

Διπλωματική Εργασία

Κουρτίδη Αριστείδα

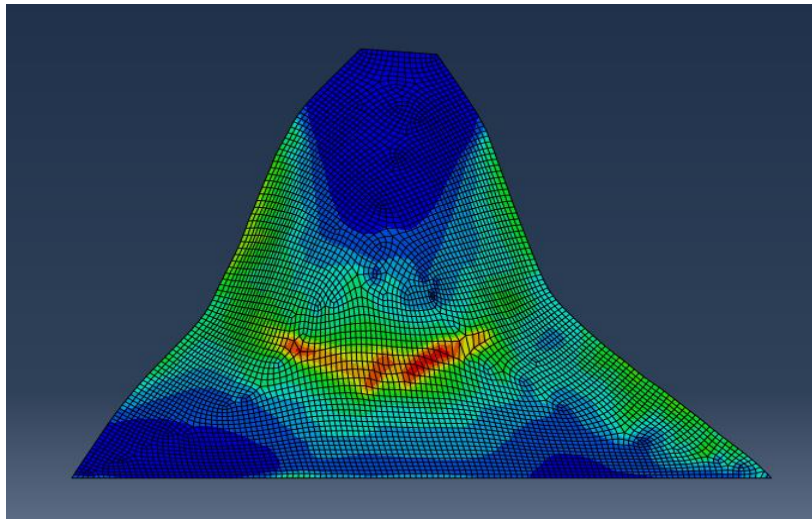
Επιβλέποντες:

Καθηγητής Γ.Γκαζέτας, Ν. Ι. Μουτάφης, Δρ. Ε. Γαρίνη

Δυναμική Απόκριση

Αξονοσυμμετρικών Φραγμάτων

Κυλινδρούμενου Σκληρού Επιχώματος (ΑΚΣΕ)



Dynamic Response of

Face Symmetrical Hardfill Dams (FSHD)

Μάιος 2014

Ευχαριστίες

Ένα ευχαριστώ στα συμβουλευτικά γραφεία Καστωρ Ε.Π.Ε., Γεωτεχνική Θεμελιώσεων Ε.Π.Ε. και Γεωμελέτη που μας έδωσαν απλόχερα ότι στοιχεία είχαν και έκαναν δυνατό τον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού του φράγματος

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	σελ.7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά.....	σελ. 9-16
Κεφάλαιο 2: Δυναμική Ελαστική Ανάλυση.....	σελ.17-42
Κεφάλαιο 2i: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	σελ.17-22
Κεφάλαιο 2ii: Ελαστική Ανάλυση.....	σελ.23-42
Κεφάλαιο 3: Δυναμική Ανελαστική Ανάλυση.....	σελ.43-92
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	σελ.93-94
Βιβλιογραφία.....	σελ.94

Περίληψη

Αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά ενός σχετικά νέου είδους φράγματος, του (κακώς) ονομαζόμενου «Αξονοσυμμετρικού» Φράγματος Σκληρού Επιχώματος, δηλαδή ενός επιχώματος με ίδιες κλίσεις στα δύο πρηνή. Αρχικά εξηγούμε τα χαρακτηριστικά αυτού του φράγματος και έπειτα παρουσιάζουμε το θεωρητικό υπόβαθρο για να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Τέλος δείχνουμε τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν με πεπερασμένα στοιχεία. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι ακόμη και με υπό μετρίως ισχυρή σεισμική διέγερση οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στην κορυφή του φράγματος είναι πολύ μεγάλες, με αποτέλεσμα η δημιουργία επικίνδυνων εφελκυστικών ρωγμών να είναι αναπόφευκτη.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά

Φράγμα ονομάζεται το τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος για να ανακόψει την συνέχεια της ροής με σκοπό την δημιουργία ενός ταμιευτήρα για αποθήκευση του νερού και μελλοντική του αξιοποίηση.

Τα φράγματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα άκαμπτα και τα εύκαμπτα. Στα μεν άκαμπτα ο πιο πολυσύχναστος τύπος είναι τα φράγματα βαρύτητας. Στα δε εύκαμπτα πρόκειται για τα γεωφράγματα. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την είσοδο των χωματούργικων μηχανημάτων η κατασκευή των τελευταίων έγινε αρκετά πιο γρήγορη και οικονομικά συμφέρουσα σε αρκετές περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά η απορία είχε δημιουργηθεί: πως θα μπορούσαν να συνεργαστούν τα μηχανήματα αυτά με το σκυρόδεμα.

Έτσι το συμβατικό σκυρόδεμα εξελίχθηκε σε κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC). Πρόκειται για ένα υλικό που έχει τις ιδιότητες του σκυροδέματος αλλά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο και κατα αυτόν τον τρόπο γινόταν δυνατός ο χειρισμός του από χωματοουργικά μηχανήματα. Εδώ να επισημάνουμε ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τρόπου κατασκευής φραγμάτων: η ταχύτητα κατασκευής τους. Το Middle Vaitarna Dam είναι το ένατο ταχύτερα κατασκευασμένο φράγμα στον κόσμο με 103 μέτρα ύψος να κατασκευάστηκαν μέσα σε 15 μήνες!



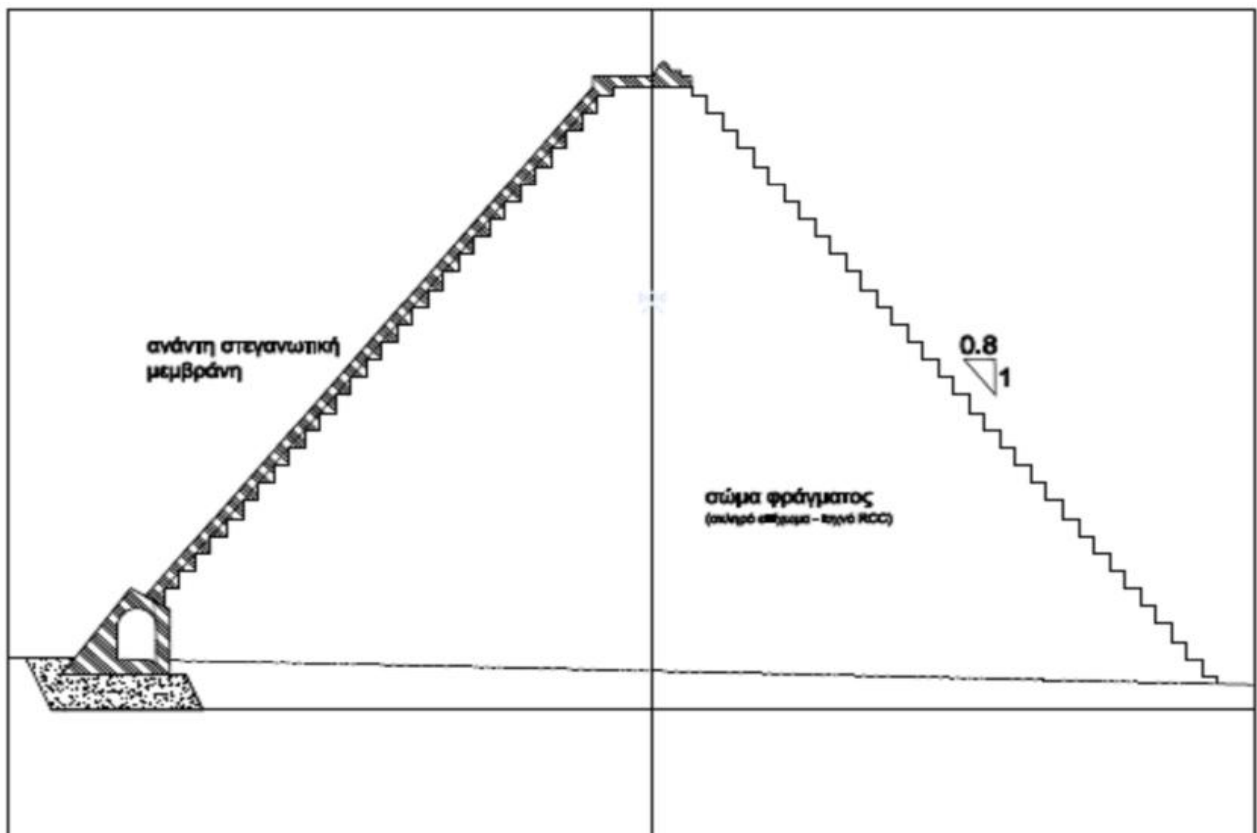
Εικόνα (1): Jahgin Dam, Iran (RCC)

Με την πάροδο των χρόνων ένας νέος τύπος φραγμάτων ήρθε στο προσκήνιο. Τα αξονοσυμμετρικά φράγματα κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος (ΑΚΣΕ). Αξονοσυμμετρικά

διότι έχουν γεωμετρική συμμετρία γύρω απο τον κατακόρυφο άξονα. Σκληρού επιχώματος διότι πλέον το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται έχει όσον το δυνατόν μικρότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο($50-70\text{kg/m}^3$) και κατά αυτόν τον τρόπο οι ιδιότητες του προσομοιάζουν το σκυρόδεμα αλλα η συμπεριφορά ως επίχωμα προσομοιάζει περισσότερο τα γεωφράγματα.

ΑΚΣΕ: Χαρακτηριστικά

Στο σχήμα (1) βλέπουμε πως το συγκεκριμένο φράγμα αποτελείται από το κυρίως σώμα του φράγματος , μια ανάντι στεγανωτική μεμβράνη η οποία μπορεί να είναι είτε από συμβατικό σκυρόδεμα (ανάντι πλάκα σκυροδέματος) είτε από συνθετική μεμβράνη, ένας τρόπος αρκετά διαδεδομένος πλέον διότι η μεμβράνη είναι εύκολα επιδιορθώσιμη σε περίπτωση ζημιάς, μια σήραγγα προσβάσεως-τσιμεντενέσεων καθώς και τον υπερχειλιστή που συνήθως κατασκευάζεται πάνω στο σώμα του φράγματος σε αντίθεση με τα γεωφράγματα. Οι κλίσεις των παρειών του φράγματος κυμαίνονται από 0.7:1 μέχρι 0.8:1 (Ο:Κ).



Σχήμα (1): Τυπική Διατομή φράγματος ΑΚΣΕ

Πλεονεκτήματα ΑΚΣΕ

- Λόγω του μεγάλου πλάτους του μειώνονται οι τάσεις που μεταβιβάζονται στο έδαφος. Αυτό του επιτρέπει να είναι το μόνο φράγμα βαρύτητας που να μπορεί να κατασκευασθεί και σε εδάφη χαμηλής αντοχής.
- Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο δεν αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές και συστολο-διαστολές που θα μπορούσαν να ρηγματώσουν το σκυρόδεμα. Έτσι δεν χρειάζονται ούτε αρμοί αλλά ούτε και σπλισμός για να παραλάβει αυτές τις τάσεις.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή, αλλουβιακά υλικά με μεγάλο μέγεθος κόκκου ή θραυστό υλικό από μαλακό βράχο με ελάχιστη επεξεργασία διαχωρισμού, καθώς η αποδεκτή κοκκομετρική περιοχή είναι μεγάλη.
- Μια ελάχιστη θλιπτική αντοχή είναι η μόνη απαίτηση για το συγκεκριμένο υλικό
- Τέλος, όπως είπαμε και παραπάνω ακολουθώντας τον πρόγονό του (R.C.C.) το Α.Κ.Σ.Ε. χαρακτηρίζεται από μεγάλη ταχύτητα κατασκευής.

Μειονεκτήματα ΑΚΣΕ

Παρότι έχει αποδειχθεί πως σε σεισμούς κάτω των 0.2g το φράγμα δεν αναπτύσσει εφελκυστικές τάσεις, ποια είναι η συμπεριφορά του σε σεισμούς μεγαλύτερης έντασης οι οποίοι αποτελούν συχνό φαινόμενο και στην χώρα μας;

Παραδείγματα ΑΚΣΕ στην χώρα μας

Τα πρώτα Αξονοσυμμετρικά φράγματα κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος κατασκευάστηκαν στην Μύκονο. Πρόκειται για τα φράγματα της Μαραθιάς και Άνω Μεράς της Μυκόνου. Έχουν ύψος 28 και 32 μέτρα και ολοκληρώθηκαν το 1993 και το 1997 αντίστοιχα. Και τα δύο αυτά φράγματα έχουν συμμετρική διατομή (1:2) και στεγανωτική πλάκα ανάντη. Η περιεκτικότητά τους σε τσιμέντο ανέρχεται σε 70-80kg/m³.



Εικόνα (2): Φράγμα Άνω Μεράς Μυκόνου, άποψη από το αριστερό κατόντη πρανές



Εικόνα (3): Φράγμα Μαραθιάς Μυκόνου, άποψη από την κατόντη πλευρά

Το επόμενο φράγμα βρίσκεται σε ένα άλλο νησί των κυκλάδων, στην Σέριφο. Πρόκειται για το φράγμα στο Στενό Σερίφου ύψους 30 μέτρων. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2003. Η διαφορά του από τα δύο προηγούμενα είναι πως η κλίση των παρειών του είναι 0,7:1 και η περιεκτικότητά του σε τσιμέντο, που κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70 kg/m³.



Εικόνα (4): Φράγμα Στενό Σερίφου, άποψη από το δεξί κατάντη πρανές

Το φράγμα στην θέση Κόρης Γεφύρι της Χίου είναι το τέταρτο φράγμα τέτοιου τύπου και ενώ ξεκίνησε η κατασκευή του το 2005 ακόμα δεν έχει τελειώσει λόγω διακοπής των εργασιών. Το ύψος του είναι 41 μέτρα με συμμετρική διατομή(0,8:1) και περιεκτικότητα σε τσιμέντο 60 kg/m³.



Εικόνα (5): Φράγμα Κόρης Γεφύρι Χίου, άποψη από το αριστερό κατάντη πρανές

Ένα ακόμα φράγμα σκληρού επιχώματος βρίσκεται στο Ληθαίο Τρικάλων. Πρόκειται για ένα μικτού τύπου φράγμα το οποίο αποτελείται από κομμάτι σκληρού επιχώματος και κομμάτι γεωφράγματος. Έχει ύψος 32 μέτρων και κλίση 0.8:1 (στο τμήμα του σκληρού επιχώματος).

Τον Μάρτη παραδόθηκε το φράγμα Βαλσαμιώτη στα Χανιά που πρόκειται για το μεγαλύτερο Α.Κ.Σ.Ε. ως τώρα, στην χώρα μας, με ύψος 57 μέτρα. Η περιεκτικότητα του σε τσιμέντο δεν ξεπερνάει τα 90 kg/m^3 .



Εικόνα (6): Φράγμα Βαλσαμιώτη Χανίων, άποψη από το δεξί αντέρεισμα

Τέλος κατασκευάζεται ένα ακόμα φράγμα τέτοιου τύπου στα Φιλιατρά της Μεσσηνίας ύψους 55 μέτρων. Από το Νοέμβριο του 2013 βρίσκεται σε διακοπή εργασιών.



Εικόνα (7): Φράγμα Φιλιατρών Μεσσηνίας, άποψη απο το δεξι κατάντι πρανές

Κεφάλαιο 2: Δυναμική Ελαστική Ανάλυση

2(i) Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το φράγμα ως ομοιογενής διατμητική δοκός

Η θεωρία του φράγματος ως διατμητική δοκός στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

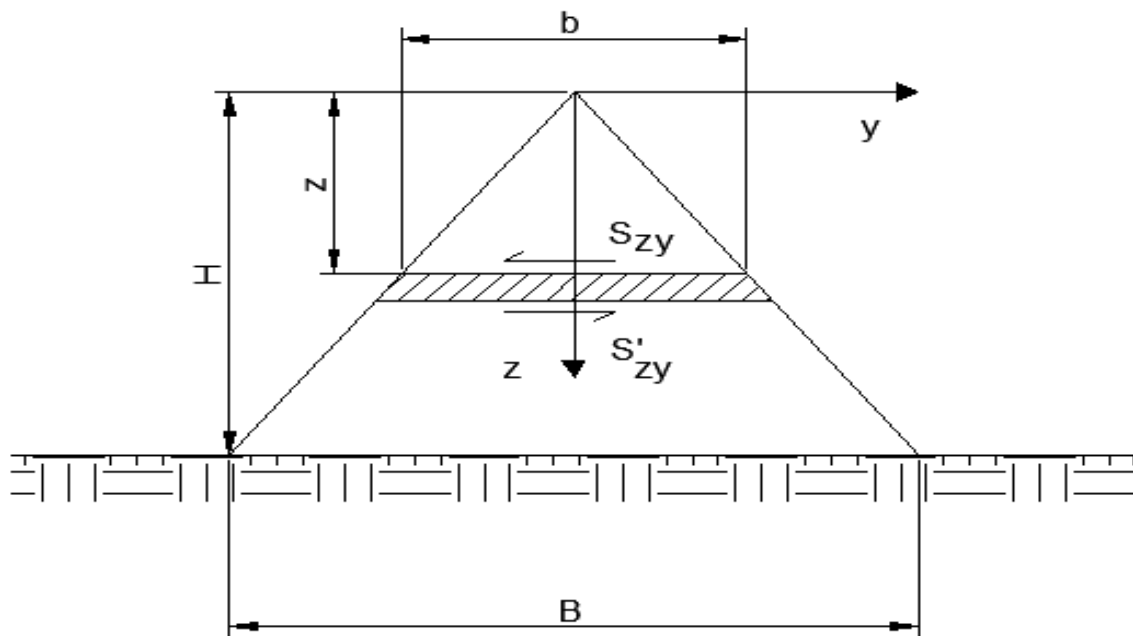
- 1) Το φράγμα είναι μια δοκός με μεταβλητή διατομή σχήματος σφήνας. Οι μετατοπίσεις σημείων στην ίδια οριζόντια διατομή είναι οριζόντιες και ομοιόμορφες.
- 2) Η μόνη παραμόρφωση που παράγεται στο φράγμα είναι η διατμητική παραμόρφωση
- 3) Το φράγμα εξετάζεται σε δύο διαστάσεις. Ως εκ τούτου η επίδραση της κοιλιάδας αμελείται. Βέβαια για μήκη φράγματος μεγαλύτερα από 4-5 φορές του ύψους του φραγματός η επίδραση αυτή μειώνεται σημαντικά οπότε και γίνεται αποδεκτή η αμέλησή της.

Από ισορροπία δυνάμεων στο γραμμοσκιασμένο τμήμα του σχήματος (2) έχουμε:

$$S'_{zy} - S_{zy} = \frac{\partial S_{zy}}{\partial z} dz + S_{zy} - S_{zy} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Οπότε:

$$\rho b dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial S_{zy}}{\partial z} dz = \frac{\partial (b\tau)}{\partial z} dz \quad (1)$$



Σχήμα (2): Φράγμα ως διατμητική δοκός

Όπου

u : μετατόπιση κατά την διεύθυνση y

ρ : πυκνότητα του υλικού

G : μέτρο διάτμησης

H : ύψος του φράγματος

S : διατμητική δύναμη

Με την βοήθεια της σχέσης μεταξύ διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων,

$$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z}$$

έχουμε από την σχέση (1)

$$\rho b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial (bG \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z}$$

Και αφού το πλάτος b του φράγματος είναι ανάλογο του ύψους z

$$\frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

Αυτή είναι η διαφορική εξίσωση που καθορίζει την ταλάντωση του φράγματος. Έστω η γωνιακή συχνότητα p και η ιδιομορφή της ταλάντωσης $\phi(z)$. Τότε η u γίνεται:

$$u = \phi e^{ipt}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2)

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{d\phi}{dz} + \frac{p^2}{c^2} \phi = 0 \quad (3)$$

Όπου c η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Η γενική λύση της εξίσωσης (3) με C_1 και C_2 σταθερές ολοκλήρωσης προκύπτει

$$\phi = C_1 J_0\left(\frac{pz}{c}\right) + C_2 Y_0\left(\frac{pz}{c}\right)$$

Εισάγοντας τις συνοριακές συνθήκες, δηλαδή τον μηδενισμό της διατμητικής τάσης στην κορυφή του φράγματος και της μετατόπισης στην βάση του, έχουμε

$$C_1 J_0\left(\frac{pH}{c}\right) = 0, \quad C_2 = 0$$

Όπου $J_0(x)$ η συνάρτηση του Bessel μηδενικής τάξης. Έτσι η χαρακτηριστική εξίσωση γίνεται

$$\frac{pH}{c} = z_i$$

όπου z_i η τιμή του z για την οποία η $J_0(z)$ είναι 0. Στο πίνακα (1) φαίνονται οι τιμές του z_i για τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές.

Ιδιομορφή	z_i
1η	2.4048
2η	5.5201
3η	8.6537
4η	11.7915

Πίνακας (1)

Από τα παραπάνω προκύπτει η ιδιοπερίοδος του φράγματος ως εξής

$$T_i = \frac{2\pi H}{z_i c}$$

και η ιδιομορφή του φράγματος

$$\phi_i(z) = J_0\left(\frac{z_i z}{H}\right) \quad (4)$$

Το φράγμα ως καμπτική δοκός

Θα παραθέσουμε εδώ τις παραδοχές της τεχνικής θεωρίας της κάμψης κατά Timoshenko (1921) καθώς και την διαφορική εξίσωση που ερμηνεύει το πρόβλημά μας.

- 1) Η κατακόρυφη μετατόπιση w μιας δοκού εξαρτάται μόνο από την θέση x : $w = w(x)$. Αυτό σημαίνει πως όλα τα σημεία μιας ορθής διατομής (x =σταθ.) έχουν την ίδια κατακόρυφη μετατόπιση. Επίσης το ύψος της διατομής παραμένει σταθερό ($\epsilon_{zz}=0$)
- 2) Διατομές που πριν την κάμψη ήταν επίπεδες, παραμένουν επίπεδες. Για να συμβαίνει αυτό, μια ορθή διατομή εκτός από την κατακόρυφη μετατόπιση $w(x)$ υφίσταται και μια στροφή $\psi(x)$
- 3) Ορθές διατομές παραμένουν και μετά την κάμψη ορθές, δηλαδή η σχετική γωνιά στροφής των διατομών είναι μηδεν και: $\psi = -\frac{dw}{dx}$

Η διαφορική εξίσωση είναι η εξής:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{EI(x)} q(x)$$

όπου:

x ο άξονας ο κάθετος στο φράγμα

w η οριζόντια μετατόπιση

E το μέτρο ελαστικότητας

$I(x)$ η μεταβλητή ροπή αδράνειας (λόγω του μεταβλητού πλάτους)

$q(x)$ το σεισμικό φορτίο που ασκείται

Η ιδιοπερίοδος της καμπτικής ταλάντωσης αυτού του 'προβόλου' προκύπτει:

$$T = 1,183 \frac{H^2}{B} \sqrt{\frac{12\rho}{E}}$$

όπου

B το πλάτος του φράγματος

H το ύψος του φράγματος

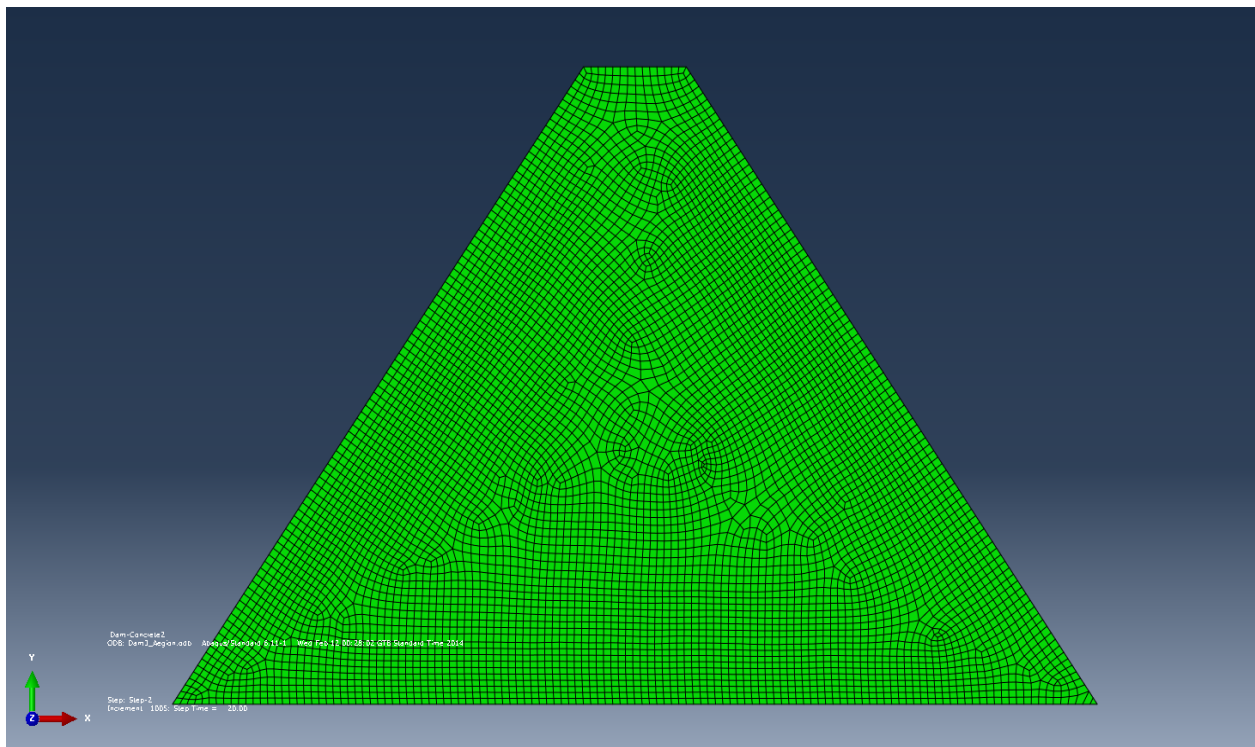
ρ η πυκνότητα του φράγματος

E το μέτρο ελαστικότητας

2(ii) Ελαστική ανάλυση

Το υπό εξέταση φράγμα

Το φράγμα που επιλέξαμε να αναλύσουμε είναι ένα μεσαίου τύπου Α.Κ.Σ.Ε. με ύψος 40 μέτρων. Η συμμετρική κλίση είναι 0.7:1(Ο:Κ) οπότε το πλάτος του προκύπτει 63 μέτρα. Σε αυτή την φάση δεν έχουμε λάβει υπόψη το μήκος του, όμως το έχουμε θεωρήσει αρκετά μεγάλο έτσι ώστε στο κέντρο του φράγματος να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι δεν παίζει ρόλο η παρουσία της τρίτης διάστασης. Το πλάτος στέψης ορίζεται 7 μέτρα.



Εικόνα (8): Το φράγμα μας

Τα δεδομένα για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος προέκυψαν από διάφορες δοκιμές στα πλαίσια ποιοτικών ελέγχων που εφαρμόζονται απαραίτητως από μελετητικά-συμβουλευτικά γραφεία για την σωστή κατασκευή του φράγματος. Έτσι έχουμε:

Πυκνότητα υλικού $\rho = 2.21 \text{Mgr/m}^3$

Μέτρο ελαστικότητας $E = 1,92 \text{GPa}$, συντελεστής poisson $\nu=0,2$

Μέτρο διάτμησης $G = E/[2*(1+\nu)] = 800 \text{MPa}$

Οριακή Θλιπτική Τάση $\sigma_{\theta\lambda} = 3,5 \text{MPa}$

Οριακή εφελκυστική τάση $\sigma_{εφ} = 0,3\text{MPa}$

Να ληφθεί υπόψη ότι αυτές οι τιμές προκύπτουν από υλικό ηλικίας 28 ημερών. Ως γνωστόν με την πάροδο του χρόνου οι αντοχές του σκυροδέματος αυξάνονται.

Για την σεισμική απόκριση του φράγματος χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Abaqus που λειτουργεί με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε είναι τετραγωνικά, τετρακομβικά στοιχεία. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την φάση είναι ελαστικό χωρίς όρια αστοχίας.

Από την θεωρία του διατμητικού κύματος καταλήξαμε στον ορισμό της περιόδου του φράγματος. Στην δική μας περίπτωση έχουμε:

$$T_1 = \frac{2\pi H}{Z_1 C} = \frac{2*\pi*45}{2,4048*600} = 0,196\text{sec}$$

Όπου $c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx 600 \text{ m/s}$, η ταχύτητα διατμητικού κύματος

Αν λάβουμε υπόψη μας και το $\lambda = h/H = 0,11$, όπου λ ο λόγος περικοπής (truncation ratio) δηλαδή το πόσο μεγάλο μέρος του τριγώνου έχουμε κόψει για δημιουργήσουμε το πλάτος στέψης που θέλουμε, τότε ο τύπος γίνεται

$$T_1 = \frac{2\pi H}{\alpha_1 C} = \frac{2*\pi*45}{2,4586*600} = 0,19\text{sec}$$

όπου α_1 η τιμή από τον πίνακα (2) για $\lambda = 0,11$ και για πρώτη ιδιομορφή ταλάντωσης

Ιδιομορφή i			
λ	1	2	3
0.00	2.405	5.520	8.654
0.03	2.409	5.541	8.703
0.05	2.416	5.576	8.783
0.10	2.448	5.726	9.096
0.15	2.501	5.948	9.525
0.20	2.574	6.233	10.048
0.25	2.668	6.580	10.666
0.30	2.786	6.994	11.388
0.35	2.930	7.485	12.231
0.40	3.107	8.067	13.222
0.45	3.323	8.763	14.400
0.50	3.588	9.605	18.818

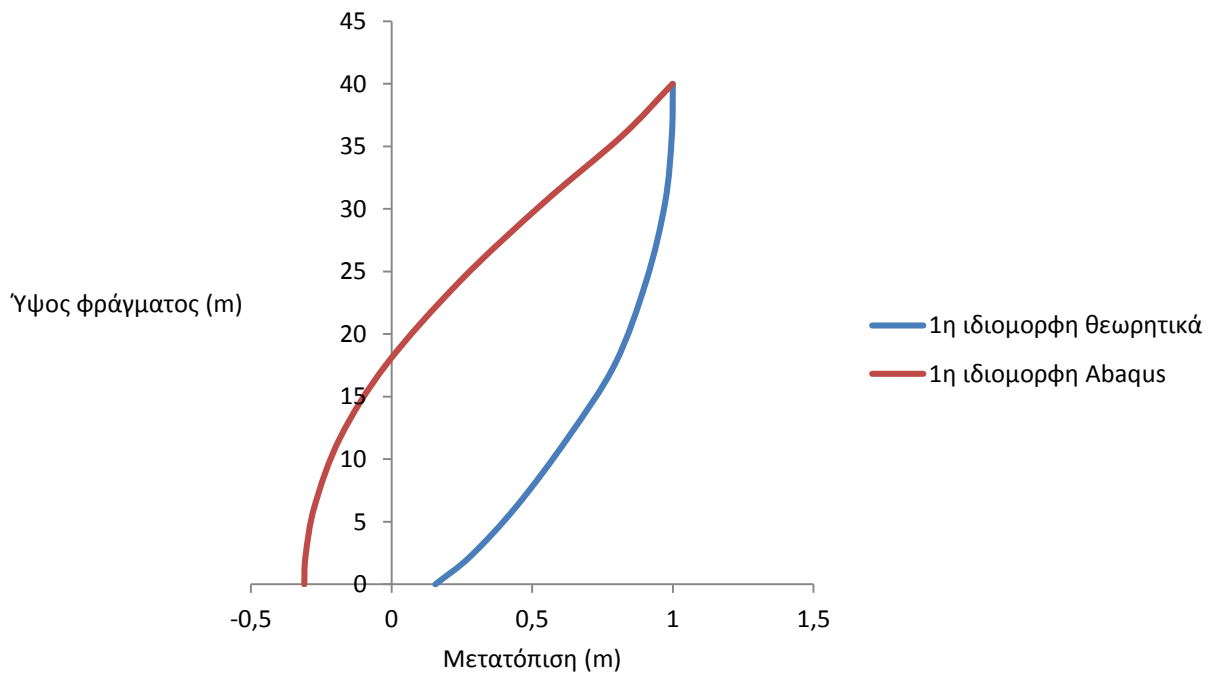
Πίνακας (2): Τιμές α_i

Από τον τύπο της περιόδου του φράγματος ως καμπτικού προβόλου έχουμε:

$$T = 1,183 \frac{H^2}{B} \sqrt{\frac{12\rho}{E}} = 1,183 \frac{45^2}{63} \sqrt{\frac{12*2,21}{1920000}} = 0.14sec$$

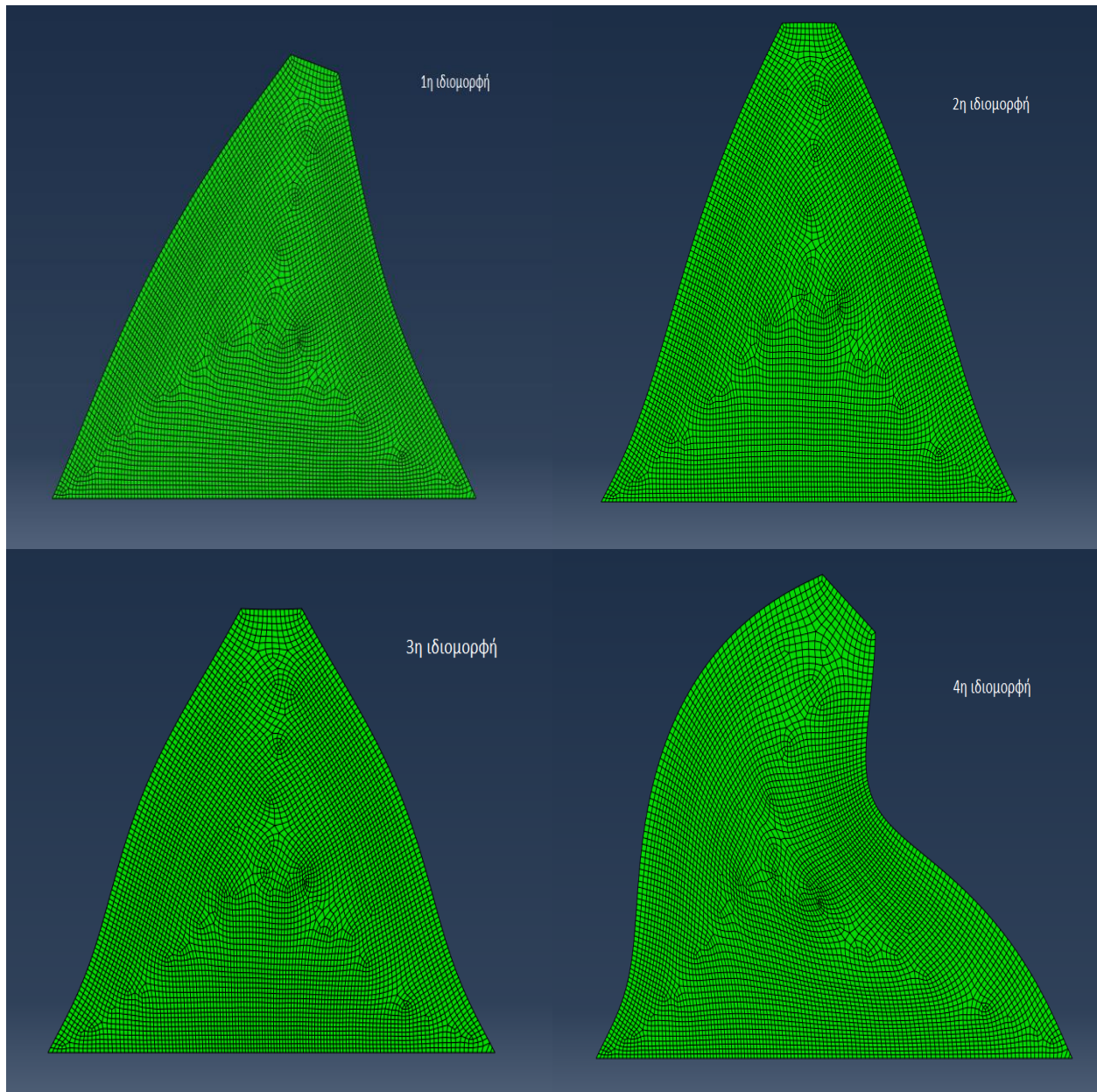
Το Abaqus μας δίνει $T_{Abaqus} = 0.17sec!!$, τιμή που μας ευχαριστεί ιδιαίτερα διότι βρίσκεται ανάμεσα στις δύο θεωρητικές ιδιοπεριόδους όπως ακριβώς και το υλικό του φράγματός μας που ταλαντεύεται μεταξύ σκυροδέματος (καμπτική λειτουργία) και επιχώματος(διατμητική λειτουργία).

Οι πρώτες ιδιομορφές που προέκυψαν τόσο από την θεωρητική σχέση (4) όσο και από το Abaqus φαίνονται στο διάγραμμα (1). Παρατηρούμε ότι η καμπύλη του Abaqus δεν ταιριάζει με την θεωρητική πράγμα το οποίο περιμέναμε αφού το φράγμα μας δεν συμπεριφέρεται ως καθαρά διατμητική δοκός.



Διάγραμμα (1): Ιδιομορφές φράγματος

Στην εικόνα (9) παρατηρούμε τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές του φράγματος μας έτσι όπως μας της εμφανίζει το Abaqus.



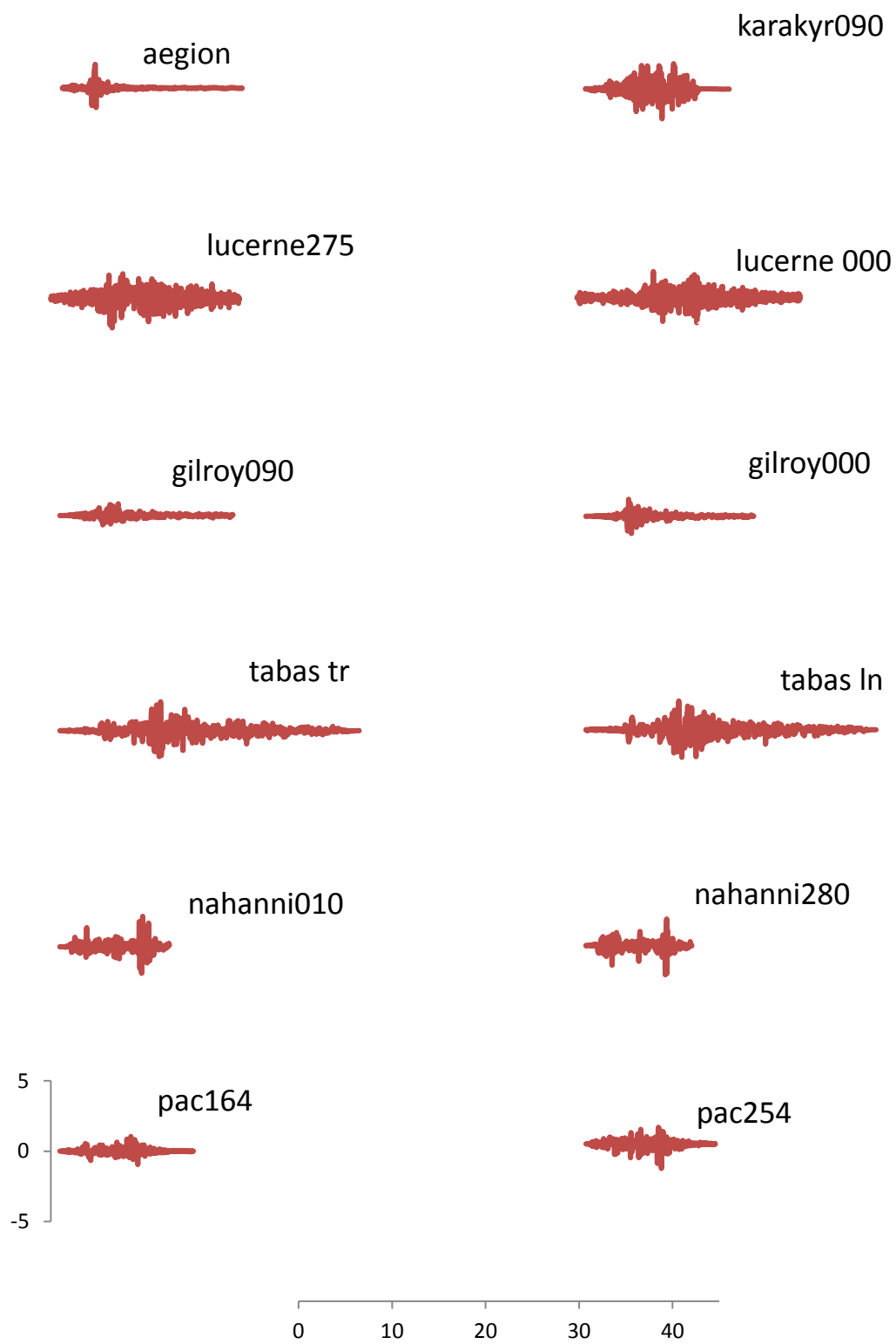
Εικόνα (9): Οι πρώτες τέσσερις ιδιομορφές του φράγματος

Με βάση, οπότε, την περίοδο που είχαμε υπολογίσει και επαληθεύσει επιλέξαμε διάφορα επιταχυνσιογραφήματα από ολόκληρο τον κόσμο για να δούμε πως αποκρίνεται το φράγμα μας. Οι

διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα χαρακτηριστικά τους στοιχεία φαίνονται στον Πίνακα (3). Τα επιταχυνσιογραφήματα αυτών των διεγέρσεων φαίνονται στον πίνακα (4).

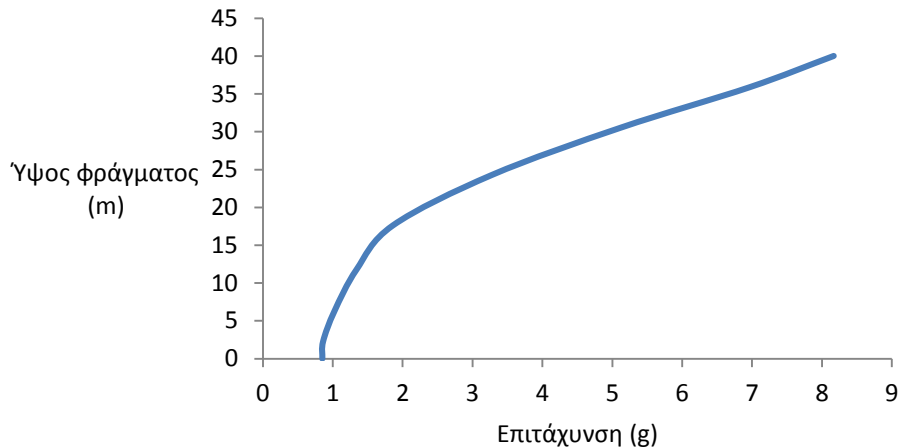
Σεισμός	Τοποθεσία	Χρονολογία	Μέγεθος(Mw)	PGA(g)	PGV(m/s)
Tabas TR	Κεντρικό Ιράν	1978	7.4	0.85	1.22
Tabas LN	Κεντρικό Ιράν	1978	7.4	0.84	0.98
Pac164	Pacoima Dam,San Fernando,California	1971	6.7	1.15	1.13
Pac254	Pacoima Dam,San Fernando,California	1971	6.7	1.05	0.58
Gilroy000	San Francisco,California	1989	6.9	0.411	0.32
Gilroy090	San Francisco,California	1989	6.9	0.473	0.34
Nahanni010	Northwest Territories,Canada	1985	6.9	0.978	0.46
Nahanni280	Northwest Territories,Canada	1985	6.9	1.096	0.46
Lucerne000	San Bernardino,California	1992	7.3	0.785	0.32
Lucerne275	San Bernardino,California	1992	7.3	0.721	0.98
Carakyr090	Gazli,Uzbekistan	1976	6.8	0.718	0.72
Lgpc090	San Francisco,California	1989	6.9	0.605	0.51
Aegion	Πελοπόννησος,Ελλάδα	1995	6.2	0.54	

Πίνακας (3): Διεγέρσεις



Πίνακας (4): Επιταχυνσιογραφήματα

Επιταχύνσεις



Διάγραμμα (2): *Tabas TR*, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα

Στο διάγραμμα (2) εύκολα παρατηρείται η ενίσχυση της επιταχύνσεως από την βάση στην κορυφή. Ενδεικτικά έχουμε:

$$A = \frac{\text{ακορ}}{\text{αβαση}}$$

$$A_{\text{pac164}} = \frac{4.59}{1.10} = \mathbf{4.2} \quad , \quad A_{\text{pac254}} = \frac{3.24}{0.76} = \mathbf{4.26}$$

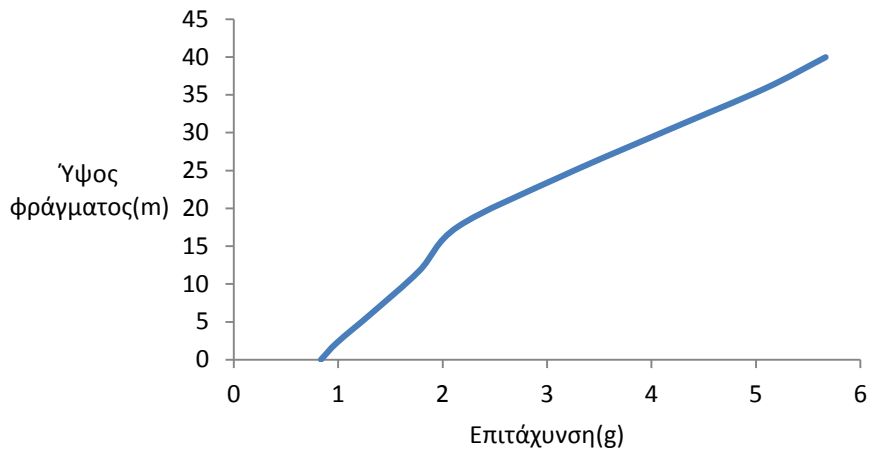
$$A_{\text{Tabas LN}} = \frac{5.67}{0.84} = \mathbf{6.75} \quad , \quad A_{\text{Tabas TR}} = \frac{8.17}{0.85} = \mathbf{9.61!!}$$

Αλλά και το Αίγιο $A_{\text{Αίγιο}} = \frac{2,17}{0,55} = \mathbf{3,95}$ παρότι το φάσμα απόκρισης για το

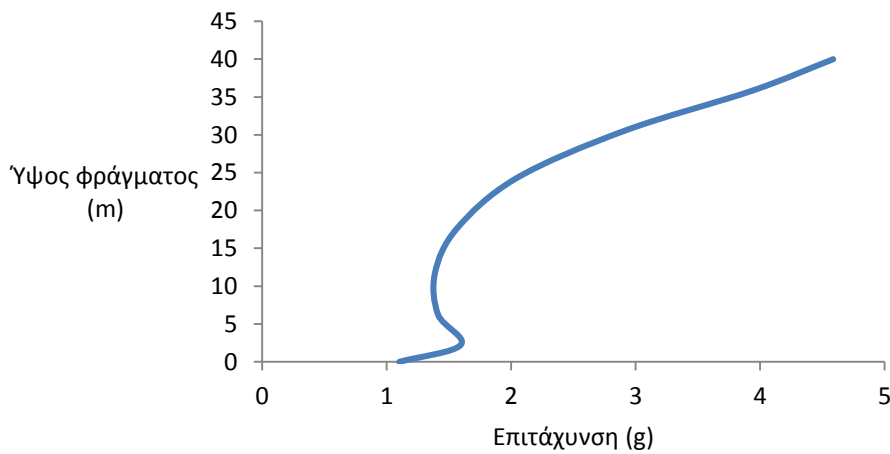
συγκεκριμένο επιταχυνσιογράφημα δεν είχε μέγιστο για την δική μας περίοδο. Βλέπουμε λοιπόν ότι δημιουργούνται πολύ μεγάλες τιμές της ενίσχυσης στο φράγμα και κατ' επέκταση μεγάλες αδρανειακές δυνάμεις. Έτσι ένας σεισμός με επιτάχυνση 0,5g μπορεί εύκολα να

ξεπεράσει τα 2g στην κορυφή και κατά αυτόν τον τρόπο να δημιουργηθούν ισχυρές εφελκυστικές τάσεις στην βάση του φράγματος όπως θα δούμε παρακάτω.

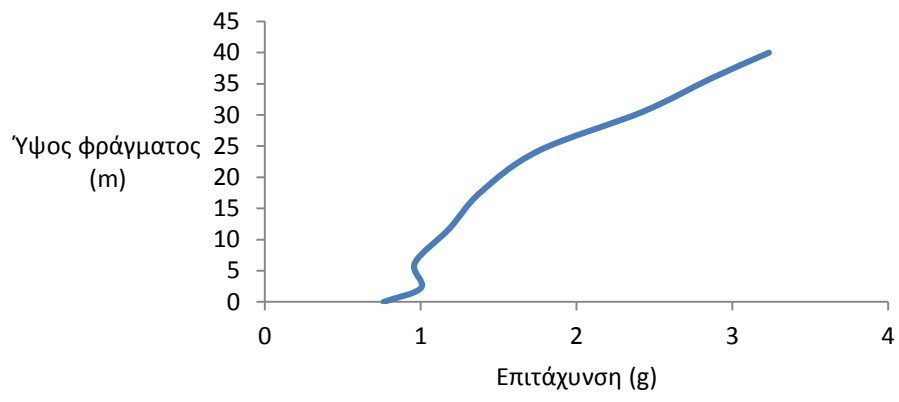
Στα διαγράμματα (3)-(13) βλέπουμε την ελαστική ενίσχυση της επιταχύνσεως για διάφορες διεγέρσεις



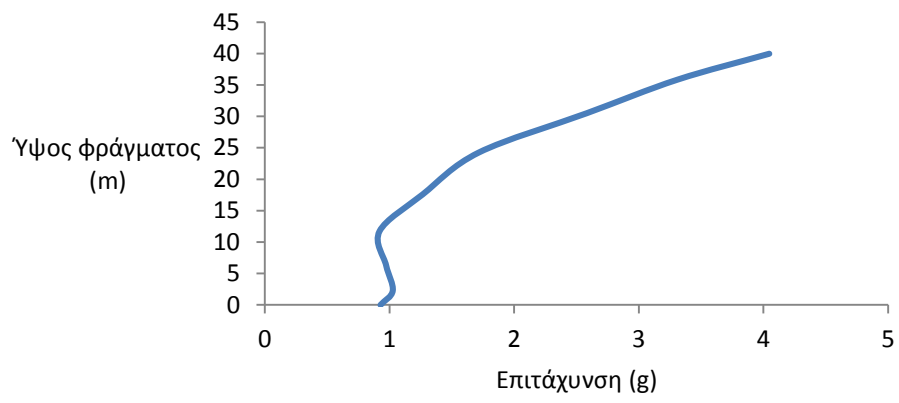
Διάγραμμα (3): Tabas LN, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



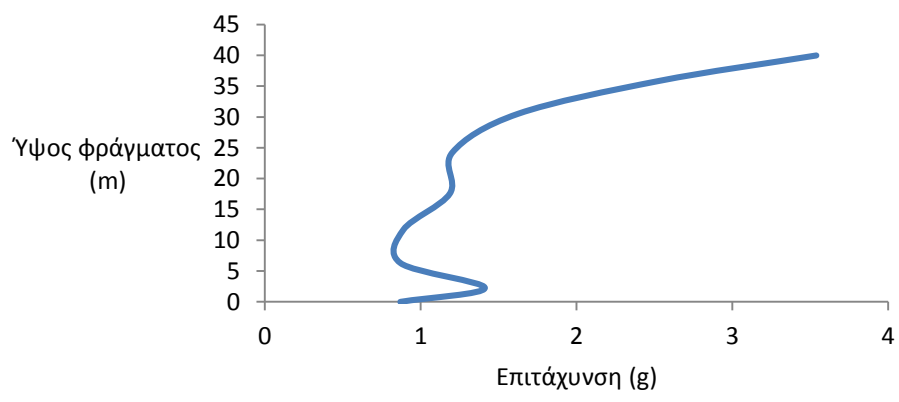
Διάγραμμα (4): Ras 164, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



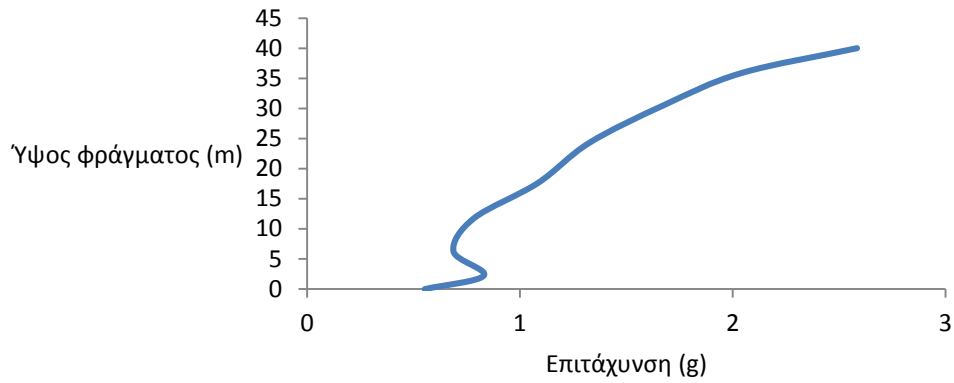
Διάγραμμα (5): Pac 254, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



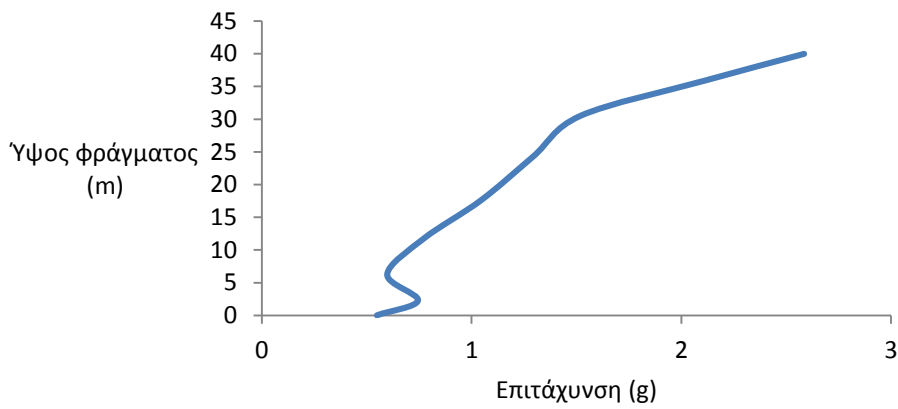
Διάγραμμα (6): Nahanni 010, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



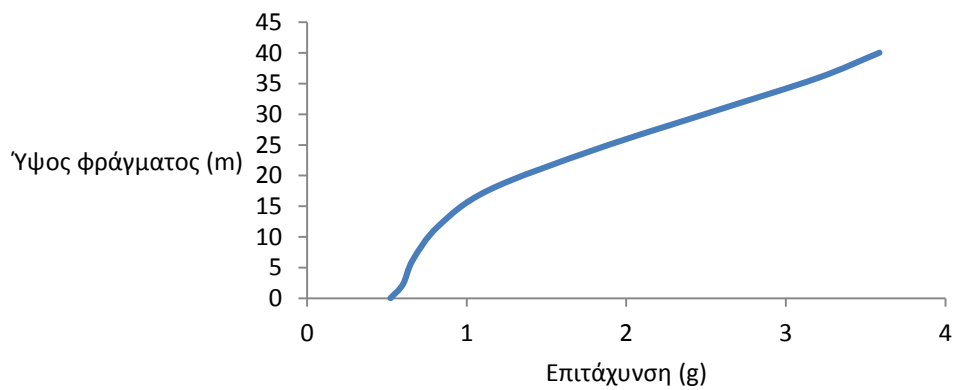
Διάγραμμα (7): Nahanni 280, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



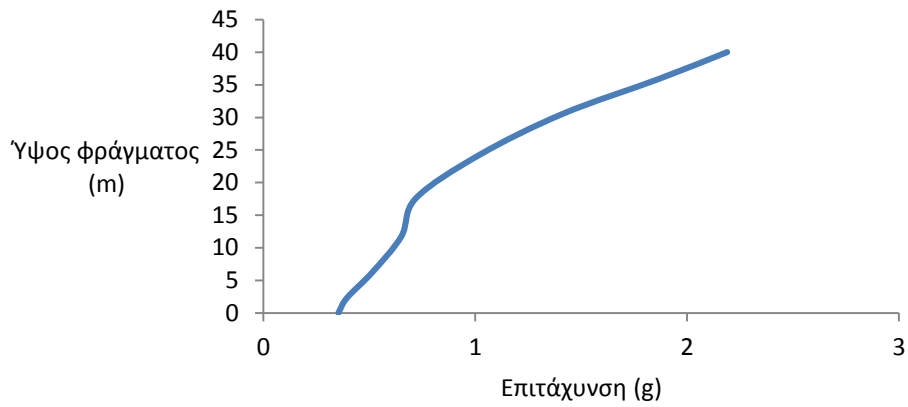
Διάγραμμα (8): *Lucerne 000*, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



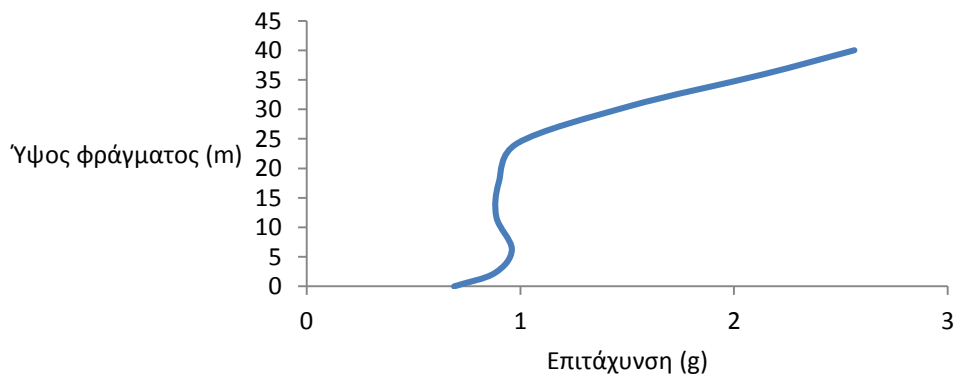
Διάγραμμα (9): *Lucerne 275*, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



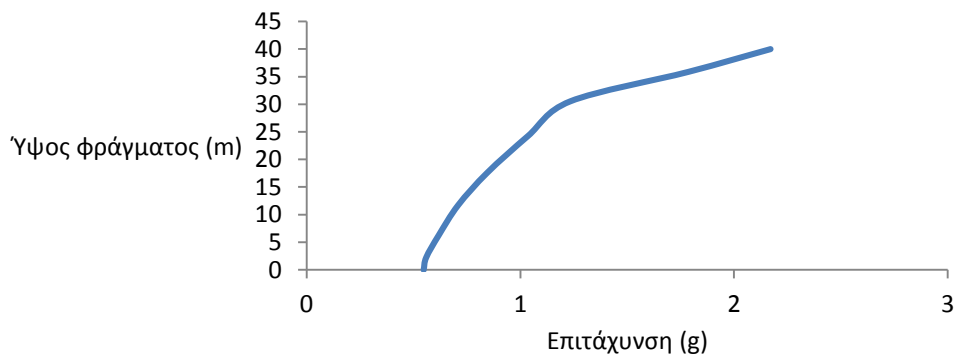
Διάγραμμα (10): *Gilroy 000*, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



Διάγραμμα (11): Gilroy 090, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



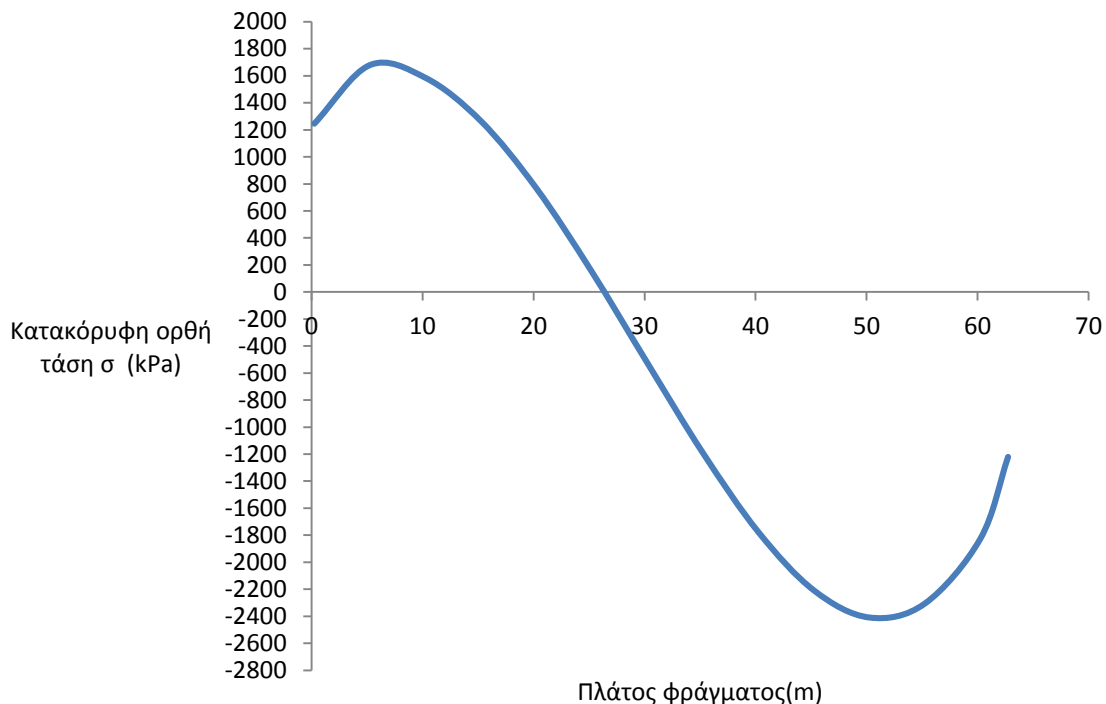
Διάγραμμα (12): Karakyr 090, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα



Διάγραμμα (13): Aegion, μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στον άξονα

Κατακόρυφες ορθές τάσεις

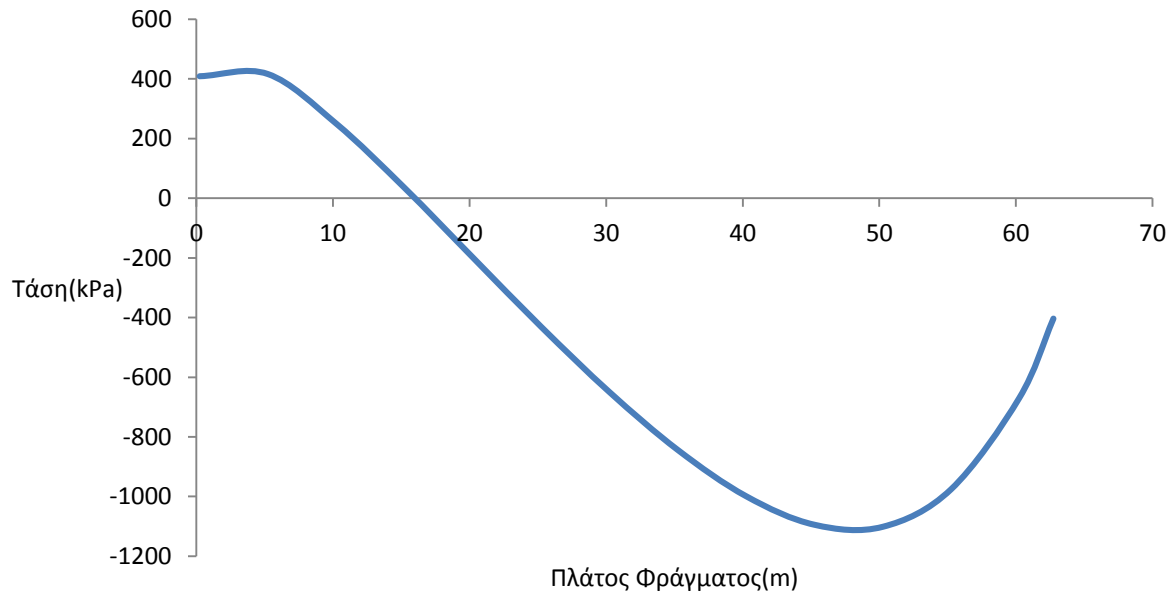
Προφανώς αυτό που μας ενδιαφέρει στην ανάλυση μας είναι να δούμε κατά πόσο θα αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις στο φράγμα ικανές να ξεπεράσουν το όριο αστοχίας σε εφελκυσμό που όπως είπαμε είναι ίσο με $0.3\text{MPa}=300\text{kPa}$.



Διάγραμμα (14): Σεισμός Tabas TR, μέγιστη κατακόρυφη τάση στην βάση

Τα θετικά του άξονα γ συμβολίζουν τον εφελκυσμό ενώ τα αρνητικά την θλίψη. Όσον αφορά τις θλιπτικές τάσεις δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα αφού τα 2400kPa που αναπτύσσονται δεν ξεπερνάνε τα 3500kPa που είναι η θλιπτική αντοχή του υλικού. Απο την άλλη όμως, βλέπουμε πως οι αναπτυχθείσες εφελκυστικές τάσεις όχι μόνο ξεπερνάνε το όριο εφελκυσμού του υλικού αλλά φτάνουν τα 1700kPa . Το υλικό δεν μπορεί παρά να συμπεριφερθεί ανελαστικά!

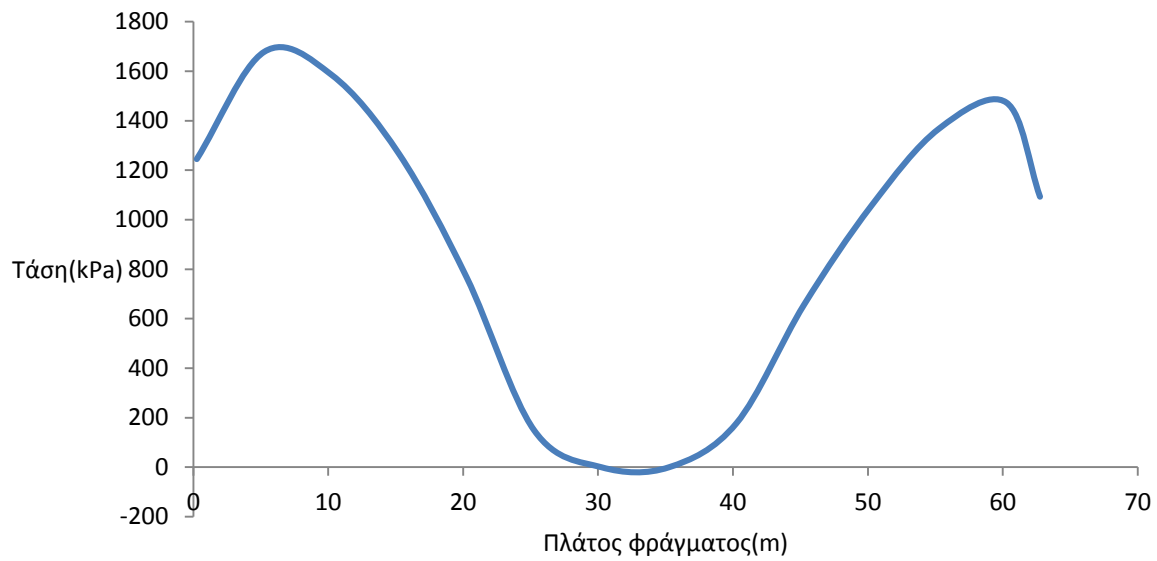
Θα μπορούσε κανείς να πει ότι τέτοιοι σεισμοί είναι απίθανο να συμβούν στην Ελλάδα και δεν είναι αντιπροσωπευτική η φόρτιση. Ας δούμε λοιπόν πως συμπεριφέρθηκε το φράγμα στον σεισμό του Αιγίου το 1995.



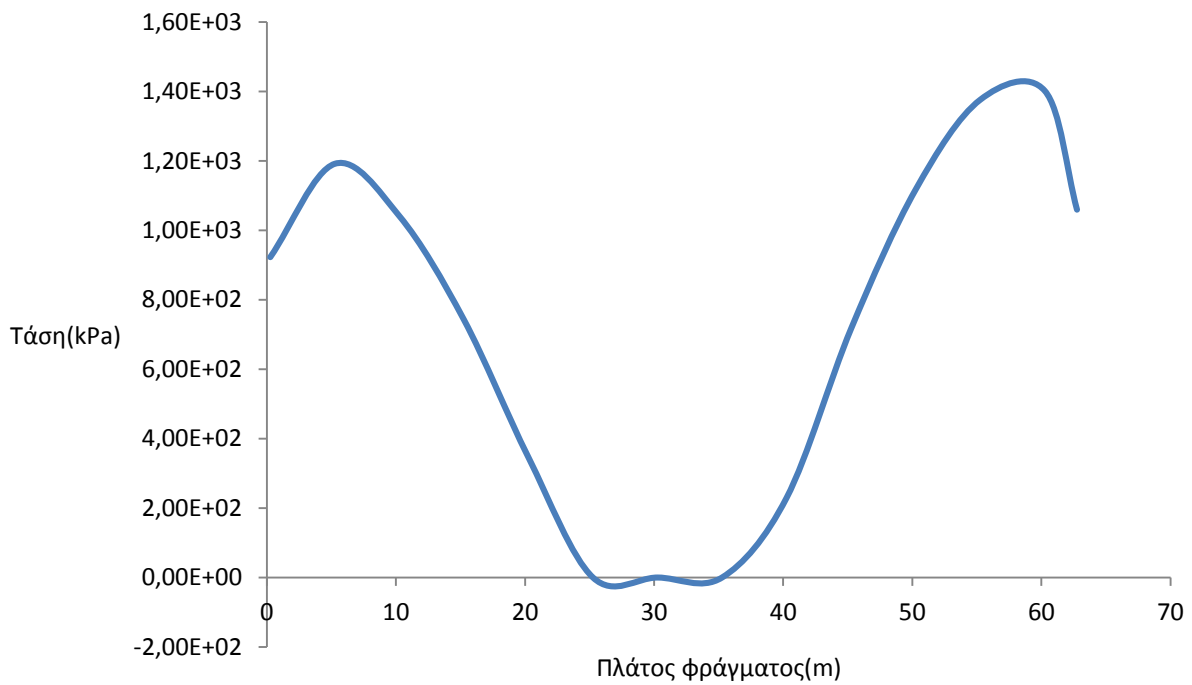
Διάγραμμα (15): Σεισμός Αιγίου 1995, κατακόρυφες τάσεις την στιγμή 4,78537

Βλέπουμε ότι ακόμα και στον σεισμό του Αιγίου υπάρχουν στιγμές που οι αναπτυχθείσες τάσεις ξεπερνούν τα όρια αστοχίας του υλικού σε εφελκυσμό ($400\text{kPa} > 300\text{kPa}$). Στα διαγράμματα (16) – (27) βλέπουμε την συμπεριφορά του φράγματος μας για όλες τις διεγέρσεις που του επιβλήθηκαν. Λόγω της ανακυκλικής μορφής της φόρτισης οι εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται και από τις δύο πλευρές του φράγματος.

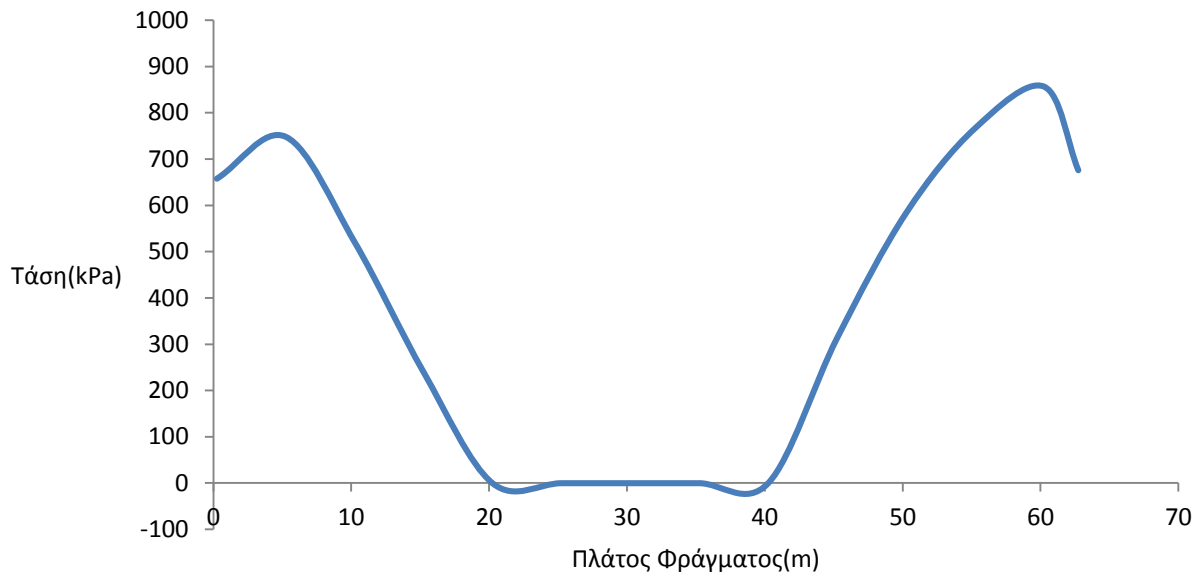
Ο πίνακας (5) μας δείχνει το ποσοστό της βάσης που έχει ξεπεράσει το όριο εφελκυστικής αντοχής.



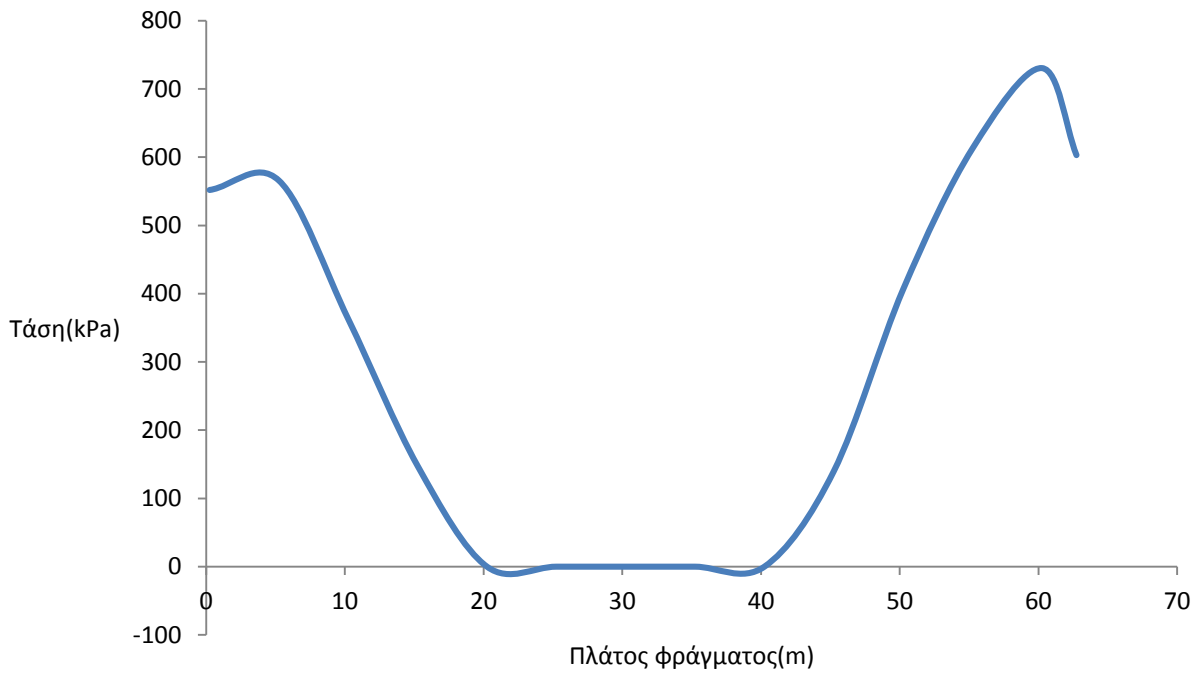
Διάγραμμα (16): Σεισμός Tabas TR, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



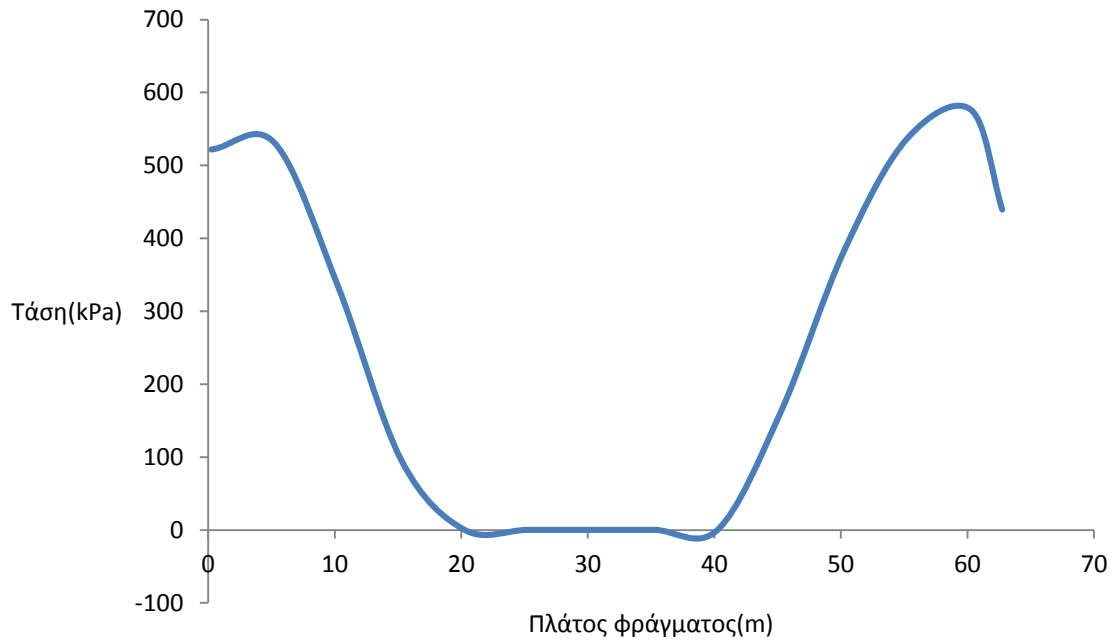
Διάγραμμα (17): Σεισμός Tabas LN, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



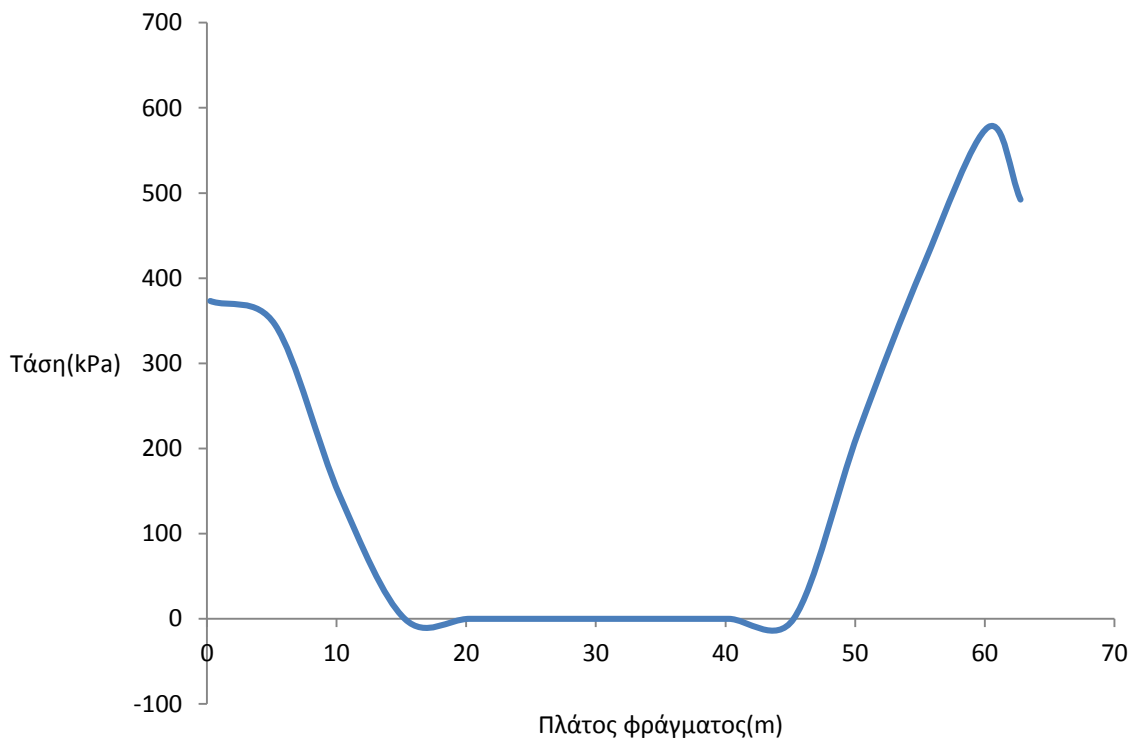
Διάγραμμα (18): Σεισμός Racoïta dam-164, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



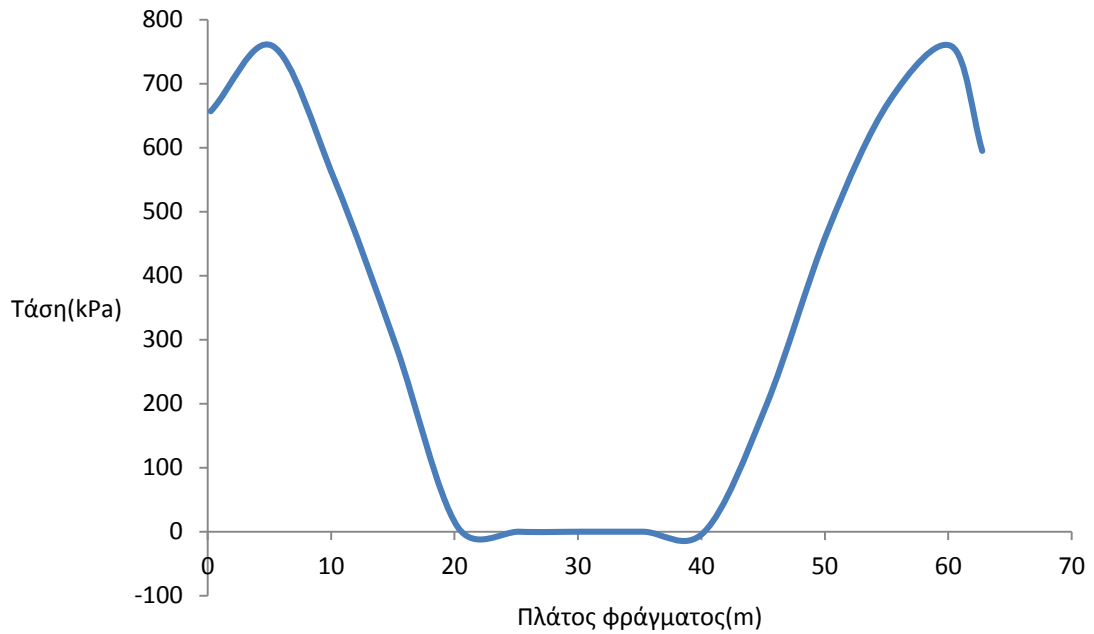
Διάγραμμα (19): Σεισμός Racoïta dam-254, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



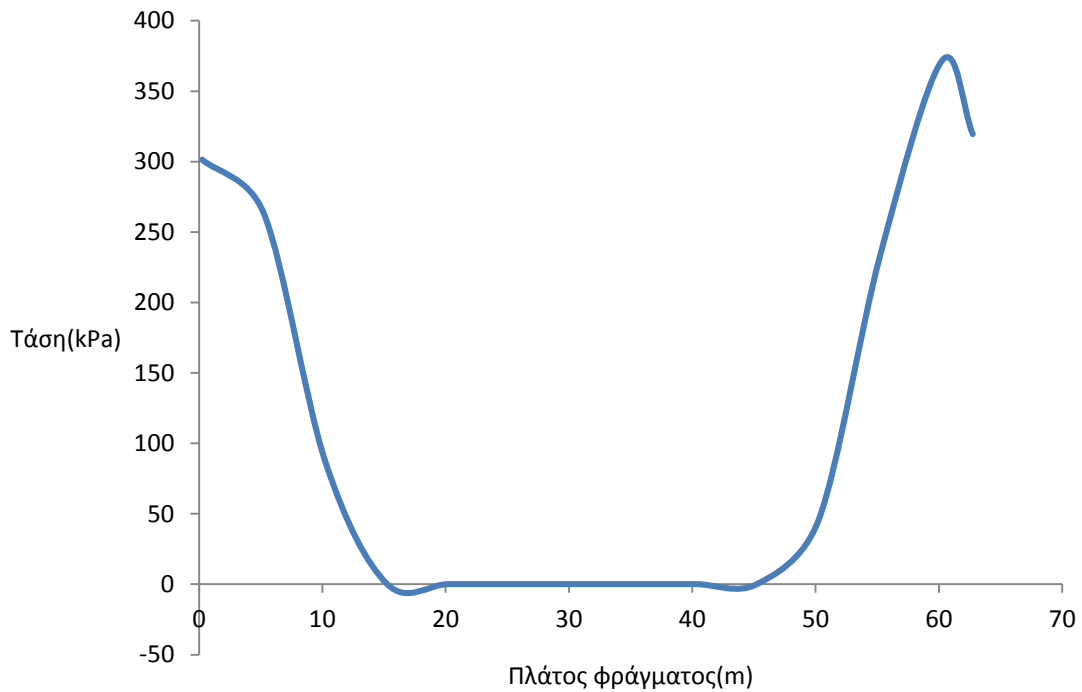
Διάγραμμα (20): Σεισμός Nahanni-010, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



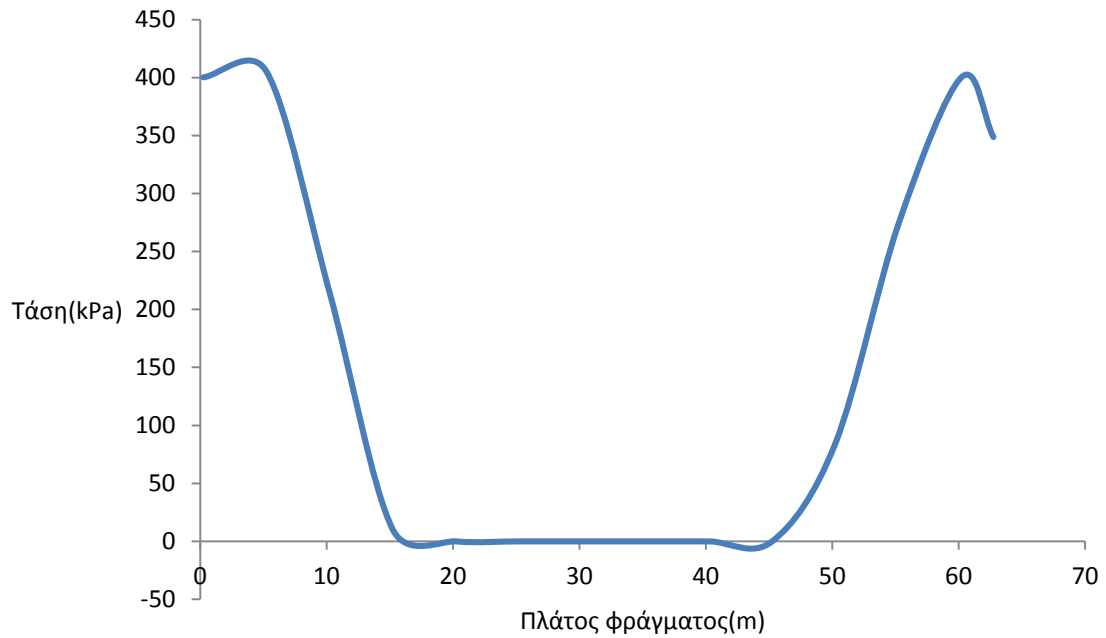
Διάγραμμα (21): Σεισμός Nahanni-280, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



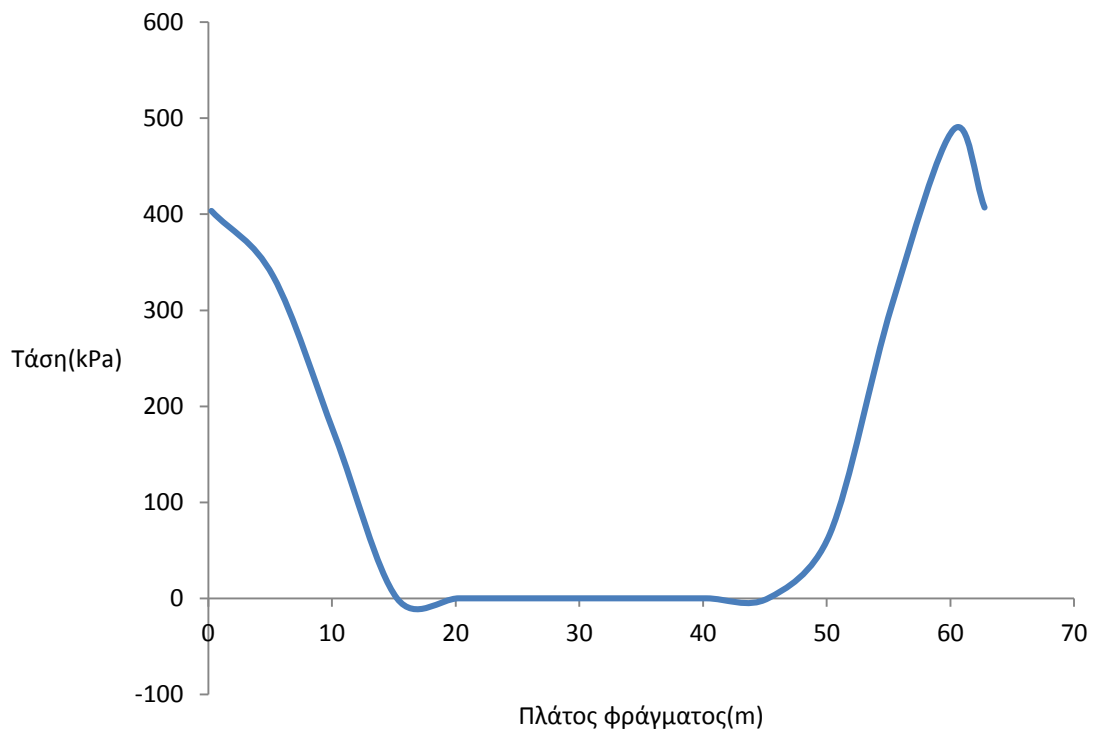
Διάγραμμα (22): Σεισμός Gilroy-000, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



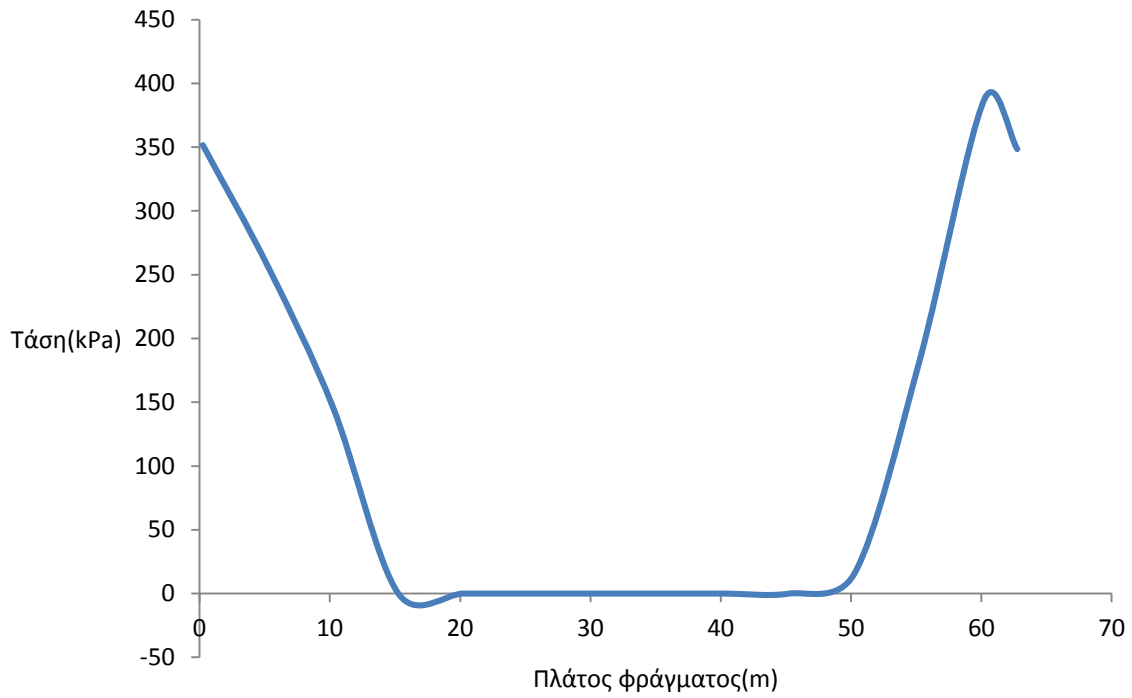
Διάγραμμα (23): Σεισμός Gilroy-090, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



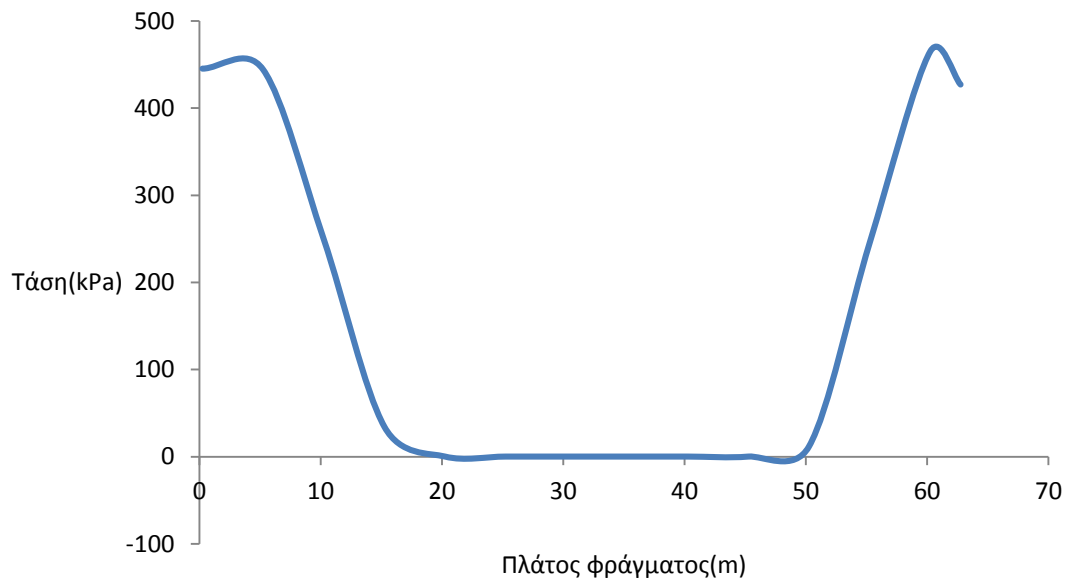
Διάγραμμα (24): Σεισμός Lucerne-000, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



Διάγραμμα (25): Σεισμός Lucerne-275, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



Διάγραμμα (26): Σεισμός Karakyr-090, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση



Διάγραμμα (27): Σεισμός Αιγίου 1995, μέγιστη εφελκυστική τάση στην βάση

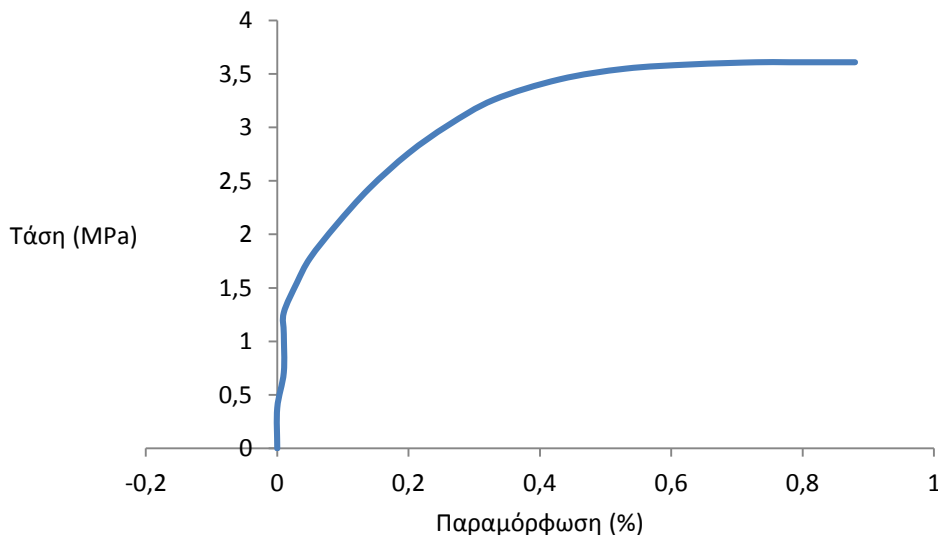
Σεισμός	Ποσοστό βάσης που ξεπερνάει την σεφ
Tabas TR	71%
Tabas LN	68%
Pac164	51%
Gilroy000	49%
Pac254	43%
Nahanni010	41%
Nahanni280	27%
Aegion	24%
Lucerne000	24%
Lucerne275	22%
Karakyr090	13%
Gilroy090	10%

Πίνακας (5): Ποσοστό υπέρβασης της σεφ

Κεφάλαιο 3:

Δυναμική Ανελαστική Ανάλυση

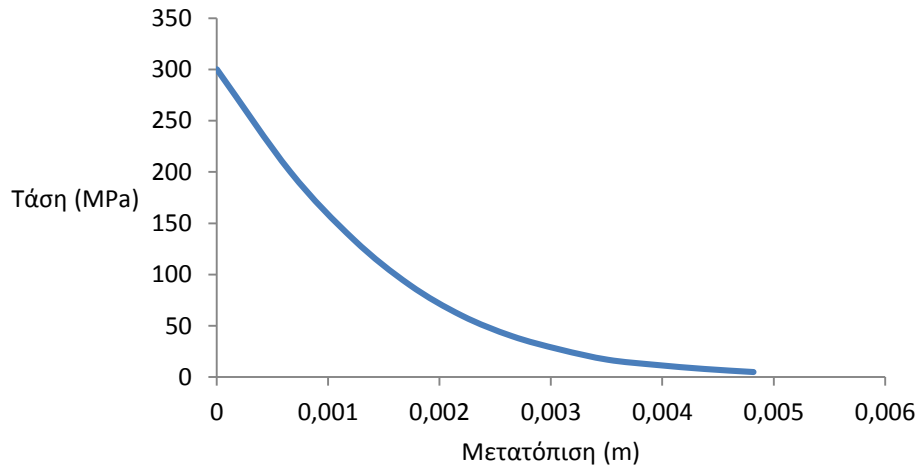
Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε ένα ανελαστικό μοντέλο πρέπει να έχουμε τις απαραίτητες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του υλικού σε θλίψη και εφελκυσμό. Δυστυχώς λόγω του ότι το υλικό αυτό έχει ως μόνη προδιαγραφή την αντοχή του σε θλίψη βρέθηκαν μόνο θλιπτικές καμπύλες. Η συμπεριφορά του σε εφελκυσμό προσομοιάστηκε από τις αντίστοιχες καμπύλες του συμβατικού σκυροδέματος. Το διάγραμμα (28) δείχνει την ανελαστικότητα που αναπτύσσεται στο υλικό μέχρι την στιγμή θραύσης του.



Διάγραμμα (28): Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σε θλίψη του υλικού μας

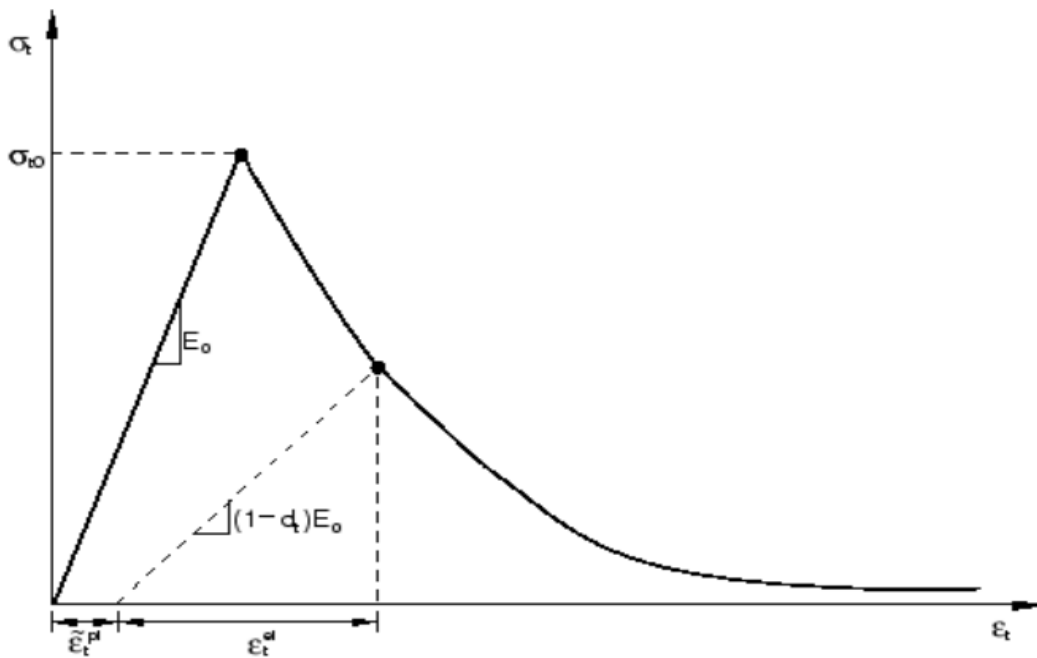
Για την συμπεριφορά του υλικού μετά το όριο θραύσης χρησιμοποιήσαμε την καμπύλη του Abaqus για το σκυρόδεμα, που συνδέει τις μετατοπίσεις που παρατηρούνται μετά την αστοχία

με μείωση της αντοχής του υλικού, δηλαδή προσομοιάζει την έναρξη ρωγμής. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα (29).



Διάγραμμα (29): Καμπύλη Μετά-αστοχίας

Το ανάλογο του σε καμπύλη εφελκυσμού τάσεων-παραμορφώσεων βρίσκεται στο σχήμα(3).



Σχήμα (3): Καμπύλη εφελκυσμού

όπου

σ_{to} η τάση αστοχίας σε εφελκυσμό

E_0 το αρχικό μέτρο ελαστικότητας

$(1-dt)E_0$ το απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας

ϵ_t^{el} η ελαστική παραμόρφωση μετά την απομείωση

ϵ_t^{pl} η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση

dt δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας που κυμαίνεται από 0 έως 1 ανάλογα με την παραμόρφωση που έχει φτάσει το υλικό μετά την αστοχία, $dt=(E_0-E_1)/E_0$

Ο τελευταίος αυτός δείκτης είναι πολύ σημαντικός διότι μας δείχνει ακριβώς την κατάσταση του υλικού και κατά πόσο το έχει βλάψει ο σεισμός. Θα τον χρησιμοποιούμε στα παρακάτω διαγράμματα ως DamageT (tensile damage).

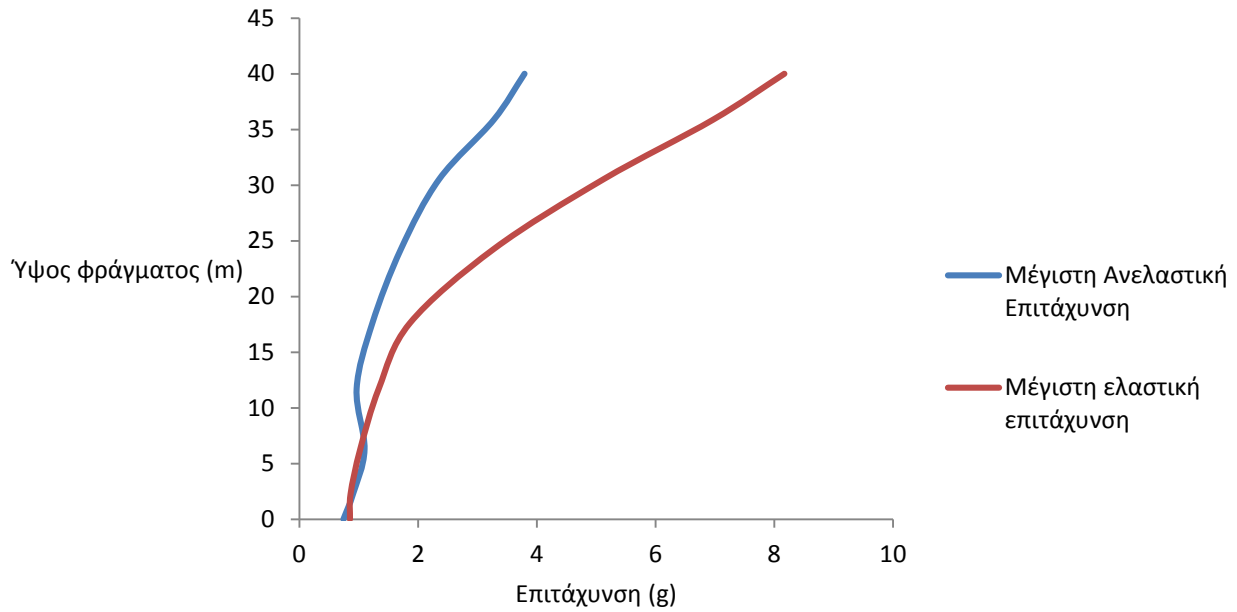
Επιταχύνσεις

Σεισμός Tabas TR

Στο διάγραμμα (30) φαίνεται ξεκάθαρα η μείωση της επιτάχυνσης όταν το υλικό συμπεριφέρεται ανελαστικά σε σχέση με την ελαστική απόκριση. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: ο πρώτος είναι ότι το υλικό πλέον έχει μια τάση αντοχής την οποία δεν μπορεί να ξεπεράσει. Έτσι υπάρχει και μια επιτάχυνση την οποία δεν μπορεί να ξεπεράσει ($a=F_{max}/m$). Ο δεύτερος λόγος είναι ότι μόλις το υλικό ξεκινάει να συμπεριφέρεται ανελαστικά μειώνεται η δυσκαμψία του, με συνέπεια να αυξάνεται η ιδιοπερίοδός του και έτσι να αποσυντονίζεται. Αυτά φαίνονται ακόμα καλύτερα στο διάγραμμα (31).

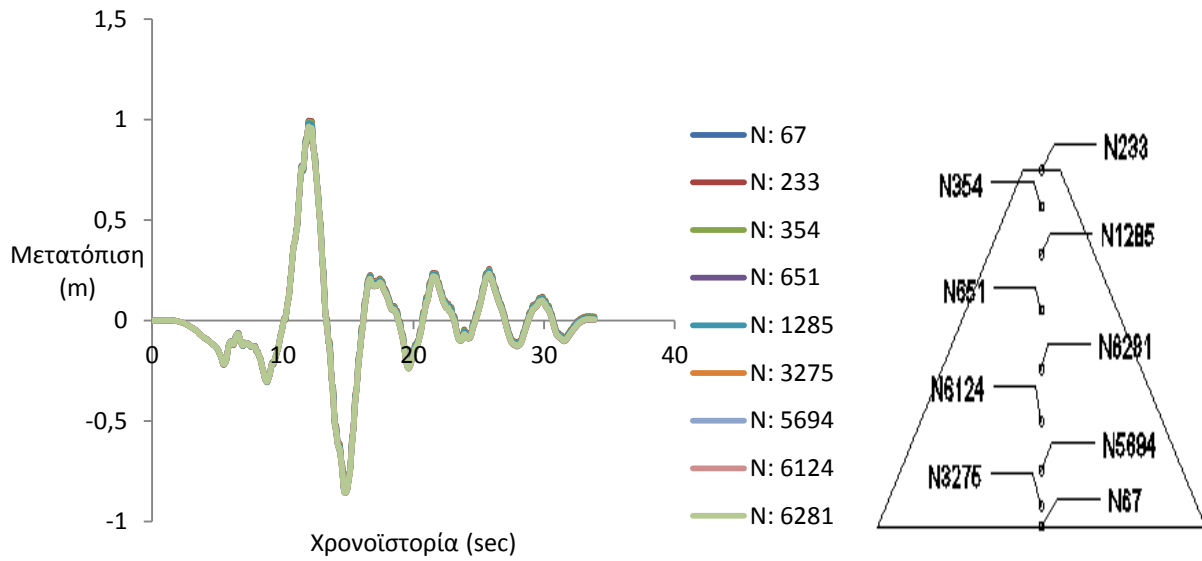
Βλέπουμε αρχικά ότι οι μεγάλες τιμές της επιτάχυνσης μειώνονται και φθάνουν ένα οριακό σημείο ($\approx 4g$) το οποίο δεν μπορούν να ξεπεράσουν. Επιπρόσθετα αφού συμβεί η μεγάλης εντάσεως επιτάχυνση η καμπύλη σταματάει να εφάπτεται στην ελαστική καμπύλη και το

χρονικό διάστημα που επαναλαμβάνεται μια ταλάντωση μεγαλώνει, δηλαδή μεγαλώνει η περίοδος.



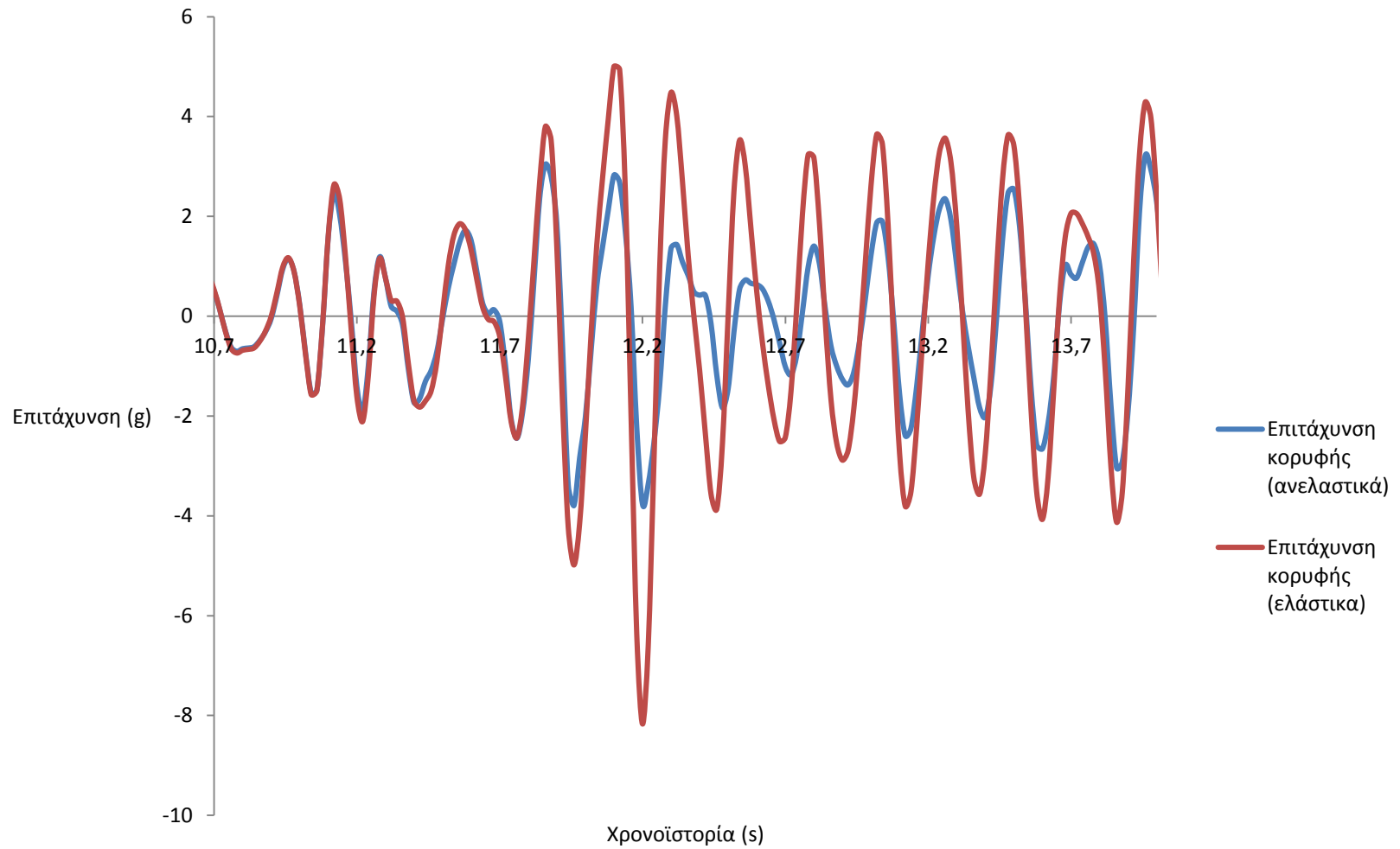
Διάγραμμα (30): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα

Οριζόντιες Μετατοπίσεις



Διάγραμμα (32): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα

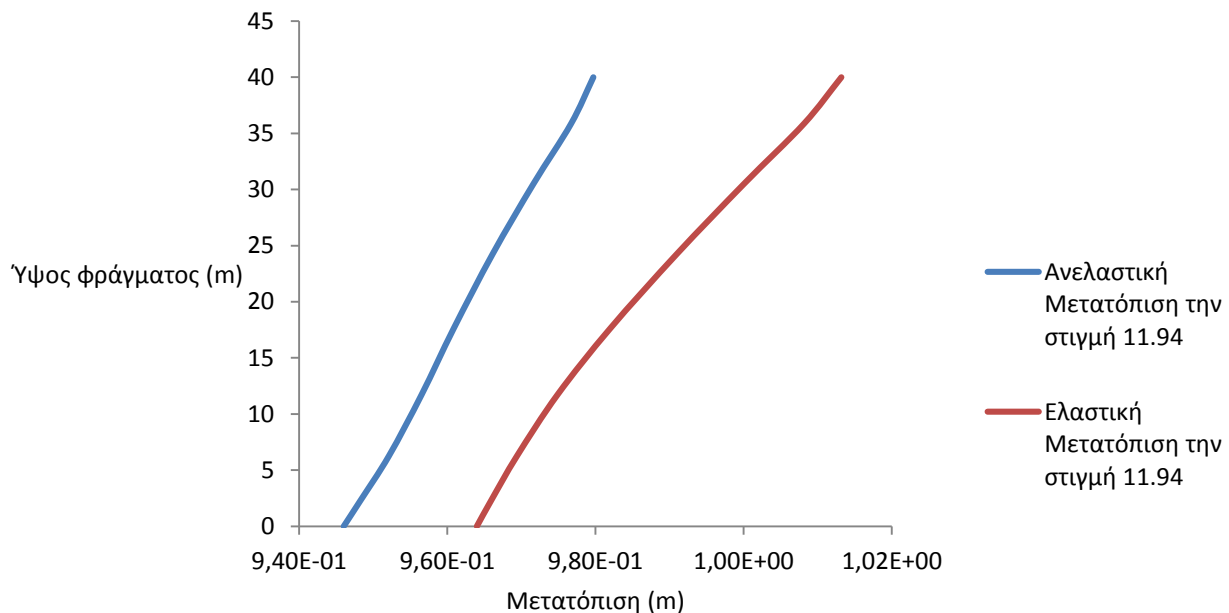
Επιτάχυνση Κόρυφής



Διάγραμμα (31): Επιτάχυνση κορυφής από 10,7-14 sec

Εκ πρώτης όψews, από το διάγραμμα (32) κανείς μπορεί να θεωρήσει πως δεν υπάρχει διαφορά στις οριζόντιες μετακινήσεις του άξονα από την στιγμή που οι καμπύλες των διαφόρων σημείων του άξονα συμπίπτουν. Βέβαια το φράγμα κίνείται προφανώς ενιαία στις μικρές επιταχύνσεις αλλά όταν έρχεται η στιγμή της μεγάλης έντασης τότε υπάρχει διαφορά.

Αν παρατηρήσουμε καλύτερα την στιγμή που λαμβάνεται η τιμή του ένος μέτρου μετατόπισης υπάρχει μια διαφορά στις μετατοπίσεις που φαίνεται ασήμαντη. Στο διάγραμμα (33) βλέπουμε ότι δεν είναι διόλου ασήμαντη καθώς στην ανελαστική περίπτωση έχουμε μια σχετική μετατόπιση της τάξεως των 5 εκατοστών. Η μετατόπιση αυτή έρχεται σε συμφωνία με την μέγιστη επιτάχυνση αφού $\alpha = \omega^2 * u = 4 * \pi^2 / T^2 * u = 4 * \pi^2 / 0,17^2 * 0,034 = 4,6g \approx 3.8g$ που μας δίνει το Abaqus.



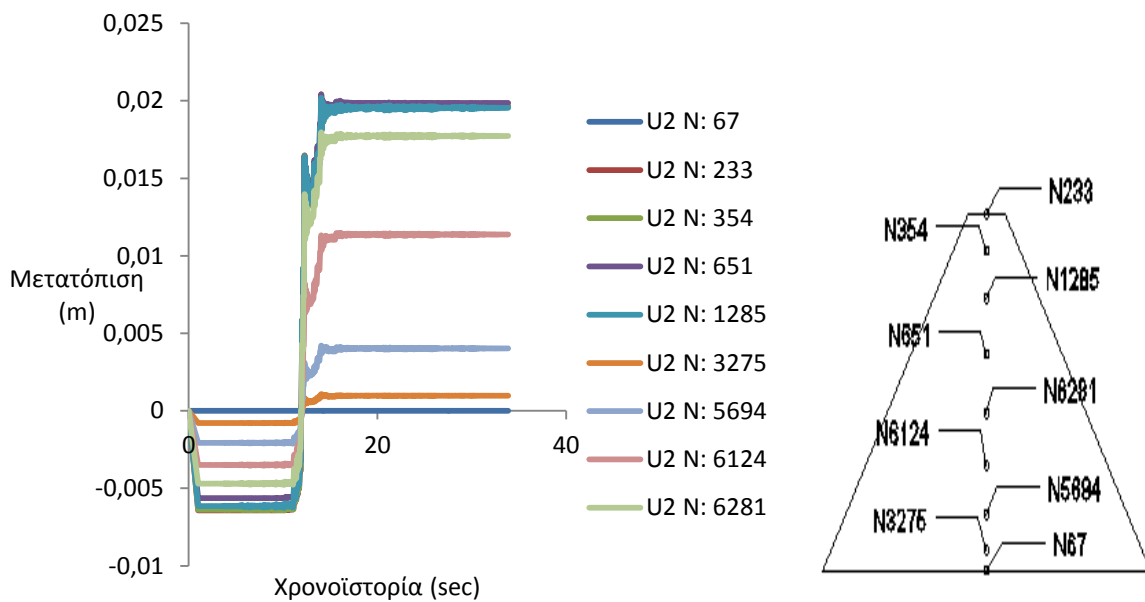
Διάγραμμα (33): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα

Κατακόρυφες Μετατοπίσεις

Στο διάγραμμα (34) βλέπουμε αρχικά την «καθίζηση» του φράγματος από το ίδιο βάρος του που το σημείο με την μεγαλύτερη τιμή της μετατόπισης είναι προφανώς η κορυφή του φράγματος. Η απότομη αύξηση της μετατόπισης προέρχεται από τια ανελαστικότητες που

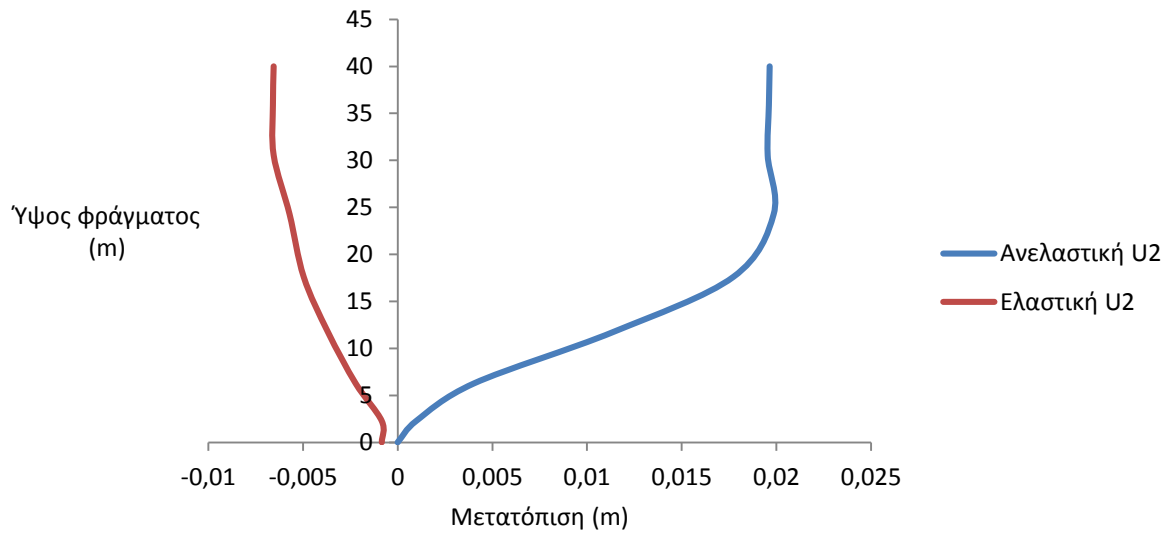
δημιουργούνται στο φράγμα κατά την διάρκεια του σεισμού και έχουν ως αποτέλεσμα παραμένουσες μετατοπίσεις.

Βλέπουμε ότι οποιαδήποτε στιγμή ξεπερνιέται η αντοχή του υλικού έχουμε ως αποτέλεσμα ένα άλμα στις κατακόρυφες μετατοπίσεις το οποίο μονίμως είναι ανοδικό διότι ξεπερνιέται μόνο η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό και όχι σε θλίψη.



Διάγραμμα (34): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα

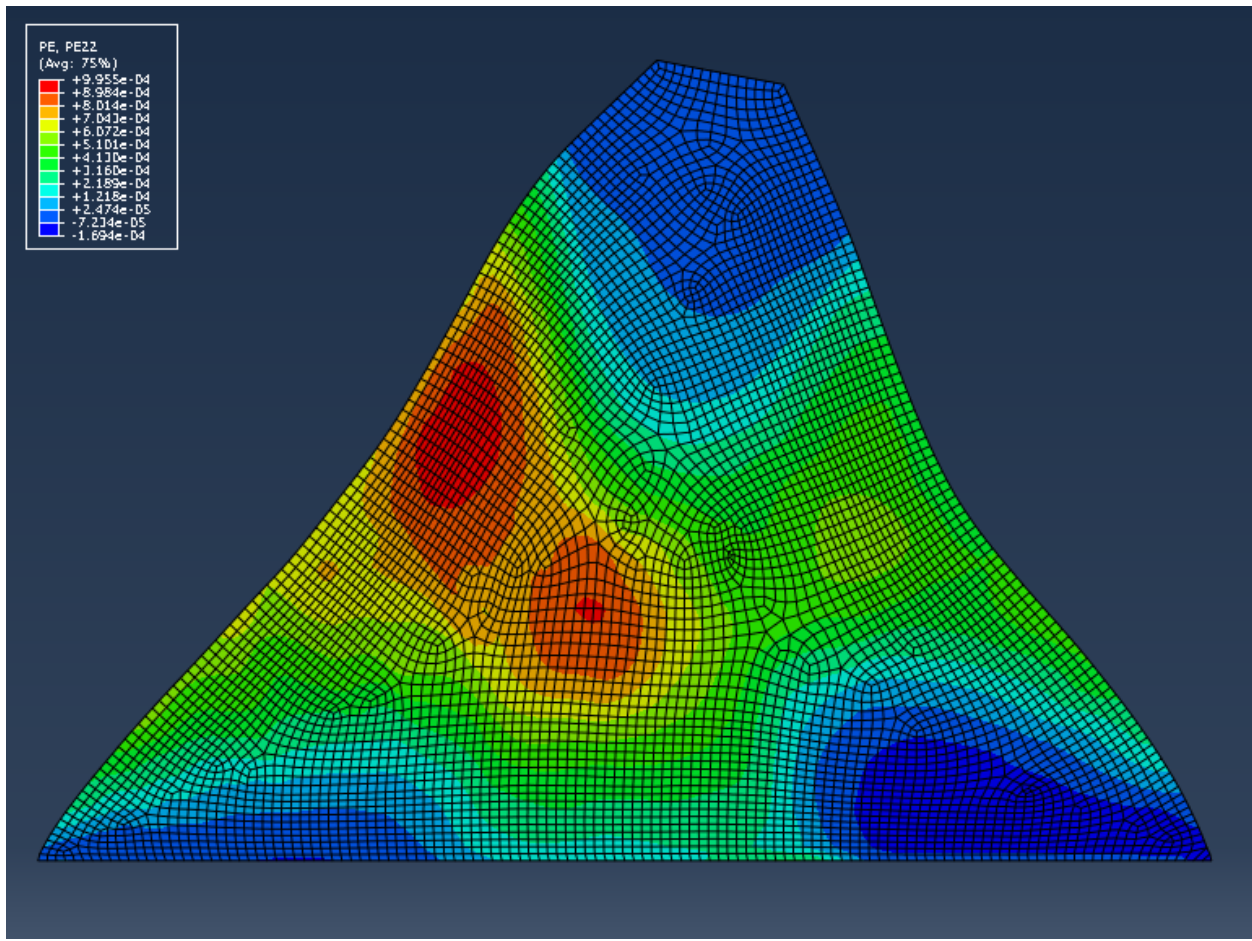
Στο διάγραμμα (35) φαίνεται ακόμα καλύτερα το πως καταμερίζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις καθ' ύψος του φράγματος.



Διάγραμμα (35): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα

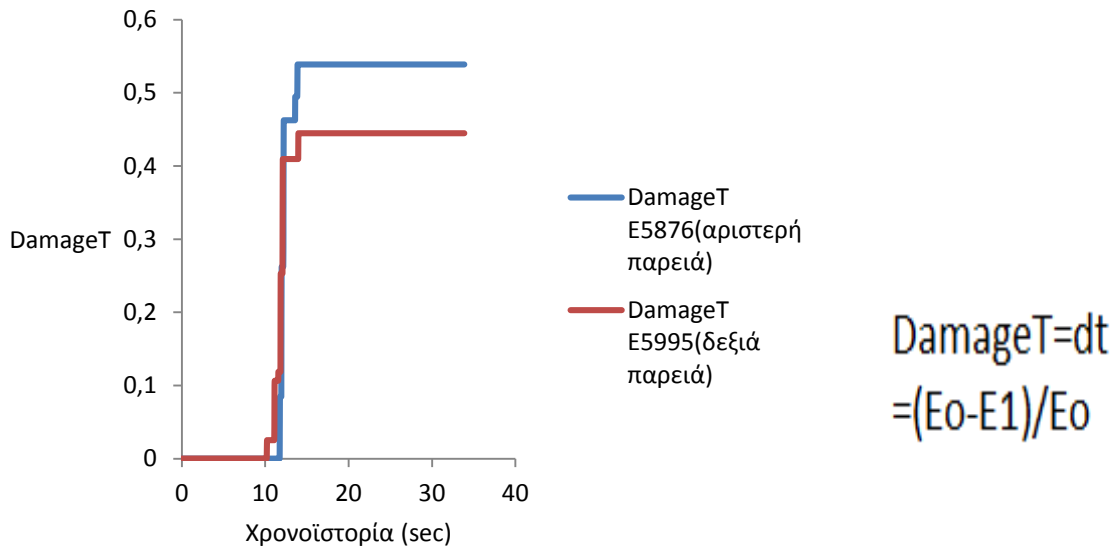
Βλέπουμε ότι από ένα σημείο και μετά οι μετατόψεις παραμένουν σταθερές πράγμα το οποίο σημαίνει πως οι ανελαστικότητες συμβαίνουν μέχρι τα 25 μέτρα. Λογικό, αν σκεφτούμε ότι η ροπή που ασκείται στο φράγμα λόγω του σεισμού μεγαλώνει καθώς απομακρυνόμαστε από την κορυφή του φράγματος.

DamageT και πλαστικές παραμορφώσεις

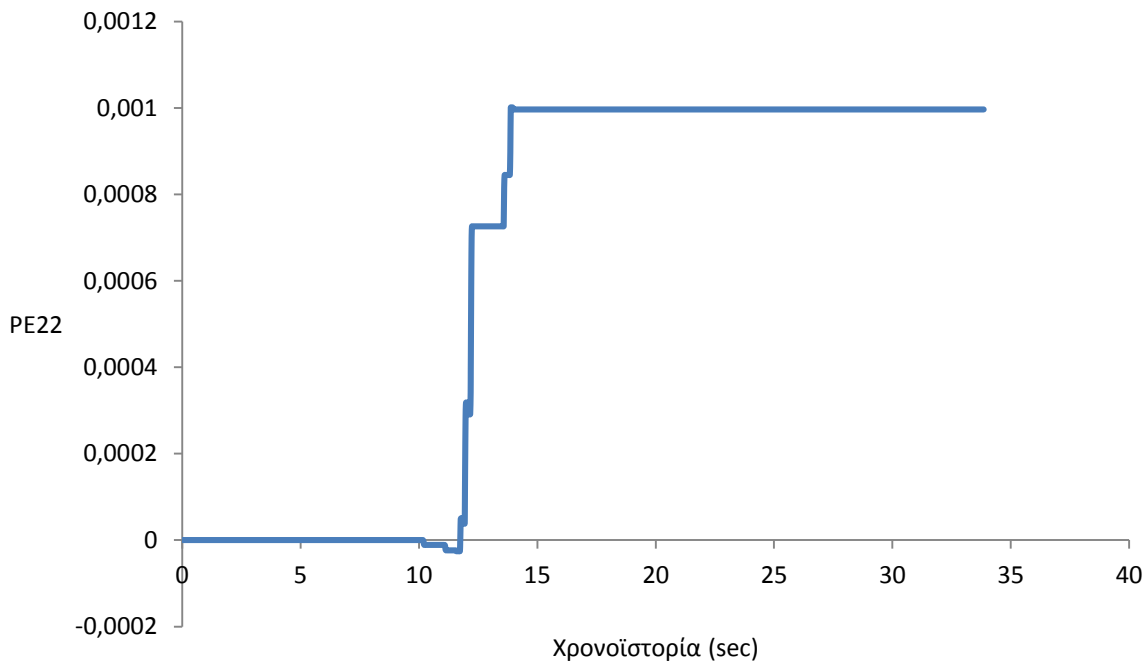


Εικόνα (10): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

Στην εικόνα (10) βλέπουμε ότι έχει σχηματιστεί μια πολύ μεγάλη λωρίδα η οποία έχει ξεπεράσει το όριο αστοχίας οπότε σίγουρα θα δημιουργηθεί μια ρωγμή που θα περάσει από όλο το φράγμα πράγμα το οποίο είναι καταστροφικό γιατί θα περάσει νερό μέσα στο φράγμα και θα προσθέσει πιέσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση ικανές να το καταστρέψουν ολόκληρο. Στο διάγραμμα (36) βλέπουμε το πόσο έχει απομειωθεί το μέτρο ελαστικότητας του υλικού δηλαδή το πόσο έχει φθαρεί το φράγμα σύμφωνα με το σχήμα (3).



Διάγραμμα (36): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας



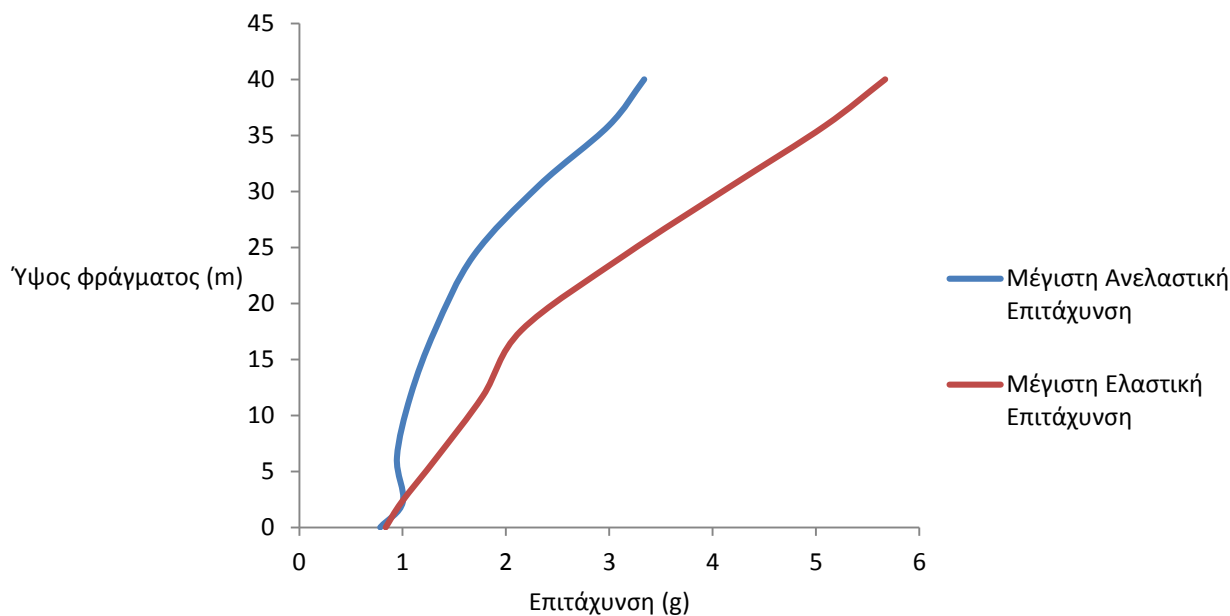
Διάγραμμα (37): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

Παρατηρούμε πως τα δύο διαγράμματα (36) και (37) μοιάζουν αρκετά διότι ούτως ή άλλως είναι δύο όψεις του ίδιου διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Το πρώτο μας δείχνει επιπλέον πόσο κοντά έχουμε φτάσει στον μηδενισμό της αντοχής του υλικού και το δεύτερο

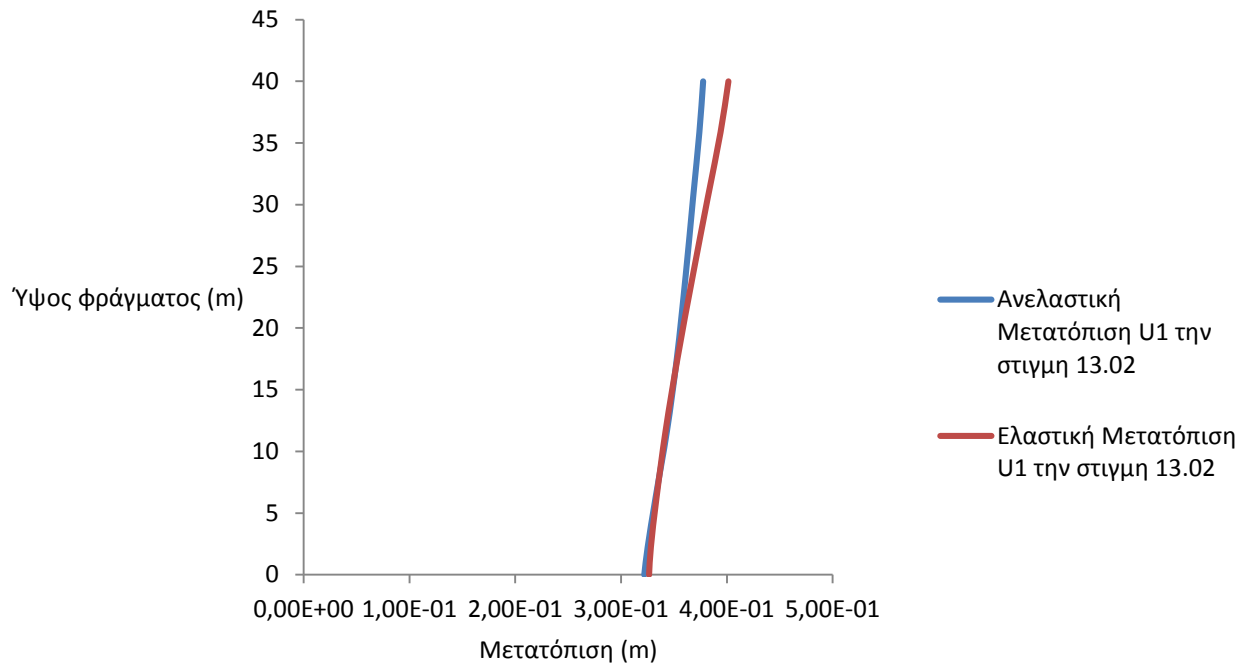
μας δείχνει και πιθανές ανελαστικότητες του υλικού σε θλίψη, μακριά βέβαια από το θλιπτικό όριο αστοχίας του υλικού. Βλέπουμε λοιπόν, όπως και στις κατακόρυφες μετατοπίσεις, ότι την στιγμή της μέγιστης διέγερσης αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις με την μορφή σκαλοπατιών τα οποία αυξάνονται ανάλογα με τον πόσες φορές ξεπερνιέται η οριακή αντόχη του υλικού δηλαδή πόσους κύκλους μεγάλης έντασης έχουμε στο επιταχυνσιογράφημά μας.

Πρέπει να τονίσουμε κάπου εδώ πως ο σεισμός αυτός (Tabas) είναι ίσως η δυσμενέστερη περίπτωση σεισμού για το φράγμα μας διότι έχει πολύ μεγάλη ένταση αλλά και περίοδο που πρόκυπτει σχεδόν ίδια με την ιδιοπερίοδο μας. Γενικά είναι μια περίπτωση που δύσκολα μπορεί να συμβεί μέσα στην ζωή του έργου και ακόμα πιο δύσκολα στην Ελλάδα. Βέβαια όπως θα δούμε και στην συνέχεια ανελαστικότητες και κατ' επέκταση ρωγμές συμβαίνουν και σε άλλους σεισμούς πιο αδύναμους και πιθανούς. Στα διαγράμματα (38) – (103) και στις εικόνες (11) – (21) δείχνουμε την απόκριση του φράγματος στις υπόλοιπες διεγερσεις.

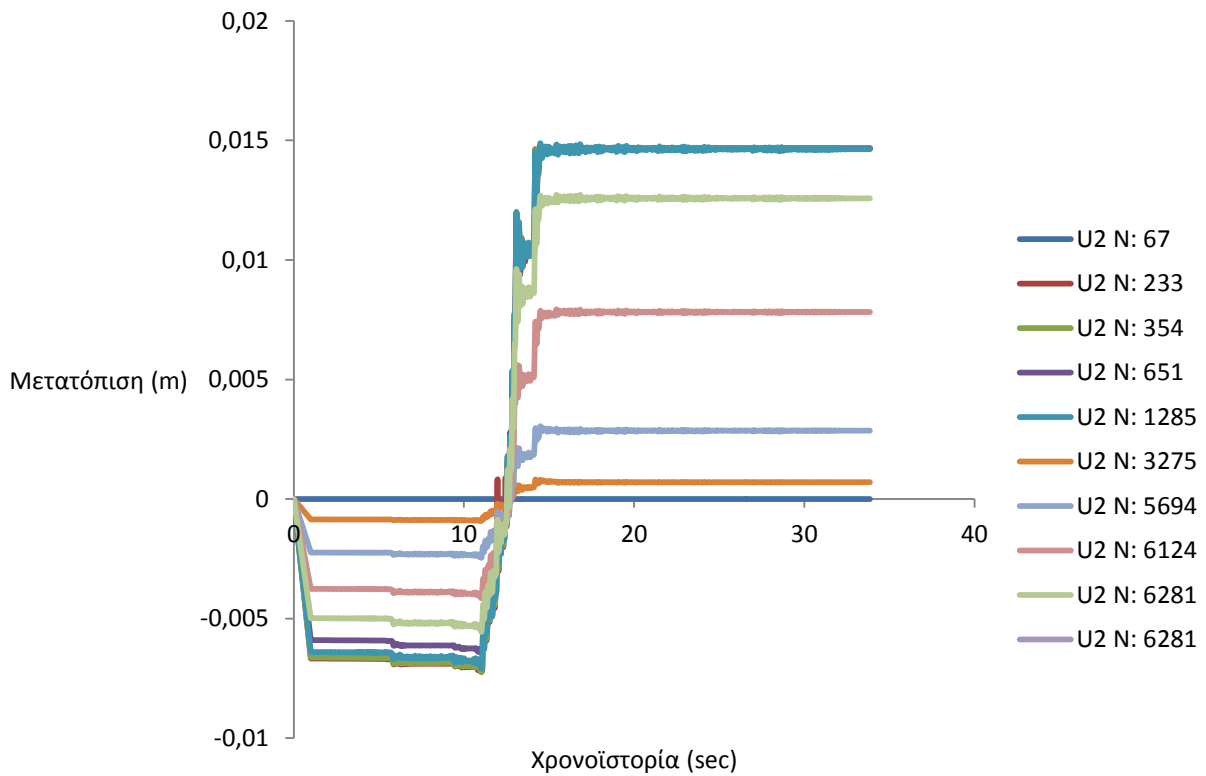
Tabas LN



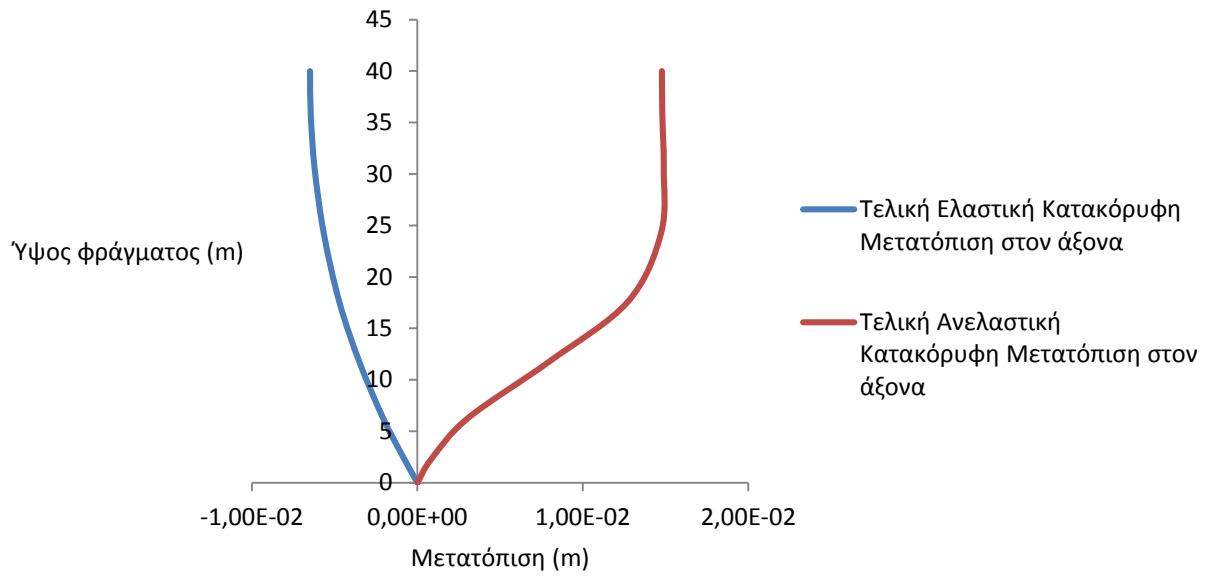
Διάγραμμα (38): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



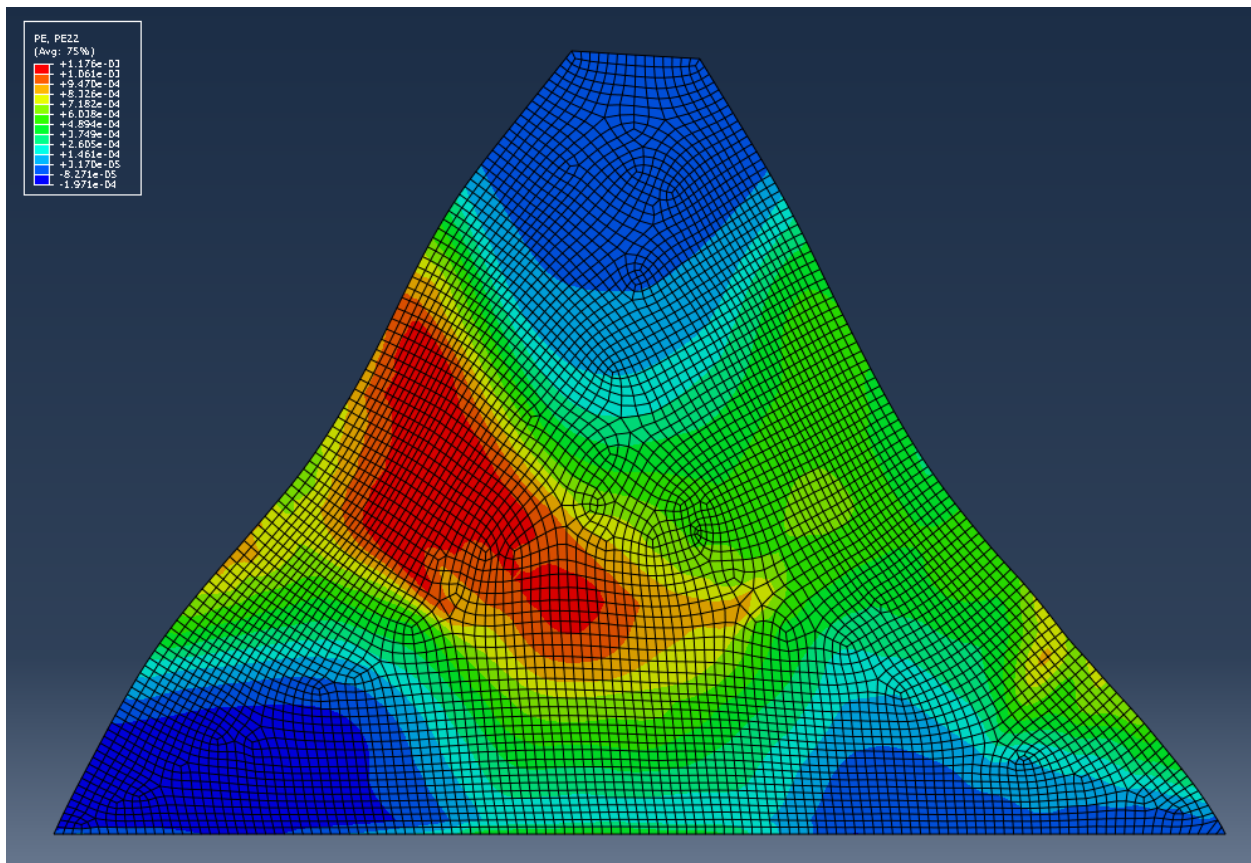
Διάγραμμα (39): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



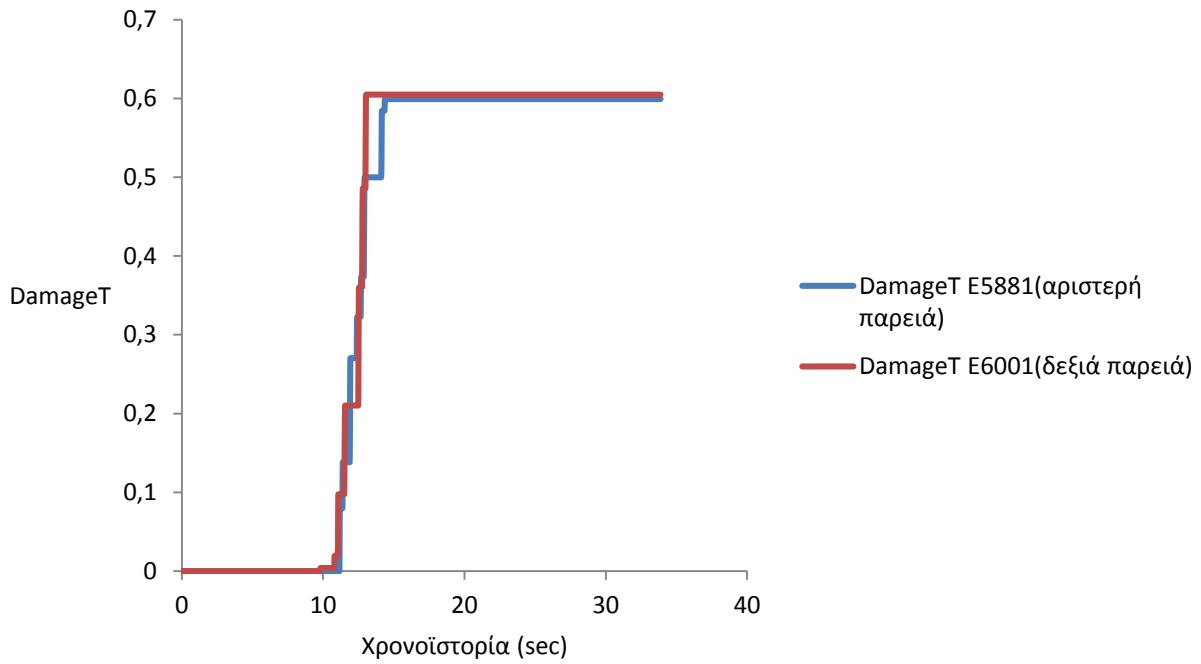
Διάγραμμα (40): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



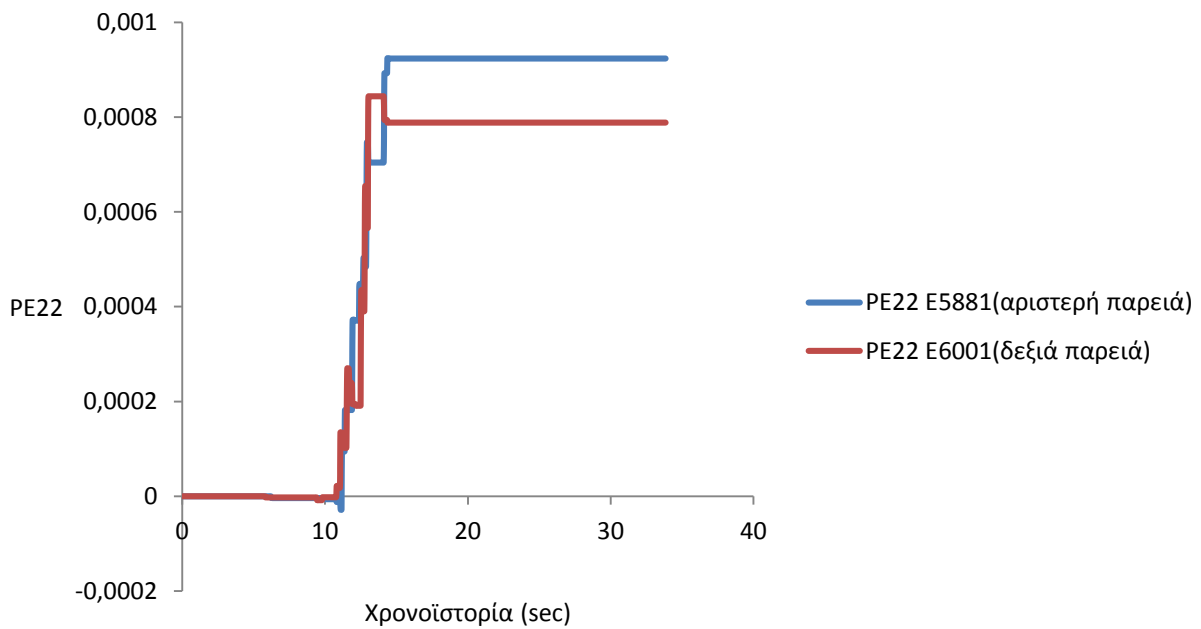
Διάγραμμα (41): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (11): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

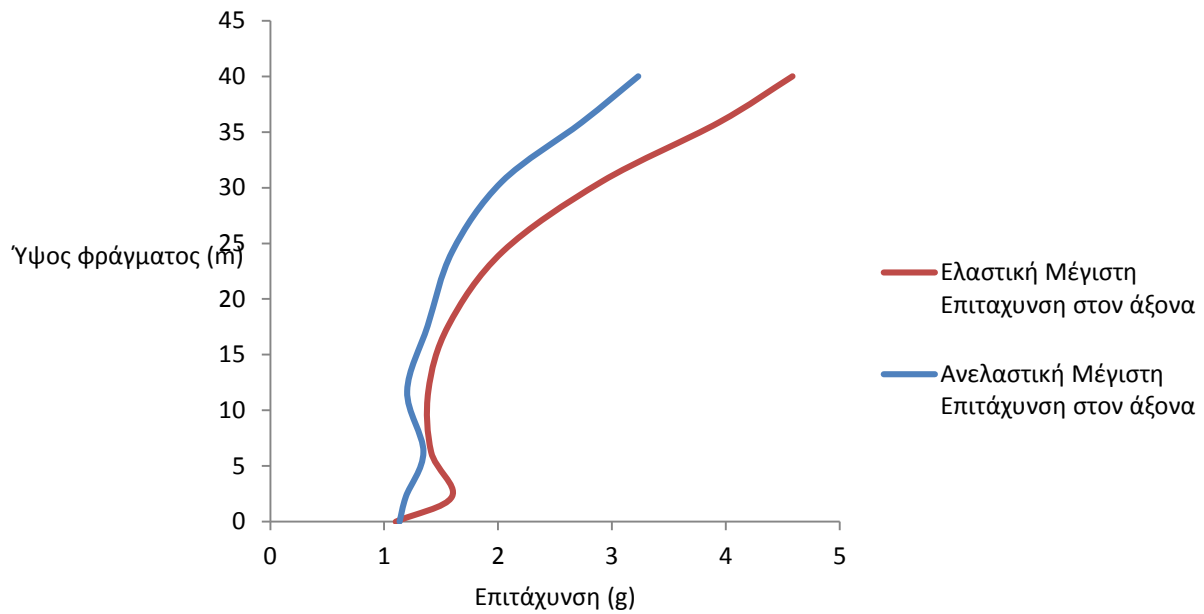


Διάγραμμα (42): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

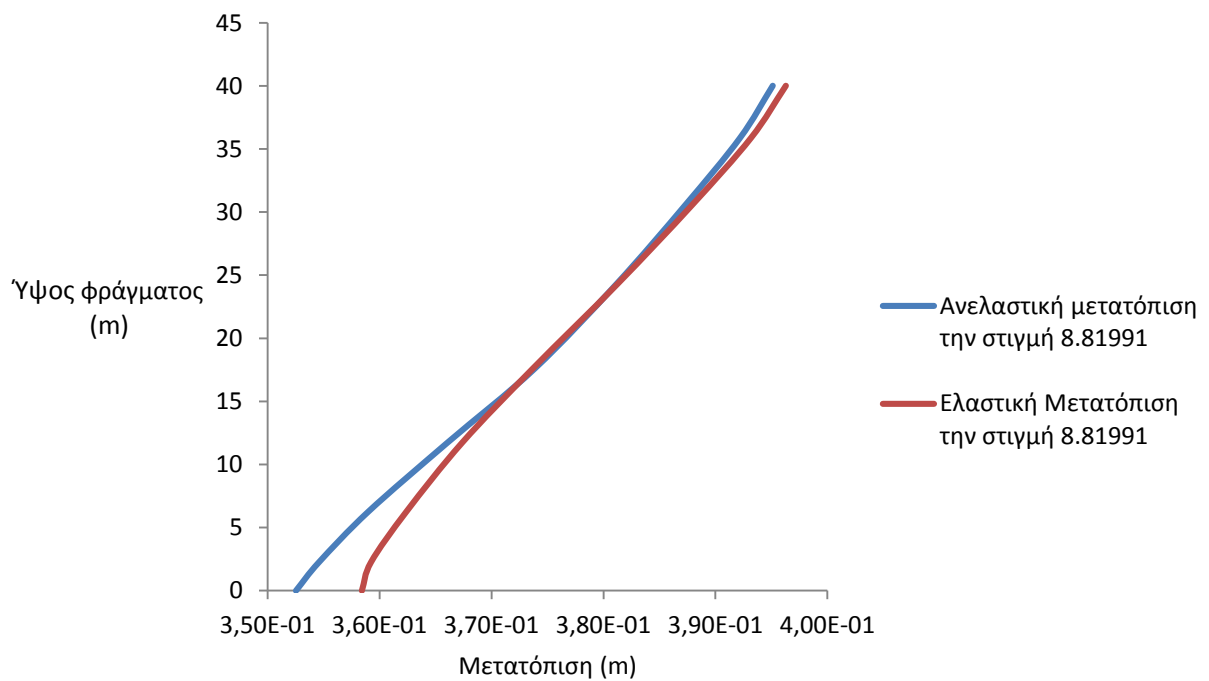


Διάγραμμα (43): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

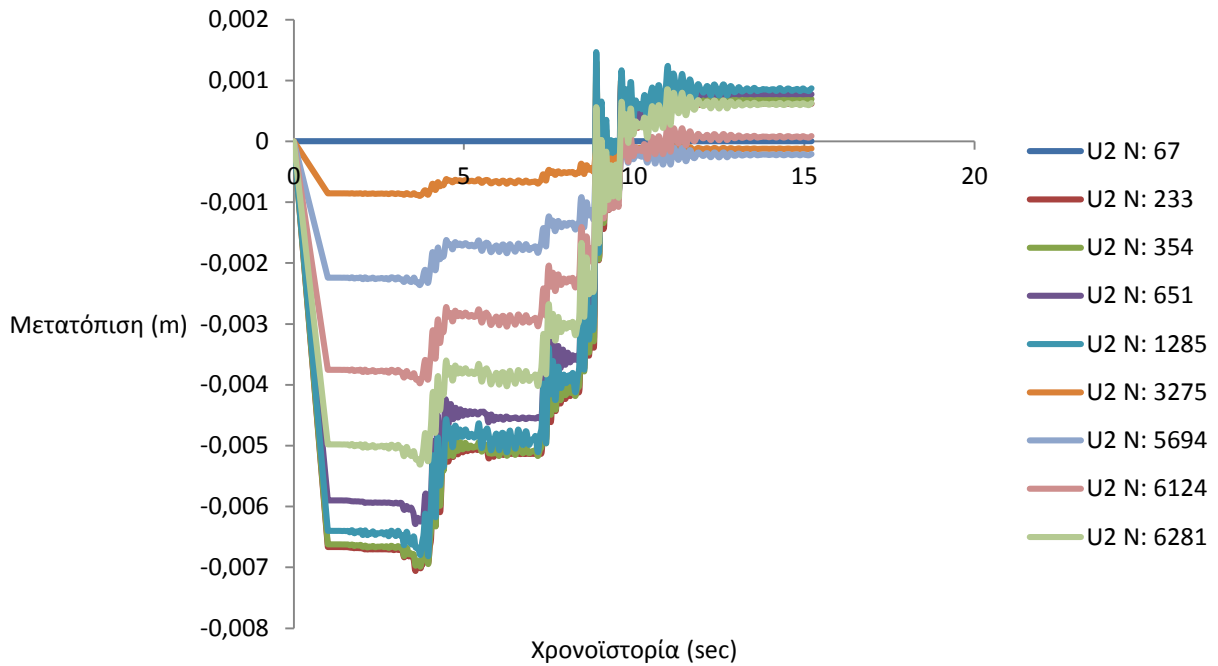
Pacoima Dam – 164



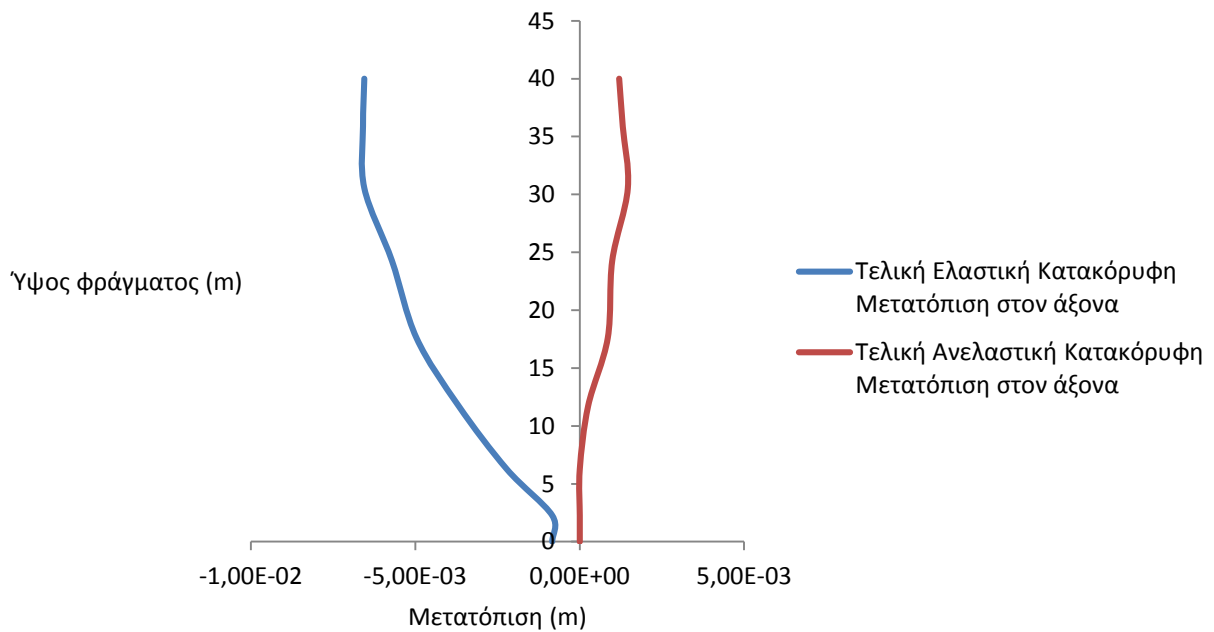
Διάγραμμα (44): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



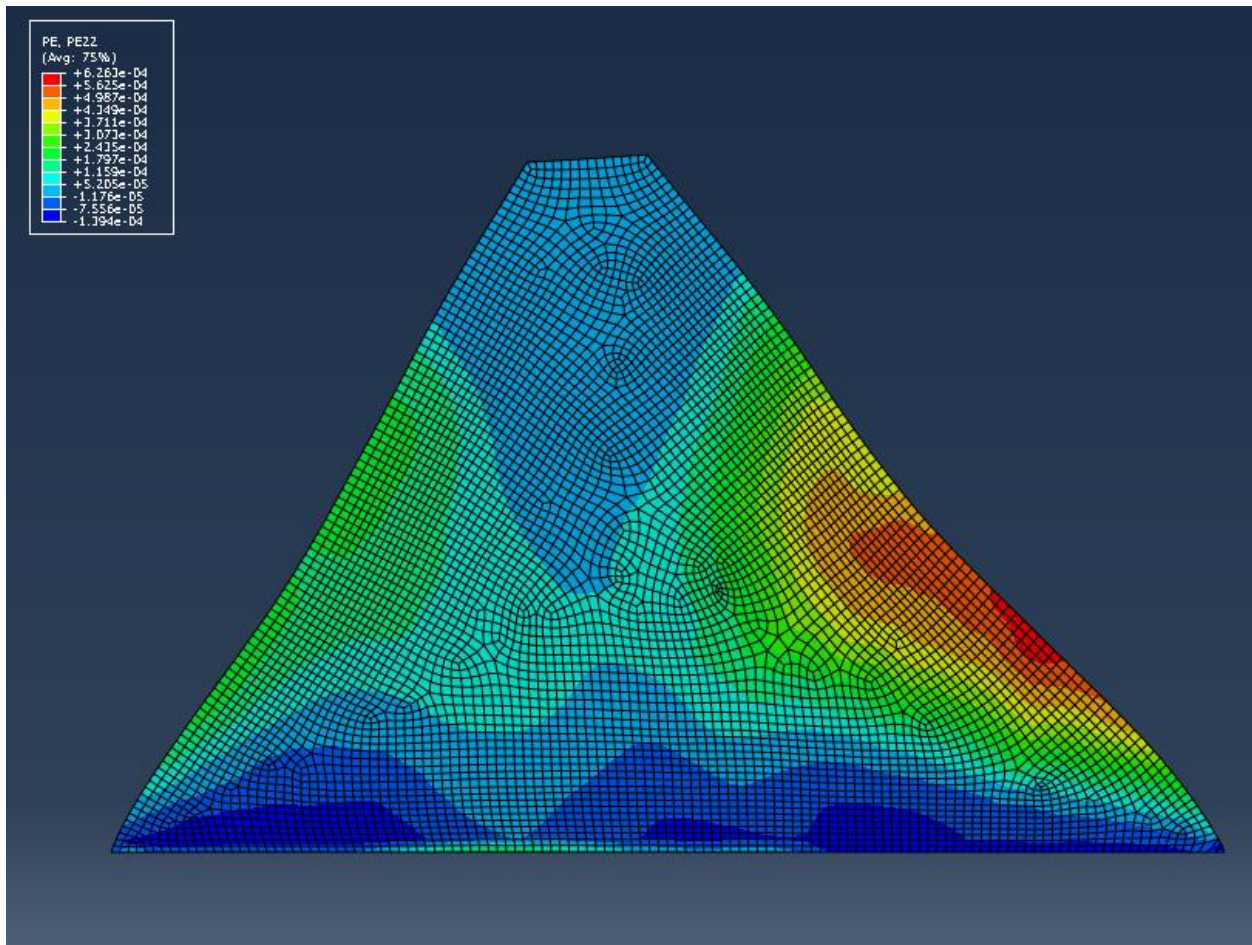
Διάγραμμα (45): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



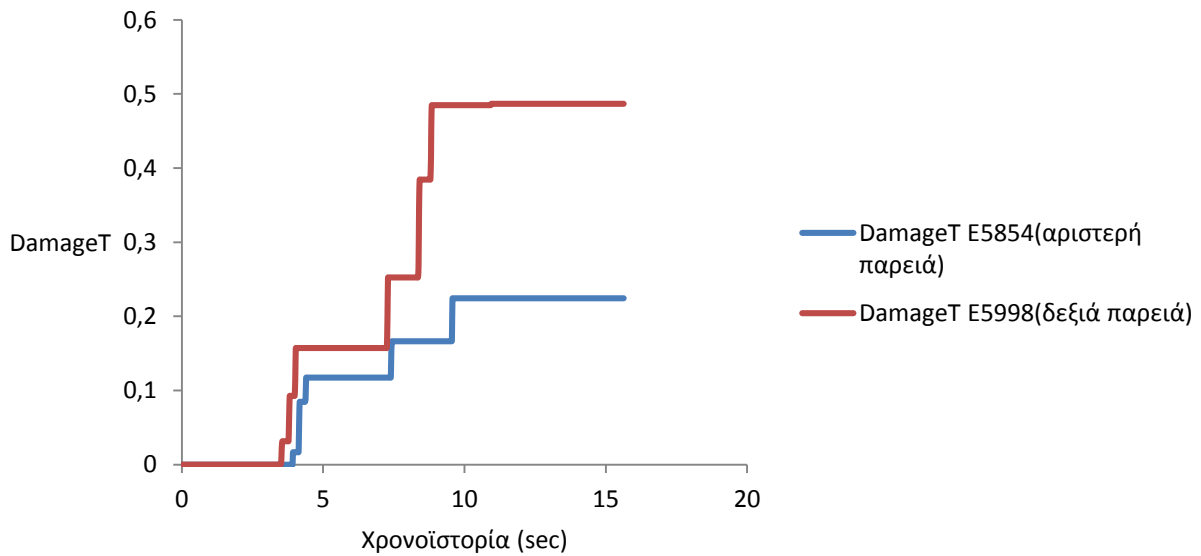
Διάγραμμα (46): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



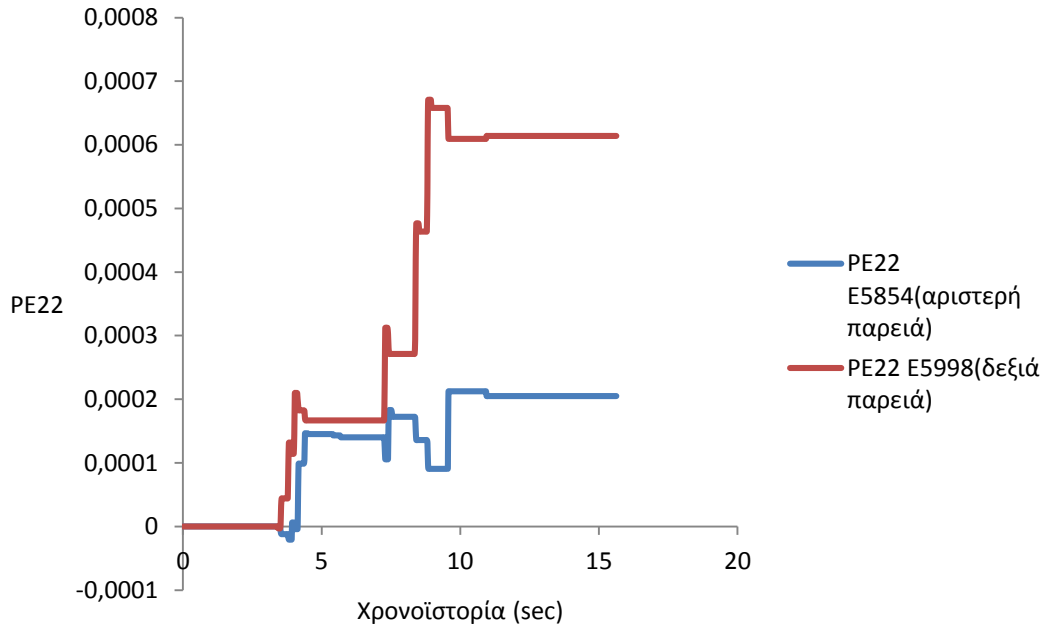
Διάγραμμα (47): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (12): Κατανομή κατακορύφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

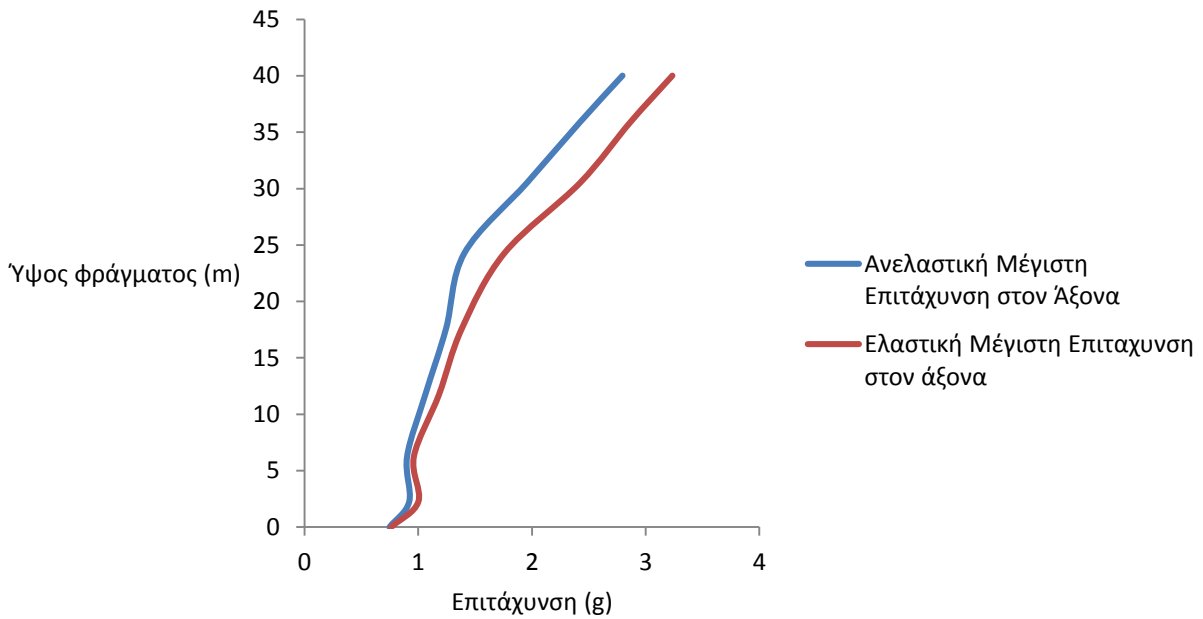


Διάγραμμα (48): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

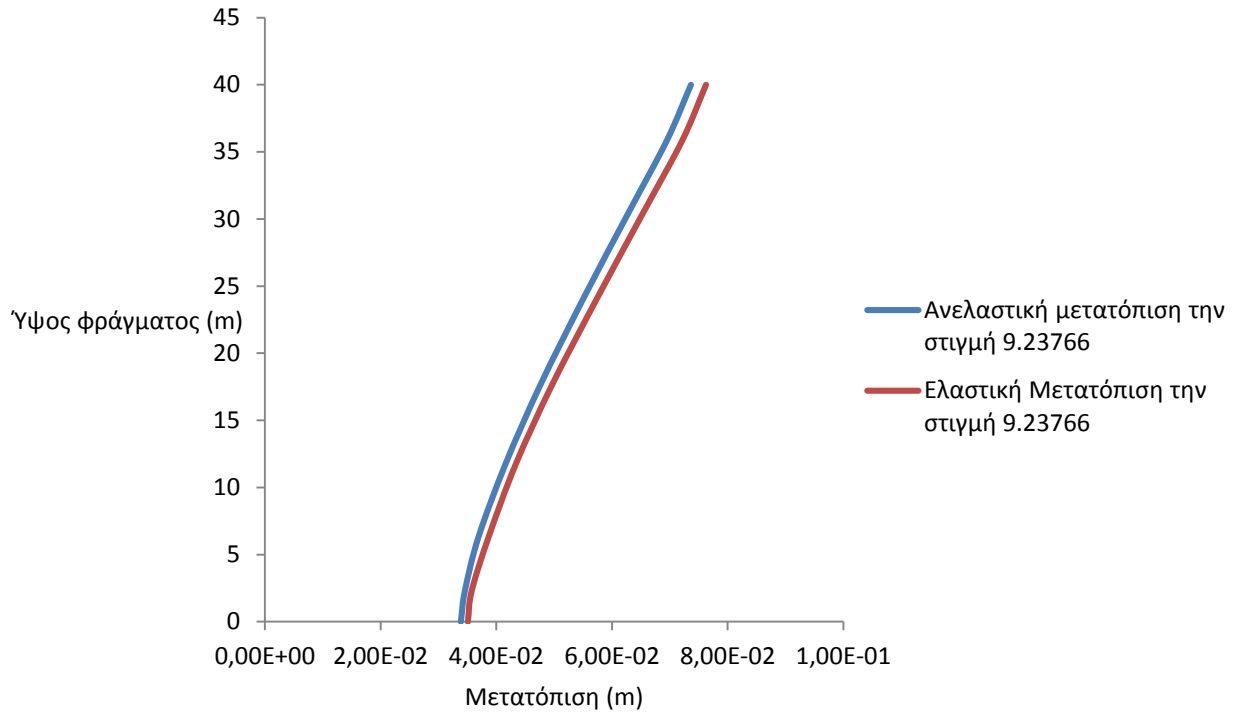


Διάγραμμα (49): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

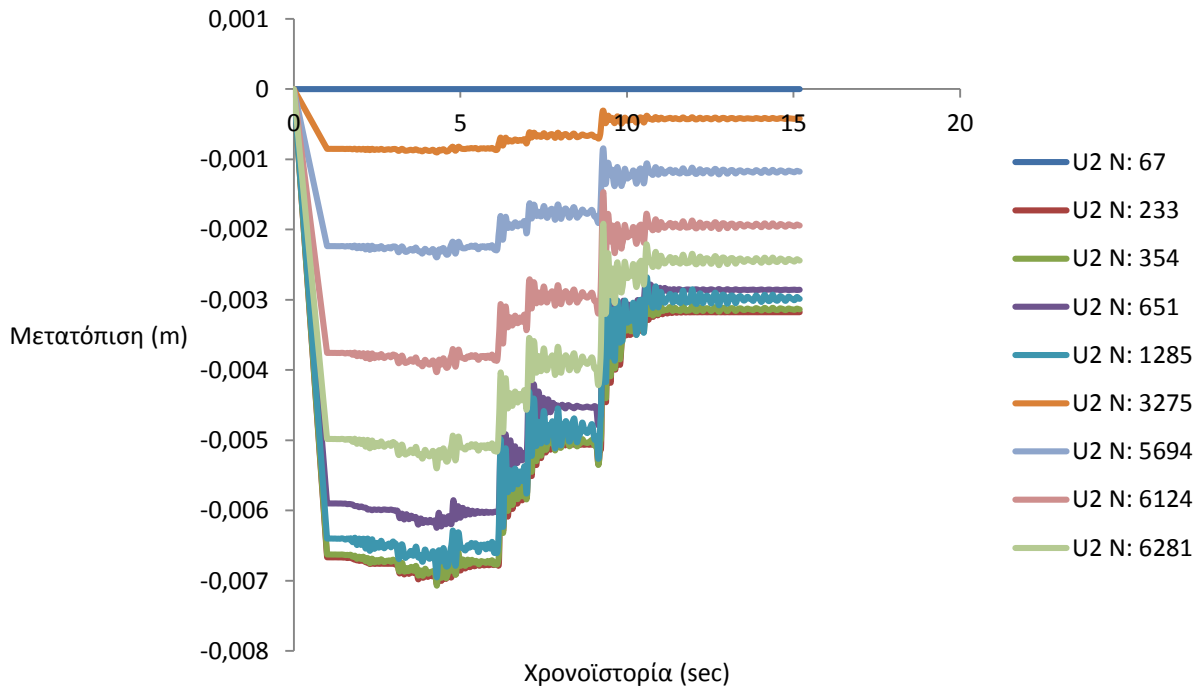
Pacoima Dam – 254



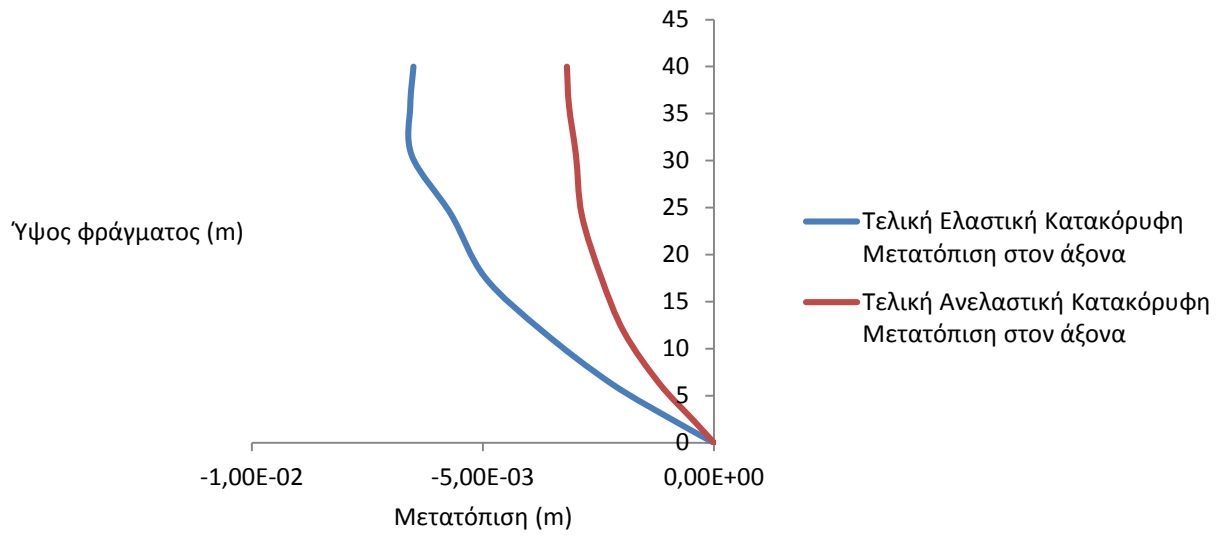
Διάγραμμα (50): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



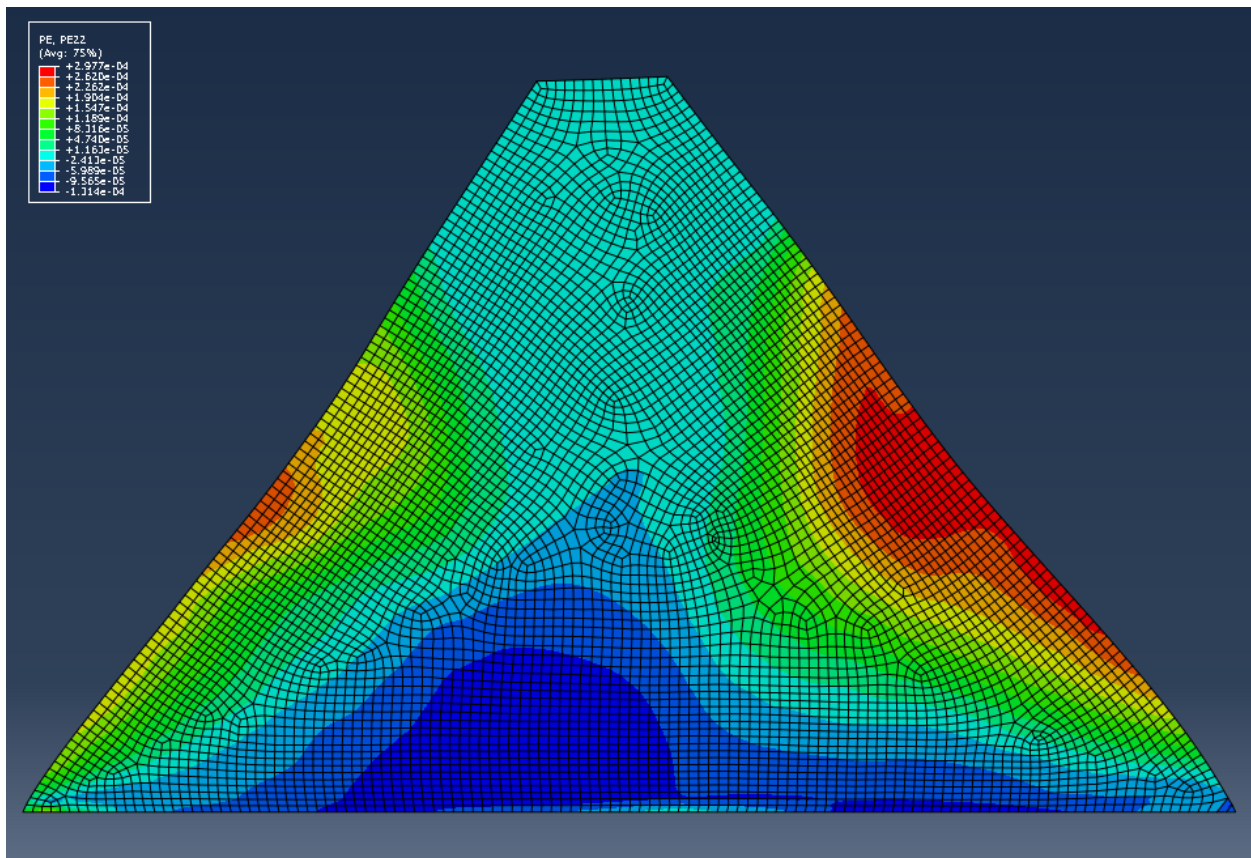
Διάγραμμα (51): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



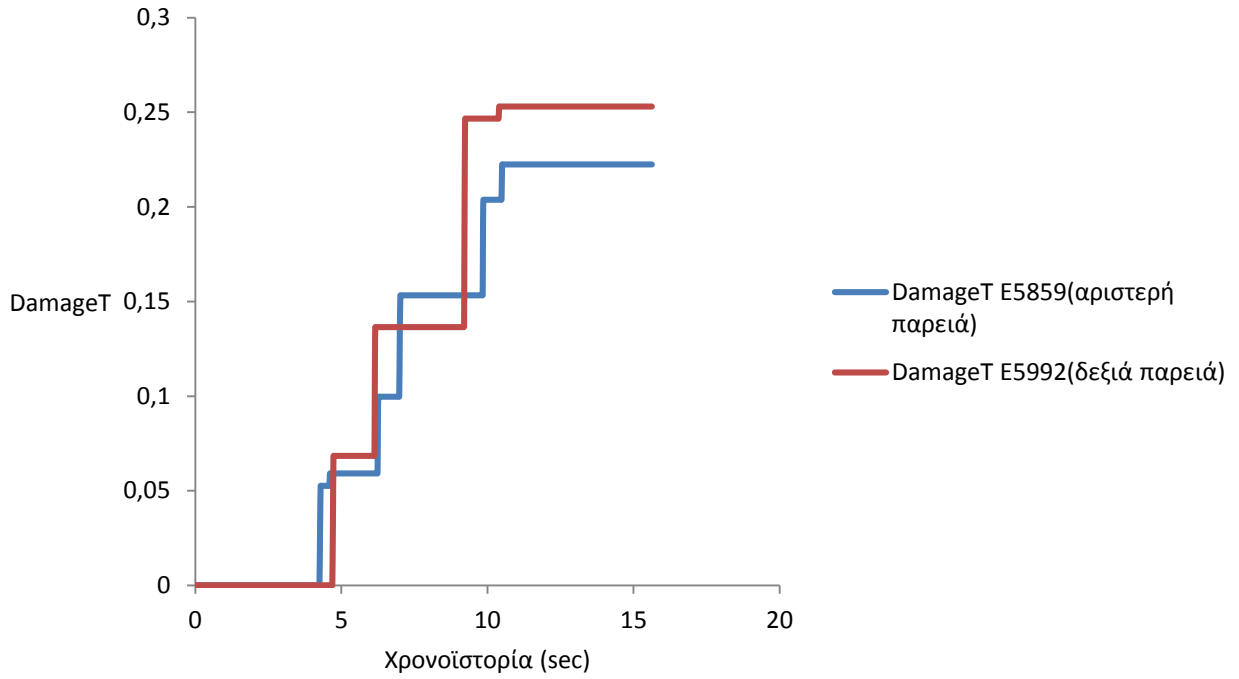
Διάγραμμα (52): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



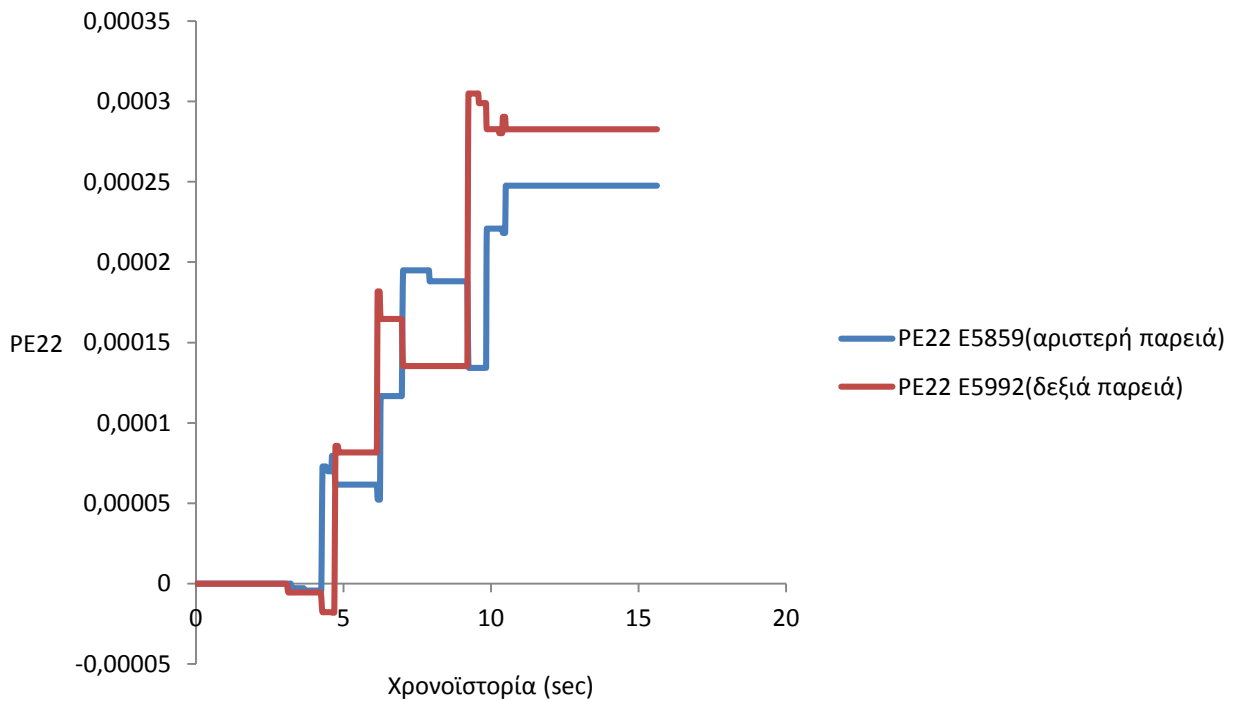
Διάγραμμα (53): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (13): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

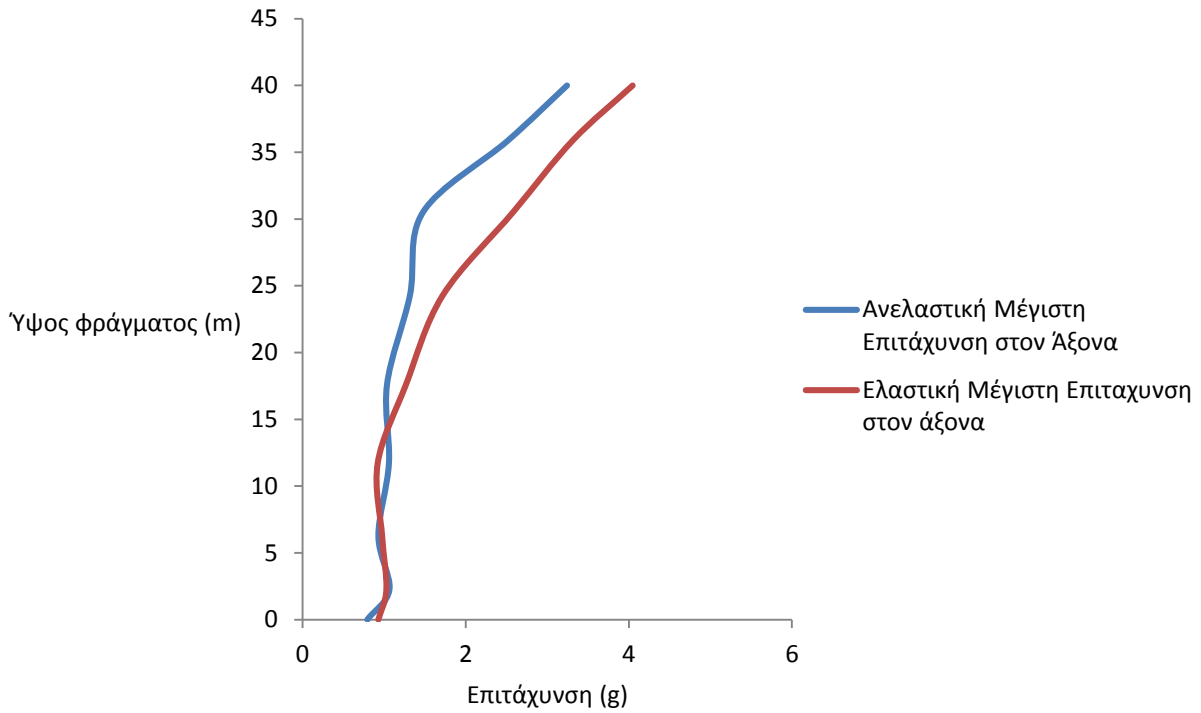


Διάγραμμα (54): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

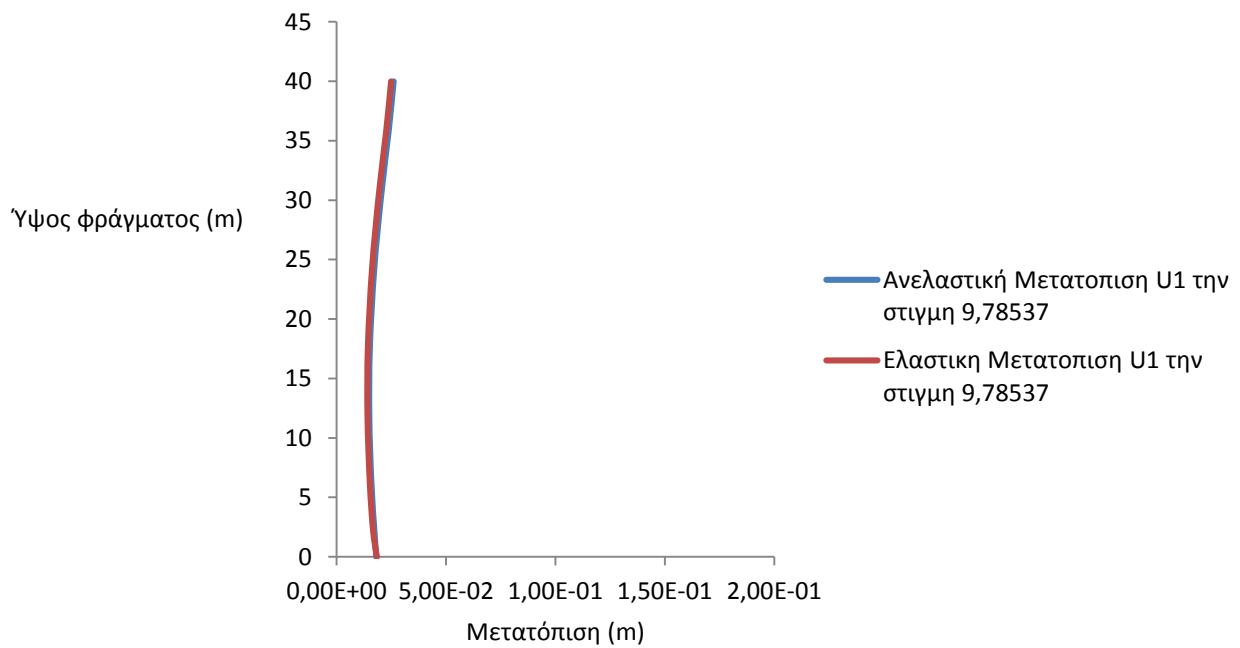


Διάγραμμα (55): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

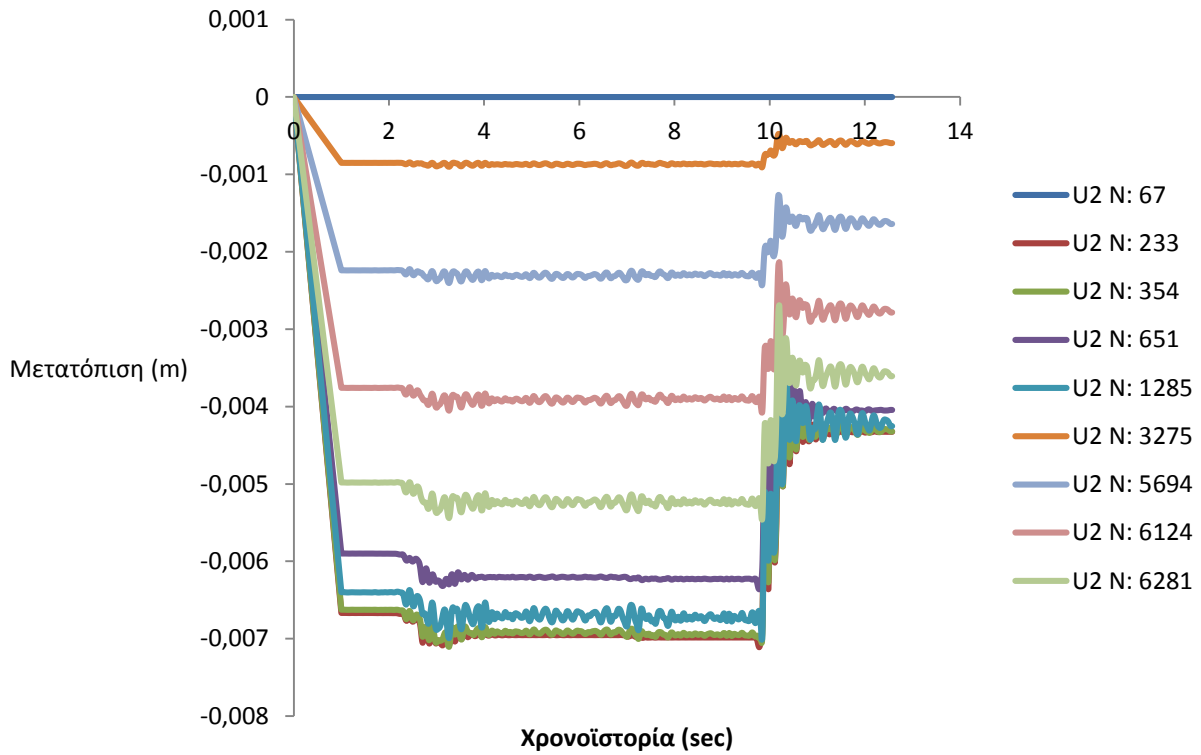
Nahanni – 010



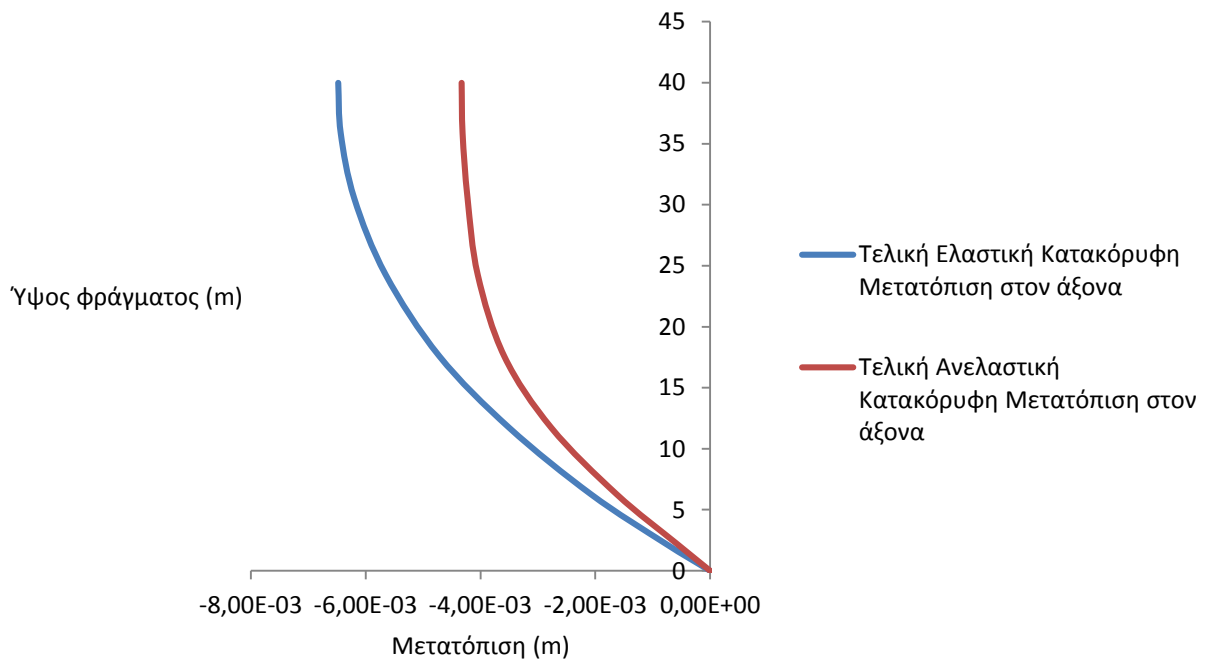
Διάγραμμα (56): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



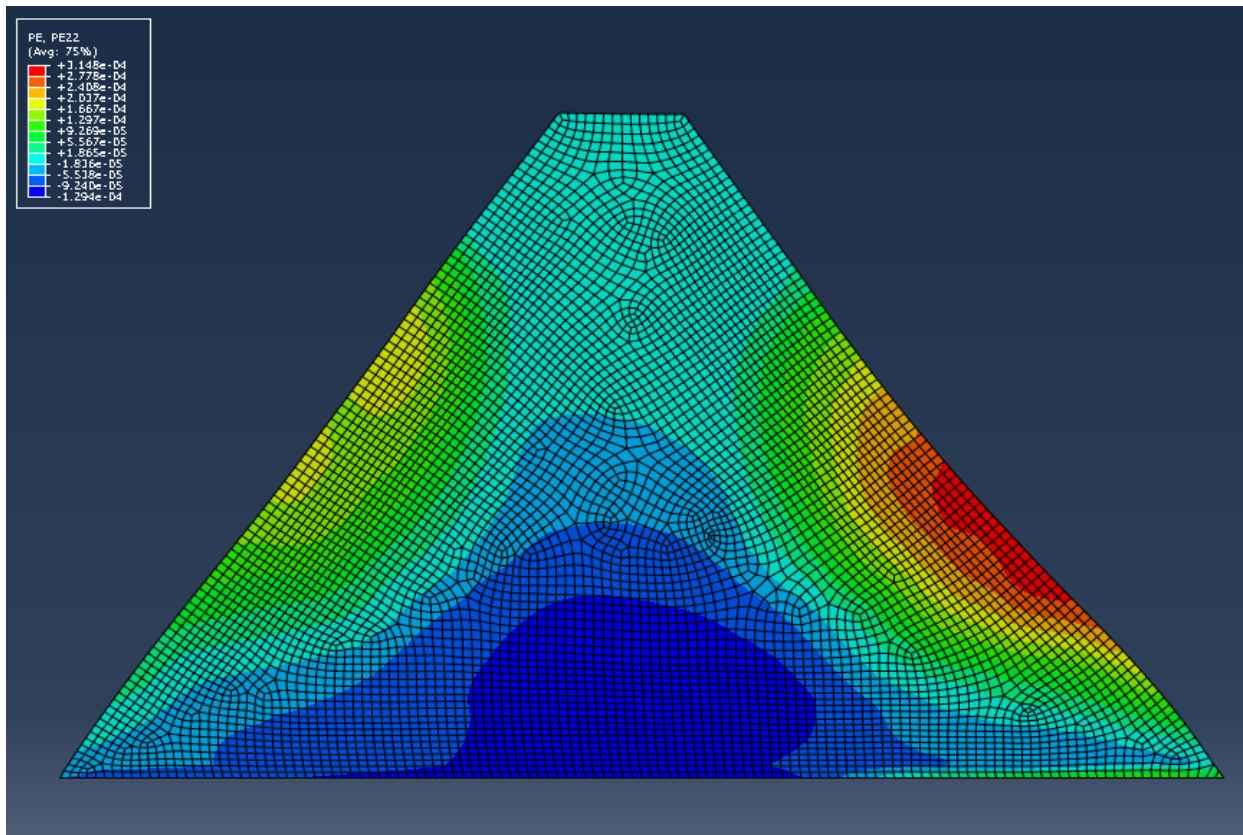
Διάγραμμα (57): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



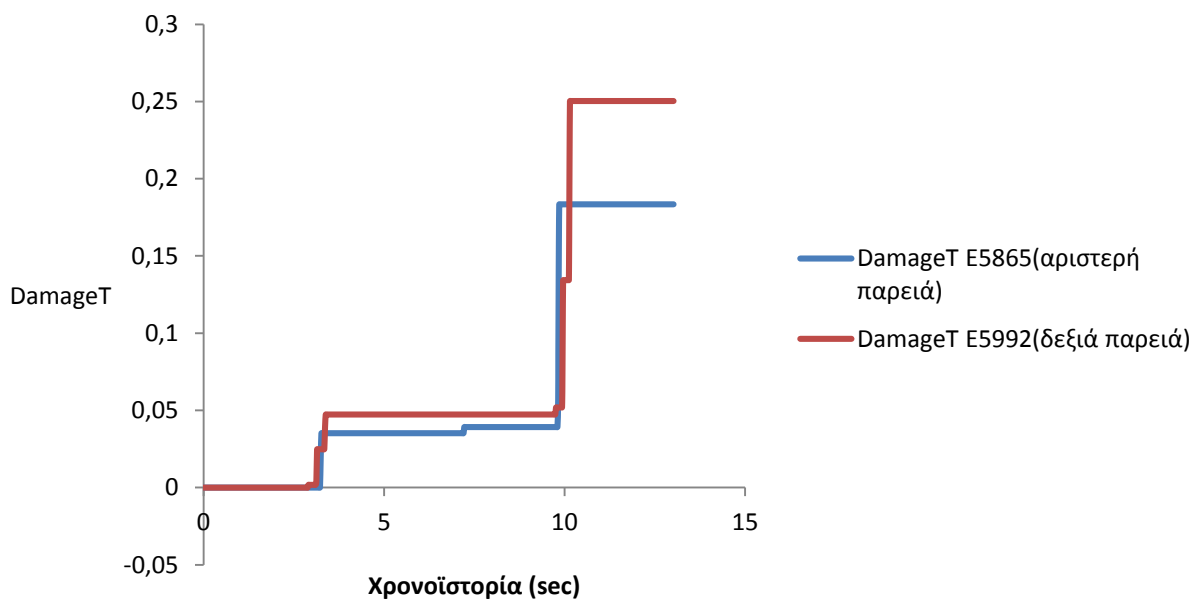
Διάγραμμα (58): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



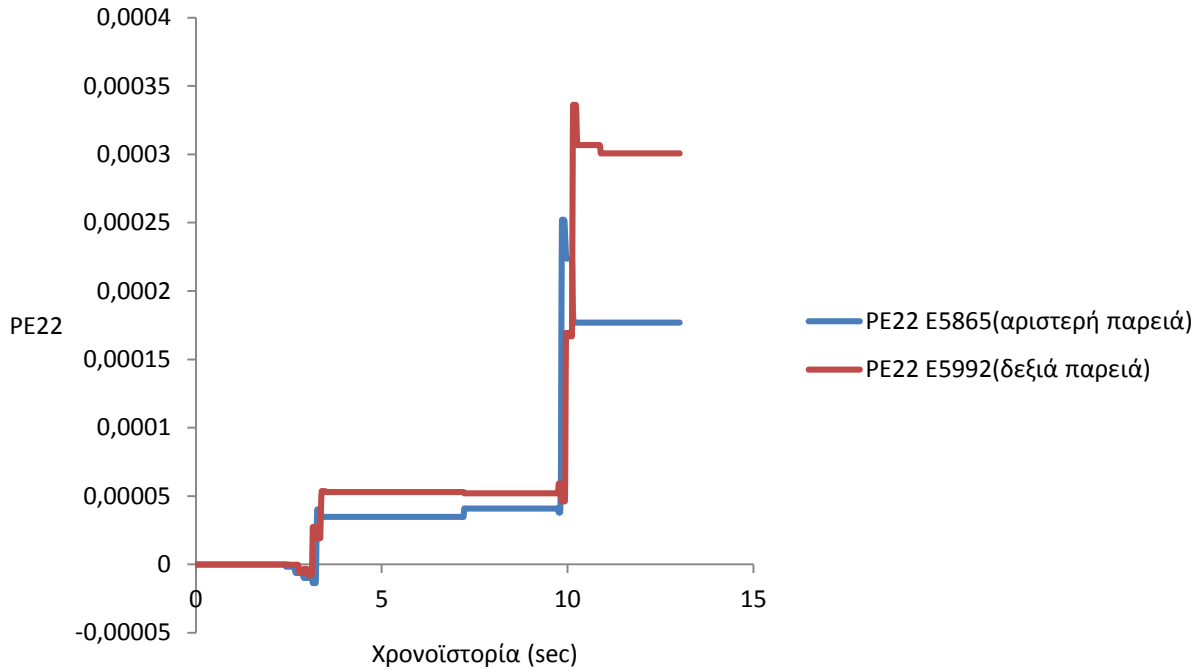
Διάγραμμα (59): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (14): Κατανομή κατακορύφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

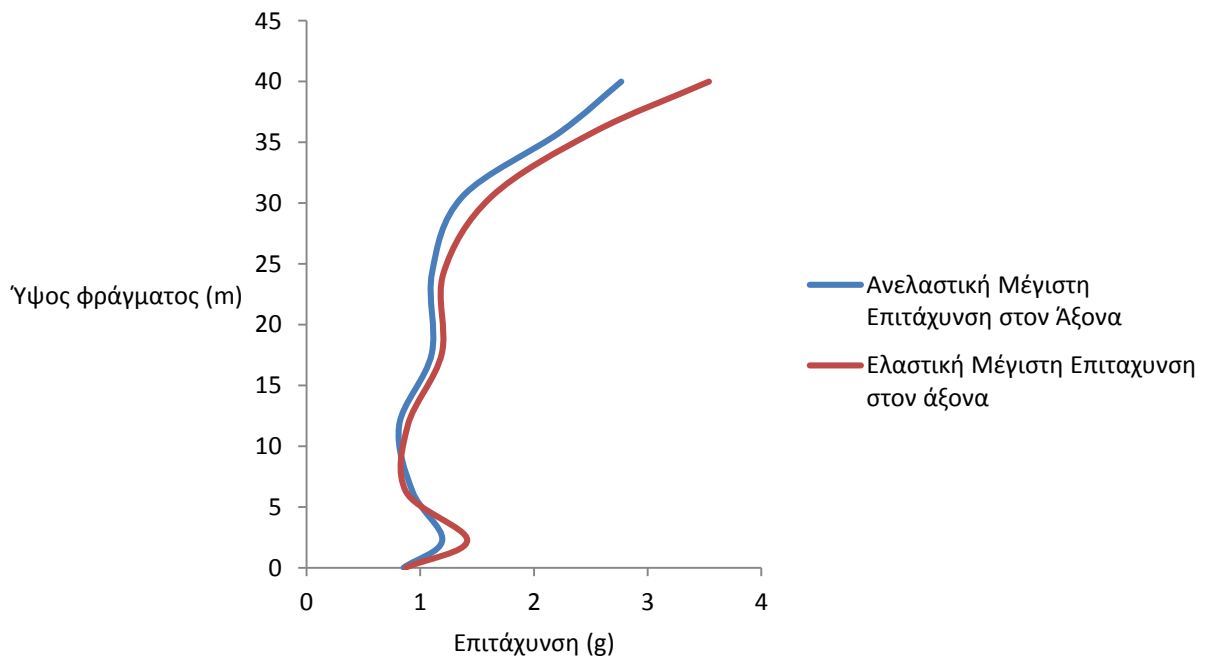


Διάγραμμα (60): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

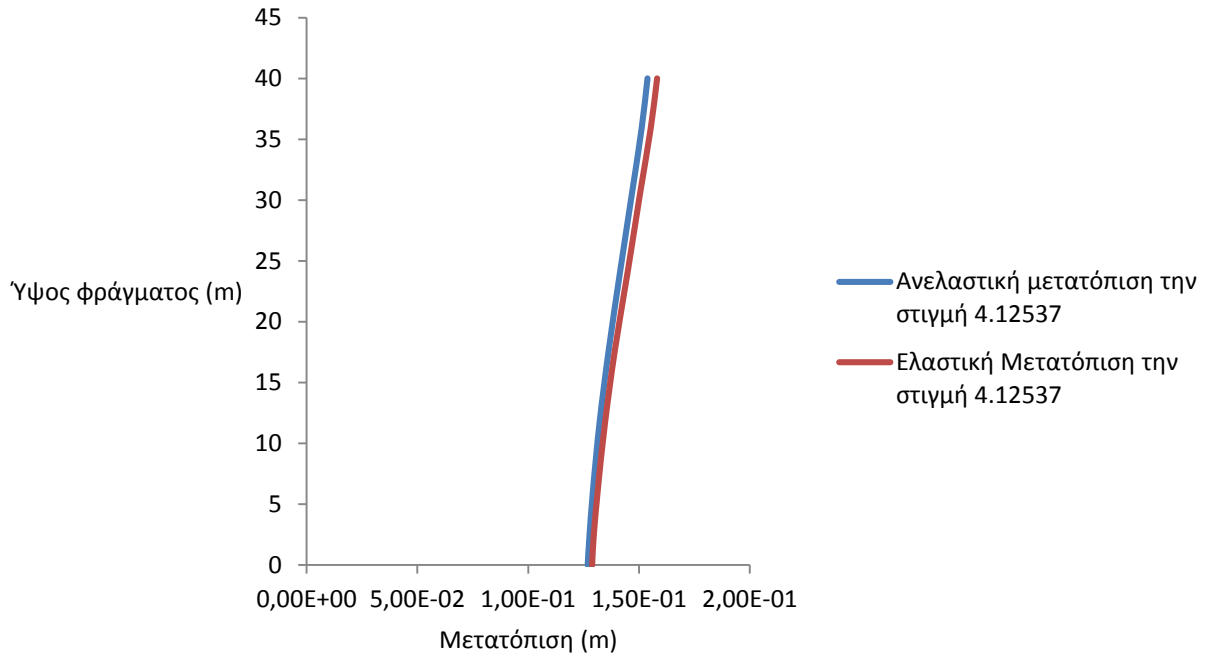


Διάγραμμα (61): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

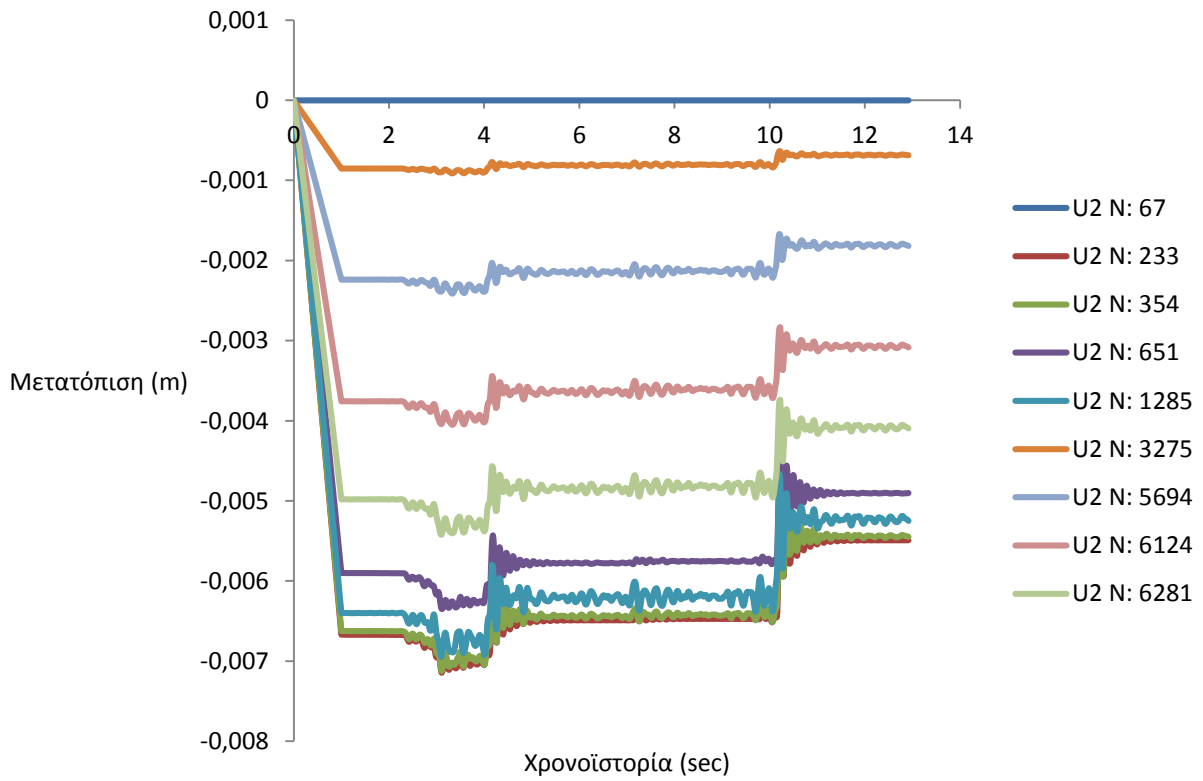
Nahanni – 280



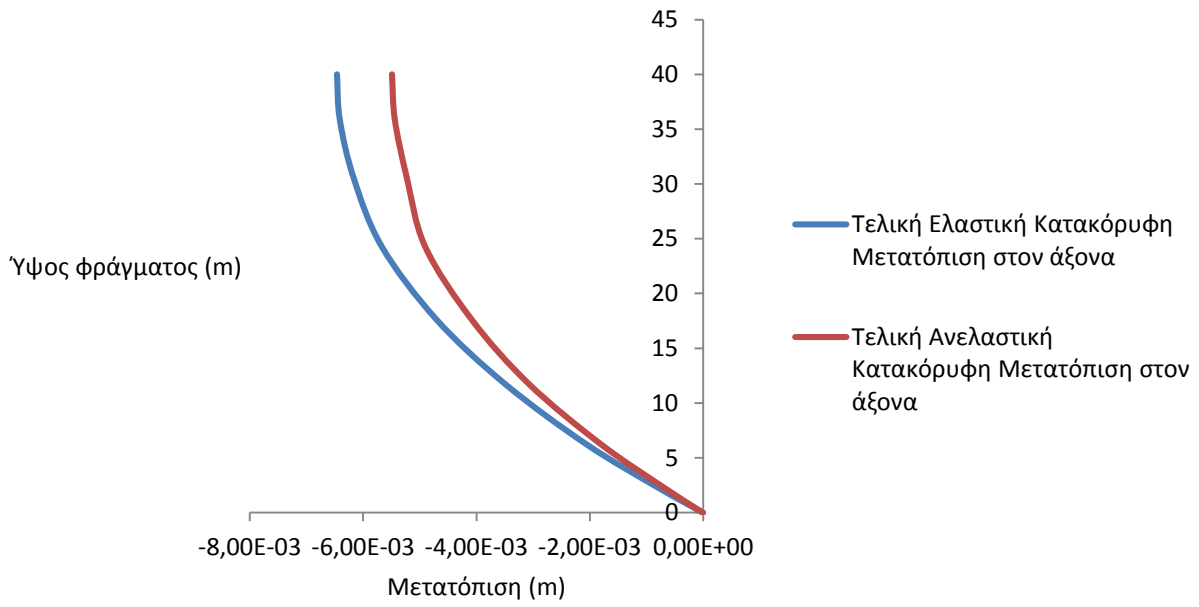
Διάγραμμα (62): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



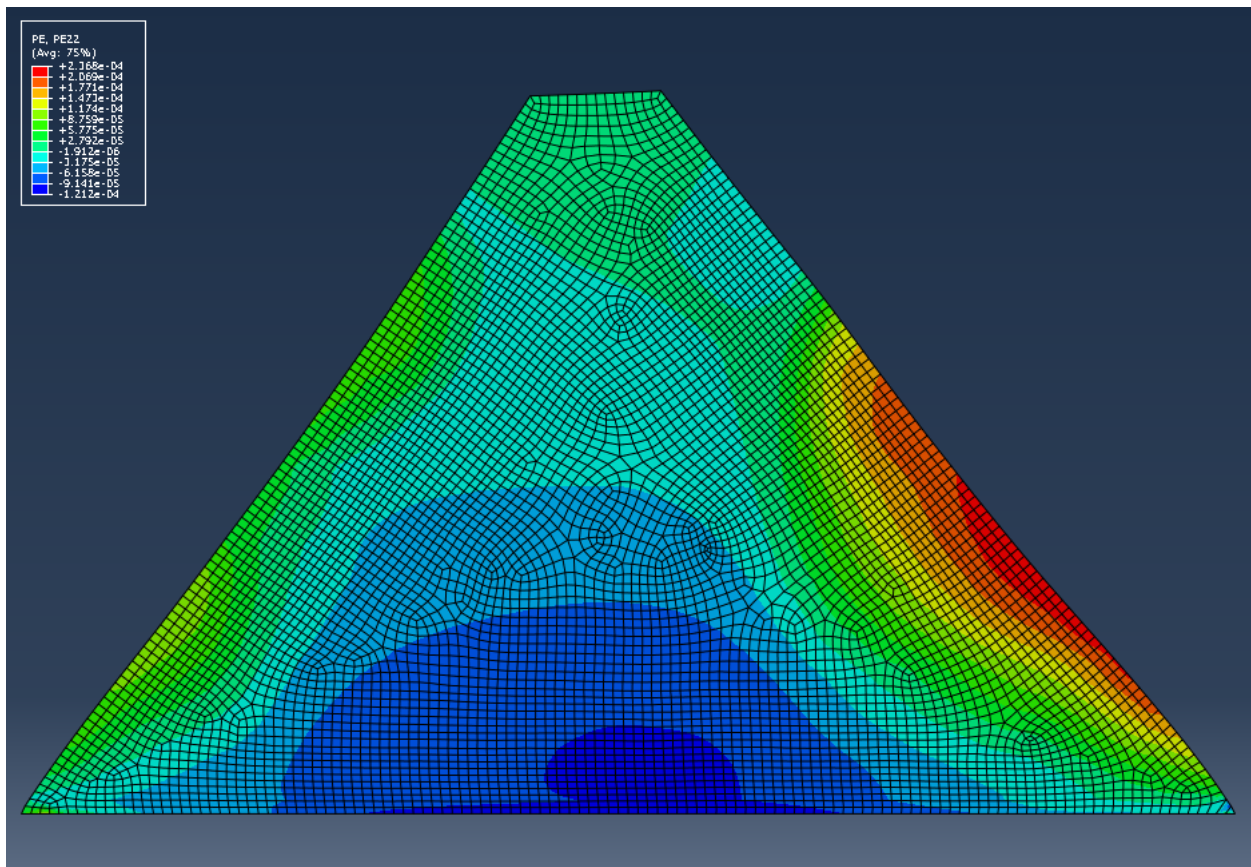
Διάγραμμα (63): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



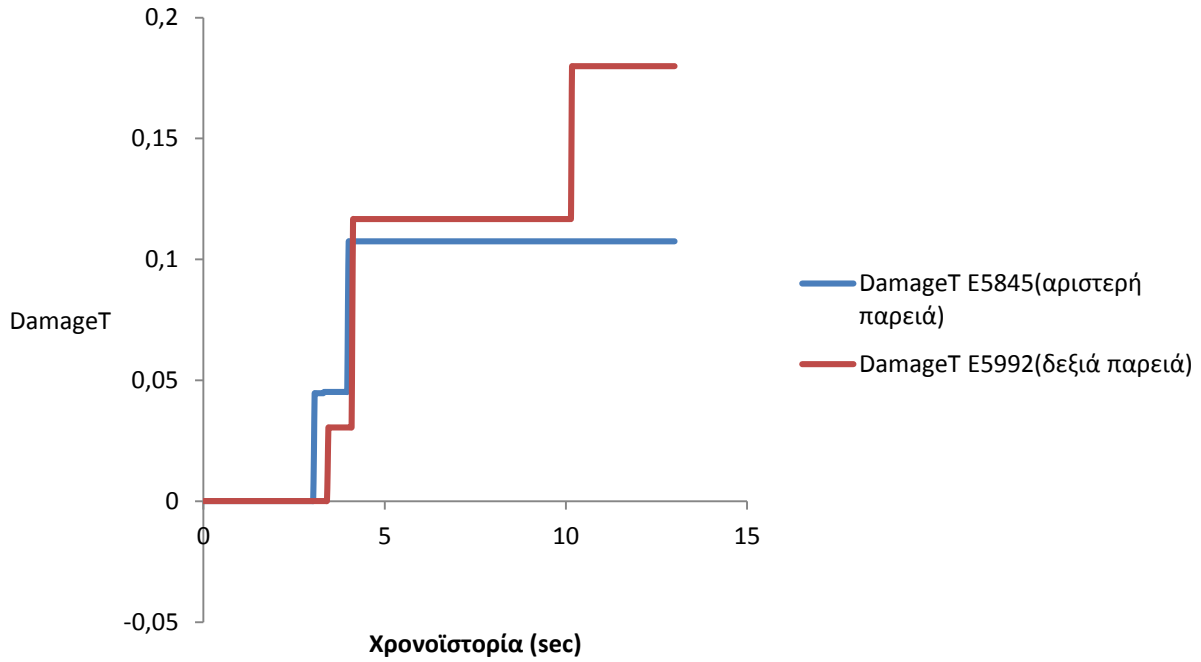
Διάγραμμα (64): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



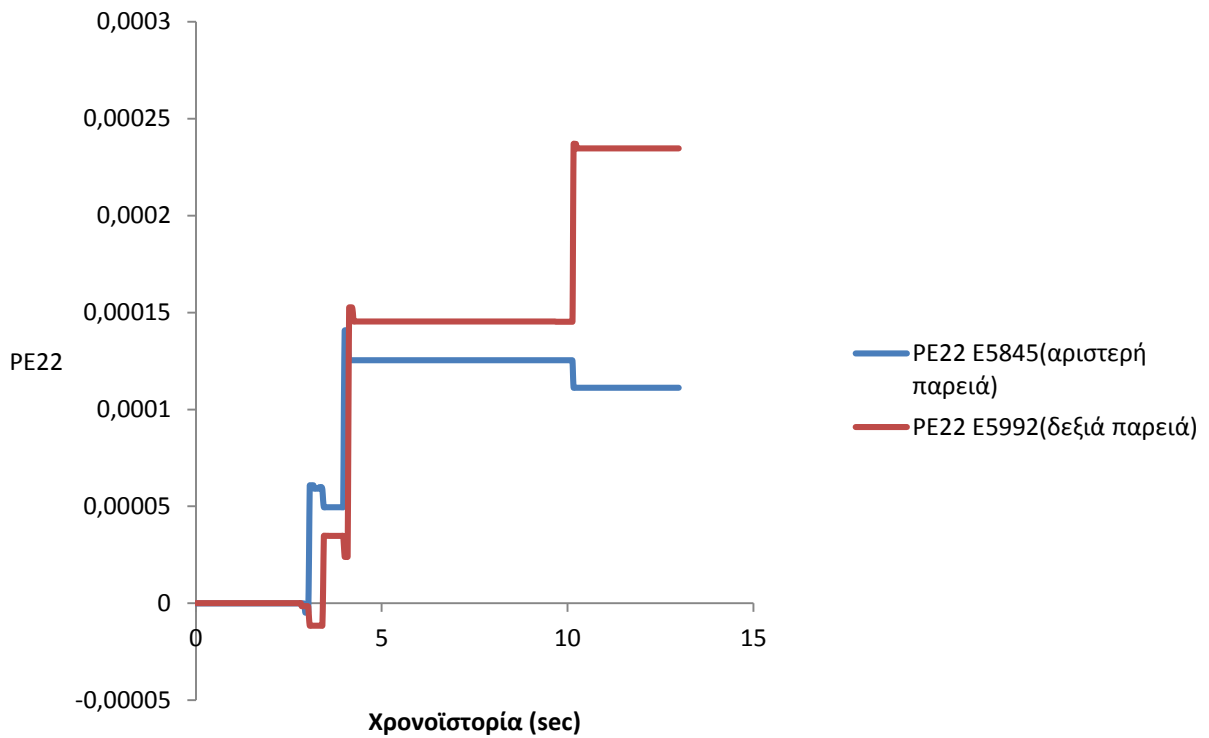
Διάγραμμα (65): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (15): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

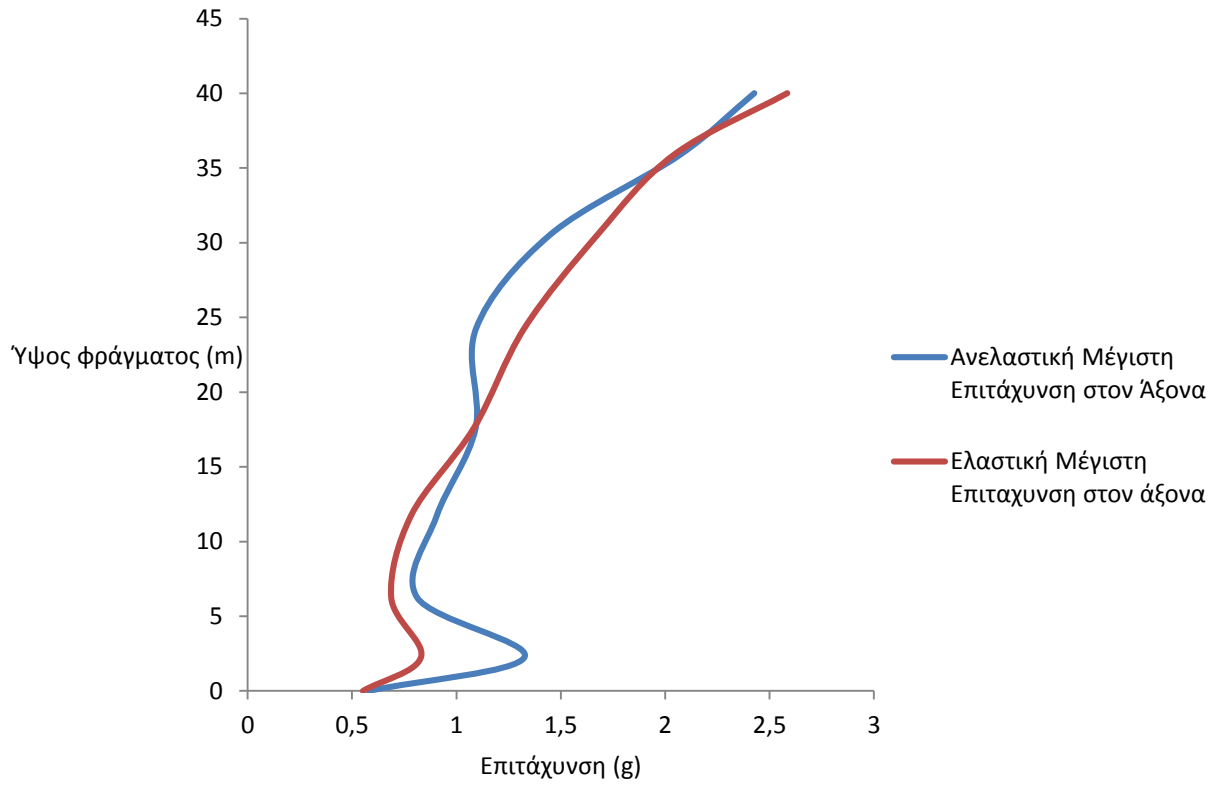


Διάγραμμα (66): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

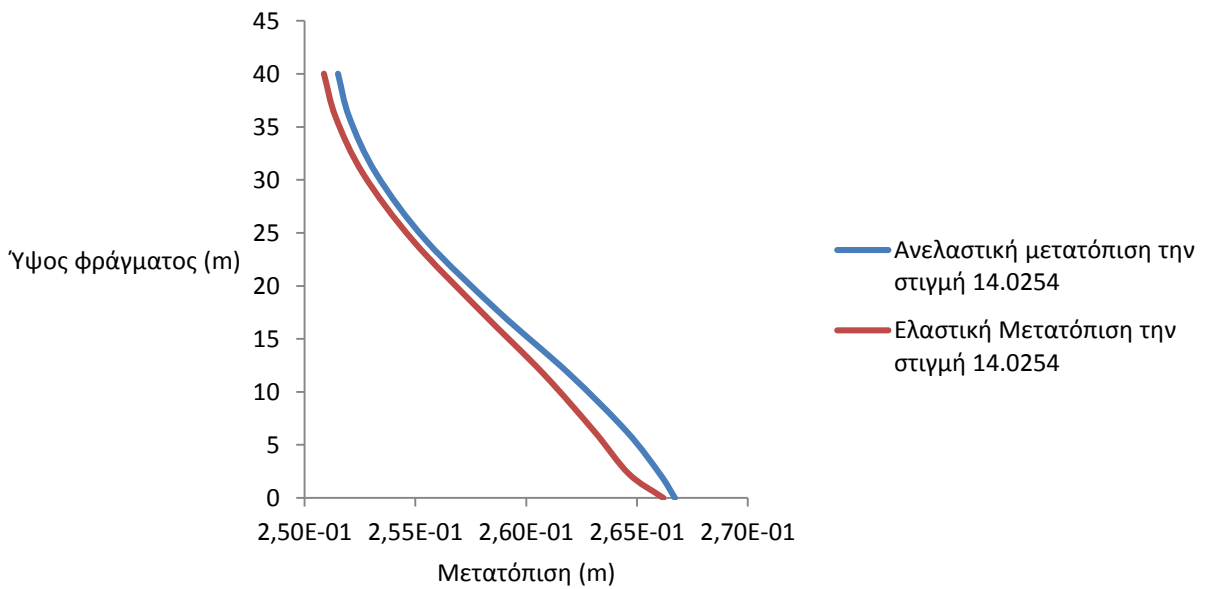


Διάγραμμα (67): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

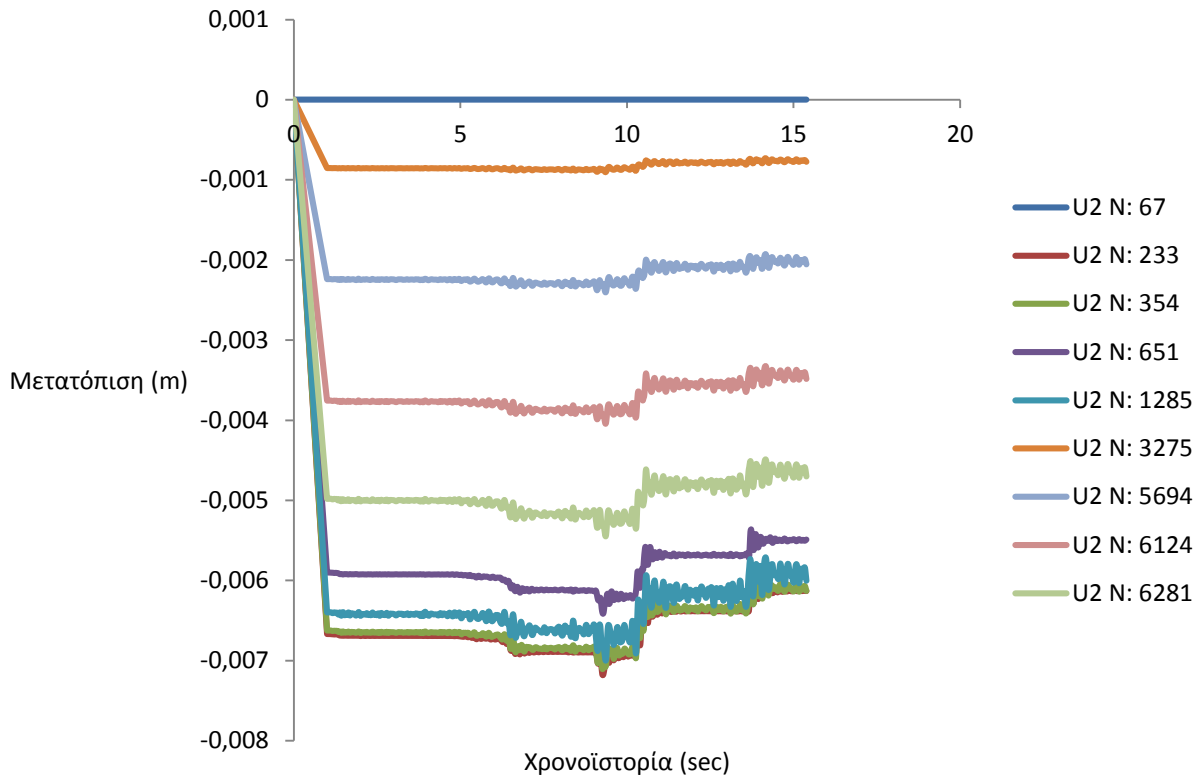
Lucerne – 000



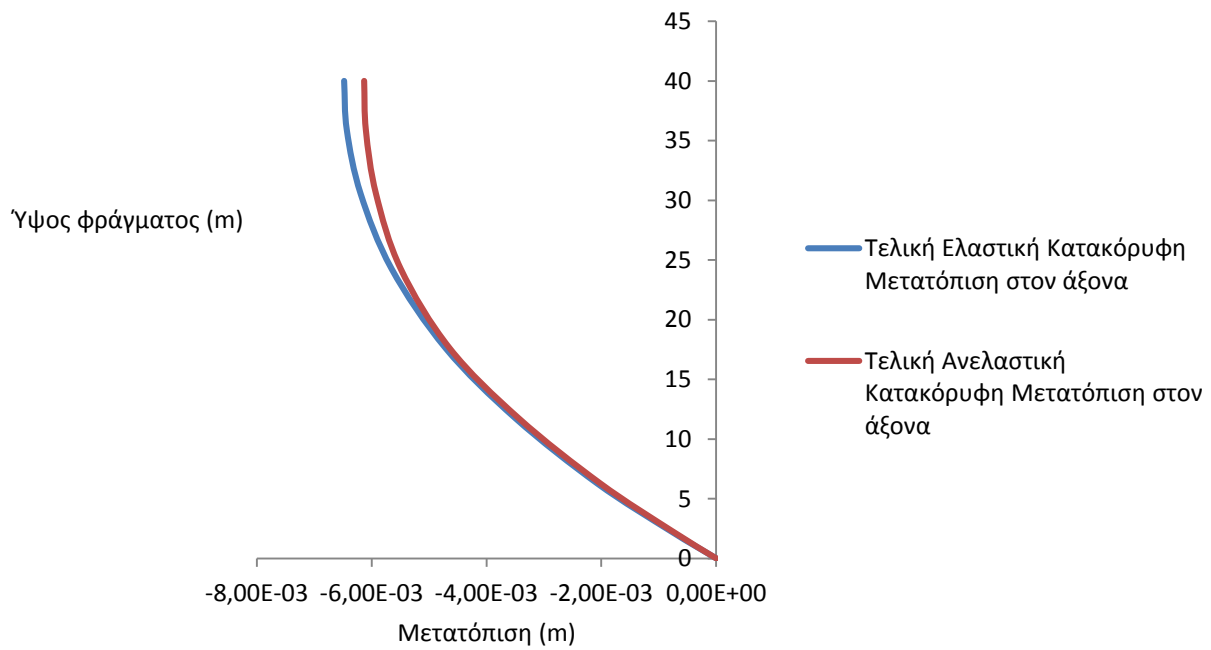
Διάγραμμα (68): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



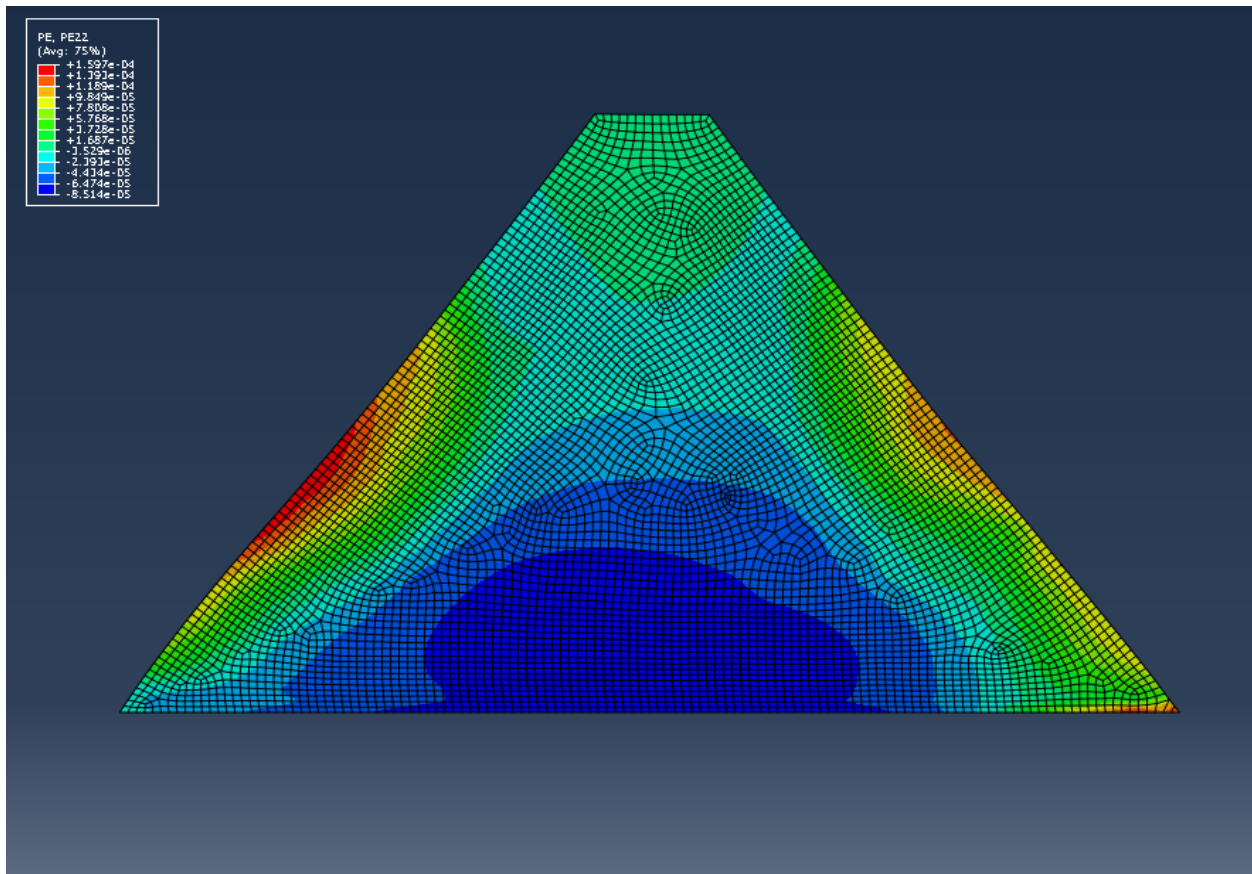
Διάγραμμα (69): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



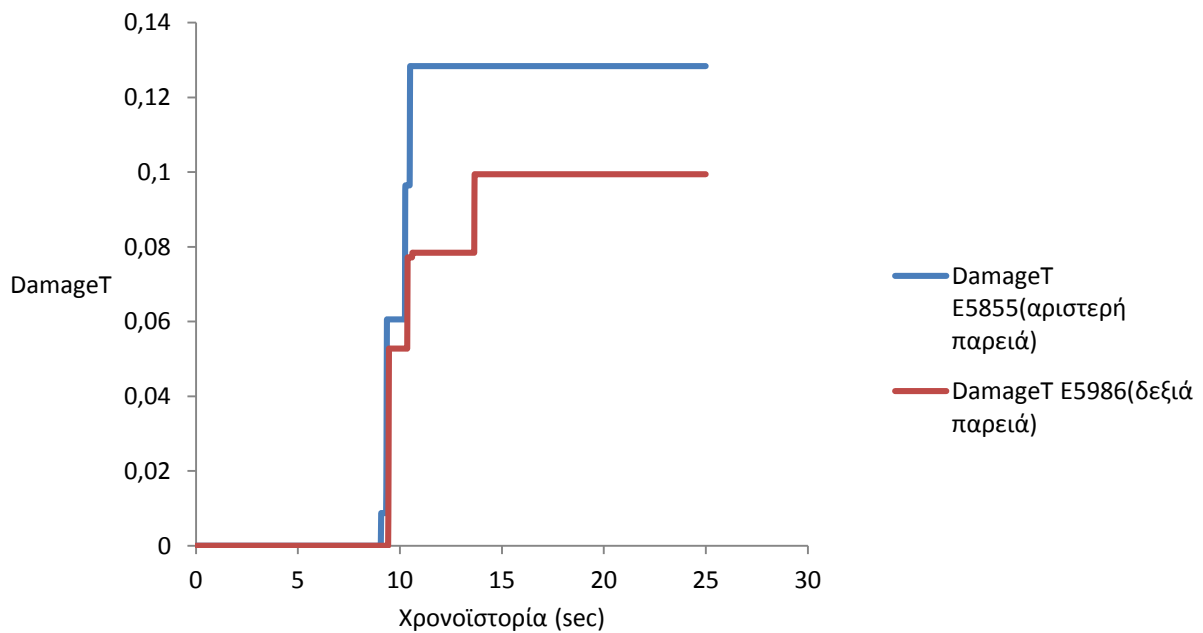
Διάγραμμα (70): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



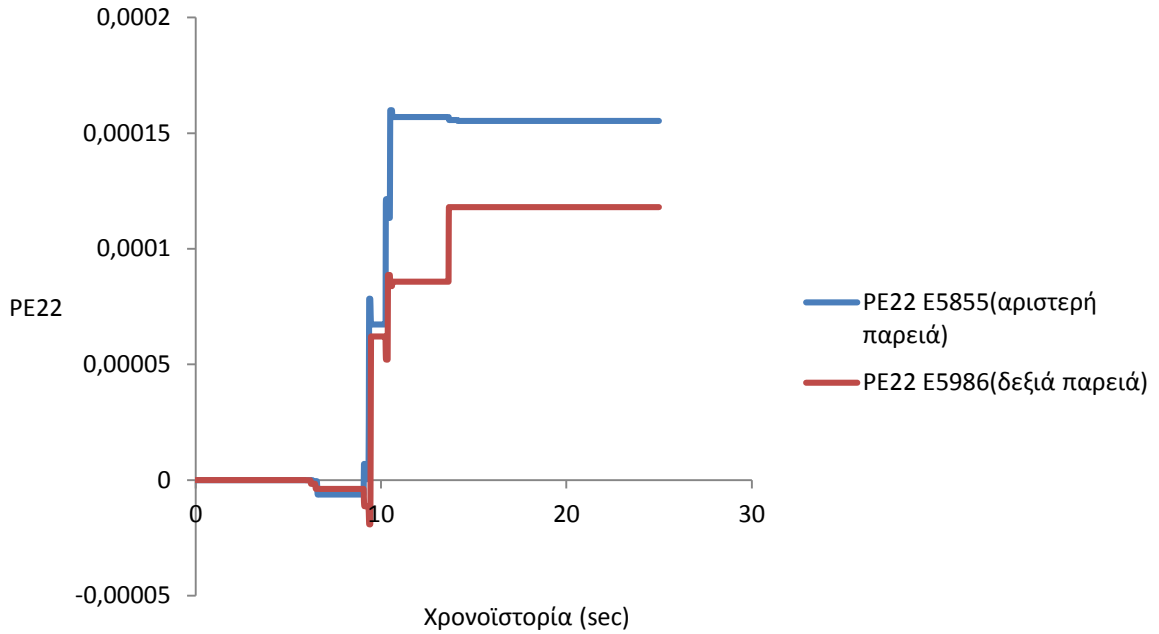
Διάγραμμα (71): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (16): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

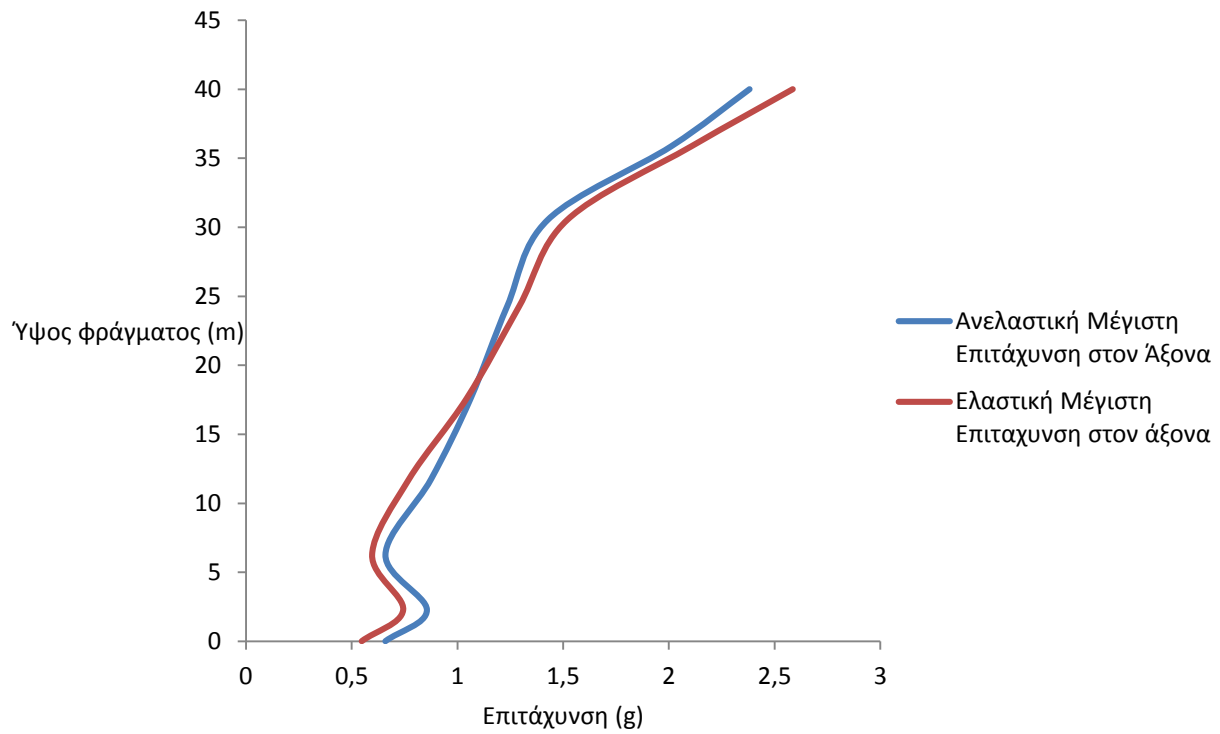


Διάγραμμα (72): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

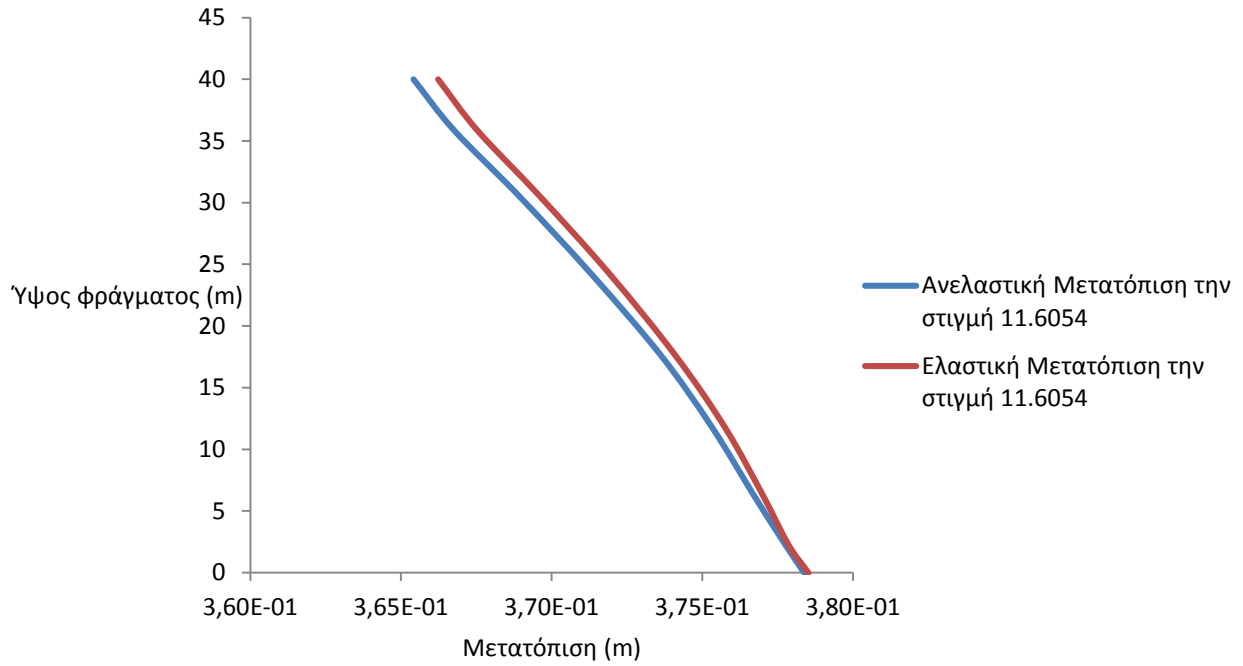


Διάγραμμα (73): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

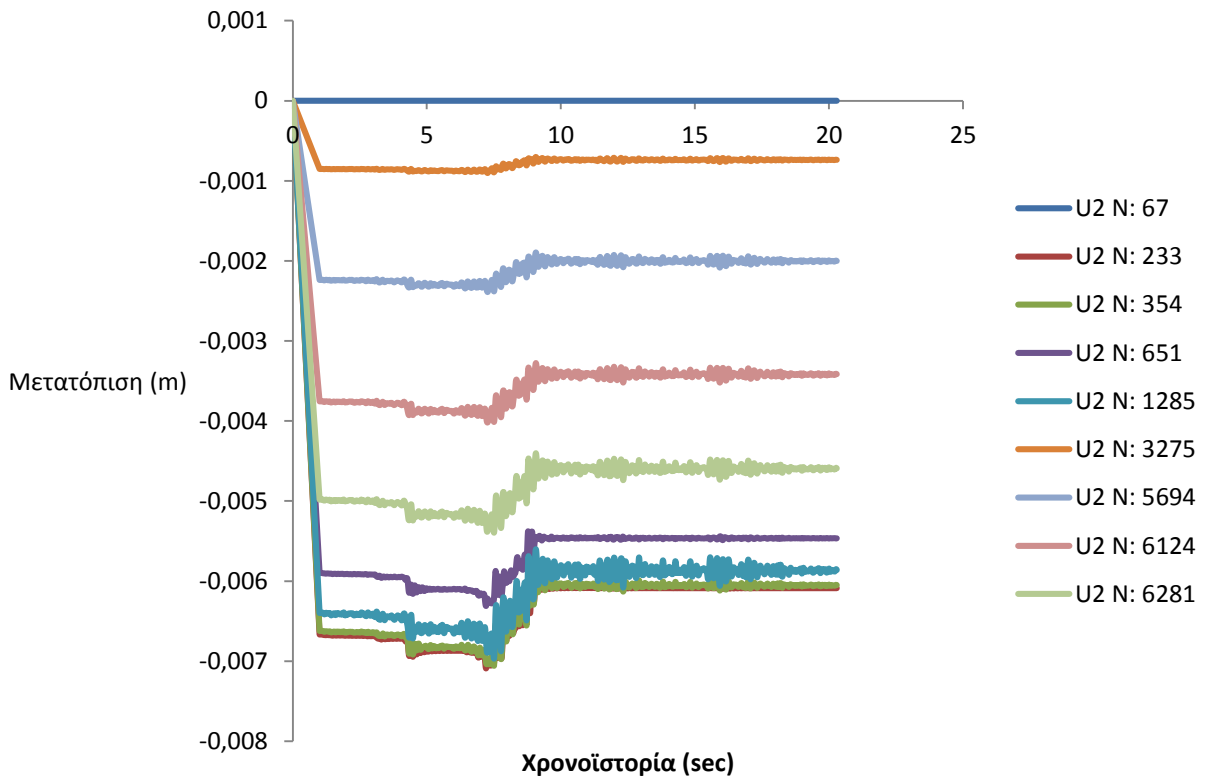
Lucerne – 275



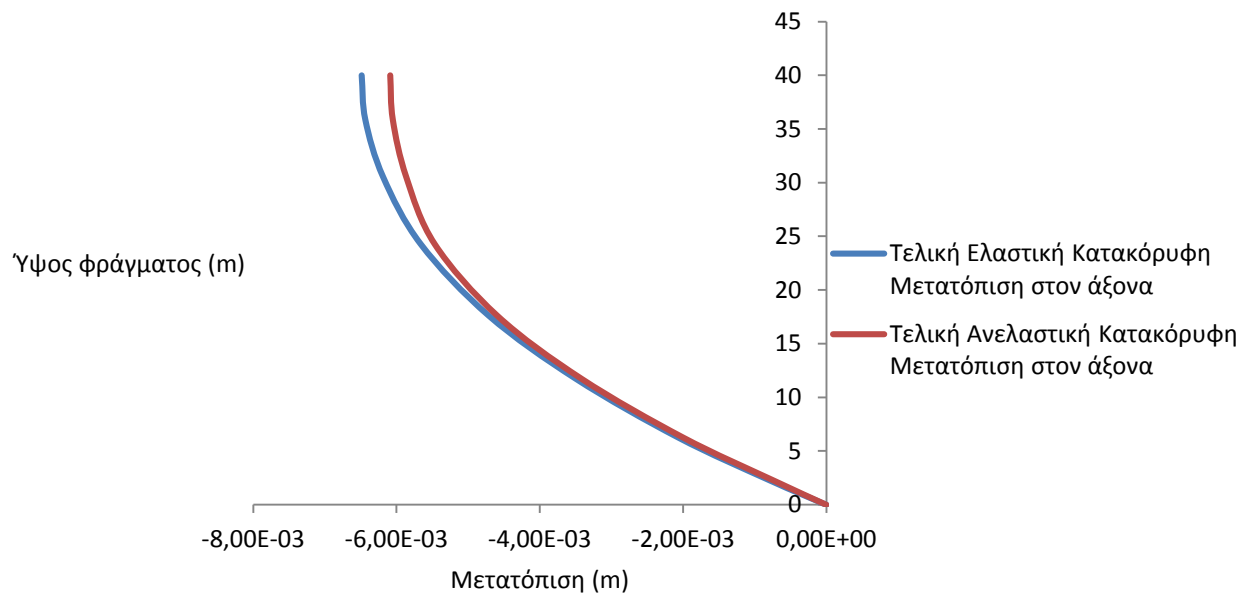
Διάγραμμα (74): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



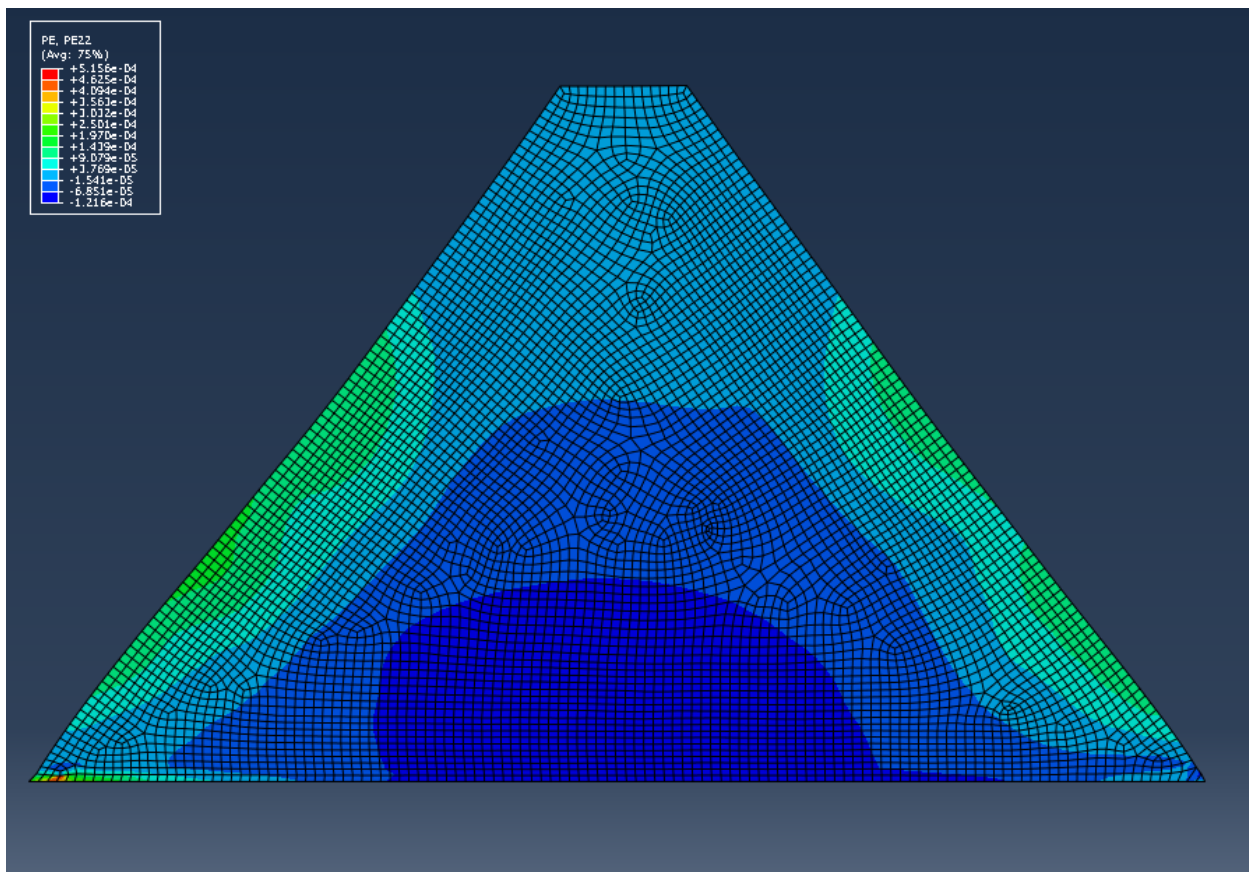
Διάγραμμα (75): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



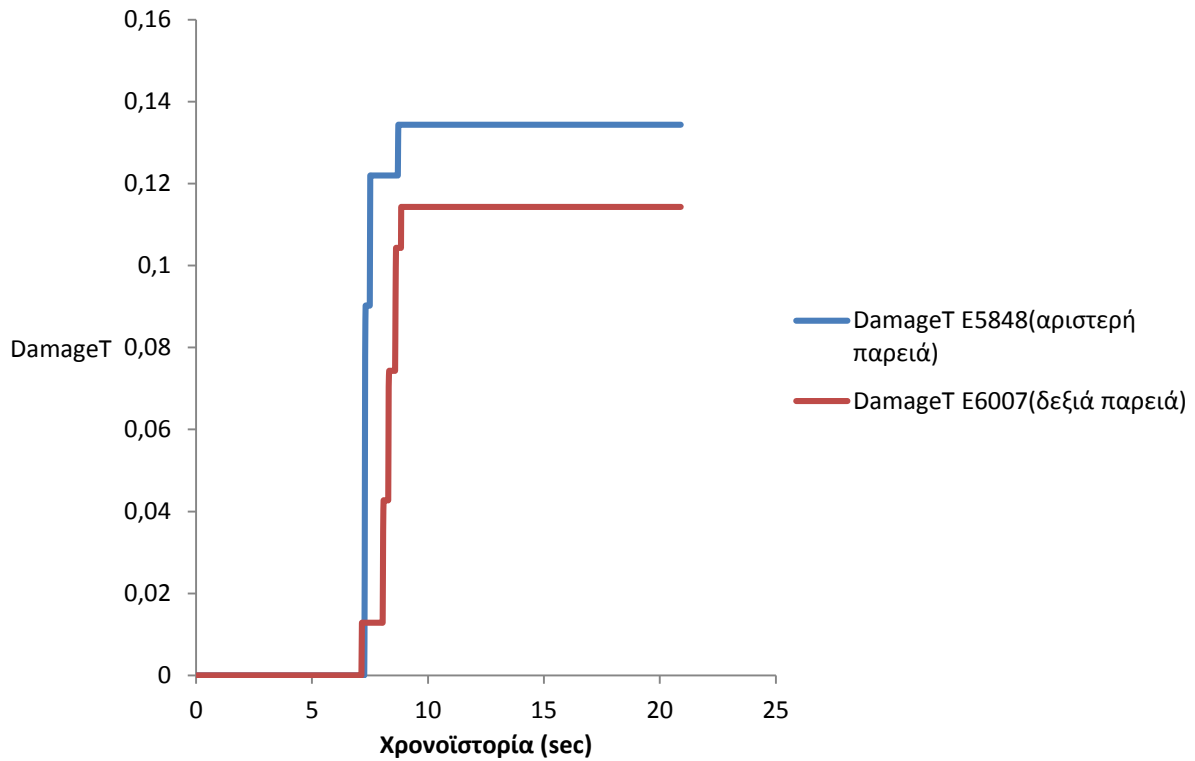
Διάγραμμα (76): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



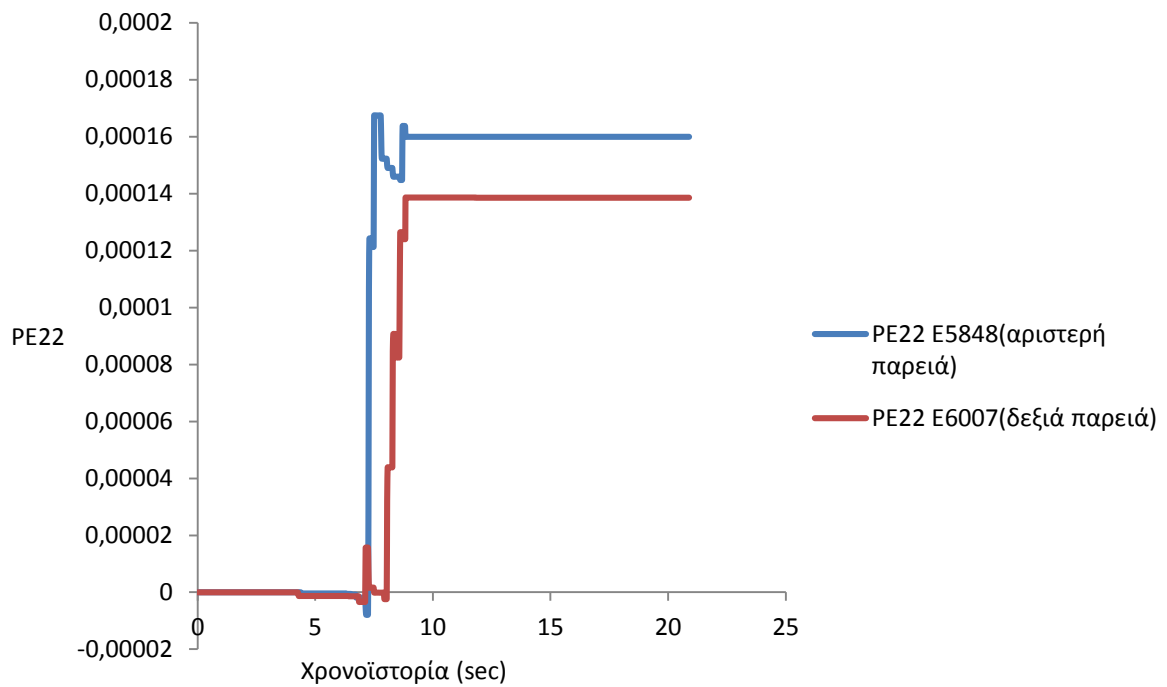
Διάγραμμα (77): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (17): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

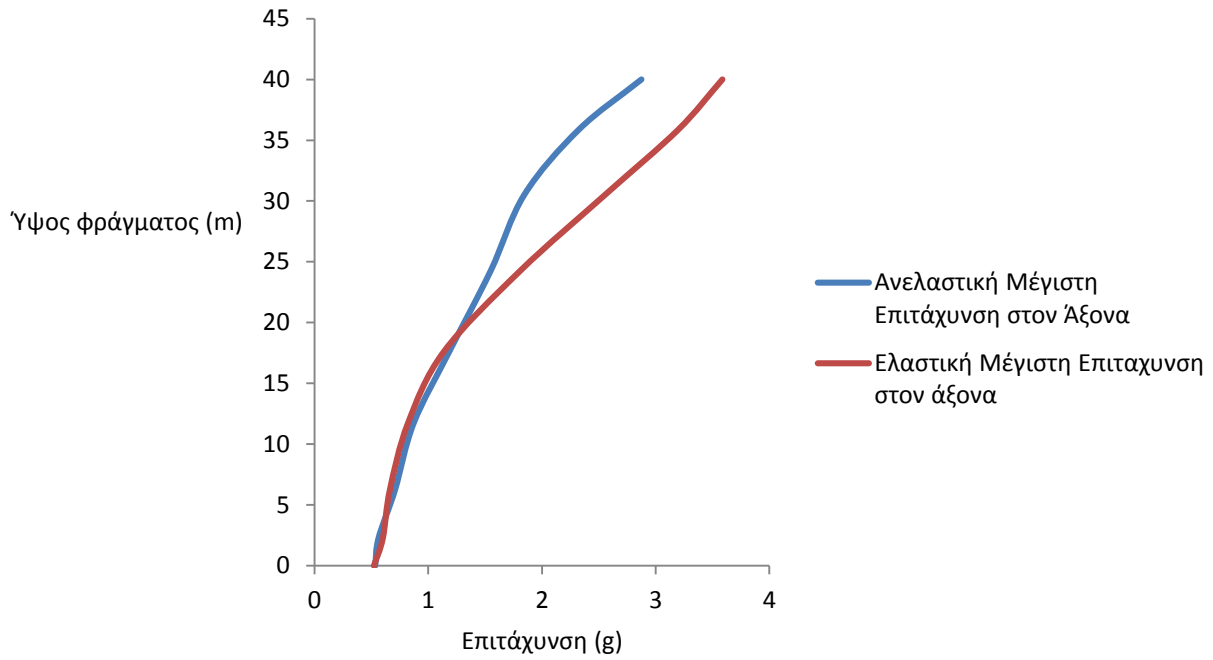


Διάγραμμα (78): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

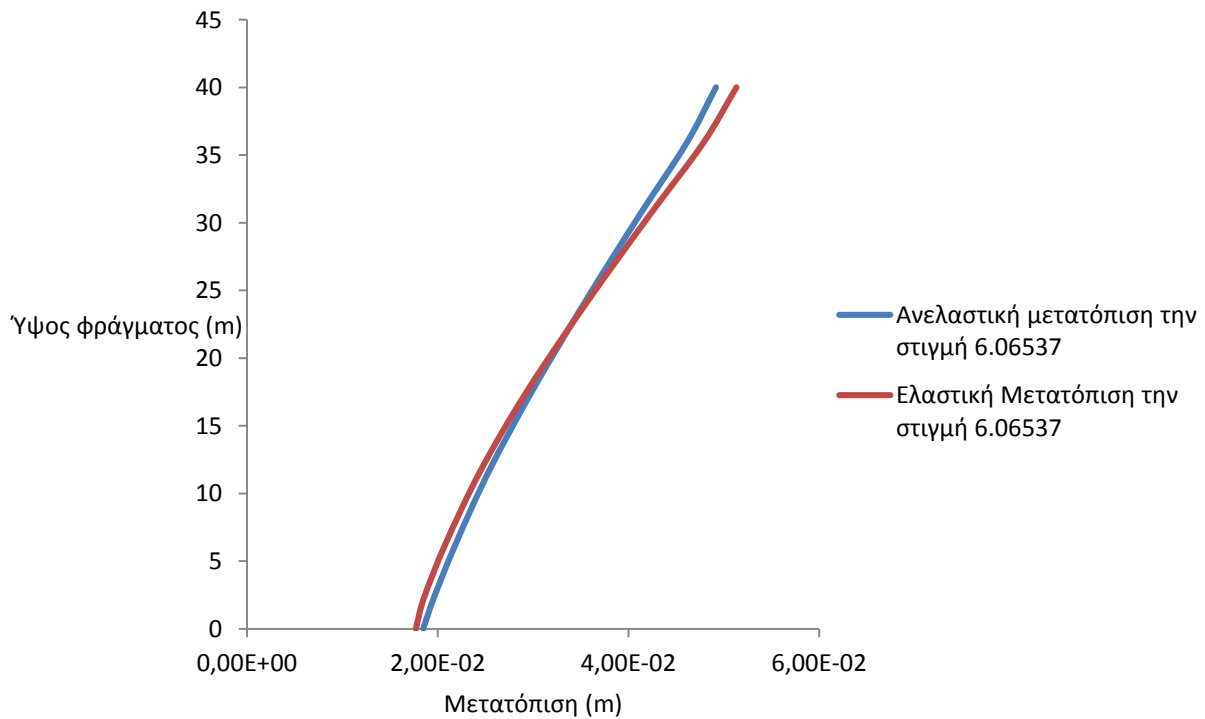


Διάγραμμα (79): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

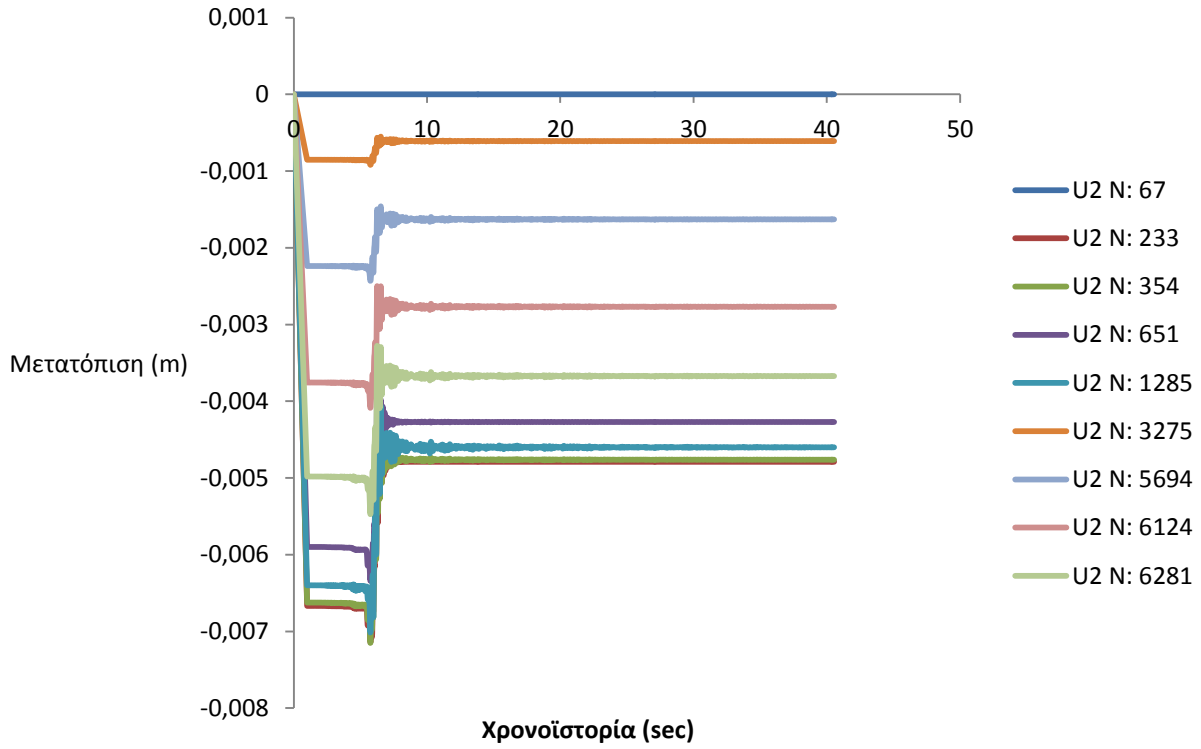
Gilroy – 000



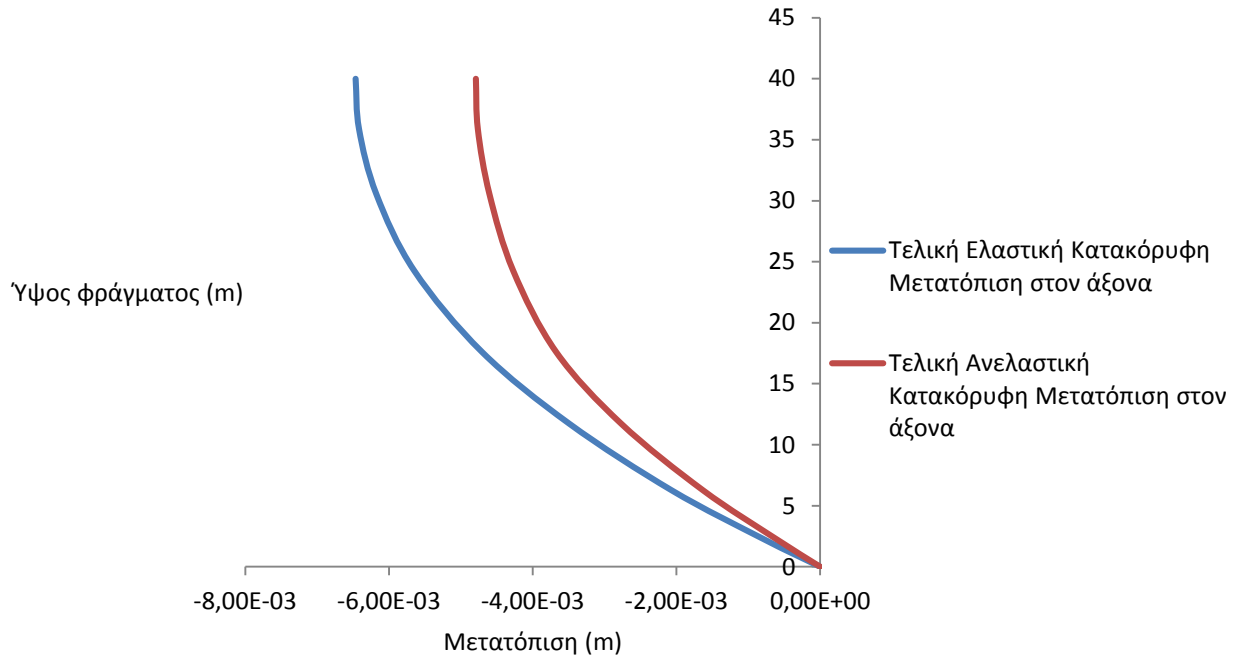
Διάγραμμα (80): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



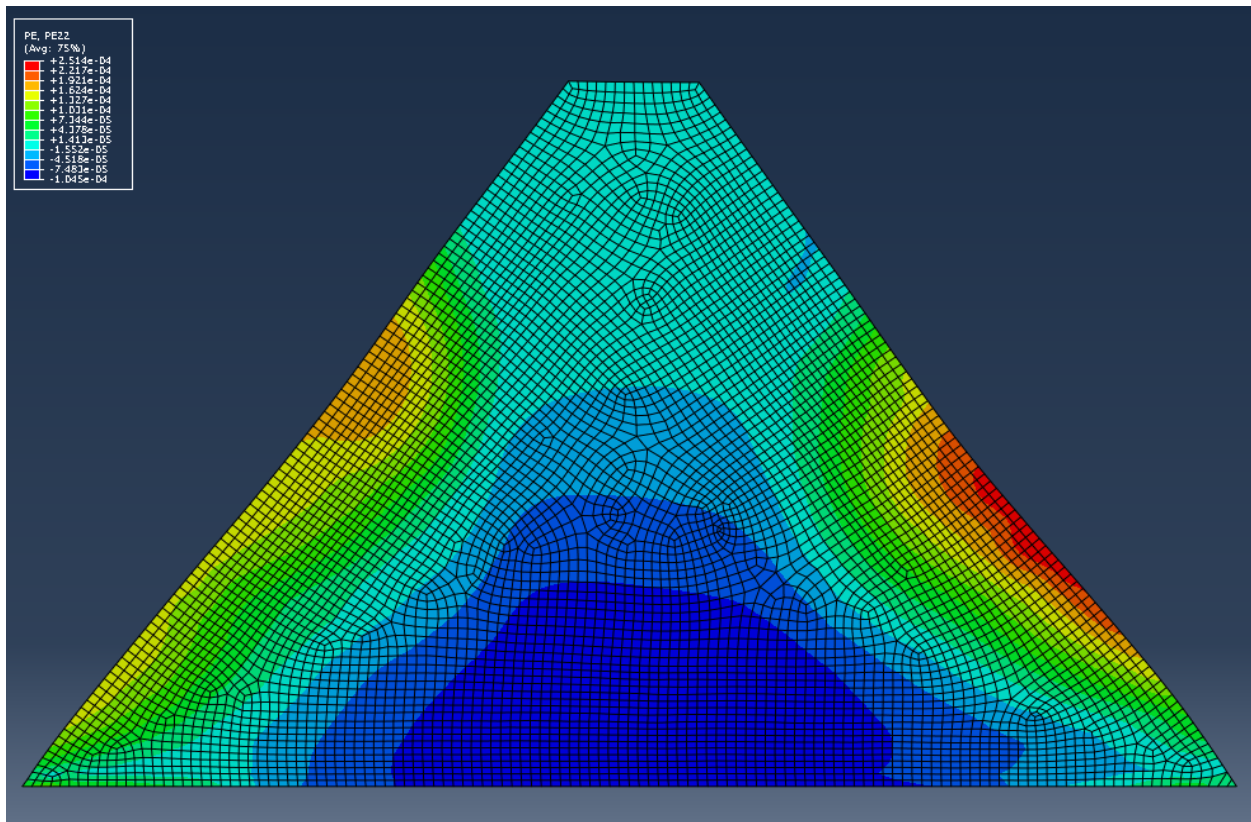
Διάγραμμα (81): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



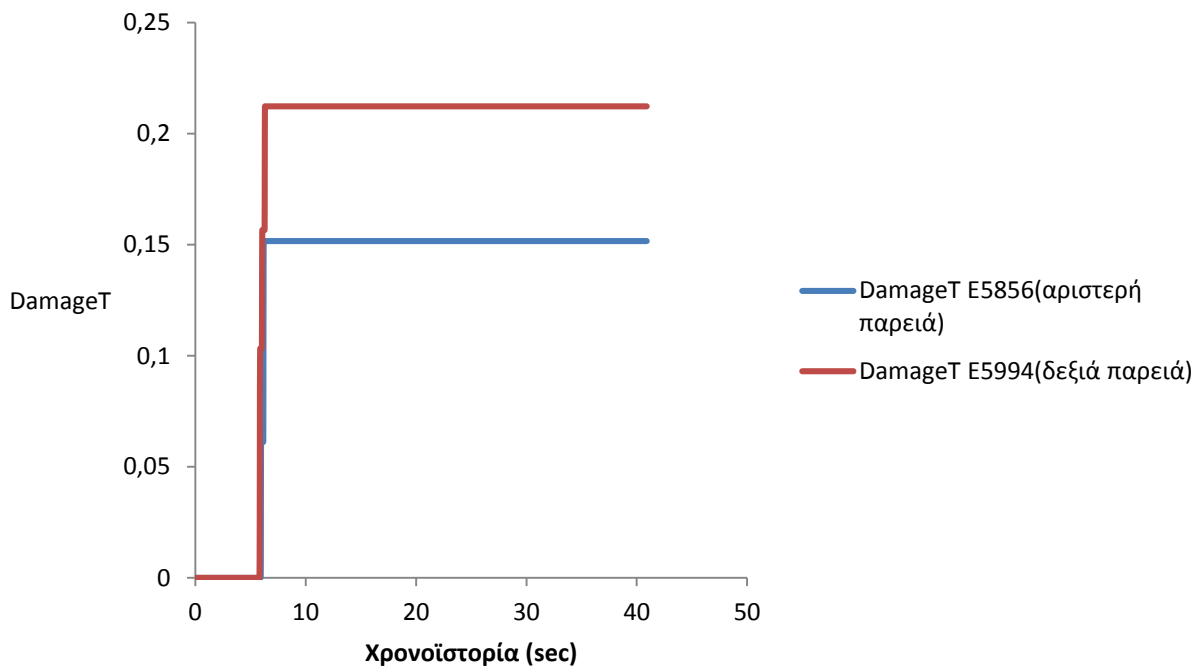
Διάγραμμα (82): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



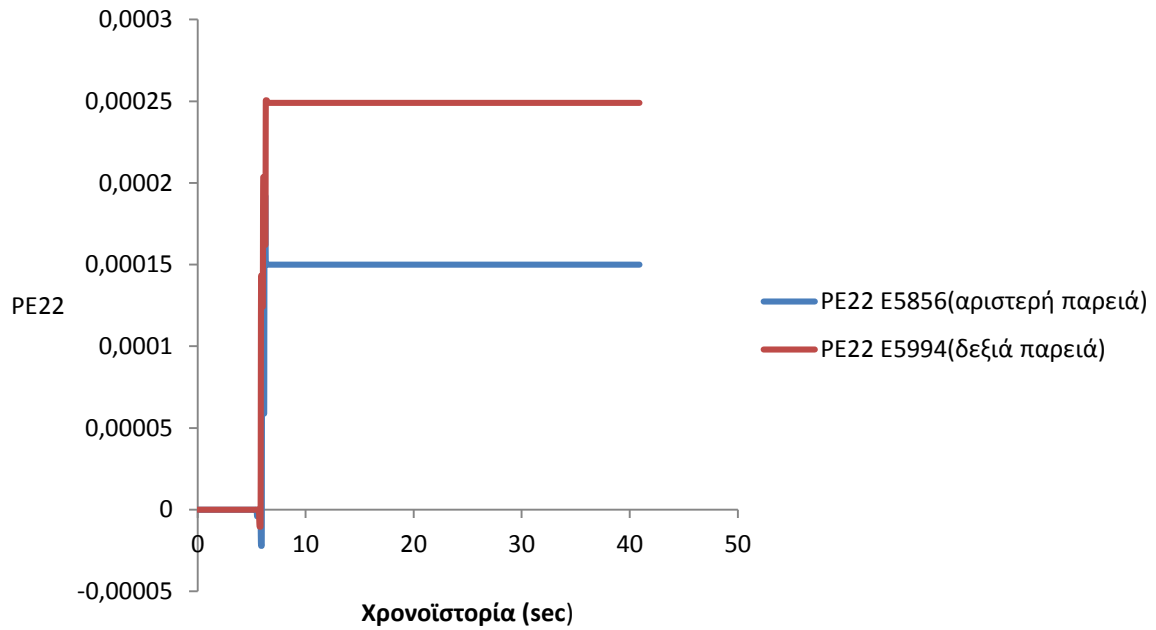
Διάγραμμα (83): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (18): Κατανομή κατακορύφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

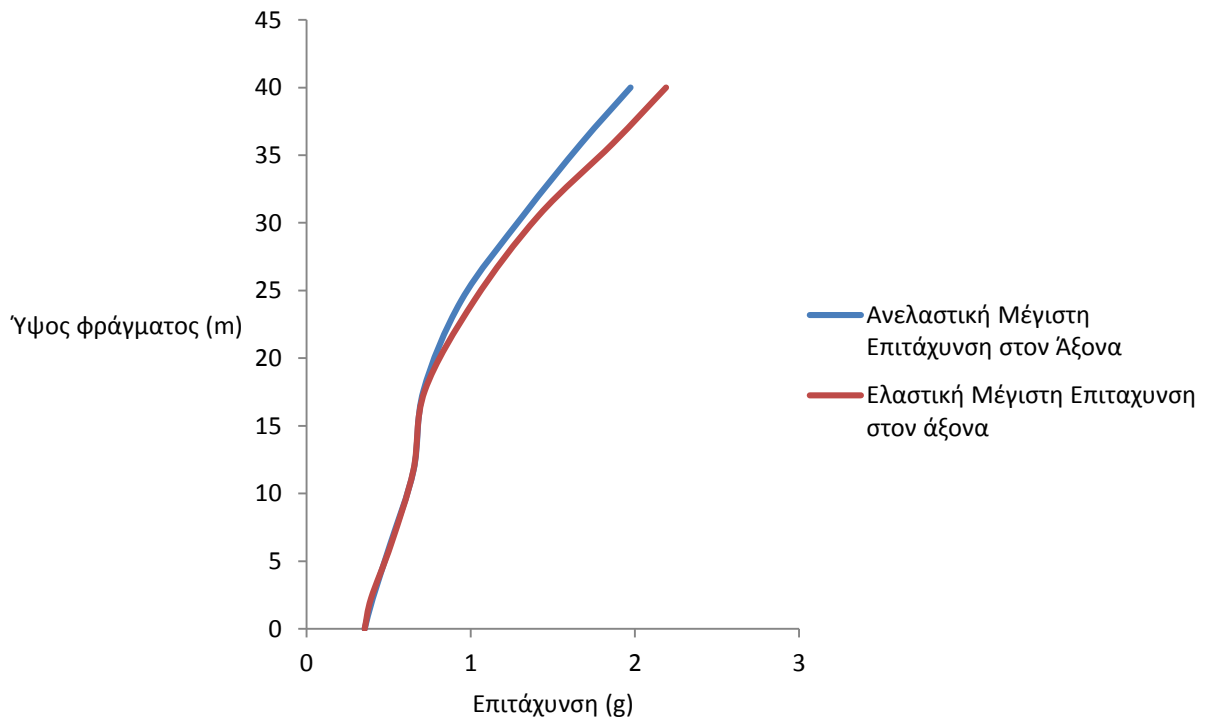


Διάγραμμα (84): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

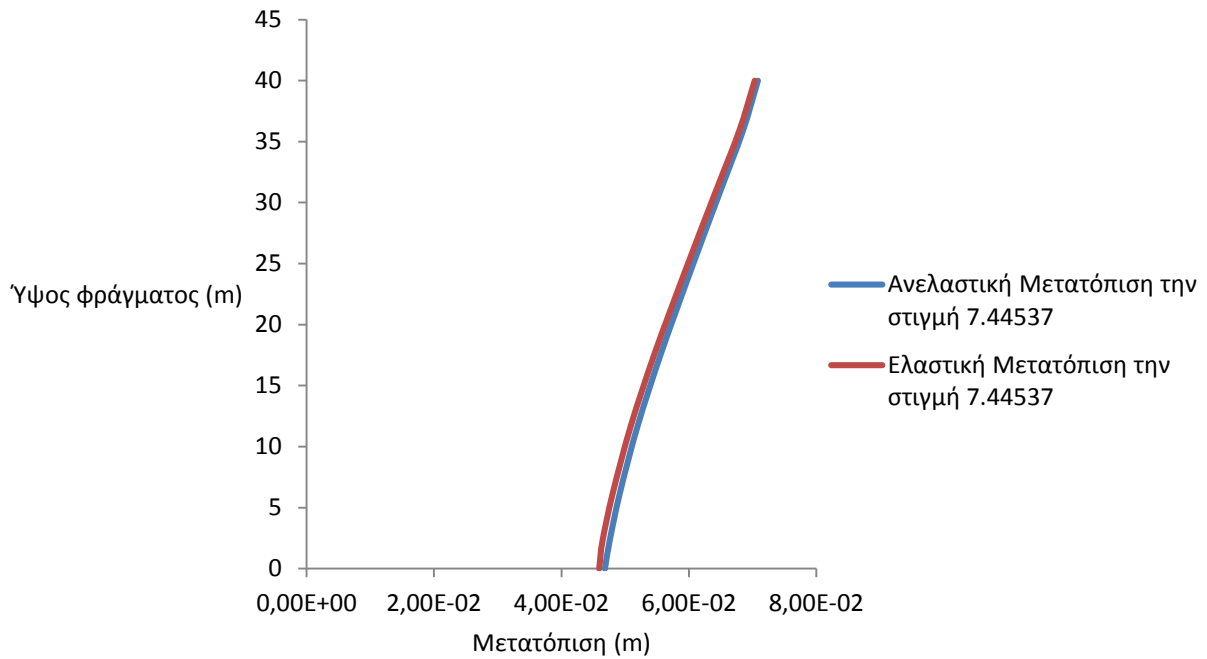


Διάγραμμα (85): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

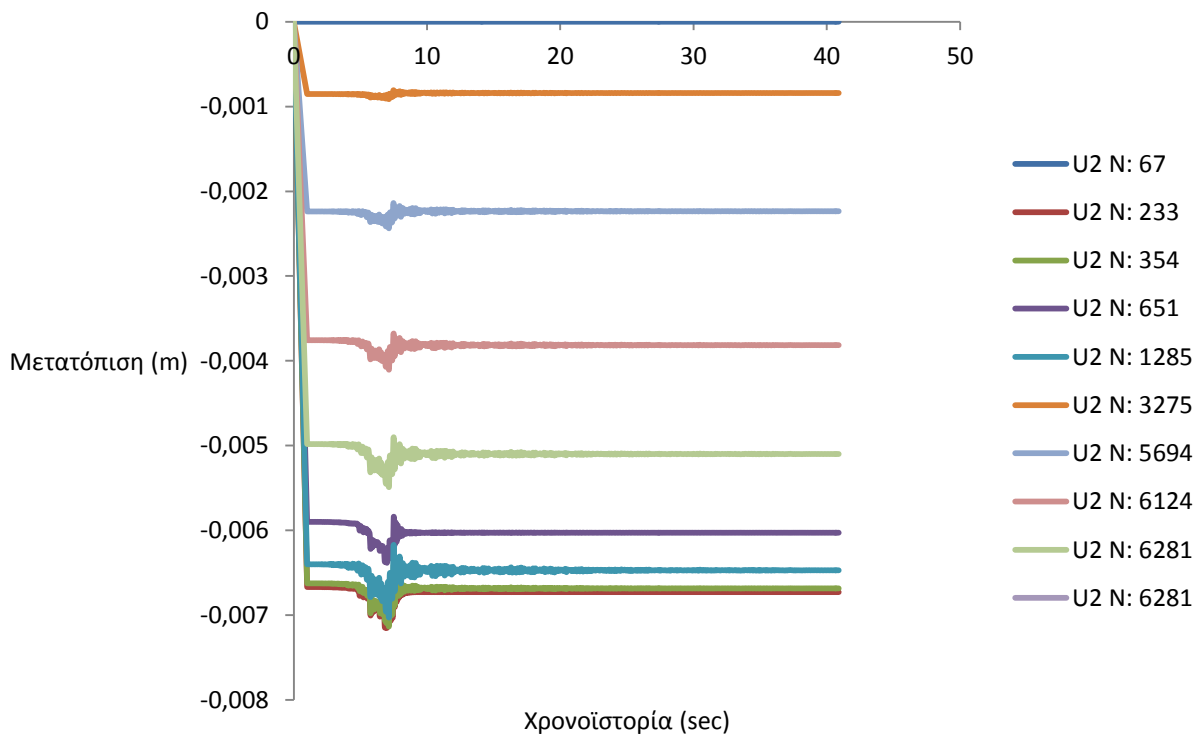
Gilroy – 090



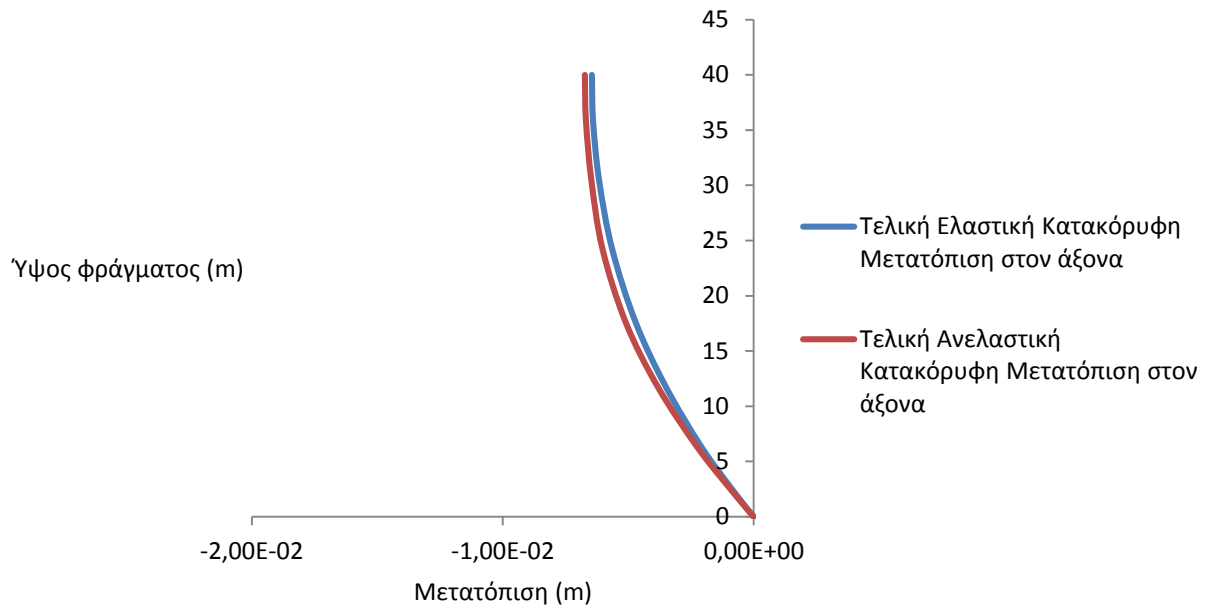
Διάγραμμα (86): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



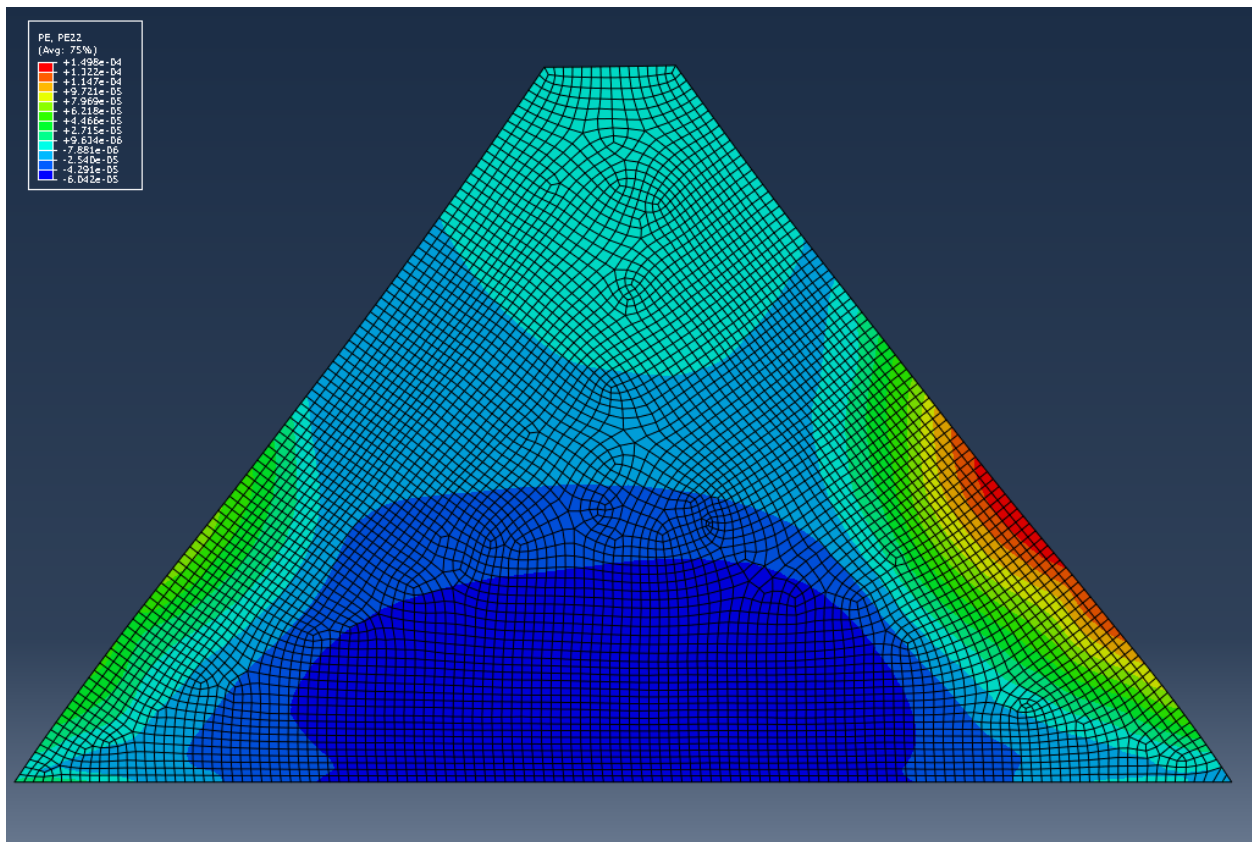
Διάγραμμα (87): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



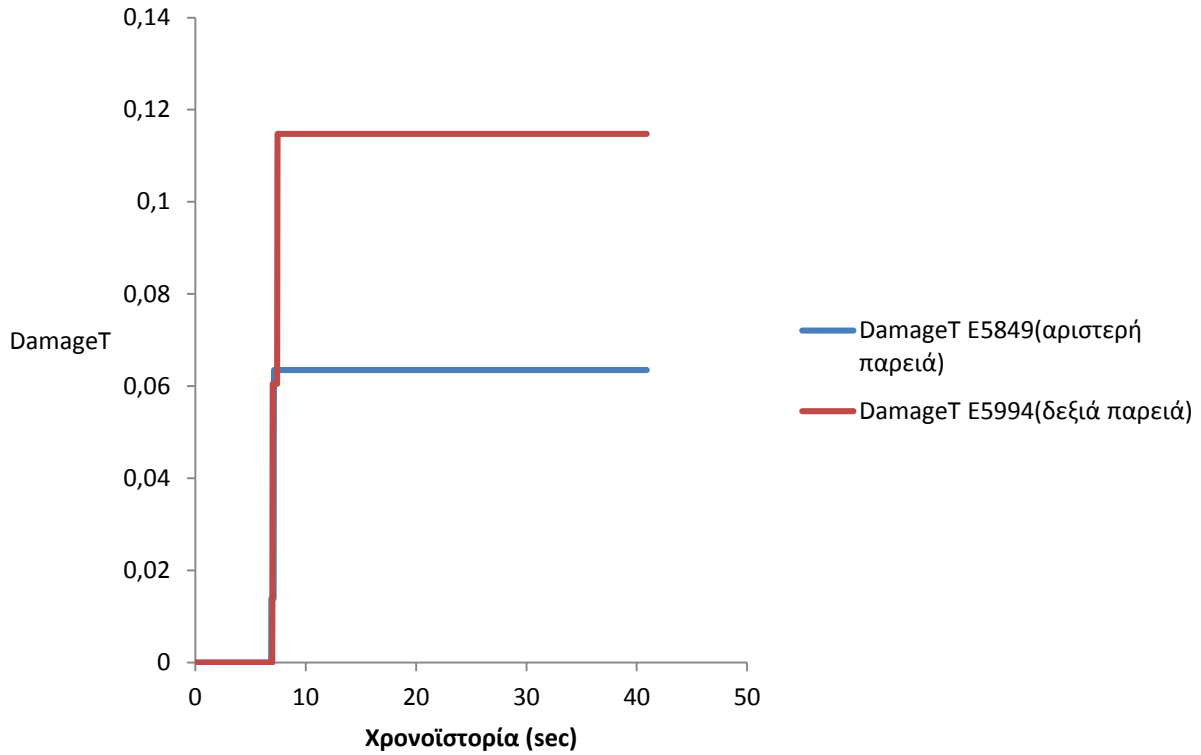
Διάγραμμα (88): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



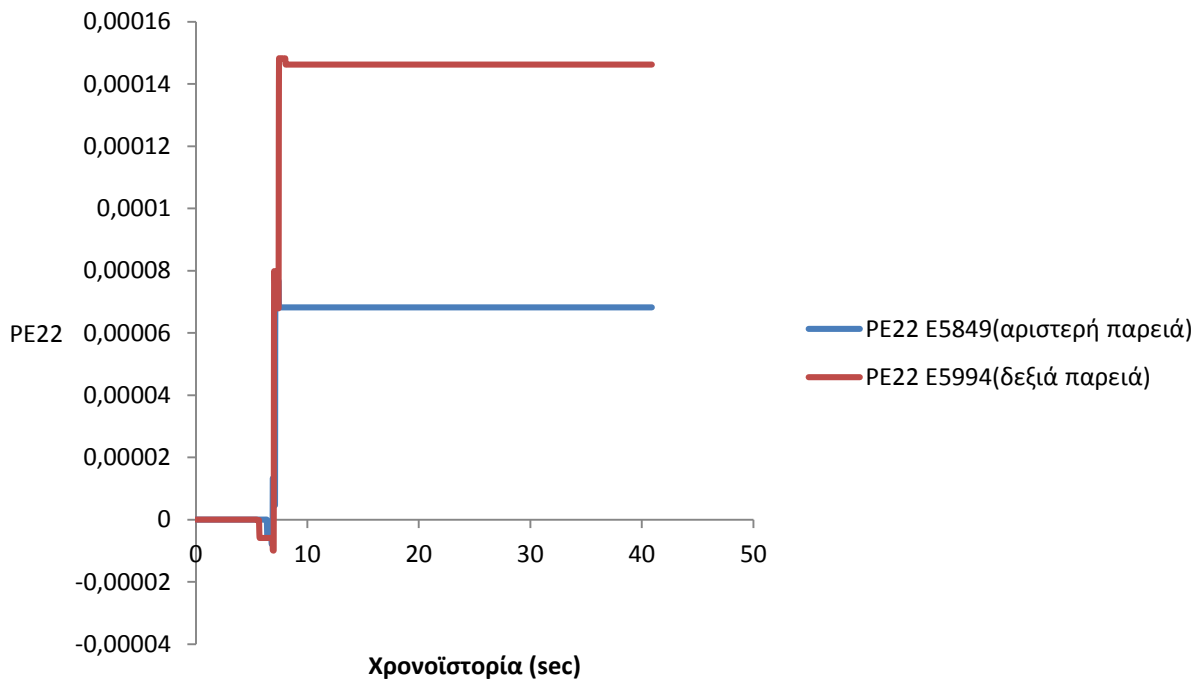
Διάγραμμα (89): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (19): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

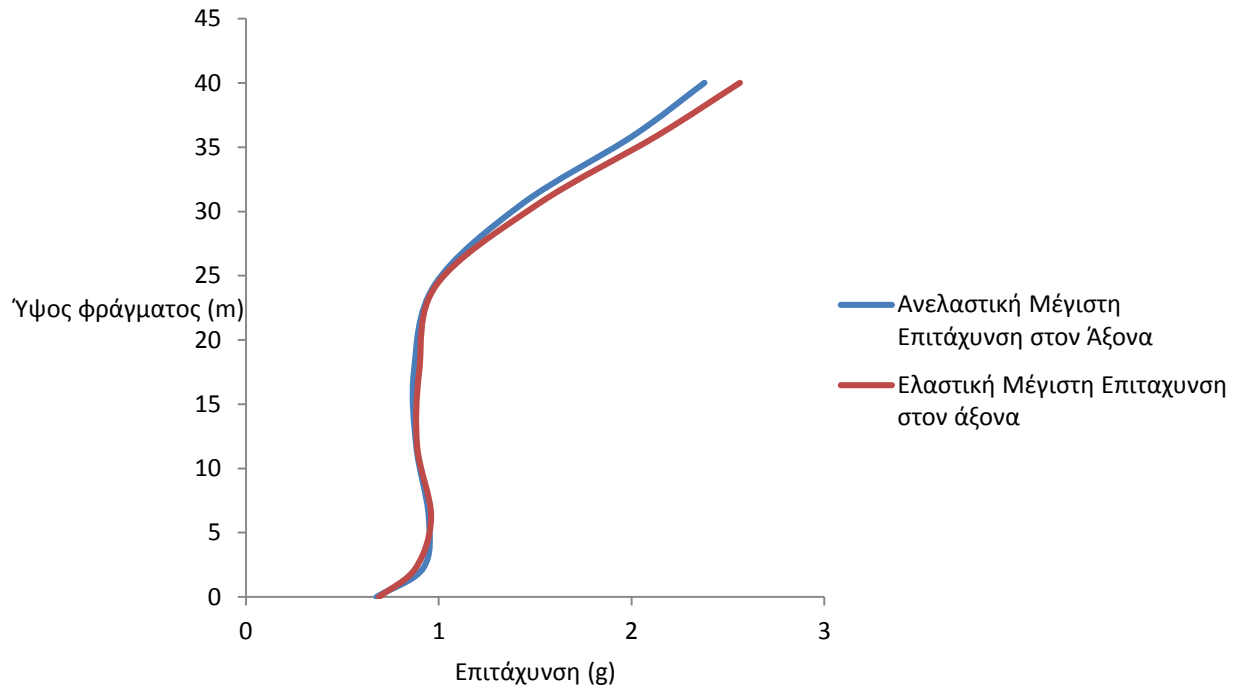


Διάγραμμα (90): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

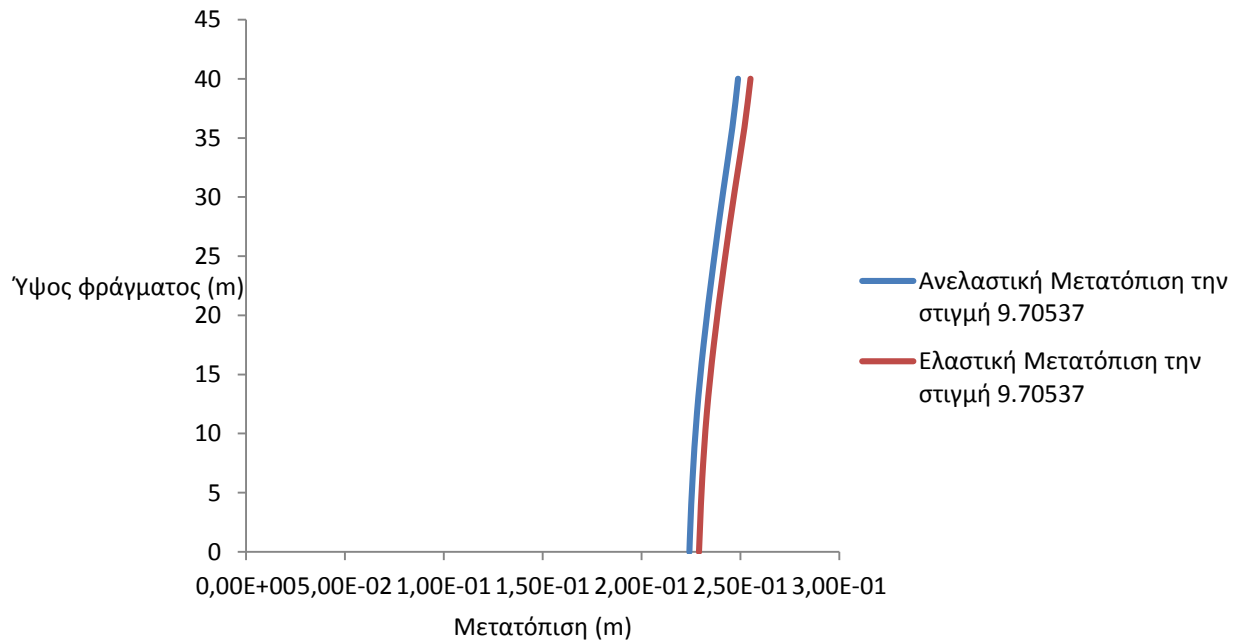


Διάγραμμα (91): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

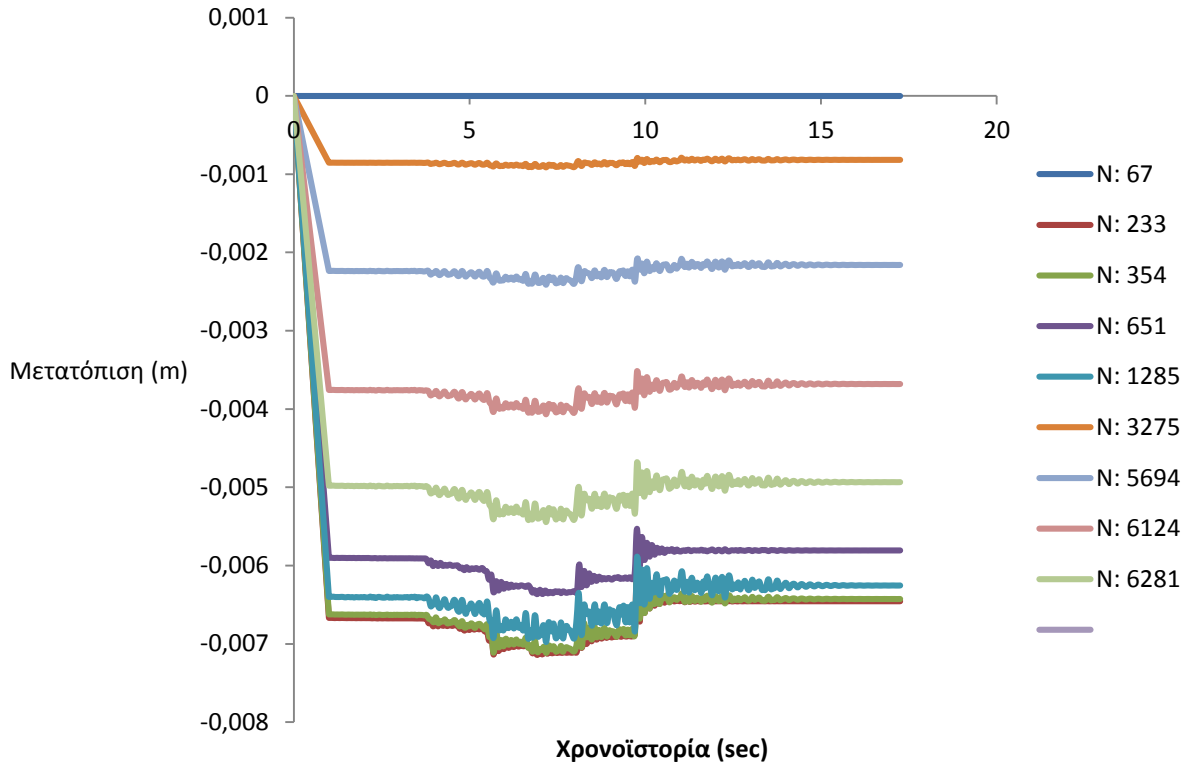
Karakyr – 090



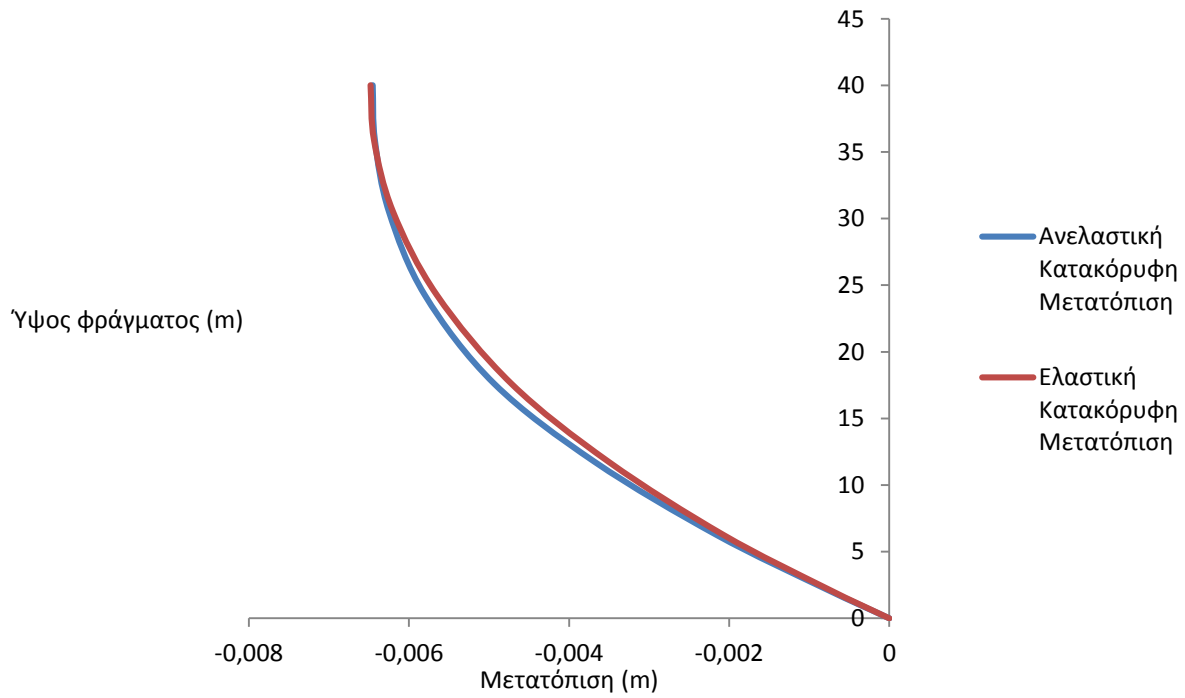
Διάγραμμα (92): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



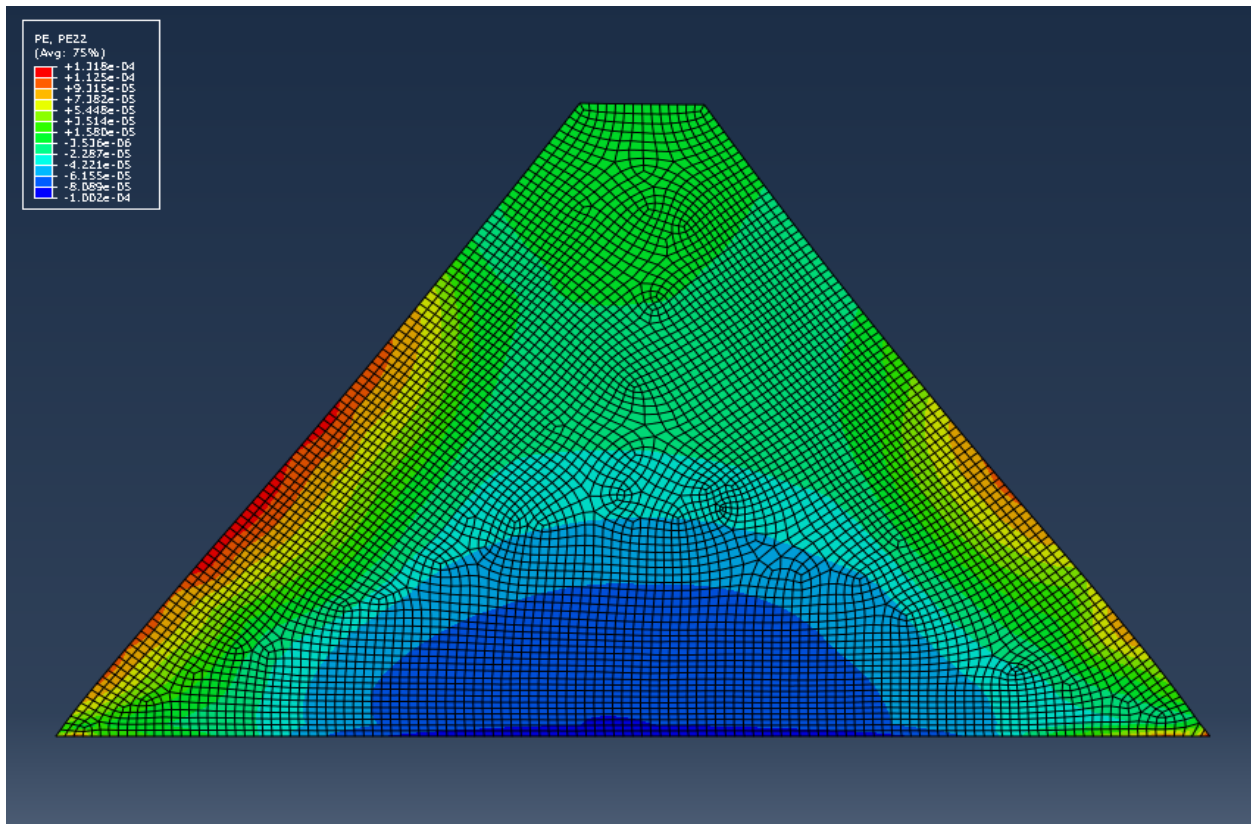
Διάγραμμα (93): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



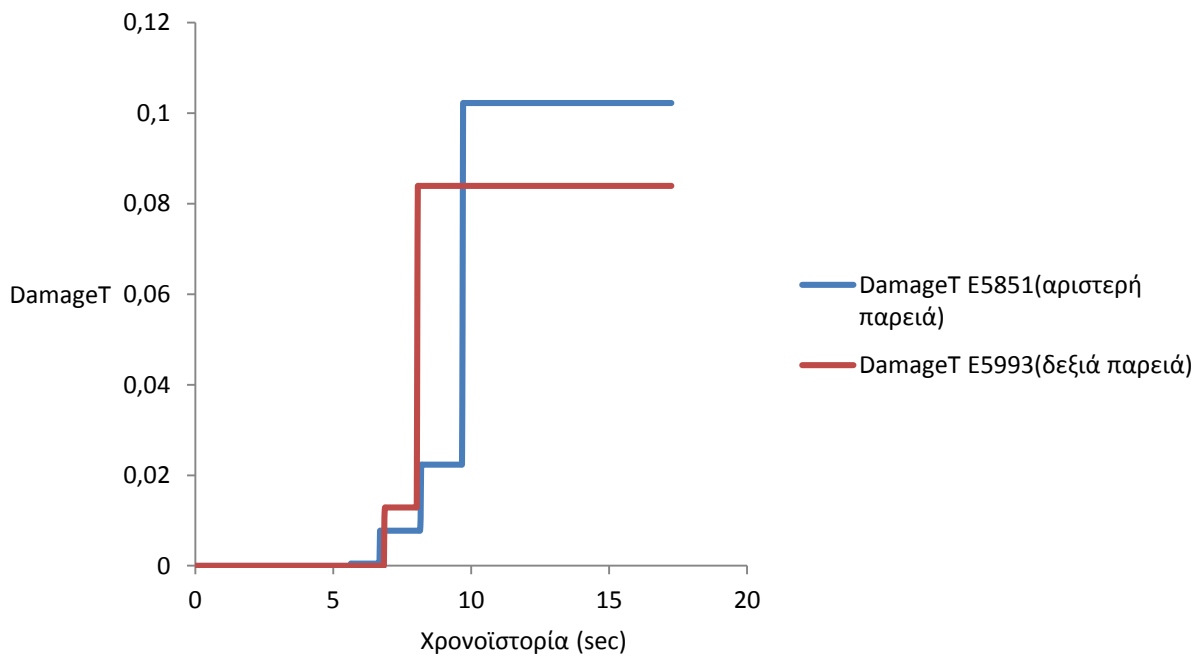
Διάγραμμα (94): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



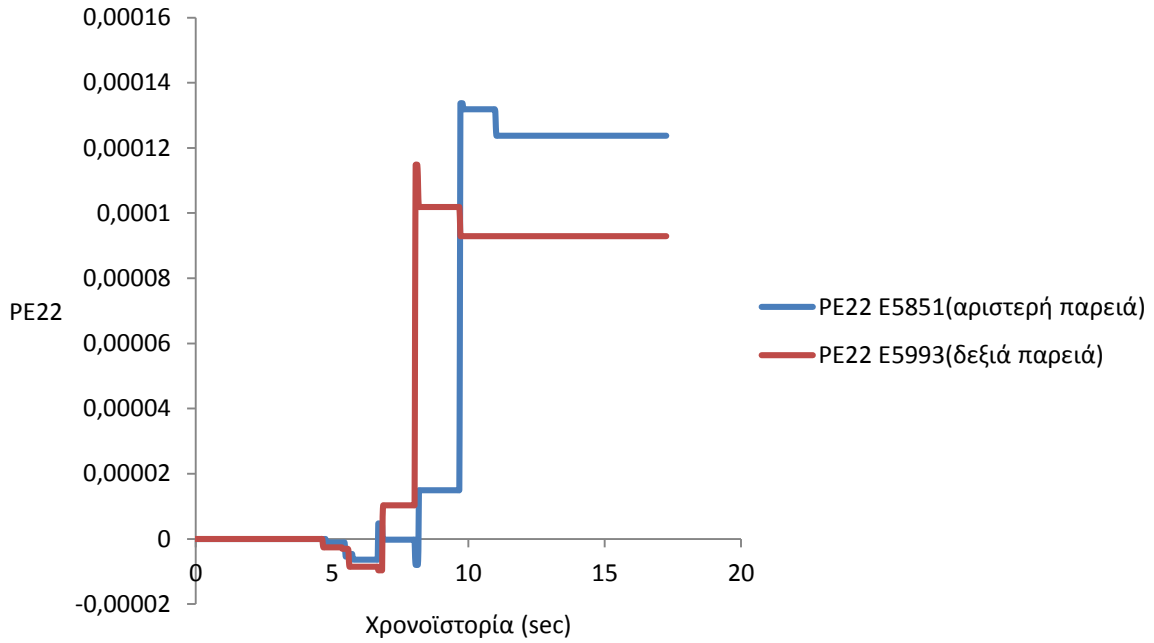
Διάγραμμα (95): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (20): Κατανομή κατακορύφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα

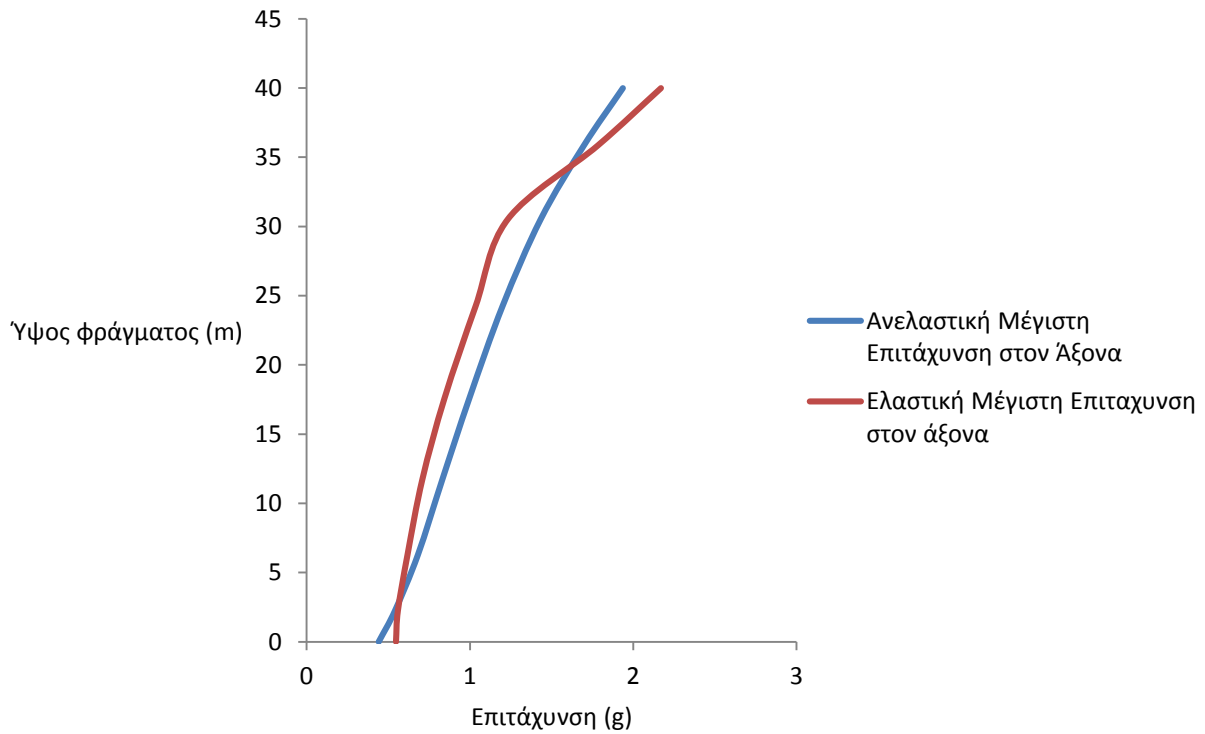


Διάγραμμα (96): DamageT, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας

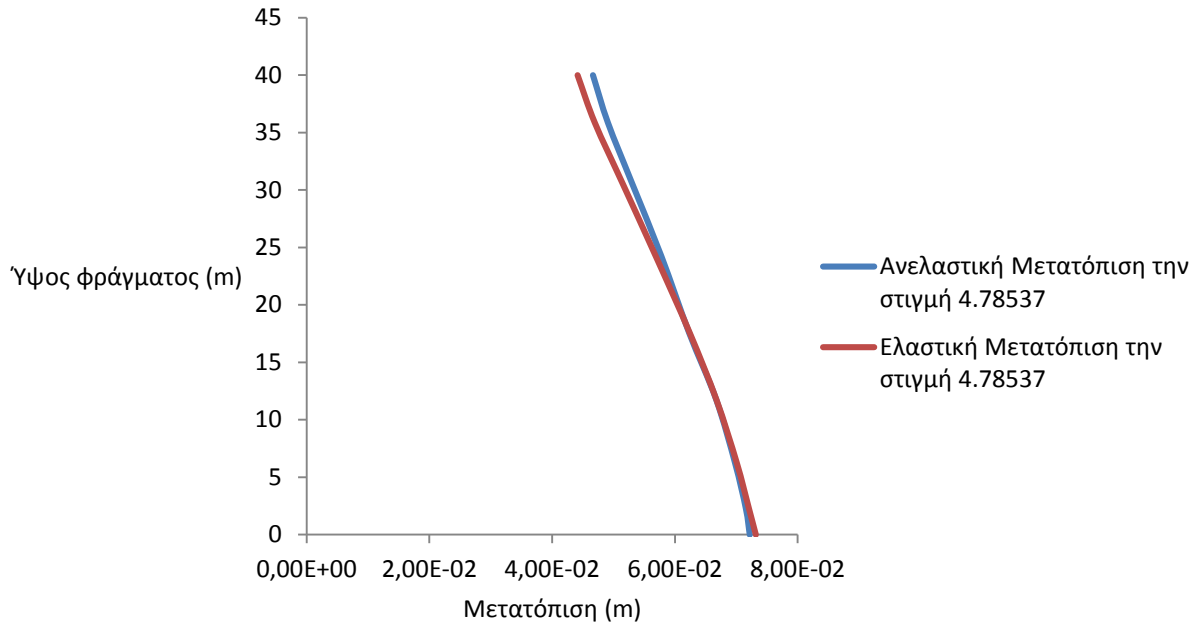


Διάγραμμα (97): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

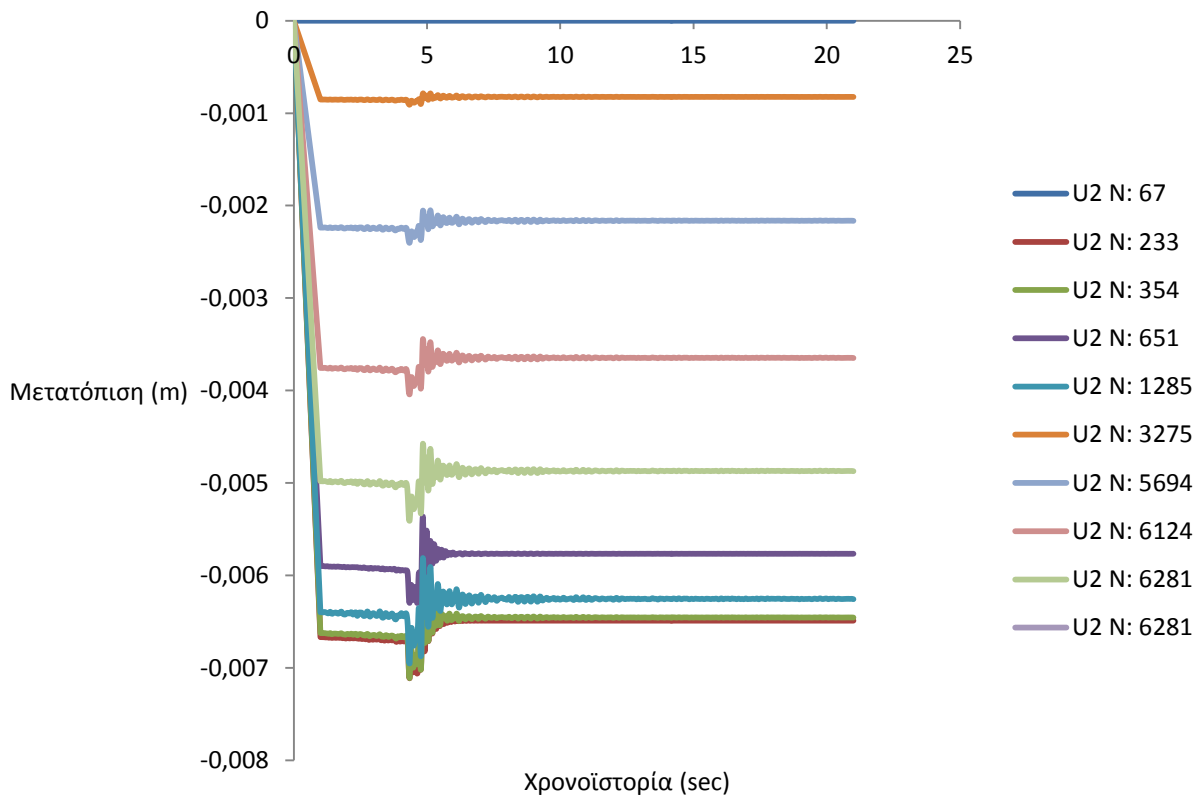
Αίγιο



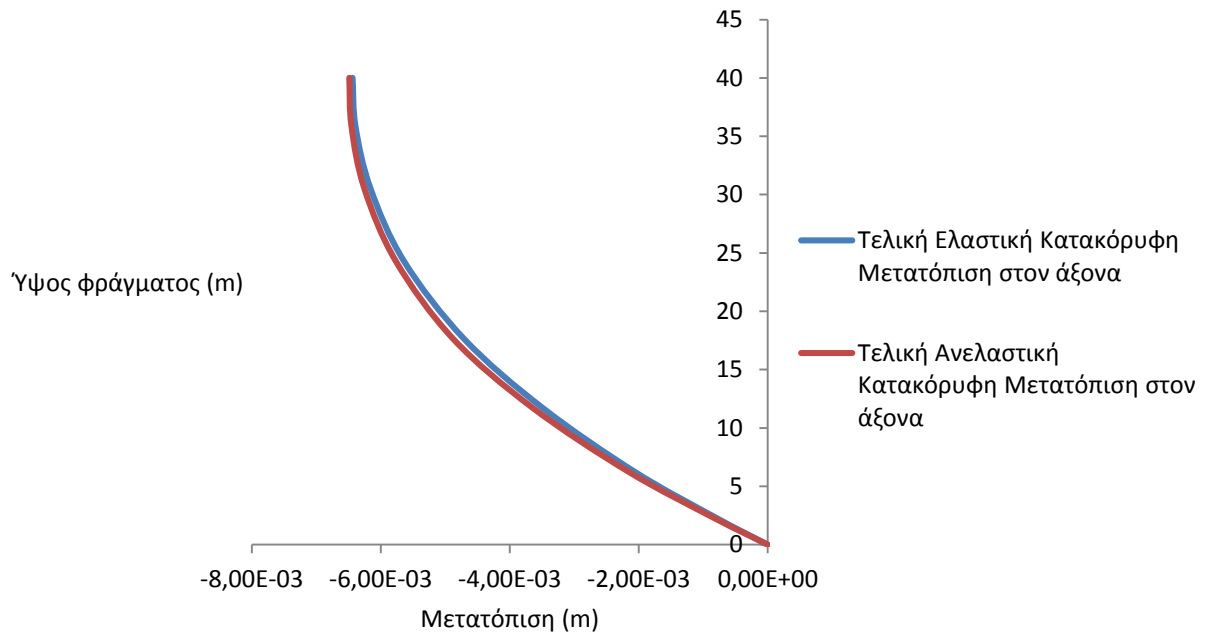
Διάγραμμα (98): Μέγιστη επιτάχυνση στον Άξονα



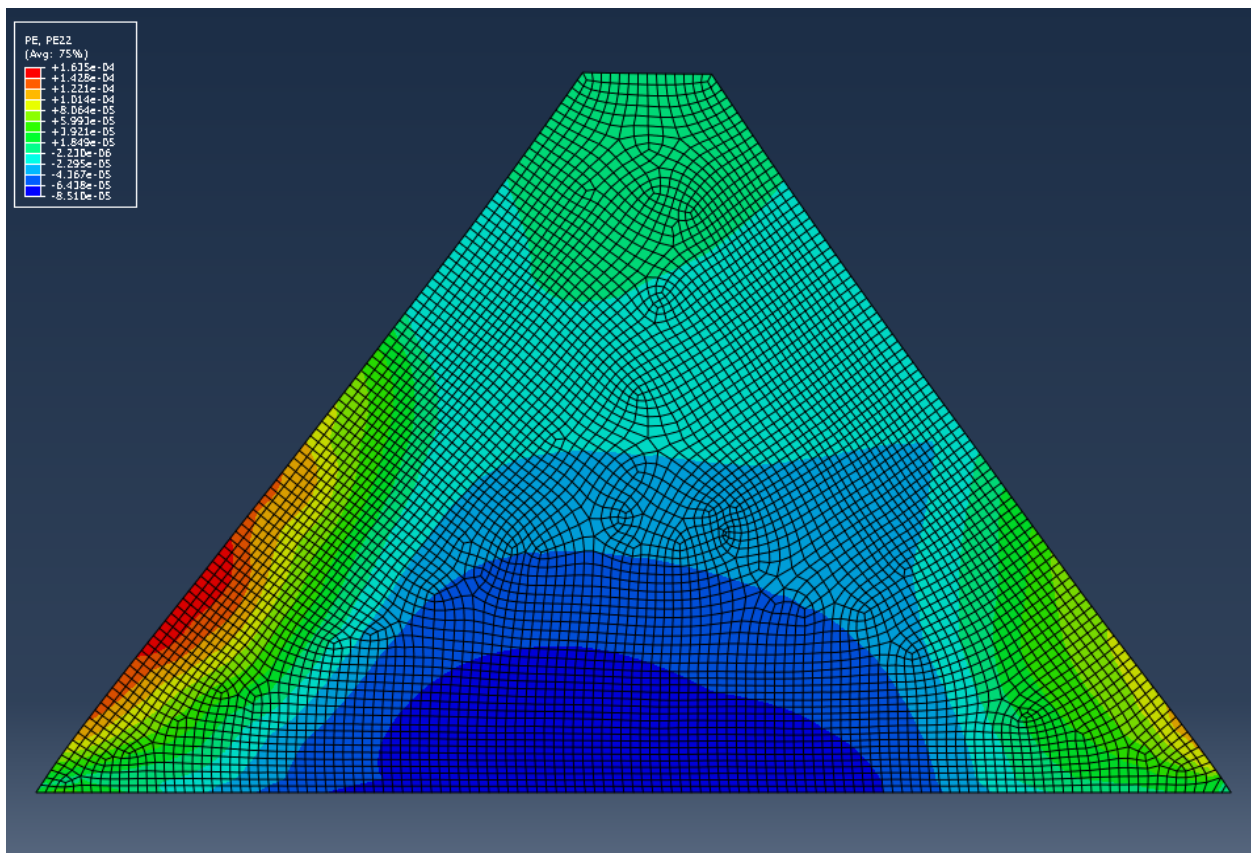
Διάγραμμα (99): Οριζόντιες μετατοπίσεις στον άξονα



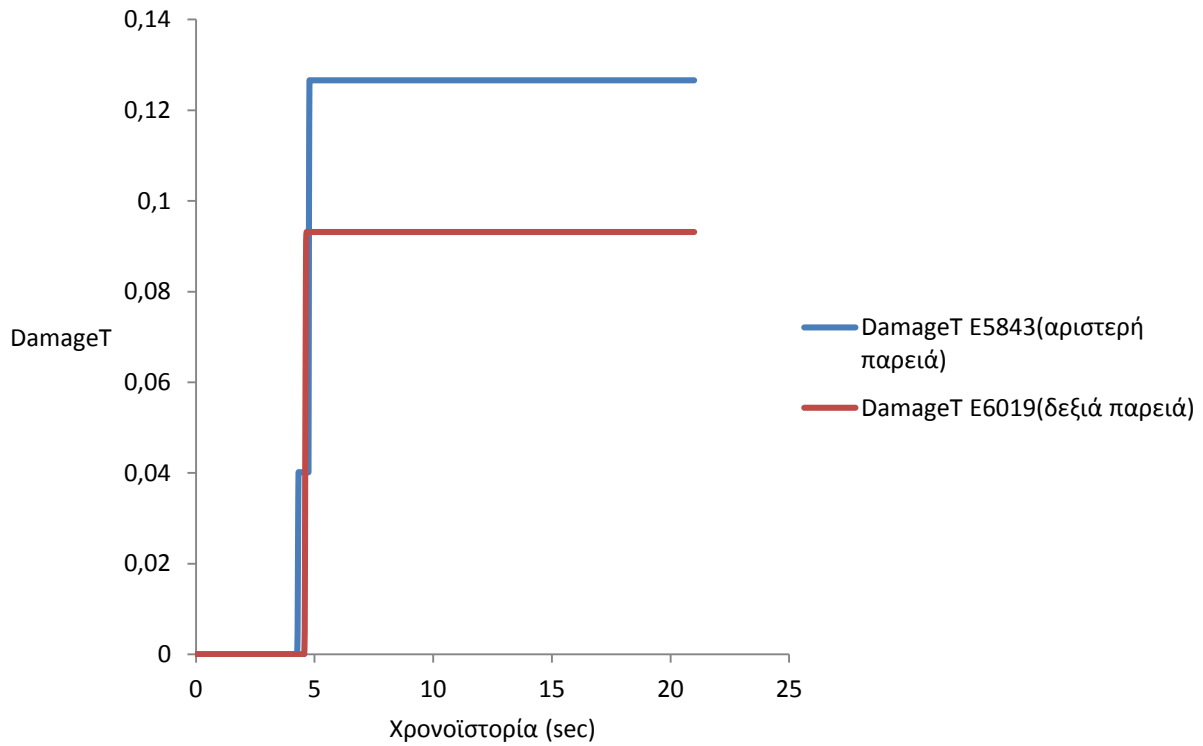
Διάγραμμα (100): Κατακόρυφες μετατοπίσεις στον άξονα



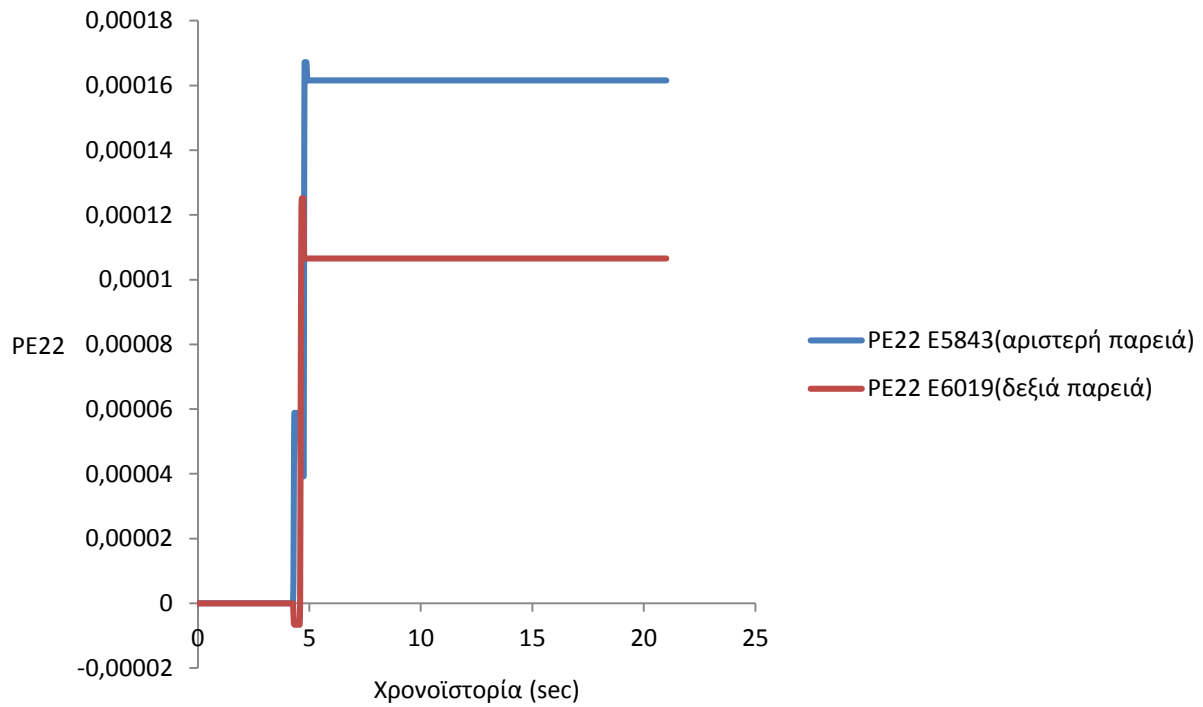
Διάγραμμα (101): Κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα



Εικόνα (21): Κατανομή κατακόρυφων πλαστικών παραμορφώσεων στο φράγμα



Διάγραμμα (102): *DamageT*, δείκτης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας



Διάγραμμα (103): Κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

- 1) $T_{\text{καμπτικού προβόλου}} < T_{\text{φράγματος}} < T_{\text{διατμητικής δοκού}}$! Αυτό δείχνει πως όπως περιμέναμε το φράγμα μας βρίσκεται ανάμεσα στις δύο συμπεριφορές αφού σε αντίθεση με την διατμητική δοκό μπορεί να παραλάβει εφελκυστικές τάσεις αλλά όχι τόσο μεγάλου μεγέθους ώστε να του επιτρέπουν να λειτουργεί κυριάρχα καμπτικά.
- 2) Από ότι είδαμε η ελαστική ανάλυση δεν είναι επαρκής διότι οι τάσεις στο φράγμα ξεπερνούν πάντοτε το όριο αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό. Για αυτό τον λόγο δεν μπορούμε παρά να διεξάγουμε ανελαστική ανάλυση
- 3) Οι επιταχύνσεις με την ανελαστική ανάλυση μειώνονται δραστικά σε σχέση με την ελαστική. Για την ακρίβεια όσο μεγαλύτερες οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης στην κορυφή τόσο μεγαλύτερες οι διαφορές μεταξύ ελαστικής και ανελαστικής ανάλυσης.
- 4) Οι οριζόντιες μετακινήσεις δεν είναι ίδιες σε όλο το φράγμα όμως δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από την μορφή της ανάλυσης.
- 5) Οι κατακόρυφες θετικές μετακινήσεις στον άξονα του φράγματος είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ανελαστικότητας. Αλλά και σε ασθενέστερες διεγέρσεις υπάρχουν θετικές κατοκόρυφες μετατοπίσεις μη ικανές να ξεπεράσουν τις αρχικές μετατοπίσεις που έχουν επιβληθεί στο φράγμα λόγω του βάρους του
- 6) Βλέπουμε ότι την μεγαλύτερη καταπόνηση στο φράγμα την αντιμετωπίζουν οι δύο παρειές του φράγματος δηλαδή τα στοιχεία του φράγματος που έρχονται σε επαφή με το νερό (ανάλογα από ποια διεύθυνση θα είναι ο σεισμός). Χωρίς να περιμένουμε πολύ μεγάλες διαφορές με την υπαρχή του νερού, η επίδραση του δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.
- 7) Στο φράγμα, όπως παρατηρήσαμε, θα αναπτυχθούν σίγουρα ρωγμές. Δυστυχώς λόγω της έλλειψης περισσότερων στοιχείων δεν μπορέσαμε να προσομοιάσουμε την εξάπλωση της ρωγμής στο φράγμα κατά την διάρκεια του σεισμού ή το μέγεθος του ανοίγματος της. Παρ'όλα αυτά σε αρκετούς σεισμούς είδαμε πως η εξάπλωση των πλαστικών παραμορφώσεων εκτείνεται σε όλο το φράγμα οπότε είναι περισσότερο από πιθανή η εξάπλωση της ρωγμής κατά μήκος της διατομής του φράγματος και εάν το νερό εισχωρήσει τότε υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες να αστοχήσει το φράγμα. Ειδικά αν η κατασκευή του εν λόγω φράγματος δεν είναι η καλύτερη δυνατή και το φράγμα που ούτως ή άλλως λόγω της φύσης του έχει μικρό ρωγμές, έχει από πριν το σεισμό σχηματισμένες ρωγμές τότε η κατάσταση είναι προβληματική.
- 8) Το φράγμα ούτως ή άλλως στην ανάντη παρειά ενισχύεται με μια ανάντη στεγανωτική μεμβράνη ή οποία είτε είναι πλάκα σκυροδέματος είτε από συνθετικό υλικό. Το θέμα είναι στην τελευταία περίπτωση αν η εφελκυστική αντοχή αυτής της μεμβράνης απο

συνθετικό υλικό είναι ικανή να παραλάβει τις τάσεις που θα δημιουργηθούν με το άνοιγμα της ρωγμής και στην περίπτωση της πλάκας σκυροδέματος ποια θα είναι η συμπεριφορά της σε σχέση με το ίδιο το φράγμα στον σεισμό. Αν και έχουν γίνει μελέτες σχετικά με αυτό το θέμα σε λιθόρριπτα φράγματα όπου η πλάκα σκυροδέματος είναι υποχρεωτική, το φράγμα μας δεν θα αντιδράσει με όμοιο τρόπο.

Βιβλιογραφία

- *Shunzo Okamoto, University of Tokyo Press, 1973, Introduction to Earthquake Engineering*
- *Ιωάννης Βαρδουλάκης, Εκδόσεις Συμμετρία, 1999, Τεχνική Μηχανική II*
- *Χρήστος Ε. Τσόγκας, Ελισάβετ Χ. Τσόγκα, Εκδόσεις Ιων, 2009, Υδροδυναμικά Έργα – Φράγματα*
- *Gazetas G., DeaChaudhury A. & Gasparini D. A., Geotechnique 31, No. 2, 1981, Random Vibration Analysis For The Seismic Response Of Earth Dams*
- *Panos Dakoulas & George Gazetas, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1985, Vol. 4, No. 4, A Class Of Inhomogeneous Shear Models For Seismic Response Of Dams And Embankments*
- *Γ. Γκαζέτας, Εκδόσεις Συμμετών, 1996, Εδαφοδυναμική και Σεισμική Μηχανική – Ιστορικά Περιστατικά*
- *Γ. Γκαζέτας, Τομέας Γεωτεχνικής Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Έκδοση 2005, Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής*
- *Αικατερίνη Α. Δημοπούλου, ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ – ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ», διπλωματική, 2008, Αξονοσυμμέτρικα φράγματα Κυλινδρούμενου Σκληρού Επιχώματος*