

Summary

Numerical Simulation of the Dynamic Phase during Rock Blasting.

E. Sarris, Z. Agioutantis

This paper presents a numerical simulation, based on the finite element analysis. The purpose of this paper is to investigate the importance of the development and propagation of stress waves during the dynamic loading phase of an explosion. Such constitutive models can be used to calculate the magnitude of the stress wave and indirectly get an estimation of the fragmentation process. These models can also be used to predict some of the numerous effects caused by the blast waves for various blasting patterns.

In order to achieve a successful simulation, the selection of the geometry pattern is of great importance. Five basic models were simulated by a 2D finite element methodology for different blasting patterns. The models were divided into two different categories. The first three models represent a single row blast and the other two models represent a double row blast. For the analysis three different nodes were considered in order to study the magnitude of the stress waves. The first one was on the borehole boundary, the second one was in the middle of the hole to burden distance and the third one was on the free surface boundary.

At first, the relationship between the size of the borehole and the model dimensions was investigated. Discretization for the models with smaller radius resulted in an increase of the nodes and the elements, and therefore of the computational time. Results however, do not differ significantly as compared to the other models. From the previous analysis, the model with the largest ratio of borehole size to burden was selected for the simulation due to computational cost.

Next, two distinct time intervals for the dynamic analysis, were investigated: 0.030 msec and 0.050 msec. The results for the case of the elastic analysis showed that the models behave in a similar fashion. The contrast of the computational time lies on the nodes upon the free surface, which they uptake significant stresses caused by the magnitude of the stress waves.

Since the geometry, the borehole size and the computational time were determined, an analysis was performed for the elastic, as well as the elastoplastic behavior of the rock material for all models. For this analysis Marc-Mentat, a commercial finite element code, was utilized.

Finally, the comparative diagrams of stress versus time for both, the elastic and elastoplastic behavior of the rock showed among other things, that the compressive stress waves generated from the blast, reflect on the free surface boundary and return as tensile. This tensile wave generated from the reflection has enough magnitude to fragment and dislocate the rock from its original placement.

Αριθμητική Προσομοίωση της Δυναμικής Φάσης σε μια Ανατίναξη

Ε. Σαρρής, Ζ. Αγιουτάντης

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 73100 Χανιά

1. Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μια αριθμητική προσομοίωση της δυναμικής φάσης της ανατίναξης, με σκοπό την μελέτη της δημιουργίας και διάδοσης των τασικών κυμάτων που παράγονται κατά την ανατίναξη. Τα καταστατικά μοντέλα διάδοσης τασικών κυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο υπολογισμού της κατανομής της έντασης του τασικού παλμού και έμμεσα στον υπολογισμό θρυμματισμού του πετρώματος αλλά και για να προβλέψουν τις διάφορες επιδράσεις από αυτά, για διάφορα σχέδια ανατίναξης. Για την προσομοίωση ανατινάξεων με διαφορετική γεωμετρία, κατασκευάστηκαν πέντε βασικά μοντέλα σε δυο διαστάσεις, τα οποία επιλύθηκαν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό πακέτο "Marc, Mentat-2000". Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά πετρώματος. Παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα τάσεων συναρτήσει του χρόνου για τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και τέλος εξάγονται συμπεράσματα από αυτά.

2. Εισαγωγή

Για τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό μιας ανατίναξης, είναι απαραίτητη προϋπόθεση, η σε βάθος κατανόηση του μηχανισμού θραύσης του πετρώματος υπό την επίδραση του διαδιδόμενου κρουστικού παλμού. Πρόκειται για ένα σύνθετο μηχανισμό που μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε δυο διακεκριμένες φάσεις. Η **πρώτη φάση (κρουστική)** οφείλεται στο κρουστικό κύμα που δημιουργήθηκε από την έκρηξη και η **δεύτερη φάση (ωστική)**, δημιουργείται από την δράση των αερίων της έκρηξης. Ο διαχωρισμός αυτός σε δυο φάσεις του μηχανισμού θραύσης του πετρώματος δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα (Jimeno et al., 1995). Και οι δυο φάσεις αποτελούν τμήματα της ίδιας συνάρτησης πίεσης-χρόνου $p = f(t)$, αν ληφθεί υπόψη ότι το πέτρωμα που υποβάλλεται σε πίεση από τα αέρια, γύρω από το θάλαμο της έκρηξης έχει προηγουμένως υποστεί συγκεκριμένες μεταβολές ως αποτέλεσμα της

δράσης του κρουστικού κύματος μέσα σε αυτό (Τσουτρέλης 2001, Brady and Brown 1985).

Σε αυτή την εργασία γίνεται προσομοίωση μιας τυπικής φόρτισης του θαλάμου του διατηρήματος που οφείλεται στη δυναμική φάση της έκρηξης χρησιμοποιώντας κατάλληλο εμπορικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (Marc-Mentat 2000). Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετηθεί η κατανομή των τάσεων από μια ανατίναξη σε ελαστικό και ελαστοπλαστικό μέσο.

Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού βασίζονται σε βιβλιογραφικές αναφορές και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Το πέτρωμα θεωρείται ότι είναι τυπικός ασβεστόλιθος (Αγιουτάντης, 2002).

Πίνακας 1: Ιδιότητες Υλικού
Table 1: Material properties

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (E) [GPa]	Λόγος Poisson (ν)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (C_0) [MPa]	Συνοχή (c) [MPa]	Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) [μοίρες]
Ασβεστόλιθος	20	0.3	80	25.50	25

Πρόσφατες εργασίες (Esen et al. 2003) μελέτησαν την ακτίνα της ζώνης σύνθλιψης για διάφορα εκρηκτικά με βασική παράμετρο την πίεση έκρηξης που είναι χαρακτηριστική για κάθε εκρηκτικό καθώς επίσης και την πίεση που ασκείται πάνω στα τοιχώματα. Εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι η ακτίνα ανάπτυξης της ζώνης αυτής αυξάνει με την πίεση έκρηξης (Pressure of Detonation, POD) και τον λόγο ζεύξης και ότι μπορεί να φτάσει μέχρι και 8 φορές την διάμετρο του διατηρήματος για πολύ διαρρηκτικές εκρηκτικές ύλες (Esen et al, 2003). Ορισμένοι ερευνητές (Τσουτρέλης 2001, Brady and Brown 1985) θεωρούν ότι η ακτίνα της ζώνης αυτής είναι της τάξης του διπλάσιου της ακτίνας του θαλάμου έκρηξης. Άλλοι (Bhandari 1997) αναφέρουν ότι η ζώνη αυτή έχει ακτίνα που κυμαίνεται από το διπλάσιο μέχρι το τετραπλάσιο της ακτίνας του διατηρήματος και υποστηρίζουν ότι για τη θραύση σε αυτή την ζώνη, καταναλώνεται το 30% της μεταφερόμενης κρουστικής ενέργειας στο πέτρωμα, ενώ από πλευρά ποσότητας θραύσης του πετρώματος σε μια κανονική ανατίναξη είναι μόνο το 0.1 % του συνολικού όγκου εξόρυξης ανά υπόνομο. Όμως οι εργασίες αυτές δεν μελετούν την απόσβεση των τάσεων εξαιτίας της ζώνης σύνθλιψης και την συμβολή θλιπτικών και εφελκυστικών κυμάτων.

3. Ορισμός γεωμετρίας

Για την επιτυχή προσομοίωση μιας ανατίναξης, η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας του πεδίου είναι πολύ σημαντική. Αρχικά κατασκευάστηκαν μοντέλα μέσω των οποίων διερευνήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας στην δημιουργία και διάδοση των τασικών κυμάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ανάλογα με την επιθυμητή παραγωγή, ο σχεδιασμός μπορεί να είναι μονής σειράς έναυσης ή πολλαπλής σειράς έναυσης. Στο σχήμα 1 φαίνεται ο σχεδιασμός της γεωμετρίας ανατίναξης μονής σειράς για απόσταση ίση με το φορτίο καθώς επίσης και η απλοποίηση της γεωμετρίας του σχεδιασμού της ανατίναξης.

Στο σχήμα 2 φαίνονται αναλυτικότερα τα πέντε πιο βασικά μοντέλα που εξάγονται λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία και συνθήκες επίπεδης κατάστασης (επίπεδης παραμόρφωσης). Αυτά τα μοντέλα είναι:

- Απλή σειρά έναυσης, απόσταση μεταξύ των διατρημάτων ίση με το φορτίο ($S=B$), όριο μοντέλου πίσω από το διάτρημα σε απόσταση 10 φορτίων. Πρόκειται για ένα πρόβλημα επαναλαμβανόμενης συμμετρίας για τα διατρήματα στο μέσο της απλής σειράς έναυσης το οποίο περιγράφεται από το μοντέλο Α του σχήματος 2.
- Απλή σειρά έναυσης, απόσταση μεταξύ των διατρημάτων ίση με το φορτίο ($S=B$), όριο μοντέλου στον άξονα του διατρήματος. Πρόκειται για ένα πρόβλημα επαναλαμβανόμενης συμμετρίας (μοντέλο Β, σχήμα 2) για τα διατρήματα στο μέσο της απλής σειράς έναυσης με το οποίο απλοποιείται το μοντέλο Α. Μετά από την αρχική διερεύνηση βρέθηκε ότι τα αποτελέσματα για τα μοντέλα Α και Β για την περιοχή ανάμεσα από το διάτρημα και το μέτωπο είχαν πολύ μικρές αποκλίσεις. Με το μοντέλο Β επιτυγχάνονται ταχύτερες επιλύσεις λόγω της μικρότερης έκτασης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Απλή σειρά έναυσης, απόσταση μεταξύ των διατρημάτων διπλάσια του φορτίου ($S=2B$), όριο μοντέλου στον άξονα του διατρήματος. Πρόκειται για ένα πρόβλημα επαναλαμβανόμενης συμμετρίας (μοντέλο Γ, σχήμα 2). Το μοντέλο είναι απλοποιημένο ως προς το πίσω σύνορο όπως και το μοντέλο Β.
- Διπλή σειρά έναυσης, απόσταση μεταξύ των διατρημάτων διπλάσια του φορτίου ($S=2B$), όριο μοντέλου στον άξονα του διατρήματος. Πρόκειται για ένα πρόβλημα επαναλαμβανόμενης συμμετρίας (μοντέλο Δ, σχήμα 2). Το μοντέλο είναι απλοποιημένο ως προς το πίσω σύνορο όπως το μοντέλο Β.

- Διπλή σειρά έναυσης, απόσταση μεταξύ των διατρημάτων διπλάσια του φορτίου ($S=B$), όριο μοντέλου στον άξονα του διατρήματος, μοντελοποίηση γειτονικών διατρημάτων. Πρόκειται επίσης για ένα πρόβλημα επαναλαμβανόμενης συμμετρίας (μοντέλο E, σχήμα 2) όπου ο άξονας συμμετρίας είναι τοποθετημένος ώστε να περιλαμβάνει και τα πλευρικά διατρήματα. Η έναυση γίνεται ταυτόχρονα και στα 6 διατρήματα που φαίνεται στο μοντέλο. Το μοντέλο είναι απλοποιημένο ως προς το πίσω σύνορο όπως το μοντέλο B.

4. Παράμετροι επίλυσης

4.1 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν σε όλα τα μοντέλα φαίνονται αντιπροσωπευτικά στο σχήμα 3 και περιλαμβάνουν:

- κύλιση στον άξονα X στο πάνω και κάτω σύνορο του μοντέλου,
- κύλιση στον άξονα Y στο πίσω σύνορο του μοντέλου (όπου ικανοποιούταν με αυτό τον τρόπο οι συνθήκες επαναλαμβανόμενης γεωμετρίας εξασφαλίζοντας έτσι και την ελεύθερη επιφάνεια στο μπροστινό σύνορο του μοντέλου),
- κατανεμημένη πίεση 1000 και 6000 MPa εντός του διατρήματος (τα μεγέθη αυτά προκύπτουν ανάλογα με το αν η πίεση προέρχεται από εκρηκτικό σε επαφή με το πέτρωμα ή εκρηκτικό αποζευγμένο από το πέτρωμα).

Για την καλύτερη ανάλυση του προβλήματος αυτού κατασκευάστηκαν μοντέλα και για διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για κατανεμημένη πίεση 6000 MPa. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη πίεση εντός του διατρήματος για αποζευγμένη γόμωση και συγχρόνως στην ελάχιστη πίεση για πλήρη ζεύξη της γόμωσης (Τσουτρέλης, 2001).

4.2 Χρόνος και τύποι φόρτισης

Ο σημαντικότερος παράγοντας στην επιτυχή προσομοίωση ανατίναξης και γενικά σε προβλήματα διάδοσης κυμάτων (dynamic transient wave propagation) είναι ο πραγματικός χρόνος διάρκειας της δυναμικής καταπόνησης που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον τρόπο φόρτισης του υλικού. Ο πραγματικός χρόνος διάρκειας της δυναμικής καταπόνησης είναι της τάξης των 30-50 msec ανάλογα με την ποσότητα, το είδος του εκρηκτικού αλλά και από τον τύπο του πετρώματος. Ο χρόνος της δυναμικής καταπόνησης θεωρείται ότι αρχίζει από τη στιγμή της έναυσης, διαρκεί μέχρι την διάδοση και ανάκλαση του κρουστικού παλμού πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια και τελειώνει όταν ο ανακλώμενος κρουστικός παλμός επιστρέψει πίσω

στο διάτρημα από όπου ξεκίνησε. Δεν εξετάζονται κύματα που παράγονται από νέες ανακλάσεις πίσω από το διάτρημα. Για τους σκοπούς της προσομοίωσης εξετάστηκε η συμπεριφορά των μοντέλων για χρόνους 30 και 50 msec και επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως συνολικός χρόνος διάρκειας του φαινομένου τα 30 msec που είναι και η πιο ρεαλιστική τιμή διάρκειας της δυναμικής φάσης (Τσουτρέλης, 2001).

Όσον αφορά στην διάρκεια φόρτισης, ο εμπειρικός κανόνας που εφαρμόζεται είναι ότι η μέγιστη πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος αναπτύσσεται σε χρόνο 1/8 της συνολικής διάρκειας του φαινομένου, δηλαδή για την περίπτωση των 30msec η μέγιστη πίεση επιτυγχάνεται σε χρόνο 0.00375 sec. Η αποφόρτιση διαρκεί για τα επόμενα 3/8 της συνολικής διάρκειας του φαινομένου δηλαδή 0.01125 sec και το υπόλοιπο του χρόνου μέχρι το τέλος της δυναμικής φάσης αντιστοιχεί στην εξάπλωση της τάσης στο πέτρωμα. Έτσι ένας πλήρης κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης του διατρήματος διαρκεί (Cook et al, 1989):

$$\text{Κύκλος}_{\Phi-A} = 0.00375_{\text{Φόρτιση}} + 0.01125_{\text{αποφόρτιση}} + 0.015_{\text{εξάπλωση τάσης}} = 0.030 \text{ sec} \quad (1)$$

Στο σχήμα 4 φαίνεται το προφίλ πίεσης συναρτήσει του χρόνου για χρόνους 30 και 50 msec.

Στη δυναμική ανάλυση ο αριθμός των στοιχείων στα οποία θα διακριτοποιηθεί το μέσο είναι συνδεδεμένος με το χρονικό βήμα. Επίσης τα στοιχεία πρέπει να είναι τέτοιου μεγέθους και το χρονικό βήμα επίλυσης να είναι τέτοιας τάξης έτσι ώστε το τασικό κύμα να μην ξεπερνάει τα δυο στοιχεία κατά την διάρκεια διάδοσης του. Το χρονικό βήμα επίλυσης βρίσκεται από την σχέση (Cook et al, 1989):

$$\Delta t_{\text{επίλυσης}} = \frac{\text{Συνολικός Χρόνος Διάρκειας}}{\text{Αριθμό βήματος Επίλυσης}} = \frac{0.03}{90} = 0.00033 \text{ sec} \quad (2)$$

4.3 Συνθήκη διαρροής του υλικού

Δημιουργήθηκαν 2 οικογένειες μοντέλων: Τα ελαστικά στα οποία δεν εφαρμόζεται καμία συνθήκη διαρροής των υλικών, και τα ελαστοπλαστικά στα οποία χρησιμοποιήθηκε το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb. Σημειώνεται ότι η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται σε μια μεγάλη τάξη εδαφών και πετρωμάτων. Η ανάλυση με το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb στο πρόγραμμα πραγματοποιείται με την εισαγωγή της τάσης διαρροής (σ_s) και της σταθεράς (α). Η τάση διαρροής και

η σταθερά (α) συνδέεται με την συνοχή (c) και την γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) με τις ακόλουθες σχέσεις (MSC, 2000):

$$c = \frac{\sigma_\delta}{3(1-12\alpha^2)^{1/2}} \quad (3)$$

$$\sin \phi = \frac{3\alpha}{(1-3\alpha^2)^{1/2}} \quad (4)$$

4.4 Μεθοδολογία δυναμικής ανάλυσης

Για την επίλυση του δυναμικού προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newmark. Οι σχέσεις γενικής μορφής της μεθόδου Newmark όπως χρησιμοποιούνται από το λογισμικό είναι (MSC, 2000):

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t v^n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 a^n + \beta \Delta t^2 a^{n+1} \text{ (μετατοπίσεις)} \quad (5)$$

$$v^{n+1} = v^n + (1-\gamma) \Delta t a^n + \gamma \Delta t a^{n+1} \text{ (ταχύτητες)} \quad (6)$$

όπου: n , ο αριθμός του χρονικού βήματος. Για την συγκεκριμένη μορφή δυναμικών εξισώσεων που ανταποκρίνονται στον κανόνα του τραπεζίου, χρησιμοποιούνται οι τιμές των σταθερών $\beta = 0.25$ και $\gamma = 0.5$ όπου η κλασική εξίσωση κίνησης του συστήματος λαμβάνει τη μορφή (MSC, 2000):

$$\left(\frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C + K \right) \Delta u = F^{n+1} - R^n + M \left(a^n + \frac{4}{\Delta t} v^n \right) + C v^n \quad (7)$$

όπου η εσωτερική δύναμη δίδεται από την σχέση:

$$R = \int_V \beta^T \sigma dv \quad (8)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (8) στην (7) προκύπτει η έμμεση λύση (implicit solution) του συστήματος:

$$u^{n+1} = u^n + \Delta u \quad (9)$$

5. Αποτελέσματα

Πριν την τελική επίλυση προηγήθηκε μία παραμετρική διερεύνηση των μοντέλων ως προς τον λόγο ακτίνας διατρήματος ως προς φορτίο και αναφορικά με

την χρονική διάρκεια του φαινομένου για την δυναμική ανάλυση. Από την παραμετρική ανάλυση προκρίθηκαν ορισμένα μοντέλα τα οποία στη συνέχεια μελετήθηκαν για θεώρηση δυο καταστατικών συμπεριφορών για το μέσο. Α) ελαστικό μέσο και Β) ελαστοπλαστικό μέσο. Τα σημεία μελέτης της χρονικής ιστορικής ανάλυσης που λήφθηκαν για όλα τα μοντέλα είναι τρία. Α) πάνω στο σύνορο του διατρήματος, Β) στη μέση της απόστασης του διατρήματος από την ελεύθερη επιφάνεια (φορτίο) και Γ) πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια.

5.1 Παραμετρική διερεύνηση

Αρχικά διερευνήθηκε η επίδραση του μεγέθους του θαλάμου (ακτίνα) του διατρήματος σε σχέση με τις διαστάσεις του μοντέλου. Τα σχήμα 5 δίνει τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν κατά τη διερεύνηση των λόγων «ακτίνα διατρήματος προς φορτίο»: 2.5/100, 5/100, 10/100. Όπως φαίνεται και από σχήμα 5, για μικρότερους λόγους η διακριτοποίηση κοντά στο θάλαμο διατρήματος καθίσταται εξαιρετικά λεπτομερής με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση των κόμβων και στοιχείων του μοντέλου. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για ελαστικά μοντέλα (σχήμα 6) έδειξαν ότι τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε το μοντέλο με λόγο 10/100 ούτως ώστε να είναι εφικτή η επίλυση όλων των μοντέλων που απαιτήθηκαν στην παρούσα μελέτη σε λογικούς χρόνους και σε κάθε περίπτωση σε λιγότερο από 24 ώρες για κάθε μοντέλο με βάση την υπάρχουσα υλικοτεχνική υποδομή του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αντίστοιχη διερεύνηση έγινε και ως προς τον χρόνο διάρκειας της δυναμικής ανάλυσης (δηλαδή 0.030 και 0.050 sec, σχήμα 4). Τα αποτελέσματα για την ελαστική περίπτωση και για τρεις λόγους «ακτίνα διατρήματος προς φορτίο» (σχήμα 7) έδειξαν ότι η συμπεριφορά των μοντέλων είναι παρόμοια. Οι τάσεις στους κόμβους στην ελεύθερη επιφάνεια λαμβάνουν υψηλότερες τάσεις για μεγαλύτερες τιμές του χρόνου ανάπτυξης της δυναμικής φάσης. Οι τάσεις για τους ενδιάμεσους κόμβους είναι στα ίδια επίπεδα για τις δύο κατηγορίες χρονικής ανάλυσης. Συνεκτιμώντας και τους χρόνους επίλυσης των μοντέλων επιλέχθηκε η τιμή 0.030 sec (χρονική διάρκεια Α, σχήμα 4) για την ανάλυση.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα για τα ελαστικά και ελαστοπλαστικά μοντέλα για τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν παραπάνω.

5.2 Τα ελαστικά μοντέλα

Τα σχήματα 8-10 παρουσιάζουν συγκεντρωτικά την απόκριση του μέσου σε τρεις διακριτούς κόμβους και για τα πέντε υπό μελέτη μοντέλα. Από την μελέτη των σχημάτων 8-10 προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Στο σχήμα 8 φαίνεται η διέγερση του διατρήματος και φτάνει στο μέγιστο της σε χρόνο 0.013 sec.
- Στο σχήμα 9 φαίνεται ότι οι τάσεις φτάνουν σε διαφορετικούς χρόνους στο μέσο του φορτίου για τα διαφορετικά μοντέλα. Από αυτό συμπεραίνεται ότι η γεωμετρία και οι διαστάσεις επηρεάζουν τα αποτελέσματα.
- Στο σχήμα 10 φαίνεται ότι οι τάσεις που φτάνουν πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια και υφίστανται ανάκλαση είναι ικανού μεγέθους για τη θραύση του πετρώματος σε εφελκυσμό.

5.3 Τα ελαστοπλαστικά μοντέλα

Τα σχήματα 11-13 παρουσιάζουν συγκεντρωτικά την απόκριση του μέσου σε τρεις διακριτούς κόμβους και για τα πέντε υπό μελέτη μοντέλα. Από την μελέτη των σχημάτων 11-13 προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Στο σχήμα 11 φαίνεται η πραγματική διέγερση που υφίσταται το διάτρημα. Οι τάσεις είναι θλιπτικές και είναι περίπου στο 45% της πίεσης έκρηξης.
- Στο σχήμα 12 φαίνεται ότι οι τάσεις φτάνουν σε διαφορετικούς χρόνους για κάθε μοντέλο στο μέσο του φορτίου. Έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τα ελαστικά μοντέλα καθώς επίσης οι χρόνοι που φτάνουν οι τάσεις αυτές είναι μεγαλύτερος από τα ελαστικά μοντέλα. Από αυτή την καθυστέρηση στην άφιξη των τάσεων συμπεραίνεται ότι η τριβή είναι σημαντική στην διάδοση του τασικού παλμού, πράγμα που δεν φαίνεται στα ελαστικά μοντέλα.
- Στο σχήμα 13 φαίνεται ότι οι τάσεις που φτάνουν πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια και υφίστανται ανάκλαση είναι πάλι ικανού μεγέθους για τη θραύση του πετρώματος σε εφελκυσμό.

6. Συζήτηση και Συμπεράσματα

Από την μελέτη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επίλυση των μοντέλων, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η επίλυση όλων των μοντέλων έδειξε ανάκλαση των κυμάτων πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια και επιστροφή του τασικού κύματος ως εφελκυστικό. Αξίζει να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα γραφήματα το μέγεθος

του εφελκυστικού κύματος είναι ικανό να επιτύχει θραύση του πετρώματος σε εφελκυσμό, οπότε συμπεραίνεται ότι το πέτρωμα θα αστοχούσε σε εφελκυσμό που είναι ουσιαστικά και ένας από τους μηχανισμούς αστοχίας του πετρώματος κατά την διάρκεια μιας ανατίναξης.

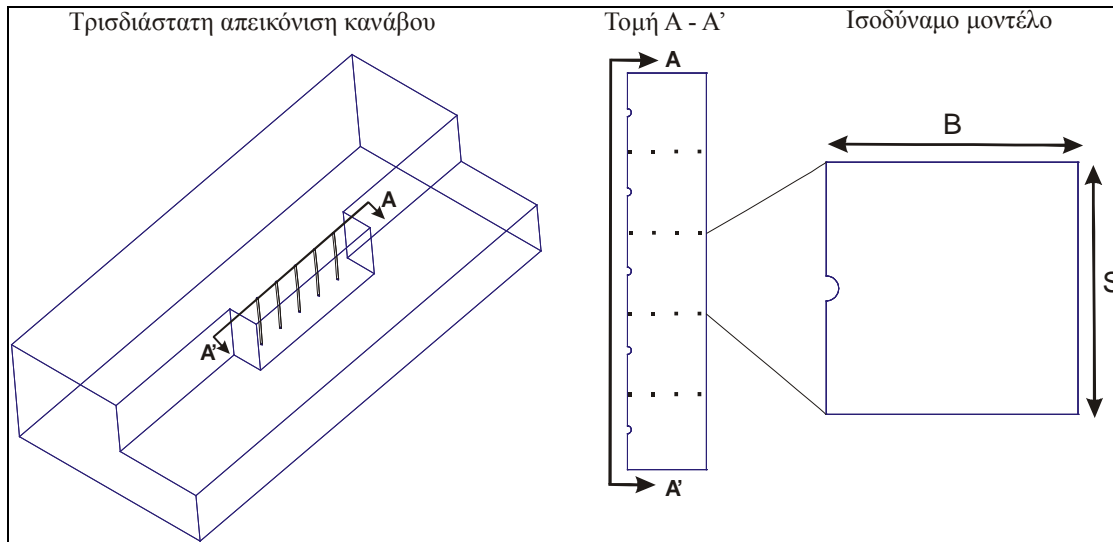
- Τα ελαστοπλαστικά μοντέλα προσεγγίζουν πιο πολύ τις πραγματικές συνθήκες και αυτό φαίνεται συγκρίνοντας τα γραφήματα των σχημάτων 8 και 11. Συγκεκριμένα στο γράφημα 11 και σε όλα τα μοντέλα στους κόμβους επί των διατρημάτων οι τάσεις παρουσιάζονται θλιπτικές σε αντίθεση με τα γραφήματα του σχήματος 8.
- Από τα γραφήματα τάσεων συναρτήσει του χρόνου παρατηρείται επίσης ότι σημαντικό μέρος της ενέργειας δαπανάται στην δημιουργία της ζώνης σύνθλιψης παρά στον θρυμματισμό. Αυτό φαίνεται συγκρίνοντας τα διαγράμματα κατανομής των τάσεων για τους κόμβους κοντά στο διάτρημα και τα αντίστοιχα για τους μακρινούς κόμβους. Σε διάφορες δοκιμές που έγιναν δεν έγινε εφικτό να αυξηθεί το μέγεθος των τάσεων μακριά από το διάτρημα χωρίς την ανάλογη αύξηση κοντά στο διάτρημα.
- Από την διερεύνηση των διαφόρων παραμέτρων που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό των μοντέλων προέκυψε ότι με την ίδια εφαρμοζόμενη πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος διαφορετικής διαμέτρου, η εξάπλωση του τασικού παλμού διαφέρει και ως προς το μέγεθος του κύματος και ως προς την χρονική του κατανομή
- Κατά την μοντελοποίηση διάδοσης των κυμάτων παρατηρήθηκε το φαινόμενο της αριθμητικής διασποράς (numerical dispersion). Όταν κατασκευάζονται αριθμητικά μοντέλα διάδοσης κυμάτων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά διάδοσης και μεταβίβασης της πληροφορίας διαμέσου των στοιχείων. Η αριθμητική διασπορά είναι ένα πρόβλημα που παρουσιάζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων όπου εξαναγκάζει την ταχύτητα των κυμάτων να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, όπως είναι η μέθοδος χρονικής ολοκλήρωσης, το μέγεθος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται (διακριτοποίηση), ακόμα τον τύπο και την τάξη του στοιχείου. Όλα όσα έχουν αναφερθεί πιο πάνω έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμητικού σφάλματος κατά την διάρκεια διάδοσης του κύματος. Ο τύπος του σφάλματος είναι συστηματικός και με την αναπαραγωγή του κατά την διάρκεια διάδοσης

μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες αποκλίσεις έως σε σημείο τα μοντέλα να μην γίνουν αποδεκτά.

- Η παραπάνω προσέγγιση κρίνεται ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην προσέγγιση του μεγέθους του τασικού παλμού που εξαπλώνεται στο πέτρωμα. Για περισσότερη ακρίβεια, πρέπει να ληφθούν υπόψη επιπλέον παράμετροι που σχετίζονται με τον τρόπο γόμωσης, την καταστατική συμπεριφορά του πετρώματος, κλπ.

7. Βιβλιογραφία

- ◆ Αγιουτάντης, Ζ., *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων*, Εκδόσεις «Ιων», Αθήνα 2002.
- ◆ Τσουτρέλης, Χ., *Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων*, Τόμος 2, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2001.
- ◆ Bhandari, S., *Engineering Rock Blasting Operations*, Balkema, 1997.
- ◆ Brady B. H. G. and E. T. Brown, *Rock Mechanics – For Underground Mining*, Chapman & Hall, 1985.
- ◆ Cook R., D. Malkus and M. Plesha, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley, 1989.
- ◆ Esen S., I. Onederra and H.A. Bilgin, Modeling the size of the crushed zone around a blasthole, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, pp. 485-495, 2003.
- ◆ Jimeno C. L., E. L. Jimeno, and F. J. A. Cardeco, *Drilling and Blasting of Rocks*, Balkema, 1995
- ◆ Msc Engineering Group, *Marc-Mentat, 2000 Manuals*, Theory and User Information, 2000.

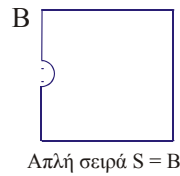


Σχήμα 1: Τρισδιάστατη απεικόνιση κανάβου και προσδιορισμός συμμετρίας μοντέλου.

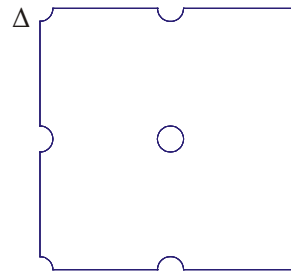
Figure 1: 3D Representation of the blast geometry and detail of symmetry conditions.



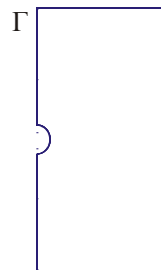
Απλή σειρά, άπειρο μέσο, $S = B$



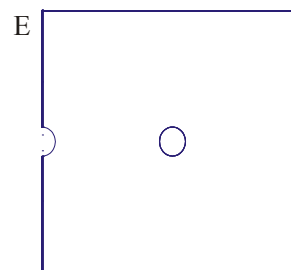
Απλή σειρά $S = B$



Διπλή σειρά $S = B$



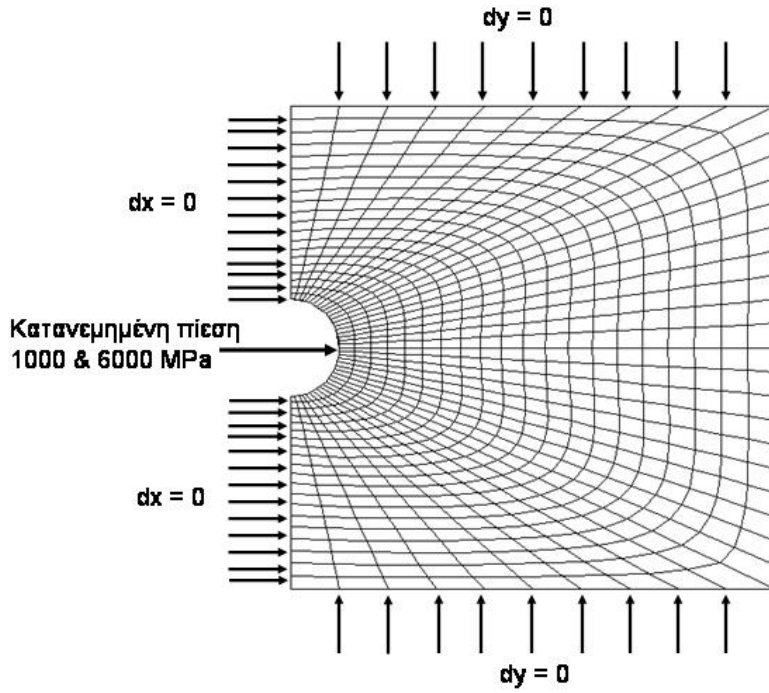
Απλή σειρά $S = 2B$



Διπλή σειρά $S = 2B$

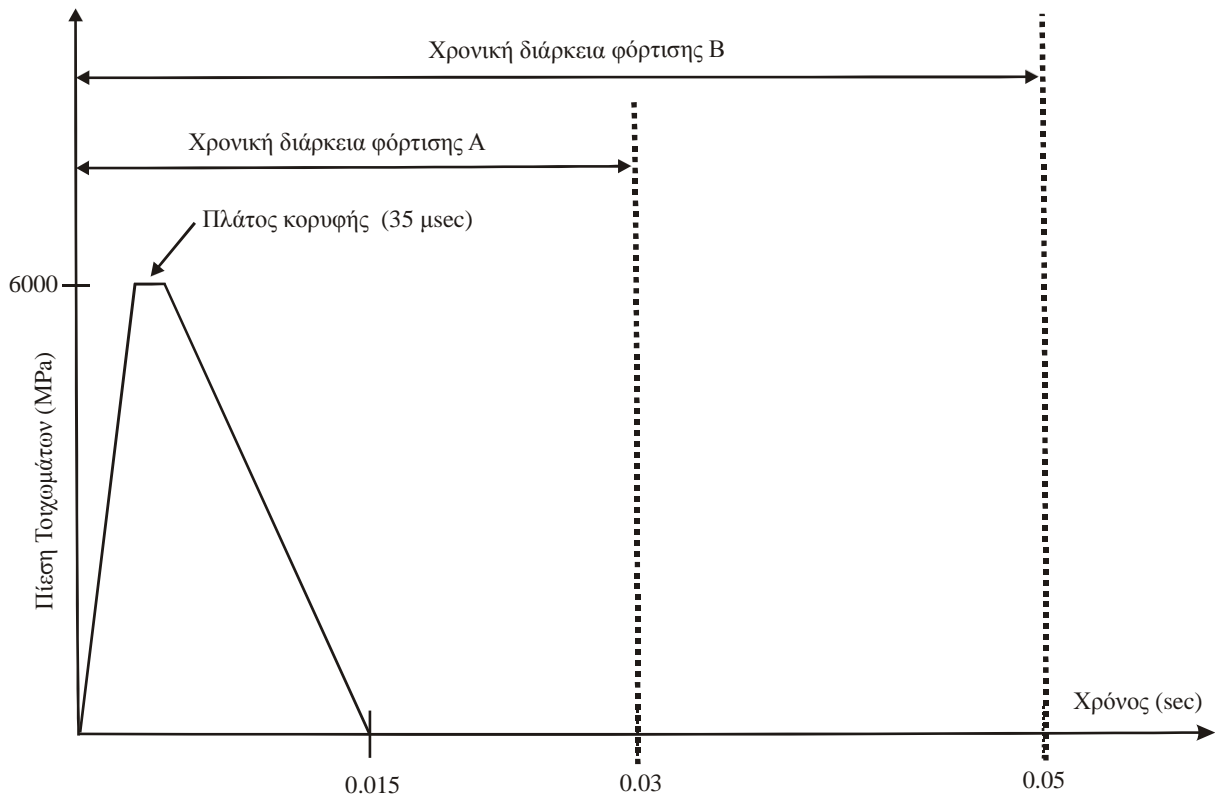
Σχήμα 2: Γεωμετρία βασικών μοντέλων.

Figure 2: Geometry of basic models.



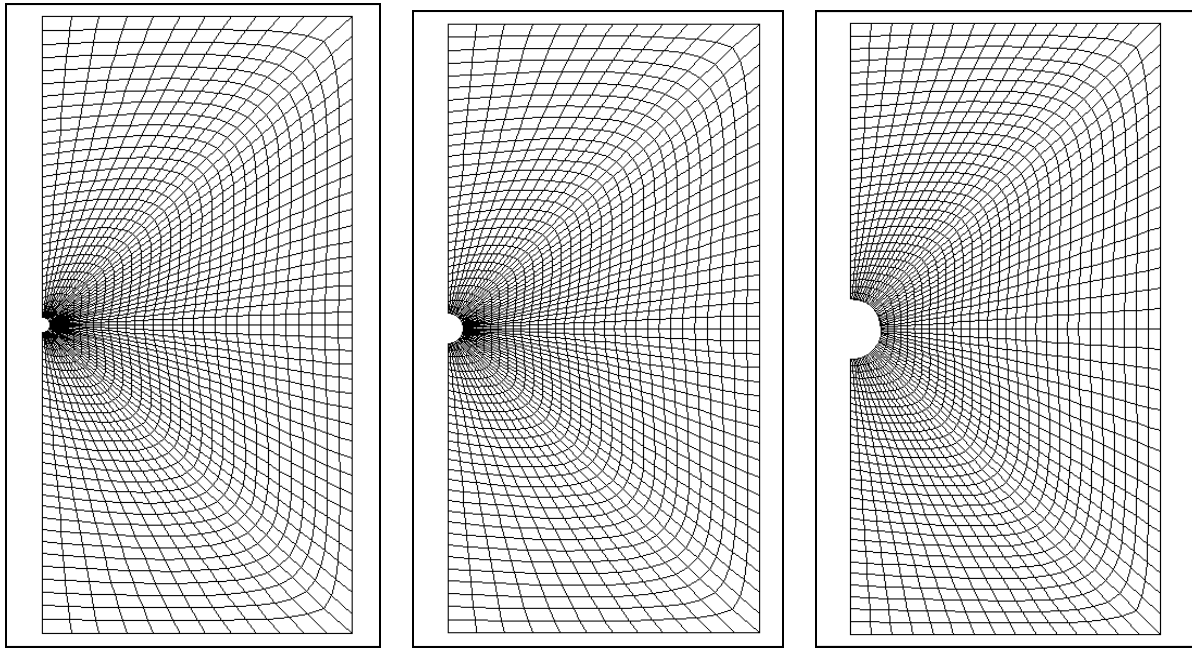
Σχήμα 3: Συνοριακές συνθήκες.

Figure 3: Boundary conditions.



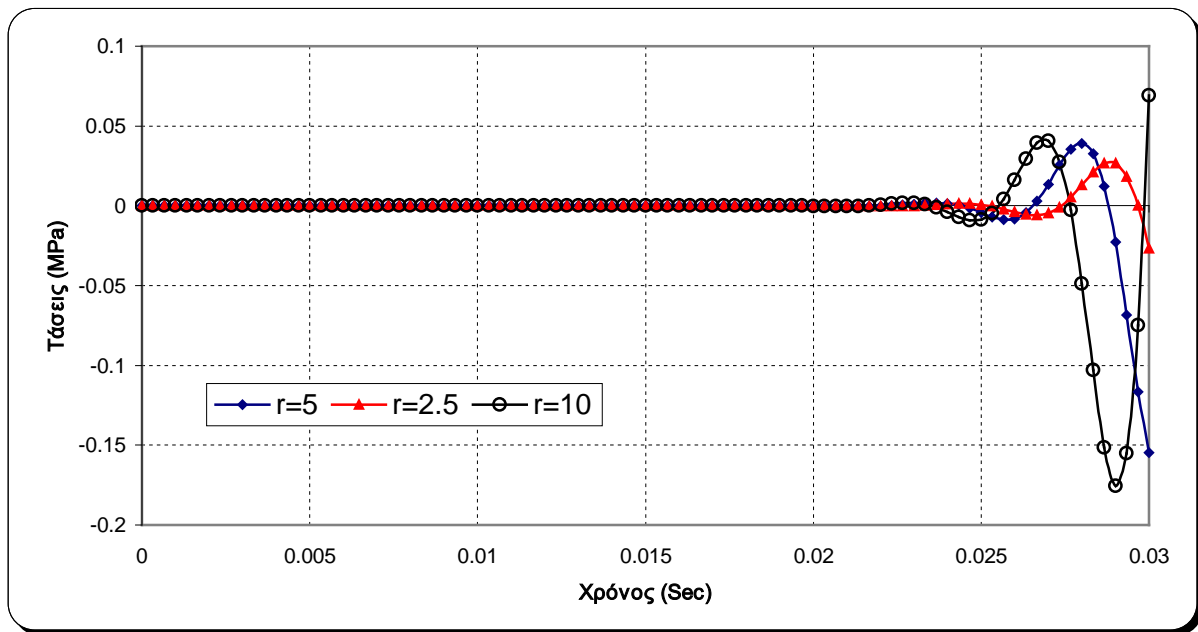
Σχήμα 4: Προφίλ πίεσης για 0.030 και 0.050 δευτερόλεπτα.

Figure 4: Pressure profile for 0.030 and 0.050 seconds.



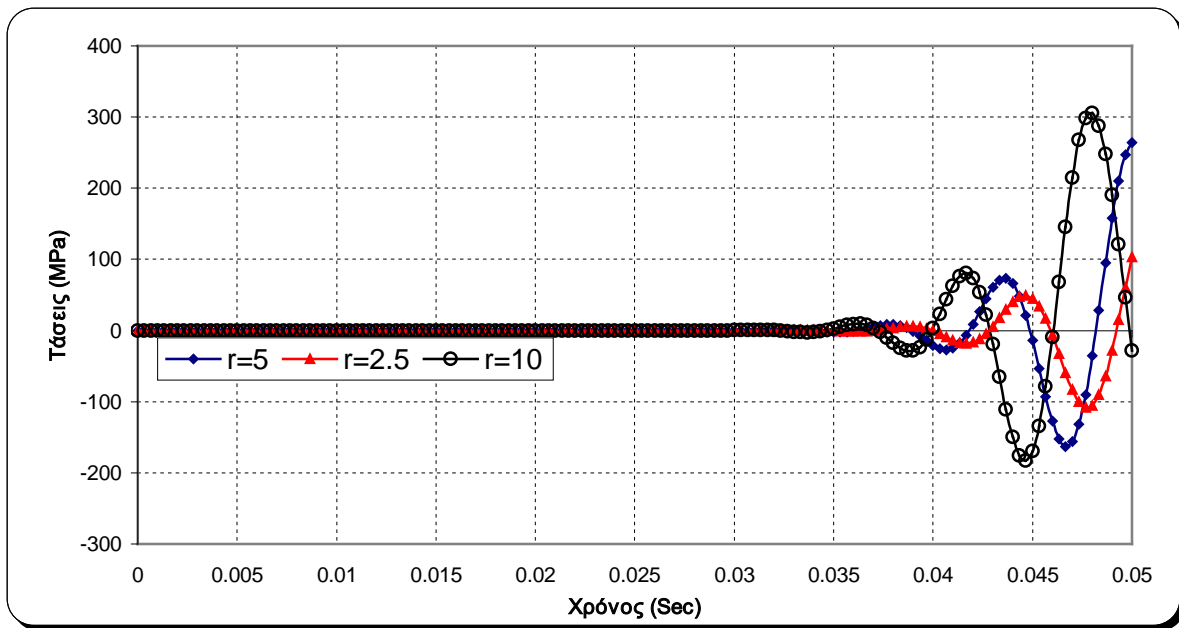
Σχήμα 5. Μοντέλα για διάφορους λόγους ακτίνας προς φορτίο (Α) 2.5/100 (Β) 5/100 (Γ) 10/100.

Figure 5: Models for various ratios of radius to burden (A) 2.5/100 (B) 5/100 (Γ) 10/100.



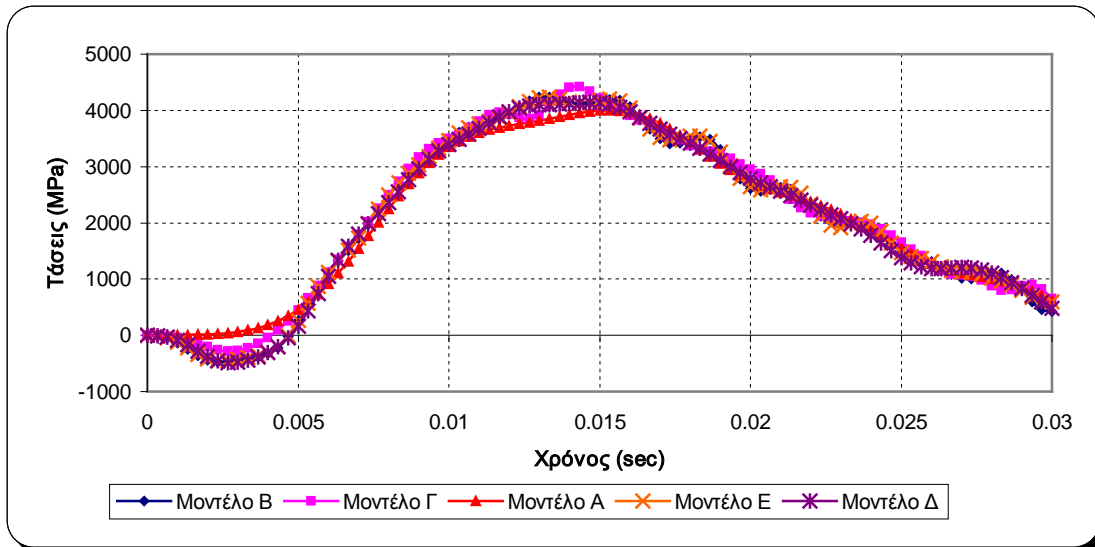
Σχήμα 6. Ελαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, κόμβος σύγκρισης στην ελεύθερη επιφάνεια, χρόνος διάρκειας δυναμικής ανάλυσης 30 msec.

Figure 6: Elastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node on the free surface, solution time for the dynamic analysis 30 msec.



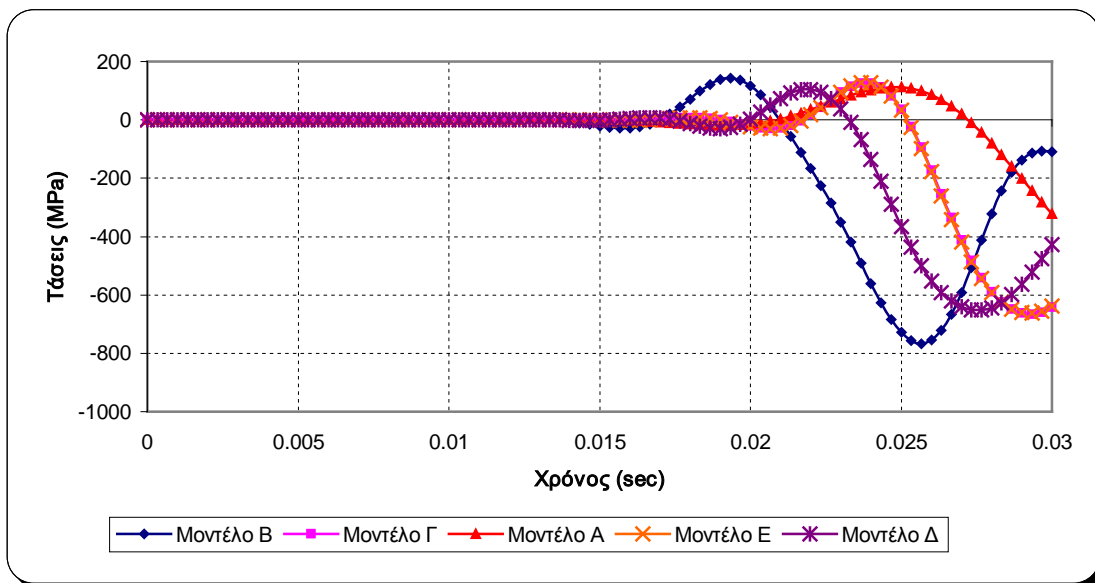
Σχήμα 7: Ελαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, κόμβος σύγκρισης στην ελεύθερη επιφάνεια, χρόνος διάρκειας δυναμικής ανάλυσης 50 msec.

Figure 7: Elastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node on the free surface, solution time for the dynamic analysis 50 msec.



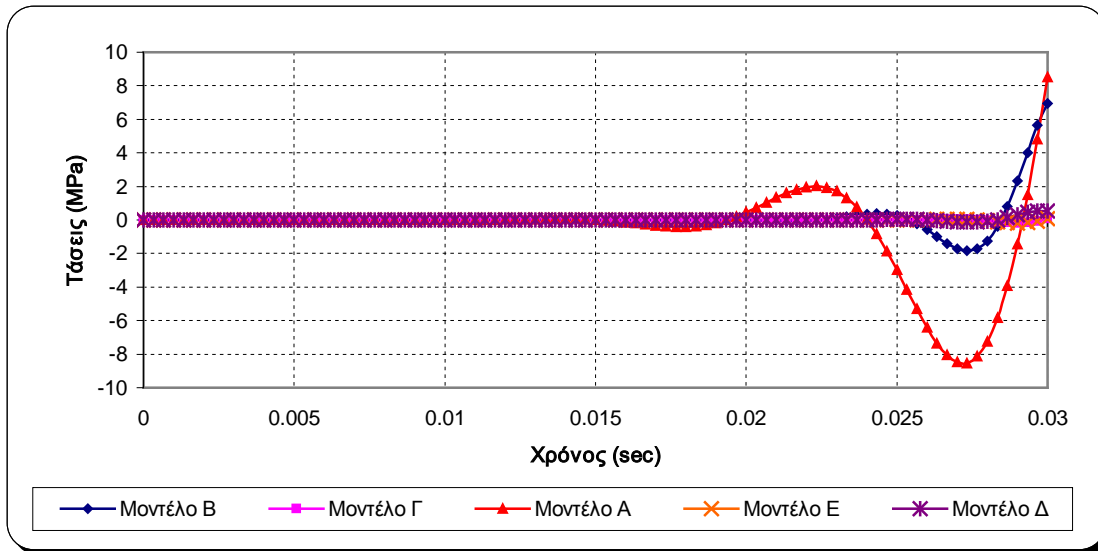
Σχήμα 8: Ελαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, κόμβος σύγκρισης στην περίμετρο του διατρήματος.

Figure 8: Elastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node on borehole perimeter.



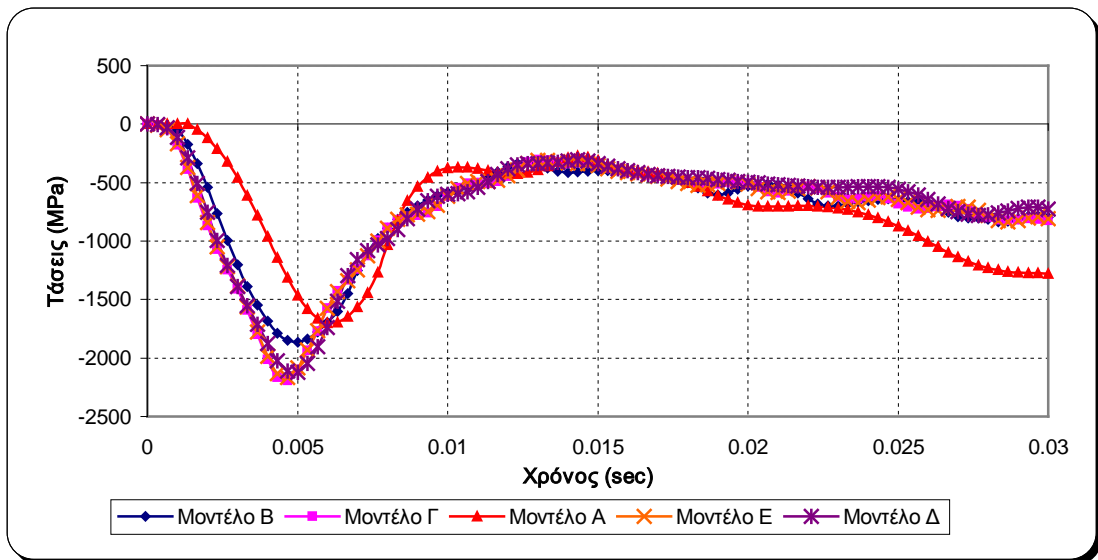
Σχήμα 9: Ελαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, κόμβος σύγκρισης στο μέσο του φορτίου.

Figure 9: Elastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node halfway to the free surface.



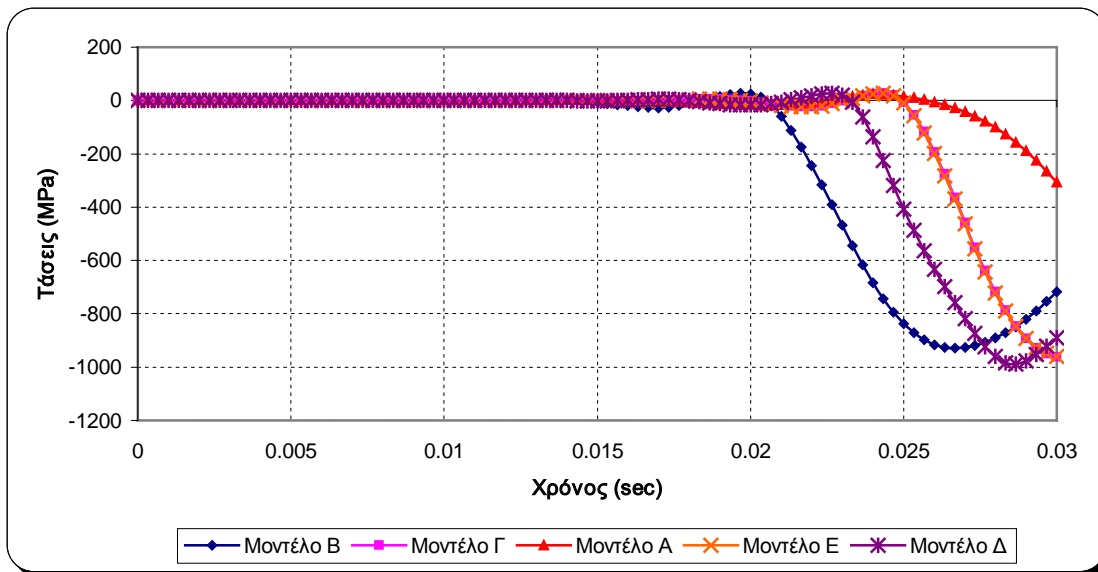
Σχήμα 10: Ελαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, για τους κόμβους της ελεύθερης επιφάνειας.

Figure10: Elastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node on the nodes upon the free surface



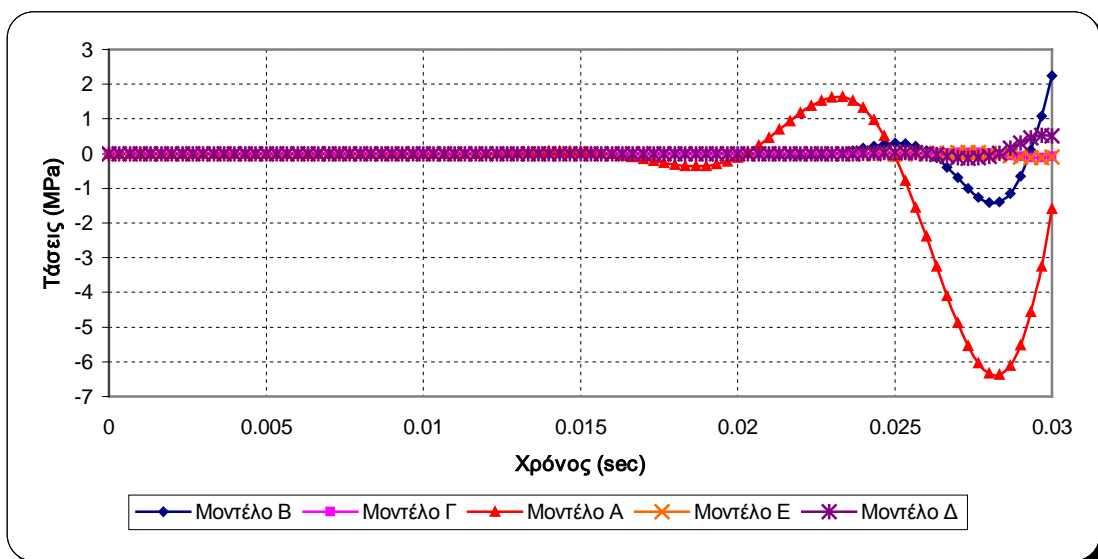
Σχήμα 11: Ελαστοπλαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, για τους κόμβους επί του διατρήματος.

Figure 11: Elastoplastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node on the nodes upon the borehole.



Σχήμα 12: Ελαστοπλαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, κόμβος σύγκρισης στο μέσο του φορτίου.

Figure 12: Elastoplastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node halfway to the free surface.



Σχήμα 13: Ελαστοπλαστικά μοντέλα, τάσεις συναρτήσει του χρόνου, πίεση 6000 MPa, για τους κόμβους της ελεύθερης επιφάνειας.

Figure 13: Elastoplastic models, stresses vs time, borehole pressure for 6000 MPa, reference node on the nodes upon the free surface