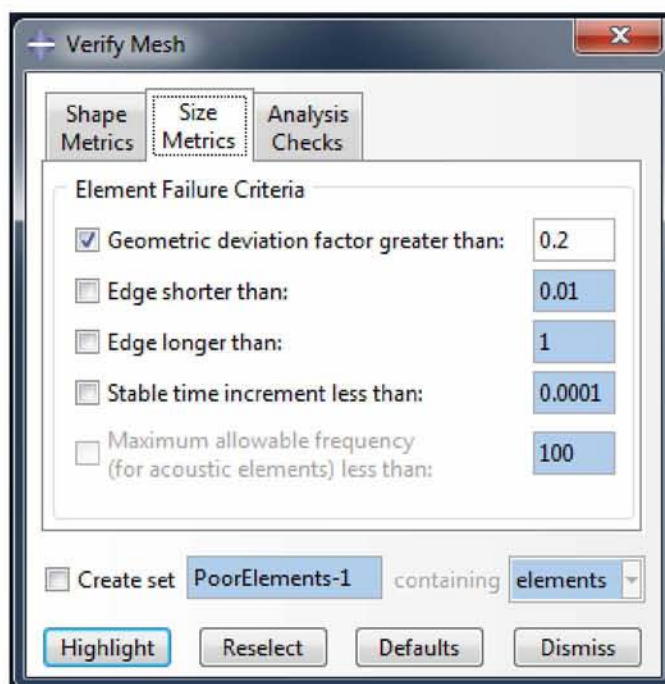
Στη συνέχεια επιλέγονται τα κριτήρια με βάση τα οποία ένα στοιχείο του πλέγματος θα επισημανθεί από το πρόγραμμα ως «φτωχό», όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στο συγκεκριμένο στοιχείο (**Element Failure Criteria**).

Στην πρώτη καρτέλα (**Shape Metrics**) επιλέγεται ως κριτήριο αστοχίας αναλογία διαστάσεων μεγαλύτερη από 10 (**Aspect Ratio Greater Than: 10**) και στη δεύτερη συντελεστής γεωμετρικής απόκλισης μεγαλύτερος του 0.2 (**Geometric deviation factor greater than: 0.2**). Στην τρίτη καρτέλα επιλέγεται να επισημανθούν τα «ακατάλληλα» στοιχεία που εμφανίζουν είτε σφάλματα (**Errors**) είτε προειδοποιήσεις πιθανότητας σφαλμάτων (**Warnings**) και κλικάρεται **Highlight**.

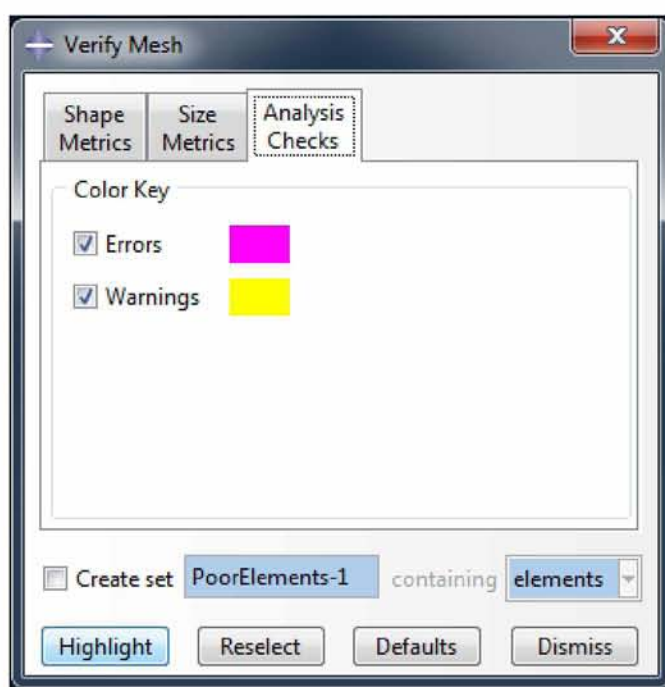


Εικόνα 4.8.32. Επιλογή αναλογίας διαστάσεων στοιχείου διακριτοποίησης ως κριτήριο ελέγχου καταλληλότητας στοιχείου.





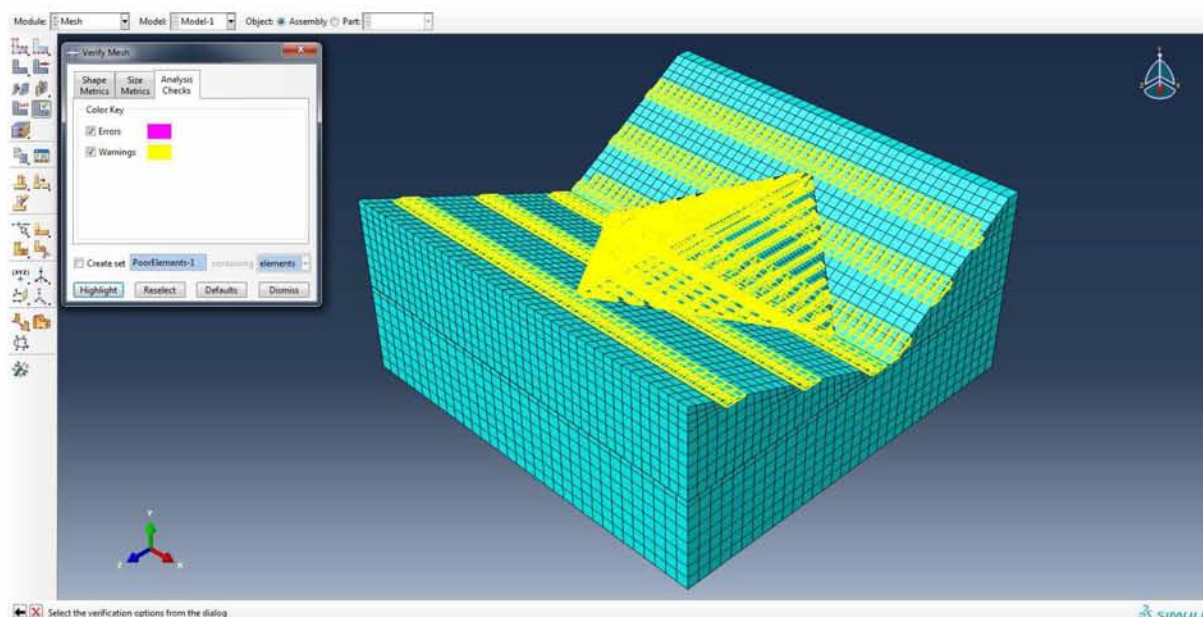
Εικόνα 4.8.33. Επιλογή συντελεστή γεωμετρικής απόκλισης στοιχείου διακριτοποίησης ως κριτήριο ελέγχου καταλληλότητας στοιχείου.



Εικόνα 4.8.34. Επιλογή εμφάνισης σφαλμάτων και προειδοποιήσεων κατά τον έλεγχο των στοιχείων διακριτοποίησης.

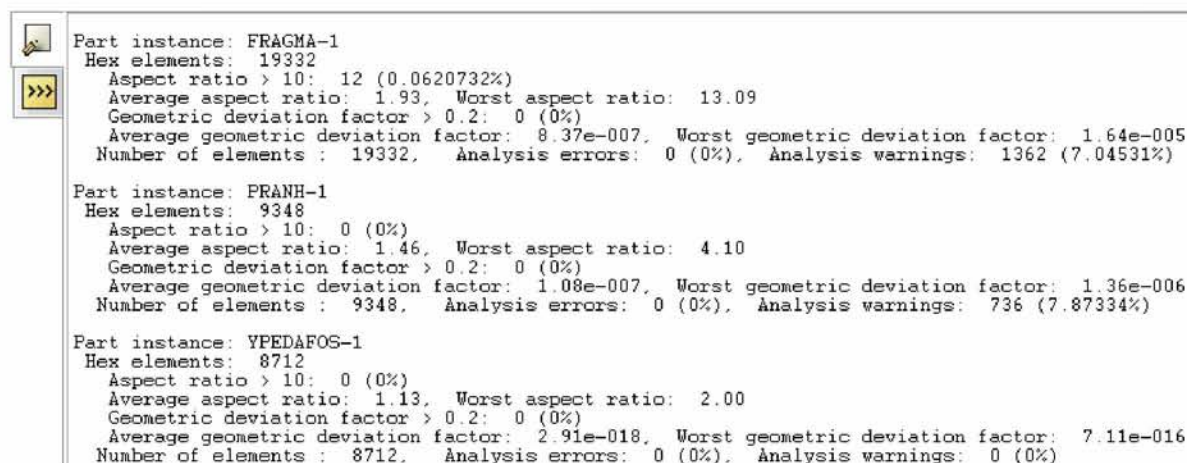
Στο παράθυρο προβολής παρατηρείται ότι υπάρχουν μεν περιοχές στοιχείων με προειδοποιήσεις (warnings), είναι δε λίγες.





Εικόνα 4.8.35. Απεικόνιση στοιχείων διακριτοποίησης που εμφανίζουν προειδοποιήσεις (κίτρινο χρώμα).

Παράλληλα, στη γραμμή εντολών δίνονται αναλυτικές πληροφορίες για τα πλέγματα του μοντέλου. Παρατηρείται ότι δεν εμφανίζονται σφάλματα (**Analysis Errors: 0**), ενώ οι προειδοποιήσεις (**Analysis Warnings**) είναι γύρω στο 7% για το πλέγμα του φράγματος και γύρω στο 8% για το πλέγμα των πρανών, με αυτό του υπεδάφους να μην εμφανίζει προειδοποιήσεις (0%). Από τη στιγμή που οι παραπάνω τιμές είναι μικρότερες του 10% κρίνονται αποδεκτές. Σε αυτό συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό ο διαχωρισμός των τμημάτων σε μικρότερα (partitions) που περιγράφηκε σε προηγούμενο στάδιο της μοντελοποίησης.



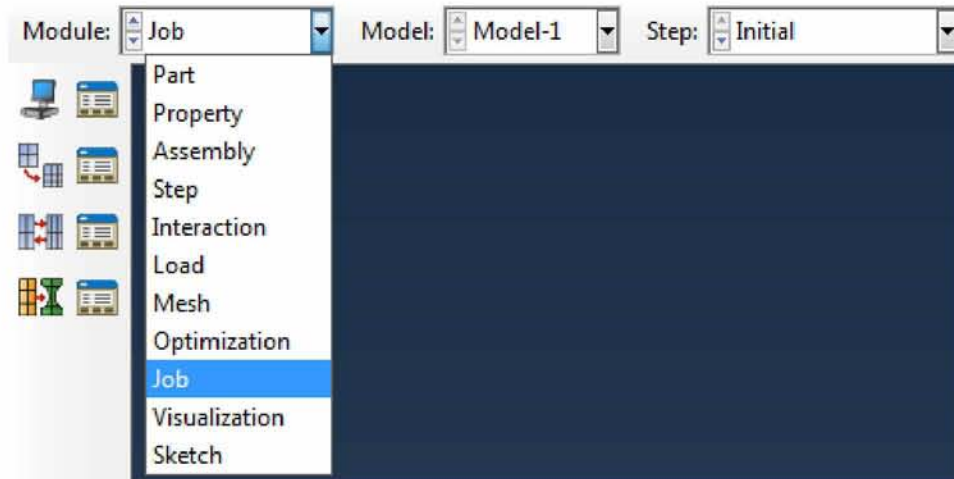
Εικόνα 4.8.36. Παρουσίαση αναλυτικών πληροφοριών διακριτοποίησης για το κάθε τμήμα του μοντέλου (αριθμός στοιχείων, ποσοστό σφαλμάτων και προειδοποιήσεων, αναλογία διαστάσεων και συντελεστής γεωμετρικής απόκλισης στοιχείων διακριτοποίησης).

Τα στοιχεία (Hex - C3D8R) που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση ήταν 19332 για το φράγμα, 9348 για τα πρανά της κοιλάδας και 8712 για το υπέδαφος θεμελίωσης, ενώ τα συνολικά στοιχεία του μοντέλου προέκυψαν 37392.

## 4.9 Job Module

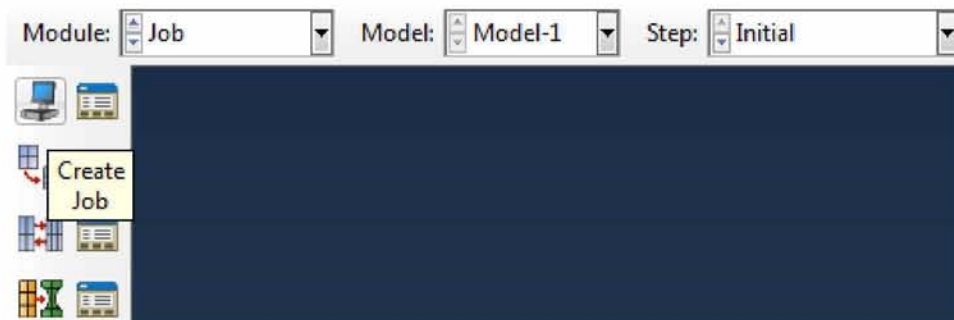
Μετά την ολοκλήρωση όλων των εργασιών που σχετίζονται με τον ορισμό ενός μοντέλου, χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη ενότητα για την ανάλυση του μοντέλου. Η ενότητα εργασίας (job module) επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει μια εργασία, να την υποβάλλει για ανάλυση, αλλά και να παρακολουθήσει την πρόοδό της. Υπάρχει η δυνατότητα μάλιστα δημιουργίας πολλαπλών μοντέλων και εργασιών και ταυτόχρονης εκτέλεσης ή και παρακολούθησής τους.

Επιλέγεται η ενότητα εργασίας (**Module: Job**).



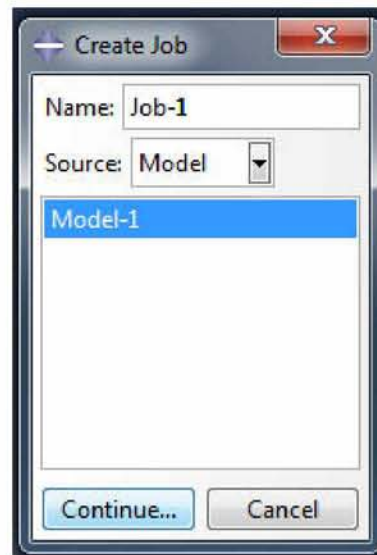
Εικόνα 4.9.1. Επιλογή ενότητας Job Module.

Δίνεται εντολή δημιουργίας εργασίας ανάλυσης (**Create Job**).



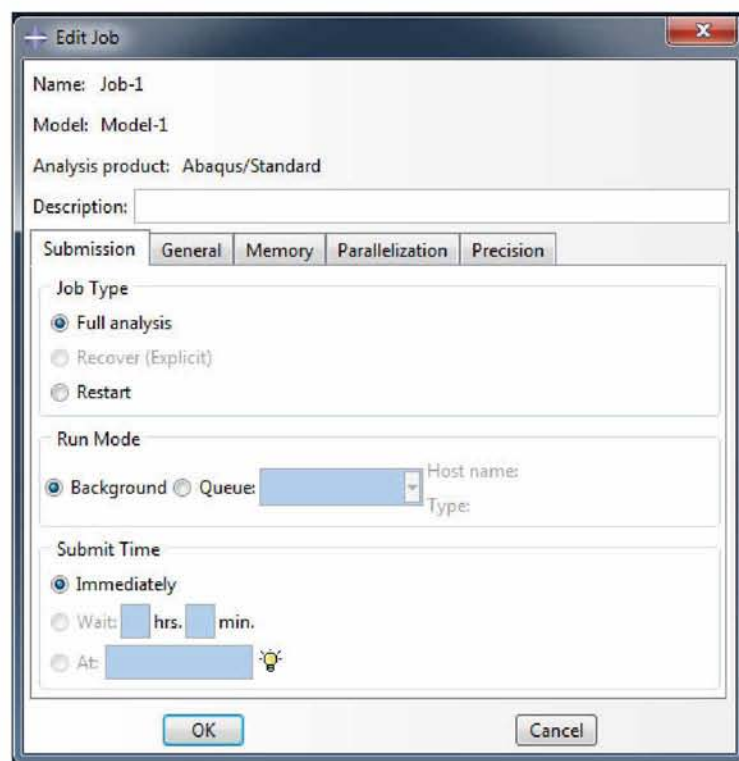
Εικόνα 4.9.2. Εντολή δημιουργίας εργασίας ανάλυσης.

Ονομάζεται και επιλέγεται το μοντέλο προς ανάλυση.



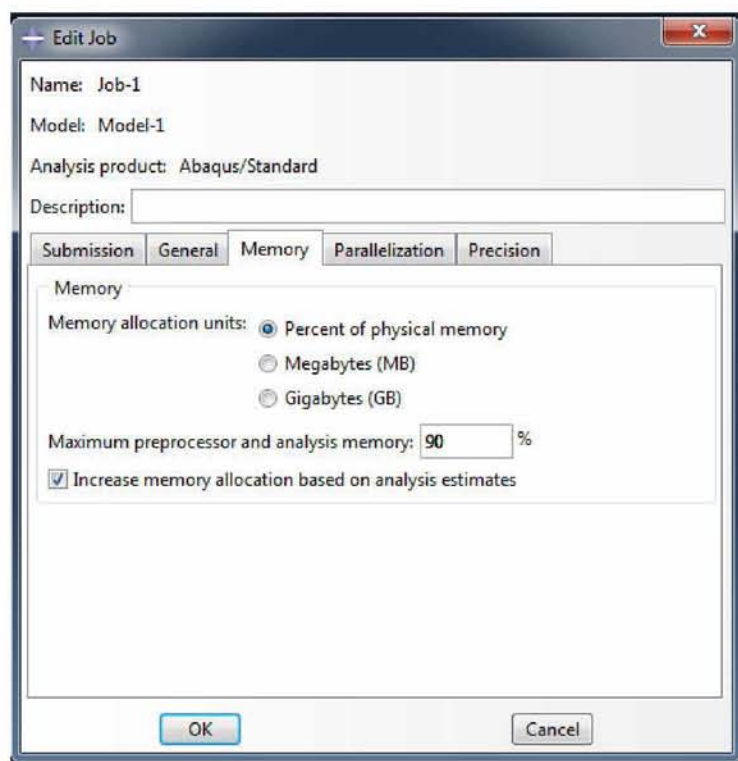
Εικόνα 4.9.3. Επιλογή μοντέλου προς ανάλυση.

Στο παράθυρο επεξεργασίας εργασίας (**Edit Job**) επιλέγεται στην καρτέλα υποβολής (**Submission**) τύπος εργασίας πλήρους ανάλυση (**Job Type: Full analysis**), στην καρτέλα μνήμης (**Memory**) προσδιορίζεται η κατανομή των μονάδων μνήμης και συγκεκριμένα επιλέγεται ως ποσοστό της φυσικής μνήμης του υπολογιστή που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση το 90% (**Memory allocation units: Percent of physical memory 90%**) και στην καρτέλα παραλληλοποίησης (**Parallelization**) τσεκάρεται η χρήση πολλών επεξεργαστών και πληκτρολογείται στο πλαίσιο ο μέγιστος διαθέσιμος αριθμός επεξεργαστών, στην προκειμένη 4 (**Use multiple processors: 4**).

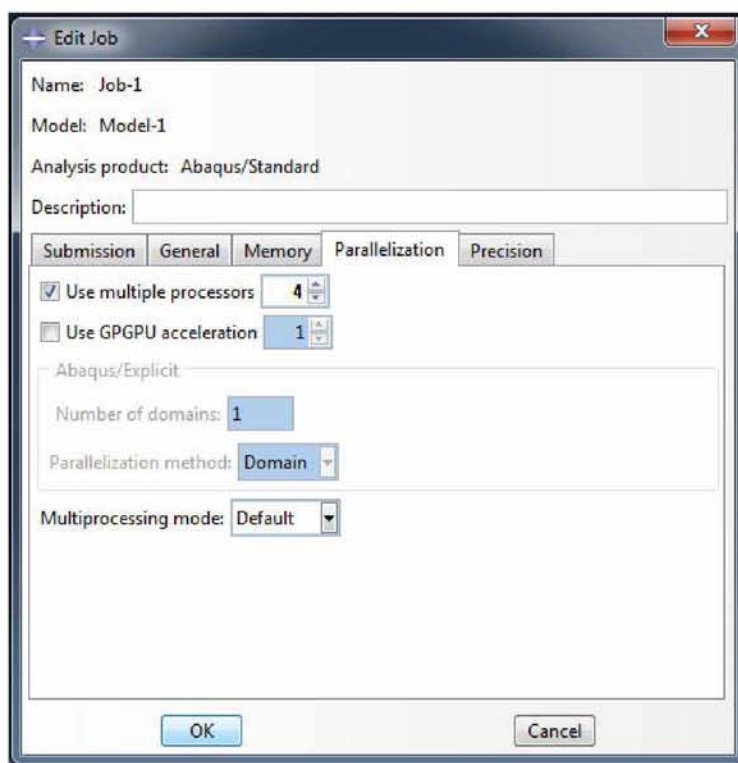


Εικόνα 4.9.4. Επιλογή πλήρους ανάλυσης.





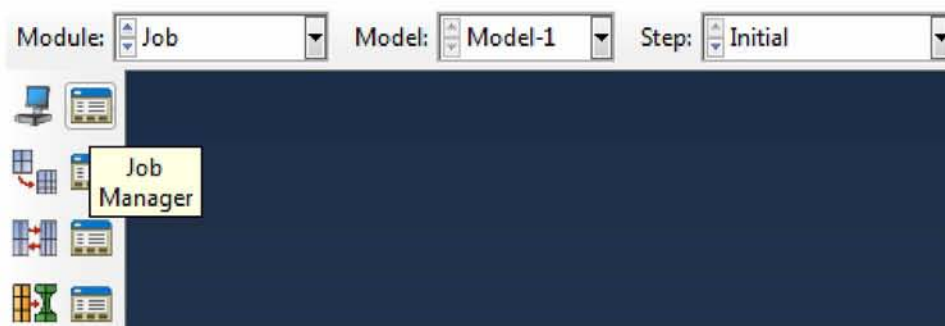
Εικόνα 4.9.5. Ορισμός ποσοστού χρήσης μνήμης υπολογιστή κατά την ανάλυση.



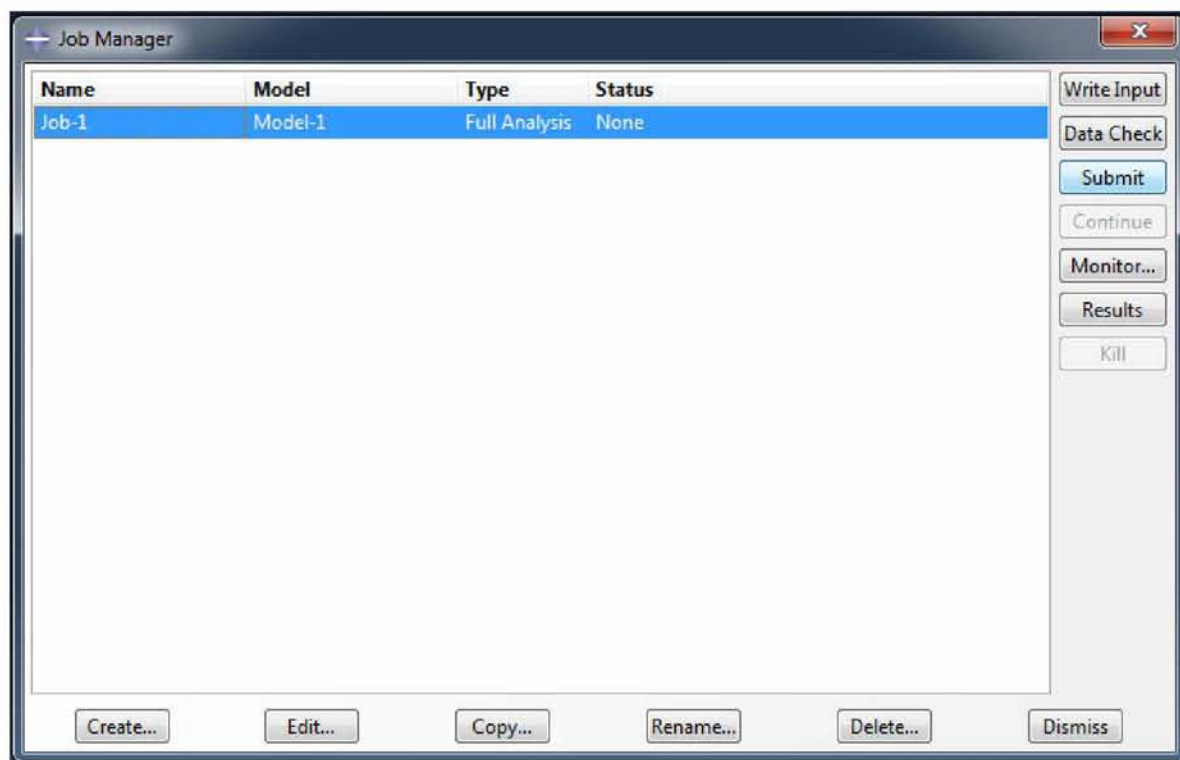
Εικόνα 4.9.6. Επιλογή χρήσης πολλαπλών επεξεργαστών κατά την ανάλυση.

Εμφανίζοντας τον διαχειριστή εργασιών (**Job Manager**), επιλέγεται η εργασία που δημιουργήθηκε και κλικάρεται υποβολή (**Submit**) προκειμένου να ξεκινήσει η ανάλυση.



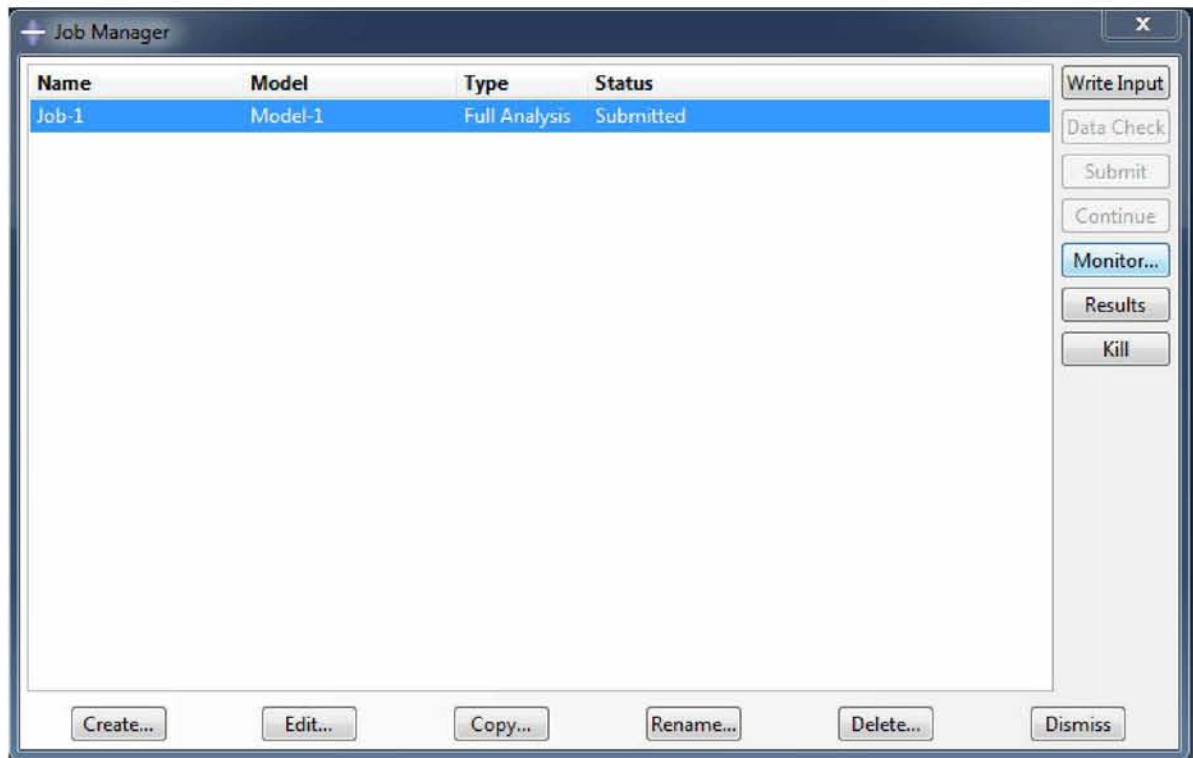


Εικόνα 4.9.7. Εντολή εμφάνισης του διαχειριστή εργασιών ανάλυσης.



Εικόνα 4.9.8. Επιλογή της εργασίας ανάλυσης που δημιουργήθηκε και υποβολή ανάλυσης.

Πλέον παρατηρείται ότι στην κατάσταση της εργασίας εμφανίζεται μήνυμα ότι υποβλήθηκε (**Status: Submitted**). Κλικάροντας την εντολή παρακολούθησης (**Monitor...**) εμφανίζεται αντίστοιχο παράθυρο. Εκτός από την εξέλιξη της ανάλυσης, στο παράθυρο παρέχονται πρόσθετες πληροφορίες για την ανάλυση, όπως η ημερομηνία και η ώρα έναρξης αλλά και ολοκλήρωσής της (**Log**), τα σφάλματα (**Errors**) και οι προειδοποιήσεις (**Warnings**) που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκειά της.



Εικόνα 4.9.9. Εντολή παρακολούθησης ανάλυσης.

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/UPF	Time/UPF Inc
1	1	1	0	3	3	1	1	1
2	1	1	0	5	5	2	1	1
3	1	1U	0	4	4	2	0	1
3	1	2	0	4	4	2.25	0.25	0.25
3	2	1	0	3	3	2.5	0.5	0.25
3	3	1	0	3	3	2.875	0.875	0.375
3	4	1	0	3	3	3	1	0.125
4	1	1	0	6	6	4	1	1
5	1	1U	0	1	1	4	0	1
5	1	2U	0	4	4	4	0	0.25
5	1	3	0	5	5	4.0625	0.0625	0.0625
5	2	1	0	3	3	4.125	0.125	0.0625
5	3	1	0	3	3	4.1875	0.1875	0.0625
5	4	1	0	2	2	4.28125	0.28125	0.09375
5	5	1	0	2	2	4.42188	0.421875	0.140625
5	6	1	0	2	2	4.62181	0.621813	0.210938
5	7	1	0	2	2	4.94922	0.949219	0.316406
5	8	1	0	2	2	5	1	0.0507813
6	1	1U	0	1	1	5	0	1
6	1	2U	0	4	4	5	0	0.25
6	1	3	0	3	3	5.0625	0.0625	0.0625
6	2	1	0	3	3	5.125	0.125	0.0625
6	3	1	0	3	3	5.21875	0.21875	0.09375
6	4	1	0	3	3	5.35938	0.359375	0.140625
6	5	1	0	3	3	5.57031	0.570313	0.210938

Log Errors Warnings Output Data File

Submitted: Mon May 14 06:11:49 2018

Started: Analysis Input File Processor

Completed: Analysis Input File Processor

Started: Abaqus/Standard

Completed: Abaqus/Standard

Completed: Mon May 14 13:19:11 2018

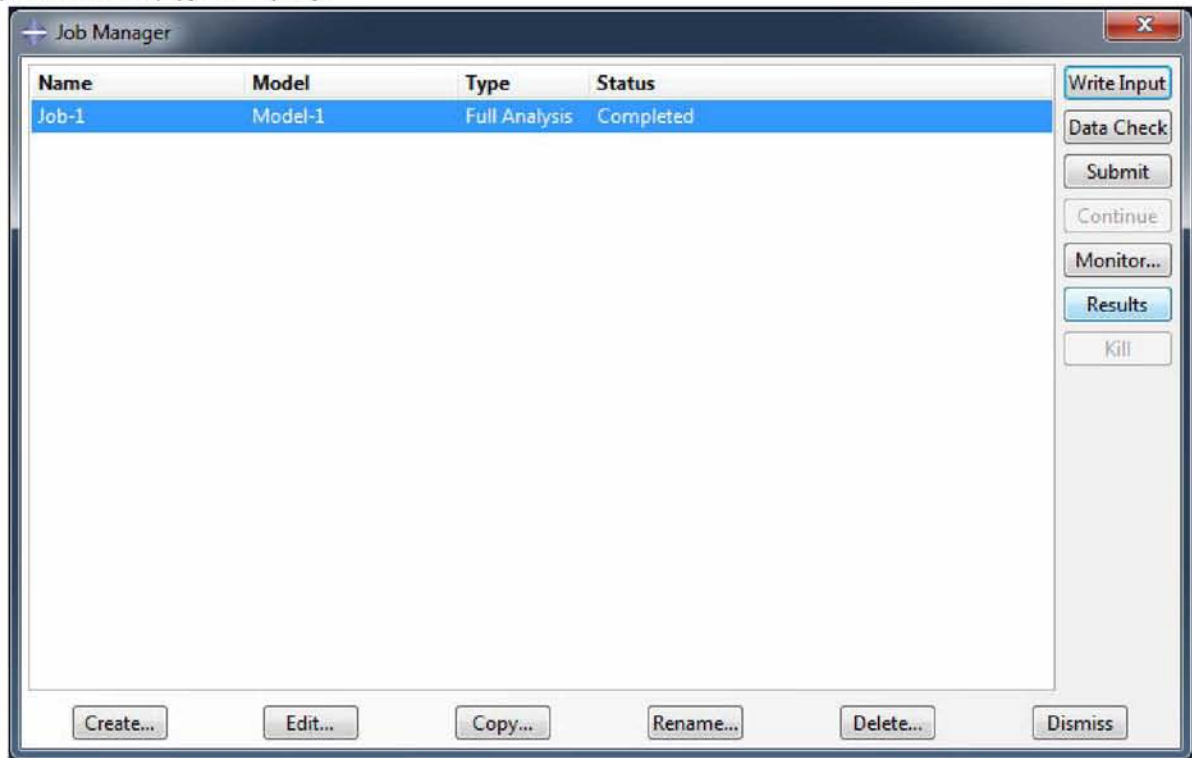
Search Text

Text to find:  Match case ☐ Next  Previous

Dismiss

Εικόνα 4.9.10. Παράθυρο παρακολούθησης ανάλυσης.

Μετά το τέλος της ανάλυσης, παρατηρείται στην κατάστασή της ότι ολοκληρώθηκε (**Status: Completed**) και πλέον μπορούν να οπτικοποιηθούν τα αποτελέσματα είτε επιλέγοντας την εργασία και κλικάροντας την αντίστοιχη εντολή (**Results**) από το παράθυρο του διαχειριστή εργασιών, είτε επιλέγοντας την ενότητα οπτικοποίησης (**Module: Visualization**) από το μενού επιλογής ενότητας.



Εικόνα 4.9.11. Ολοκλήρωση ανάλυσης και επιλογή εμφάνισης αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.9.12. Επιλογή ενότητας οπτικοποίησης αποτελεσμάτων (Visualization Module).

#### **4.10 Ιδιότητες υλικών**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η γεωμετρία του υπό μελέτη φράγματος βασίστηκε σε αυτή του φράγματος Σμοκόβου, του Νομού Καρδίτσας.

Όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών, χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον αυτές του φράγματος στο Μαυρομάτι του Δήμου Σούρπης του Νομού Μαγνησίας, προερχόμενες από σχετική εδαφοστατική μελέτη [14].

Στη συνέχεια δίνονται οι αναλυτικές ιδιότητες του κάθε τμήματος του μοντέλου.

##### **ΣΩΜΑΤΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**

- Είδος υλικού: Σχιστόλιθος (ίλυολιθικός και ψαμμιτικός).
- Πυκνότητα (**Mass Density**):  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ .
- Μέτρο ελαστικότητας (**Young's Modulus**):  $E = 60 \text{ MPa}$ .
- Λόγος Poisson (**Poisson's Ratio**):  $\nu = 0.25$ .
- Γωνία τριβής (**Friction Angle**):  $\phi = 38^\circ$ .
- Γωνία διαστολής (**Dilation Angle**):  $\psi = 0.1^\circ$ .
- Συνοχή (**Cohesion**):  $c = 10 \text{ kPa}$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\alpha$  (**Damping Alpha**):  $\alpha = 0.0135165$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\beta$  (**Damping Beta**):  $\beta = 0.184543$ .

##### **ΠΥΡΗΝΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ**

- Είδος υλικού: Αργιλικά υλικά.
- Πυκνότητα (**Mass Density**):  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ .
- Μέτρο ελαστικότητας (**Young's Modulus**):  $E = 30 \text{ MPa}$ .
- Λόγος Poisson (**Poisson's Ratio**):  $\nu = 0.25$ .
- Γωνία τριβής (**Friction Angle**):  $\phi = 25^\circ$ .
- Γωνία διαστολής (**Dilation Angle**):  $\psi = 0.1^\circ$ .
- Συνοχή (**Cohesion**):  $c = 20 \text{ kPa}$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\alpha$  (**Damping Alpha**):  $\alpha = 0.0135165$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\beta$  (**Damping Beta**):  $\beta = 0.184543$ .

##### **ΠΡΑΝΗ ΚΟΙΛΑΔΑΣ**

- Είδος υλικού: Βραχώδη υλικά.
- Πυκνότητα (**Mass Density**):  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ .



- Μέτρο ελαστικότητας (**Young's Modulus**):  $E = 100 \text{ MPa}$ .
- Λόγος Poisson (**Poisson's Ratio**):  $\nu = 0.20$ .
- Γωνία τριβής (**Friction Angle**):  $\phi = 26^\circ$ .
- Γωνία διαστολής (**Dilation Angle**):  $\psi = 0.1^\circ$ .
- Συνοχή (**Cohesion**):  $c = 30 \text{ kPa}$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\alpha$  (**Damping Alpha**):  $\alpha = 0.0135165$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\beta$  (**Damping Beta**):  $\beta = 0.184543$ .

## ΥΠΕΔΑΦΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

### (1) ΑΝΩΤΕΡΗ ΣΤΡΩΣΗ (ΠΑΧΟΣ 10m)

- Είδος υλικού: Βραχώδη υλικά.
- Πυκνότητα (**Mass Density**):  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ .
- Μέτρο ελαστικότητας (**Young's Modulus**):  $E = 100 \text{ MPa}$ .
- Λόγος Poisson (**Poisson's Ratio**):  $\nu = 0.20$ .
- Γωνία τριβής (**Friction Angle**):  $\phi = 26^\circ$ .
- Γωνία διαστολής (**Dilation Angle**):  $\psi = 0.1^\circ$ .
- Συνοχή (**Cohesion**):  $c = 30 \text{ kPa}$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\alpha$  (**Damping Alpha**):  $\alpha = 0.0135165$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\beta$  (**Damping Beta**):  $\beta = 0.184543$ .

### (2) ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΣΤΡΩΣΗ

- Είδος υλικού: Βραχώδη υλικά.
- Πυκνότητα (**Mass Density**):  $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ .
- Μέτρο ελαστικότητας (**Young's Modulus**):  $E = 1 \text{ GPa}$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\alpha$  (**Damping Alpha**):  $\alpha = 0.0135165$ .
- Συντελεστής απόσβεσης  $\beta$  (**Damping Beta**):  $\beta = 0.184543$ .

Για όλα τα υλικά θεωρήθηκε πλαστική συμπεριφορά σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb, εκτός της κατώτερης στρώσης του υπεδάφους που θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται ελαστικά και γι' αυτό δεν χρειάστηκε η εισαγωγή άλλων παραμέτρων.

Λόγω έλλειψης δεδομένων για τη γωνία διαστολής, συννηθίζεται να λαμβάνεται  $\psi = \phi - 30^\circ$  ή  $\psi = 0^\circ$  για ασύνδετη ροή (non-associated flow), ενώ σε αντίθετη περίπτωση (associated flow) η γωνία διαστολής λαμβάνεται ίση με τη γωνία τριβής του υλικού ( $\psi = \phi$ ). Στην παρούσα εργασία έγινε θεώρηση πλαστικού κανόνα ασύνδετης ροής (non-associated plastic flow rule) και επομένως λόγω των μικρών γωνιών τριβής στα υλικά του μοντέλου θεωρήθηκε πρακτικά μηδενική γωνία διαστολής ( $\psi = 0.1^\circ$ ), καθώς το πρόγραμμα δεν δέχεται ανστηρά μηδενική τιμή.

*Ο λόγος κρίσιμης απόσβεσης και επομένως και οι συντελεστές απόσβεσης  $\alpha$  και  $\beta$  θεωρήθηκαν ίδιοι σε όλα τα υλικά του μοντέλου, καθώς παρατηρήθηκε ότι ενδεχόμενη διαφοροποίησή τους μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου οδηγούσε σε πολύ σημαντική αύξηση του χρόνου ανάλυσης. Ο τρόπος υπολογισμού των συντελεστών απόσβεσης Rayleigh  $\alpha$  και  $\beta$  που χρησιμοποιήθηκαν αναλύεται στη συνέχεια.*

## ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Η ανάγκη προσομοίωσης της απόσβεσης λόγω απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας (radiation damping) η οποία παρατηρείται στη φύση είναι σημαντική. Αυτό γίνεται συνήθως με την εφαρμογή ειδικών συνοριακών συνθηκών στα όρια του προσομοιώματος και πιο συγκεκριμένα με την εφαρμογή αποσβεστήρων (dampers) στους κόμβους που βρίσκονται στα όρια του μοντέλου.

Το Abaqus παρέχει εναλλακτικά τη δυνατότητα εισαγωγής μιας γενικής απόσβεσης στο μοντέλο, την απόσβεση Rayleigh, που ορίζεται ουσιαστικά ως ιδιότητα του κάθε υλικού και ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση.

Σύμφωνα με τη μέθοδο Rayleigh το μητρώο απόσβεσης  $[C]$  υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση, [5]:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

όπου  $\alpha$  ο συντελεστής αναλογικής απόσβεσης του μητρώου μάζας,  $[M]$  το μητρώο μάζας του συστήματος,  $\beta$  ο συντελεστής αναλογικής απόσβεσης του μητρώου δυσκαμψίας και  $[K]$  το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος.

Ο λόγος της κρίσιμης απόσβεσης  $\xi$  εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα  $\omega$  με βάση τη σχέση, [5]:

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2}$$

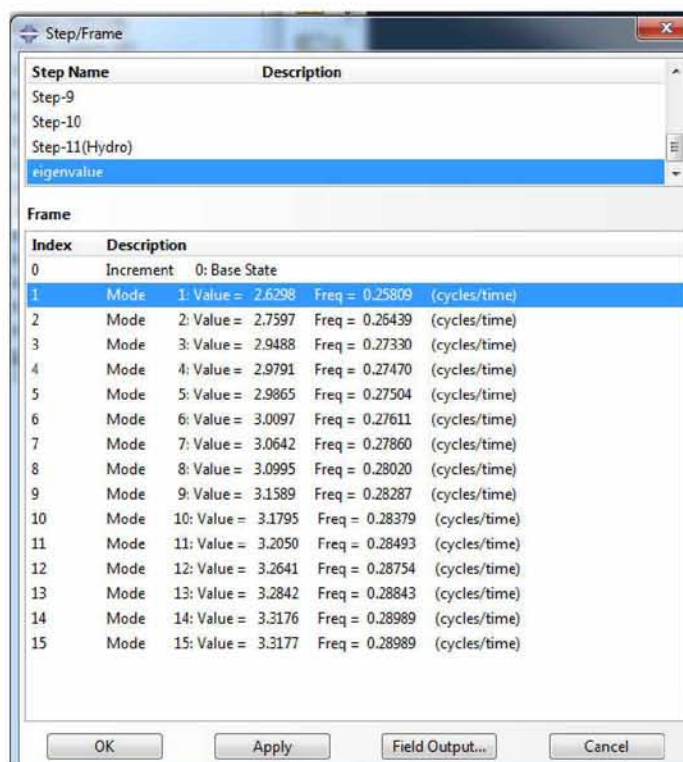
Ωστόσο, στους εδαφικούς σχηματισμούς, ο λόγος απόσβεσης είναι γνωστός και δεν εξαρτάται από τη συχνότητα. Επομένως, μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  από την παραπάνω εξίσωση με τη χρήση δύο γνωστών ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_1$  και  $\omega_2$ . Με βάση τα παραπάνω, οι τιμές των συντελεστών  $\alpha$  και  $\beta$  δίνονται από τις σχέσεις, [5]:

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}$$

$$\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_1 + \omega_2}$$

*Θεωρήθηκε σταθερός λόγος κρίσιμης απόσβεσης και ίδιος σε όλα τα υλικά του μοντέλου, ίσος με  $\xi = 5\%$ .*

Πριν τη σεισμική διέγερση και με την υπόθεση γεμάτου ταμιευτήρα πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίστηκαν οι πρώτες 15 ιδιομορφές και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες. Η μεγαλύτερη ενέργεια απόκρισης για ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται συνήθως στις πρώτες 10 ιδιομορφές [45], οπότε και στην προκειμένη επιλέχθηκαν η 1<sup>η</sup> (θεμελιώδης) ιδιοσυχνότητα και η 10<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα για τον υπολογισμό των συντελεστών  $\alpha$  και  $\beta$ .



Step Name	Description
Step-9	
Step-10	
Step-11(Hydro)	
eigenvalue	

Index	Description
0	Increment 0: Base State
1	Mode 1: Value = 2.6298 Freq = 0.25809 (cycles/time)
2	Mode 2: Value = 2.7597 Freq = 0.26439 (cycles/time)
3	Mode 3: Value = 2.9488 Freq = 0.27330 (cycles/time)
4	Mode 4: Value = 2.9791 Freq = 0.27470 (cycles/time)
5	Mode 5: Value = 2.9865 Freq = 0.27504 (cycles/time)
6	Mode 6: Value = 3.0097 Freq = 0.27611 (cycles/time)
7	Mode 7: Value = 3.0642 Freq = 0.27860 (cycles/time)
8	Mode 8: Value = 3.0995 Freq = 0.28020 (cycles/time)
9	Mode 9: Value = 3.1589 Freq = 0.28287 (cycles/time)
10	Mode 10: Value = 3.1795 Freq = 0.28379 (cycles/time)
11	Mode 11: Value = 3.2050 Freq = 0.28493 (cycles/time)
12	Mode 12: Value = 3.2641 Freq = 0.28754 (cycles/time)
13	Mode 13: Value = 3.2842 Freq = 0.28843 (cycles/time)
14	Mode 14: Value = 3.3176 Freq = 0.28989 (cycles/time)
15	Mode 15: Value = 3.3177 Freq = 0.28989 (cycles/time)

Εικόνα 4.10.1. Ανάλυση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων μοντέλου για τον υπολογισμό των συντελεστών απόσβεσης.

Με δεδομένες τις τιμές των δύο αυτών ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_1$  και  $\omega_{10}$  και για λόγο κρίσιμης απόσβεσης  $\xi = 5\%$ , προέκυψε από τις παραπάνω εξισώσεις  $\alpha = 0.013516528$  και  $\beta = 0.184542703$ . Έτσι, επιτεύχθηκε μείωση της απόσβεσης ανάμεσα στις συχνότητες  $\omega_1$  και  $\omega_2$  και αύξησή της εκτός του διαστήματος των δύο αυτών συχνοτήτων. Με τον τρόπο αυτό, το προσομοίωμα αποκρίνεται με μεγαλύτερο ρεαλισμό στη δεσπόζουσα περίοδο της κίνησης, χωρίς να υπόκειται δηλαδή σε υψηλά επίπεδα απόσβεσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στο σύστημα φράγματος – πρανών κοιλάδας – υπεδάφους θεμελίωσης που δημιουργήθηκε, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε στατική και δυναμική ανάλυση. Η στατική ανάλυση περιελάμβανε τη σταδιακή κατασκευή του φράγματος σε 10 βήματα και την πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος με νερό. Σε καθένα από τα 10 πρώτα βήματα της ανάλυσης κατασκευάστηκε η κάθε μία από τις δέκα ισοϋψείς στρώσεις στις οποίες χωρίστηκε αρχικά το φράγμα και ασκήθηκε το ίδιο βάρος της. Στο επόμενο βήμα της ανάλυσης εφαρμόστηκε η πίεση του νερού στην ανάντη πλευρά του φράγματος ως στατικό φορτίο. Η δυναμική ανάλυση περιελάμβανε τη δυναμική καταπόνηση του συστήματος μέσω της εφαρμογής σεισμικής επιτάχυνσης. Ο σεισμός εφαρμόστηκε στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση (κατά μήκος της κοιλάδας) και είχε συνολική διάρκεια 10 δευτερόλεπτα.

Το φράγμα του μοντέλου ήταν λιθόρριπτο, με κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα και με γεωμετρία που βασίστηκε σε αυτήν του φράγματος Σμοκόβου του Νομού Καρδίτσας. Οι ιδιότητες των υλικών του συστήματος προήλθαν από σχετική εδαφοστατική μελέτη του φράγματος του Δήμου Σούρπης του Νομού Μαγνησίας. Σε σχέση με τα παραπάνω τονίζεται ότι αν και το σύστημα ήταν θεωρητικό σαν σύνολο, τόσο η γεωμετρία του φράγματος όσο και οι ιδιότητες όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν σε πραγματικές τιμές.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με διαφορετικά δεδομένα δυναμικής φόρτισης στην κάθε μία, ώστε να δοθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της δυναμικής απόκρισης του συστήματος. Χρησιμοποιήθηκαν τα επιταχυνσιογραφήματα δύο σεισμών.

Ο πρώτος σεισμός επιλέχθηκε με βάση την περιοχή από την οποία προήλθαν οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν:

- Σεισμός Αλμυρού Μαγνησίας, 11/08/1980, επίκεντρο 15.67km, μέγεθος  $M=5.3$ ,  $pga$  (μέγιστη επιτάχυνση εδάφους) οριζόντιας διεύθυνσης  $=0.068g$ ,  $pga$  κατακόρυφης διεύθυνσης  $=0.069g$ , [42].

Ο δεύτερος σεισμός επιλέχθηκε από τον ευρύτερο ελλαδικό χώρο με βάση την τιμή εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού που ορίζεται στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας [49] για την περιοχή της Θεσσαλίας ( $a=0.24g$ ), απ' όπου προήλθαν τόσο η γεωμετρία όσο και οι ιδιότητες των υλικών του υπό μελέτη συστήματος:

- Σεισμός Κεφαλονιάς, 02/03/2014, επίκεντρο 14.88km, μέγεθος  $M=6.1$ ,  $pga$  οριζόντιας διεύθυνσης  $=0.26g$ ,  $pga$  κατακόρυφης διεύθυνσης  $=0.17g$ , [43].

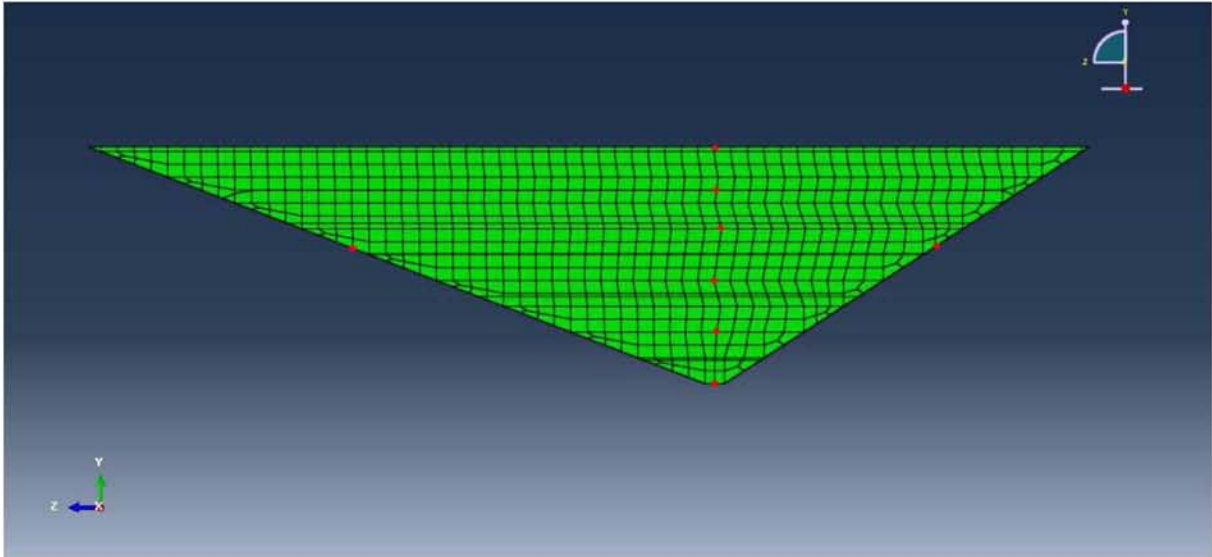
Από τις αναλύσεις ζητήθηκαν ως μεγέθη ενδιαφέροντος οι τάσεις Von Mises, οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις του συστήματος, καθώς και οι οριζόντιες επιταχύνσεις που αναπτύχθηκαν στο φράγμα.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.



Να σημειωθεί ότι όλες οι χρονοϊστορίες που ακολουθούν λήφθηκαν σε σημεία της κεντρικής διατομής του φράγματος, όπου ως «κεντρική» θεωρήθηκε η διατομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος, αν και η γεωμετρία του φράγματος δεν είναι συμμετρική και η στέψη του δεν βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της.

Παρακάτω φαίνονται με κόκκινο χρώμα τα σημεία του φράγματος από τα οποία λήφθηκαν οι χρονοϊστορίες.



Εικόνα 5.1. Απεικόνιση σημείων κεντρικής διατομής φράγματος (σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος) από τα οποία λήφθηκαν χρονοϊστορίες, σε υψόμετρα  $0m$ ,  $0.2H=21.8m$ ,  $0.4H=43.6m$ ,  $0.6H=65.4m$ ,  $0.8H=87.2m$ ,  $H=109m$  και  $0.5H=54.5m$  (για τα αντερείσματα) από τη βάση του φράγματος.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις και επιταχύνσεις αναφέρονται στον άξονα  $X$  του μοντέλου (στον κάθετο στη στέψη του φράγματος), ο οποίος είναι και ο κρισιμότερος από τους δύο οριζόντιους άξονες, καθώς στον άλλο (άξονας  $Z$  του μοντέλου) υπάρχει αντίσταση έναντι μετακίνησης του σώματος του φράγματος λόγω της ύπαρξης των πρανών της κοιλάδας.

## 5.1 Τάσεις Von Mises

Στην ενότητα αυτή δίνονται οι μέγιστες (εφελκυστικές) τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται στο σύστημα στο τέλος κάθε σταδίου φόρτισης.

Οι τάσεις Von Mises χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την αστοχία των υλικών κάτω από οποιαδήποτε εντατική κατάσταση. Περιγράφουν την αστοχία υλικών που χαρακτηρίζονται από ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Συνεπώς, οι τάσεις Von Mises δείχνουν πότε ένα ισότροπο υλικό (δηλαδή δεν μεταβάλλονται οι ιδιότητές του υλικού προς τις διάφορες διευθύνσεις) αρχίζει και παραμορφώνεται πλαστικά. Η μαθηματική έκφραση του κριτηρίου σε όρους κύριων τάσεων  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  είναι:

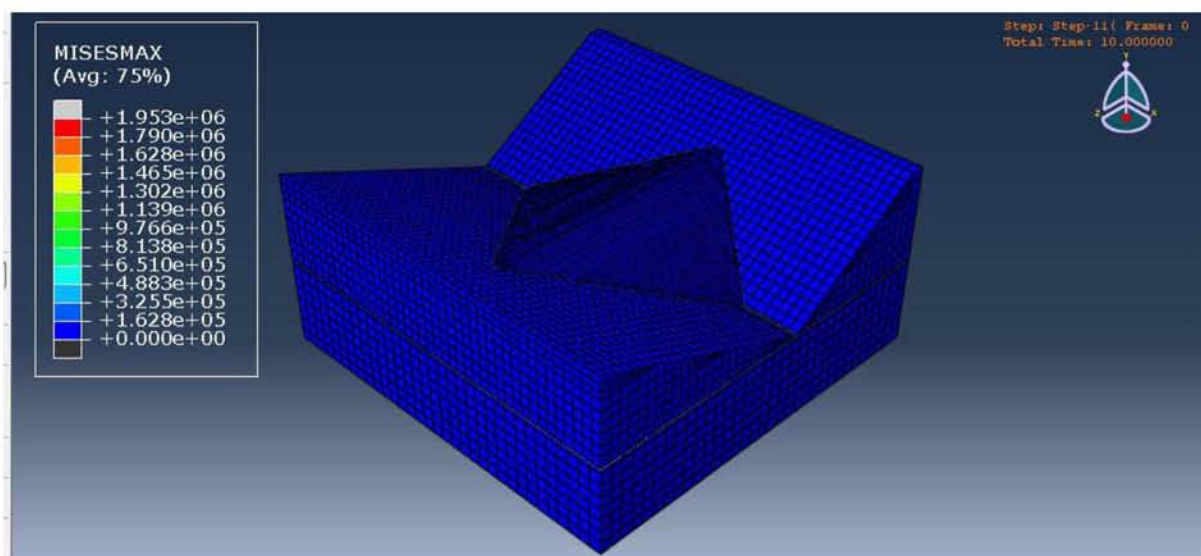
$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 = 2\sigma_y^2$$

και αντίστοιχα σε όρους ορθών και διατμητικών τάσεων εκφρασμένων στο καθολικό σύστημα αξόνων XYZ είναι:

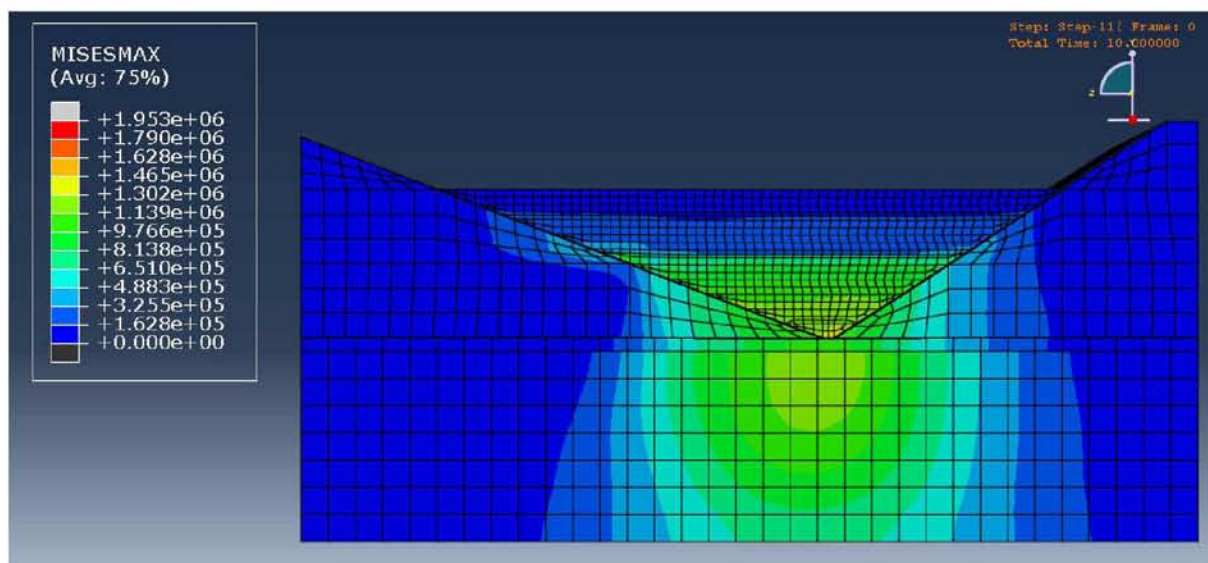
$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_y^2$$

όπου  $\sigma_y$  η τάση διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Στις εικόνες 5.1.1. και 5.1.2. φαίνονται οι μέγιστες τάσεις Von Mises στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος, αρχικά στις τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) αντίστοιχα.



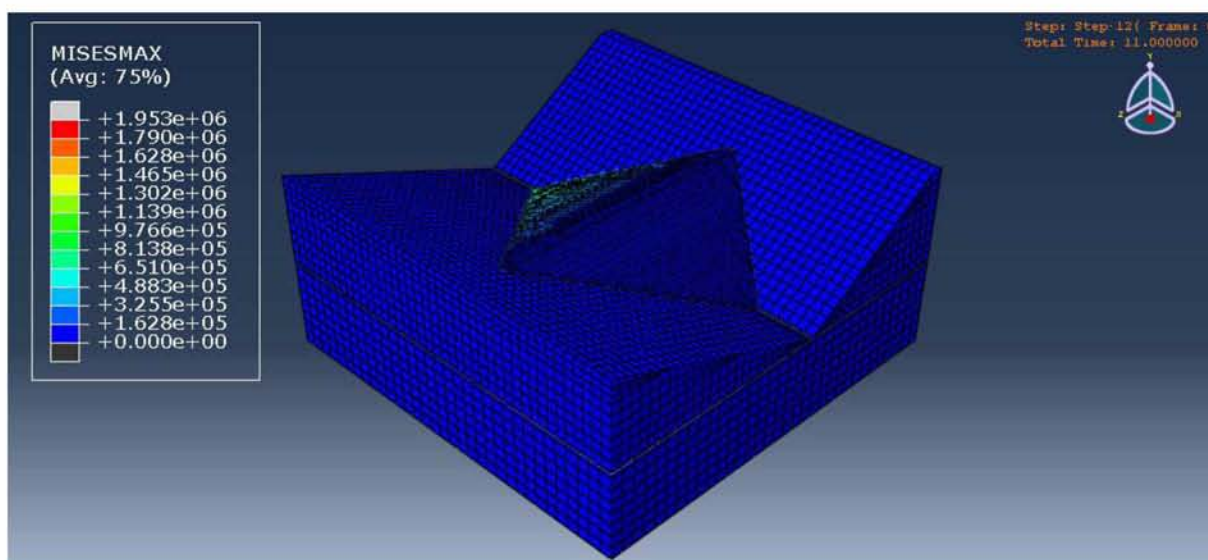
Εικόνα 5.1.1. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).



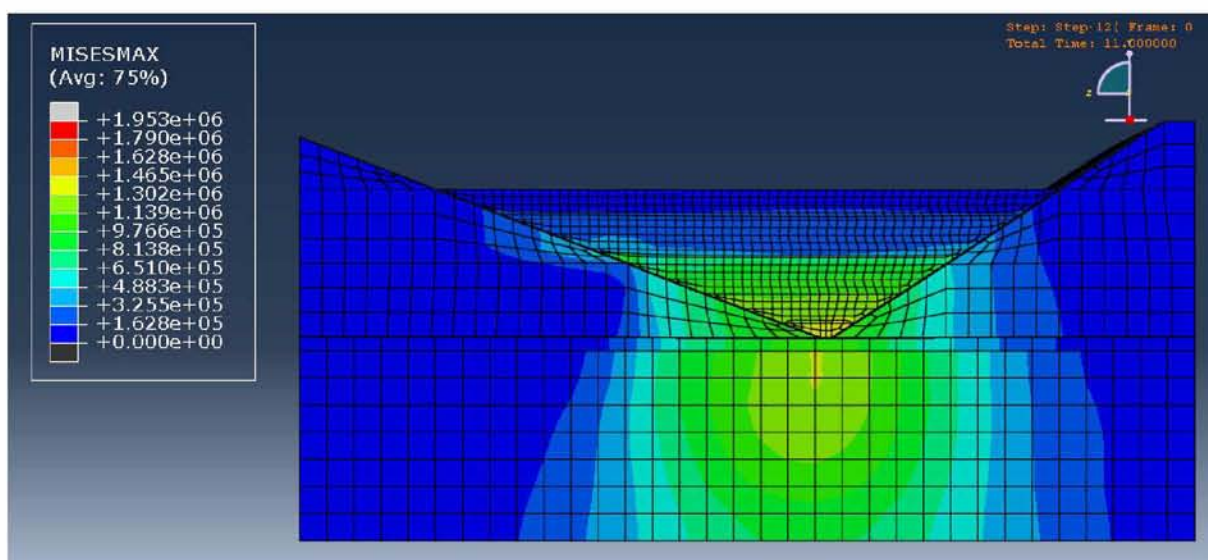
Εικόνα 5.1.2. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

Στις εικόνες 5.1.3. και 5.1.4. φαίνονται οι μέγιστες τάσεις Von Mises αμέσως μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος με νερό, αρχικά στις τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) αντίστοιχα.



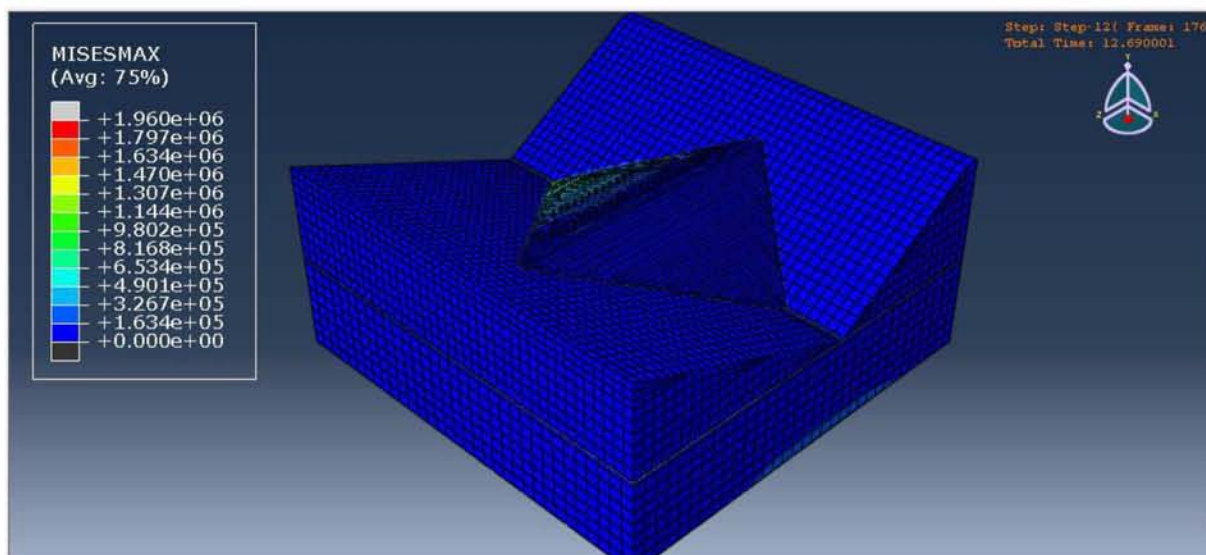


Εικόνα 5.1.3. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμειευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

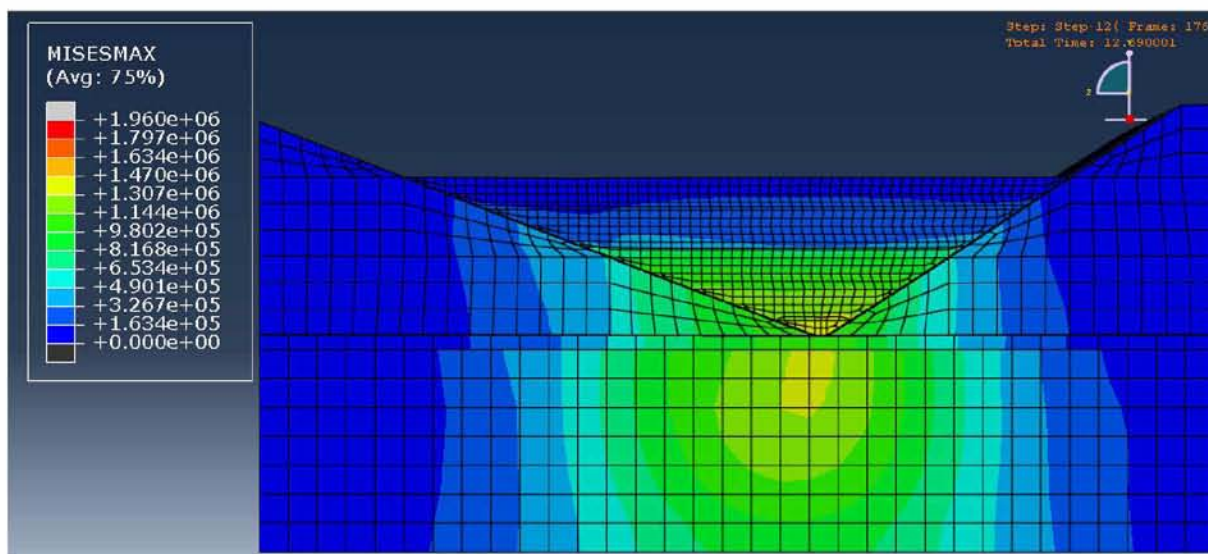


Εικόνα 5.1.4. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμειευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

Στις εικόνες 5.1.5. και 5.1.6. φαίνεται η κατανομή των τάσεων Von Mises στο σύστημα τη χρονική στιγμή που παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους κατά το στάδιο του σεισμού (Αλμυρού), αρχικά στις τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) αντίστοιχα.



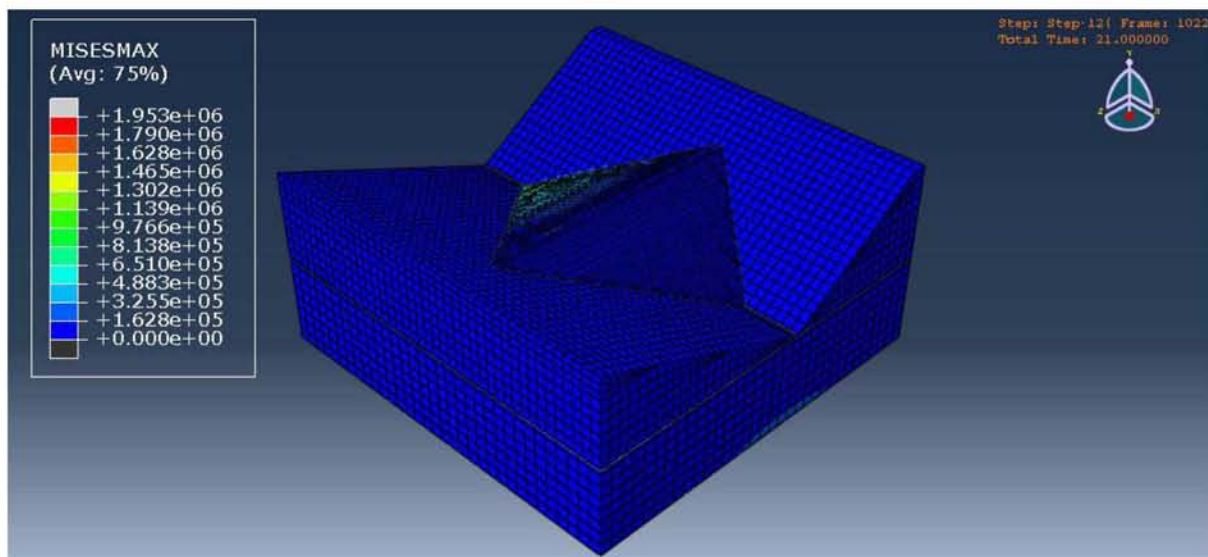
Εικόνα 5.1.5. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού του Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 12.69 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 1.69 sec).



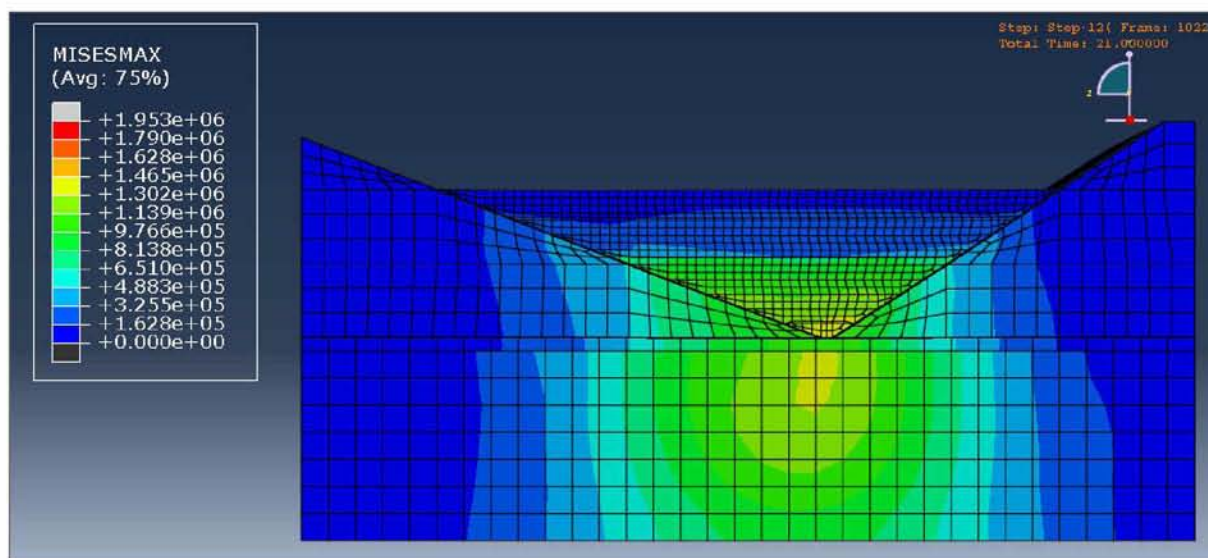
Εικόνα 5.1.6. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού του Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 12.69 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 1.69 sec).

Στις εικόνες 5.1.7. και 5.1.8. φαίνονται οι μέγιστες τάσεις Von Mises στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού (Αλμυρού), αρχικά στις τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) αντίστοιχα.



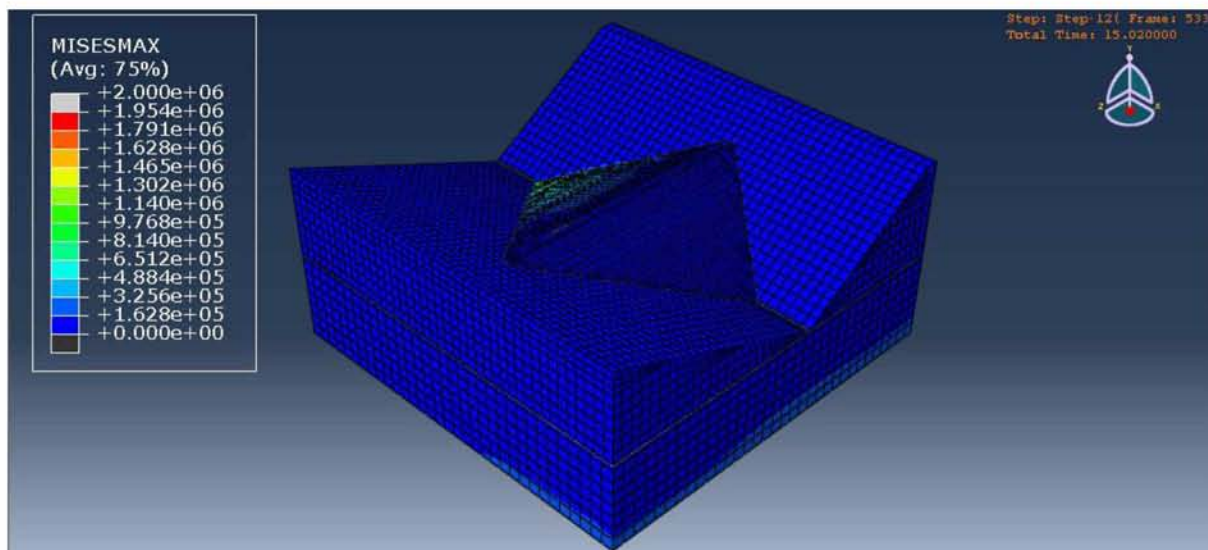


Εικόνα 5.1.7. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

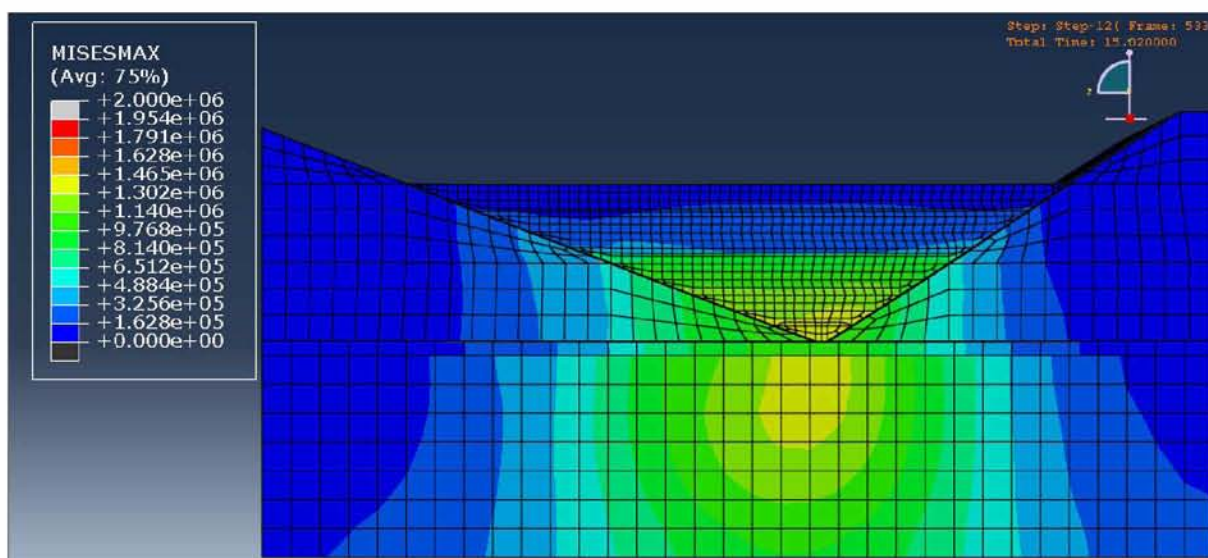


Εικόνα 5.1.8. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

Στις εικόνες 5.1.9. και 5.1.10. φαίνεται η κατανομή των τάσεων Von Mises στο σύστημα τη χρονική στιγμή που παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους κατά το στάδιο του σεισμού (Κεφαλονιάς), αρχικά στις τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) αντίστοιχα.



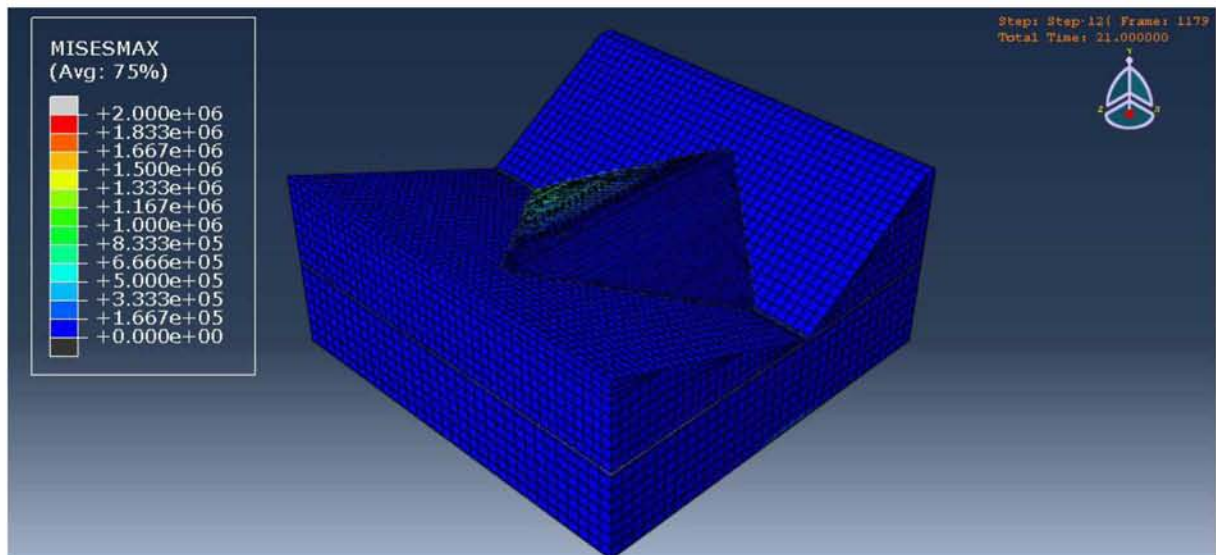
Εικόνα 5.1.9. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού της Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 15.02 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 4.02 sec).



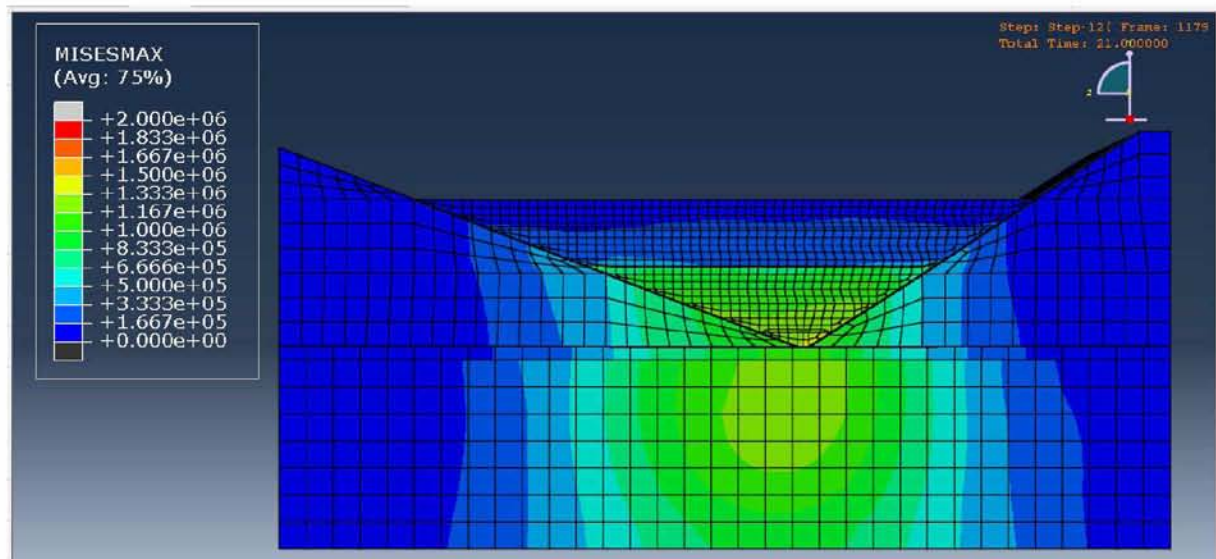
Εικόνα 5.1.10. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης τη χρονική στιγμή που αυτές μεγιστοποιούνται κατά το στάδιο εφαρμογής του σεισμού της Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 15.02 sec – χρονική στιγμή από την έναρξη της σεισμικής διέγερσης 4.02 sec).

Στις εικόνες 5.1.11. και 5.1.12. φαίνονται οι μέγιστες τάσεις Von Mises στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού (Κεφαλονιάς), αρχικά στις τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) αντίστοιχα.





Εικόνα 5.1.11. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα στις τρεις διαστάσεις στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).



Εικόνα 5.1.12. Κατανομή τάσεων Von Mises  $S$  (Pa) στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

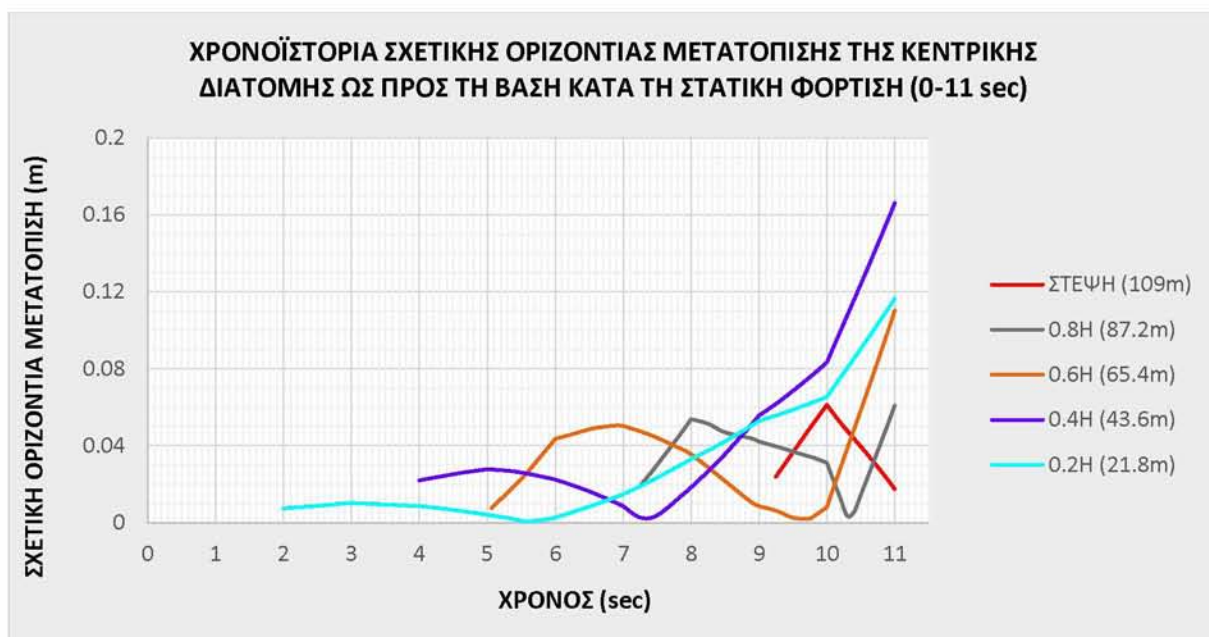
- ⇒ Οι μέγιστες τάσεις που εμφανίζονται στο σύστημα σε όλα τα στάδια φόρτισης είναι της τάξεως των 1.45-1.65 MPa, με τις μεγαλύτερες τιμές να αναφέρονται στο στάδιο πλήρωσης του ταμιευτήρα και στο στάδιο του σεισμού, τα οποία παρουσιάζουν μεν μεταξύ τους διαφορές στην κατανομή των τάσεων όχι όμως πολύ μεγάλες. Σε αυτό βέβαια συντελεί και το γεγονός θεώρησης της πίεσης του νερού ως στατικό φορτίο, αγνοώντας τα υδροδυναμικά φαινόμενα που παρατηρούνται σε ρεαλιστικές συνθήκες κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.
- ⇒ Η μέγιστη τάση μετά το πέρας της κατασκευής του φράγματος εμφανίζεται, όπως αναμένεται, στη βάση του, καθώς αυτή δέχεται το ίδιο βάρος ολόκληρης της κατασκευής.
- ⇒ Κατά το στάδιο πλήρωσης του ταμιευτήρα παρατηρείται εμφάνιση τάσεων στο ανάντη τμήμα του φράγματος λόγω της υδροστατικής πίεσης που ασκείται σε αυτό. Με την

ολοκλήρωση της πλήρωσης, το εύρος της περιοχής όπου οι τάσεις παρουσιάζουν μέγιστες τιμές αυξάνεται σημαντικά και περιλαμβάνει πλέον, εκτός από τη βάση του φράγματος, ένα τμήμα της υπερκείμενης σε αυτήν στρώση, αλλά και σημαντικό τμήμα του υπεδάφους θεμελίωσης που εκτείνεται σε βάθος 25m.

- ⇒ Κατά το στάδιο δυναμικής φόρτισης οι μέγιστες τάσεις επεκτείνονται σε μεγαλύτερο τμήμα του συστήματος. Η δυσμενέστερη κατανομή τάσεων προκύπτει για τον σεισμό του Αλμυρού σε χρόνο 1.69 δευτερολέπτου μετά την εφαρμογή του, ενώ γι' αυτόν της Κεφαλονιάς σε χρόνο 4.02 δευτερολέπτων μετά την εκκίνησή της διέγερσης. Όπως είναι αναμενόμενο δηλαδή, οι μέγιστες κατανομές τάσεων παρατηρούνται περίπου στις χρονικές στιγμές εμφάνισης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης του κάθε σεισμού. Για τον πρώτο σεισμό στο τμήμα εμφάνισης μέγιστων τιμών τάσης εντάσσονται τα χαμηλότερα στρώματα του φράγματος μέχρι ύψος περίπου 15m από τη βάση του αλλά και το υπέδαφος θεμελίωσης μέχρι βάθος περίπου 45m. Για τον σεισμό της Κεφαλονιάς αντίστοιχα η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι τα 25m ύψος και τα 65m βάθος από τη βάση του φράγματος.
- ⇒ Όταν ολοκληρώνεται η σεισμική καταπόνηση του συστήματος, οι τάσεις έχουν κάπως περιοριστεί. Οι τάσεις δηλαδή αυξομειώνονται κατά τη διάρκεια του σεισμού και δεν λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους αποκλειστικά στο τέλος του.

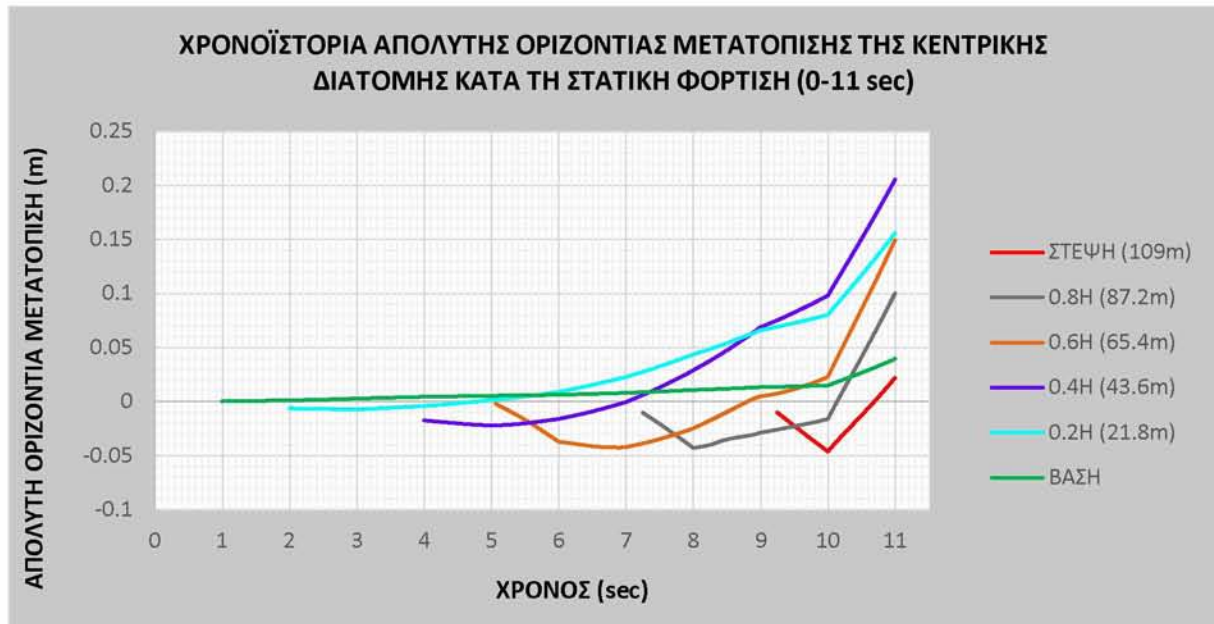
## 5.2 Στάδιο Στατικής Φόρτισης

Στη συνέχεια δίνονται οι χρονοϊστορίες τόσο των σχετικών όσο και των απόλυτων οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων στο στάδιο στατικής φόρτισης του φράγματος. Τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα (χρόνος 0-10 sec) αντιστοιχούν στην κατασκευή των στρώσεων του φράγματος, όπου στο τέλος κάθε δευτερολέπτου δημιουργείται μία από τις δέκα στρώσεις του (δηλαδή  $0.1H / \text{sec}$  όπου  $H=109\text{m}$  το ύψος του φράγματος). Το 11<sup>ο</sup> δευτερόλεπτο (χρόνος 10-11 sec) αναφέρεται στην πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος με νερό.



Διάγραμμα 5.2.1. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο στατικής φόρτισης.





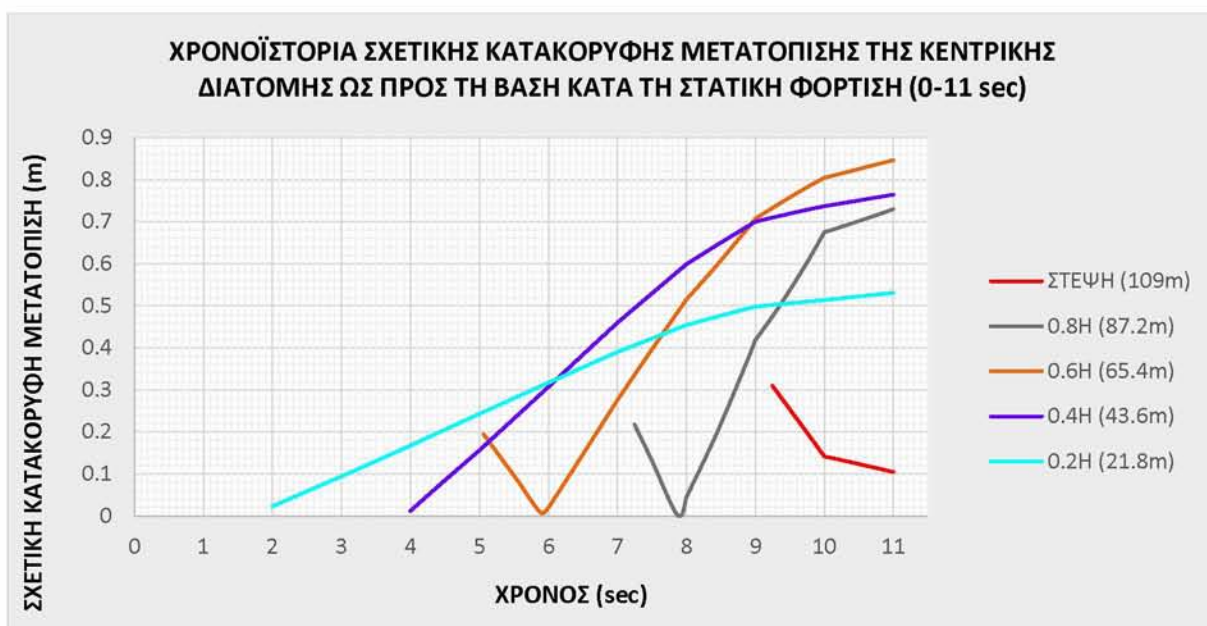
Διάγραμμα 5.2.2. Χρονοϊστορία απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

Στον πίνακα 5.2.1. δίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές των σχετικών και απόλυτων οριζόντιων μετακινήσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο κατασκευής του και πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό.

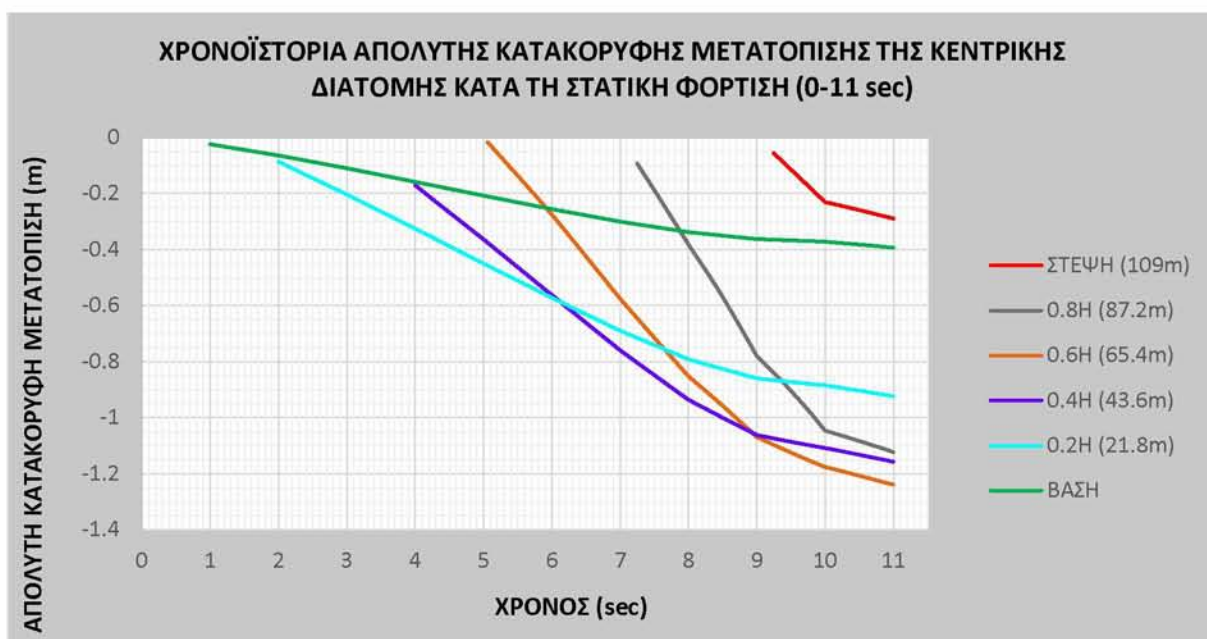
Πίνακας 5.2.1. Μέγιστες τιμές σχετικής και απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (0-11 sec)		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΥΨΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΥΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)
ΣΤΕΨΗ	0.061129	-0.046321
0.8H	0.060821	0.100173
0.6H	0.110015	0.149368
0.4H	0.165870	0.205222
0.2H	0.116344	0.155697
ΒΑΣΗ	-	0.039353

Το θετικό πρόσημο στις τιμές των απόλυτων οριζόντιων μετατοπίσεων δηλώνει φορά μετακίνησης από τα ανάντη προς τα κατόντη του φράγματος, ενώ το αρνητικό από τα κατόντη προς τα ανάντη αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.2.3. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο στατικής φόρτισης.



Διάγραμμα 5.2.4. Χρονοϊστορία απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

Στον πίνακα 5.2.2. δίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές των σχετικών και απόλυτων κατακόρυφων μετακινήσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο κατασκευής του και πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό.

Πίνακας 5.2.2. Μέγιστες τιμές σχετικής και απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο στατικής φόρτισης.

<b>ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (0-11 sec)</b>		
<b>ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ</b>		
<b>ΥΨΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΥΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)</b>
<b>ΣΤΕΨΗ</b>	<b>0.308985</b>	<b>-0.289795</b>
<b>0.8H</b>	<b>0.729666</b>	<b>-1.123671</b>
<b>0.6H</b>	<b>0.845838</b>	<b>-1.239843</b>
<b>0.4H</b>	<b>0.763982</b>	<b>-1.157987</b>
<b>0.2H</b>	<b>0.530462</b>	<b>-0.924467</b>
<b>ΒΑΣΗ</b>	<b>-</b>	<b>-0.394005</b>

- ⇒ Σχετικά με την οριζόντια μετατόπιση, παρατηρείται ότι οι κατώτερες στρώσεις του φράγματος και συγκεκριμένα αυτές που βρίσκονται μεταξύ του μέσου ύψους του και της βάσης του (0.4H και 0.2H) παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές τόσο σχετικής ως προς τη βάση όσο και απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης. Αυτό ισχύει στο στάδιο κατασκευής του φράγματος (0-10 sec), αφού οι κατώτερες στρώσεις δέχονται μεγαλύτερα φορτία ιδίου βάρους και για περισσότερη χρονική διάρκεια σε σχέση με τις ανώτερες στρώσεις, αλλά και στο στάδιο πλήρωσης του ταμιευτήρα (10-11sec), καθώς το νερό ασκεί πίεση αυξανόμενη αναλογικά με το βάθος. Παρ' όλα αυτά, η βάση του φράγματος παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές οριζόντιας μετατόπισης, γεγονός που συνδέεται με τη θεώρηση μονολιθικής μετακίνησής της με το υπέδαφος θεμελίωσης.
- ⇒ Μικρές σχετικά τιμές παρατηρούνται και στις τιμές της κατακόρυφης μετακίνησης της βάσης, όπου το πρακτικά ασυμπίεστο υπέδαφος (από τα 10m βάθος και κάτω) αποτρέπει τις μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις της. Αντιθέτως, οι ενδιαμέσες ανώτερες στρώσεις του φράγματος (0.8H, 0.6H, 0.4H) παρουσιάζουν σημαντικές σχετικές αλλά και απόλυτες τιμές καθίζησης.

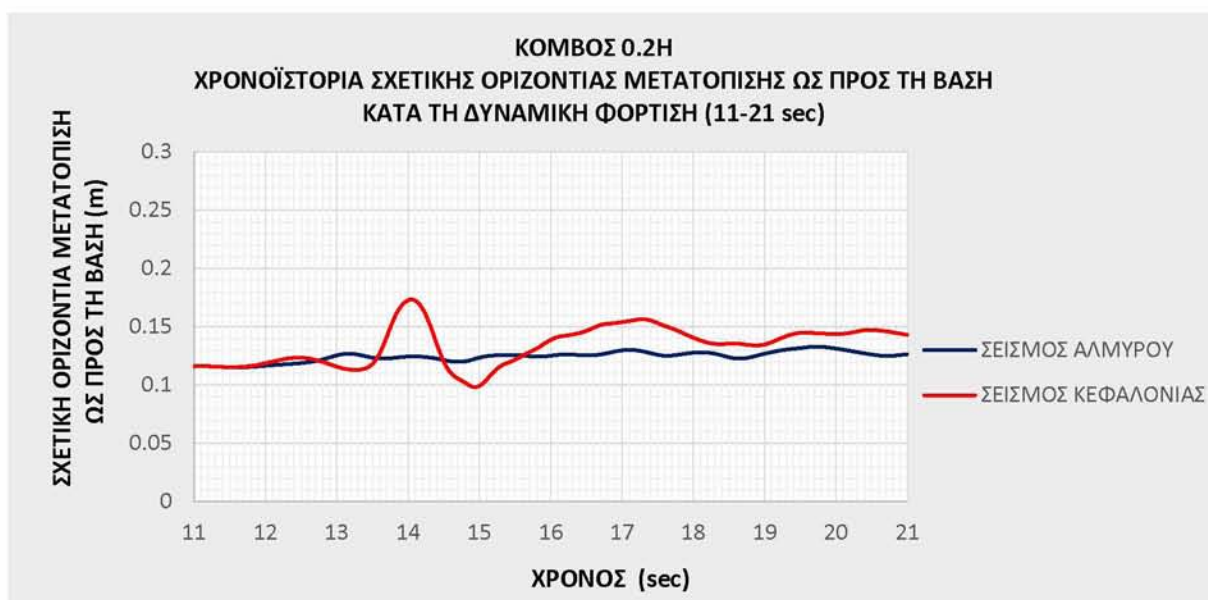
### **5.3 Στάδιο Δυναμικής Φόρτισης**

Στις επόμενες ενότητες δίνονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων, καθώς και των οριζόντιων επιταχύνσεων στο στάδιο εφαρμογής σεισμού στο υπό μελέτη σύστημα.

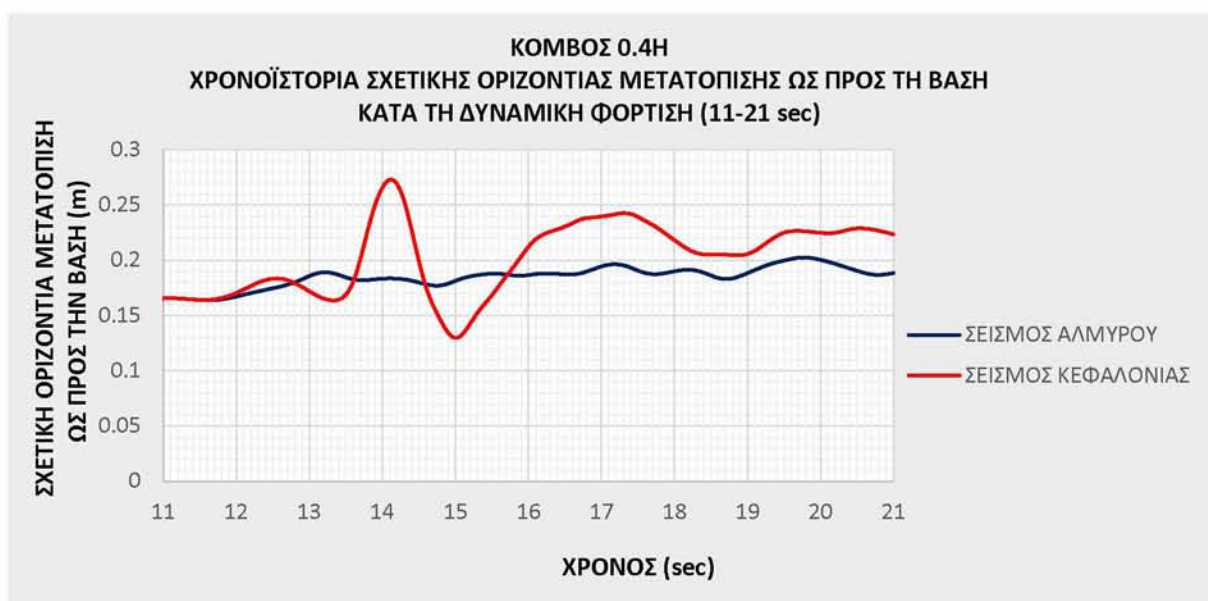
#### **5.3.1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ**

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με τις χρονοϊστορίες των σχετικών (και κάποιων απόλυτων) οριζόντιων μετατοπίσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος.





Διάγραμμα 5.3.1.1. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.2H (21.8m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

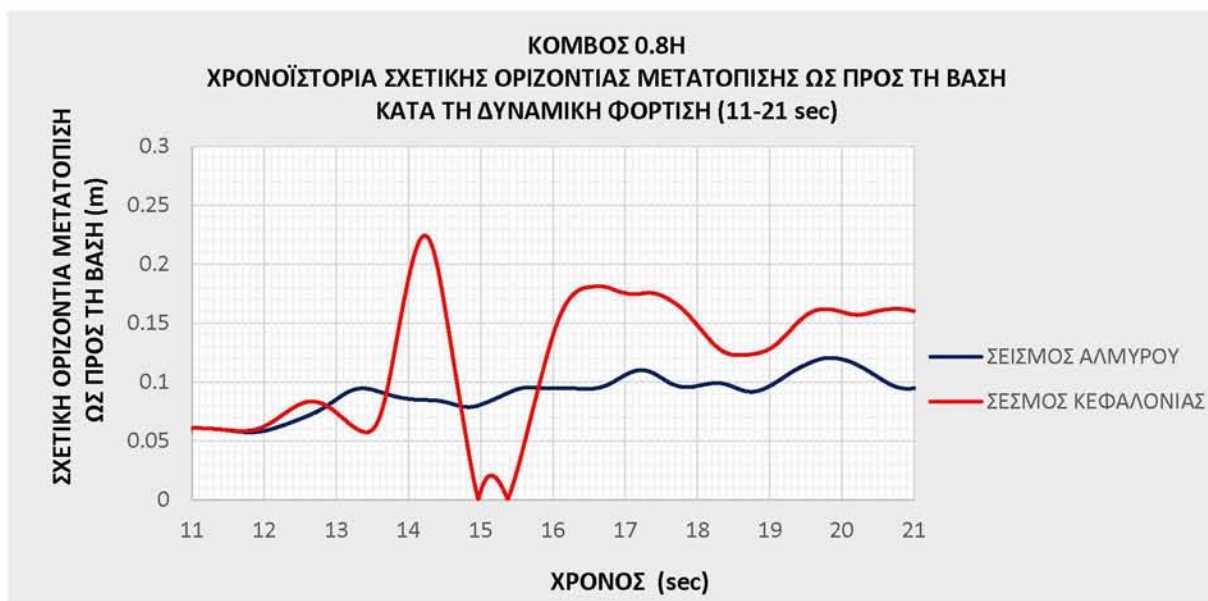


Διάγραμμα 5.3.1.2. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.4H (43.6m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.





Διάγραμμα 5.3.1.3. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.6H (65.4m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.1.4. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.8H (87.2m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

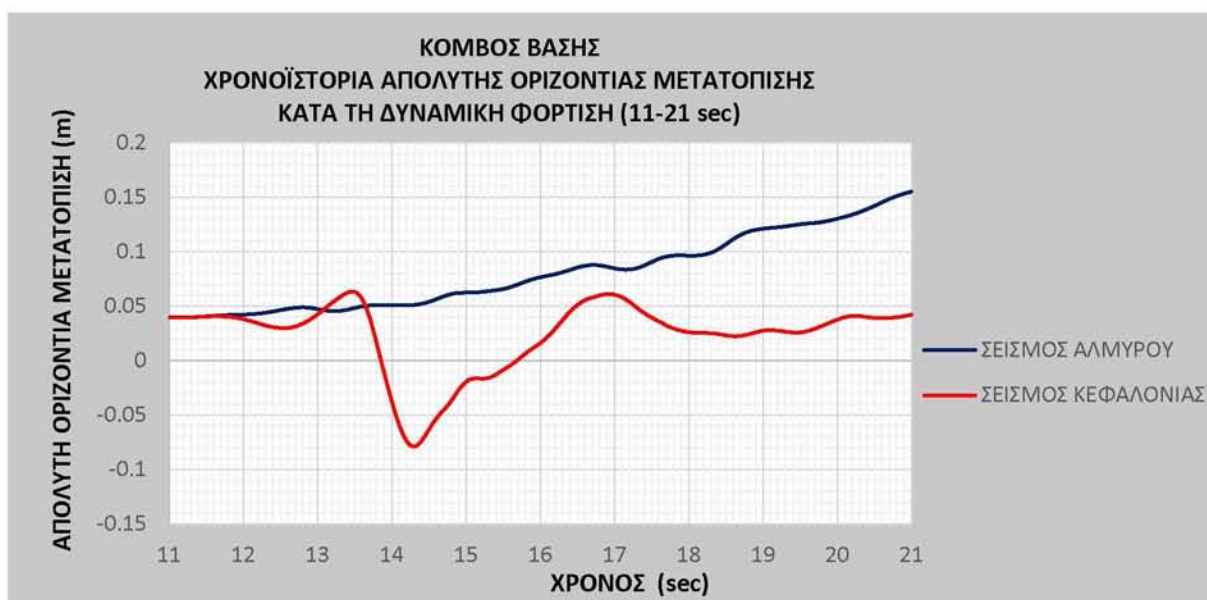


Διάγραμμα 5.3.1.5. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος στο κέντρο της στέψης του κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

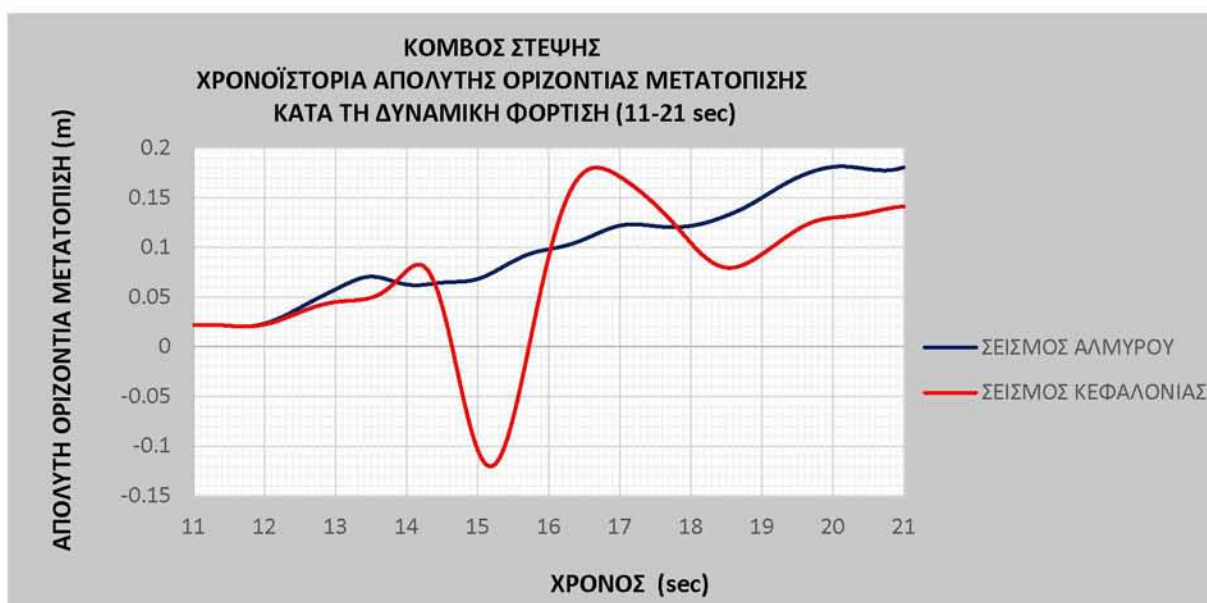
Στον πίνακα 5.3.1.1. δίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων ως προς τη βάση του φράγματος της κεντρικής διατομής του στο στάδιο εφαρμογής σεισμικής καταπόνησης στο σύστημα.

Πίνακας 5.3.1.1. Μέγιστες τιμές σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)		
ΥΨΟΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΣΤΕΨΗ	0.051267	0.158370
0.8H	0.120362	0.224028
0.6H	0.160403	0.252005
0.4H	0.202478	0.272952
0.2H	0.132958	0.173309



Διάγραμμα 5.3.1.6. Χρονοϊστορία απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο κέντρο της βάσης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



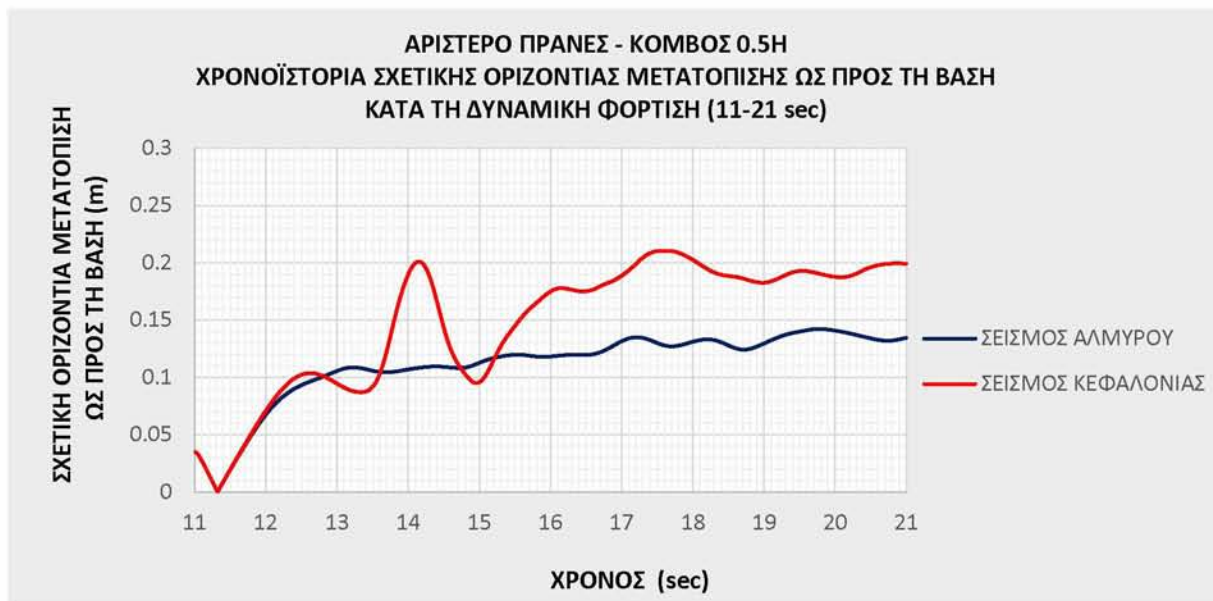
Διάγραμμα 5.3.1.7. Χρονοϊστορία απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο κέντρο της στέψης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

Στον πίνακα 5.3.1.2. δίνονται οι μέγιστες τιμές των απόλυτων οριζόντιων μετακινήσεων στη βάση και τη στέψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο εφαρμογής σεισμικής καταπόνησης στο σύστημα.



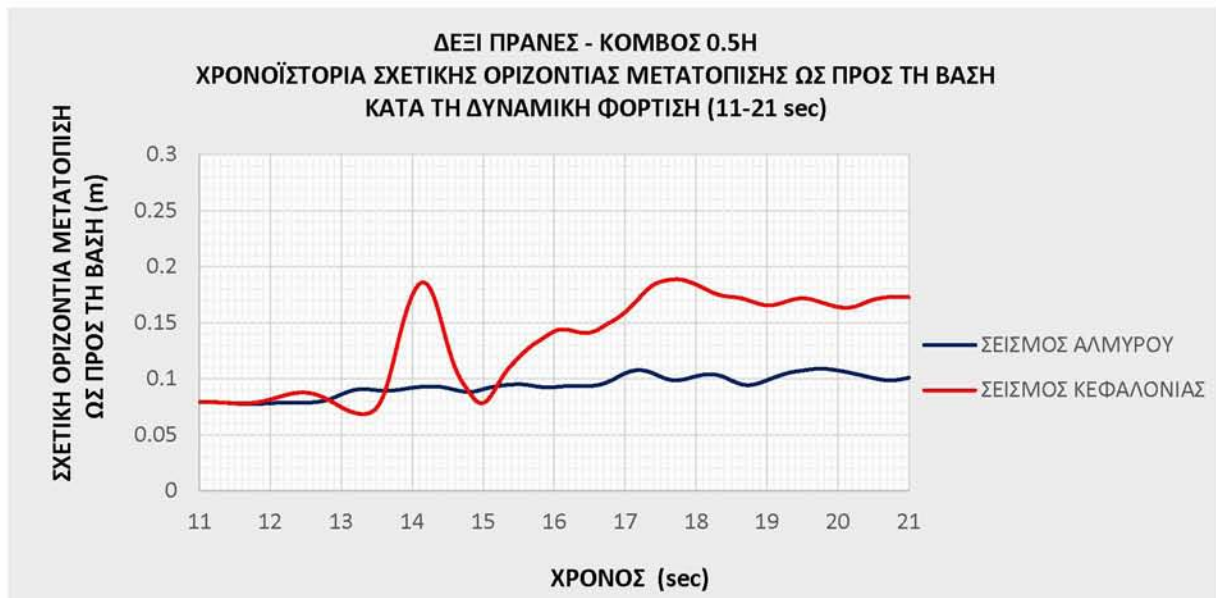
Πίνακας 5.3.1.2. Μέγιστες τιμές απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στη βάση και τη στέψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΥΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)		
ΥΨΟΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΣΤΕΨΗ	0.181487	0.180244
ΒΑΣΗ	0.155195	-0.079121



Διάγραμμα 5.3.1.8. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του αριστερού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.





Διάγραμμα 5.3.1.9. Χρονοϊστορία σχετικής οριζόντιας μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος

Στον πίνακα 5.3.1.3. δίνονται οι μέγιστες τιμές των σχετικών ως προς τη βάση του φράγματος και των απόλυτων οριζόντιων μετακινήσεων στο μέσο του ύψους ( $0.5H = 54.5m$ ) του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο εφαρμογής σεισμικής καταπόνησης στο σύστημα.

Πίνακας 5.3.1.3. Μέγιστες τιμές σχετικής ως προς τη βάση του φράγματος και απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο του ύψους του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

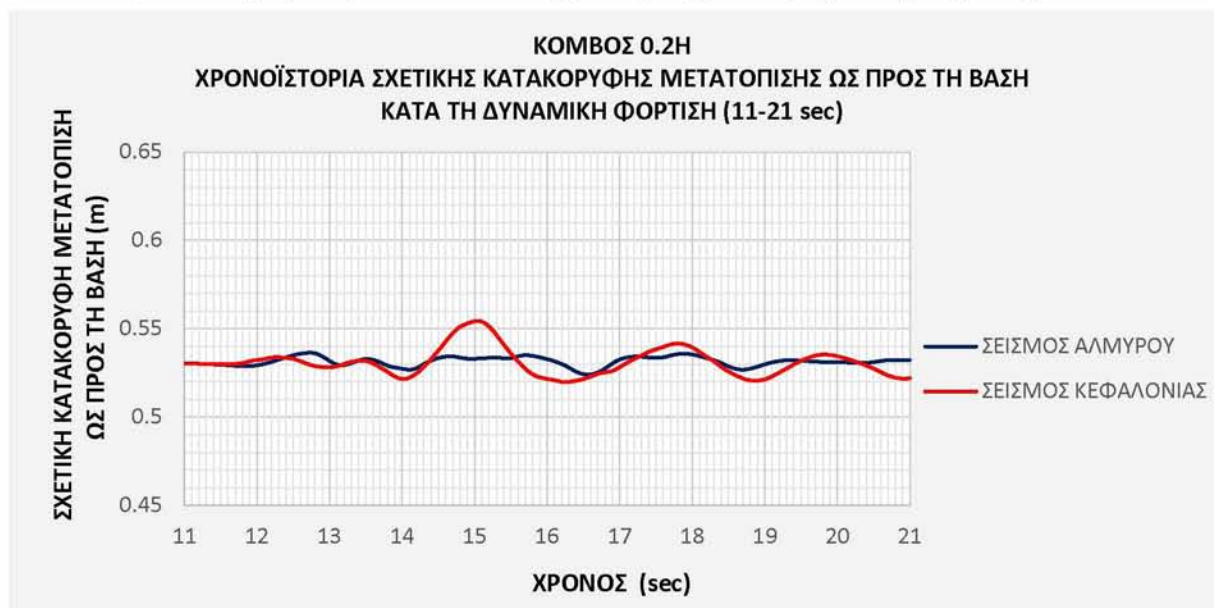
ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)				
ΑΝΤΕΡΕΙΣΜΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ				
ΥΨΟΣ 0.5H	ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)		ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΥΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)	
	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΠΡΑΝΕΣ	0.142206	0.210438	0.289667	0.253068
ΔΕΞΙ ΠΡΑΝΕΣ	0.108831	0.188514	0.255871	0.227124

⇒ Συγκρίνοντας τις χρονοϊστορίες των σχετικών οριζόντιων μετατοπίσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του για τους δύο σεισμούς που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο, οι υψηλότερες στιγμιαίες τιμές μετατόπισης αλλά και οι δυσμενέστερες χρονοϊστορίες εμφανίζονται στις μεσαίες στρώσεις του φράγματος (0.4H και 0.6H) και για τους δύο σεισμούς.

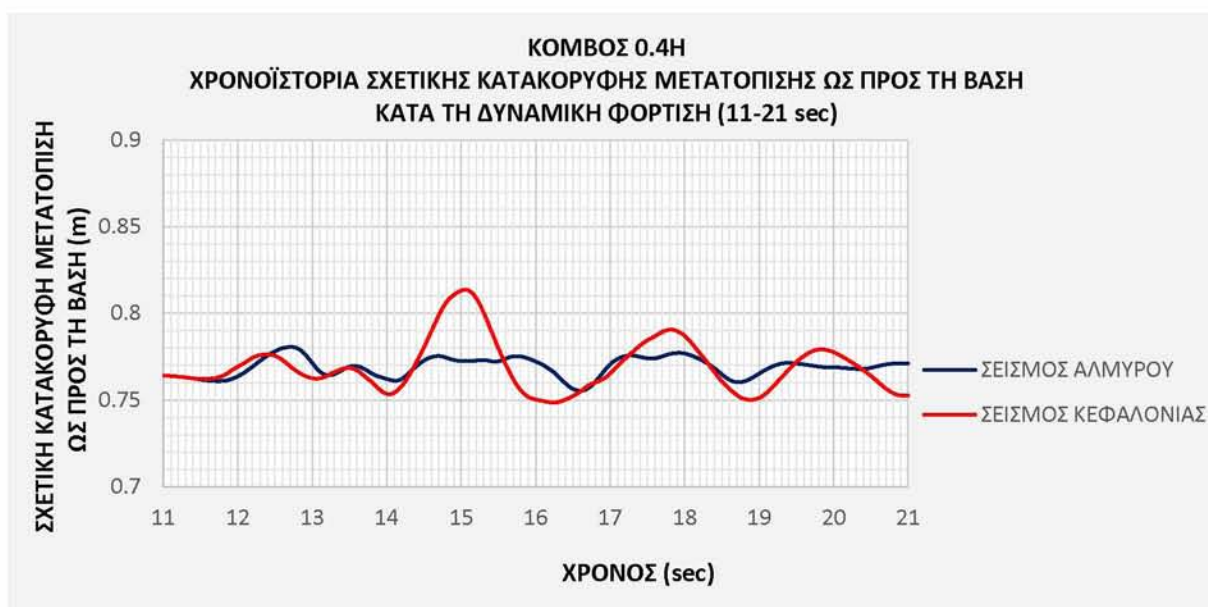
- ⇒ Η δυναμική φόρτιση του συστήματος σύμφωνα με το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Κεφαλονιάς δίνει αρκετά μεγαλύτερες μέγιστες τιμές σχετικής οριζόντιας μετατόπισης σε όλα τα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος, λόγω μεγαλύτερης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε σχέση με αυτή του σεισμού του Αλμυρού.
- ⇒ Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα δύο αντερείσματα του φράγματος με τον σεισμό της Κεφαλονιάς να δίνει σημαντικά υψηλότερες τιμές σχετικής οριζόντιας μετακίνησης.
- ⇒ Αν και παρατηρούνται παραπλήσιες μέγιστες τιμές απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στη στέψη του φράγματος μεταξύ των δύο σεισμών, οι αντίστοιχες τιμές της σχετικής μετατόπισης είναι πολύ μεγαλύτερες για τον σεισμό της Κεφαλονιάς.

### 5.3.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ

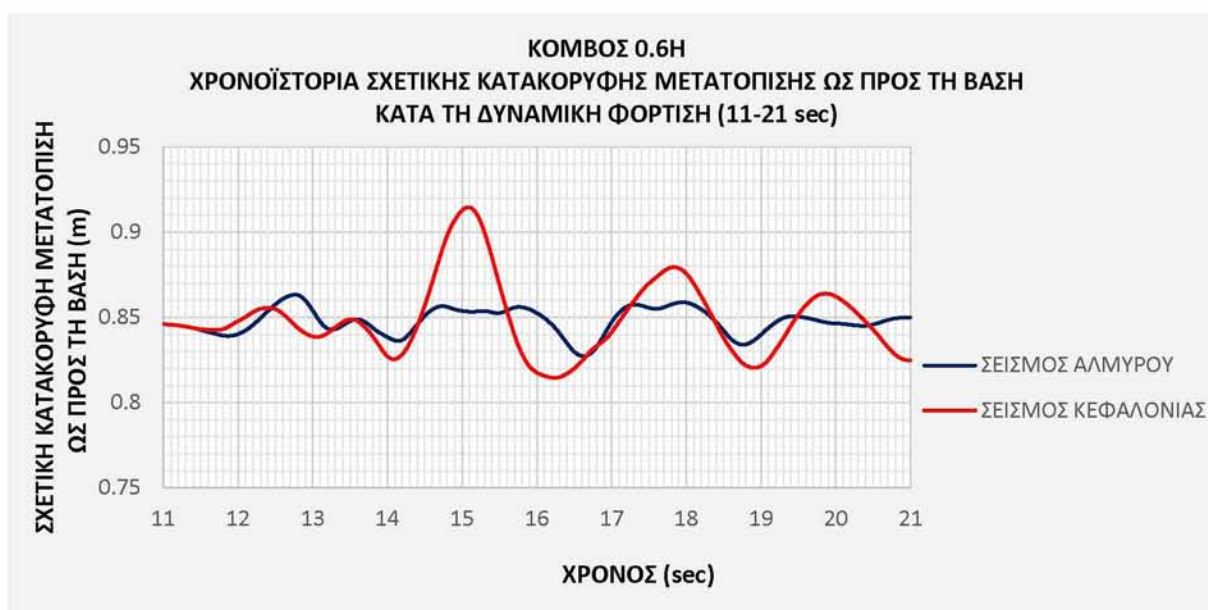
Στη συνέχεια δίνονται διαγράμματα με τις χρονοϊστορίες των σχετικών (και κάποιων απόλυτων) κατακόρυφων μετατοπίσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος.



Διάγραμμα 5.3.2.1. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.2H (21.8m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

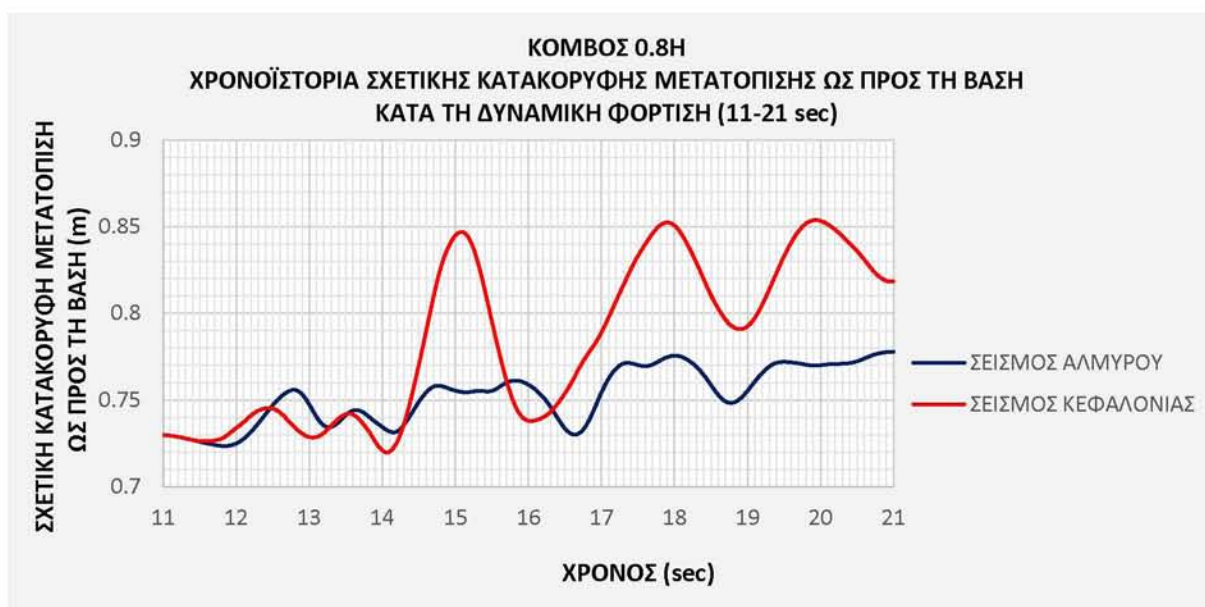


Διάγραμμα 5.3.2.2. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.4H (43.6m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.2.3. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.6H (65.4m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.





Διάγραμμα 5.3.2.4. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.8H (87.2m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



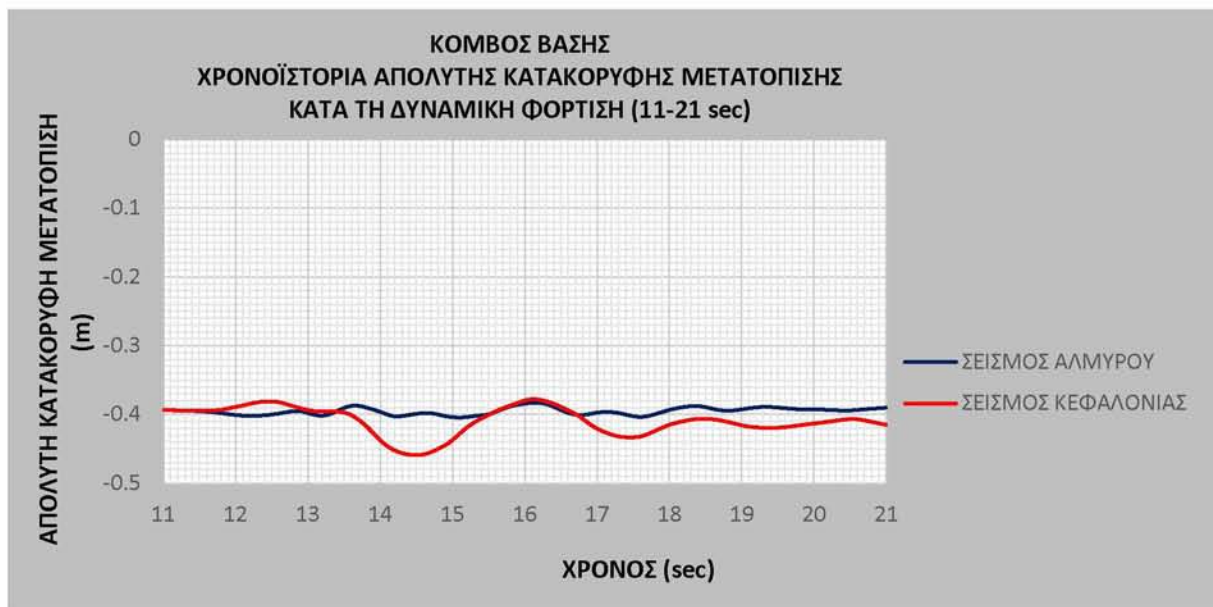
Διάγραμμα 5.3.2.5. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος στο κέντρο της στέψης του κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

Στον πίνακα 5.3.2.1. δίνονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές των σχετικών κατακόρυφων μετακινήσεων ως προς τη βάση του φράγματος της κεντρικής διατομής του στο στάδιο εφαρμογής σεισμικής καταπόνησης στο σύστημα.

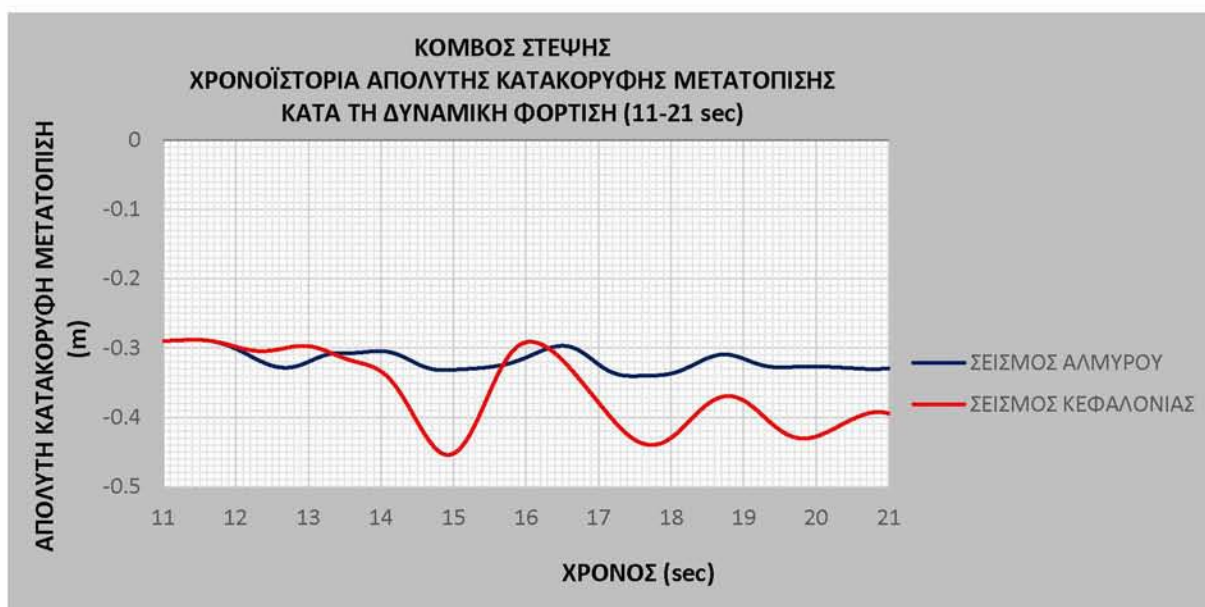


Πίνακας 5.3.2.1. Μέγιστες τιμές σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)		
ΥΨΟΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΣΤΕΨΗ	0.107010	0.106645
0.8H	0.777793	0.853772
0.6H	0.863189	0.914457
0.4H	0.780519	0.813574
0.2H	0.536320	0.554314



Διάγραμμα 5.3.2.6. Χρονοϊστορία απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στο κέντρο της βάσης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

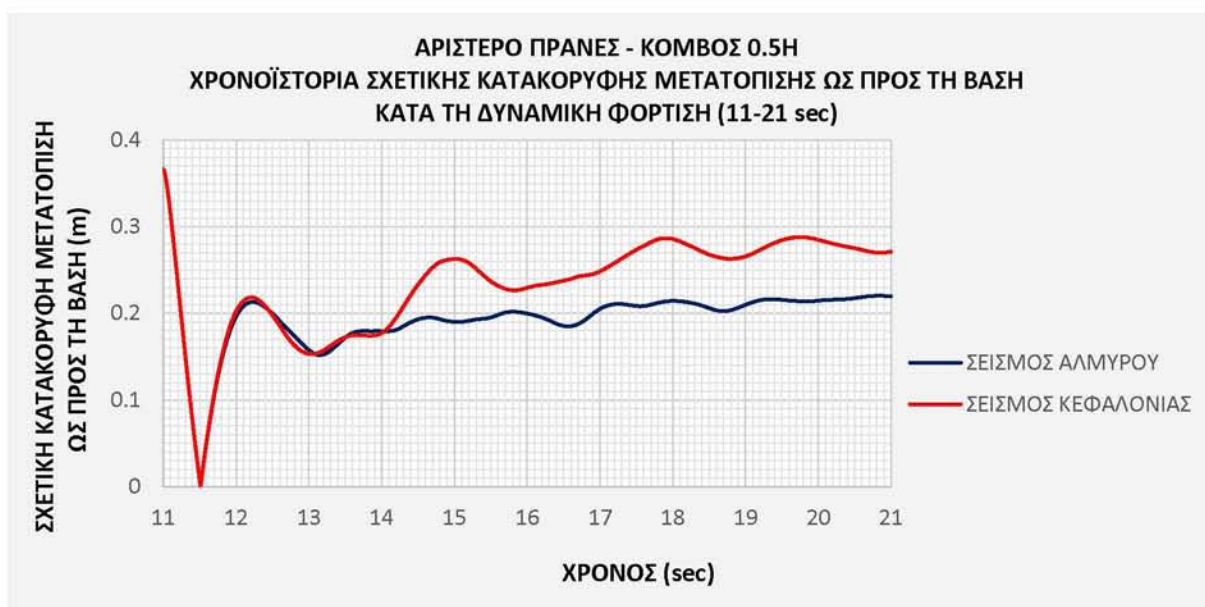


Διάγραμμα 5.3.2.7. Χρονοϊστορία απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στο κέντρο της στέψης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

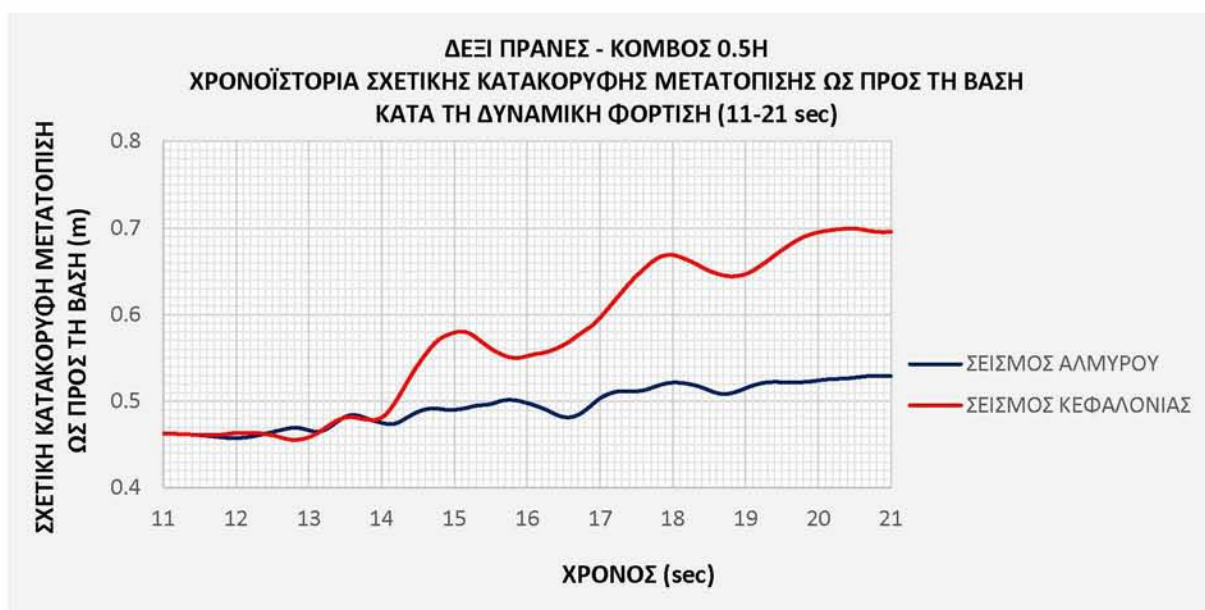
Στον πίνακα 5.3.2.2. δίνονται οι μέγιστες τιμές των απόλυτων κατακόρυφων μετακινήσεων στη βάση και τη στέψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο εφαρμογής σεισμικής καταπόνησης στο σύστημα.

Πίνακας 5.3.2.2. Μέγιστες τιμές απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στη βάση και τη στέψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΥΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)		
ΥΨΟΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΣΤΕΨΗ	-0.340573	-0.454414
ΒΑΣΗ	-0.404596	-0.459296



Διάγραμμα 5.3.2.8. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του αριστερού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.2.9. Χρονοϊστορία σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης ως προς τη βάση του φράγματος σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

Στον πίνακα 5.3.2.3. δίνονται οι μέγιστες τιμές των σχετικών ως προς τη βάση του φράγματος και των απόλυτων κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσο του ύψους ( $0.5H = 54.5m$ ) του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο εφαρμογής σεισμικής καταπόνησης στο σύστημα.



Πίνακας 5.3.2.3. Μέγιστες τιμές σχετικής ως προς τη βάση του φράγματος και απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του ύψους του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)				
ΑΝΤΕΡΕΙΣΜΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ				
ΥΨΟΣ 0.5H	ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)		ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΥΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (m)	
	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΠΡΑΝΕΣ	0.220121	0.287898	-0.615248	-0.710894
ΔΕΞΙ ΠΡΑΝΕΣ	0.529294	0.699214	-0.921872	-1.110961

Να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή των μέγιστων τιμών σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης του αριστερού αντερείσματος (Πίνακας 5.3.2.3.) αγνοήθηκε η αρχική τιμή μετατόπισης του αντίστοιχου διαγράμματος (Διάγραμμα 5.3.2.8. – χρονική στιγμή 11sec), καθώς η τιμή αυτή αναφέρεται στο τέλος της στατικής φόρτισης και όχι στο στάδιο εφαρμογής της δυναμικής φόρτισης που εξετάζεται στην παρούσα ενότητα.

- ⇒ Σύμφωνα με τις παραπάνω χρονοϊστορίες για τους δύο σεισμούς που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο, οι ενδιάμεσες στρώσεις του φράγματος παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης, όπως παρατηρήθηκε και με αυτές της σχετικής οριζόντιας μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές σχετικών κατακόρυφων μετατοπίσεων εμφανίζονται στο ύψος 0.6H ακολουθούμενες από τις αντίστοιχες στα ύψη 0.4H και 0.8H.
- ⇒ Η δυναμική φόρτιση του συστήματος σύμφωνα με το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Κεφαλονιάς δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες μέγιστες τιμές σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης σε όλα τα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος, αλλά και στα αντερείσματά του.
- ⇒ Στο κέντρο της στέψης αν και οι τιμές της απόλυτης κατακόρυφης μετακίνησης είναι αρκετά μεγαλύτερες για τον σεισμό της Κεφαλονιάς στο μεγαλύτερο μέρος της διάρκειάς του, οι τιμές της αντίστοιχης σχετικής καθίζησης είναι ίσες ή και αρκετά μικρότερες από αυτές του σεισμού του Αλμυρού. Αυτό συμβαίνει γιατί η βάση τυχαίνει να παρουσιάζει παρόμοια φορά και τιμές κατακόρυφης μετακίνησης με τη στέψη κατά τον σεισμό της Κεφαλονιάς.



### 5.3.3 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ

Ακολουθούν διαγράμματα με τις χρονοϊστορίες των οριζόντιων επιταχύνσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος.



Διάγραμμα 5.3.3.1. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.2H (21.8m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.3.2. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.4H (43.6m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.3.3. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.6H (65.4m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.3.4. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.8H (87.2m) της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



Διάγραμμα 5.3.3.5. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο κέντρο της στέψης του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



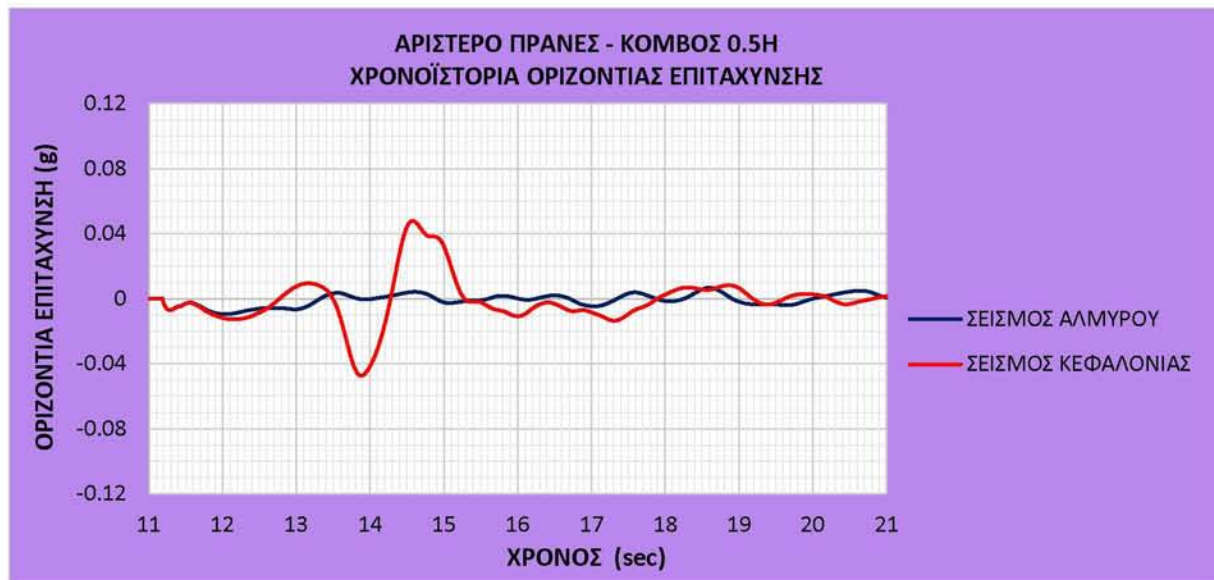
Διάγραμμα 5.3.3.6. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης στο κέντρο της βάσης της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

Στον πίνακα 5.3.3.1. δίνονται οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων επιταχύνσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο της σεισμικής διέγερσης του συστήματος.



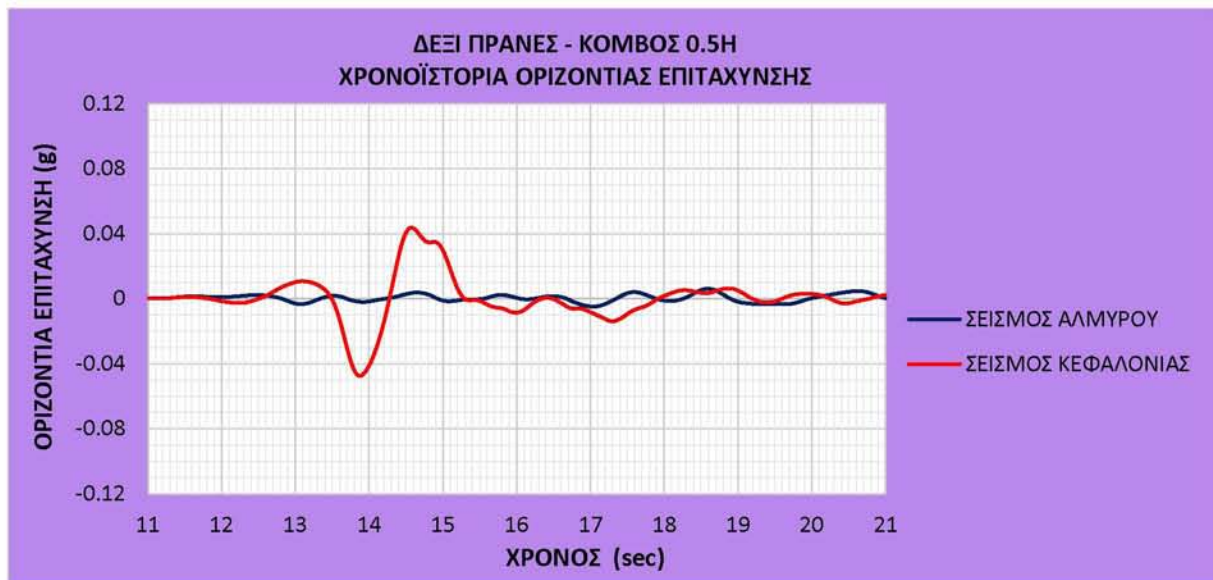
Πίνακας 5.3.3.1. Μέγιστες τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης σε διάφορα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)		
ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΜΕΓΙΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ (g)		
ΥΨΟΣ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΣΤΕΨΗ	-0.014724	0.106844
0.8H	0.009363	0.095257
0.6H	-0.008809	0.068310
0.4H	-0.008428	-0.058706
0.2H	0.010428	-0.076545
ΒΑΣΗ	0.014307	-0.112693



Διάγραμμα 5.3.3.7. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του αριστερού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.





Διάγραμμα 5.3.3.8. Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης σε σημείο ύψους 0.5H (54.5m) του δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.

Στον πίνακα 5.3.3.2, δίνονται οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων επιταχύνσεων στο μέσο του ύψους ( $0.5H = 54.5m$ ) του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο της σεισμικής διέγερσης του συστήματος.

Πίνακας 5.3.3.2. Μέγιστες τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης στο μέσο του ύψους του αριστερού και δεξιού αντερείσματος της κεντρικής διατομής του φράγματος στο στάδιο δυναμικής φόρτισης του συστήματος.

ΣΤΑΔΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (11-21 sec)		
ΑΝΤΕΡΕΙΣΜΑΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ		
ΜΕΓΙΣΤΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ (g)		
ΥΨΟΣ 0.5H	ΣΕΙΣΜΟΣ ΑΛΜΥΡΟΥ	ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ
ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΠΡΑΝΕΣ	-0.009596	0.047811
ΔΕΞΙ ΠΡΑΝΕΣ	0.006064	-0.047589

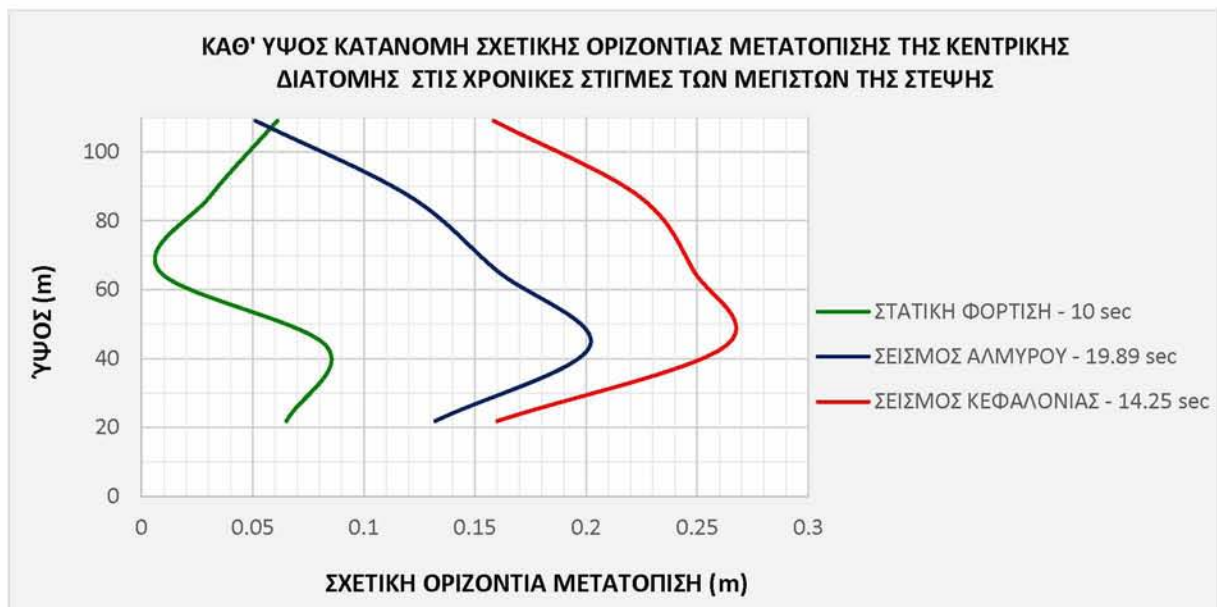
- ⇒ Παρατηρείται ότι οι μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις αναπτύσσονται στη βάση και στη στέψη του φράγματος, ενώ στις ενδιάμεσες στρώσεις η τιμή της επιτάχυνσης είναι σχετικά περιορισμένη.
- ⇒ Ο σεισμός της Κεφαλονιάς δίνει πολύ μεγαλύτερες τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης σε όλα τα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος αλλά και στα αντερείσματά του σε σχέση με τον σεισμό του Αλμυρού, κάτι που είναι φυσικό εξαιτίας του κατά πολύ μεγαλύτερου  $p_{rga}$  του (0.26g έναντι 0.068g). Μάλιστα στη στέψη του φράγματος αναπτύσσεται 7 φορές υψηλότερη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση κατά τον σεισμό της Κεφαλονιάς από αυτή του Αλμυρού.

#### 5.4 Καθ' ύψος Κατανομές - Συγκριτικά Διαγράμματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται διαγράμματα με τις καθ' ύψος κατανομές των οριζόντιων & κατακόρυφων μετατοπίσεων και των οριζόντιων επιταχύνσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος στις χρονικές στιγμές όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές στη στέψη του.

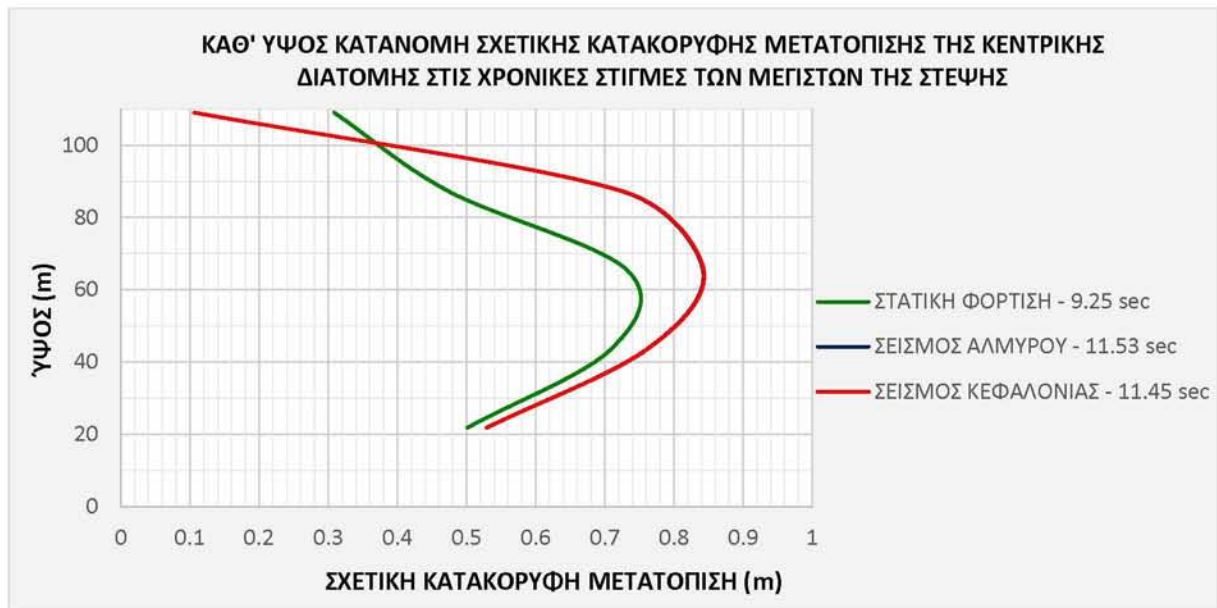
Επίσης δίνονται συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των μετακινήσεων της κεντρικής διατομής του φράγματος που προέκυψαν στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης, αλλά και αντίστοιχες εικόνες όπως προέκυψαν από το Abaqus.

Στο υπόμνημα του κάθε διαγράμματος, δίπλα από το στάδιο φόρτισης που αντιστοιχεί στην κάθε καμπύλη, δίνεται η χρονική στιγμή της ανάλυσης κατά την οποία λήφθηκαν οι τιμές της αντίστοιχης καμπύλης.



Διάγραμμα 5.4.1. Καθ' ύψος κατανομή σχετικής οριζόντιας μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης.

⇒ Στις χρονικές στιγμές που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές οριζόντιας σχετικής μετατόπισης στο κέντρο της στέψης για κάθε στάδιο φόρτισης, παρατηρείται ότι η καθ' ύψος κατανομή του φράγματος είναι η δυσμενέστερη σε όλο το εύρος της για τον σεισμό της Κεφαλονιάς. Ο σεισμός του Αλμυρού είναι δυσμενέστερος κατά πολύ από τη στατική φόρτιση σε όλο το εύρος της καθ' ύψος κατανομής με εξαίρεση το σημείο της στέψης, όπου παρατηρούνται παραπλήσιες τιμές μεταξύ των δύο.

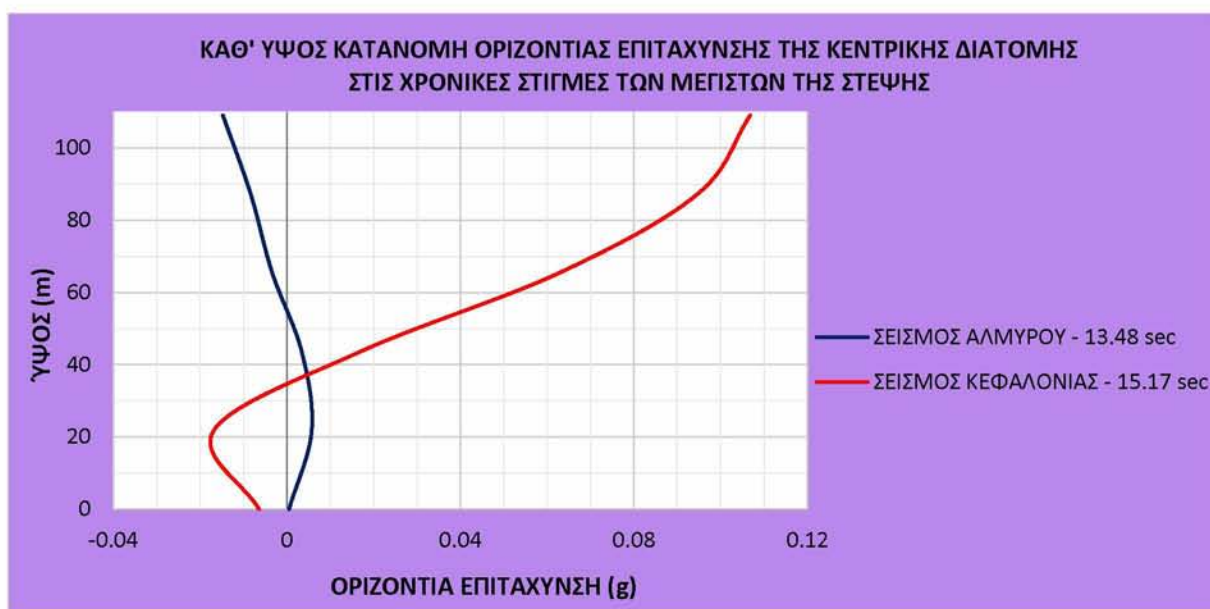


Διάγραμμα 5.4.2. Καθ' ύψος κατανομή σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης.

- ⇒ Στις χρονικές στιγμές που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές κατακόρυφης σχετικής μετατόπισης στο κέντρο της στέψης για κάθε στάδιο φόρτισης, παρατηρείται ότι το κέντρο της στέψης παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στο στάδιο στατικής φόρτισης συγκριτικά με το στάδιο δυναμικής φόρτισης. Η καθ' ύψος κατανομή της στα υπόλοιπα ύψη της κεντρικής διατομής του φράγματος παρουσιάζει τιμές γενικά μεγαλύτερες στη δυναμική φόρτιση και μάλιστα αρκετά παρόμοιες μεταξύ των δύο σεισμών.

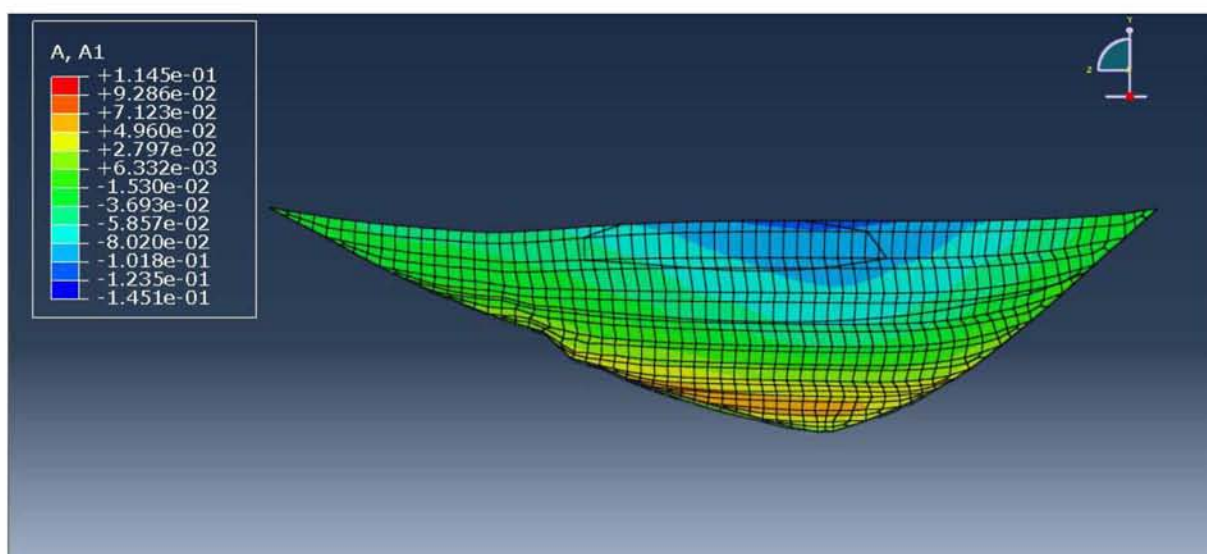
Εξετάστηκαν και άλλες χρονικές στιγμές εμφάνισης κατακόρυφων μετατοπίσεων με τιμές κοντινές στις μέγιστες (16.63 sec ανάλυσης με σεισμό Αλμυρού και 14.06 sec ανάλυσης με σεισμό Κεφαλονιάς) και εξακριβώθηκε ότι η καθ' ύψος κατανομή της σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης στις στιγμές όπου εμφανίζονται τα μέγιστα στη στέψη, σχεδόν ταυτίζεται στους δύο σεισμούς.





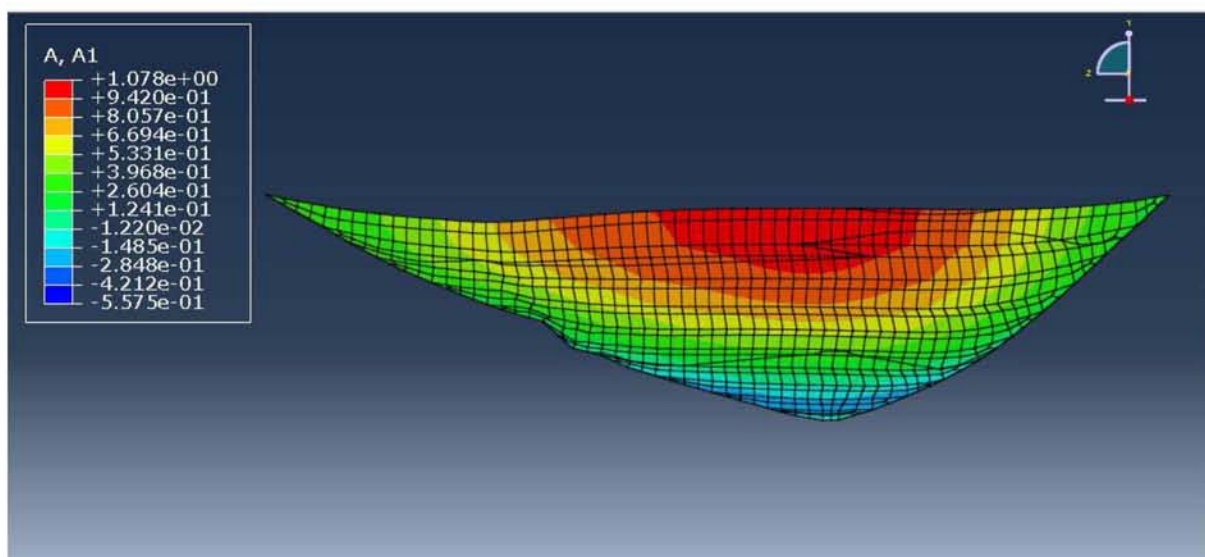
Διάγραμμα 5.4.3. Καθ' ύψος κατανομή οριζόντιας επιτάχυνσης της κεντρικής διατομής του φράγματος στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης.

Στις εικόνες 5.4.1. και 5.4.2. δίνονται οι οριζόντιες επιταχύνσεις σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ), στις χρονικές στιγμές των μεγίστων τιμών της στέψης κατά τον σεισμό του Αλμυρού και της Κεφαλονιάς αντίστοιχα.



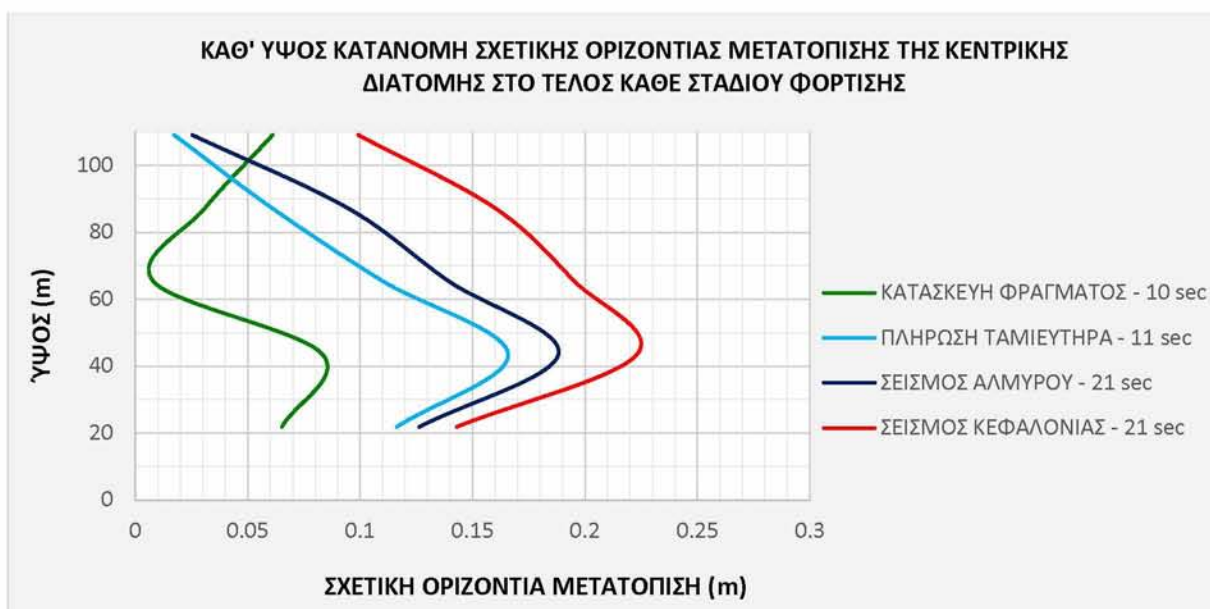
Εικόνα 5.4.1. Κατανομή οριζόντιας επιτάχυνσης ( $m/s^2$ ) στο φράγμα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος τη χρονική στιγμή της μέγιστης τιμής της στέψης κατά τον σεισμό του Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 13.48 sec).





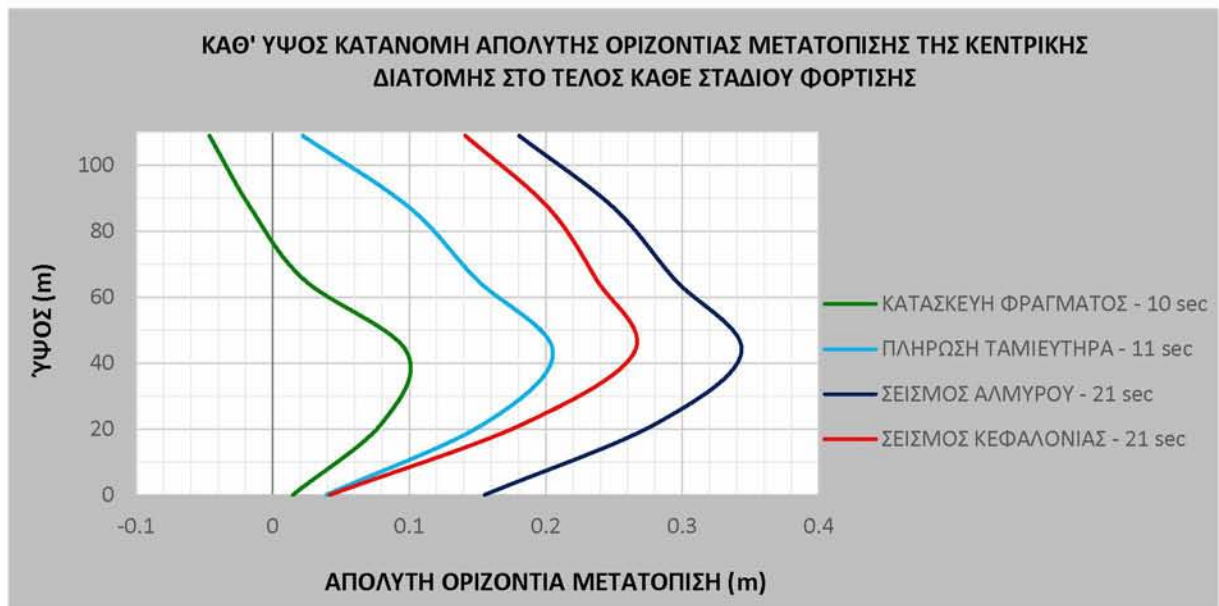
Εικόνα 5.4.2. Κατανομή οριζόντιας επιτάχυνσης ( $m/s^2$ ) στο φράγμα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος τη χρονική στιγμή της μέγιστης τιμής της στέψης κατά τον σεισμό της Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 15.17 sec).

⇒ Και για τους δύο σεισμούς, παρατηρείται ότι οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις αναπτύσσονται στην κεντρική διατομή στις ανώτερες στρώσεις (κοντά στη στέψη) του φράγματος, με αντίθετες όμως μεταξύ τους φορές. Συγκεκριμένα ο σεισμός του Αλμυρού δημιουργεί μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στέψης της τάξεως των  $0.15m/s^2 \approx 0.015g$  με φορά από τα κατόντη προς τα ανάντη του φράγματος, ενώ η αντίστοιχη τιμή του σεισμού της Κεφαλονιάς είναι της τάξεως των  $1.1m/s^2 \approx 0.11g$  με φορά από τα ανάντη προς τα κατόντη του φράγματος.



Διάγραμμα 5.4.4. Καθ' ύψος κατανομή σχετικής οριζόντιας μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

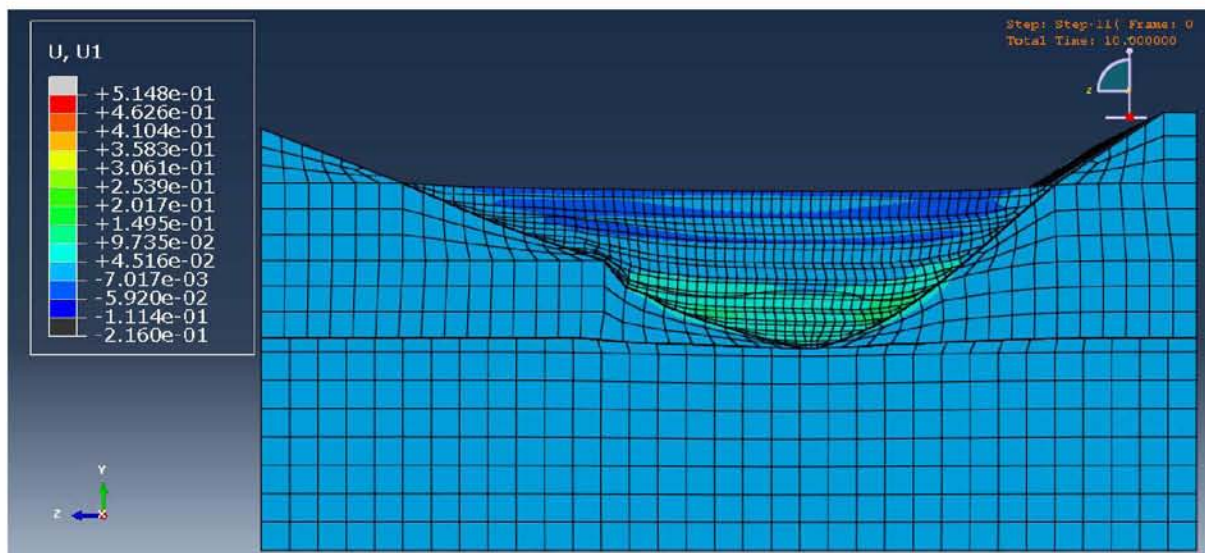
- ⇒ Σχετικά με την καθ' ύψος κατανομή της σχετικής οριζόντιας μετατόπισης στο φράγμα στο τέλος κάθε σταδίου φόρτισης, παρατηρείται ότι ο σεισμός της Κεφαλονιάς δίνει τις δυσμενέστερες τιμές σε όλο το εύρος της κατανομής, ακολουθούμενος από τον σεισμό του Αλμυρού και από το στάδιο πλήρωσης του ταμιευτήρα. Στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος, ωστόσο, σημειώνεται σημαντική σχετική οριζόντια μετατόπιση της στέψης του φράγματος, αφού αυτή μετατοπίζεται κατά την αντίθετη φορά από τη βάση, όπως αποτυπώνεται στην καθ' ύψος κατανομή των απόλυτων οριζόντιων μετατοπίσεων.



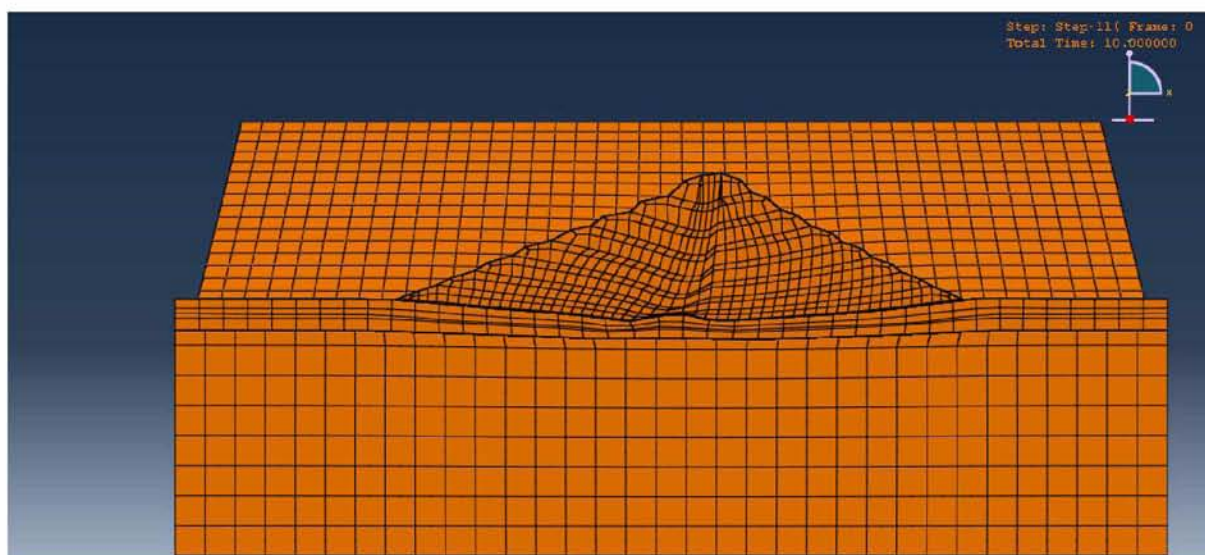
Διάγραμμα 5.4.5. Καθ' ύψος κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

Στις εικόνες 5.4.3. και 5.4.4. δίνονται οι απόλυτες οριζόντιες μετατοπίσεις σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) και μια απεικόνιση της οριζόντιας παραμόρφωσης του φράγματος (μεγεθυμένη κατά 20 φορές) σε τομή κατά μήκος της κοιλάδας (επίπεδο XY) στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος.



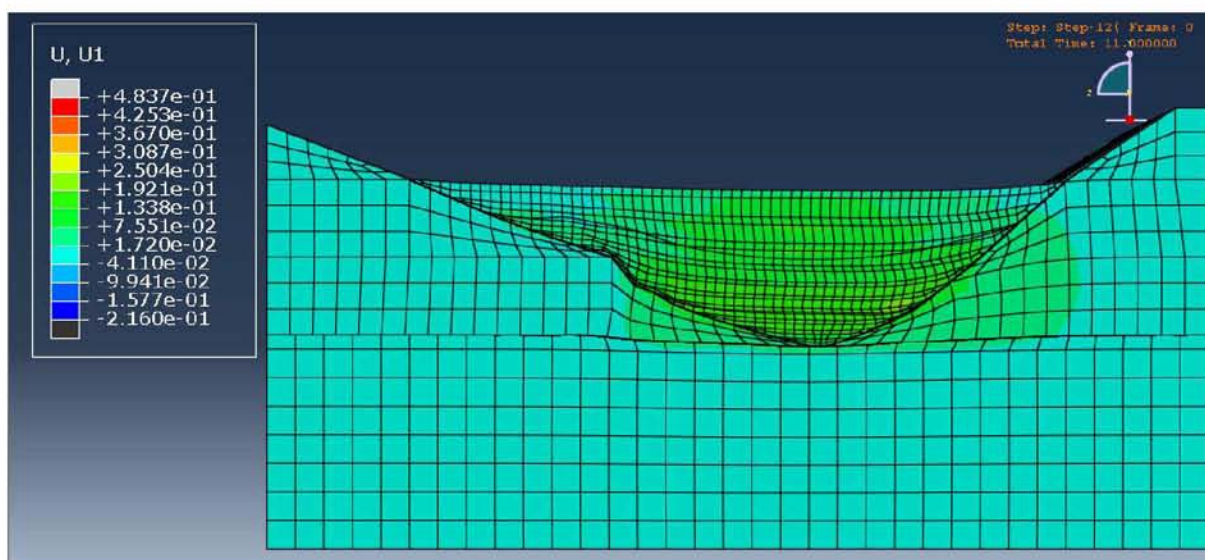


Εικόνα 5.4.3. Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

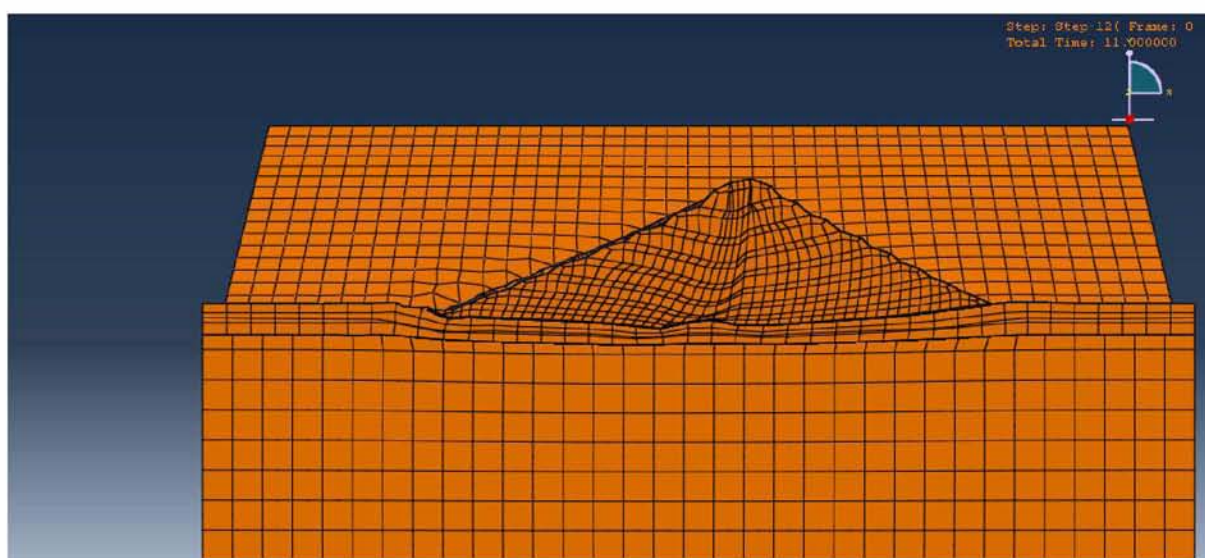


Εικόνα 5.4.4. Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).

Στις εικόνες 5.4.5. και 5.4.6. δίνονται οι απόλυτες οριζόντιες μετατοπίσεις σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) και μια απεικόνιση της οριζόντιας παραμόρφωσης του φράγματος (μεγεθυμένη κατά 20 φορές) σε τομή κατά μήκος της κοιλάδας (επίπεδο XY) αμέσως μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος με νερό.



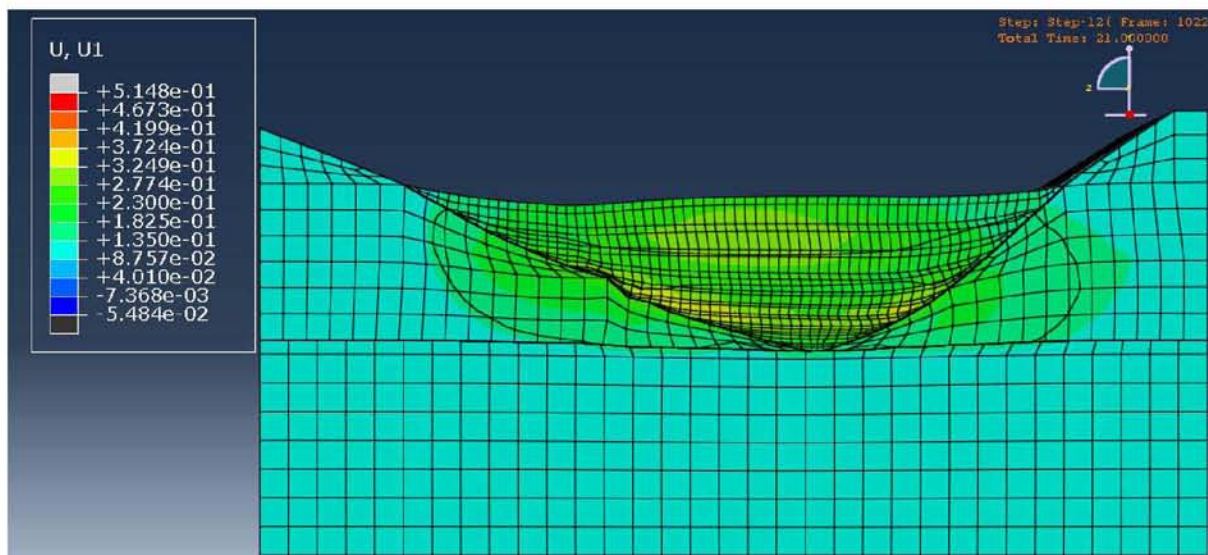
Εικόνα 5.4.5. Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).



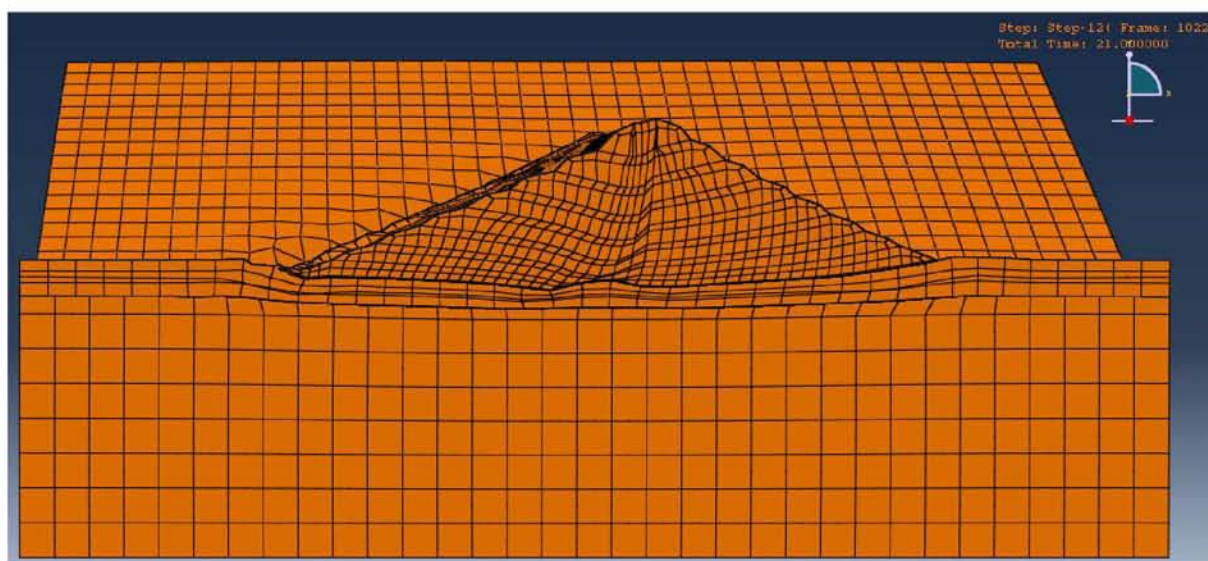
Εικόνα 5.4.6. Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

Στις εικόνες 5.4.7. και 5.4.8. δίνονται οι απόλυτες οριζόντιες μετατοπίσεις σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) και μια απεικόνιση της οριζόντιας παραμόρφωσης του φράγματος (μεγεθυμένη κατά 20 φορές) σε τομή κατά μήκος της κοιλάδας (επίπεδο XY) στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού.



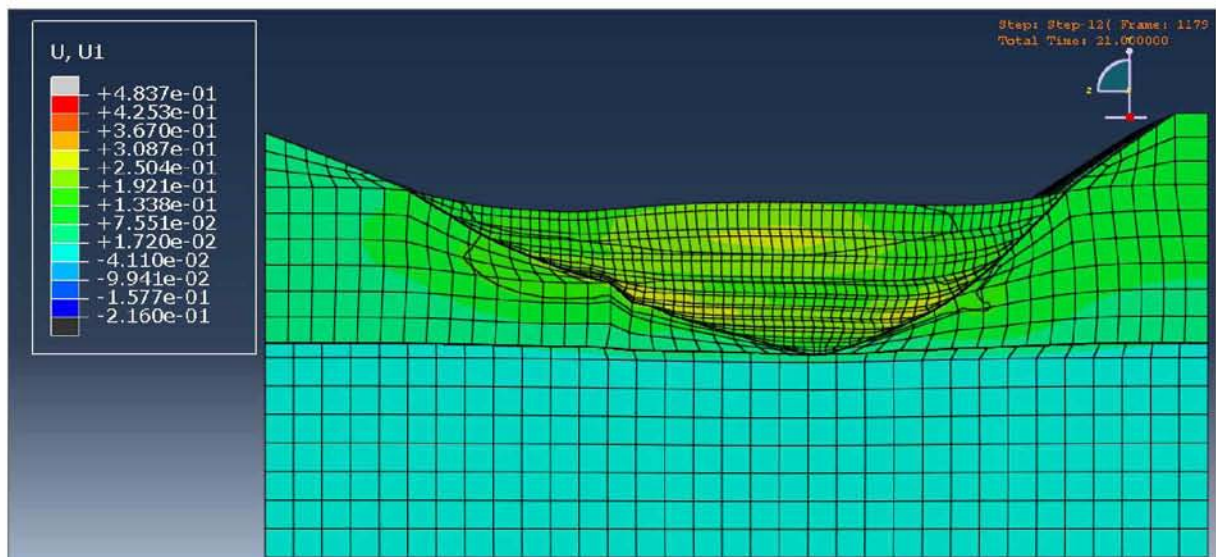


Εικόνα 5.4.7. Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

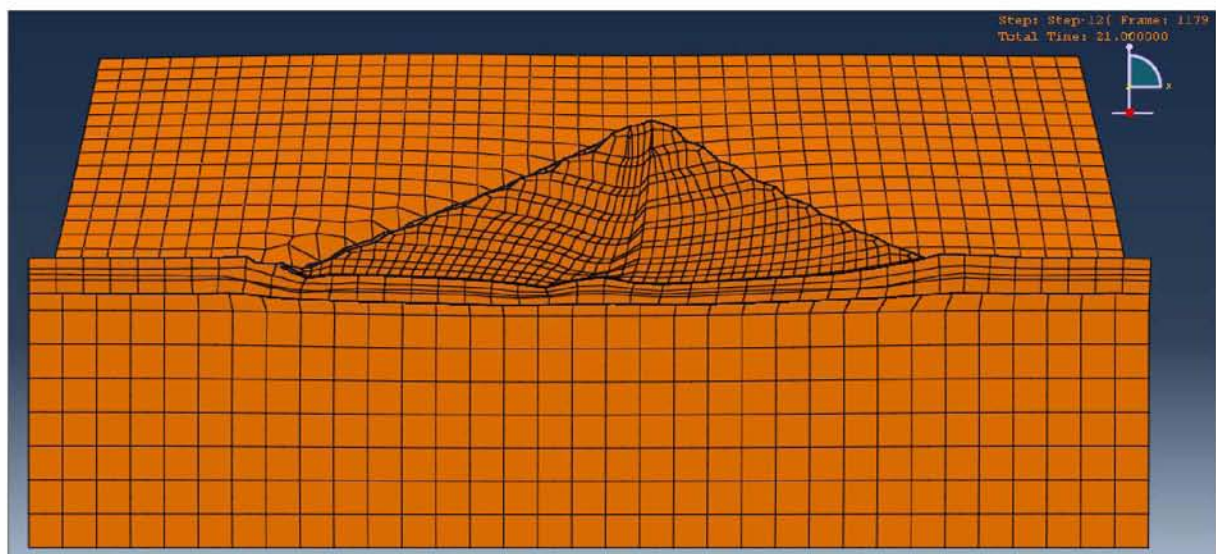


Εικόνα 5.4.8. Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

Στις εικόνες 5.4.9. και 5.4.10. δίνονται οι απόλυτες οριζόντιες μετατοπίσεις σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) και μια απεικόνιση της οριζόντιας παραμόρφωσης του φράγματος (μεγεθυμένη κατά 20 φορές) σε τομή κατά μήκος της κοιλάδας (επίπεδο XY) στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς.

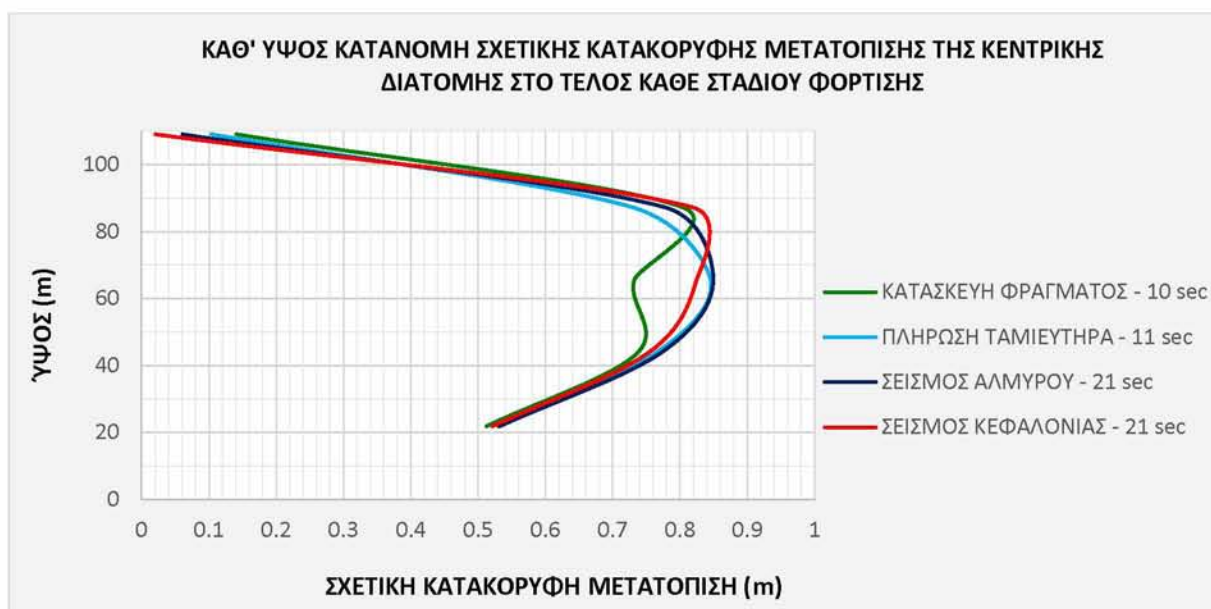


Εικόνα 5.4.9. Κατανομή απόλυτης οριζόντιας μετατόπισης στο σύστημα σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

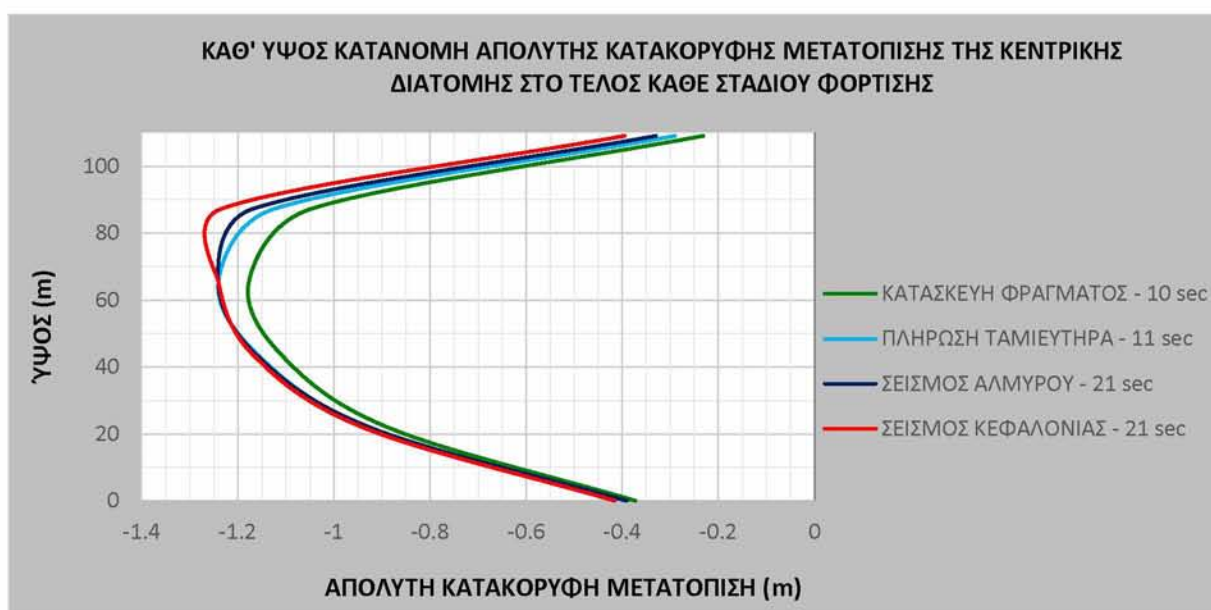


Εικόνα 5.4.10. Απεικόνιση παραμόρφωσης – μετακίνησης του φράγματος κατά την οριζόντια διεύθυνση σε εγκάρσια τομή XY κατά μήκος της κοιλάδας στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).



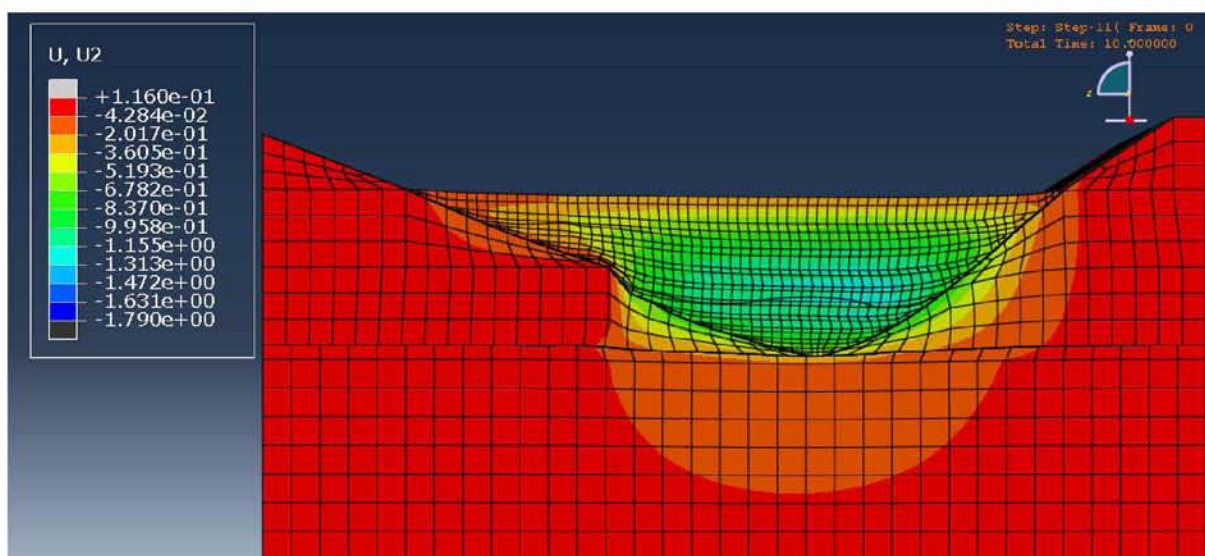


Διάγραμμα 5.4.6. Καθ' ύψος κατανομή σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος ως προς τη βάση του στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

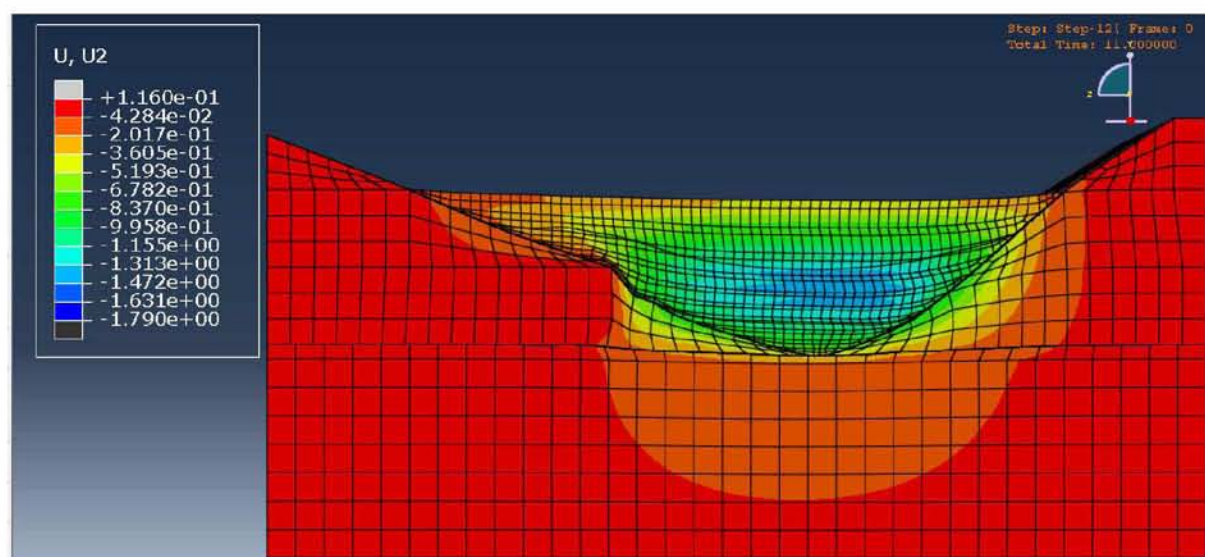


Διάγραμμα 5.4.7. Καθ' ύψος κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης της κεντρικής διατομής του φράγματος στο πέρας του κάθε σταδίου φόρτισης.

Στις εικόνες 5.4.11. και 5.4.12. φαίνονται οι απόλυτες κατακόρυφες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις (μεγεθυμένες κατά 20 φορές) σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ), σε πρώτη φάση αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος και σε δεύτερη αμέσως μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα του φράγματος με νερό.



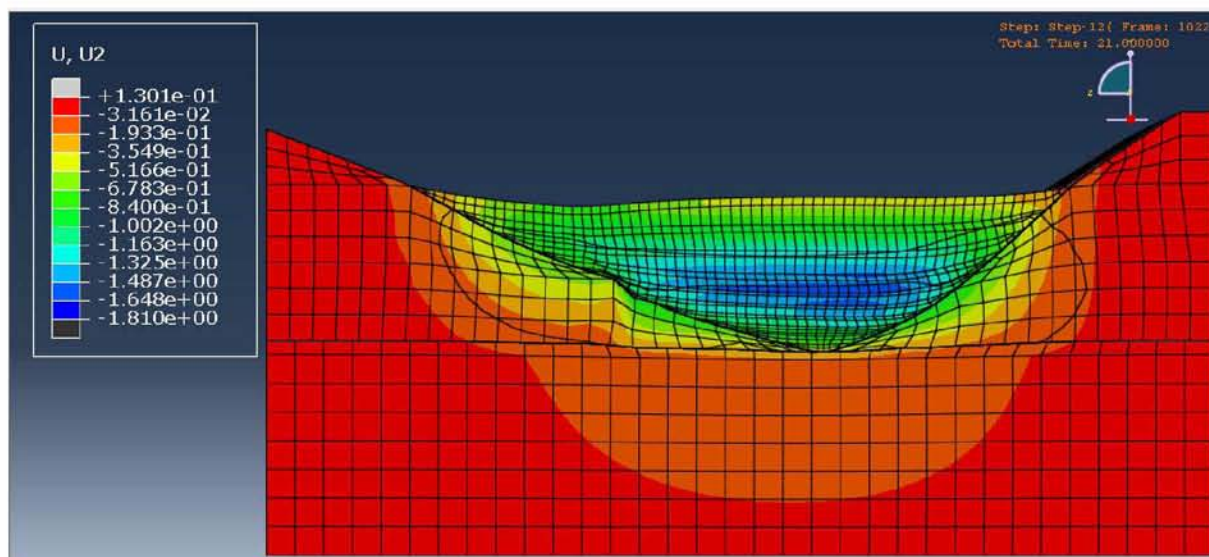
Εικόνα 5.4.11. Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος (χρονική στιγμή ανάλυσης 10 sec).



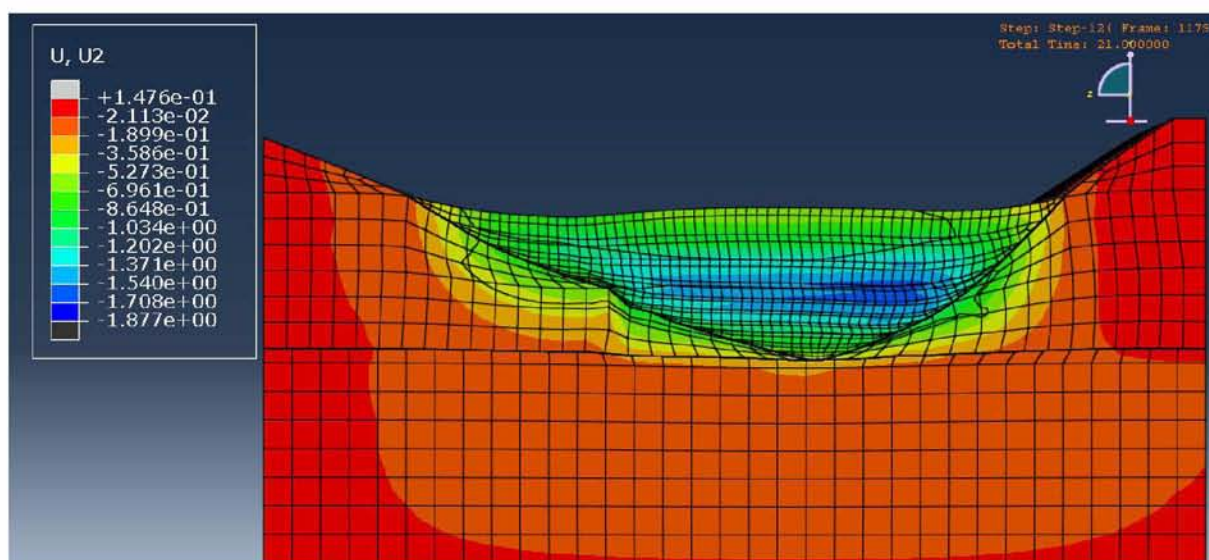
Εικόνα 5.4.12. Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης της πλήρωσης του ταμιευτήρα με νερό (χρονική στιγμή ανάλυσης 11 sec).

Στις εικόνες 5.4.13. και 5.4.14. φαίνονται οι απόλυτες κατακόρυφες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις (μεγενθυμένες κατά 20 φορές) σε τομή κατά μήκος της στέψης του φράγματος (επίπεδο YZ) στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού, πρώτα για τον σεισμό του Αλμυρού και στη συνέχεια γι' αυτόν της Κεφαλονιάς.





Εικόνα 5.4.13. Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Αλμυρού (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).



Εικόνα 5.4.14. Κατανομή απόλυτης κατακόρυφης μετατόπισης και απεικόνιση κατακόρυφης παραμόρφωσης του φράγματος σε εγκάρσια τομή YZ κατά μήκος της στέψης του φράγματος στο στάδιο ολοκλήρωσης του σεισμού Κεφαλονιάς (χρονική στιγμή ανάλυσης 21 sec).

⇒ Από τις καθ' ύψος κατανομές της κατακόρυφης σχετικής αλλά και απόλυτης μετατόπισης του φράγματος για το κάθε στάδιο φόρτισης, φαίνεται ότι η κεντρική διατομή του φράγματος παρουσιάζει πολύ παρόμοια εικόνα στο τέλος όλων των σταδίων φόρτισής του, στα σημεία που βρίσκονται κάτω από το κέντρο της στέψης. Ωστόσο, μετά την ολοκλήρωση της σεισμικής κίνησης, η εικόνα είναι πολύ διαφορετική (δυσμενέστερες τιμές) στις κατώτερες ενδιάμεσες στρώσεις του φράγματος, στις επιφάνειες έδρασης του φράγματος στην κοιλάδα, καθώς και στα υπόλοιπα σημεία κατά μήκος της στέψης (πέραν του κέντρου της).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στη διπλωματική αυτή εργασία δημιουργήθηκε σύστημα φράγματος – πρανών κοιλάδας – υπεδάφους θεμελίωσης πάνω στο οποίο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις, στατικού και δυναμικού τύπου. Η στατική ανάλυση αφορούσε σε πρώτη φάση τη σταδιακή κατασκευή του φράγματος και σε δεύτερη την πλήρωση της λεκάνης με νερό, ενώ η δυναμική ανάλυση αναφερόταν στη σεισμική καταπόνηση του συστήματος για χρονική διάρκεια 10 δευτερολέπτων, μέσω της εφαρμογής σεισμικής επιτάχυνσης στη βάση του υπεδάφους θεμελίωσης.

Οι παράμετροι εισαγωγής για τη δημιουργία του μοντέλου προήλθαν από την περιοχή της Θεσσαλίας. Το φράγμα θεωρήθηκε λιθόρριπτο, με κεκλιμένο αργιλικό πυρήνα και με γεωμετρία που βασίστηκε στο φράγμα Σμοκόβου του Νομού Καρδίτσας, ενώ οι ιδιότητες των υλικών του συστήματος προήλθαν από σχετική εδαφοστατική μελέτη του επίσης λιθόρριπτου φράγματος Μαυροματίου του Δήμου Σούρπης του Νομού Μαγνησίας.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με διαφορετικά δεδομένα δυναμικής φόρτισης, προκειμένου να δοθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της δυναμικής απόκρισης του συστήματος. Χρησιμοποιήθηκαν για τον λόγο αυτό τα επιταχυνσιογραφήματα δύο σεισμών, που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η τιμή της μέγιστης καθίζησης της στέψης αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με την αντίστοιχη του φράγματος Σμοκόβου, στο οποίο βασίστηκε η γεωμετρία του υπό μελέτη φράγματος [8], [39].
- Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο φράγμα κατά την πλήρωση της λεκάνης και κατά τη σεισμική διέγερση είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο στάδιο κατασκευής του.
- Για να δοθεί σαφής εικόνα των μετατοπίσεων και επομένως της πιθανότητας αστοχίας της κατασκευής, πέρα από τις απόλυτες μετακινήσεις είναι σημαντικός ο έλεγχος των σχετικών - διαφορικών μετακινήσεων στα διάφορα ύψη της σε σχέση με τη βάση της.
- Ο σεισμός με τη μεγαλύτερη τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης προκαλεί κατά κανόνα μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις του σώματος του φράγματος σε σχέση με τη βάση του. Στην οριζόντια διεύθυνση (κατά μήκος της κοιλάδας) οι τιμές αυτές αυξάνονται σημαντικά, ενώ στην κατακόρυφη διεύθυνση η αύξηση αυτή είναι σχετικά μικρότερη. Παράλληλα, υψηλότερη τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης φαίνεται να οδηγεί και στην ανάπτυξη πολλαπλάσιας επιτάχυνσης στην κατασκευή.
- Οι οριζόντιες επιταχύνσεις που δημιουργεί ο σεισμός παρατηρήθηκε ότι μεγιστοποιούνται στην περιοχή του κέντρου της στέψης του φράγματος, ενώ αρκετά μεγάλες τιμές παρατηρήθηκαν και στη βάση του, με τα ενδιάμεσα στρώματα να παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές επιτάχυνσης.

- Η στέψη του φράγματος παρουσιάζει εντονότερη κατακόρυφη παραμόρφωση στην πλευρά του αντερείσματος με την μικρότερη κλίση, καθώς αυτή παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του ιδίου βάρους της κατασκευής.

Γενικότερα:

- Η συμπεριφορά του φράγματος που προσομοιώθηκε κρίνεται ικανοποιητική υπό στατική και δυναμική φόρτιση.
- Οι ιδιότητες και η μορφή του υπεδάφους θεμελίωσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της κατασκευής, κυρίως κατά τη δυναμική φόρτισή της. Θεώρηση πρακτικά ασυμπίεστου υπεδάφους (με υψηλό μέτρο ελαστικότητας) και χωρίς αξιοσημείωτες εναλλαγές διαφορετικών υλικών συμβάλλει στον περιορισμό των παρατηρούμενων καθιζήσεων, προς τη μεριά της ασφάλειας της κατασκευής.
- Σημαντικό ρόλο έχει και η θεώρηση ελαστικής ή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς για το κάθε τμήμα του συστήματος φράγματος – κοιλάδας – υπεδάφους. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ελαστική συμπεριφορά μόνο για την κατώτερη στρώση του υπεδάφους, λόγω της μικρής συμπίεσής της, ενώ για τα υπόλοιπα υλικά της κοιλάδας και του φράγματος ελαστοπλαστική. Σε περίπτωση ελαστικής θεώρησης για το σύνολο του υποβάθρου θεμελίωσης, οι τιμές παραμόρφωσης του φράγματος αναμένονται αρκετά μικρότερες. Υπόκειται, λοιπόν, στην κρίση του μελετητή να προσαρμόζει τον τύπο συμπεριφοράς του κάθε τμήματος με βάση τις ιδιότητές του, ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να συμβαδίζουν με την πραγματικότητα.
- Τονίζεται, τέλος, η σημασία της υπολογιστικής ισχύος προκειμένου να προσομοιωθεί και να αναλυθεί ένα τέτοιο μοντέλο, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές φορτισιακές και συνοριακές συνθήκες.

Η συγκεκριμένη εργασία εκπονήθηκε σε θεωρητική βάση και προκειμένου να συμβαδίζει περισσότερο με τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα τέτοιο σύστημα χρήζει βελτιώσεων. Ως προτάσεις εξέλιξης – μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας μελέτης αναφέρονται ενδεικτικά οι εξής:

- Η χρήση διαφορετικών ελαστοπλαστικών μοντέλων αστοχίας για την αποτελεσματικότερη προσομοίωση ενός λιθόρριπτου φράγματος, καθώς το κριτήριο Mohr-Coulomb δεν είναι το πλέον κατάλληλο. Ειδικά για λιθόρριπτα φράγματα μεγάλου ύψους προτείνεται το Γενικευμένο Κριτήριο Πλαστικότητας (Generalized Plasticity Model), [41], [50], [51].
- Η περαιτέρω διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του συστήματος, με την εισαγωγή διέγερσης μεγαλύτερης διάρκειας και μεγαλύτερου αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων διαφορετικών σεισμών, καθώς εκτός από τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του σεισμού στη συμπεριφορά της κατασκευής σε δυναμική φόρτιση επιδρούν κι άλλοι παράγοντες, όπως το μέγεθος του σεισμού και οι ιδιότητες του φάσματος απόκρισης [52], [53], [55]. Ιδιαίτερη σημασία έχει η μελέτη του συχνοτικού περιεχομένου του εκάστοτε σεισμού σε συνδυασμό με τις ιδιοσυχνότητες (κυρίως τη θεμελιώδη) της κατασκευής [52], [54], [56] [57].
- Η εξέταση και η προσομοίωση των υδροδυναμικών φαινομένων που δημιουργούνται στη λεκάνη κατά τη δυναμική φόρτιση του συστήματος.



- Η εισαγωγή επιφάνειας ολίσθησης μεταξύ της βάσης του φράγματος και του υπεδάφους και δυνατότητας αποκόλλησής του από αυτό, καθώς σε δυναμικές συνθήκες η κατασκευή δεν συμπεριφέρεται μονολιθικά με τη θεμελίωση.
- Η δημιουργία πιο ρεαλιστικών συνοριακών συνθηκών. Προτείνεται η εισαγωγή αποσβεστήρων στα εξωτερικά όρια του συστήματος για την αποφυγή ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό του, η οποία επηρεάζει (δίνει δυσμενέστερες τιμές) τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης. Εναλλακτικά, θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στοιχεία απείρου μήκους στα όρια του μοντέλου, εφόσον βέβαια το υπολογιστικό κόστος δεν αποτελεί πρόβλημα.
- Η προσομοίωση πραγματικής γεωμορφολογίας της κοιλάδας και του υπεδάφους θεμελίωσης, μέσω της εισαγωγής ασυνεχειών, διακλάσεων και ρηγμάτων στη μάζα των υλικών των βραχωδών πετρωμάτων, καθώς και υπαρχόντων υδροφόρων οριζόντων.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] – Παπαδημητρίου, Α. (2015), Σημειώσεις Μαθήματος “Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- [2] – Μαρίνος, Β. (2011), Σημειώσεις Μαθήματος “Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων”, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- [3] – Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ. (2016), Σημειώσεις Μαθήματος “Υδροηλεκτρικά Έργα”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- [4] – Σταυροθεοδώρου, Ε. (2015), Διδακτορική Διατριβή “Προχωρημένο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα για την ανάλυση της κατασκευής και φόρτισης μεγάλων φραγμάτων λιθορριπής”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
- [5] – Αχιλλέως, Γ. (2015), Διπλωματική Εργασία “Σεισμική Ευστάθεια Γεωφραγμάτων”, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [6] – Καββαδάς, Μ. (2006), Εποπτικό υλικό διαλέξεων του μαθήματος “Ειδικά Γεωτεχνικά Έργα – Γεωτεχνική Φραγμάτων”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- [7] – Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (2013), “Τα Φράγματα της Ελλάδας”.
- [8] – Ντουνιάς, Γ., Δέδε, Β., Ντάλης, Δ., Καστούδης, Α. (2006), “Η Συμπεριφορά του Φράγματος Σμοκόβου”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη.
- [9] – Βρόντζος, Ι. (2013), Διπλωματική Εργασία “Συμπεριφορά Φραγμάτων Λιθορριπής Διερχόμενων από Ενεργό Τεκτονικό Ρήγμα”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
- [10] – Εφραιμίδης, Γ. (2016), Σημειώσεις Μαθήματος “Τεχνική Γεωλογία – Βραχομηχανική”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
- [11] – Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G., Foster M. (2015), *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd edition, by CRC Press.
- [12] – Schuster, R. (2006), *Interaction of Dams and Landslides - Case Studies and Mitigation*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- [13] – Gupta, H., Rastogi, B. (1976), *Dams and Earthquakes*, by Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- [14] – Καββαδάς, Μ., Καραβοκύρης, Γ. (2004), “Φράγμα Συγκέντρωσης Νερού στο Ρέμα Μαυρομάτι του Δήμου Σούρπης Ν. Μαγνησίας – Εδαφοστατική Μελέτη του Χωμάτινου Αναχώματος”, Αθήνα.
- [15] – Αγγελίδης, Π. (2017), Σημειώσεις Μαθήματος “Υδροδυναμικά Έργα - Τεχνικά Έργα μιας Υδροδυναμικής Εγκατάστασης”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.

- [16] – Ιστότοπος, <https://www.ussdams.org/dam-levée-education/overview/types-of-dams/> (Ημερ. Επίσκεψης 25 Μαΐου 2018).
- [17] – Ιστότοπος, <https://theconstructor.org/water-resources/classification-types-of-dams/4439> (Ημερ. Επίσκεψης 25 Μαΐου 2018).
- [18] – Φιλίντας, Α., Πολύζος, Σ. (2008), “Φράγματα, λειτουργίες οικοσυστήματος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις”, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ – Τμ. ΚΔΘ, Λάρισα.
- [19] – Σαμπατάκης, Ν., Δεπούντης, Ν. (2017), Σημειώσεις Μαθήματος “Φράγματα: Ταξινόμηση - Κατασκευαστικές απαιτήσεις”, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [20] – Λουπασάκης, Κ. (2014), Σημειώσεις Μαθήματος “Τεχνική Γεωλογία ΙΙ”, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, ΕΜΠ.
- [21] – Εφραιμίδης, Γ. (2017), Σημειώσεις Μαθήματος “Τεχνική και Θαλάσσια Γεωλογία” Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Μ.Σ. Ανάλυση και Σχεδιασμός Κατασκευών Ενεργειακών Υποδομών, Π.Θ.
- [22] – Ευστρατιάδης, Α., Μάμασης, Ν., Κουτσιγιάννης, Δ. (2015), Σημειώσεις Μαθήματος “Φράγματα”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Ε.Μ.Π.
- [23] – Τζιτζή, Σ. (2008), “Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη από την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων της ΔΕΗ ΑΕ”, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, ΤΕΕ, ΤΕΕ – Τμ. ΚΔΘ, Λάρισα.
- [24] – Παπαλάιος, Η. (2013), Μεταπτυχιακή Διατριβή “Προσομοίωση και Έλεγχος Ευφύων Πιεζοηλεκτρικών Κατασκευών με χρήση Σύγχρονων Υπολογιστικών Συστημάτων”, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [25] – Κοτζιαπασίης, Χ. (2010), Διπλωματική Εργασία “Τεχνολογική και Ακαδημαϊκή Έρευνα στα Πλαίσια της Λειτουργίας και του Σχεδιασμού Αποθηκών”, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [26] – Ιεροδιακόνου, Α. (2013), Διπλωματική Εργασία “Προσομοίωση Πειραμάτων Θλίψης και Φθοράς Επικαλύψεων με Ψεκασμό Πλάσματος με Χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (Abaqus – Code)”, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- [27] – Σημειώσεις Μαθήματος “Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές”, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, ΕΜΠ.
- [28] – Γκότσης, Π. (2004), Πεπερασμένα Στοιχεία, Εκδόσεις Ζήτη

- [29] – Ιστότοπος, <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/PDF/brochures/simulia-abaqus-unified-fea-brochure.pdf> (Ημερ. Επίσκεψης 28 Μαΐου 2018).
- [30] – Ιστότοπος, <https://www.scribd.com/document/38430579/abaqus> (Ημερ. Επίσκεψης 29 Μαΐου 2018).
- [31] – Ιστότοπος, <http://wiki.central.ntua.gr/#!/software/abaqus.md> (Ημερ. Επίσκεψης 29 Μαΐου 2018).
- [32] – ABAQUS (2013), Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA.
- [33] – Ιστότοπος, <http://www.istorikoiperipatoi.gr/> (Ημερ. Επίσκεψης 1 Ιουνίου 2018).
- [34] – Ιστότοπος, [http://www.digital-camera.gr/index.php?option=photos&action=view&photo\\_id=34683](http://www.digital-camera.gr/index.php?option=photos&action=view&photo_id=34683) (Ημερ. Επίσκεψης 1 Ιουνίου 2018).
- [35] – Ιστότοπος, <http://arcadia.ceid.upatras.gr/arkadia/places/ladon.htm> (Ημερ. Επίσκεψης 1 Ιουνίου 2018).
- [36] – Ιστότοπος, <http://7gym-laris.lar.sch.gr/perivalon/ekdr-deh.htm> (Ημερ. Επίσκεψης 1 Ιουνίου 2018).
- [37] – Ιστότοπος, <https://www.ultraenerji.com/hydroelectric/hydroelectric-power-plants/keban-baraji-ve-hidroelektrik-santrali.html> (Ημερ. Επίσκεψης 1 Ιουνίου 2018).
- [38] – Abbasiverki R., Nordström E., Ansell A. (2017), “Initial study on seismic analyses of concrete and embankment dams in Sweden”, Division of Concrete Structures, KTH Civil and Architectural Engineering, Stockholm, Sweden.
- [39] – Καραβοκύρης, Ι., Ντουνιάς, Γ., Νικολάου, Δ., Καστούδης, Α., Ανδριώτης, Γ. (2008), “Ολοκλήρωση και πρώτη πλήρωση του φράγματος Σμοκόβου”, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, TEE, Λάρισα.
- [40] – Fei Kang, Liu Han-long (2010), “Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam”.
- [41] – Pornthap Pramthawee, Pornkasem Jongpradist and Warat Kongkitkul (2011), “Evaluation of hardening soil model on numerical simulation of behaviors of high rockfill dams”, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thung Khru, Bangkok, Thailand.
- [42] – Ιστότοπος, <http://www.itsak.gr/seismicdata/V2/ALM18004.V2> (Ημερ. Επίσκεψης 28 Απριλίου 2018).



- [43] – Ιστότοπος, [http://www.itsak.gr/db/data/strong\\_motion/after2000/](http://www.itsak.gr/db/data/strong_motion/after2000/) (καταγ. Αργοστόλι) (Ημερ. Επίσκεψης 28 Απριλίου 2018).
- [44] – Κολλάτου Άννα-Μαρία (2017), Μεταπτυχιακή Διατριβή “Δυναμική Ανάλυση Τοξωτού Φράγματος Βαρύτητας από Κυλινδρουμενο Σκυρόδεμα”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.
- [45] – Chowdhury I., Dasgupta S. (2003), “Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems”, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 8.
- [46] – Sunbul A., Cavusli M., Kartal M., Sunbul F., “A Case Study on 3D Non-Linear Analysis of a Clay Core Rockfill Dam”, Icones2017: International Conference on Technology, Engineering and Science, The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), ISRES Publishing, Vol. 1, P. 388-396.
- [47] – Triantafyllou S., Course: Method of Finite Elements II, “Quick Guide to Abaqus/CAE”, Institute of Structural Engineering, ETH, Zurich, Switzerland.
- [48] – Getting Started with Abaqus: Interactive Edition (2010), Appendix B: Creating and Analyzing a Simple Model in Abaqus/CAE, School of Engineering & Applied Science, Washington University, St. Louis, USA.
- [49] – Ιστότοπος, <http://www.oasp.gr/node/87> (Ημερ. Επίσκεψης 7 Ιουνίου 2018).
- [50] – Weixin Dong, Liming Hu, Yu Zhen Yu & He Lv (2013), “Comparison between Duncan and Chang’s EB Model and the Generalized Plasticity Model in the Analysis of a High Earth-Rockfill Dam”, Journal of Applied Mathematics, Hindawi Publishing Corporation.
- [51] – Xu Bin, Zou Degao, Kong Xianjing (2012), “Static and Dynamic Analysis of a 200m High Concrete Faced Dam Based on a Generalized plasticity Model”, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (WCCE), Lisbon, Portugal.
- [52] – Yu, L., Kong, X., Xu, B. (2012), “Seismic Response Characteristics of Earth and Rockfill Dams”, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (WCCE), Lisbon, Portugal.
- [53] – Yao, X., Elnashai, A., Jiang, J. (2012), “Analytical Seismic Fragility Analysis of Concrete Arch Dams”, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (WCCE), Lisbon, Portugal.
- [54] – Uddin, N., Gazetas, G. (1995), “Dynamic Response of Concrete-Faced Rockfill Dams to Strong Seismic Excitation”, Journal of Geotechnical Engineering.
- [55] – Swaisgood, J. (2003), “Embankment dam deformations caused by earthquakes”, 7<sup>th</sup> Pacific Conference on Earthquake Engineering (PCEE), Christchurch, New Zealand.



- [56] – Kan, M., Taiebat, H. (2013), “Reliability of simplified methods for evaluation of earthquake-induced displacement in earth and rockfill dams”, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, NSW, Australia.
- [57] – Veylon, G, Bard, P., Luu, L., Carvajal, C. (2017), “A simplified method for estimating Newmark displacements of mountain reservoirs”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.