



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΛΗΜΑ
ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΚΡΟΥ

ΣΟΡΟΚΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

- 2008-

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μελέτη και εξέλιξη των τυπικών μηχανολογικών υλικών έχει φτάσει σήμερα σε πραγματικά πολύ υψηλά επίπεδα . Υλικά όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο , έχουν διερευνηθεί και αναπτυχθεί τόσο από την μακροσκοπική όσο και από την μικροσκοπική πλευρά σε μεγάλο βαθμό . Όμως οι ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις του ανθρώπου έφτασαν σε τέτοιο σημείο , ώστε τα παραπάνω υλικά να αδυνατούν να τις καλύψουν . Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις λοιπόν επιχειρήθηκε μια στροφή σε αξιόπιστες εναλλακτικές λύσεις οι οποίες μπορούν να αντικαταστήσουν τα κλασσικά μηχανολογικά υλικά με επιτυχία. Μια τέτοια κατηγορία υλικών είναι αυτή σύνθετων υλικών τα οποία διαθέτουν πολλά από τα πλεονεκτήματα των μεταλλικών υλικών, όπως οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες , ενώ ταυτόχρονα εμφανίζουν και κάποια επιπλέον όπως η ευκολία κατασκευής , το μικρό βάρος , η καλή συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση και στις συγκρούσεις, καθώς και η εξαιρετική αντοχή σε κόπωση .

Η αντοχή που παρουσιάζει μιας κατασκευή σε σύγκρουση και η ικανότητά της να απορροφά όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια , είναι μεγάλης σημασίας και εμφανίζει πρακτικό ενδιαφέρον στην περίπτωση των σύγχρονων μεταφορικών μέσων . Εκεί η προστασία των επιβατών σε περιπτώσεις σύγκρουσης αποτελεί την βασικότερη προτεραιότητα των κατασκευαστών. Επίσης είναι δεδομένες οι απαιτήσεις για μικρό βάρος και απόλυτο έλεγχο του τρόπου με τον οποίο θα διανεμηθεί σε μια κατασκευή η κινητική ενέργεια που παράγεται όταν λαμβάνει χώρα μια σύγκρουση. Για τους λόγους αυτούς , η μελέτη κατασκευών που έχουν ως βάση τους τα σύνθετα υλικά βρίσκεται σήμερα στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Έχει αποδειχτεί ότι τα σύνθετα υλικά παρέχουν εξαιρετικές ικανότητες απορρόφησης ενέργειας κατά τις συγκρούσεις σε σχέση με αυτές των μετάλλων, όταν χρησιμοποιείται ως κριτήριο ο λόγος απογραφόμενης

ενέργειας από την κατασκευή προς το βάρος της ίδιας της κατασκευής .

Η εκτεταμένη έρευνα που γίνεται σήμερα στην περιοχή των συνθέτων υλικών για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια, χρησιμοποιεί ως κύριο εργαλείο το πείραμα και διάφορες καταστροφικές μεθόδους . Αντιλαμβάνεται κανείς πόσο μεγάλο είναι το κόστος καθώς τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται , με το πέρας των πειραμάτων αχρηστεύονται . Στην μεγάλη αύξηση του κόστους συμβάλλει και το γεγονός ότι τα δοκίμια πραγματικών διαστάσεων που θα πρέπει να δοκιμαστούν είναι μεγάλης κλίμακας , όσον αφορά στην περίπτωση των μεταφορικών μέσων . Για το λόγο αυτό αναζητήθηκαν άλλες μέθοδοι που θα μπορούσαν να προβλέψουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των υλικών με ικανοποιητική ακρίβεια, και οι οποίες δεν θα ήταν καταστροφικές . Σήμερα δείχνει να κερδίζει έδαφος ολοένα και περισσότερο η χρήση κώδικα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, για την προσομοίωση φαινομένων σύγκρουσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη στον Τομέα Τεχνολογίας και Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου .Πραγματεύεται την χρήση και αξιολόγηση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA (VERSION 971) της εταιρείας Livermore Software Technology Corporation , σε ηλεκτρονικό υπολογιστή , για την προσομοίωση της δυναμικής διάτρησης σύνθετων υλικών . Κάτι που αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας στην τεχνολογία των υλικών σήμερα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή του Τομέα των Κατεργασιών Κ. Α.Γ. Μάμαλη , καθώς και στον Καθηγητή κ. Δ. Μανωλάκο , για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στον γράφοντα, αναθέτοντάς του την διπλωματική αυτή εργασία. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται στον κ. Κωστάζο Π. για την βοήθεια και τις κατευθύνσεις που προσέφερε στην εκμάθηση του κώδικα LS-DYNA.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ορίζουμε σύνθετο υλικό ένα υλικό που αποτελείτε από δύο ή περισσότερα διακριτά υλικά ή φάσεις .Οι διακριτές φάσεις έχουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους στις φυσικές ιδιότητες , ενώ οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι τελείως διαφορετικές από τις ιδιότητες του κάθε υλικού που το αποτελούν.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερες μη συνεχείς φάσεις εμβαπτισμένες σε μια συνεχή φάση . Οι μη συνεχείς φάσεις είναι συνήθως σκληρότερες και ονομάζονται ενισχύσεις (reinforcements).Ενώ η συνεχείς φάση ονομάζεται καλούπι (matrix).

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Κοκκώδη σύνθετα: είναι τα υλικά των οποίων οι ενισχύσεις αποτελούνται από κατανεμημένα σωματίδια . Η διάμετρος των κατανεμημένων σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από 1μm .Στα υλικά αυτά το επιβαλλόμενο φορτίο μοιράζεται τόσο στη μήτρα όσο και στα σωματίδια . Τέτοιας μορφής ενίσχυση έχουν τα

περισσότερα κεραμικά του εμπορίου.

ΣΥΝΘΕΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Είναι τα υλικά στα οποία η διάμετρος των κατανεμημένων σωματιδίων είναι μικρότερη από 0,1 μ m. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τα ντουραλουμίνια που σχηματίζονται με προσθήκη 4% κατά βάρος χαλκού σε μήτρα αλουμινίου.

ΙΝΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ

Είναι τα υλικά που η προσθήκη μιας ινώδους φάσης από γυαλί , άνθρακα , πολυεστέρα κ.α. βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες της μήτρας όπως η αντοχή σε κρούση και κόπωση .Σε αντίθεση με τα κοκκώδη σύνθετα στα υλικά αυτά ο ρόλος της μήτρας περιορίζεται στο να μεταφέρει το επιβαλλόμενο φορτίο στις ίνες οι οποίες είναι και το κατεξοχήν υλικό που απορροφούν τα φορτία. Στα ινώδη σύνθετα υλικά η γεωμετρία της ίνας παίζει σημαντικό ρόλο ως προς την αντοχή τους. Χαρακτηριστικά είδη ινών που χρησιμοποιούνται ως μέσα ενίσχυσης είναι οι ίνες γυαλιού ,οι πολυεστερικές ,ίνες Kevlar,οι ανόργανες ίνες. Όσων αφορά τις φυσικές ιδιότητες κάθε υλικό σε ινώδη μορφή παρουσιάζει υψηλότερη αντοχή και δυσκαμψία λόγω τελειότερης κρυσταλλικής δομής που εμφανίζει η κάθε ίνα .Αντίθετα το υλικό της μήτρας μπορεί να είναι μεταλλικό ,κεραμικό ή οργανικό.

ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ

Είναι τα υλικά που κατασκευάζονται με την εναπόθεση πλακών ή στρωμάτων δύο ή περισσότερων υλικών. Με την στρωματοποίηση έχουμε βελτίωση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους όπως η αντοχή , η δυσκαμψία ,η αντίσταση στη διάβρωση και φθορά. Ο προσανατολισμός των ινών κάθε στρώματος διαφοροποιεί τις τελικές ιδιότητες του υλικού.

ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

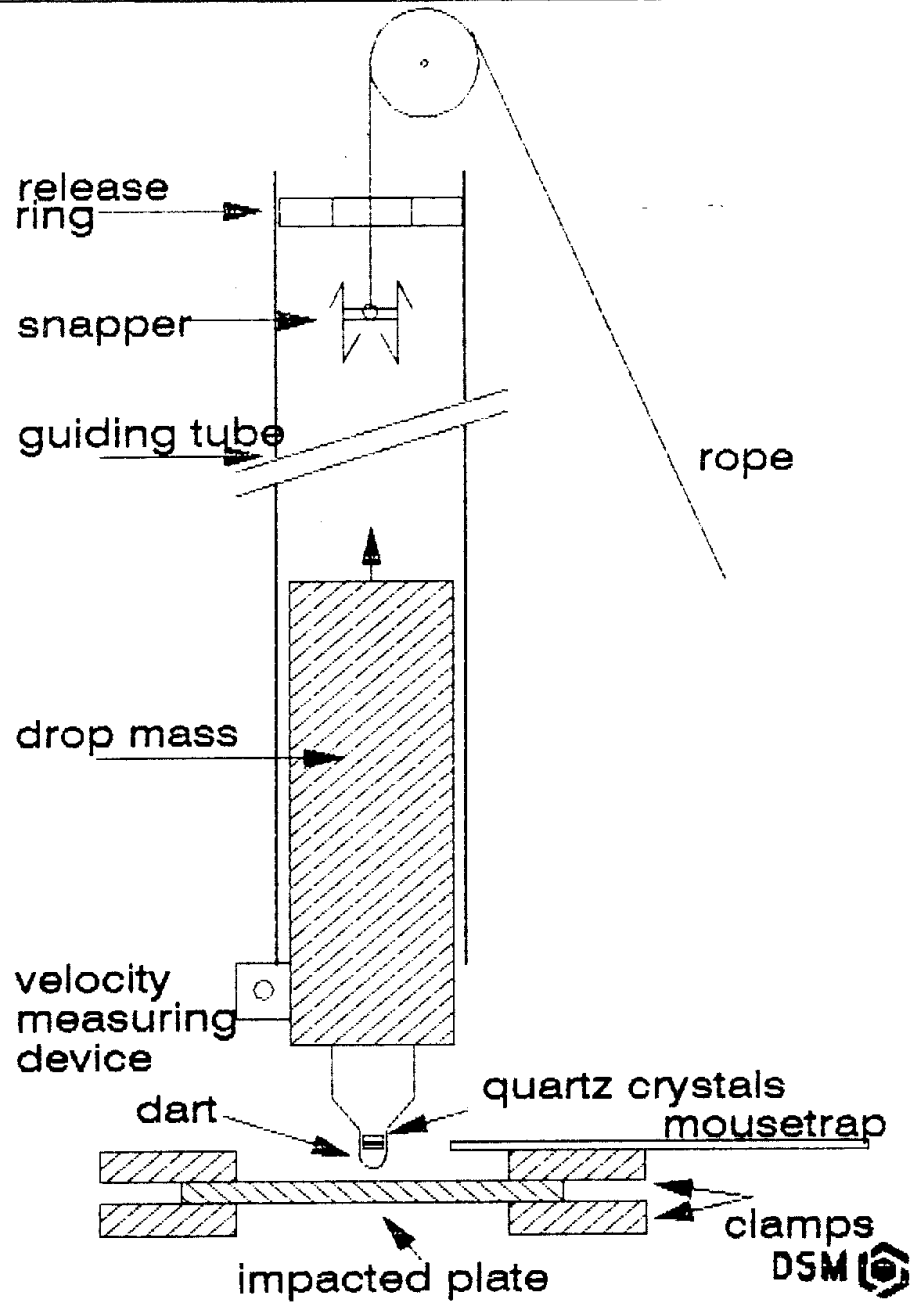
Η κατασκευή και διαμόρφωση ενός σύνθετου υλικού μέχρι την τελικά μορφή του περιέχει όλες τις φάσεις διαμόρφωσης των επιμέρους υλικών του. Η κατασκευή αυτή ακολουθεί τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας πλαστικών και μετάλλων.

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΡΗΣΗ:

Για την χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών σήμερα οφείλουμε να γνωρίζουμε τη συμπεριφορά τους σε καταπονήσεις που πιθανώς υποβληθούν .Η συμπεριφορά αυτή γίνεται γνωστή με την υποβολή αντιστοίχων δοκιμίων σε τεστ για την διεξαγωγή συμπερασμάτων .Ένα είδος που συναντάμε συχνά σήμερα όπως για παράδειγμα στην αεροναυπηγική στην ναυτιλία είναι η διάτρηση . Σε αυτήν το αντικείμενο το οποίο προσκρούει στο υπό εξέταση δοκίμιο με κάποια αρχική ταχύτητα προκαλεί παραμόρφωση η οποία μελετάται .Το φερόμενο αντικείμενο είναι μικρότερων και μπορεί να είναι είτε σφαίρα είτε κάποιο αιχμηρό αντικείμενο .Έπειτα μελετάται το

Low velocity impact DSM Research



δοκίμιο χώρα με σκοπό να προβλέψουμε τα αποτελέσματα διάτρησης σε πιο σύνθετες κατασκευές από τα ίδια υλικά.

Χρησιμοποιούμενα τεστ διάτρησης στο εργαστήριο για την μελέτη δοκιμίων συγκεκριμένων διαστάσεων είναι τα λεγόμενα “charpy” και “izod”. Κατά το πρώτο τεστ το προς μελέτη δοκίμιο στηρίζεται στα δύο άκρα του και ο διεισδητής εισχωρεί στο κέντρο .Στο δεύτερο το δοκίμιο είναι πακτωμένο κατακόρυφα στο ένα άκρο και στ πάνω άκρο φέρει αντίσταση από την μία πλευρά .Σ’ αυτό ο διεισδυτής προσκρούει από το πλάι.

Τα τεστ αυτά ενδείκνυνται για ομογενή ισότροπα υλικά .Γενικότερα βοηθού στη μελέτη συμπεριφοράς και άλλων υλικών πόσο μάλλον για τα σύνθετα που η διαδικασία κατάρρευσης τους είναι πιο σύνθετη. Βοηθούν επίσης στην καταγραφή όλης της διαδικασίας φόρτισης του δοκιμίου .

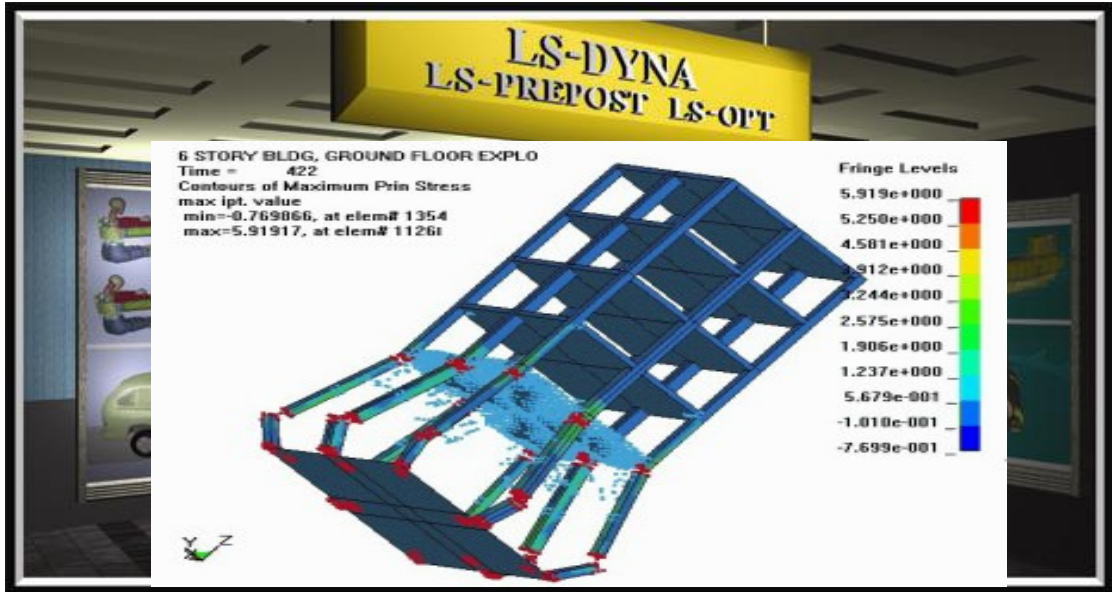
Μία άλλη μορφή τεστ για την μελέτη σύνθετων υλικών σε διάτρηση είναι το τεστ της πίπτουσας μάζας όπου το δοκίμιο συγκρατείται στα άκρα και σφαίρα γνωστής μάζας πέφτει από καθορισμένο ύψος.

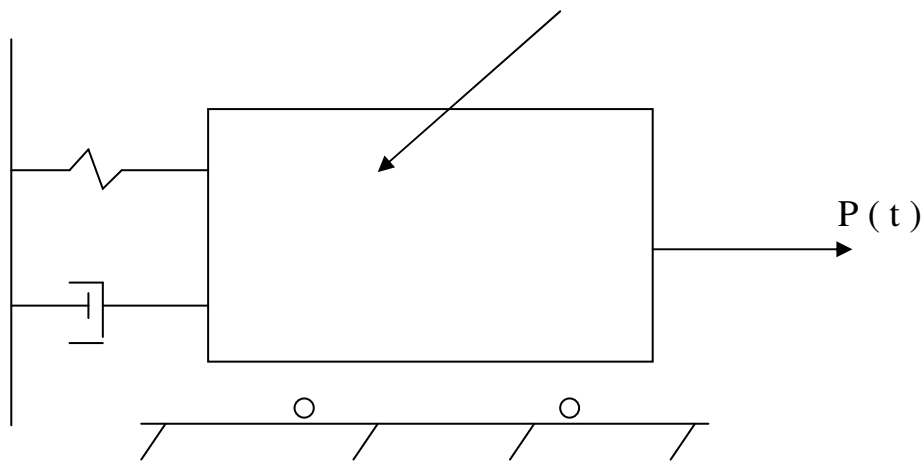
Μέχρι σήμερα η πειραματική προσέγγιση αποτελούσε την πλέον αξιόπιστη μέθοδο για τη μελέτη το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των διαφόρων κατασκευών. Τα πειράματα ωστόσο αποτελούν δαπανηρές και χρονοβόρες λύσεις, ενώ παρουσιάζεται το πρόβλημα γενίκευσης των αποτελεσμάτων τους. Το κενό αυτό έρχονται να καλύψουν τα μοντέλα πρόβλεψης, τα οποία επιτρέπουν στον μελετητή να καταλήγει σε αξιόπιστα αποτελέσματα με σφάλμα μικρότερο από 10 % .Ένα από τα σημαντικότερα αυτών είναι το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων.

Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

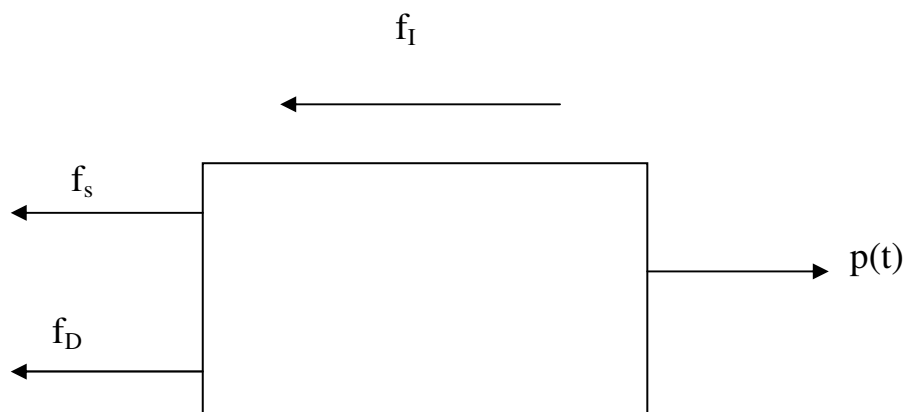
Η χρήση μη γραμμικών και γραμμικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ξεκίνησε εδώ και πολλά χρόνια , με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς διαφόρων υλικών κατασκευών σε διάφορες καταπονήσεις , και την μελέτη τόσο ολόκληρων συστημάτων , όσο και των συνιστωσών τους . Οι περισσότερες από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και καταγράφηκαν στην βιβλιογραφία , επιχείρησαν να προβλέψουν τον τρόπο κατάρρευσης και τον αντίστοιχο μηχανισμό καταπόνησης , δίνοντας γενικές κατευθύνσεις που αφορούν τα φαινόμενα αυτά . Ωστόσο είναι υπό αμφισβήτηση η ακρίβεια που μπορούν να παρέχουν τα προγράμματα αυτά, και η ικανότητά τους να περιγράψουν με σαφήνεια τις κρίσιμες παραμέτρους σχεδίασης όπως οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι αναπτυσσόμενες ροπές .

Για την αξιολόγηση των ικανοτήτων πρόβλεψης των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων , πρέπει να έχουμε κατά νου ότι μέχρι σήμερα δεν έχουν διατυπωθεί ενοποιημένες θεωρίες για τις καταστατικές εξισώσεις που διέπουν την συμπεριφορά των υλικών σε περιπτώσεις σύνθετης φόρτισης. Πολλές όμως από τις δυσκολίες αυτές ενδέχεται να ξεπεραστούν στο άμεσο μέλλον, οπότε μαζί με την πρόοδο της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών που θα παρέχει αυξημένη υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα στο μέσο χρήστη, οι επιδόσεις των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αναμένεται να βελτιωθούν σημαντικά.





ΑΣΚΟΥΜΕΝΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ



f_I : Δυνάμεις αδρανείας

f_s : Ελαστικές δυνάμεις

f_D : Δυνάμεις απόσβεσης

$p(t)$: Εξωτερικές δυνάμεις

Βάση της αρχής D'ALAMBERT ,οι εξισώσεις ισορροπίας δίνουν:

$$f_I + f_D + f_s = p(t)$$

$$f_I = m \cdot \ddot{u} \quad , \ddot{u} = d^2u/dt^2 \text{ επιτάχυνση}$$

$$f_D = c \cdot \dot{u} \quad , \dot{u} = du/dt \text{ ταχύτητα}$$

$$f_S = k \cdot u \quad , u = \text{μετατόπιση}$$

όπου c είναι ο συντελεστής απόσβεσης και k είναι η σταθερά του ελατηρίου.

Οι εξισώσεις κίνησης για την περίπτωση γραμμικής συμπεριφοράς οδηγούν σε συνήθη γραμμική διαφορική εξίσωση:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = p(t)$$

Η επίλυση μιας τέτοιας εξίσωσης γίνεται θεωρώντας ότι η μορφή της εξωτερικής φόρτισης είναι αρμονική. Για λόγους ευκολίας χρησιμοποιούμε τους ακόλουθους συμβολισμούς :

- Αρμονική φόρτιση : $p(t) = p_0 \cdot \sin(\bar{\omega}t)$
- Κυκλική συχνότητα : $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ για συστημα ενός βαθμού ελευθερίας .
- Φυσική συχνότητα : $f = \omega/2\pi = 1/T$, $T =$ περίοδος
- Λόγος απόσβεσης : $\xi = c/c_r = c/2 \cdot m \cdot \omega$
- Συχνότητα αποσβενόμενης ταλάντωσης : $\omega_0 = \omega \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$
- Συχνότητα εφαρμοζόμενου φορτίου: $\beta = \bar{\omega}/\omega$

Η επίλυση κλειστής μορφής είναι η παρακάτω :

$$U(t) = u \cos(\omega t) + (\dot{u}/\omega) \sin(\omega t) + (p_0/k) \cdot \frac{1}{1 - \beta^2} [\sin(\bar{\omega} \cdot t) - \beta \cdot \sin(\omega \cdot t)]$$

Όπου οι αρχικές συνθήκες είναι :

u_0 : αρχική μετατόπιση

\dot{u} : αρχική ταχύτητα

p_0/k : στατική μετατόπιση

Στην περίπτωση μη γραμμική συμπεριφοράς, οι ελαστικές δυνάμεις μεταβάλλονται ως μη γραμμική συνάρτηση της μετατόπισης, οδηγώντας σε μη γραμμική συνήθη διαφορική εξίσωση:

$$m \cdot \ddot{\mathbf{u}} + c \cdot \dot{\mathbf{u}} + f_s(\mathbf{u}) = \mathbf{p}(t)$$

Για την επίλυση τέτοιων εξισώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο αριθμητικές μέθοδοι. Ο κώδικας LS-DYNA χρησιμοποιεί την μέθοδο των κεντρικών διαφορών για να ολοκληρώσει τις εξισώσεις κίνησης στο χρόνο.

Οι ημιδιακριτές εξισώσεις κίνησης τη χρονική στιγμή n είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{M} \cdot \alpha^n = \mathbf{P}^n - \mathbf{F}^n + \mathbf{H}^n$$

Όπου \mathbf{M} είναι το διαγώνιο μητρώο μάζας, \mathbf{P}^n είναι το μητρώο εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων, \mathbf{F}^n είναι το διάνυσμα απόκλισης των τάσεων και \mathbf{H}^n είναι η αντίσταση κλεψύδρας (hourglass resistance).

Για να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα t^{n+1} , χρησιμοποιούμε την μέθοδο ολοκλήρωσης των κεντρικών διαφορών:

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1} \cdot (\mathbf{P}^n - \mathbf{F}^n + \mathbf{H}^n)$$

$$\mathbf{v}^{n+1/2} = \mathbf{v}^{n-1/2} + \mathbf{a}^n \cdot \Delta t^n$$

$$\mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \mathbf{v}^{n+1/2} \cdot \Delta t^{n+1/2}$$

Όπου :

$$\Delta t^{n+1/2} = \frac{(\Delta t^n + \Delta t^{n+1})}{2}$$

\mathbf{V} = η ταχύτητα των κόμβων στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων

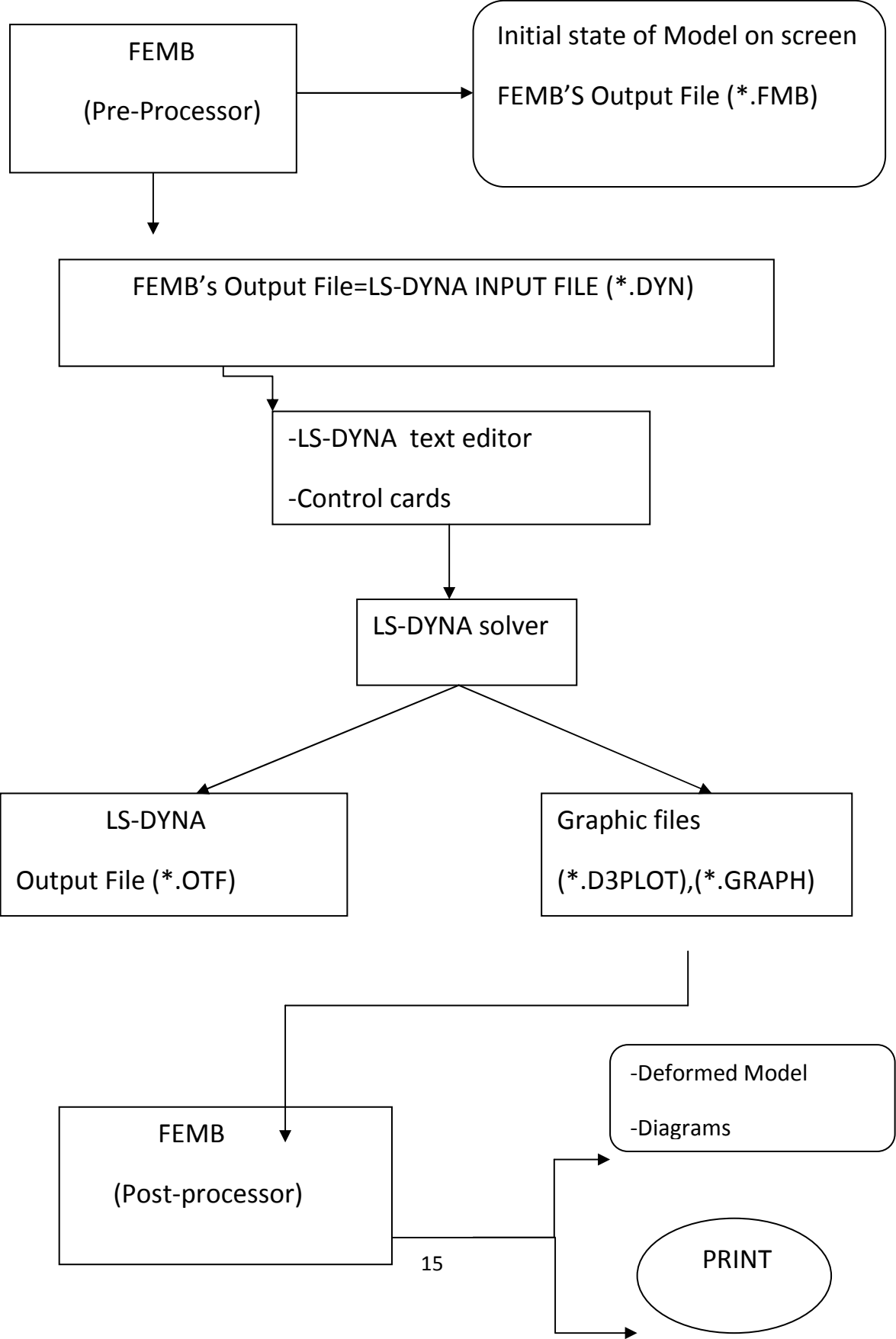
\mathbf{U} = το διάνυσμα μετατοπίσεων. Οι νέες θέσεις των διαφόρων σημείων της αρχικής γεωμετρίας βρίσκονται προσθέτοντας σε αυτές τις όποιες μεταβολές των μετατοπίσεων

Με τη μέθοδο αυτή τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία στα σφάλματα στρογγυλοποίησης. Επίσης δεν επηρεάζονται από

πιθανά σφάλματα του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή . Έτσι δεν είναι απαραίτητο ο κώδικας να χρησιμοποιεί ακρίβεια.

Η κατανομή του υπολογιστικού χώρου που απαιτείται κατά την επίλυση ενός μοντέλου γίνεται με δυναμικό τρόπο . Αυτό σημαίνει ότι κατά την εκτέλεση του ο κώδικας υπολογίζει αυτόματα τον απαιτούμενο χώρο για την επεξεργασία και αποθήκευση των ενδιάμεσων και τελικών αποτελεσμάτων . Ο μόνος περιορισμός που τίθεται στις δυνατότητες του είναι οι υπολογιστικές δυνατότητες του υπολογιστή .

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε τα απαιτούμενα βήματα για την ολοκληρωμένη προσομοίωση και μελέτη ενός φαινομένου στον κώδικα LS-DYNA



Παρατηρούμε ότι είναι απαραίτητη η παρουσία δύο βασικών προγραμμάτων . Το ένα από αυτά είναι ο Προ I Μετά - επεξεργαστής (Pre- I Post - Processor) , ο οποίος στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το πρόγραμμα FEMB (Finite Element Model Builder) . Το άλλο είναι το ίδιο το LS - DYNA , το οποίο περιέχει ενσωματωμένα δύο προγράμματα , τον επεξεργαστή κειμένου (LS - DYNA Text Editor) και τον επιλυτή (LS - DYNA Solver) .

Τα επιμέρους στάδια που ακολουθούνται είναι τα παρακάτω :

- Με την βοήθεια του FEMB κατασκευάζουμε την βασική γεωμετρία του μοντέλου μας , δίνοντάς του πραγματικές διαστάσεις με την βοήθεια απλών γεωμετρικών σχημάτων (ευθείες, τόξα, κύκλους, επιφάνειες, κ.λ.π.) .
- Προχωρούμε με την διακριτοποίηση και δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων με βάση την αρχική γεωμετρία.
- Καθορίζουμε τα υλικά και τις φυσικές ιδιότητες των επιμέρους στοιχείων του μοντέλου μας (τύπος πεπερασμένων στοιχείων, πάχη, Κ.λ.π.) .
- Ορίζουμε διεπιφάνειες (sliding interfaces) μεταξύ σωμάτων που έρχονται σε επαφή.
- Καθορίζουμε αρχικούς περιορισμούς (μετατοπίσεις, περιστροφές , Κ.λ.π.) φορτίσεις (δυνάμεις, ροπές , κ.λ.π.) και ταχύτητες.

Καθ' όλη την διάρκεια των παραπάνω σταδίων έχουμε την δυνατότητα να βλέπουμε στην οθόνη του υπολογιστή κάθε κίνηση που κάνουμε και να αποθηκεύουμε ενδιάμεσα στάδια σε μορφή αρχείων * . FMB . Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούμε την αρχική κατάσταση του μοντέλου (Initial State of Model on Screen) . Με την ολοκλήρωση των σταδίων αυτών, μπορούμε με την βοήθεια του FEMB να αποθηκεύσουμε το τελικό μοντέλο μας με την μορφή output αρχείου κατάληξης * . DYN η οποία είναι κατάλληλη για ανάγνωση τόσο από τον επεξεργαστή κειμένου του LS - DYNA (LS - DYNA Text Editor) όσο και από τον επιλυτή (LS - DYNA Solver) . Καθώς με την βοήθεια του προγράμματος FEMB δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλες τις δυνατότητες που παρέχει ο κώδικας LS - DYNA (για παράδειγμα δεν περιέχει

όλους τους διαθέσιμους τύπους υλικών και επιφανειών επαφής) , είμαστε αναγκασμένοι να προσθέσουμε οποιαδήποτε λεπτομέρεια θέλουμε με την βοήθεια του επεξεργαστή κειμένου , μέσω των καρτών ελέγχου (Control Cards) .

Αφού ολοκληρώσουμε τις όποιες επιδιορθώσεις θέλουμε να κάνουμε με τον επεξεργαστή κειμένου, εισάγουμε το αρχείο μας σε μορφή *.DYN πλέον στον επιλυτή . Ο επιλυτής αναλαμβάνει να προχωρήσει στην επίλυση του μοντέλου μας και να δημιουργήσει με την σειρά του κάποιους συγκεκριμένους τύπους output αρχείων (*.D3PLOT , *.GRAPH) . Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της επίλυσης (θέσεις των κόμβων κάθε χρονική στιγμή, ασκούμενες δυνάμεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις διαφόρων κόμβων, κ.λ.π.) .

Στο τελικό στάδιο, με την χρήση πάλι του προγράμματος FEMB , αυτή τη φορά όμως ως Μετά - Επεξεργαστή (Post - Processor) , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα παραπάνω αρχεία για να παρακολουθήσουμε τον τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται το μοντέλο μας κατά τα διάφορα χρονικά διαστήματα, καθώς και διάφορα γραφήματα. Τέλος έχουμε την δυνατότητα να εκτυπώσουμε τα αποτελέσματα σε κάποιο εκτυπωτή .

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ LS - DYNA

Αφού γίνει η εγκατάσταση του προγράμματος και εισαχθούν οι απαραίτητοι κωδικοί, είμαστε σε θέση να εκκινήσουμε το πρόγραμμα. Από το μενού Start > Program Files > LS - DYNA3D επιλέγουμε το αρχείο LS - DYNA . Η αρχική οθόνη στην οποία βρισκόμαστε περιέχει μια σειρά από μενού και κάποια εικονίδια συντόμευσης , τα οποία απλώς μας βοηθούν να έχουμε πρόσβαση στις βασικότερες επιλογές των μενού δίχως να αναγκάζομαστε κάθε φορά να μπαίνουμε σε αυτά.

Ακολούθως θα κάνουμε μια σύντομη περιγραφή των μενού του προγράμματος:

- Μενού FILE : Περιέχει όλες εκείνες τις βασικές λειτουργίες που έχουν να κάνουν με την διαχείριση αρχείων. Μπορούμε να δημιουργήσουμε νέο αρχείο προς εκτέλεση (New) , να ανοίξουμε ένα ήδη υπάρχον (Open) , να καθορίσουμε τις ιδιότητες και τον τρόπο με τον οποίο εμφανίζεται η οθόνη στην οποία εργαζόμαστε (Page setup) και ο τρόπος με τον οποίο εκτυπώνουμε (Print setup) . Τέλος μπορούμε να εγκαταλείψουμε το πρόγραμμα (Exit) . Ουσιαστικά με την βοήθεια αυτού του μενού έχουμε πρόσβαση στον επεξεργαστή κειμένου του LS - DYNA.
- Μενού VIEW : Με το μενού αυτό επιλέγουμε αν θα εμφανίζονται στην αρχική οθόνη ή όχι τα εικονίδια συντόμευσης , και η μπάρα τρέχουσας κατάστασης (Status bar) στο κάτω τμήμα της αρχικής οθόνης .
- Μενού SOL VERS : Οι επιλογές του μενού αυτού μας επιτρέπουν να ξεκινήσουμε την ανάλυση κάποιου νέου μοντέλου που έχουμε πρόσφατα δημιουργήσει ή κάποιου παλαιότερου μοντέλου . Επίσης έχουμε την

δυνατότητα για μια γενική εποπτεία των αρχείων που θέλουμε να εισάγουμε προς ανάλυση .

- Μενού BUILDER / VIEWER : Σ' αυτό το μενού περιέχεται μια και μοναδική επιλογή η οποία μας μεταφέρει αυτόματα στο περιβάλλον του Προ / Μετά Επεξεργαστή (Pre / Post Processor) με την βοήθεια του οποίου μπορούμε να δημιουργήσουμε μοντέλα προς ανάλυση και να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης.
- Μενού HELP / MANUALS : Το τελευταίο αυτό μενού περιέχει μια σειρά από αρχεία βοήθειας σε μορφή * .PDF , τα οποία μπορούμε να διαβάσουμε με την βοήθεια του προγράμματος ACROBAT READER της εταιρείας Adobe Systems Incorporated .

2.1 ΠΕΡΙΦΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FEMB

Το πρόγραμμα FEMB αποτελεί έναν πολύ καλό Προ / Μετά Επεξεργαστή πεπερασμένων στοιχείων , ο οποίος έχει την δυνατότητα συνεργασίας τόσο με τον κώδικα LS - DYNA , όσο και με αρκετά προγράμματα σχεδίασης (CAD programs) . Αναπτύχθηκε στα μέσα του 1980 από την Engineering Technology Associates Inc ..

Ως προ - επεξεργαστής έχει την δυνατότητα να δέχεται δεδομένα μορφής CAD από σχεδόν όλα τα σύγχρονα σχεδιαστικά πακέτα . Από την στιγμή που θα εισαχθούν τέτοιας μορφής δεδομένα , το FEMB μπορεί εύκολα και γρήγορα να χειριστεί οποιαδήποτε γεωμετρική οντότητα, όπως γραμμές , καμπύλες , επιφάνειες, κ.λ.π .. Ακόμη και στην περίπτωση όμως που κάποιο σχεδιαστικό πακέτο δεν είναι διαθέσιμο , το FEMB περιλαμβάνει μενού που περιέχουν επιλογές και έτοιμες συναρτήσεις με τις οποίες εύκολα κανείς μπορεί να δημιουργήσει από απλές έως πολύ σύνθετες γεωμετρίες . Το δυνατότερο ίσως σημείο όμως του προγράμματος είναι η μεγάλη ευκολία που παρέχει στον χρήστη για την διακριτοποίηση και δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, με κύριο εργαλείο την επιλογή , AUTOMESHING ' πάνω σε έτοιμες επιφάνειες .

Από την άλλη ως μετά - επεξεργαστής , το FEMB μπορεί να εκμεταλλευτεί τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης, παρέχοντας δυνατότητες, όπως απεικόνιση τάσεων , ενεργειών και παραμορφώσεων σε πραγματικό χρόνο, είτε μέσω animation , είτε μέσω διαγραμμάτων σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Η κύρια μορφή που έχει το περιβάλλον του προγράμματος FEMB φαίνεται στο σχήμα 2.4 . Παρατηρούμε ότι υπάρχουν τρεις βασικές περιοχές:

I Η πρώτη είναι το κυρίως παράθυρο (main window) , όπου περιέχονται

όλα τα μενού και κάποια εικονίδια που αντιστοιχούν σε βασικές λειτουργίες του προγράμματος . Στο άνω μέρος της η περιοχή αυτή περιέχει πληροφορίες για το τρέχον μοντέλο (όνομα) .

II. Η δεύτερη περιοχή είναι το παράθυρο γραφικών graphics display window), όπου μπορούμε να παρακολουθήσουμε οπτικά το μοντέλο μας και κάθε ενέργεια που πραγματοποιείται μέσω των επιλογών που υπάρχουν στα μενού) .

III. Η τρίτη και τελευταία περιοχή αποτελεί το παράθυρο μηνυμάτων (message display window) . Στο παράθυρο αυτό εμφανίζονται μηνύματα , που ενημερώνουν τον χρήστη ότι βρίσκεται σε εξέλιξη η εκτέλεση μίας εντολής και προειδοποιούν όταν είναι αναγκαία η παρέμβαση του (π.χ. εισαγωγή δεδομένων).

Ακολούθως θα προχωρήσουμε σε μια συνοπτική παρουσίαση των μενού που παρέχονται από το πρόγραμμα . Δεν θα γίνει πλήρης αναφορά όλων των επιλογών που εμπεριέχονται στα μενού , αλλά θα παρουσιαστούν μόνο οι σημαντικότερες εξ αυτών.

- Μενού FILE : Εδώ περιέχονται οι βασικές λειτουργίες διαχείρισης αρχείων του προγράμματος , όπως η δημιουργία καινούργιου αρχείου (New ...) , η εκκίνηση ενός παλαιού (Open ...) , η αποθήκευση του τρέχοντος μοντέλου (Save) και η αποθήκευση με συγκεκριμένο όνομα (Save As...) . Επίσης μπορούμε να επέμβουμε και σε άλλες λειτουργίες όπως το μέγεθος των χαρακτήρων που παρουσιάζονται στην οθόνη και η εκτύπωση. Με την βοήθεια της επιλογής Open μπορούμε να εισάγουμε και να εξάγουμε δεδομένα . Τα δεδομένα αυτά μπορεί να είναι τύπου LS - DYNA, DXFIGES (μορφές CAD) , αρχεία από το γνωστό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων NASTRAN (μορφής * . nas) , καθώς και αρχεία FEMB (animation / graphs) . Τέλος μπορούμε να εγκαταλείψουμε το πρόγραμμα μέσω της επιλογής Exit .
- Μενού GEOM : Με το μενού αυτό έχουμε την δυνατότητα να δημιουργήσουμε γραμμές και γεωμετρικές οντότητες διαφόρων μορφών, ή να επεξεργαστούμε κάποιες ήδη υπάρχουσες. Οι κυριότερες λειτουργίες που μπορούμε να επιτελέσουμε είναι να σχεδιάσουμε τόξα, γραμμές, καμπύλες, να ενώσουμε να διαγράψουμε να αντιγράψουμε ή να επεκτείνουμε μια ήδη υπάρχουσα γραμμή . Επίσης μπορούμε με την βοήθεια του ποντικιού (InOUSe) να επιλέξουμε έναν κόμβο από το πλέγμα μας ή ένα σημείο και το πρόγραμμα να το αναγνωρίσει .
- Μενού SURF : Το μενού αυτό είναι αφιερωμένο στην δημιουργία και επεξεργασία επιφανειών . Η δημιουργία επιφανειών γίνεται με την βοήθεια δύο , τριών ή τεσσάρων γραμμών που χρησιμοποιούνται ως όρια ή ακόμα και με περιστροφή μιας γραμμής γύρω από έναν άξονα . Μπορούμε επίσης να διαγράψουμε, να αντιγράψουμε ή και να διαχωρίσουμε μια επιφάνεια. Τέλος

υπάρχει η δυνατότητα επιλογής εξειδικευμένων εντολών, όπως η Reverse Surface Normal , η οποία επιτρέπει την αντιστροφή στην κανονική φορά που διαθέτει μια επιφάνεια ως κανονική ορίζεται η φορά εκείνη που προκύπτει αν επιλέξουμε τα όρια της δημιουργούμενης επιφάνειας σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η επιλογή αυτή σχετίζεται με την φορά που επιθυμούμε να έχουν τα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (plate elements) που θα δημιουργήσουμε αργότερα με βάση κάποια επιφάνεια.

- Μενού ELEM. : Πρόκειται για το μενού εκείνο με το οποίο δημιουργούμε το πλέγμα μας και καθορίζουμε τις ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων Έχουμε την δυνατότητα να δημιουργήσουμε όλους τους κλασσικούς τύπους πεπερασμένων στοιχείων (Beam , Rigid Link , Plate , Solid , Spring Damper Element , Mass) , με διάφορες τεχνικές (κατά μήκος μιας γραμμής πάνω σε ήδη ορισμένες επιφάνειες , μεταξύ δύο ή και περισσότερων¹ γραμμών) . Μπορούμε επίσης να επιτελέσουμε και βοηθητικές εργασίες όπως αντιγραφή, διαγραφή, αναγνώριση, σύμπτυξη, επαναρίθμηση και εύρεση πεπερασμένων στοιχείων.
- Μενού NODE : Σε αυτό το μενού περιέχονται όλες εκείνες οι λειτουργίες που αφορούν τους κόμβους. Υπάρχει η δυνατότητα για δημιουργία νέων κόμβων, για έλεγχο πιθανής σύμπτωσης κάποιων , για εύρεση και αναγνώριση κόμβων, καθώς και για άλλες βοηθητικές λειτουργίες.
- Μενού CHECK : Με το μενού αυτό μπορούμε να ελέγξουμε το μοντέλο μας για πιθανά λάθη (έλεγχος συνέχειας των πεπερασμένων στοιχείων , έλεγχος μεγέθους των στοιχείων, κλ.π.) , καθώς και να τροποποιήσουμε κάποιες ιδιότητές του, όπως η κανονική φορά (normal direction) των στοιχείων (στοιχείων μεμβράνης , στερεών στοιχείων, Κ.λ.Π.) .
Μενού P A R T : Σκοπός του μενού αυτού είναι να οργανώσει γραμμές επιφάνειες και πεπερασμένα στοιχεία σε ενιαίες ομάδες (Parts) . Με τρόπο ώστε η εμφάνιση στην οθόνη του υπολογιστή και διαχείριση των επιμέρους ομάδων γίνεται ευκολότερη και γρηγορότερη . Κάθε ομάδα μπορεί να έχει ένα ξεχωριστό όνομα. Ειδικότερες λειτουργίες του μενού αφορούν στην δημιουργία, διαγραφή, αλλαγή ονόματος και ιδιοτήτων μιας ομάδας, καθώς και σειρά από επιλογές που έχουν να κάνουν με την διαχείριση των ομάδων που κάθε φορά εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή .

- Μενού MATL. : Το μενού αυτό είναι υπεύθυνο σε πρώτη φάση για την δημιουργία υλικών . Υπάρχει μια σειρά από 19 υλικά του κώδικα LS - DYNA από τα οποία μπορεί κανείς να επιλέξει το κατάλληλο. Από εκεί και πέρα υπάρχει δυνατότητα για διαγραφή , μετονομασία , αλλαγή ιδιοτήτων και αντιστοίχιση σε κάποια ομάδα ή γεωμετρική οντότητα ενός από τα δημιουργηθέντα υλικά.
- Μενού PROP. : Στο μενού αυτό δημιουργούμε , τροποποιούμε και αντιστοιχίζουμε τις φυσικές ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων . Υπάρχει όπως και για τα υλικά , μια σειρά από έτοιμα θεωρητικά μοντέλα στοιχείων μεμβράνης (plate elements) και ογκικών στοιχείων (solid elements) .
- Μενού I.F. : Εδώ μπορεί ο χρήστης να ορίσει επιφάνειες επαφής και ολίσθησης, καθώς και απαραμόρφωτες επιφάνειες όπου αυτές υφίστανται στο μοντέλο του . Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μιας επιφάνειας ολίσθησης ή μιας απαραμόρφωτης επιφάνειας μέσα από μια σειρά έτοιμων που διαθέτει το πρόγραμμα και αντιστοιχούν στον κώδικα LS - DYNA και αργότερα η τροποποίησή της . Αμέσως μετά την δημιουργία της διεπιφάνειας πρέπει να επιλεχθούν είτε επιφάνειες , είτε κόμβοι που αντιστοιχούν στα δύο σώματα που έρχονται σε επαφή. Τέλος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και επιλογές που έχουν να κάνουν με την οργάνωση και την οπτική αναπαράσταση στην οθόνη του υπολογιστή .
- Μενού B.C. : Εδώ υπάρχει η δυνατότητα για τον χρήστη να ορίσει και να διαχειρίζεται περιορισμούς , φορτία , πιέσεις , και αρχικές ταχύτητες σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.
- Μενού SET : Σκοπός του μενού αυτού είναι να ορίσει και να διαχειρίζεται σετ από κόμβους και πεπερασμένα στοιχεία.
- Μενού POST : Το μενού αυτό όπως και το επόμενο ανήκει στο Post - Processing τμήμα του προγράμματος FEMB . Επιτρέπει στον χρήστη να δει δέχεται ένα μοντέλο είτε σε μορφή animation , είτε σε διάφορες χρονικές ξεχωριστά .

γραφικά και να επεξεργαστεί αρχεία εξόδου από ένα κώδικα ανάλυσης όπως το LS - DYNA . Μπορούμε να δούμε τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που δέχεται ένα μοντέλο είτε σε μορφή ανιτνατιον , είτε σε διάφορες χρονικές στιγμές.

- Μενού GR.APH : Οι επιλογές του μενού αυτού επιτρέπουν στον χρήστη να παρακολουθήσει διάφορες χρήσιμες παραμέτρους του φαινο μένου που αντιπροσωπεύει το μοντέλο του (φορτία, ταχύτητες, επιταχύνσεις) σε μορφή διαγραμμάτων σε συνάρτηση με τον χρόνο .
- Μενού HELP : Το μενού αυτό παρέχει κάποιες πληροφορίες σχετικά με το πρόγραμμα FEMB και απευθύνεται σε νέους χρήστες

ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

Κατά την διάρκεια εισαγωγής δεδομένων στον κώδικα, είναι αναγκαίο να τηρείται μια τάξη όσον αφορά στο σύστημα μονάδων. Πολλά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων και σχεδίασης (Π.χ. εφαρμογές CAD) δεν προβλέπουν την εισαγωγή δεδομένων ακολουθούμενα από τις αντίστοιχες μονάδες τους. Απλά απαιτούν από τον χρήστη να επιλέξει εξ' αρχής ένα σύστημα μονάδων και κάποια κλίμακα , και να εισάγει τα δεδομένα του σύμφωνα με αυτό, κάνοντας όπου είναι απαραίτητο μετατροπές.

Στον κώδικα LS - DYNA τα δεδομένα εισάγονται αδιάστατα αλλά θα πρέπει να υπάρχει μια συνέπεια όσον αφορά στο ακολουθούμενο σύστημα μονάδων. Ένας τρόπος για να δούμε αν ένα σύστημα μονάδων ευσταθεί, είναι να ελέγξουμε αν ισχύουν οι ισότητες :

$$(1 \text{ Μονάδα Δύναμης}) = (1 \text{ Μονάδα Μάζας}) \times (1 \text{ Μονάδα Επιτάχυνσης})$$

$$(1 \text{ Μονάδα Επιτάχυνσης}) = (1 \text{ Μονάδα Μήκους}) / (1 \text{ Μονάδα Χρόνου})^2$$

Αν δεν ληφθεί μέριμνα για την ορθότητα του συστήματος μονάδων , τότε είτε ο κώδικας δεν θα λειτουργήσει ή θα λειτουργήσει δίνοντας όμως λανθασμένα αποτελέσματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο σύστημα μονάδων :

- Η μάζα εκφράζεται σε γραμμάρια (gr)
- Το μήκος εκφράζεται σε mm
- Ο χρόνος εκφράζεται σε msec

Η ταχύτητα εκφράζεται σε :

$$[\text{mm} \cdot \text{msec}^{-1}] = 10^3 \cdot 10^3 [\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}] = \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

Η επιτάχυνση εκφράζεται σε :

$$[\text{mm} \cdot \text{msec}^{-2}] = 10^3 \cdot 10^{-6} [\text{m} \cdot \text{sec}^{-2}] = 10^3 [\text{m} \cdot \text{sec}^{-2}]$$

Η πυκνότητα εκφράζεται σε :

$$[\text{gr} \cdot \text{mm}^{-3}] = 10^{-3} \cdot 10^9 [\text{kgr} \cdot \text{m}^{-3}] = 10^6 [\text{kgr} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Η δύναμη εκφράζεται σε :

$$[\text{gr} \cdot \text{mm} \cdot \text{msec}] = 10^{-3} \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 [\text{kgr} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-2}] = [\text{kgr} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-2}] = [\text{Nt}]$$

Η πίεση εκφράζεται σε :

$$[\text{Nt} \cdot \text{mm}^{-2}] = 10^6 [\text{Nt} \cdot \text{m}^{-2}] = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ Mpa}$$

Συνοπτικά έχουμε :

Πίνακας 5 - Μονάδες βασικών μεγεθών

Μέγεθος	Μονάδες
Μάζα	gr
Μήκος	mm
Χρόνος	msec
Δύναμη	Nt
Πυκνότητα	gr/ mm ³
Πίεση	Mpa
Ταχύτητα	mm/ msec
Επιτάχυνση	mm/ msec ²

Πριν προχωρήσουμε πρέπει να υπενθυμίσουμε τα βήματα που απαιτείται να γίνουν όταν επιχειρείται η προσομοίωση ενός φαινομένου:

- **Καθορισμός της βασικής γεωμετρίας.**
- **Διακριτοποίηση - Δημιουργία πλέγματος.**
- **Δημιουργία και αντιστοίχιση υλικών.**
- **Καθορισμός φυσικών ιδιοτήτων.**
- **Ορισμός διεπιφανειών ολίσθησης.**
- **Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών (φορτίσεων, ταχυτήτων, κλ.π.)**

Για την δημιουργία του μοντέλου μας θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα FEMB ως Προ - Επεξεργαστή. Ακολούθως θα εισάγουμε τις απαραίτητες λεπτομέρειες με την βοήθεια του επεξεργαστή κειμένου του LS - DYNA και θα (εισάγουμε στον επιλυτή του το τελικό μοντέλο προς ανάλυση . Τα αποτελέσματα θα τα αναλύσουμε πάλι με την βοήθεια του FEMB χρησιμοποιώντας το ως Μετά - Επεξεργαστή .

Πριν προχωρήσουμε πρέπει να υπενθυμίσουμε τα βήματα που απαιτείται να γίνουν όταν επιχειρείται η προσομοίωση ενός φαινομένου:

- **Καθορισμός της βασικής γεωμετρίας.**
- **Διακριτοποίηση - Δημιουργία πλέγματος.**
- **Δημιουργία και αντιστοίχιση υλικών.**
- **Καθορισμός φυσικών ιδιοτήτων.**
- **Ορισμός διεπιφανειών ολίσθησης.**
- **Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών (φορτίσεων, ταχυτήτων, κ.λ.π.) .**

Για την δημιουργία του μοντέλου μας θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα FEMB ως Προ - Επεξεργαστή. Ακολούθως θα εισάγουμε τις απαραίτητες λεπτομέρειες με την βοήθεια του επεξεργαστή κειμένου του LS - DYNA και θα εισάγουμε στον επιλυτή του το τελικό μοντέλο προς ανάλυση . Τα αποτελέσματα θα τα αναλύσουμε πάλι με την βοήθεια του FEMB , χρησιμοποιώντας το ως Μετά - Επεξεργαστή .

3.2.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Στην παράγραφο αυτή θα καθορίσουμε επακριβώς την γεωμετρία του δοκιμίου μας και θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα την εισάγουμε με την μορφή απλών ευθύγραμμων τμημάτων και τόξων στο πρόγραμμα FEMB .

Σκοπός του πειράματος είναι η μελετη δοκιμίου από σύνθετα υλικά σε δυναμική διάτρηση καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων στον κώδικα. Στην προσομοίωση αυτού του πειράματος θεωρούμε δοκίμια από σύνθετα υλικά. Η πίπτουσα μάζα αποτελείται από ένα κύβο ο οποίος φέρει κυλινδρική προεξοχή η οποία έχει ημισφαιρική κατάληξη. Ο άξονας αυτού του κυλίνδρου κινείται κάθετα στο κέντρο του δοκιμίου μας (κατά τον άξονα z) με ταχύτητα που ορίζουμε ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος. Κατόπιν εξετάζουμε τα διάφορα δοκίμια ξεχωριστά όσον αφορά τη παραμόρφωση τους στην εκάστοτε καταπόνηση. Σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή του υλικού του δοκιμίου όσο και η ταχύτητα του διεισδυτή. Αρχικά ξεκινάμε με την παρακάτω προσομοίωση:

Εισάγουμε τα εξής δεδομένα του πειράματος στο κώδικα ώστε να προβούμε σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Thickness: 2.2mm

Impact velocity:2.51m/s

Fall weight mass:1kgr

Drop height:0.32m

Dart diameter:10.0mm

Dart:hemisphere

Όσων αφορά τις ιδιότητες του δοκιμίου αναφέρονται οι εξής (RI1B-0215-C(GDF)):

Orthotropic material model

$$E_x = 10 \text{ GPa}$$

$$E_y = 10 \text{ GPa}$$

$$E_z = 3 \text{ GPa}$$

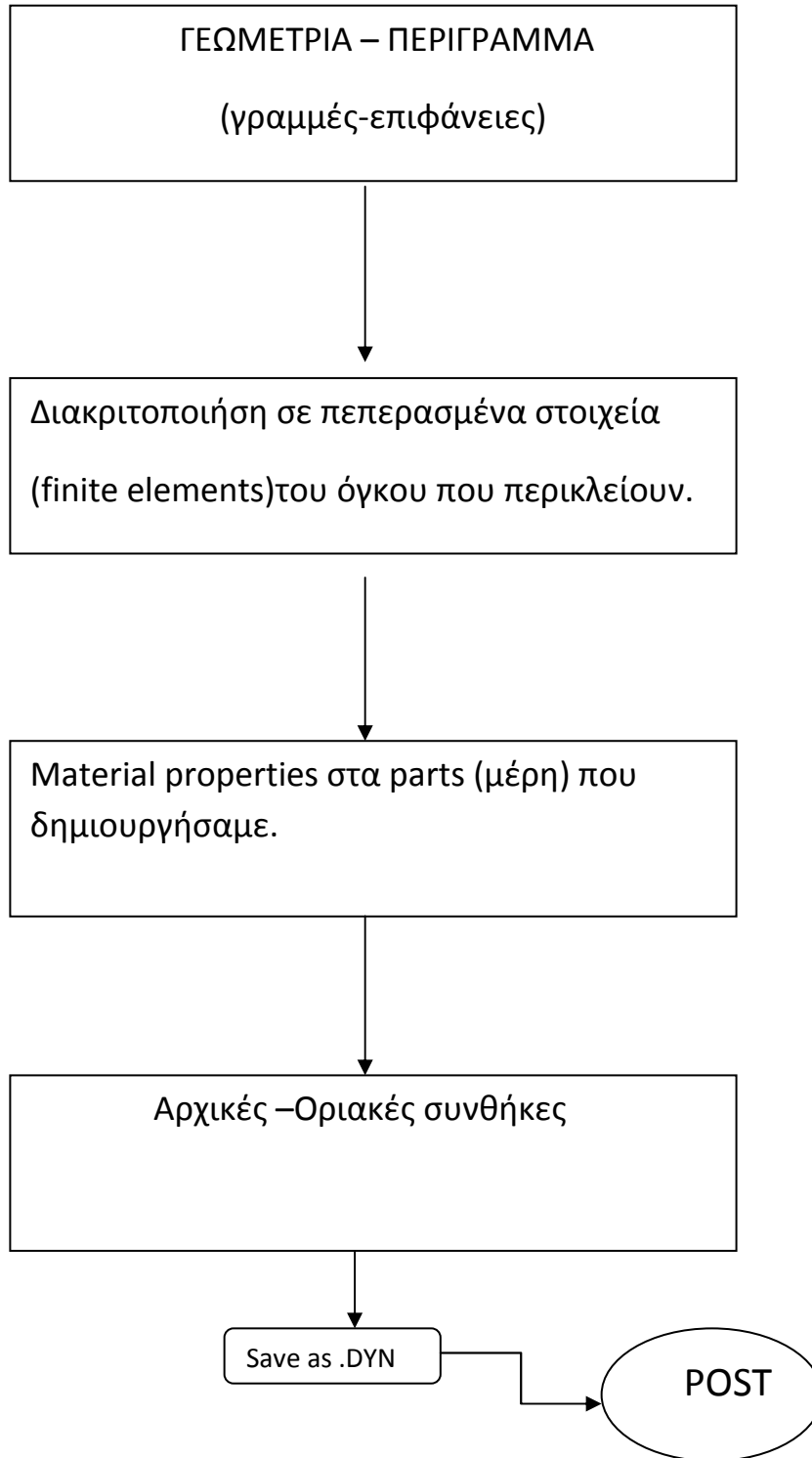
$$G_{xy} = 0.5 \text{ GPa}$$

$$G_{yz} = 1.1 \text{ GPa}$$

$$G_{zx} = 1.1 \text{ GPa}$$

Στη συνέχεια προχωράμε στον σχεδιασμό του μοντέλου στον κώδικα ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Έχοντας ορίσει τα PARTS του πειράματος προχωράμε στην δημιουργία γεωμετρία του μοντέλου . Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο πρόγραμμα FEMB θα πρέπει να εισάγουμε τις διαστάσεις των τμημάτων από σύνθετο υλικό θεωρώντας ότι το πάχος τους είναι μηδενικό . Αυτό γίνεται γιατί το πάχος των συγκεκριμένων τμημάτων εισάγεται στο πρόγραμμα κατά το στάδιο καθορισμού των φυσικών ιδιοτήτων (PROPERTIES) .

Όπως θα δούμε και πιο κάτω , η εισαγωγή των δεδομένων , απαιτεί την εκλογή κάποιου καθολικού ή κάποιου τοπικού συστήματος συντεταγμένων . Λόγω της σχετικά απλής γεωμετρίας του μοντέλου μας , επιλέγουμε καθολικό σύστημα συντεταγμένων (GLOBAL COORDINATE SYSTEM) . Έχοντας λύσει και το θέμα των συντεταγμένων , μπορούμε πλέον να συνεχίσουμε με την εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων.Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του LS-DYNA είναι η δυνατότητα που παρέχει στον χρήστη να ορίζει διεπιφάνειες σε περιπτώσεις σύγκρουσης , αλλά και διεπιφάνειες ολίσθησης μεταξύ δύο σωμάτων που έρχονται σε επαφή .

Σε κάθε μοντέλο που μελετάται είναι απαραίτητο να ορίσουμε όλες τις διεπιφάνειες που εμφανίζονται μεταξύ των διακριτών σωμάτων που το αποτελούν . αν αμελήσουμε να ορίσουμε κάποια διεπιφάνεια , ο κώδικας θα λειτουργήσει , αλλά τα αποτελέσματα θα είναι λανθασμένα . Αυτό συμβαίνει διότι η παράλειψη καθορισμού μιας διεπιφάνειας ουσιαστικά δίνει στον κώδικα να καταλάβει ότι τα σώματα είναι σε επαφή , δεν βρίσκουν κάποια αντίσταση κατά την κίνηση τους το ένα προς το άλλο και συνεπώς επιτρέπει την εισχώρηση του ενός στο άλλο .

Για να καθορίσουμε διεπιφάνειες στο LS-DYNA , θεωρούμε ότι αυτές αποτελούν ένα νοητό επίπεδο που διαθέτει δυο πλευρές . Κάθε πλευρά αντιστοιχεί σε ένα από τα σώματα που έρχονται σε επαφή και χωρίζονται σε τμήματα (segments) είτε σε μορφή τριγώνου (triangular) ,είτε σε μορφή τετραγώνου(quadrilateral) . Η μια από τις πλευρές φέρει την ονομασία MASTER και η άλλη SLAVE . Αντίστοιχα οι κόμβοι κάθε πλευράς MASTER NODES ΚΑΙ SLAVE NODES . Οι κόμβοι SLAVE είναι δεσμευμένοι να ολισθαίνουν στην πλευρά MASTER της διεπιφάνειας συνεχώς , έως ότου μια δύναμη έλξης αναπτυχθεί μεταξύ των κόμβων και της πλευράς .

Ο κώδικας προσφέρει μια σειρά από διεπιφάνειες οι οποίες καλύπτουν πολλές περιπτώσεις επαφής π.χ.:

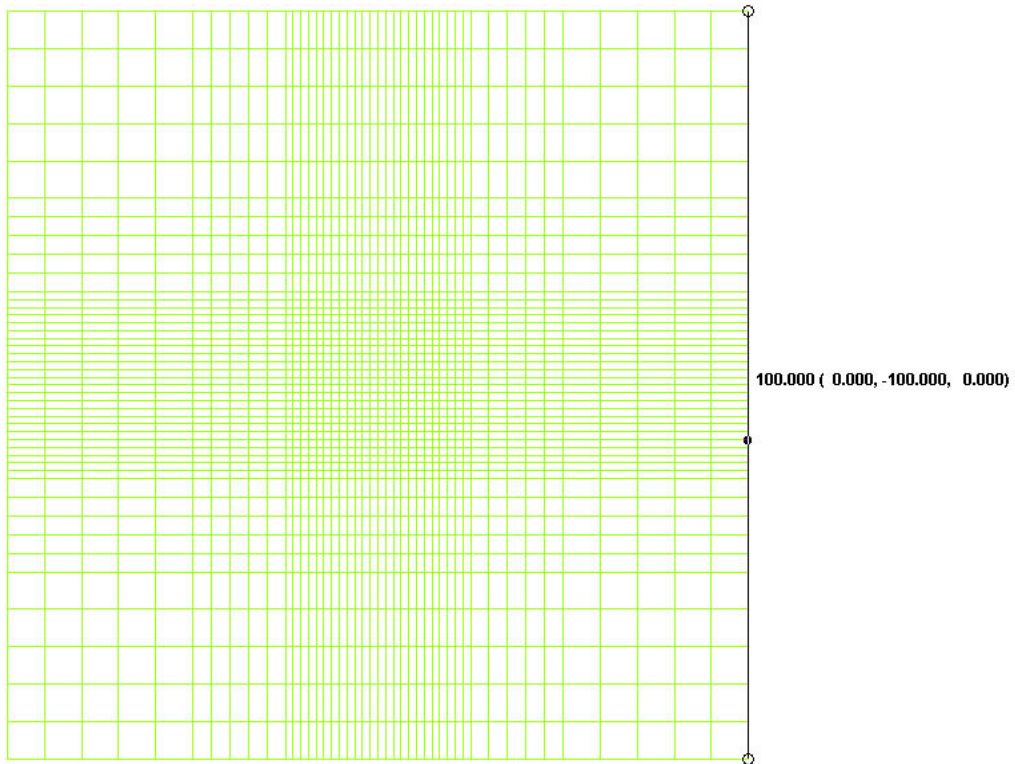
«*επιφάνεια σε επιφάνεια*» (*surface to surface*). Για τον ορισμό της πρέπει να ορίσουμε τόσο την πλευρά MASTER όσο και την SLAVE. Ακολούθως ορίζουμε συνθήκες τριβής στατικής και δυναμικής που εμφανίζονται μεταξύ των σωμάτων που έρχονται σε επαφή.

Ακολούθως βλέπουμε σχηματικά τα τεμάχια στην τελική τους μορφή και όπως τα έχουμε εισάγει στον κώδικα.

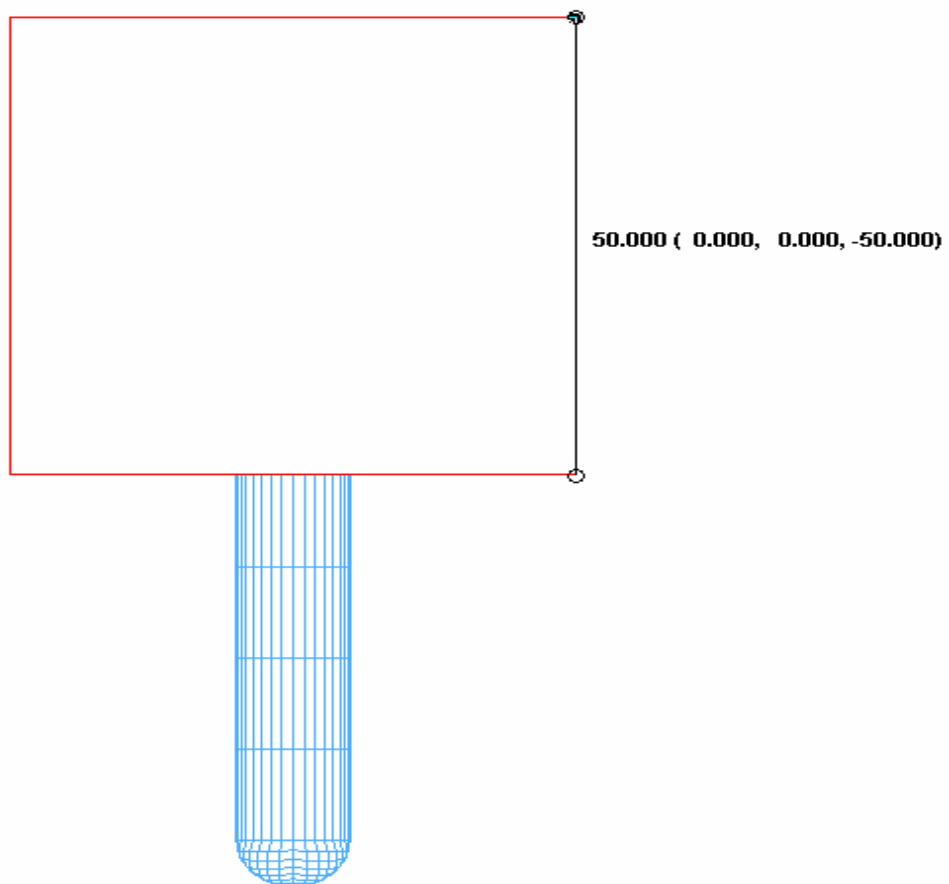
“*Eroding surface to surface*”: είναι μια παράμετρος την οποία χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα όπου αποτρέπεται η εισχώρηση των διεπιφανειών του plate κατά την διάρκεια του πειράματος στον διεισδητή.

ΔΟΚΙΜΙΟ (PLATE)

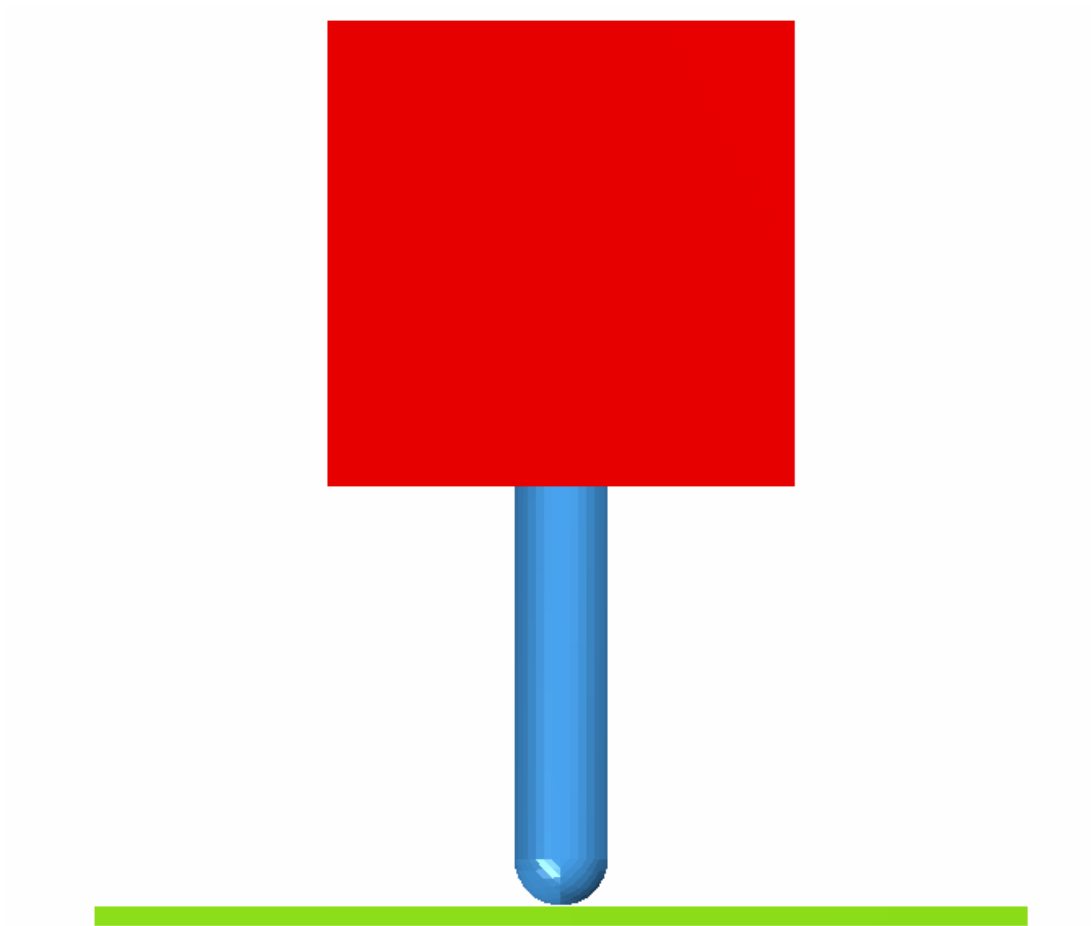




ΠΗΤΟΥΣΑ ΜΑΖΑ-ΔΙΕΙΣΔΥΤΗΣ



ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ



Όπως αναφερθήκαμε και στην περιγραφή του προγράμματος FEMB, η βιβλιοθήκη υλικών που αυτό περιέχει, δεν καλύπτει όλα τα υλικά του κώδικα LS-DYNA. Έτσι για να εκμεταλλευτούμε πλήρως όλα τα υλικά, θα πρέπει να επέμβουμε στις κάρτες ελέγχου (Control cards) του προγράμματος. Αυτό γίνεται με την βοήθεια του επεξεργαστή κειμένου του LS-DYNA, στο αρχείο εξόδου με κατάληξη *.DYN, το οποίο όπως έχει αναφερθεί εξάγεται από το πρόγραμμα FEMB και αποτελεί στην ουσία ένα αρχείο κειμένου, στο οποίο περιέχονται όλα τα δεδομένα του μοντέλου(οι συντεταγμένες των κόμβων, καθορισμός των πεπερασμένων στοιχείων, το είδος των υλικών, οι ιδιότητες

και οι διεπιφάνειες , φορτήσεις κ.λ.π.)σε μορφή εντολών με αλφαβητική διάταξη . Ένα τυπικό παράδειγμα της μορφής των καρτών φαίνεται παρακάτω:

```

*PART
$HEADING
PART PID =          1 PART NAME :HEAD
$      PID          SID          MID          EOSID          HGID          GRAV
ADPOPT          TMID
          1          2          1

*PART
$HEADING
PART PID =          3 PART NAME :DROPMASS
$      PID          SID          MID          EOSID          HGID          GRAV
ADPOPT          TMID
          3          4          2

*PART
$HEADING
PART PID =          7 PART NAME :PLATE
$      PID          SID          MID          EOSID          HGID          GRAV
ADPOPT          TMID
          7          8          4
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---
7---+---8
$
          (7) MATERIAL CARDS
*MAT_RIGID_TITLE
HEAD
$      MID          RO          E          PR          N          COUPLE
M      ALIAS
          1 7.830E-03 2.070E+05 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00
$      CMO          CON1          CON2
          1.0          4.0          7.0
$LCO or A1          A2          A3          V1          V2          V3

*MAT_RIGID_TITLE
DROPMASS
$      MID          RO          E          PR          N          COUPLE
M      ALIAS
          2 7.830E-03 2.070E+05 2.800E-01 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00
$      CMO          CON1          CON2
          1.0          4.0          7.0
$LCO or A1          A2          A3          V1          V2          V3

*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC_TITLE
PLATE
$      MID          RO          EA          EB          EC          PRBA
PRCA          PRCB
          4 0.0010 10000.0 10000.0 3000.0 0.30
0.30 0.30
$      GAB          GBC          GCA          AOPT          G          SIGF
          500.0 1100.0 1100.0 0.0
$      XP          YP          ZP          A1          A2          A3

$      V1          V2          V3          D1          D2          D3
BETA          REF

0.0
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---
7---+---8

```

```

$ (7.1) SECTION CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----
7-----8
*SECTION_SHELL_TITLE
HEAD
$      SID      ELFORM      SHRF      NIP      PROPT      QR/IRID
ICOMP
      2          2      .100E+01      2.0      1.0      .0
$      T1          T2          T3          T4          NLOC
1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00
*SECTION_SOLID_TITLE
DROPMASS
$      SID      ELFORM
      4          1
*SECTION_SOLID_TITLE
PLATE
$      SECID      ELFORM      AET
      8          2          0

```

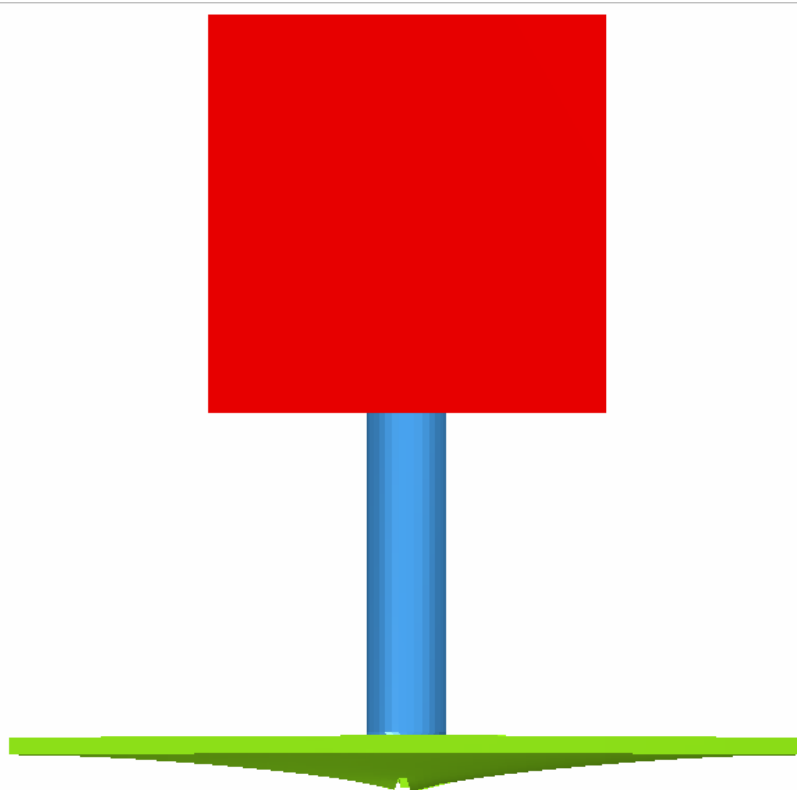
Όταν η γραμμή στο αρχείο ξεκινά με το σύμβολο * ο κώδικας κατά την ανάγνωση καταλαβαίνει ότι πρόκειται για εντολή , οπότε προχωρεί στην αναγνώριση της και συνεχίζει στην επόμενη γραμμή . Αν ξεκινά με το σύμβολο \$ ο κώδικας την δέχεται σαν απλό σχόλιο χωρίς να διαβάζει δεδομένα και προχωρεί στην επόμενη . Ανάλογα με την μορφή της κάθε εντολής , ο κώδικας περιμένει να διαβάσει όλα τα δεδομένα που αυτή προϋποθέτει , και μάλιστα στη σωστή μορφή (ακέραιους ή δεκαδικούς αριθμούς) . Τα δεδομένα θα πρέπει να είναι σωστά τοποθετημένα , σε κατακόρυφη διάταξη κατά στήλες .

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

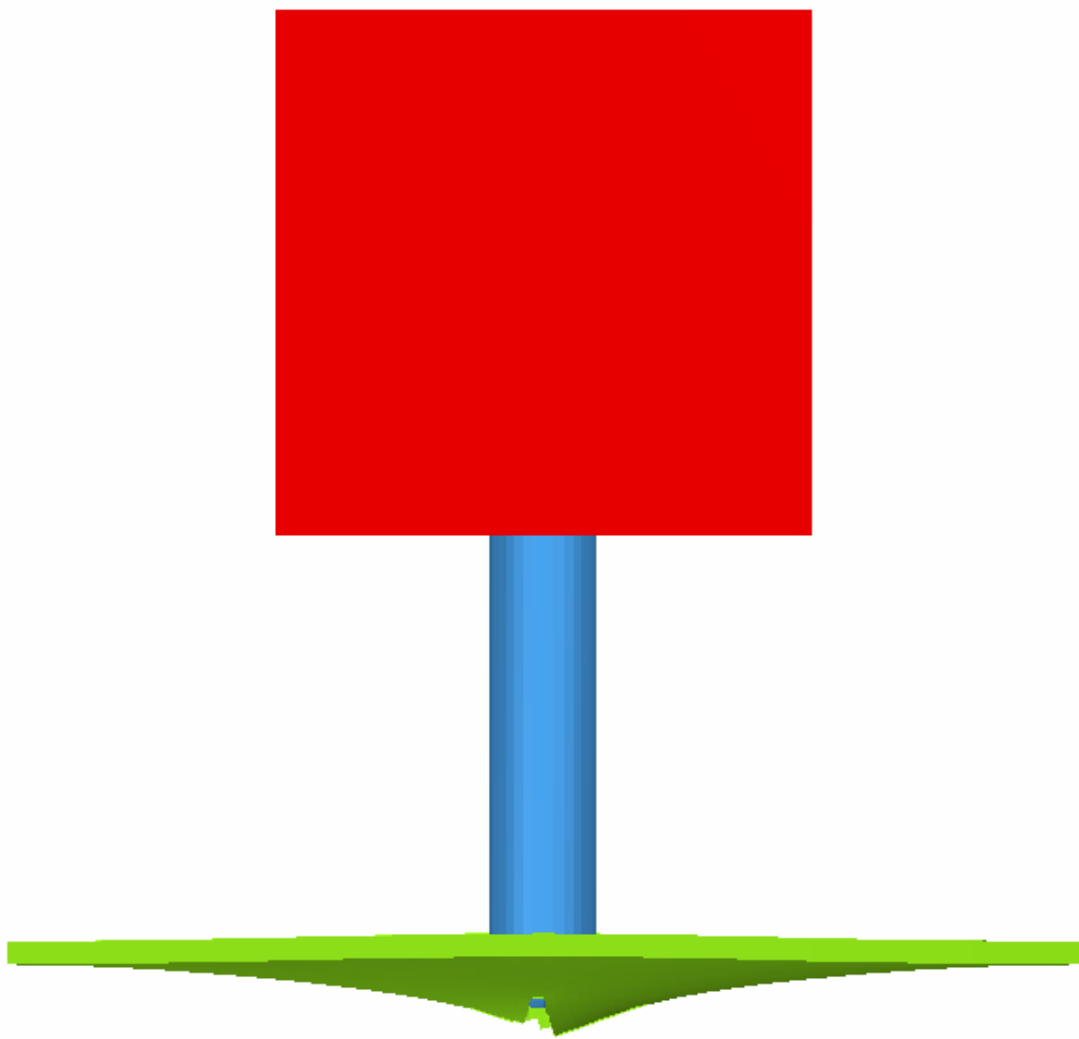
Αφού ολοκληρώσουμε τον σχεδιασμό της προσομοίωσης στον κώδικα ξεκινάμε το "τρέξιμο" της δοκιμής της οποίας απαιτήθηκε περίπου στις 4 ώρες εξ' αιτίας της μικρής σχετικά ταχύτητας. Ο κώδικας έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

Step5 t=1.99998

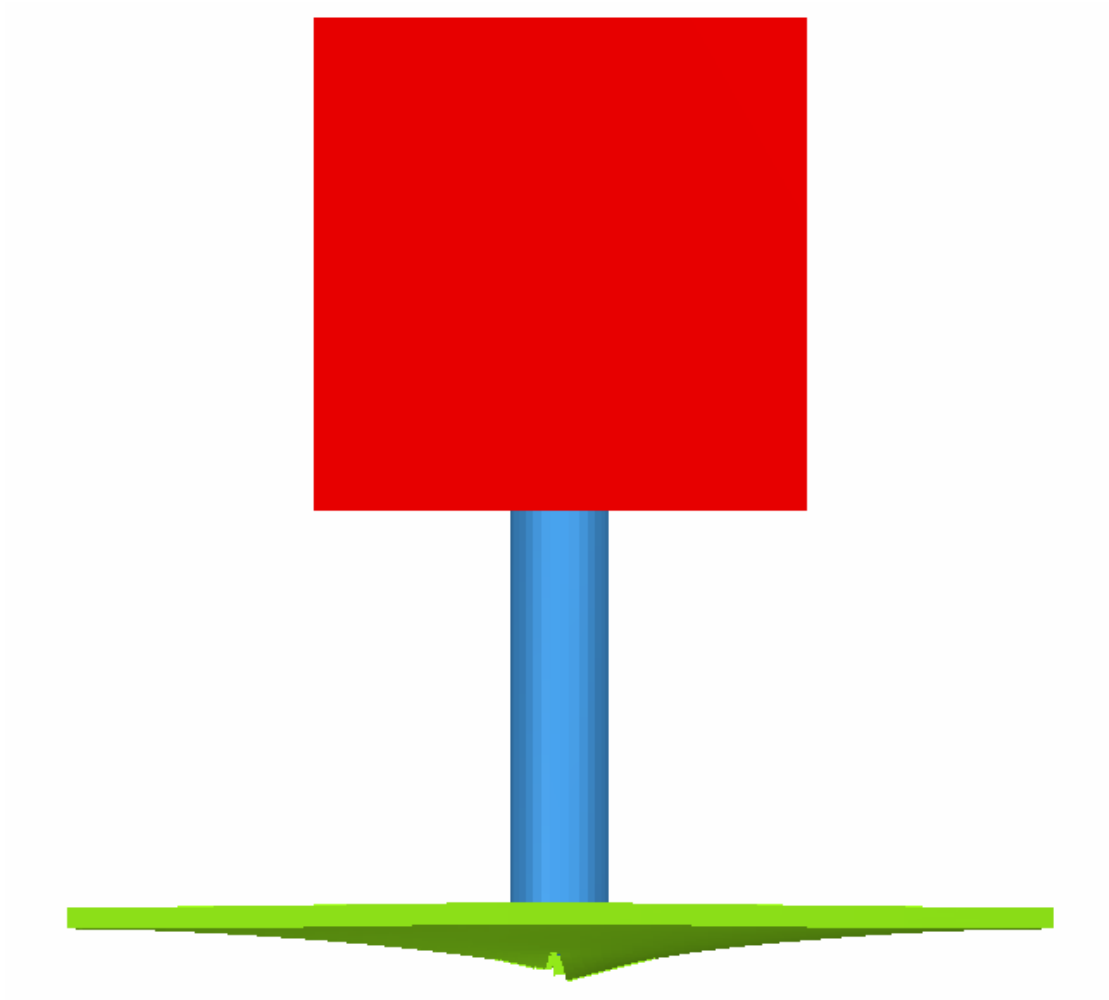
19984



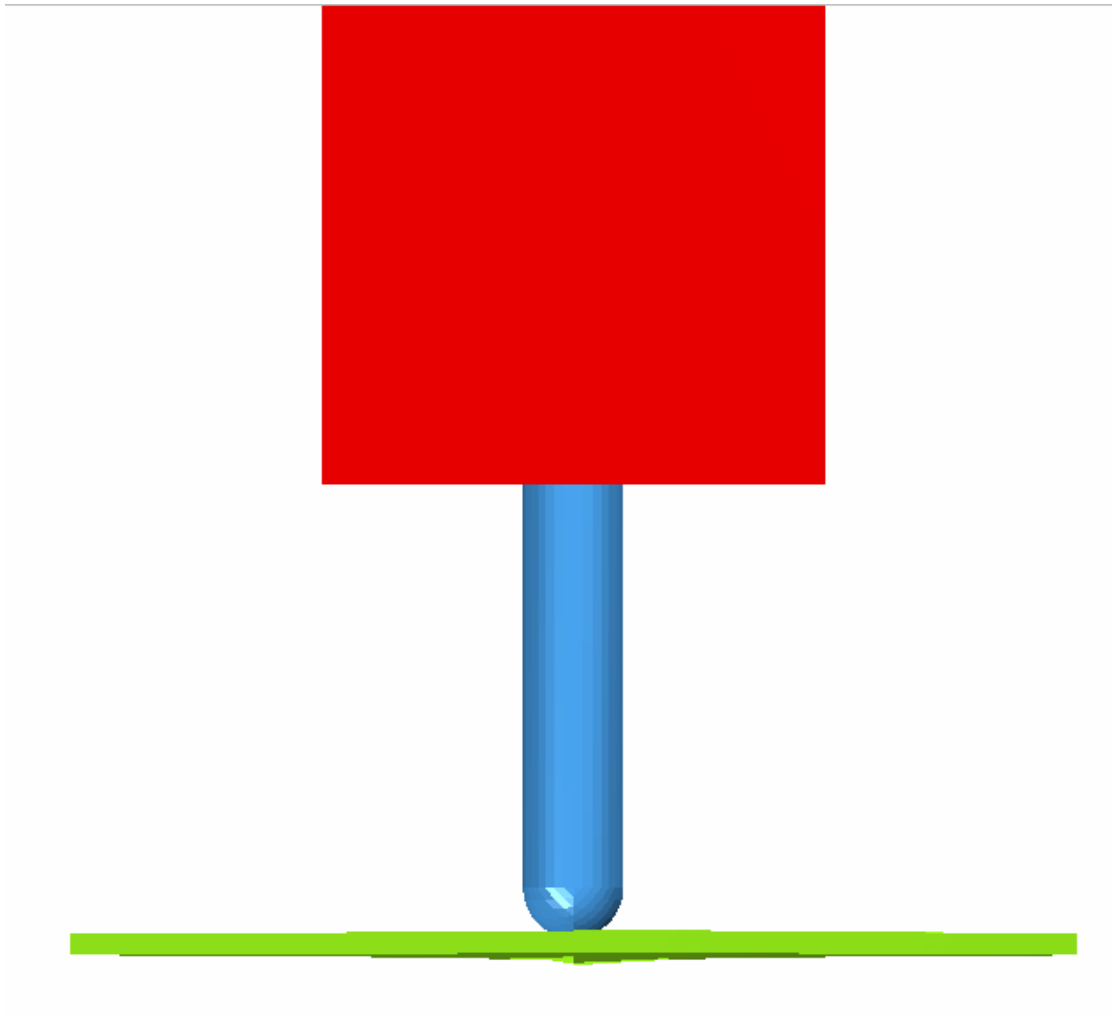
Step2 $t=4.9999$

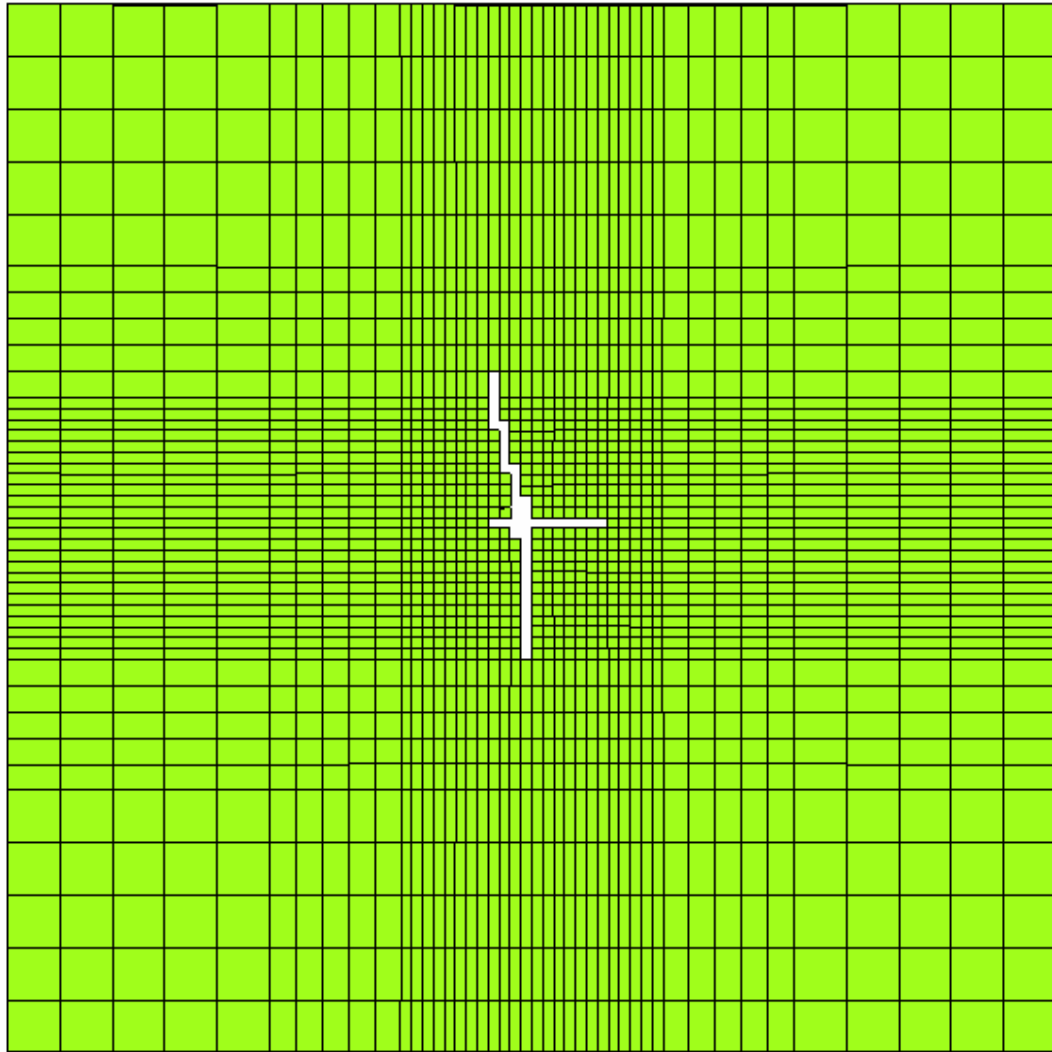


Step 3 $t=6.9997$



Step 4 $t=10$

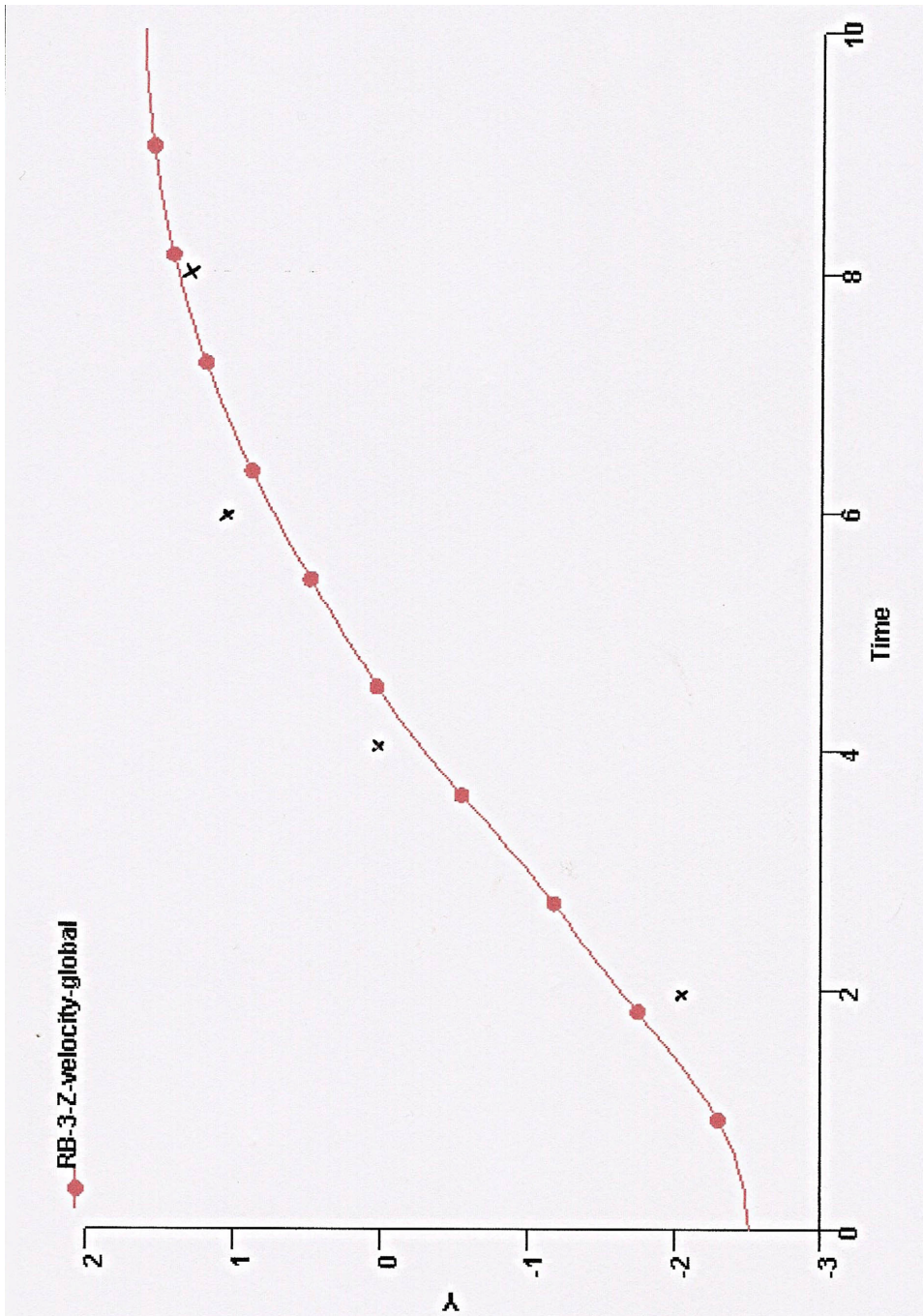


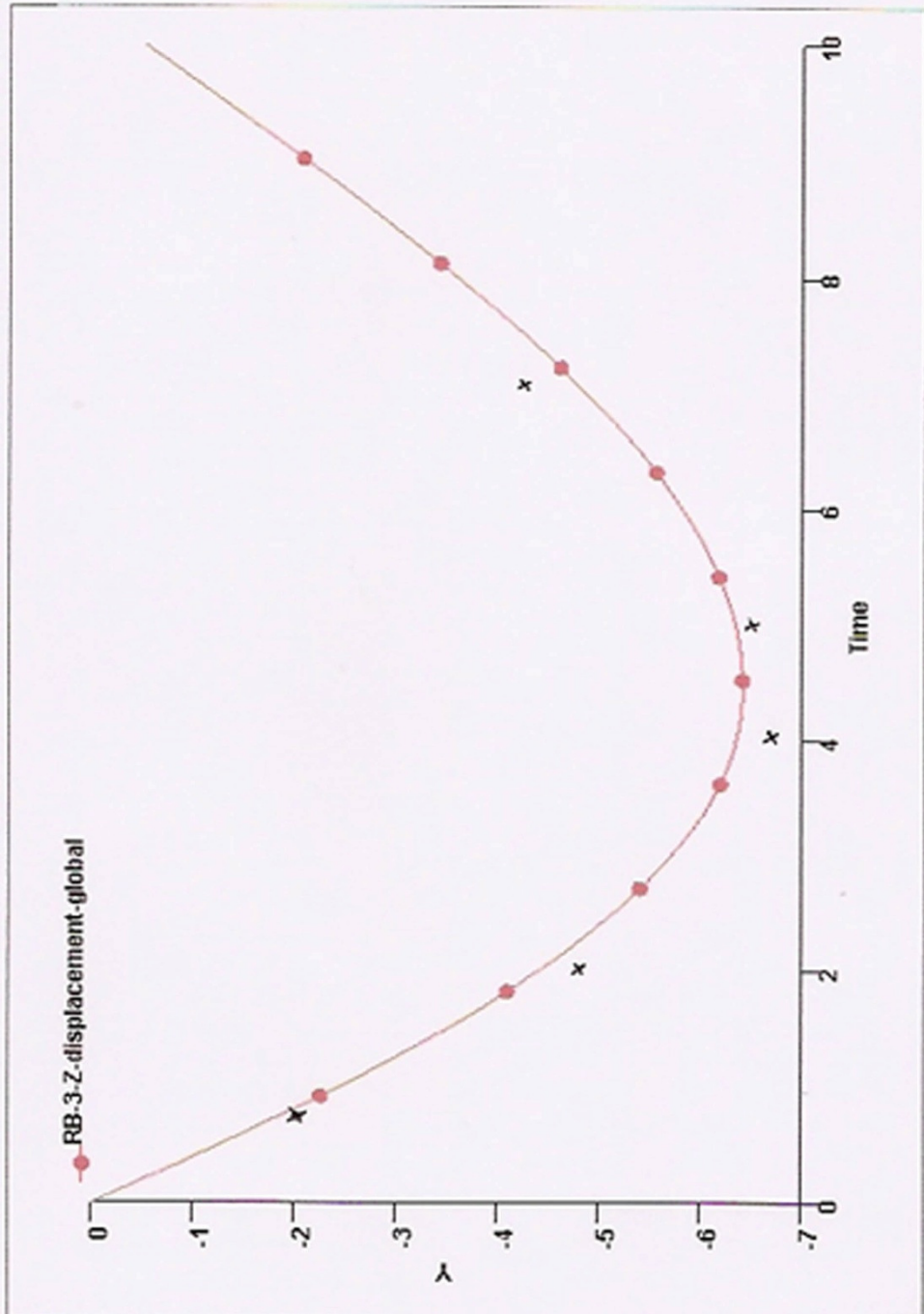


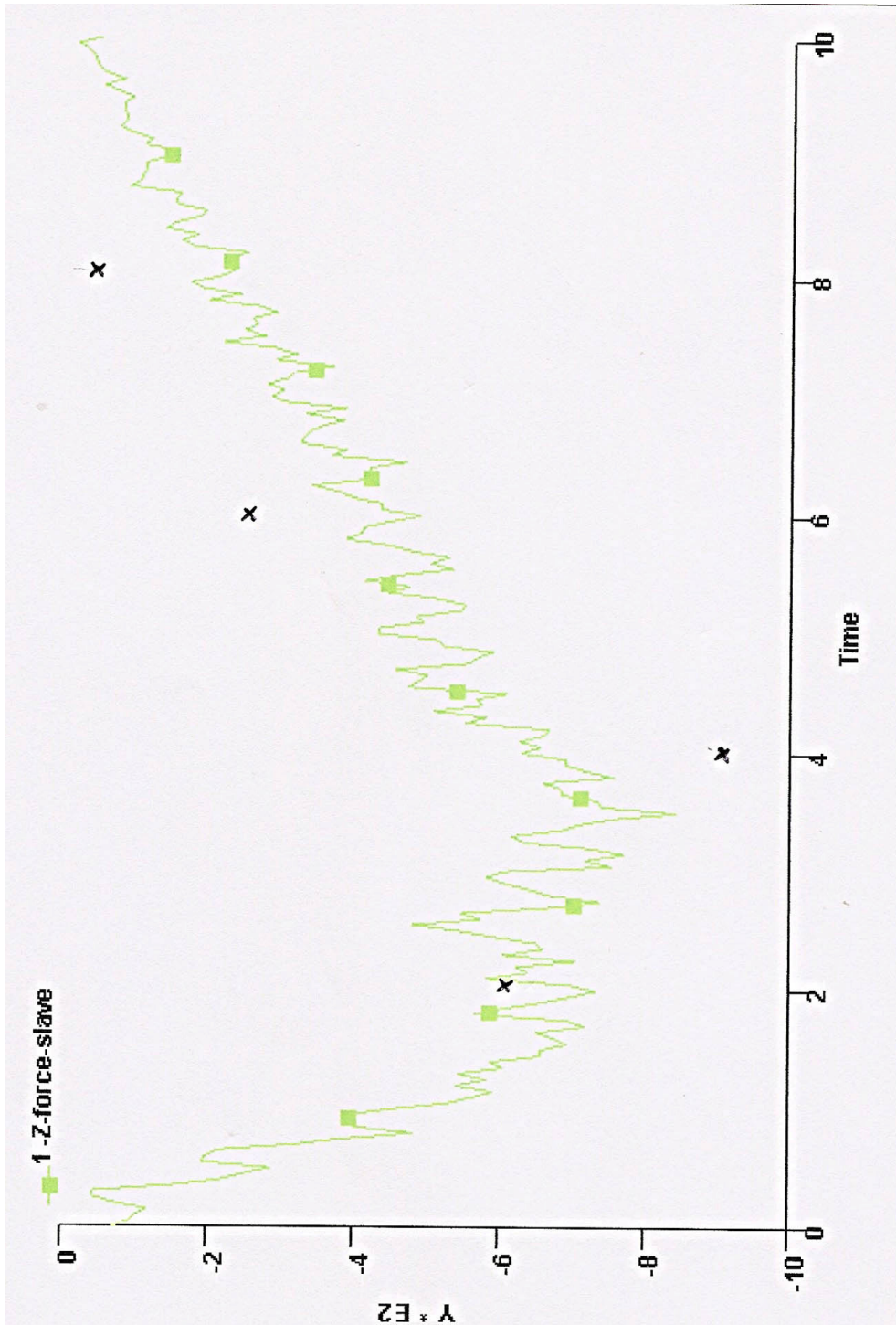


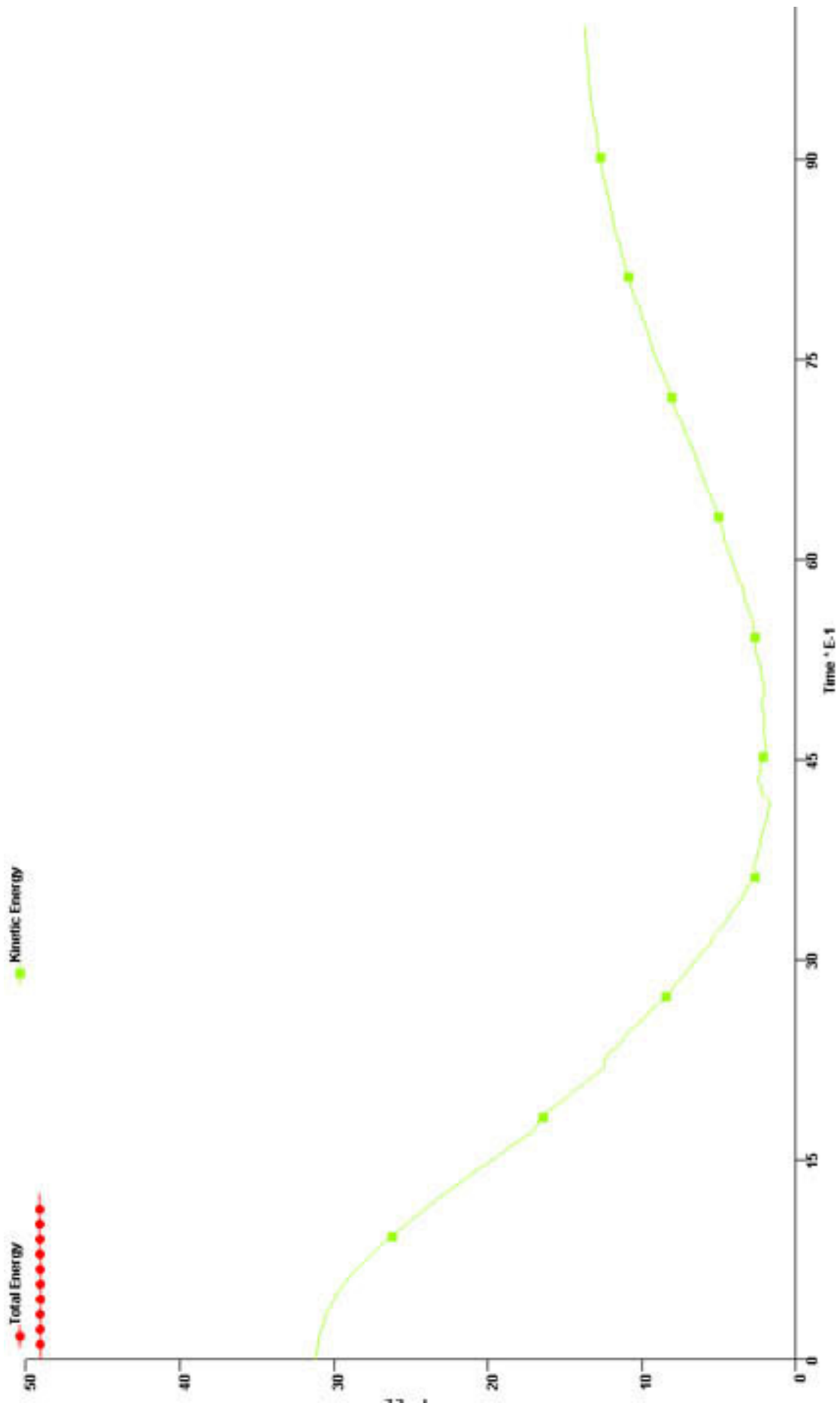
Οι τελευταίες δύο εικόνες δείχνουν την τελική μορφή του τεμαχίου μας μετά το τέλος του τεστ.

Ακολούθως προκύπτουν και τα διαγράμματα τα οποία τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα πειραματικά:









Στα παραπάνω διαγράμματα η συνεχής καμπύλη μας δείχνει τα αποτελέσματα που να έδωσε ο κώδικας ενώ τα σημεία + αποτελούν τα αντίστοιχα πειραματικά. Βλέπουμε ότι η προσομοίωση του μοντέλου μας στον κώδικα έχει πολύ μικρή απόκλιση σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για την διεξαγωγή εγκυρότερων αποτελεσμάτων για όσον αφορά τα αποτελέσματα του κώδικα συνεχίζουμε το πείραμα μελετώντας διαφορετικά μοντέλα αλλάζοντας τις ιδιότητες του υλικού και μεταβάλλοντας την ταχύτητα τηςπίπτουσας μάζας.

Κάνουμε τις εξής αλλαγές :

Σχεδιάζουμε την νέες διαστάσεις του δοκιμίου όπου είναι

Τετραγωνικής μορφής 70X80 cm πακτωμένο από στην πλευρά των 70 cm και ελεύθερη την μεγάλη πλευρά .Οι ιδιότητες του δοκιμίου είναι:

Young's moduli

$$E_x = 16.28 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

$$E_y = 16.28 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

$$E_z = 3.2 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

$$G_{xy} = 2.2 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

$$G_{yz} = 1.185 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

$$G_{zx} = 1.185 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$$

Poisson's ratios

$$\nu_{xy} = 0.13$$

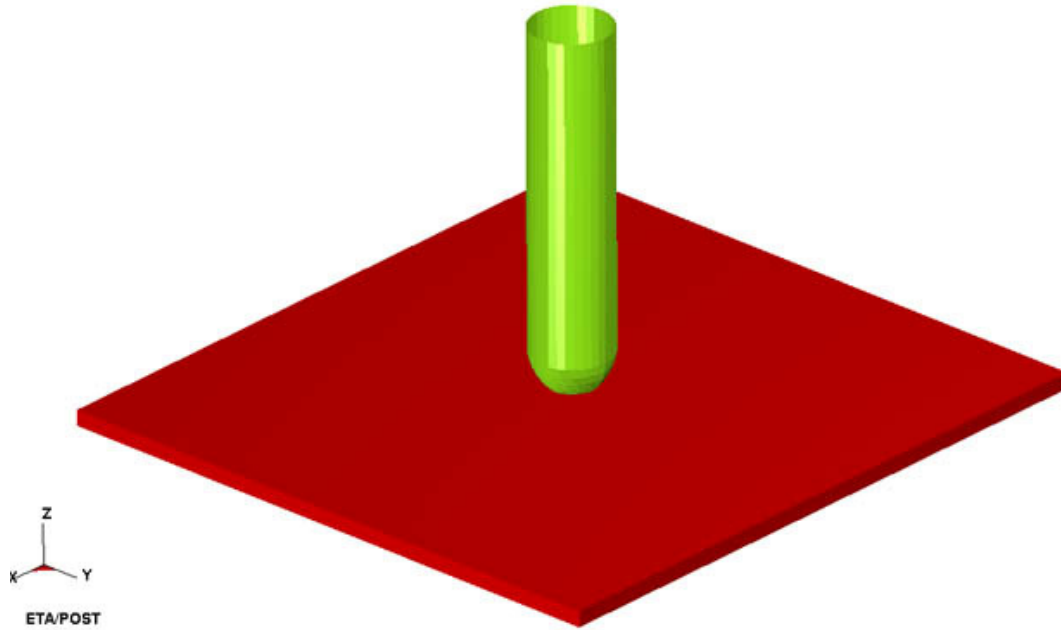
$$\nu_{zx} = 0.069$$

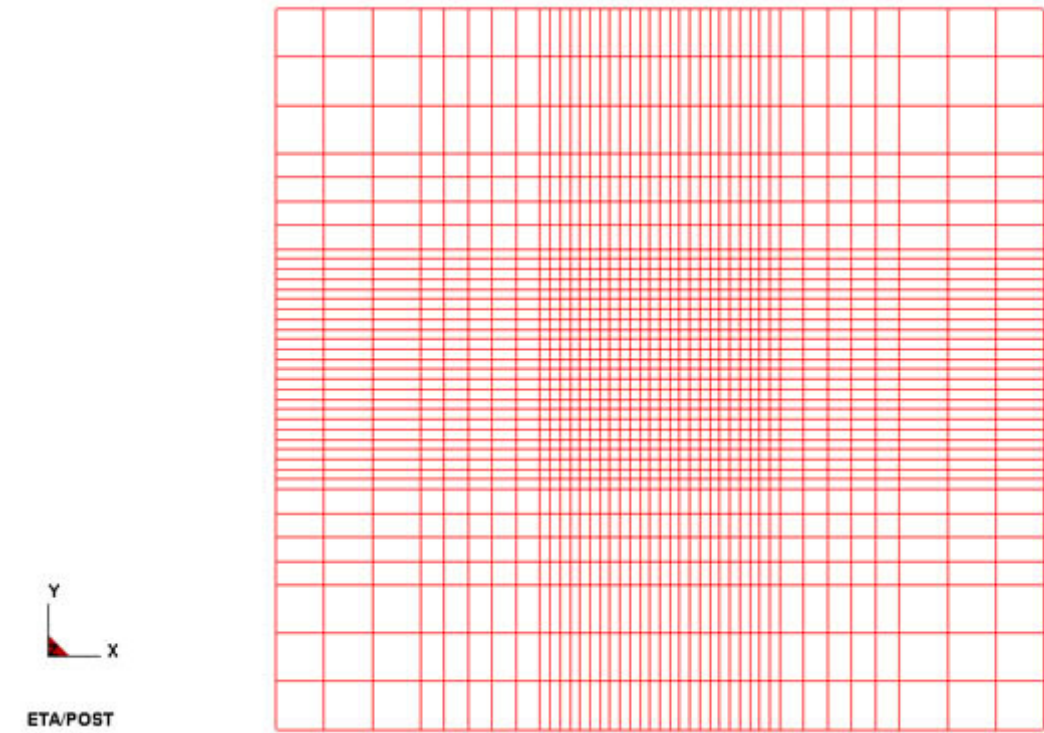
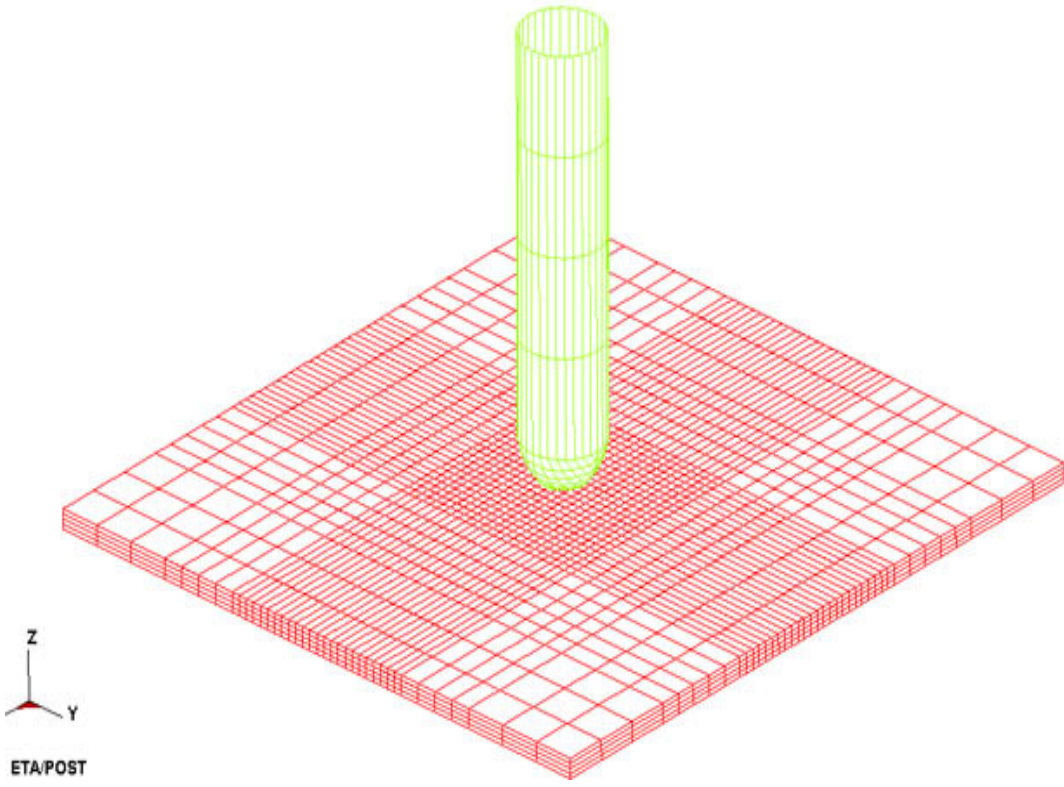
$$\nu_{zy} = 0.069$$

Ο χρόνος της νέας προσομοίωσης είναι στα 1.25 ms αρκετός για την διείσδυση του impactor στο δοκίμιο και πολύ μικρός για την

διάδοση των ταλαντώσεων μετά την αποκόλληση από το τεμάχιο.

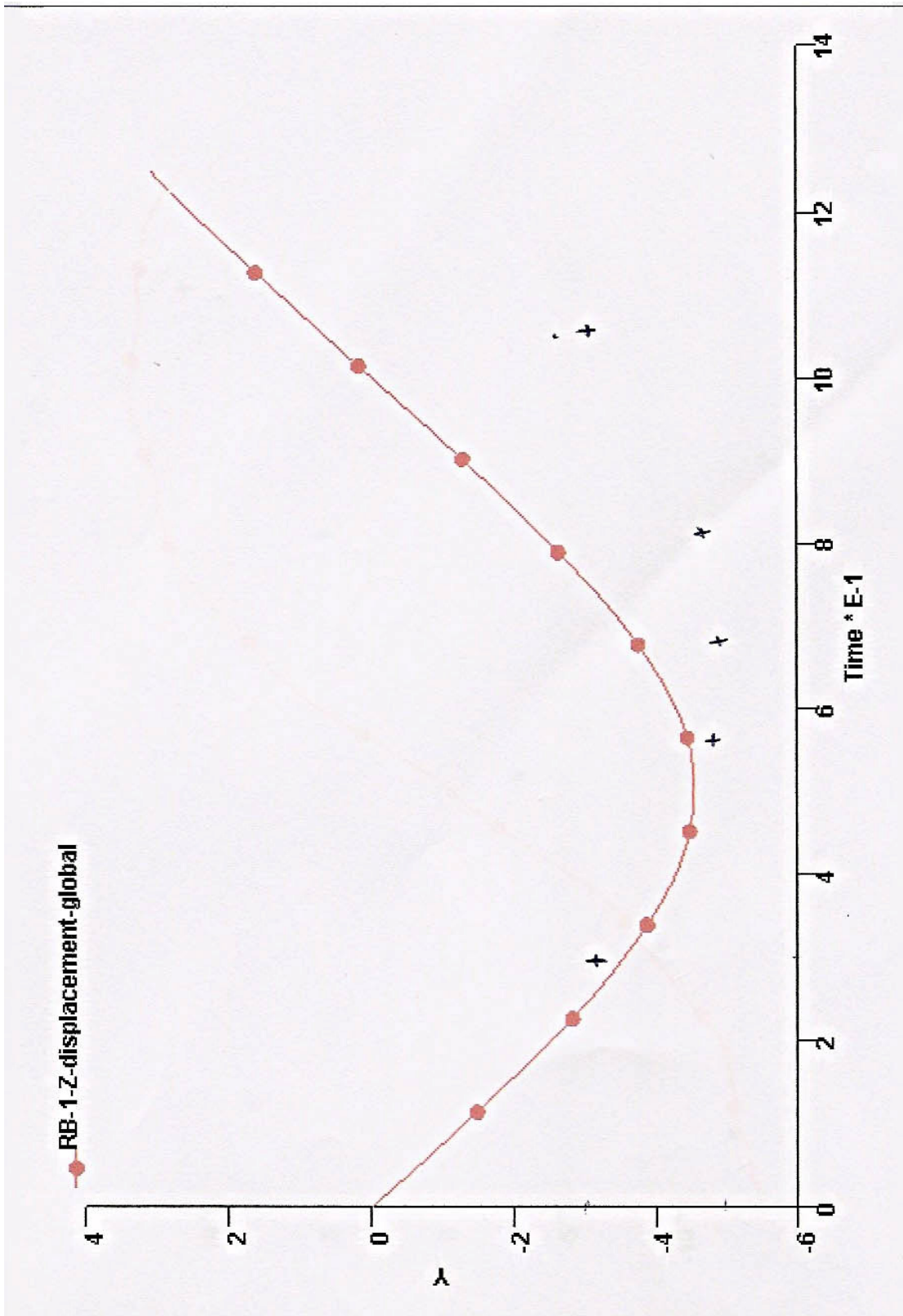
Η νέα μορφή του διεισδυτή έχει ως εξής, αφαιρέσαμε το τεμάχιο όπου είχαμε προσδέσει στην μια του άκρη στο προηγούμενο πείραμα και δώσαμε όλο το επιθυμητό βάρος μόνο σε αυτόν, το οποίο βάρος τώρα είναι 53.9 gr.

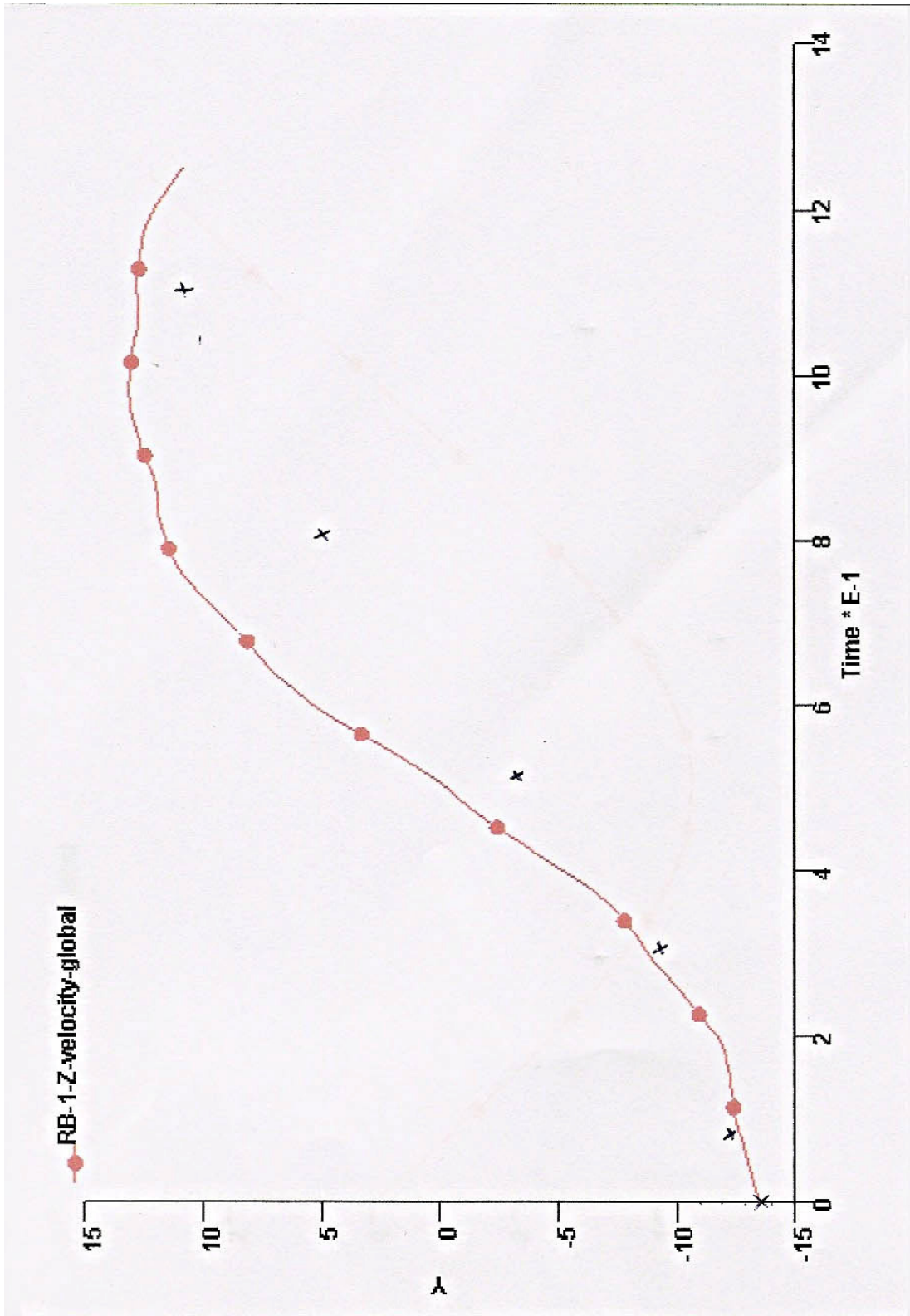


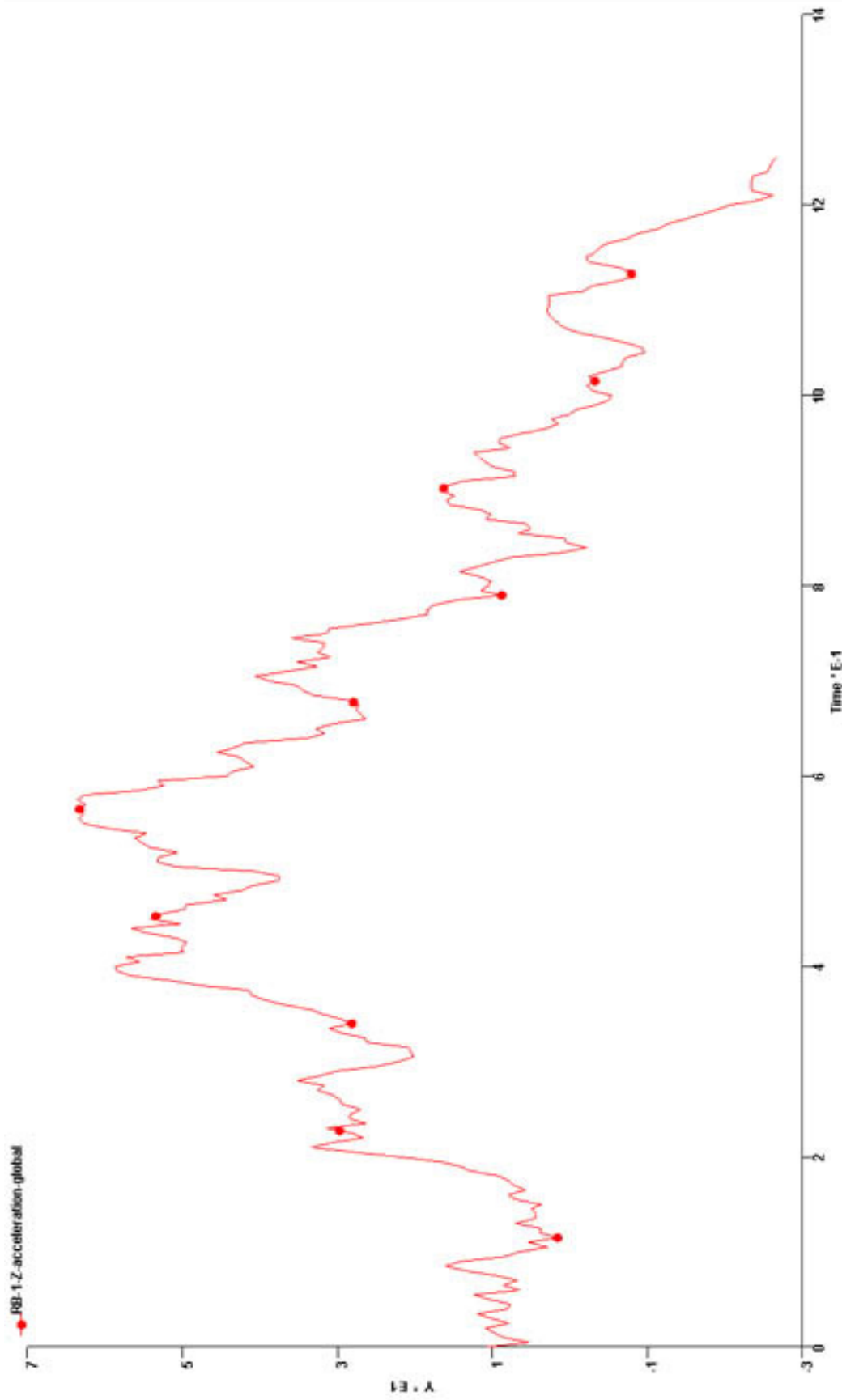


RGFE	VO m/s	VR(-)	t1	t 2	ttot	Eo (J)	Eri	Eap	AP/Eo
236L	13.5	13.05	0.52	0.45	0.97	4.9	4.59	0.31	6.3%
234L	17.5	17.07	0.47	0.43	0.90	8.25	7.85	0.4	4.8%
238R	21.3	20.79	0.43	0.42	0.85	12.23	11.65	0.58	4.7%
234R	23.0	22.54	0.42	0.42	0.84	14.26	13.69	0.57	4.0%
236R	27.4	26.86	0.40	0.41	0.81	20.23	19.19	1.04	5.1%

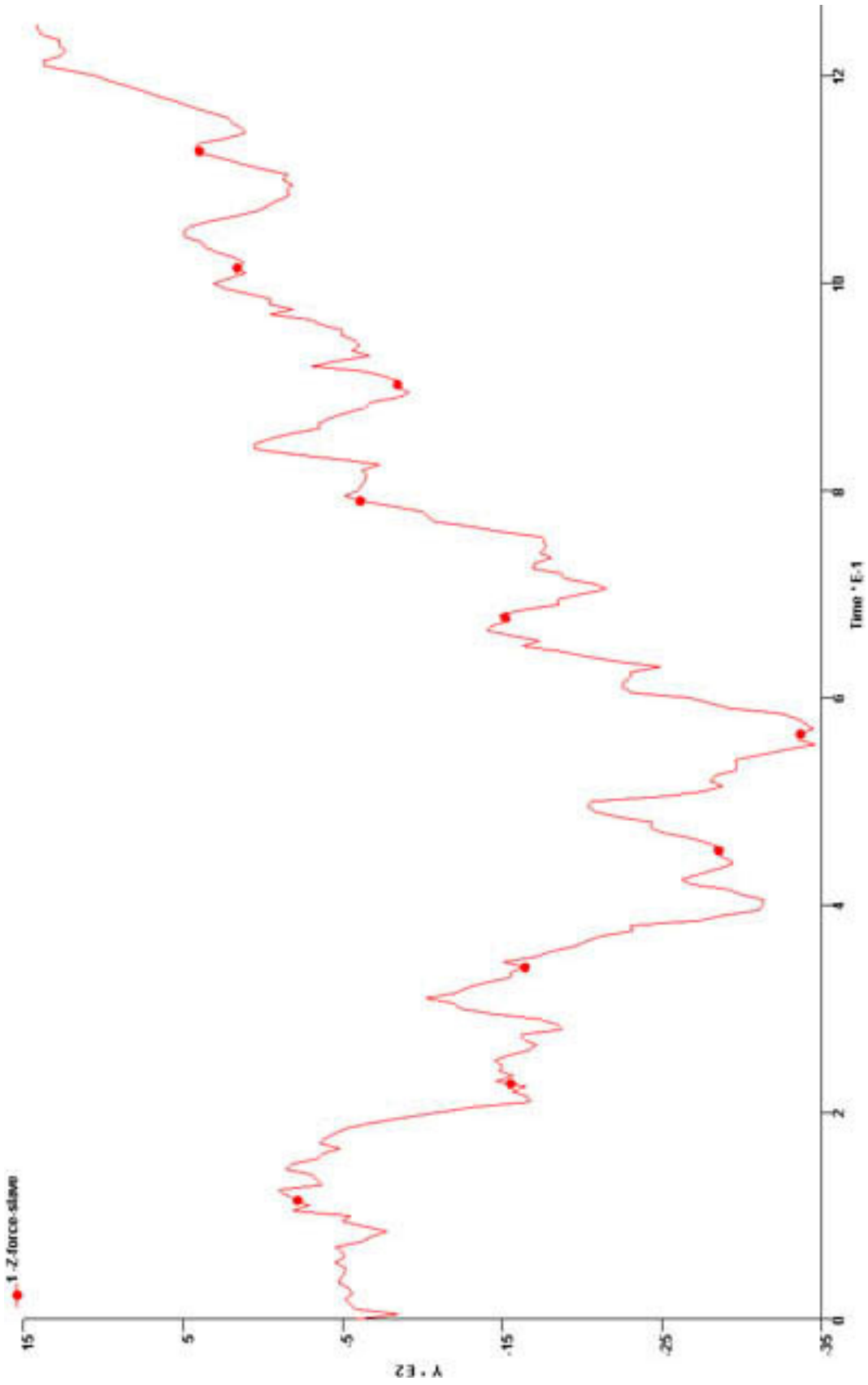
Με βάση λοιπόν τις παραπάνω τροποποιήσεις κάνουμε τα αντίστοιχα τρεξίματα στον κώδικα για τις διάφορες τιμές των ταχυτήτων ,τα οποία τα συγκρίνουμε με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι όλα τα διαγράμματα αναφέρονται στον κόμβο του διεισδυτή που βρίσκεται στο άκρο και είναι ο πρώτος που έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο.

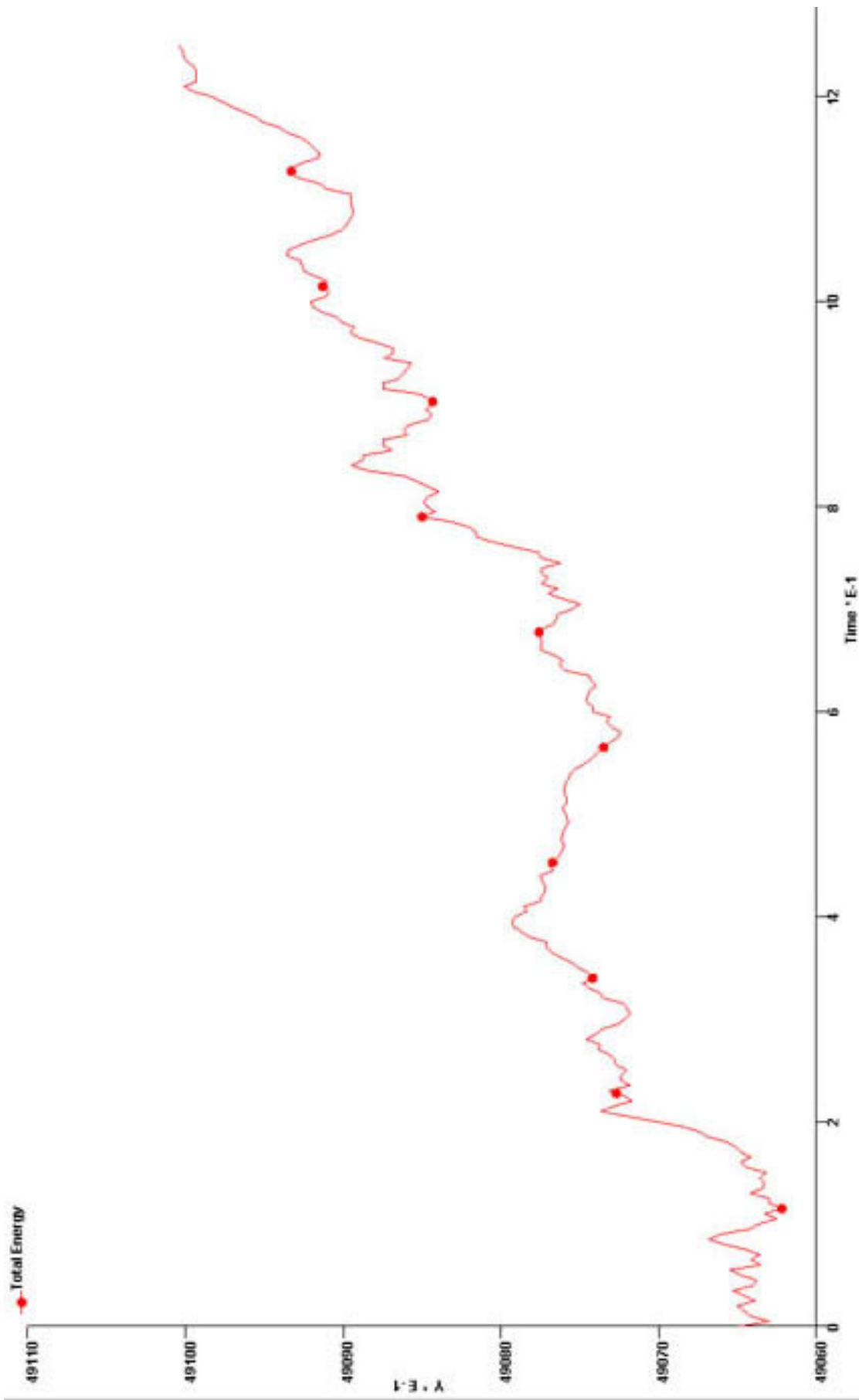






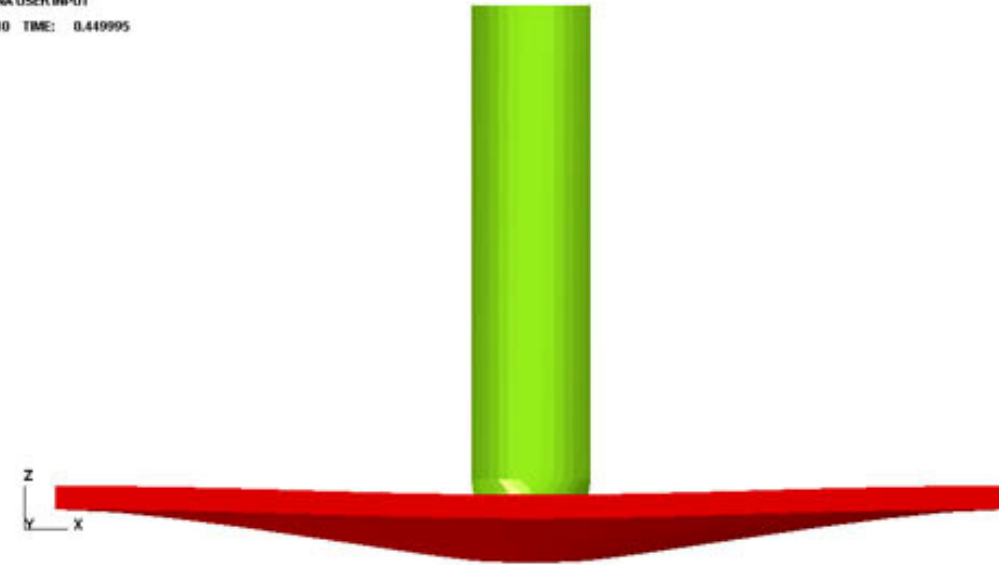
236L



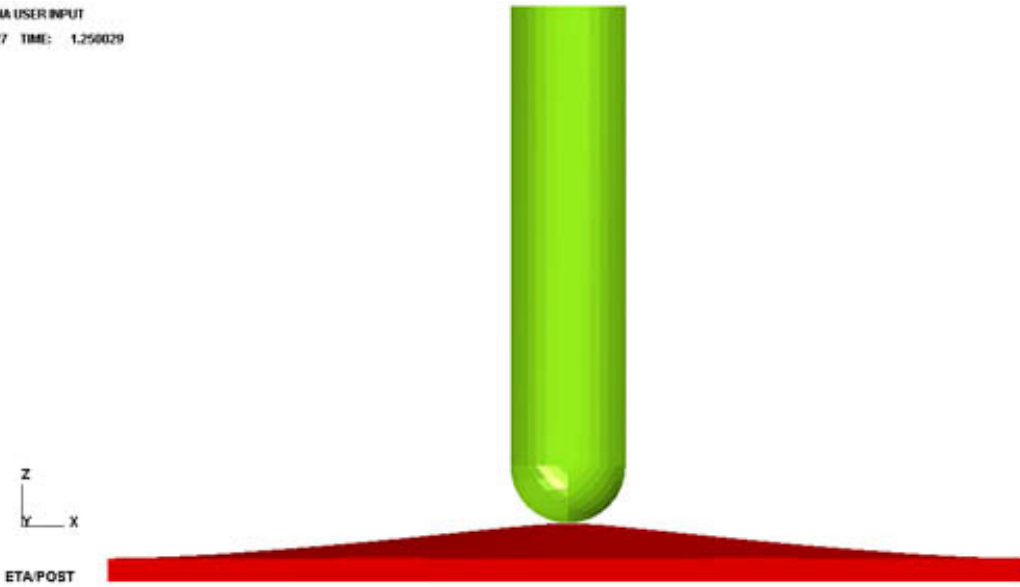


236L

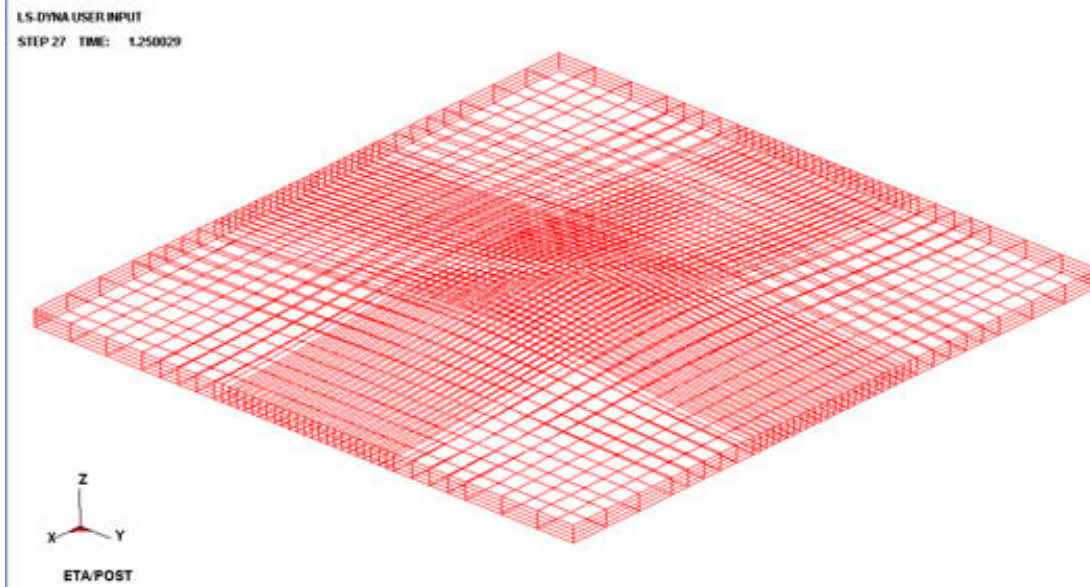
LS-DYNA USER INPUT
STEP 10 TIME: 0.449995



LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.258029

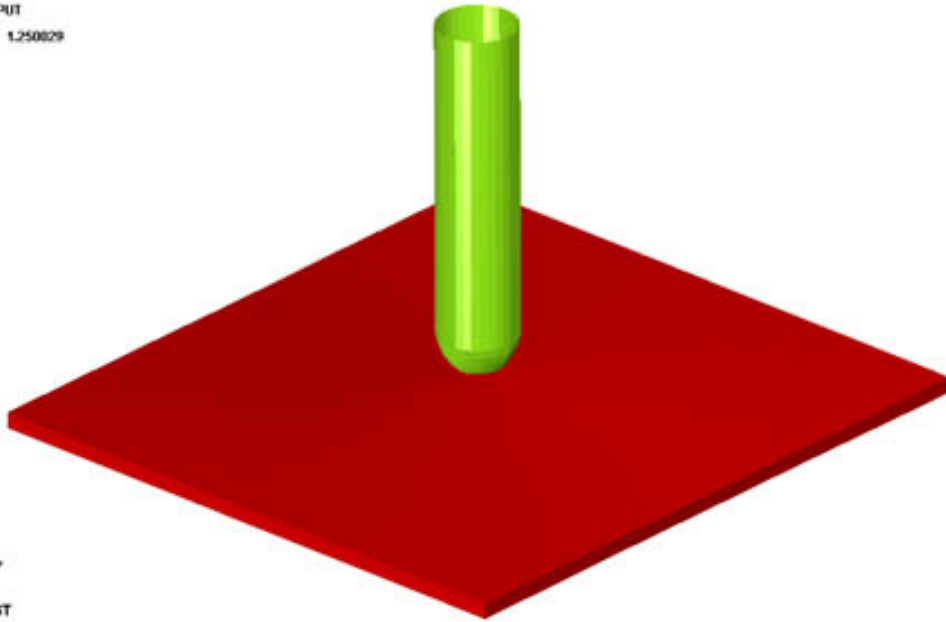


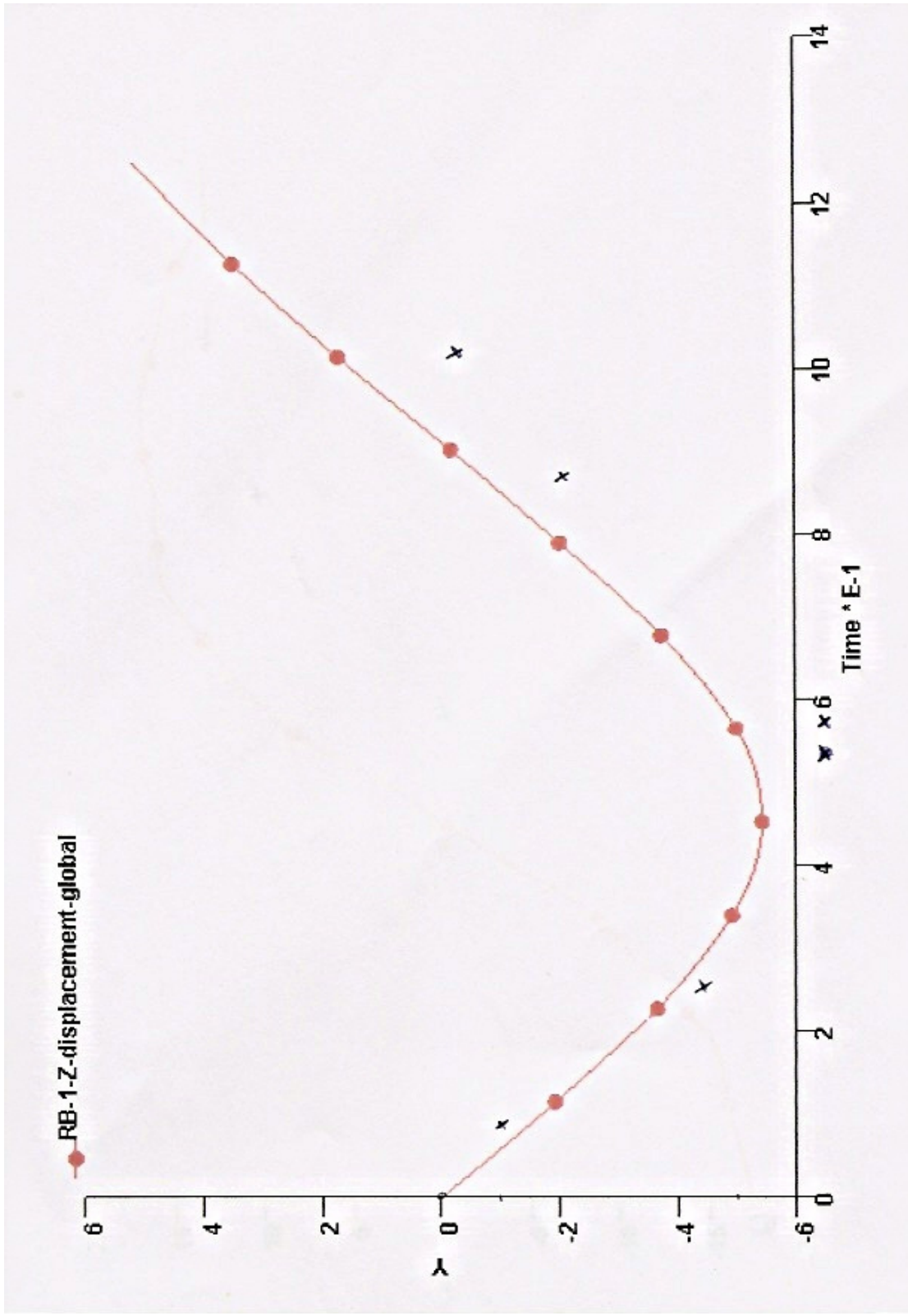
236L



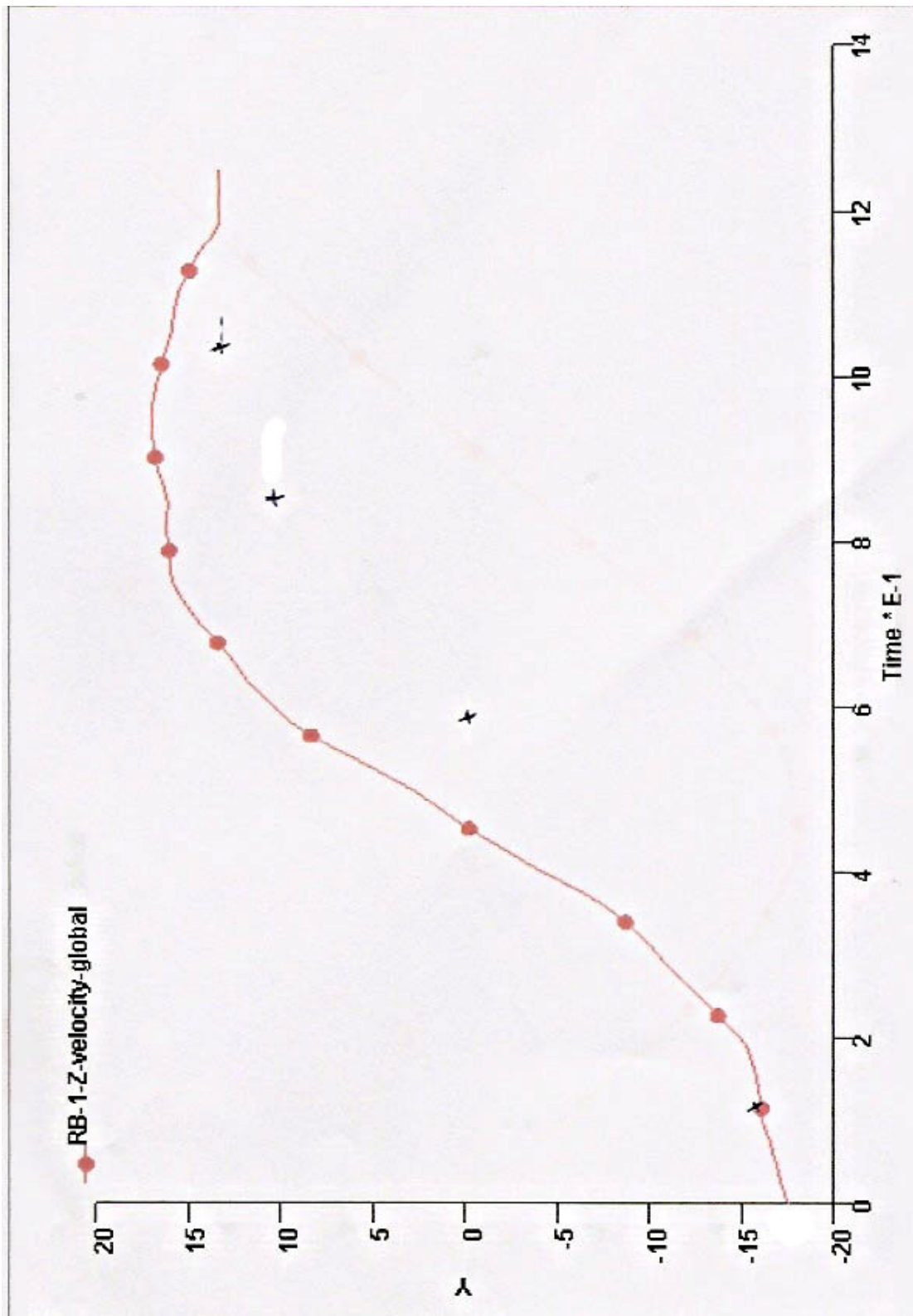
236L

LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250029

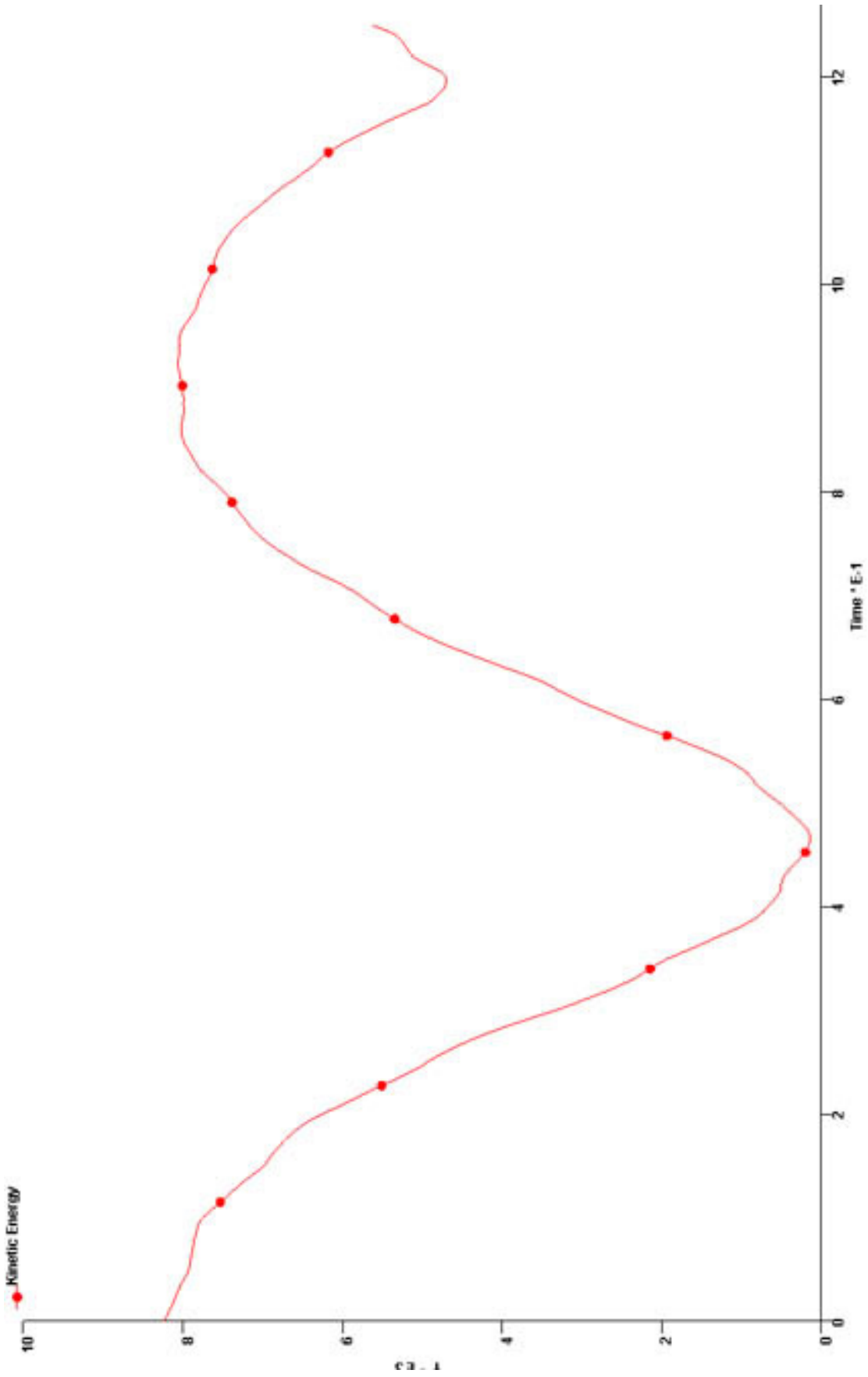




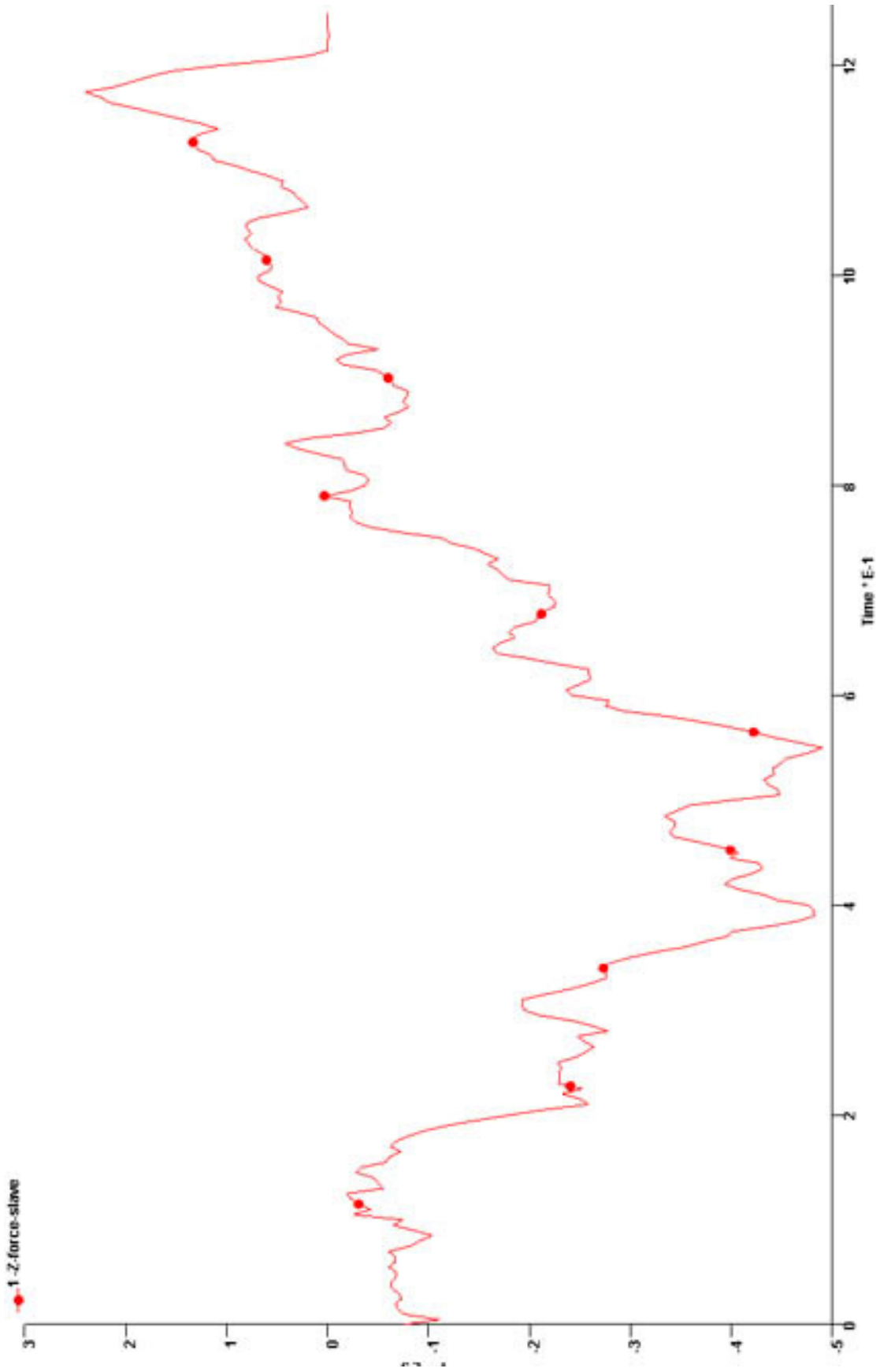
234L

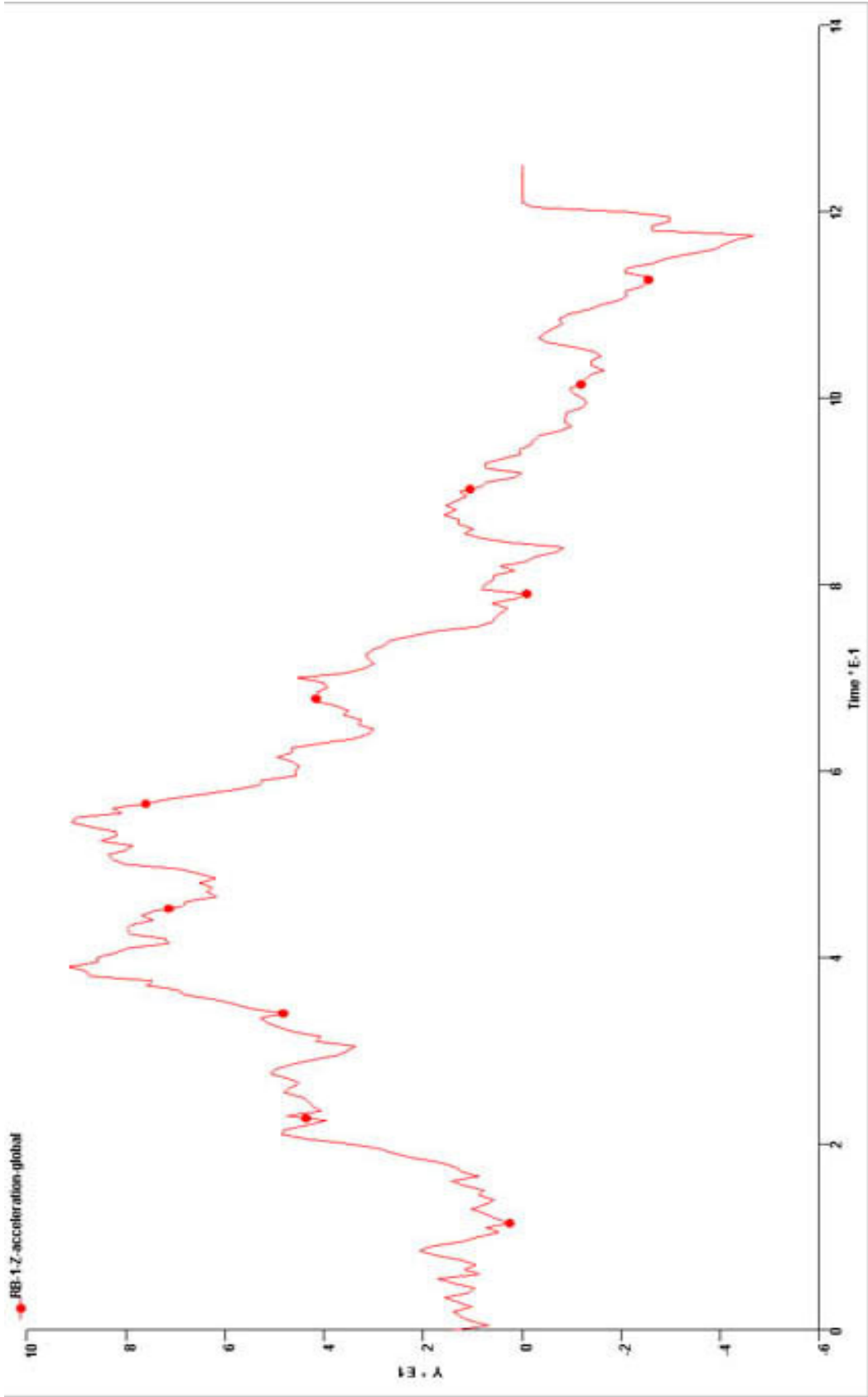


234L



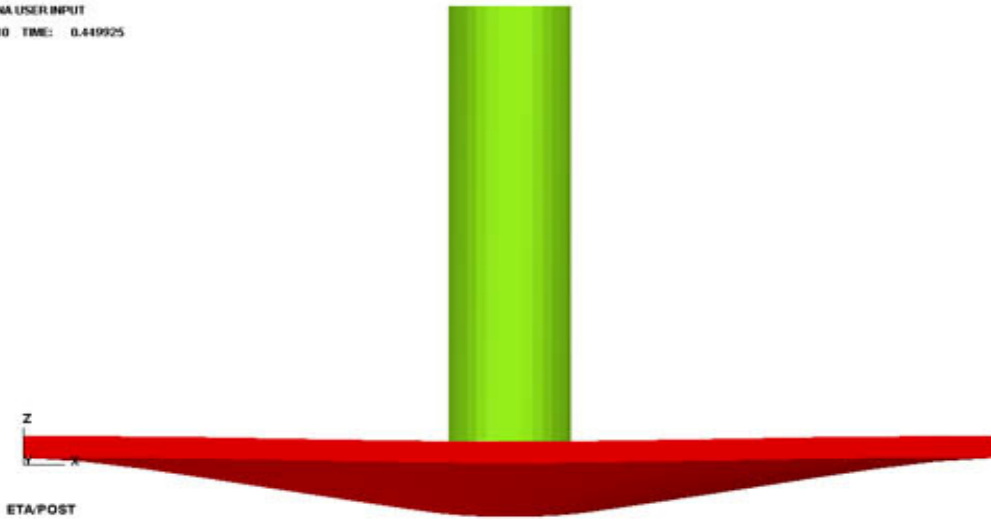
234L



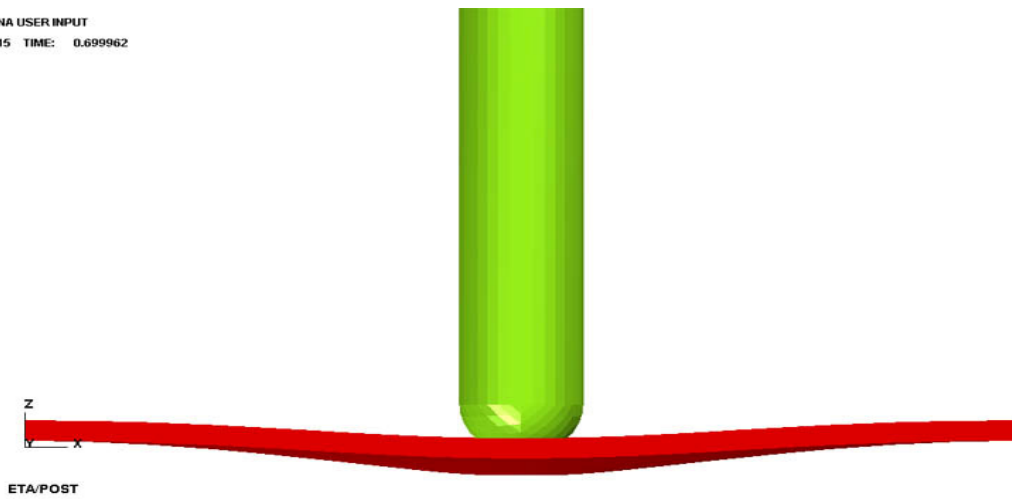


234L

LS-DYNA USER INPUT
STEP 10 TIME: 0.449925



LS-DYNA USER INPUT
STEP 15 TIME: 0.699962



234L

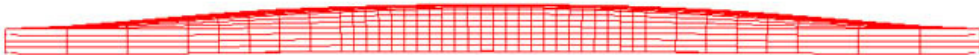
LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250085



ETA/POST

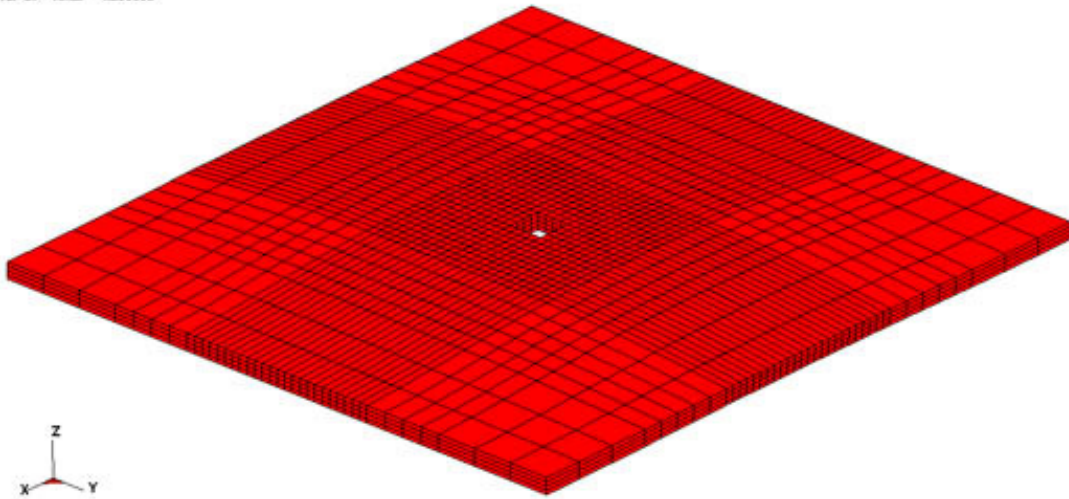


LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250085



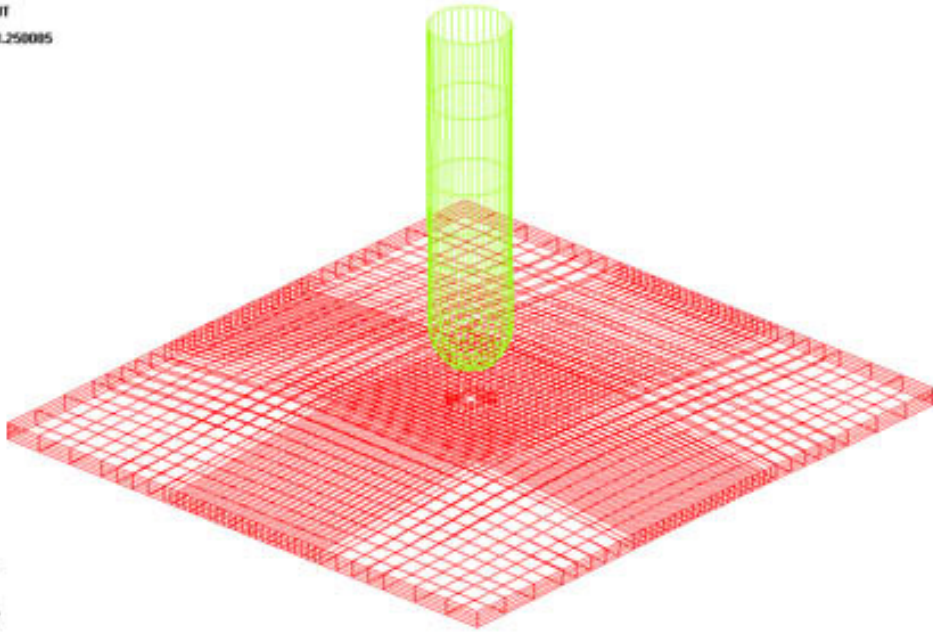
234L

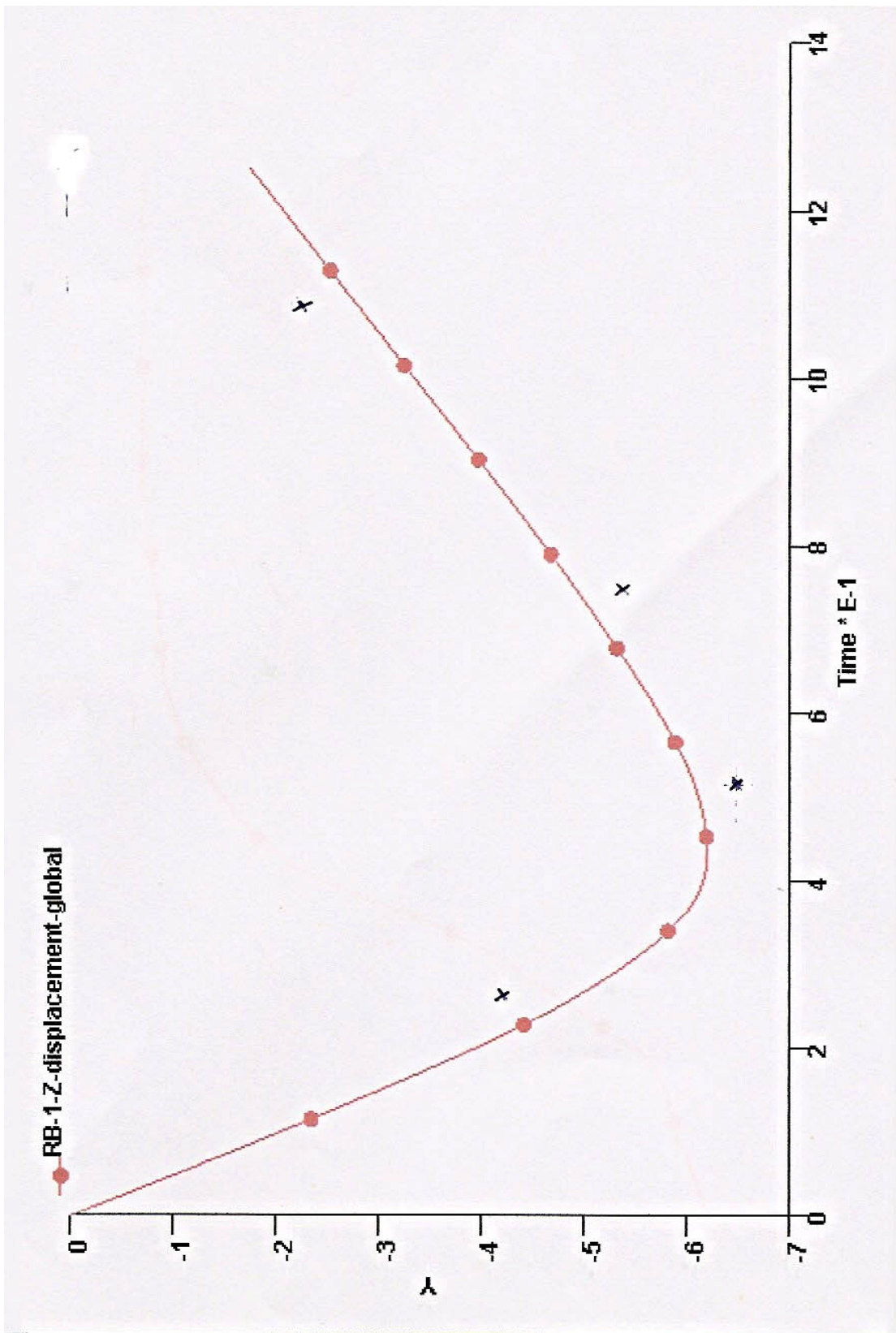
LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250085

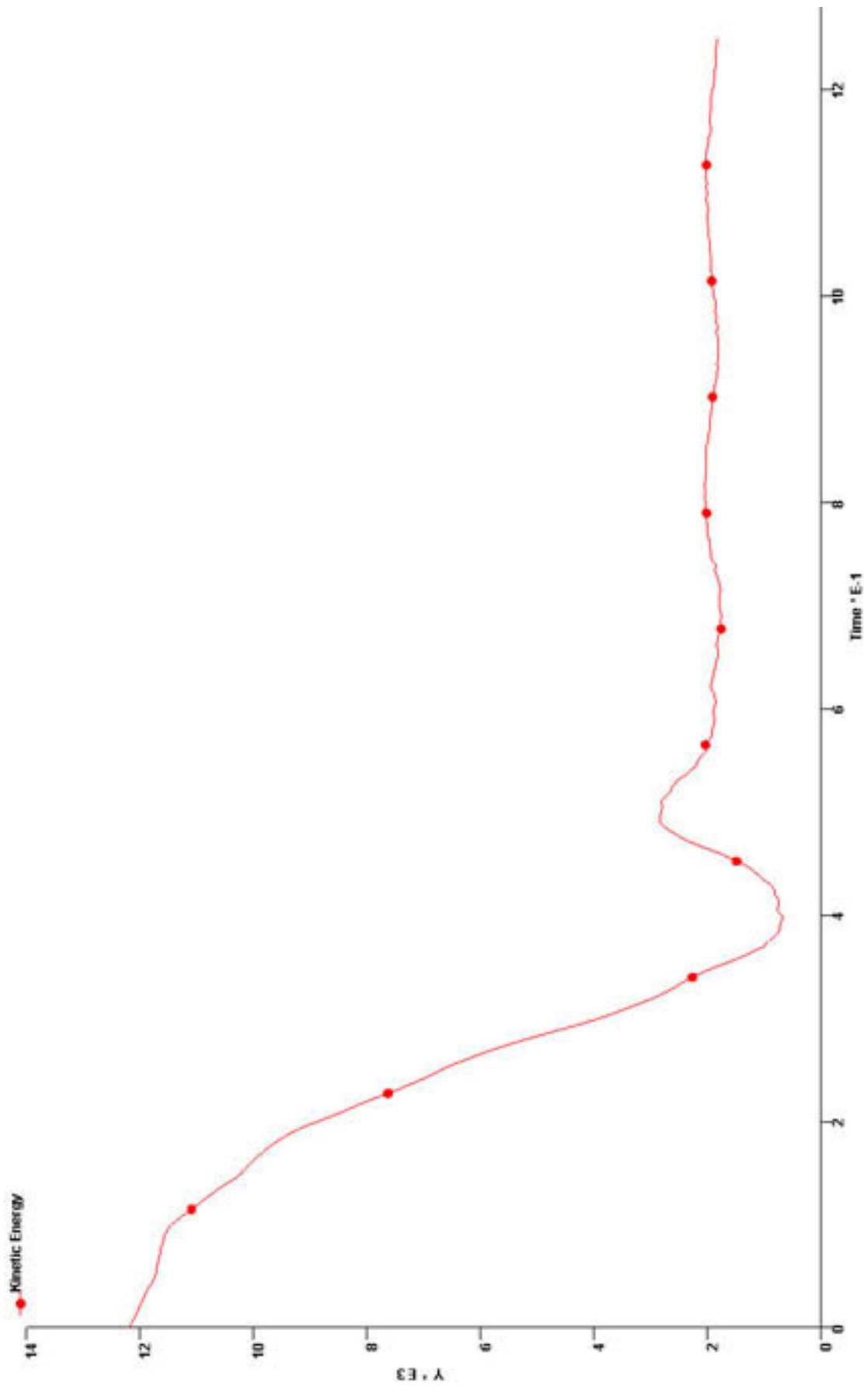


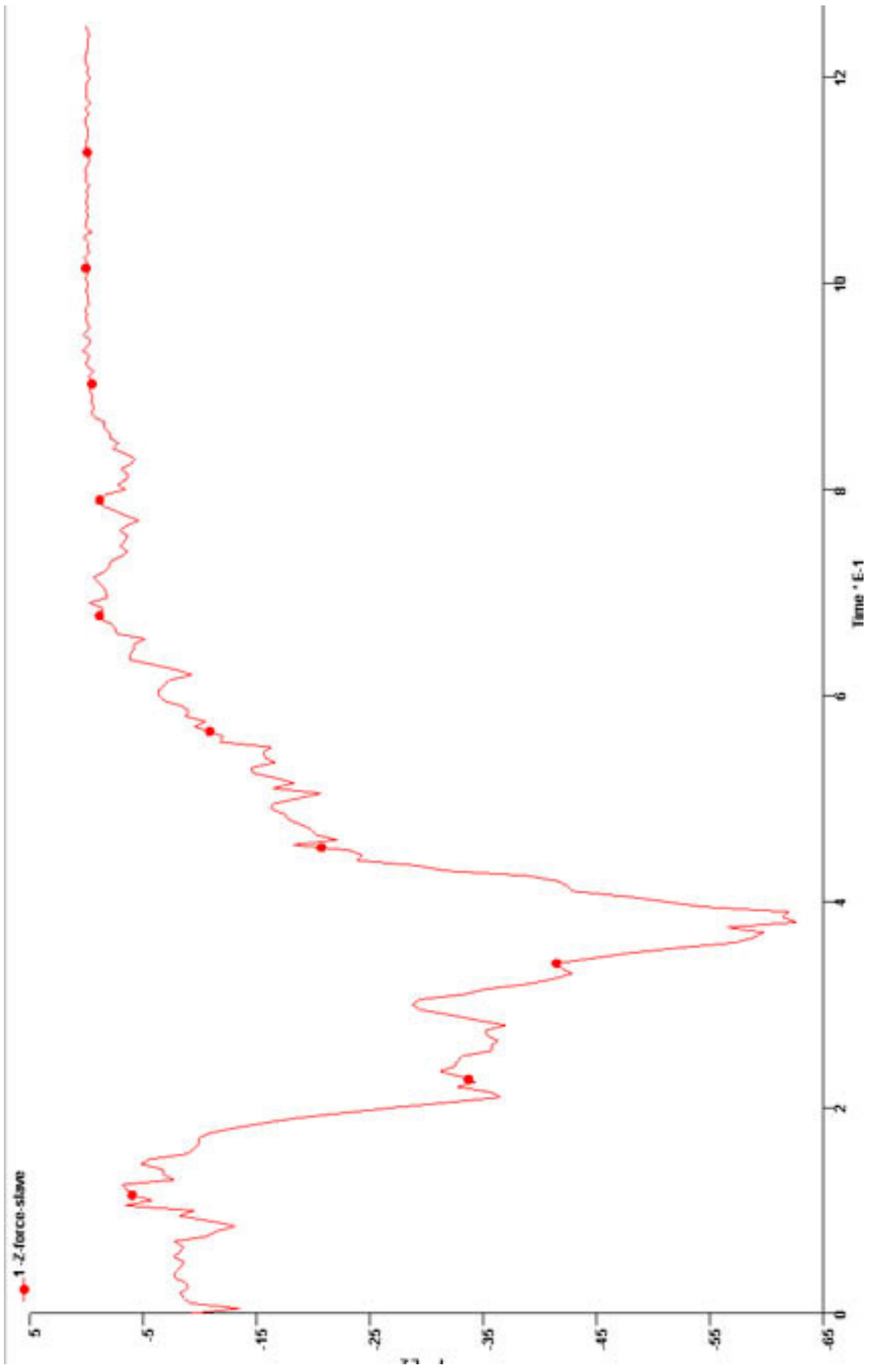
ETA/POST

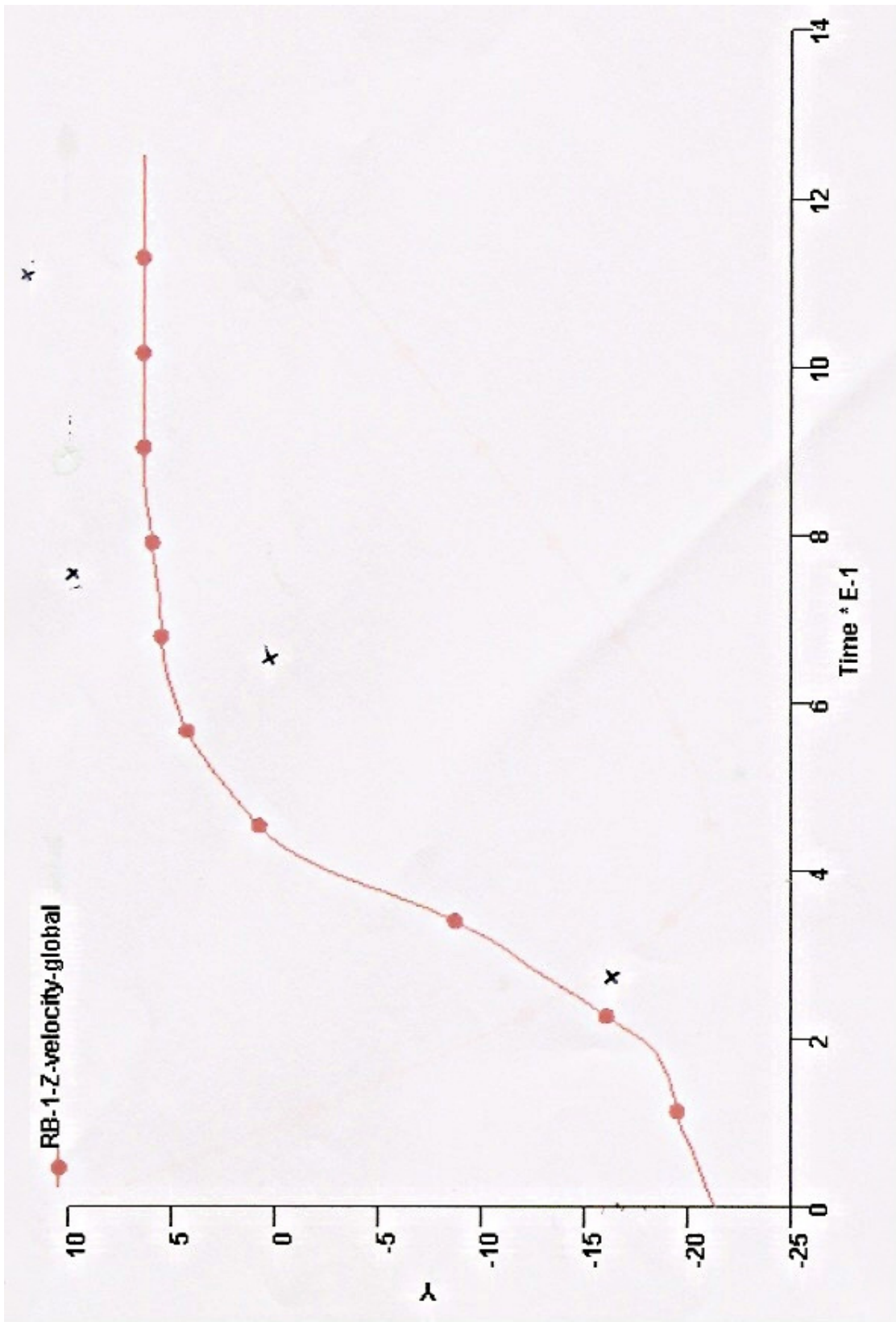
LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250005



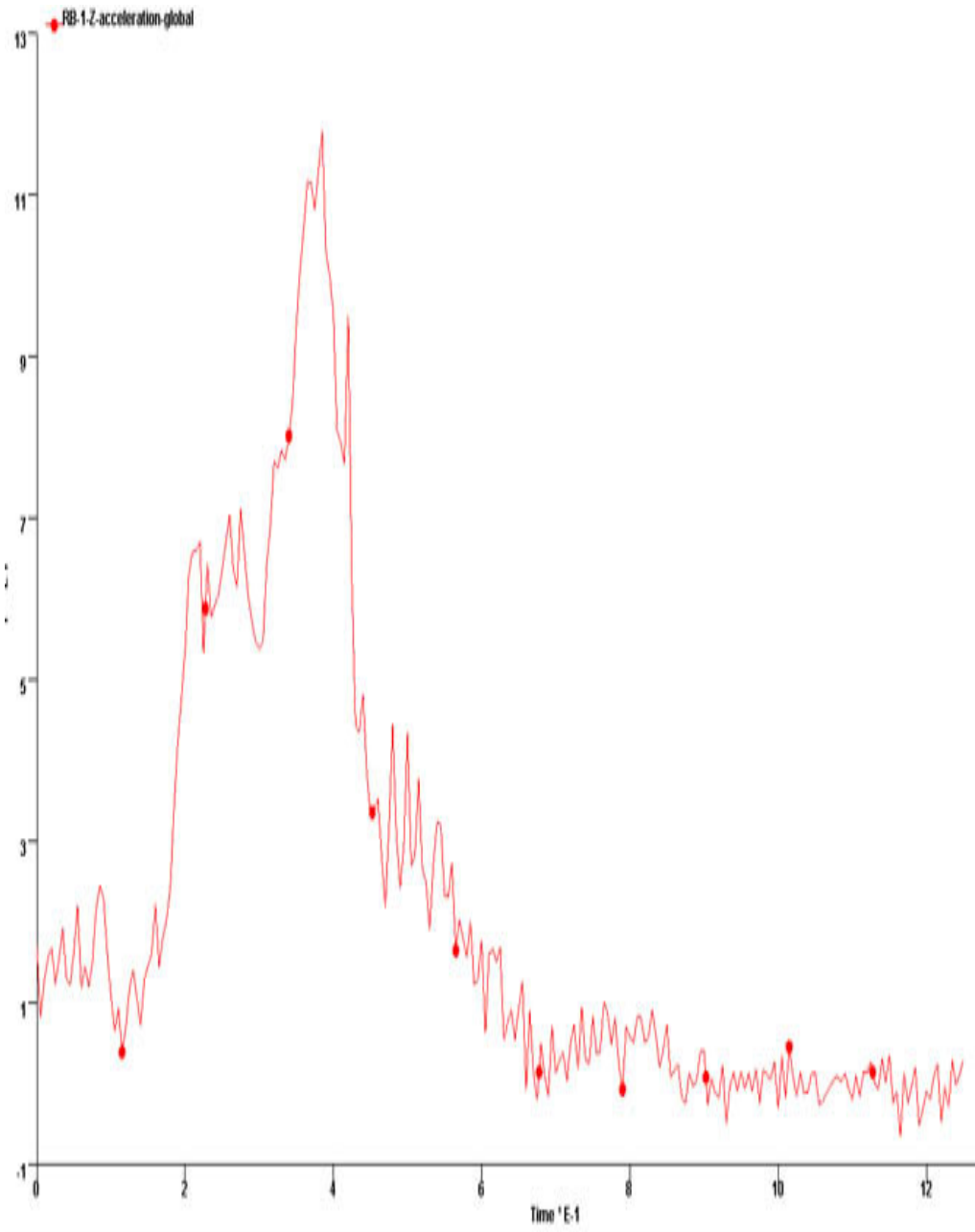






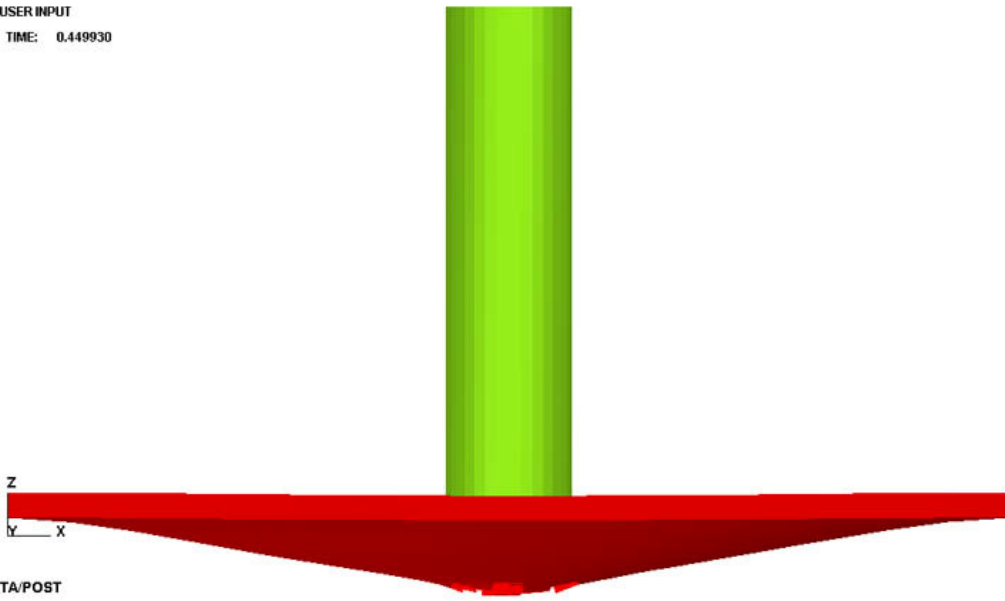


238R

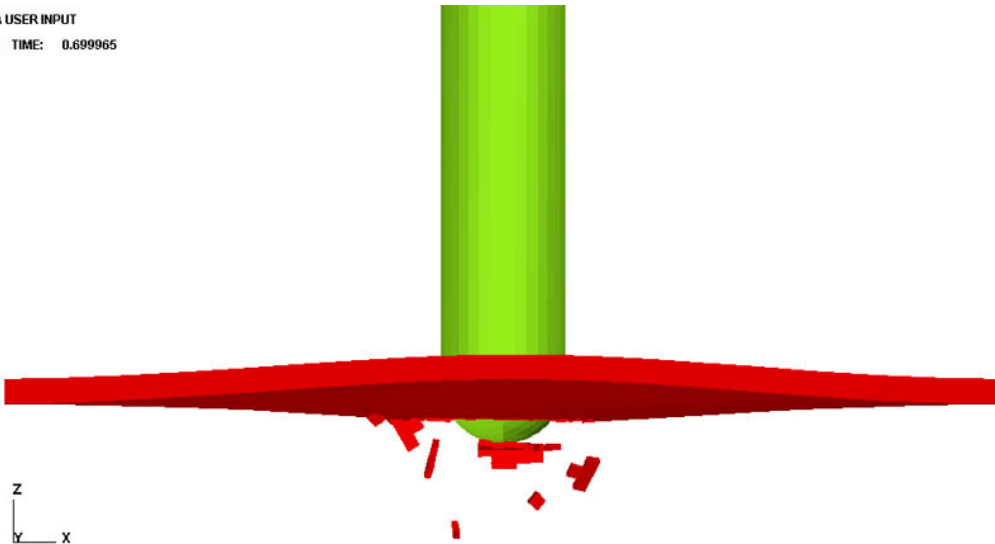


238R

LS-DYNA USER INPUT
STEP 10 TIME: 0.449930

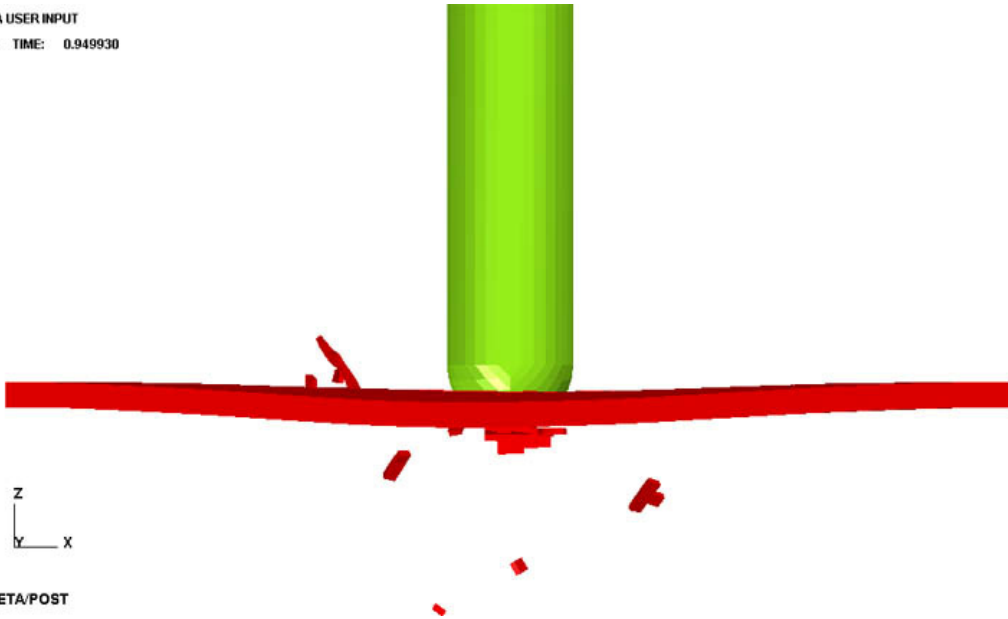


LS-DYNA USER INPUT
STEP 15 TIME: 0.699965

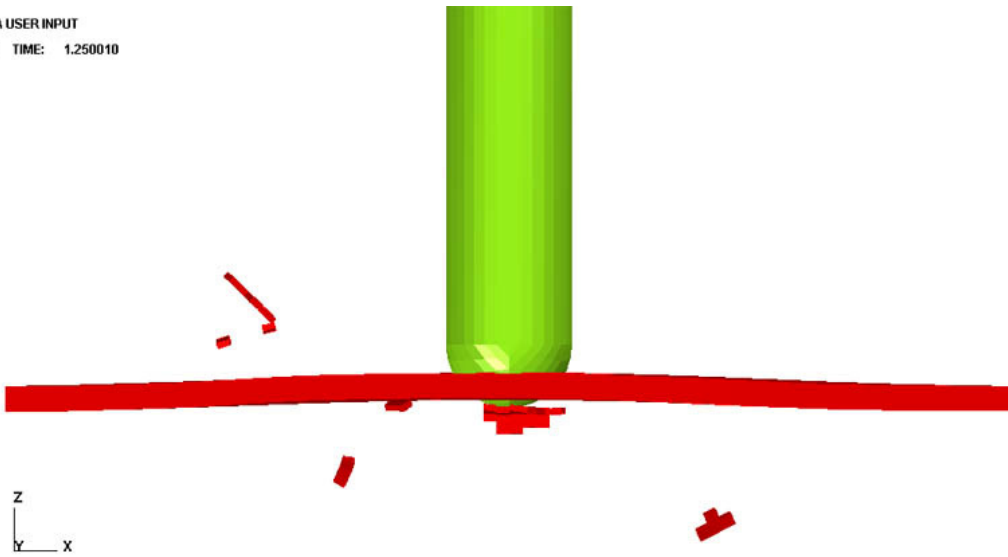


238R

LS-DYNA USER INPUT
STEP 20 TIME: 0.949930

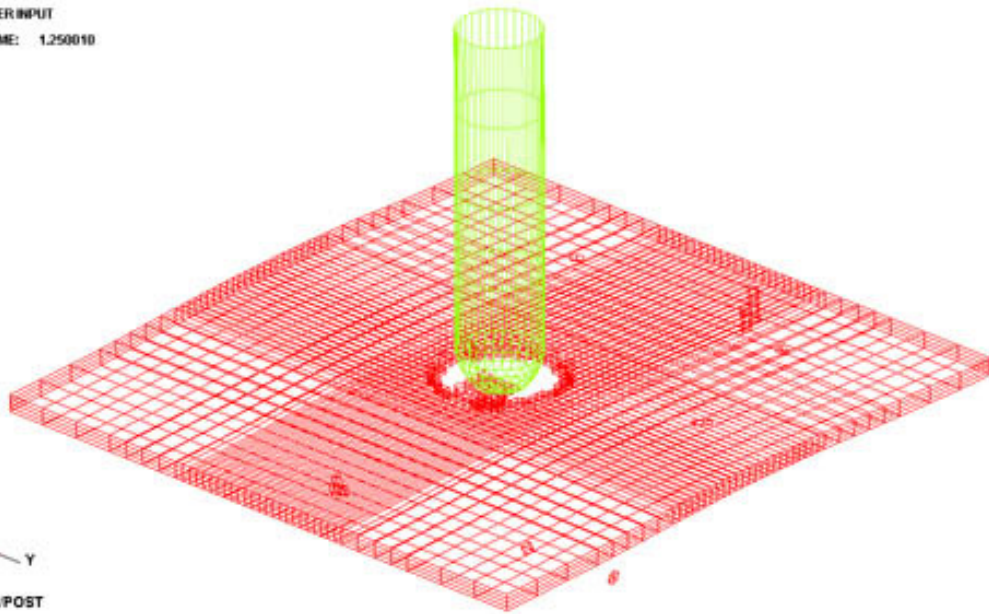


LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250010

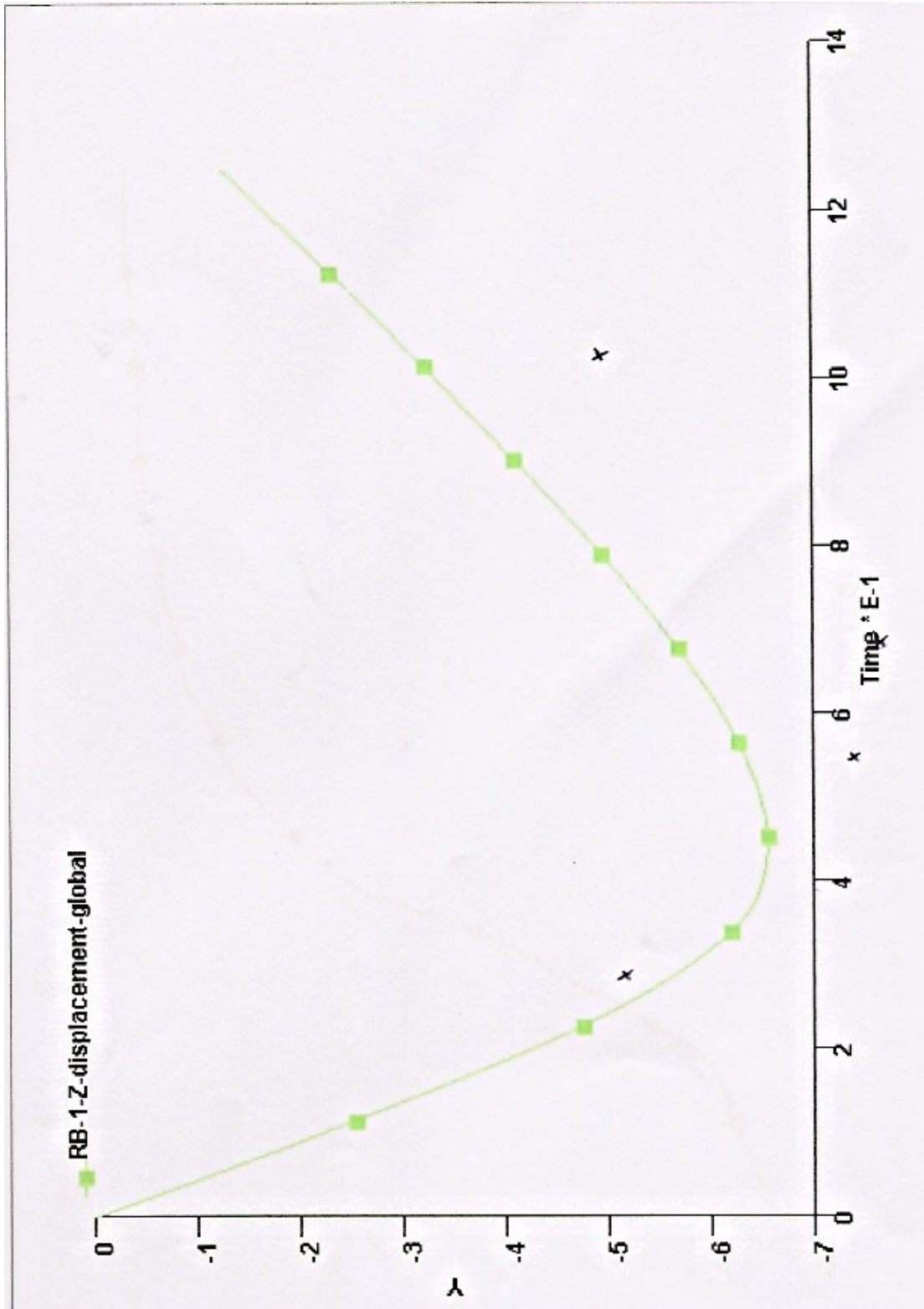


238R

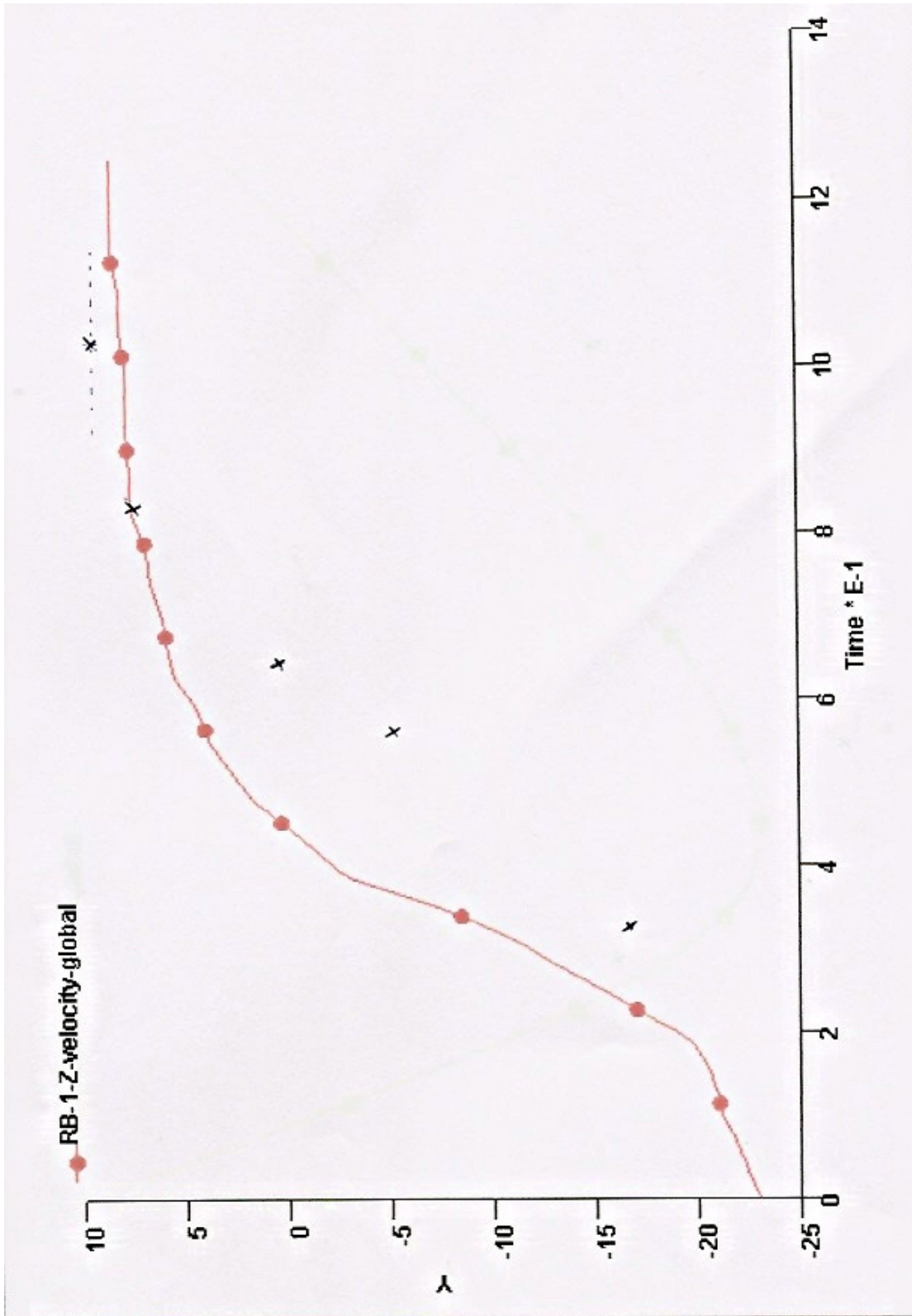
LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250010



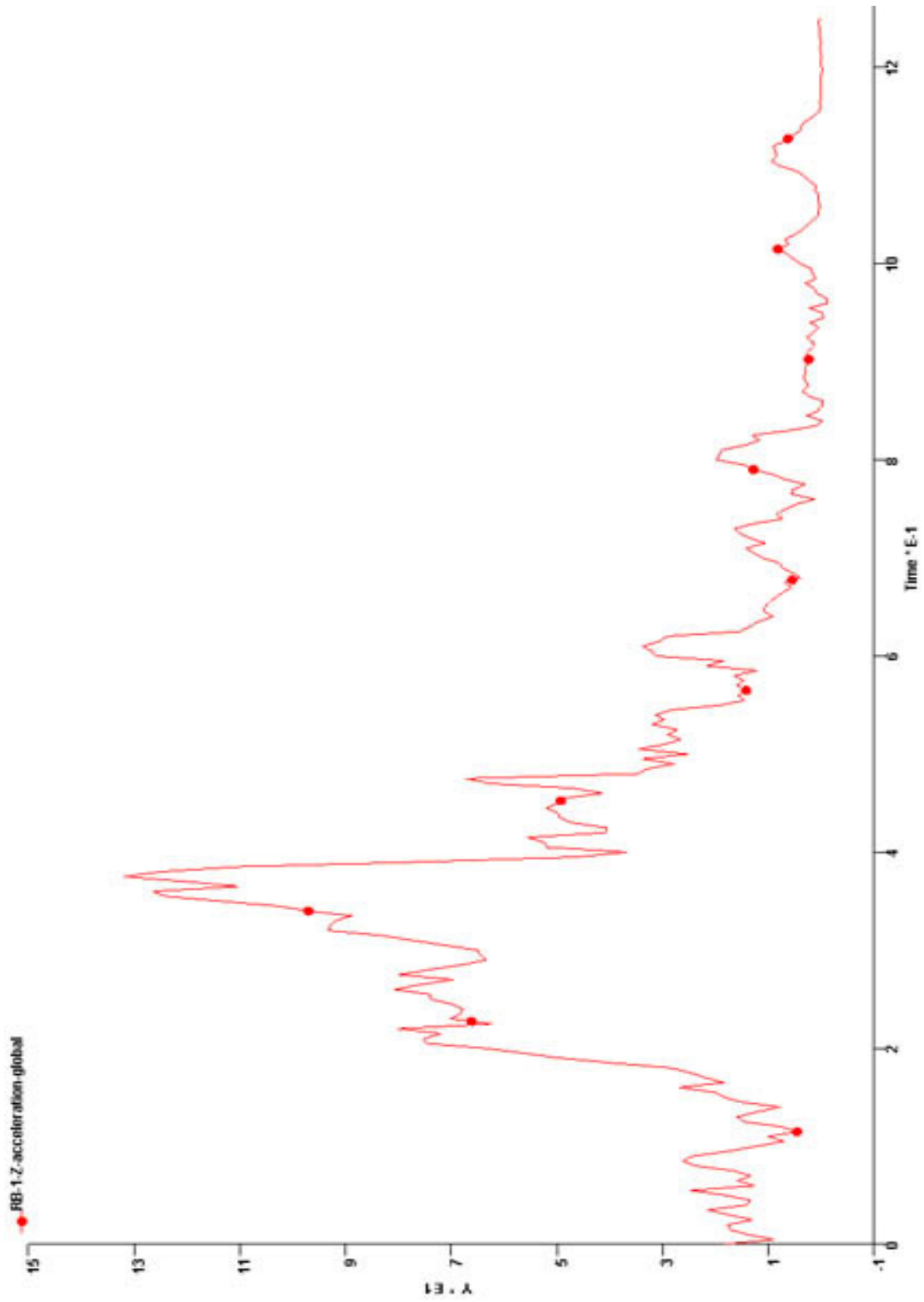
234R



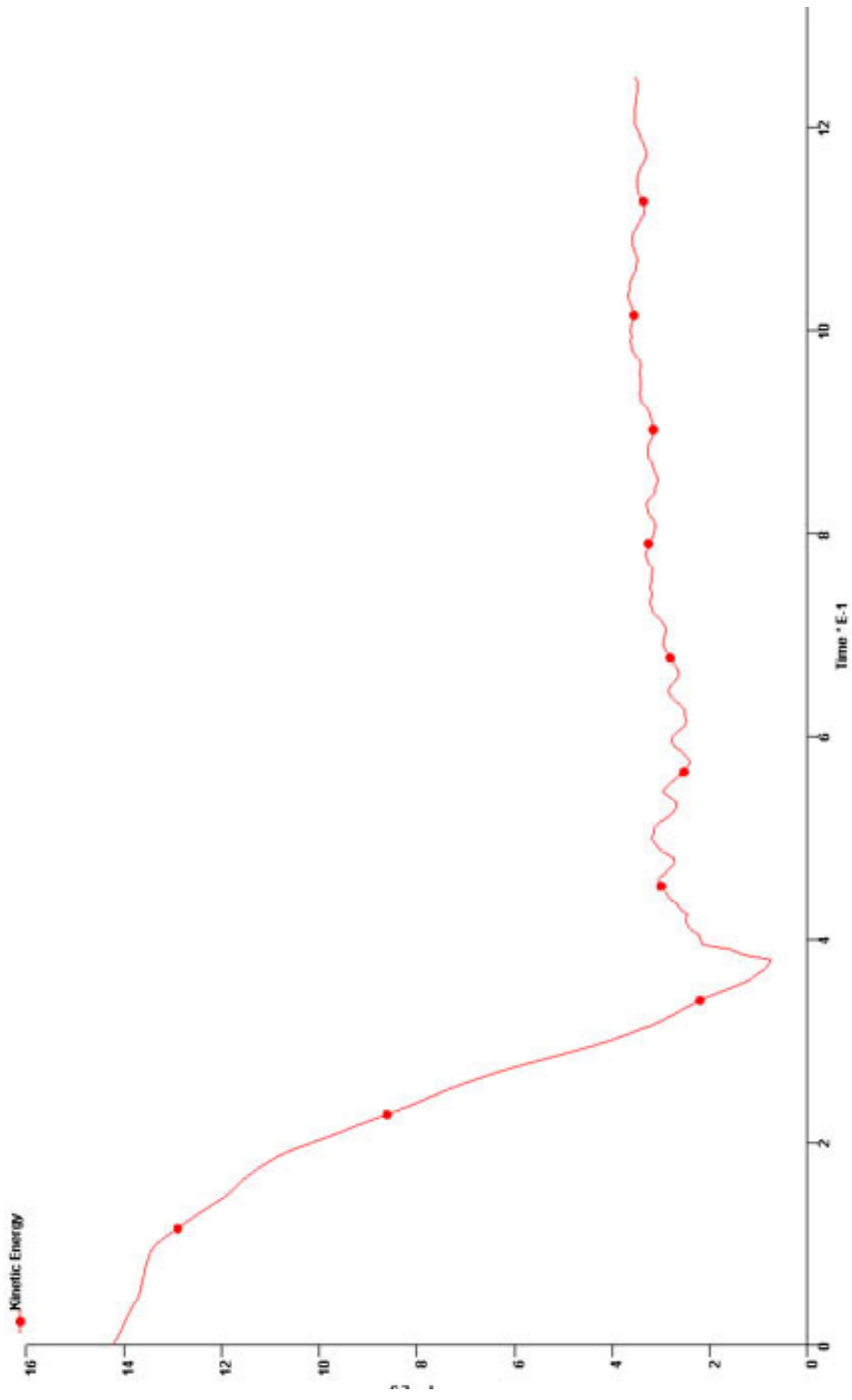
234R



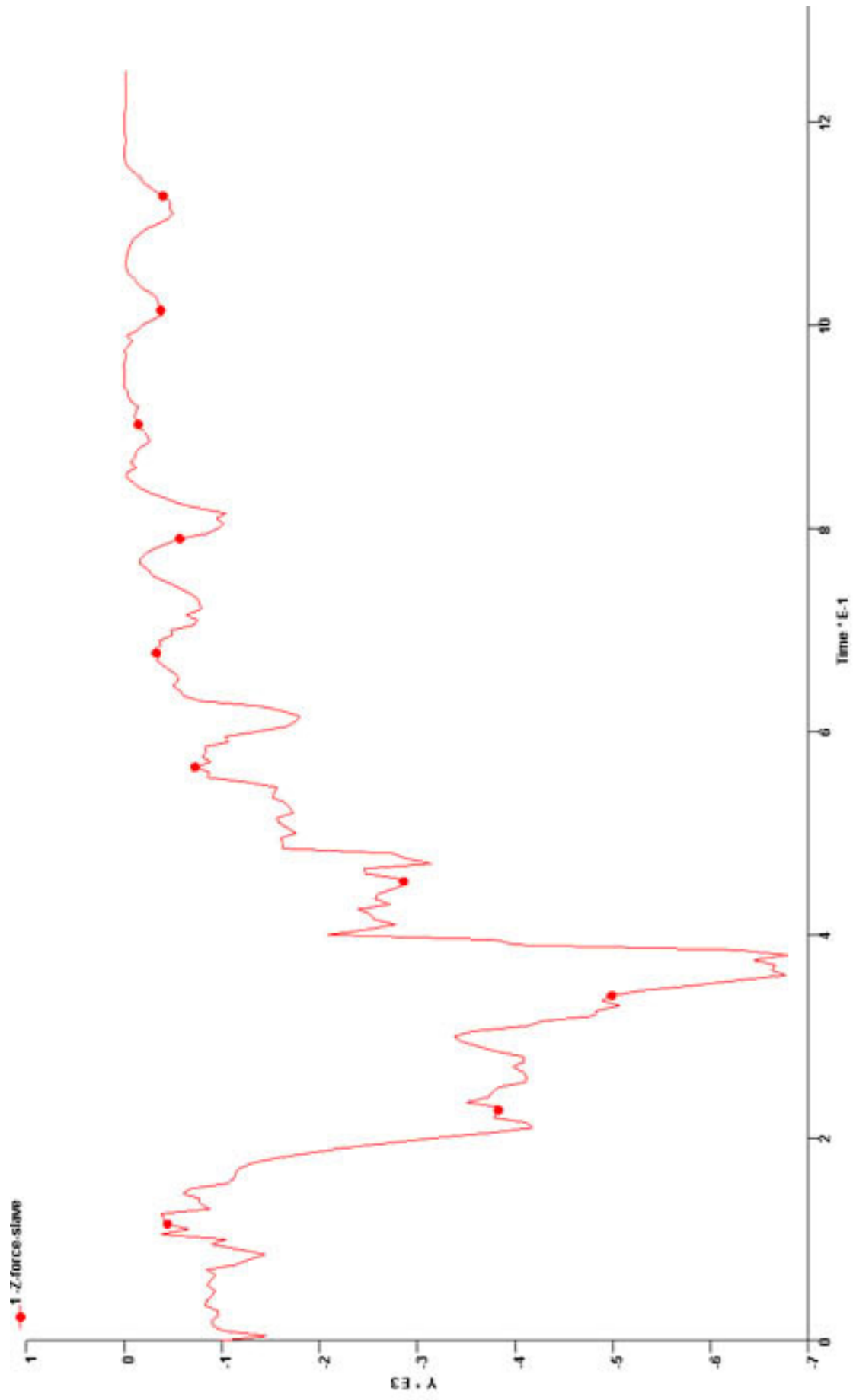
234R



234R

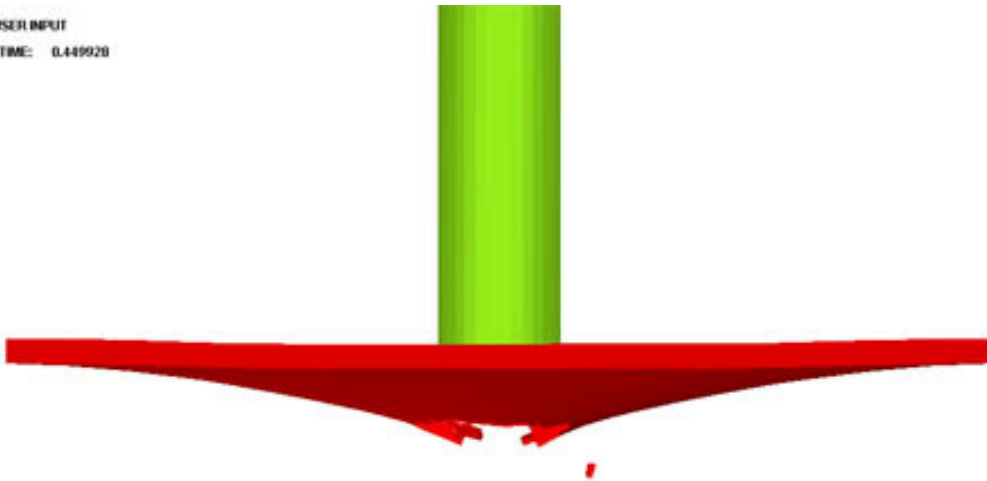


234R



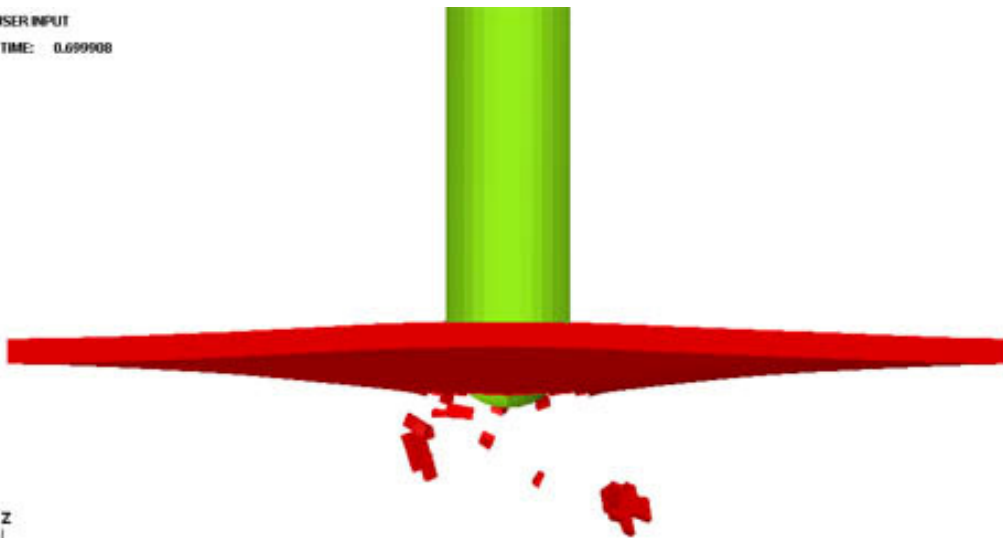
234R

LS-DYNA USER INPUT
STEP 10 TIME: 0.449020



ETA/POST

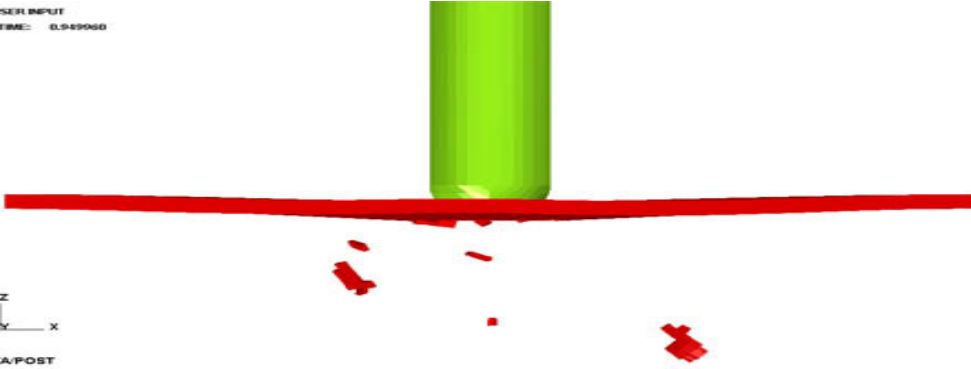
LS-DYNA USER INPUT
STEP 15 TIME: 0.699008



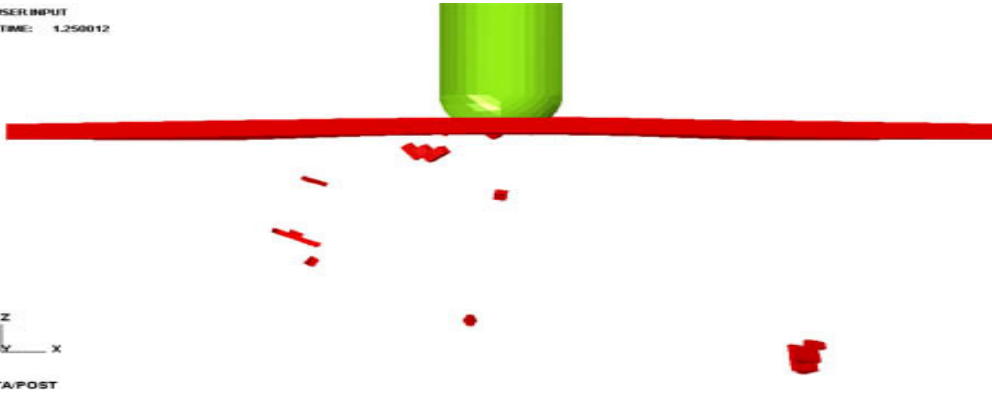
ETA/POST

234R

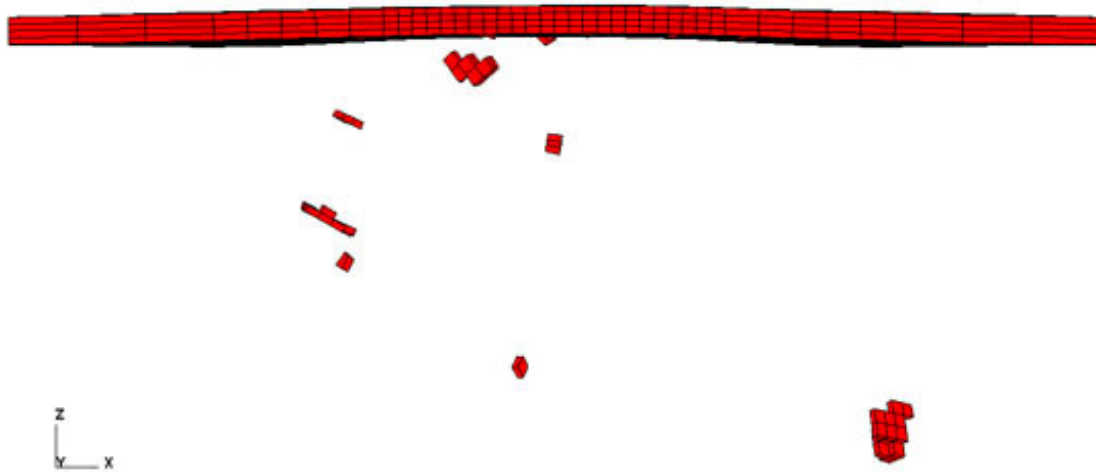
LS-DYNA USER INPUT
STEP 20 TIME: 0.949060



LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250012

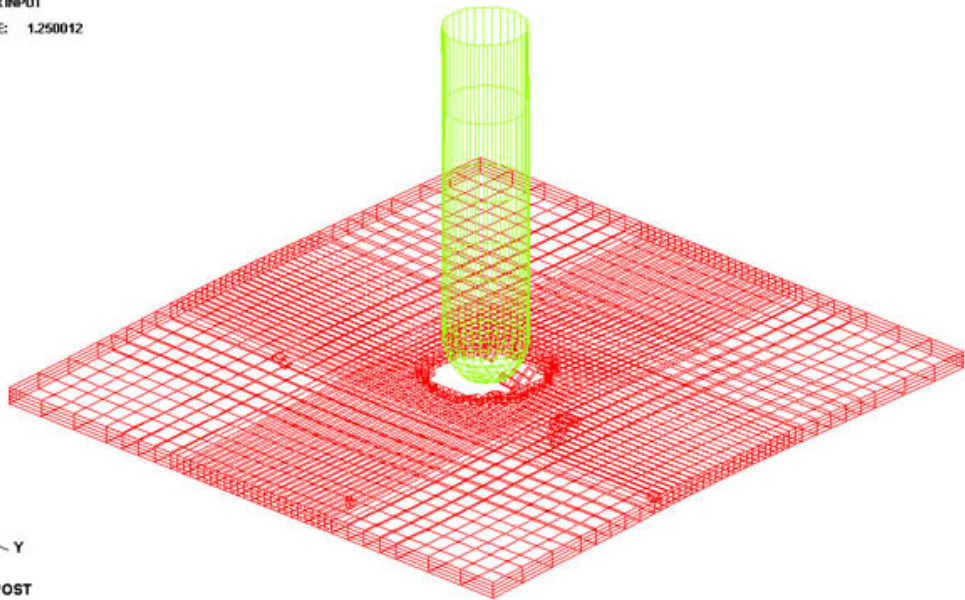


LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250012

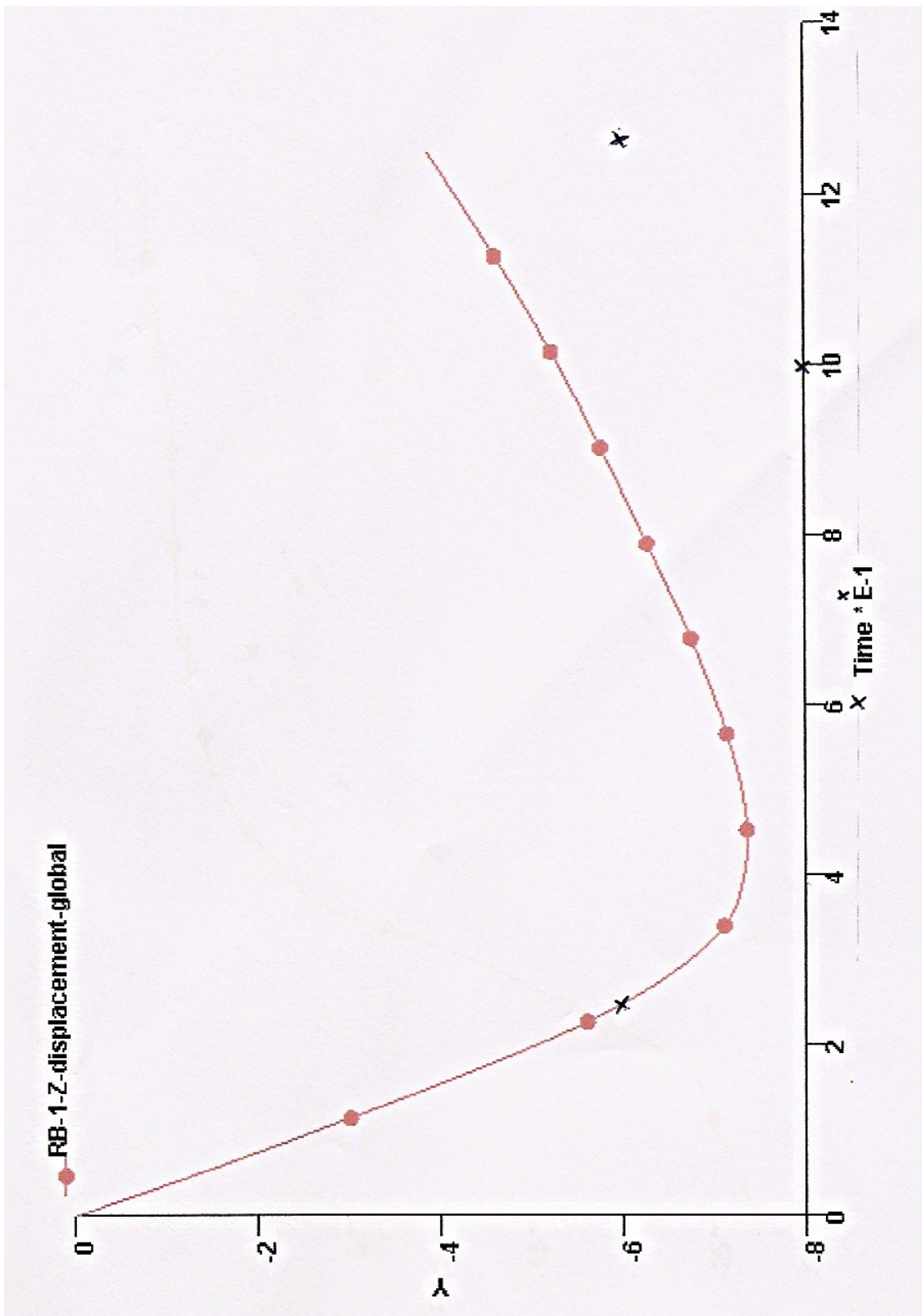


234R

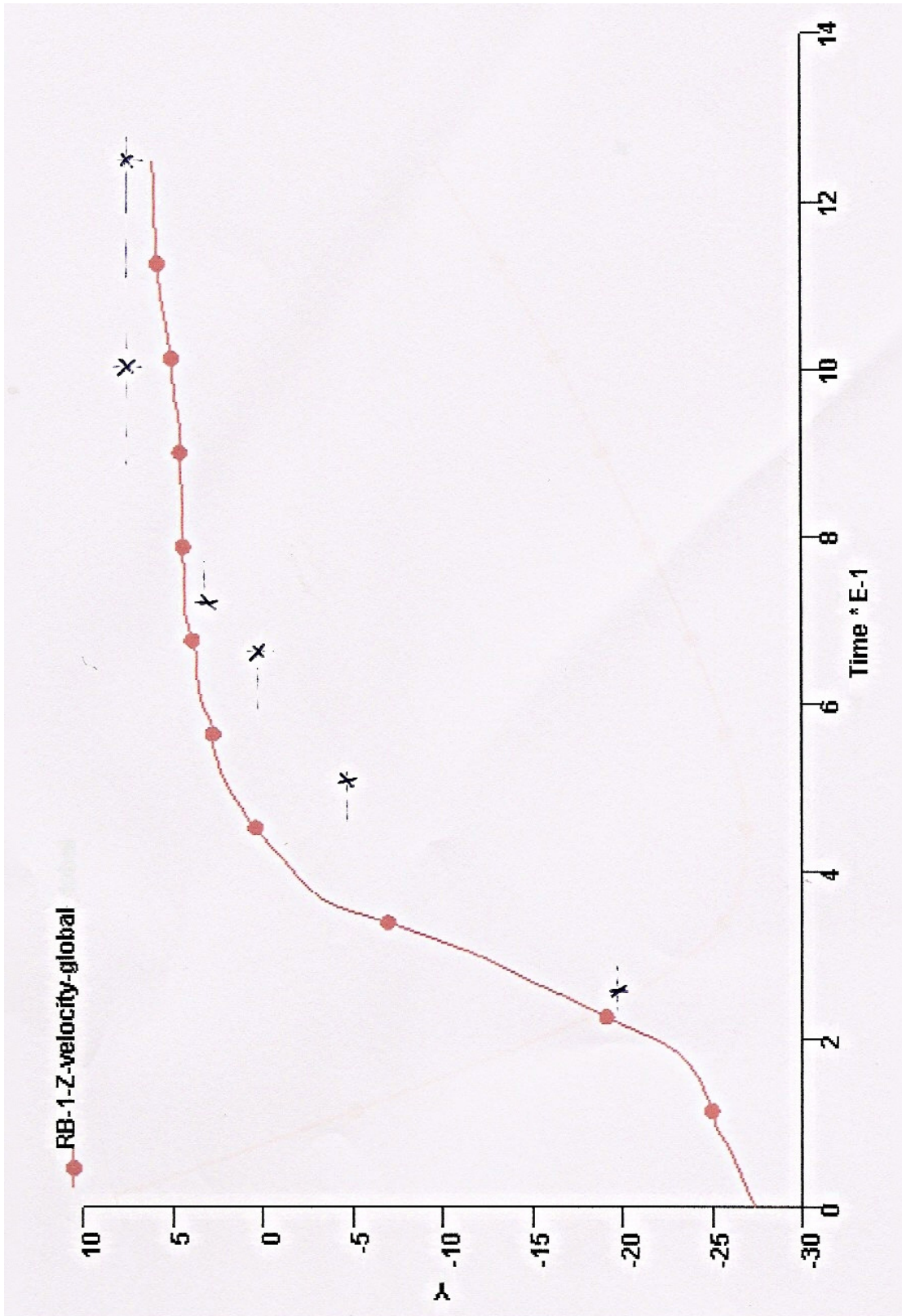
LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250012



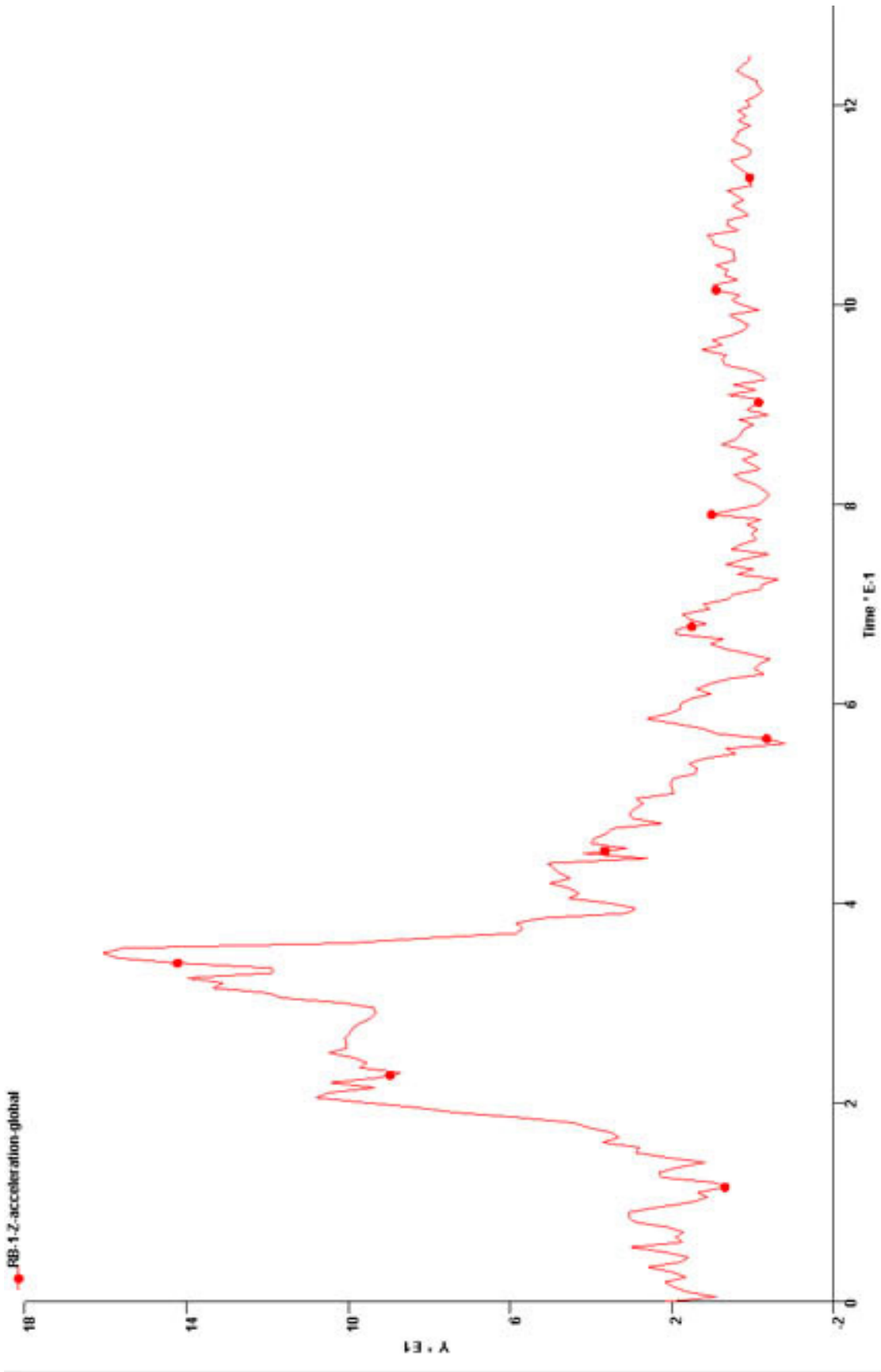
Z
X Y
ETA/POST



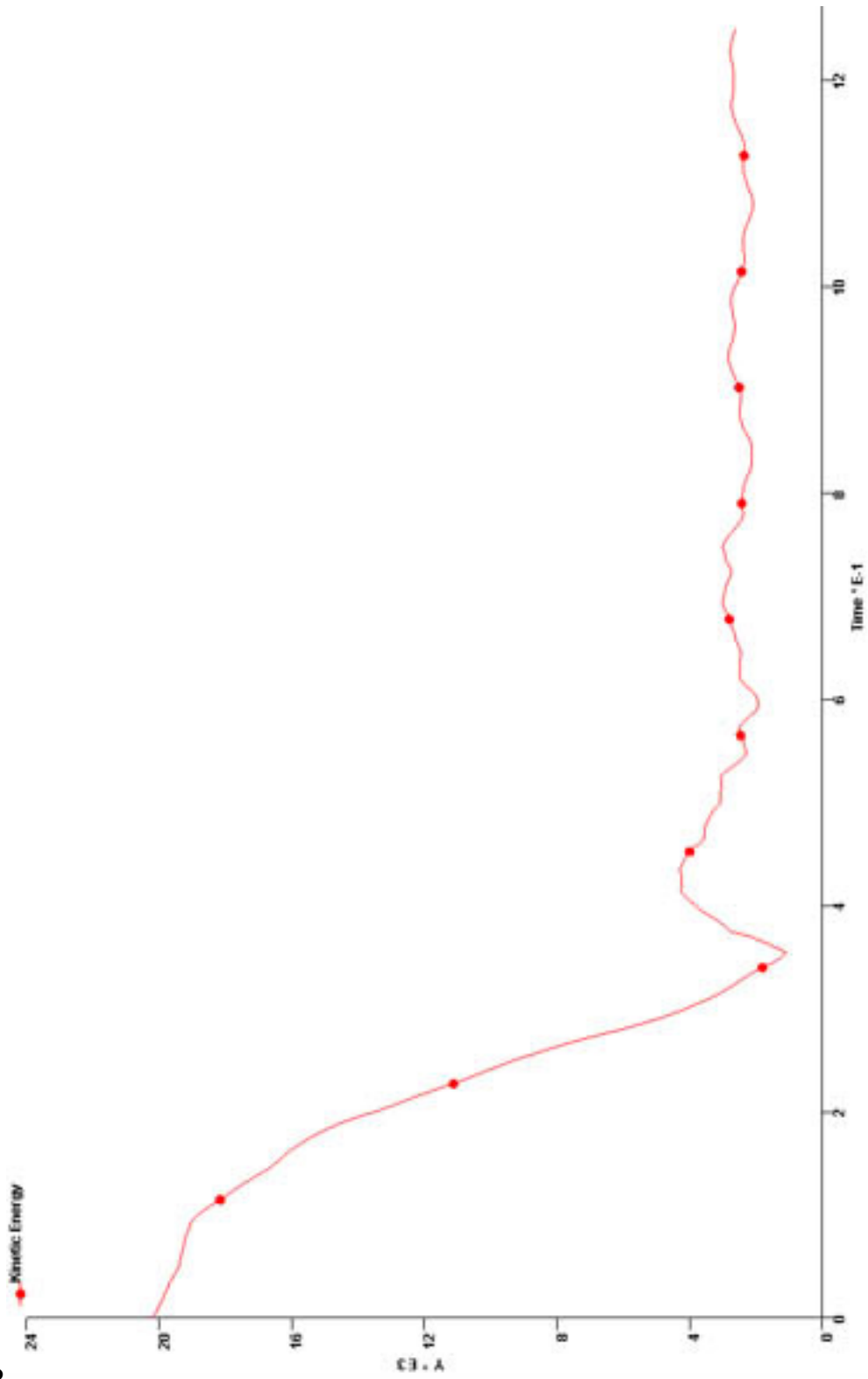
236R



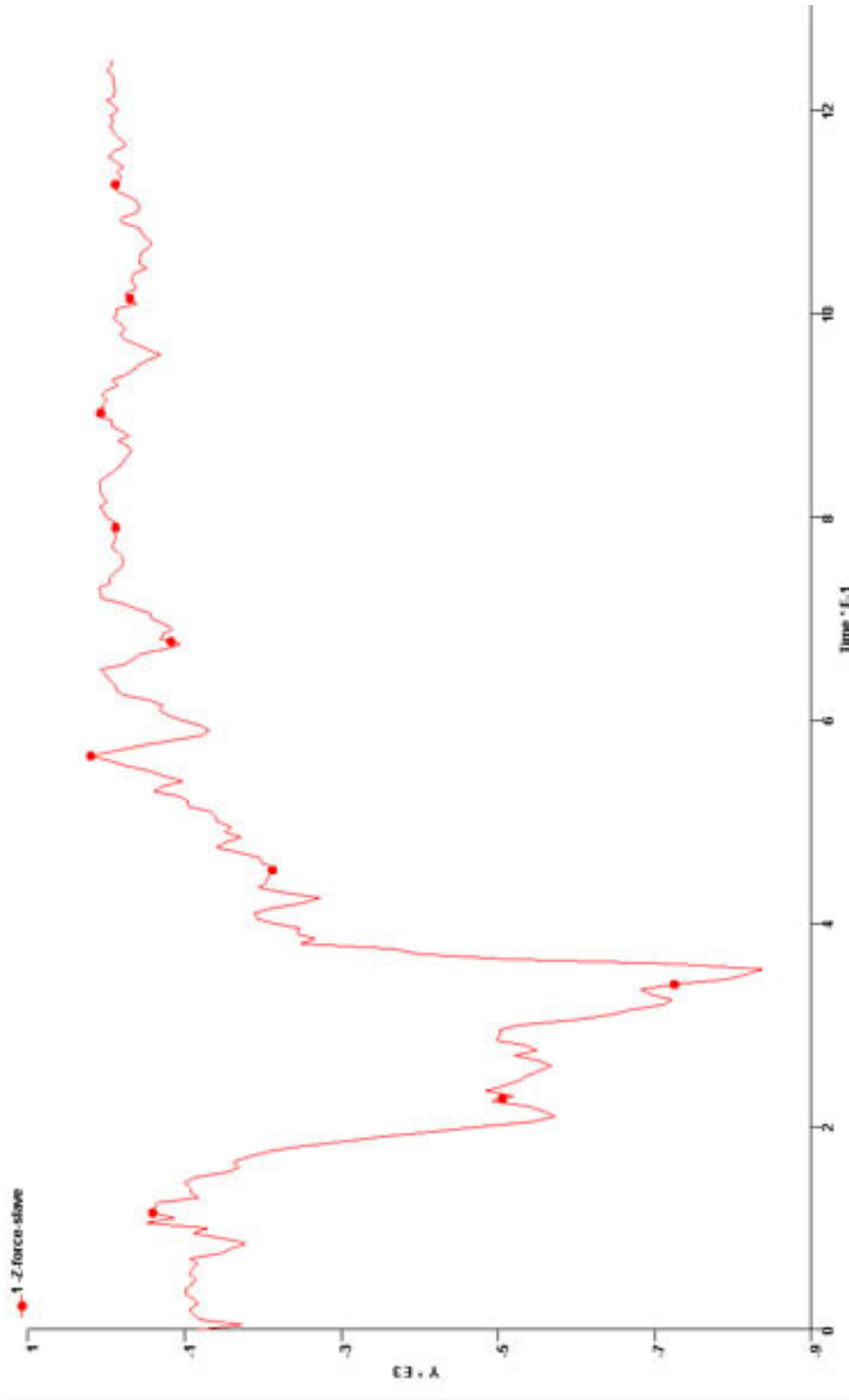
236R



236R

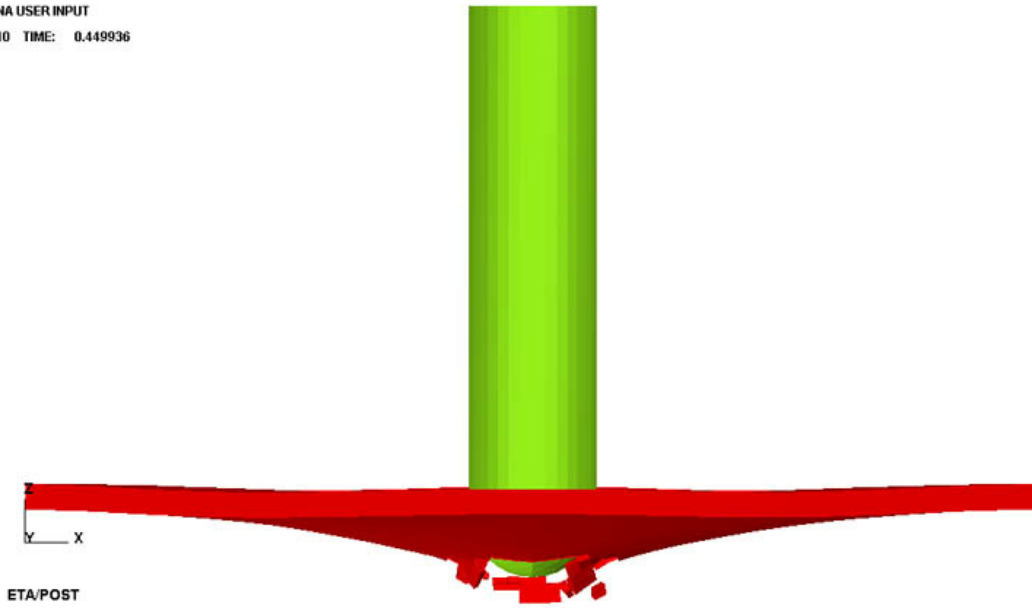


236R

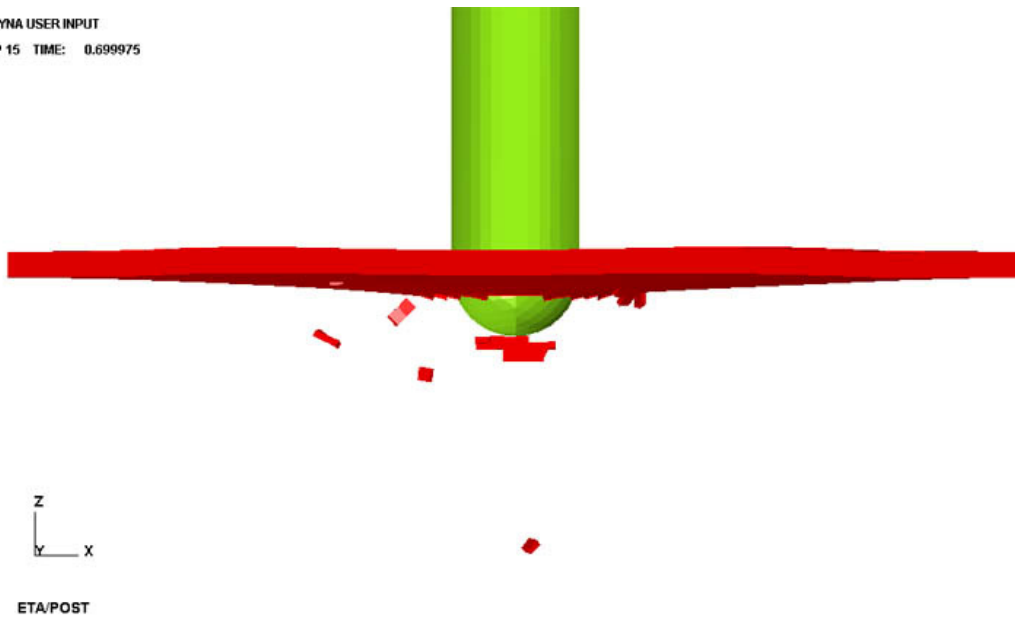


236R

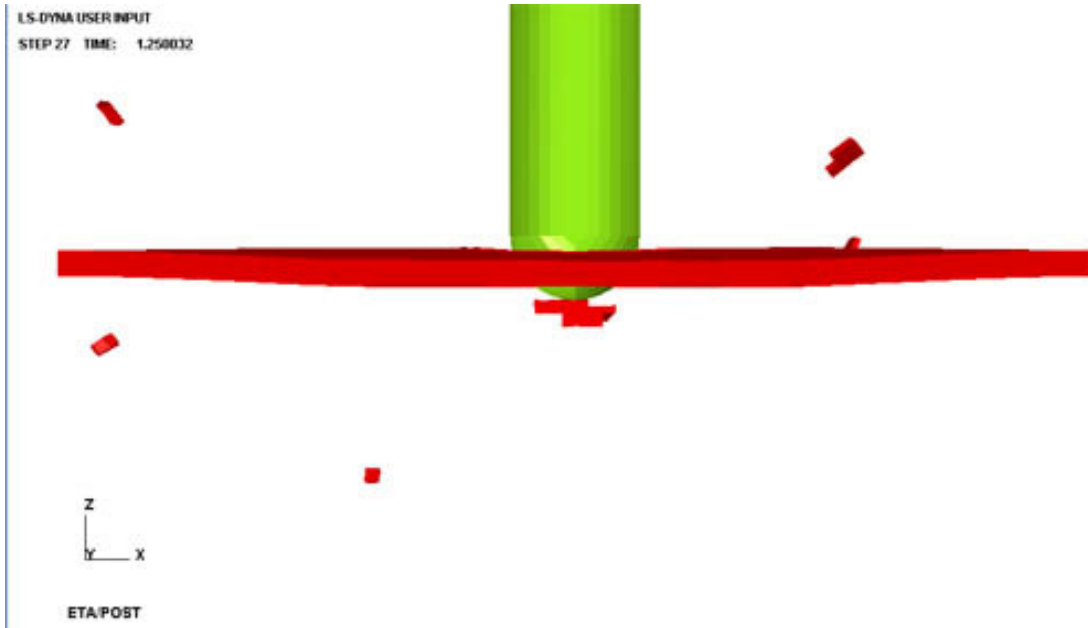
LS-DYNA USER INPUT
STEP 10 TIME: 0.449936



LS-DYNA USER INPUT
STEP 15 TIME: 0.699975

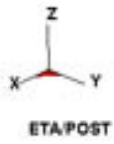
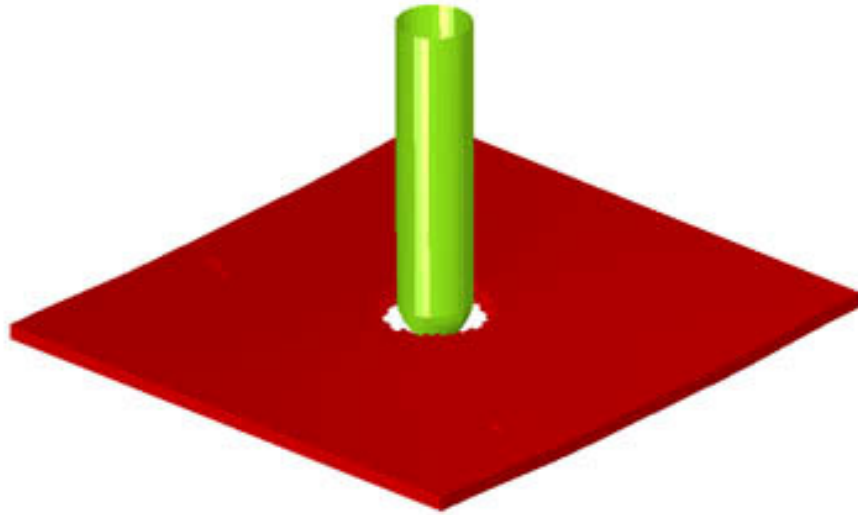


236R

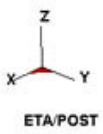
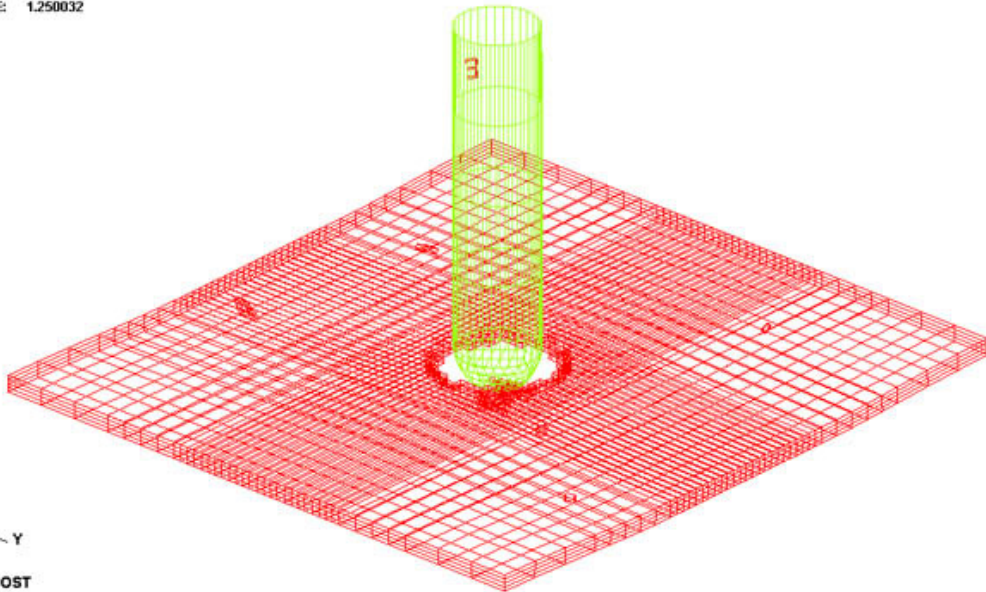


236R

LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250032



LS-DYNA USER INPUT
STEP 27 TIME: 1.250032



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ LS-DYNA

Για να προχωρήσουμε στην διαπίστωση οποιωνδήποτε συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια και την αξιοπιστία του κώδικα , θα έπρεπε να είχαμε την δυνατότητα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα μεγάλου αριθμού πειραμάτων . Ο κώδικας LS-DYNA δείχνει να έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης του φαινομένου και το μορφών κατάρρευσης των δοκιμίων . Ωστόσο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των υλικών μοντελοποίησης και την εισαγωγή των κατάλληλων ιδιοτήτων .

Από την άλλη ο κώδικας , όπως είναι φυσικό δεν μπορεί να προβλέψει ατέλειες και ελαττώματα στο υλικό , ώστε η μορφή κατάρρευσης του δοκιμίου να είναι ανάλογη . Η μοντελοποίηση τέτοιων φαινομένων δεν είναι αδύνατη με την χρήση του κώδικα . Όμως η αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος προϋποθέτει την διεξαγωγή πολλών πειραμάτων και την άριστη γνώση πολλών λεπτομερειών που αφορούν το εξεταζόμενο σώμα (γεωμετρία δοκιμίου , ασυνέχειες υλικού , τοπικά ελαττώματα , πλήρης προσδιορισμός συνθηκών διεπιφάνειας μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του δοκιμίου , κ.λ.π.)

Όσων αφορά στα χαρακτηριστικά μεγέθη (διαγράμματα φορτίου , μεταβολή της κινητικής ενέργειας)είναι δύσκολο να γίνουν κάποιες συγκρίσεις λόγω των ελλিপών πειραματικών στοιχείων .Στα παραπάνω διαγράμματα όπου γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία του κώδικα στην παρακολούθηση της κατάρρευσης του δοκιμίου καθώς και στην μεταβολή ταχύτητας και μετατόπισης.

Οι υπάρχουσες μεταβολές στα διαγράμματα ερμηνεύονται από το γεγονός ότι ο κώδικας αντιλαμβάνεται καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος το υλικό με βάση τις αρχικές ιδιότητες που δώσαμε στο πείραμα αδυνατώντας να λάβει υπόψην οποιεσδήποτε μεταβολές έγιναν κατά την διάρκεια της κατάρρευσης του εξ' αιτίας του επιβαλλόμενου παραμόρφωσης. Αντιλαμβάνεται επίσης ομοιογένεια του υλικού σε όλο του το μέγεθος να χωρίς να λειφθεί υπόψη οποιαδήποτε μεταβολή εξ' αιτίας της κατάρρευσης του .

Αποτελεί σαφώς σημαντικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού σήμερα η χρήση του κώδικα δίνοντας την δυνατότητα πρόβλεψης αποτελεσμάτων διαφόρων καταπονήσεων που διαφορετικά θα απαιτούσαν πλήθος πειραμάτων στα εργαστήρια.

Στα μείων του κώδικα θα πρέπει να καταγραφεί το γεγονός της μεγάλης καθυστέρησης στην επίλυση των μοντέλων σύνθετων διατομών . Καθώς μάλιστα η ευκαμψία είναι ένα από τα ζητούμενα σε ένα κώδικα πεπερασμένων στοιχείων , η οποιαδήποτε καθυστέρηση αποτελούσε ανασταλτικό παράγοντα στην διεύρυνση περαιτέρω φαινομένων με την δημιουργία νέων πολυπλοκότερων μοντέλων . Βέβαια η οποιαδήποτε καθυστέρηση βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με τις δυνατότητες της διατιθέμενης υπολογιστικής ισχύος που σήμερα αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες .

Κλείνοντας θα πρέπει να πούμε ότι η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη και τον σχεδιασμό μίας κατασκευής , όμως απαιτεί την πολύ καλή αντίληψη και γνώση του εξεταζόμενου φαινομένου και όλων των επιμέρους παραμέτρων του , έτσι ώστε να έχει ουσιαστικά αποτελέσματα και να οδηγήσει στον προσδιορισμό και την επιλογή μιας βέλτιστης λύσης .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. YARD REPORT NO YR3982 . “BRITE IMPACT PROGRAMME”
Version September 1989.
2. Journal of Composite Materials (2002).A constitutive model for
glass fibre composites under Impact
3. FEMB(Finite Element Model Builder)USER’S MANUAL (A
pre- and post-processor for use with LS-DYNA) Livermore
Software Technology Corporation , USA.
4. YARD “Brite Impact Test” RI1B – 0215 –C (GDF).
5. KELLY , A. . “Concise Encyclopedia of Composite Materials”,
Revised edition , Pergamon Press , UK,(2000)
6. LS-DYNA USER’S MANUAL,Version 971, Livermore
Software Technology Corporation , USA.(2007)
7. SCHWARTZ , M. “Composite Materials Handbook” , second
edition, McGraw-Hill Inc. , USA, (1998)
8. J.O.HALLQUIST ,G.L. Goudreau,D.j. BENSON, Sliding
interfaces with contact-impact in large scale Lagrangian
computations , Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 51 (1985)
9. T. Belytschko J.I. ,Lin , A three-dimension impact-penetration
algorithm with erosion, Comput.Struct.25(1987)
10. J.D. REID, Admissible modeling errors or modeling
simplifications , Finite Element anal.des.29(1998)
11. Abrate, S.(1998) Impact on composite structures. Cambridge
University Press.

12. Davies , G.A.O. ,Zhang ,X., Zhou, G., and Watson ,S.(1994)
13. Abrate ,S. Impact on laminated composite materials.(1991)
14. Hoffman,O.,The brittle strength of orthotropic materials.J.of composite materials(1987)
15. Ochoa ,O.o. and Engblom ,J.J.(1987).Analysis of progressive failure in composites . Composites science and Technology.
16. DgriECK, J. Analysis of impact on a fibre reinforced plastic. PhD Thesis University of Ghent (1991).
- 17.Tan,T.M. and sun ,C.T. Use of statical indentation laws in impact analysis of laminated composite plates(1985).
18. Stillman ,D.W. and Hallquist ,J.O. INGRID:A three-dimensional mesh for modeling non linear systems.(1985)
19. Spelce , T.and Hallqusist ,J.O. An interactive post-processor for analysis codes NIKE3D, DYNA3D, GEMINI. University of California , Lawrence Livermore National Laboratory (1991)
20. BROUTMAN,L.J.,AGARWAL,B.D., “ANALYSIS AND PERFORMANCE OF FIBER” , second edition , Wiley-interscience Ppublications, USA(1990)
21. CARRUTHERS, J.J., “Some Aspects of the energy Absorption of Composite Materials”, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering –The University of Sheffield,UK, (September 1997).
22. HALLQUIST , J.O. , “LS-DYNA3D THEORETICAL MANUAL” , Livermore Software Technology Corporation , USA.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	1
Εισαγωγή.....	4
Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.....	8
Περιγραφή περιβάλλοντος του κώδικα Ls-Dyna.....	17
Περιγραφή περιβάλλοντος του FEMB.....	20
Σύστημα μονάδων.....	25
Καθορισμός βασικής γεωμετρίας.....	28
Τελική μορφή προσομοίωσης.....	35
Μοντελοποίηση.....	37
Συμπεράσματα και Αξιολόγηση του κώδικα.....	95
Βιβλιογραφία.....	97

