



**Πολυτεχνείο Κρήτης**  
**Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

**Διπλωματική εργασία**

---

*Μελέτη δυναμικής απόκρισης κλασσικού και αυξητικού υλικού με  
τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων*

**Γεωργέλλης Αλέξανδρος**

Επιβλέπων καθηγητής : Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά 2016



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	5
1. Εισαγωγή .....	6
1.1 Γενικά στοιχεία .....	6
1.2 Σκοπός εργασίας .....	6
2. Περιγραφή κραδασμών και καταπόνησης .....	7
2.1 Συνολική καταπόνηση .....	7
2.2 Φύση και μέγεθος κραδασμών .....	7
2.3 Σχέση μεταξύ κραδασμών και τραυματισμού .....	8
3. Αυξητικά υλικά .....	10
3.1 Γενική περιγραφή .....	10
3.2 Ιστορικά στοιχεία και εφαρμογές .....	11
3.3 Αρνητικός λόγος Poisson .....	12
3.4 Χαρακτηριστικά Αυξητικών υλικών .....	14
3.5 Εφαρμογές αυξητικών υλικών .....	14
4. Η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων .....	16
4.1 Το λογισμικό Abaqus .....	17
5. Προσομοίωση αυξητικού και συμβατικού υλικού .....	19
5.1 Πάνελ τύπου σάντουιτς .....	19
5.2 Βήματα προσομοίωσης .....	20
6. Αποτελέσματα προσομοίωσης Αυξητικού – κλασσικού μοντέλου .....	26
6.1 Ανάλυση ιδιοτιμών ιδιομορφών .....	26
6.1.1 Αναλυση ιδιοτιμων ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο .....	26
6.1.2 Αναλυση ιδιοτιμων ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο .....	29
6.2 Δυναμική ανάλυση .....	31
6.2.1 Αυξητικό μοντέλο .....	32
6.2.2 Κλασσικό μοντέλο .....	38
6.3 Συγκριτικά αποτελέσματα αυξητικού – συμβατικού μοντέλου .....	45
7. Συμπεράσματα .....	54
7.1 Προτάσεις διερεύνησης .....	55

Βιβλιογραφία .....	57
Παράρτημα .....	58

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο για την βοήθεια του και την συνέργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς επίσης και τον συνεργάτη του κ. Δροσόπουλο Γεώργιο για την καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε παρόλη την απουσία του από τα Χανιά. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνεργάτη του κ. Σταυρουλάκη, Παύλο Φουράκη, για την υπόδειξη σημαντικού υλικού που χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την υποστήριξη τους στην διάρκεια των σπουδών μου.

*Γεωργέλλης Αλέξανδρος*

## Περίληψη

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού κατά την διαδικασία παραγωγής, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια, καθώς καθορίζει και την συμπεριφορά της κατασκευής. Για αυτό το λόγο η αξιοποίηση νέων υλικών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες κρίνεται επιτακτική. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί και το παράδειγμα των αυξητικών υλικών. Με τον όρο αυξητικά υλικά εννοούμε ουσιαστικά μικροδομές οι οποίες όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν ενδιαφέρον λόγω της ασυνήθιστης συμπεριφοράς τους και για αυτό γίνεται έρευνα για την περαιτέρω αξιοποίησή τους σε πληθώρα εφαρμογών. Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη των αποκρίσεων κλασσικού και αυξητικού μοντέλου, το οποίο θεωρούμε ότι θα τοποθετηθεί σε δομικά μέρη ενός ταχύπλοου σκάφους. Λόγω των δονήσεων που δημιουργούνται σε τέτοιου είδους σκάφη, υπάρχει σημαντική πιθανότητα τραυματισμών στο πλήρωμα, τους χειριστές και τους επιβαίνοντες. Για το λόγο αυτό, γίνεται δοκιμή των συγκεκριμένων μικροδομών για την μελέτη πιθανής απόσβεσης των δονήσεων που δημιουργούνται. Τέλος, χρησιμοποιούμε την μέθοδο Πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση επίδρασης των διεγέρσεων και την σύγκριση των δύο μικροδομών.

## Abstract

The selection of the suitable material during the production process, is one of the most important stages and determines the whole behavior of the structure. For that reason, the use of new materials with improved mechanical properties is imperative. Such case is the example of the auxetic materials. Auxetic materials are structures who have a negative Poisson's ratio and when stretched, they become thicker perpendicular to the applied force. Auxetic microstructures are famous because of their unusual behavior, and recently there has been research for further use of them in a variety of applications. In this thesis, we study the dynamic responses of an auxetic and a conventional material in order to place such materials in a highspeed craft. Due to the vibrations in such vessels, there is a significant likelihood of injuries to the crew, the operators and the occupants. For this reason, the microstructures are tested in order to find the dynamic responses and see if we can use auxetics as a possible damping mechanism of the vibrations generated. Finally, we use the finite element method to simulate the problem and compare the two microstructures.

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά στοιχεία

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού κατά την διαδικασία παραγωγής, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια, καθώς καθορίζει και την συμπεριφορά της κατασκευής. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας, πολλές είναι οι προσπάθειες που γίνονται για την έρευνα και χρησιμοποίηση νέων υλικών και δομών με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Παράγοντες όπως η ανεπαρκής συμπεριφορά των υλικών αλλά και η καταπόνηση τους στο χρόνο, κρίνουν επιτακτική την έρευνα και αξιοποίηση νέων υλικών και μικροδομών. Σε αυτή τη βάση, έχουν αναπτυχθεί νέα υλικά, υψηλής αντοχής τα οποία διαθέτουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής. Μια τέτοια μορφή υλικών αποτελούν τα αυξητικά υλικά. Με τον όρο αυξητικά υλικά εννοούμε ουσιαστικά μικροδομές οι οποίες όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η ονομασία αυτή τους δόθηκε λόγω της αυξανόμενης διατομής που παρουσιάζουν. Για δεκαετίες, έχουν παρουσιαστεί διάφορες γεωμετρικές δομές με αυξητική συμπεριφορά οι οποίες έχουν αναλυθεί και επεξεργαστεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή λόγω της ασυνήθιστης συμπεριφορά τους. Περισσότερα χαρακτηριστικά των αυξητικών υλικών θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες.

Η ανάπτυξη ελαφριών και προηγμένης τεχνολογίας υλικών έχουν συμβάλει στην κατασκευή ισχυρότερων και ταχύτερων ταχύπλοων (*High-speed Craft*). Ωστόσο, τα φορτία που ενεργούν, τόσο στη θέση του χειριστή, όσο και στο υπόλοιπο πλήρωμα και τους επιβάτες, δημιουργούν εκτεταμένη κόπωση αλλά και μυϊκούς τραυματισμούς. Για το λόγο αυτό, η δημιουργία, είτε συστημάτων, είτε δομών που απορροφούν τους κραδασμούς αυτούς, κρίνεται επιτακτική.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη και σύγκριση των αποκρίσεων ενός υλικού με αυξητική συμπεριφορά και ενός κλασσικού υλικού, κάνοντας την υπόθεση ότι θα εφαρμοστεί σε δομικά μέρη ενός ταχύπλοου.

### 1.2 Σκοπός εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό την μελέτη ενός συγκεκριμένου αυξητικού μοντέλου το οποίο έχει προσομοιωθεί σε κατάλληλο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις που έγιναν, βοηθούν στην συνολική κατανόηση της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου φορέα αλλά και στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις αποκρίσεις του σε κατάστρωμα ταχύπλοου σκάφους. Παράλληλα γίνεται και σύγκριση με κλασσικό υλικό ώστε να κατανοήσουμε τις ενδεχόμενες διαφορές τους σε μεγαλύτερο βαθμό. Η εργασία αυτή δεν έχει ως στόχο την εξαγωγή τέλειων και άκρως ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, αλλά την μελέτη μιας έτοιμης και συγκεκριμένης σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά μικροδομής. Στόχος της εργασίας λοιπόν, είναι να διαπιστώσουμε, αν λόγω αυτής της ασυνήθιστης συμπεριφοράς τους, τα αυξητικά υλικά μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε περιβάλλον και να έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Για την πληρέστερη και ακριβέστερη μελέτη του εγχειρήματος αυτού, χρειάζεται εκ νέου δημιουργία μοντέλου με βέλτιστο σχεδιασμό της κατασκευής και βέλτιστη παραμετροποίηση σε μικροδομή, πάχη γραμμών και άλλα στοιχεία που ενδεχομένως χρήζουν τροποποίησης.

## 2. Περιγραφή κραδασμών και καταπόνησης

### 2.1 Συνολική καταπόνηση

Αν σκεφτούμε το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί ένα ταχύπλοο σκάφος, καταλαβαίνουμε ότι λόγω των δυνάμεων που επιδρούν σε κάθε στιγμή, σε κάθε μεγέθους πλεούμενο δημιουργούνται μικρές και μεγάλες δονήσεις. Παρόλα αυτά είναι εξαιρετικά δύσκολο να εκμηδενιστούν οι δονήσεις αυτές, γι αυτό και γίνεται έρευνα στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να υπάρξει ένα «φιλτράρισμα», ένας τρόπος απόσβεσης των δονήσεων αυτών. Οι δονήσεις αυτές πολλές φορές είναι αποτέλεσμα των λειτουργικών συστημάτων, και οδηγούν σε μικρές και μεγάλες αναταράξεις. Πέρα από αυτό το είδος των δονήσεων, η κύρια πηγή των κραδασμών που δημιουργούνται, ( και σαν αποτέλεσμα οι καταπονήσεις των επιβατών ), είναι οι κρούσεις μεταξύ πλοίου – στην περίπτωση που εξετάζεται ταχύπλοου – και κυμάτων, κραδασμοί που δημιουργούνται από την πτώση του ταχύπλοου στην επιφάνεια της θάλασσας, σε συνδυασμό πάντα με τις εξωτερικές συνθήκες αλλά και την ταχύτητα του πλεούμενου. Τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν σε αυτό που ονομάζουμε **συνολική καταπόνηση του σώματος**, πράγμα που έχει συνήθως αντίκτυπο σε μέρη του σώματος όπως τα γόνατα, η μέση και η πλάτη, που έρχονται πιο συχνά σε επαφή με δονούμενες επιφάνειες. Η επίδρασή αυτών των δονήσεων στο ανθρώπινο σώμα, επηρεάζουν την απόδοση και την άνεση των επιβατών και των χειριστών, και σε μερικές περιπτώσεις οδηγούν σε χρόνια προβλήματα υγείας. Για παράδειγμα, η χρόνια έκθεση σε δονήσεις έχει σαν αποτέλεσμα την πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού, ή και ακόμη την δημιουργία συσσωρευμένης κούρασης η οποία λειτουργεί αρνητικά στην απόδοση του χειριστή.

### 2.2 Φύση και μέγεθος κραδασμών

Η μελέτη, όσον αφορά την αλληλεπίδραση των υδροδυναμικών δυνάμεων, μεταξύ της γάστρας του ταχύπλοου και της θάλασσας, είναι χρήσιμη για την κατανόηση των μηχανικών κραδασμών που επιδρούν στο σκάφος. Η βέλτιστη σχεδίαση της γάστρας ενός ταχύπλοου αλλά και η κατάλληλη επιλογή των υλικών κατασκευής, αποτελούν παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν ώστε να περιορίζονται οι κραδασμοί που δημιουργούνται. Ως μηχανικοί κραδασμοί (mechanical shock), ορίζονται οι ξαφνικές **επιταχύνσεις** ενός σώματος, που δημιουργούνται είτε εξαιτίας μιας ξαφνικής δόνησης, είτε πτώσης, είτε κρούσης. Οι κραδασμοί που δημιουργούνται διαφέρουν, και καθορίζονται ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Για παράδειγμα, σε πολύ χαμηλές ταχύτητες του σκάφους, οι επιταχύνσεις αυτές είναι σχετικά μικρές και η συχνότητα τους είναι επίσης μικρή, αντιθέτως όταν τα σκάφη ταξιδεύουν με μεγαλύτερες ταχύτητες, οι κραδασμοί δεν είναι αμελητέοι, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η πιθανότητα τραυματισμού ενός επιβαίνοντα.





Η θεωρητική γνώση, για το πώς οι κραδασμοί δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της γάστρας του σκάφους με τη θάλασσα και παράλληλα ποιο είναι το μέγεθος των τάσεων που αναπτύσσονται στις επιφάνειες του ταχύπλοου, είναι χρήσιμη για τη συνολική κατανόηση και μοντελοποίηση του προβλήματος και έπειτα, τη βέλτιστη κατασκευή του σκάφους. Παράλληλα όμως, η καταγραφή δεδομένων σε πραγματικές συνθήκες παραμένει αναγκαία προκειμένου να καθοριστεί η συγκεκριμένη συμπεριφορά των σκαφών κάτω από διάφορες συνθήκες στη θάλασσα. Για την μελέτη λοιπόν της απόκρισης του αυξητικού υλικού που θα εφαρμόσουμε στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούμε την μελέτη “*Analysis and Mitigation of Mechanical Shock Effects on High Speed Planning Boats*” κατά την διάρκεια έρευνας του “Massachusetts Institute of Technology”, από την οποία χρησιμοποιούμε τα πειραματικά αποτελέσματα. Κατά την πειραματική διαδικασία τοποθετήθηκε ειδικής χρήσης επιταχυνσιόμετρο το οποίο μετρούσε την ώρα, την ημερομηνία και τις αντίστοιχες επιταχύνσεις κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σαν είσοδος στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για να προσομοιώσουμε τις αποκρίσεις των μοντέλων.

## 2.3 Σχέση μεταξύ κραδασμών και τραυματισμού

Προκειμένου να καθορίσουμε τη σχέση μεταξύ των κραδασμών και της καταπόνησης, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο σώμα ανταποκρίνεται σε δονήσεις και κρούσεις. Για την ανάλυση αυτή, υπάρχουν πολλές σκέψεις, σχετικά με τη εύρεση της κατάλληλης παραμέτρου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των επιπτώσεων που δημιουργούν οι κραδασμοί. Οι πιο συχνές παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Παρόλα αυτά, η πιο διαδεδομένη μεθοδολογία για την μελέτη αυτή, αποτελεί η χρήση της **επιτάχυνσης** ως κύριας παραμέτρου για την μελέτη των δονήσεων που υπόκεινται οι επιβαίνοντες. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει μια σχετική ευκολία στην λήψη των δεδομένων της επιτάχυνσης σε σχέση τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Παρόλα αυτά, η ανάλυση της απόκρισης του ανθρώπινου σώματος είναι δύσκολη λόγω της πολύπλοκης φύσης του ίδιου του ανθρώπινου σώματος. Το σώμα είναι ένα μηχανικό και βιολογικό σύστημα, και η συμπεριφορά του διέπεται από συνδυασμένες μηχανικές και βιολογικές ιδιότητες. Παράλληλα, παράγοντες όπως η κληρονομικότητα, η διατροφή, η καθημερινή φυσική δραστηριότητα, το ιστορικό τραυματισμών ή ασθένειας, και γενικότερα η φυσική κατάσταση, μπορεί να αναδείξει σημαντικές διαφορές στον τρόπο που αντιδρά ένα

άτομο στους κραδασμούς που δημιουργούνται, σε σύγκριση με ένα άλλο. Παρακάτω παρατίθεται μια ενδεικτική παρουσίαση της καταπόνησης σε διάφορα μέρη του σώματος.

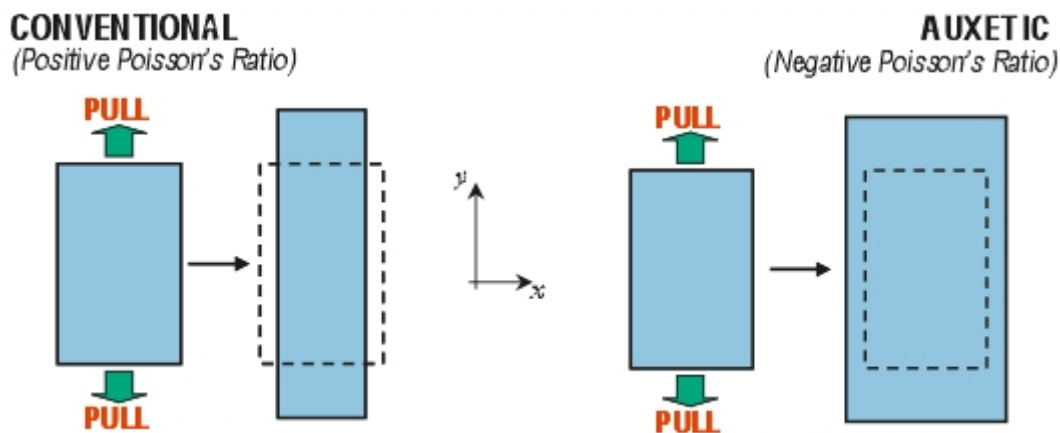
<b>Injury Location:</b>	<b># of Injuries at Location:</b>
Head	3
Neck/Upper Back	9
Shoulder	21
Elbow	2
Wrist	1
Hand	1
Trunk	2
Lower Back	50
Hip/Buttocks	6
Thigh	2
Knee	32
Leg	7
Ankle	10
Foot	3
<b>Total</b>	<b>149</b>

Εικόνα 1. Καταπόνηση σώματος

### 3. Αυξητικά υλικά

#### 3.1 Γενική περιγραφή

Όταν ένα κοινό υλικό υπόκειται εφελκυσμό σε μία κατεύθυνση, προκαλείται μεταβολή του μήκους του σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση στην οποία υπάρχει η φόρτιση, πραγματοποιείται δηλαδή μείωση της διατομής του (συρρίκνωση). Αντίστοιχα, όταν συμπιέζεται ένα κοινό υλικό, στην κάθετη κατεύθυνση από αυτή στην οποία εφαρμόζεται η κλίση το υλικό εμφανίζει επιμήκυνση. Ο λόγος Poisson μετράει αυτή τη μεταβολή του μήκους ενός ελαστικού υλικού, η οποία πραγματοποιείται κάθετα στην κατεύθυνση του εκάστοτε εφαρμοζόμενου φορτίου, είναι συνήθως θετικός αριθμός  $0 < \nu < 0.5$  και ορίζεται ως το αρνητικό κλάσμα της εγκάρσια τροπής προς την αξονική τροπή. Τα υλικά που εμφανίζουν αρνητικό λόγο Poisson ονομάζονται αυξητικά (auxetic materials). Πρόκειται ουσιαστικά για μικροδομές οι οποίες όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η ονομασία αυτή τους δόθηκε λόγω της αυξανόμενης διατομής που παρουσιάζουν, ενώ εμφανίζονται και με άλλες ονομασίες, όπως αντί-καουτσούκ (anti-rubber) επειδή όταν είναι τεντωμένα γίνονται παχύτερα σε εγκάρσια τομή, σε αντίθεση με το καουτσούκ που γίνεται λεπτότερο. Ονομάζονται επίσης και dilatational materials (υλικά που διογκώνονται) διότι ενώ τα κοινά υλικά μπορούν εύκολα να υποστούν διατμητική παραμόρφωση και όχι τόσο μεταβολή όγκου, τα αυξητικά υλικά εμφανίζουν εύκολη μεταβολή στον όγκο. Πολλές διαφορετικές μικροδομές έχουν διαμορφωθεί προκειμένου να εξηγηθεί και να μοντελοποιηθεί η αυξητική συμπεριφορά.

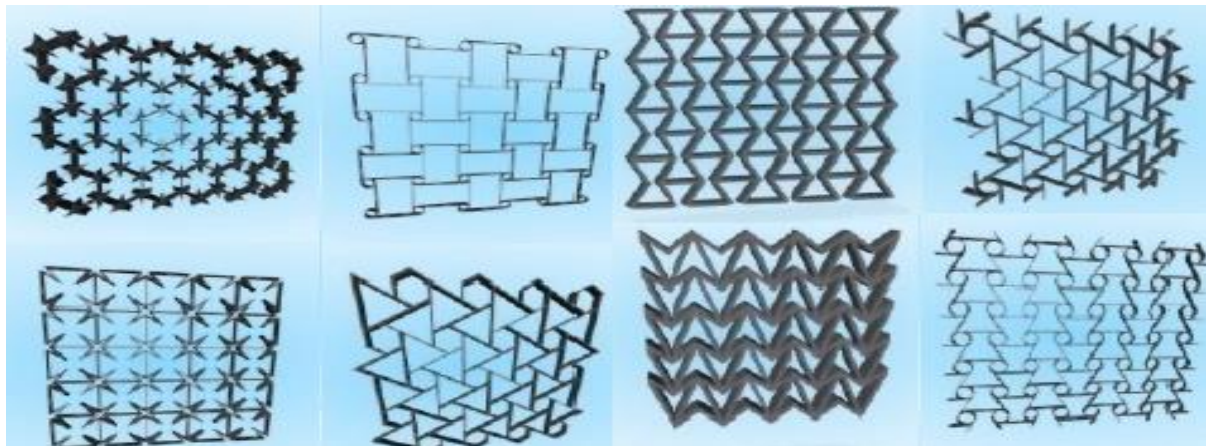


Εικόνα 2. Χαρακτηριστικά κλασσικού και αυξητικού υλικού

### 3.2 Ιστορικά στοιχεία και εφαρμογές

Για δεκαετίες, έχουν παρουσιαστεί διάφορες γεωμετρικές δομές με αυξητική συμπεριφορά οι οποίες έχουν αναλυθεί και επεξεργαστεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή λόγω της ασυνήθιστης συμπεριφορά που παρουσιάζουν. Το 1987, ο Lakes ανέπτυξε για πρώτη φορά τον αφρό πολυουρεθάνης, με αρνητικό λόγο Poisson, με αυξητική δομή (Lakes, 1987a and 1987b). Αυτός ο πολυμερής αφρός είχε λόγο Poisson  $-0,7$ . Αυτά τα νέου τύπου υλικά ονομάστηκαν αυξητικά από τον Evans (Evans, et al, 1991), τα οποία σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά (όπως το καουτσούκ, γυαλί, μέταλλα, κ.λπ.) έχουν την ιδιότητα να γίνονται παχύτερα όταν τεντώνονται, ή να γίνονται λεπτότερα όταν συμπιέζονται. Ο όρος αυξητικά "Auxetics" προέρχεται από την Ελληνική λέξη auxetos, που σημαίνει «εκείνο το οποίο μπορεί να αυξηθεί».

Τα αυξητικά υλικά είναι γνωστά για πάνω από 100 χρόνια, παρόλα αυτά ειδικά στην αρχή δεν δόθηκε αρκετή προσοχή σε αυτά καθώς και σε εφαρμογές που θα μπορούσαν να έχουν. Μέχρι σήμερα, μεγάλη ποικιλία αυξητικών υλικών έχει κατασκευαστεί, σε αυτά περιλαμβάνονται πολυμερείς και μεταλλικοί αφροί, μικροπορώδη πολυμερή, ελάσματα ανθρακονημάτων καθώς και δομές κυψελών. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το ευρέως γνωστό τεφλόν (συνθετικό πολυμερές- πολυτετραφθοροαιθυλενίου PTFE), το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια. Άλλα παραδείγματα υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα αρνητικού λόγου Poisson είναι το μικροπορώδες, εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE), το πολυπροπυλένιο (PP) (Caddock & Evans, 1989; Picklrs, et al, 1996; Alderson, et al, 2000), καθώς και αρκετοί τύποι πετρωμάτων (Nur & Simmons, 1969). Παρόλα αυτά, τα ειδικά χαρακτηριστικά τους δεν είχαν γίνει ευρέως γνωστά μέχρι σχετικά πρόσφατα, όπου η δουλειά του Lakes, του Evans και άλλων επιστημόνων προσέλκυσε την προσοχή στα αυξητικά υλικά. Τα αυξητικά υλικά τυγχάνουν ενδιαφέροντος λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, όπως διατμητική αντοχή, αντίσταση στην παραμόρφωση και αντοχή σε θραύση (Lakes, 1987a; Evans, 1990), σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται. Συνεπώς, η μελέτη τέτοιου τύπου μη συμβατικών υλικών είναι πραγματικά σημαντική από την σκοπιά στοιχειώδους έρευνας καθώς και πιθανών πρακτικών εφαρμογών, ιδιαίτερα στο πεδίο της ιατρικής, της αεροδιαστημικής καθώς και της βιομηχανίας. Στην πραγματικότητα, μερικά υλικά με τέτοιου είδους ασυνήθιστες ιδιότητες έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπως είναι ο πυρολιθικός γραφίτης που χρησιμοποιείται για θερμική προστασία στην αεροδιαστημική καθώς και δομή κρυστάλλων Ni3Al σε βάνες στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.



Εικόνα 3. Αυξητικές δομές

### 3.3 Αρνητικός λόγος Poisson

Είναι γνωστό, ότι ο λόγος Poisson, ορίζεται από το λόγο της εγκάρσιας συστολής προς τον διαμήκη επέκταση σε μια απλή κατάσταση έντασης (Fung, 1968).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\frac{\Delta y}{l_y}}{\frac{\Delta x}{l_x}} = -\frac{\Delta y}{\Delta x} \Rightarrow \nu < 0 \quad \text{με } \Delta x, \Delta y > 0$$

Στα γραμμικά ελαστικά υλικά, οι σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης προέρχονται από το γενικευμένο κανόνα του Hooke. Τέσσερα είναι τα βασικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίσουμε την συμπεριφορά ενός ισοτροπικού γραμμικού ελαστικού υλικού: το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο διάτμησης (ή μέτρο δυσκαμψίας) (G), το μέτρο ελαστικότητας όγκου (K) και η αναλογία Poisson ( $\nu$ ), τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους με βάση τις σχέσεις που ακολουθούν :

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

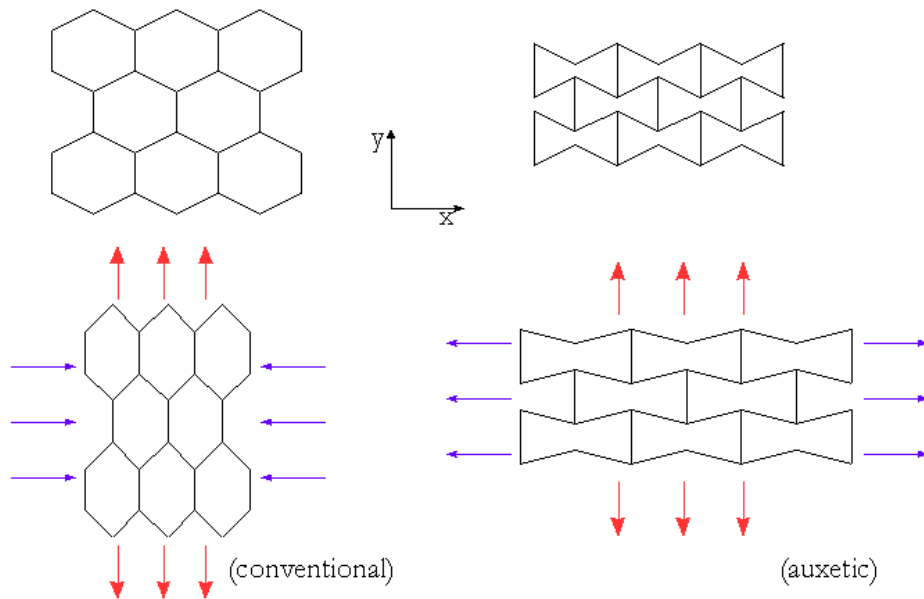
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$E = \frac{9KG}{(3K + G)} \quad (3)$$

$$\left( \frac{(1+\nu)}{(1-2\nu)} \right) = \frac{3K}{2G} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left( \frac{3K - 2G}{3K + G} \right) \quad (5)$$

Σύμφωνα με τις πρώτες δύο εξισώσεις ο λόγος Poisson ενός υλικού δεν μπορεί να είναι μικρότερος από -1.0 και μεγαλύτερος από 0.5 εφόσον είναι αναγκαία συνθήκη το μέτρο διάτμησης και το μέτρο ελαστικότητας όγκου να έχουν θετικές τιμές. Έτσι, καθώς το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) αφορά την παραμόρφωση δισδιάστατων υλικών ενώ το μέτρο διάτμησης και το μέτρο ελαστικότητας όγκου χαρακτηρίζουν τρισδιάστατα υλικά, προκύπτει ότι ο ομογενοποιημένος λόγος Poisson μπορεί να πάρει τιμές από  $-1.0 < \nu < 0.5$  σε 3D δομές και  $-1.0 < \nu < 1.0$  σε 2D δομές.



**Εικόνα 4.** Αυξητική και κλασσική μικροδομή υπο την επίδραση εφελκυστικών δυνάμεων



### 3.4 Χαρακτηριστικά Αυξητικών υλικών

Γενικά, υλικά με αρνητικό λόγο Poisson έχουν τις ακόλουθες ειδικές ιδιότητες:

- Υψηλή εντός επιπέδου αντίσταση σημειακής παραμόρφωσης
- Καλή δυσθραυστότητα
- Υψηλό εγκάρσιο μέτρο διάτμησης
- Υψηλές δυναμικές ιδιότητες

### 3.5 Εφαρμογές αυξητικών υλικών

Τα υλικά με αρνητικό λόγο Poisson ή αυξητικά προσφέρουν μια εναλλακτική και σχεδόν ανεξερεύνητη πρόταση στην επιλογή υλικών για αναρίθμητα προϊόντα και εφαρμογές. Ο συνδυασμός των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά φέρνει πιο κοντά στην πραγματικότητα εφαρμογές που είναι αδύνατες μέχρι σήμερα και βελτιώνει σημαντικά τις επιδόσεις από ήδη υπάρχουσες εφαρμογές. Τις προηγούμενες δεκαετίες μελέτες με την υποστήριξη από γνωστούς φορείς, πιστοποίησαν και τεκμηρίωσαν τις ιδιότητες των αυξητικών υλικών, πρότειναν νέες χρήσεις και μεθόδους παραγωγής και συγκέντρωσαν το επιστημονικό ενδιαφέρον. Η πρόοδος όσον αφορά τις μεθόδους παραγωγής των αυξητικών υλικών προδιαθέτει για την εμφάνιση πολλών καινοτόμων εφαρμογών στον βιομηχανικό κλάδο άλλα και σε άλλους τομείς. Κάποιες χαρακτηριστικές εφαρμογές των αυξητικών υλικών είναι οι εξής:

- **Σύνθετα υλικά με αυξητικές ίνες**

Τα σύνθετα υλικά με αυξητικές ίνες παρουσιάζουν βελτιωμένες επιδόσεις στην αντοχή. Οι αυξητικές ίνες διαστέλλονται διατμητικά στις αξονικές εφελκυστικές τάσεις άρα θα είναι δυσκολότερο να αποτραβηχτούν μέσα από τη μήτρα, πράγμα που είναι προαπαιτούμενο για την αστοχία του σύνθετου υλικού.

- **Αισθητήρες**

Τα αυξητικά υλικά είναι ελκυστική επιλογή για την κατασκευή υδρόφωνων και αισθητήρων γενικότερα λόγω της μικρής τιμής του μέτρου διόγκωσης ( $K$ ) που εμφανίζουν. Το μικρό μέτρο διόγκωσης σημαίνει ευκολία στις υδροστατικές μεταβολές του όγκου, άρα ευαισθησία στις κυματικές διαταραχές από το εξωτερικό περιβάλλον του αισθητήρα. Ο σκοπός των αισθητήρων είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο ευαίσθητοι στις μεταβολές του περιβάλλοντός τους. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται και οι συνδυαστικές εφαρμογές με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.

- **Βιοϊατρική**

Ένας ιδιαίτερα ενδιαφέρον κλάδος που έχει να αποκομίσει πολλά από τις εφαρμογές με τα αυξητικά υλικά είναι αυτός της Βιοϊατρικής. Μια χαρακτηριστική εφαρμογή είναι με τις αυξητικές τεχνητές αρτηρίες. Αν η τεχνητή αρτηρία είναι από μη – αυξητικό υλικό, τείνει να λεπταίνει στο πάχος των τοιχωμάτων της ως αντίδραση στο κύμα αίματος που προκύπτει από τον παλμό της καρδιάς. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε ρήξη της

αρτηρίας με καταστροφικές συνέπειες. Για αυτό το λόγο προτάθηκε η χρήση αυξητικού υλικού για τις τεχνητές αρτηρίες.

- **Δομές απόσβεσης**

Η περίπλοκη εσωτερική, των αυξητικών υλικών, γεωμετρία διευκολύνει την διασπορά και την απορρόφηση των ηχητικών κυμάτων. Προϊόντα που χρησιμοποιούνται στην ηχομόνωση αλλά και στην απορρόφηση ενέργειας κρούσης είναι από τις πιθανές διεξόδους που μπορούν να βρουν οι αυξητικές εφαρμογές στην αγορά. Ωτοασπίδες, υλικό ηχομόνωσης, προφυλακτήρες αυτοκινήτων, συσκευασία (με την ευρεία έννοια) είναι μερικές από αυτές τις εφαρμογές.



## 4. Η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Elements Method*), χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση των πολύπλοκων κατασκευών και κατατάσσεται πρώτη μεταξύ των μοντέρνων εργαλείων σχεδιασμού στην βιομηχανία, στην ναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε εφαρμογές πολιτικών μηχανικών. Οι βάσεις της μεθόδου αυτής τέθηκαν τη δεκαετία του 1940, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης πάσης φύσεως κατασκευής. Οι βασικοί ημιεμπειρικοί κανόνες και οι λύσεις κλειστής μορφής αδυνατούν να αποδώσουν επαρκώς τα πεδία μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και τάσεων σε προβλήματα που παρουσιάζουν πολυπλοκότητα ως προς την συμπεριφορά των υλικών, τη γεωμετρία των δομικών στοιχείων, το είδος των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών.

Κατά αυτό τον τρόπο, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια υπολογιστική μέθοδο που επιλύει με προσεγγιστικές μεθόδους τις θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν μια ευρεία ομάδα προβλημάτων συνεχούς μέσου, τα οποία έχουν αυθαίρετη γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες και φόρτιση. Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε επιμέρους τμήματα όπου τα τμήματα αυτά ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στην απόλυτα ορισμένη αυτή περιοχή κάθε πεπερασμένου στοιχείου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας, και εν συνεχεία γίνεται συναρμολόγηση όλων των εξισώσεων αυτών για την επίλυση τους στα πλαίσια του συνεχούς μέσου. Επομένως, η μέθοδος επιλύει κάθε πρόβλημα που περιγράφεται από μια μερική διαφορική εξίσωση, όπως προβλήματα παραμορφώσιμων στερεών, μετάδοσης θερμότητας, μηχανικής των ρευστών, και προσεγγίζεται από ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται προσεγγιστικά με τεχνικές γραμμικής άλγεβρας.

Συγκεκριμένα για την ανάλυση των τάσεων των μελών ενός δικτύωματος, η μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί την εξής διαδικασία:

- Υπολογισμός των μητρώων δυσκαμψίας και των διανυσμάτων φόρτισης κάθε στοιχείου.
- Συναρμολόγηση επιμέρους μητρώων δυσκαμψίας για την δημιουργία του ολικού μητρώου δυσκαμψίας.
- Επίλυση του συστήματος των γραμμικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των αγνώστων κομβικών βαθμών ελευθερίας του συστήματος (μετατοπίσεις) και των αντιδράσεων στα σημεία (κόμβους) όπου οι μετατοπίσεις έχουν προκαθορισμένη τιμή.
- Χρήση των υπολογισμένων, από το παραπάνω βήμα, κομβικών μετατοπίσεων για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων τους και εν συνεχεία των τάσεων των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος επινοήθηκε και εφαρμόστηκε, αρχικά, για τη στατική ανάλυση φορέων, όμως έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μια ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων μηχανικού. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών με τις ολοένα μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και τη αύξηση της ταχύτητας εκτέλεσης των αριθμητικών πράξεων, κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων ενός μηχανικού.

## 4.1 Το λογισμικό Abaqus

Για την εκπόνηση της προσομοίωσης των δύο υπό εξέταση μοντέλων, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα ABAQUS/cae. Το ABAQUS/cae είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον που παρέχει μια απλή και εύχρηστη διεπιφάνεια για δημιουργία, εκτέλεση, έλεγχο και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit. Το ABAQUS/cae είναι χωρισμένο σε ενότητες, η κάθε μία εκ των οποίων είναι ένα λογικό βήμα στη διαδικασία της μοντελοποίησης: ορισμός γεωμετρίας, ορισμός ιδιοτήτων των υλικών, κατασκευή πλέγματος. Καθώς γίνεται η μετάβαση από ενότητα σε ενότητα, κατασκευάζεται το μοντέλο από το οποίο το ABAQUS/cae παράγει ένα αρχείο input το οποίο στη συνέχεια εκτελείται στο περιβάλλον ανάλυσης Abaqus/Standard ή Abaqus/Explicit. Το περιβάλλον ανάλυσης διενεργεί την ανάλυση, στέλνει πληροφορίες στο ABAQUS/cae που επιτρέπουν τον έλεγχο της προόδου της διαδικασίας και τέλος, παράγει μία βάση δεδομένων (output database). Τελικά χρησιμοποιείται η ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) του ABAQUS/cae (ή το ξεχωριστό πρόγραμμα ABAQUS/Viewer) για να διαβαστεί η βάση δεδομένων και να μπορέσουν να διαβαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στο σημείο θα ήταν καλό να αναφέρουμε μερικά βασικά στοιχεία για τα προγράμματα Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit. Το Abaqus/Standard είναι ένα γενικού σκοπού πρόγραμμα ανάλυσης το οποίο μπορεί να επιλύσει ένα μεγάλο εύρος γραμμικών και μη – γραμμικών προβλημάτων περιλαμβάνοντας τη στατική, δυναμική, θερμική και ηλεκτρική απόκριση των δομικών στοιχείων. Το Abaqus/Standard επιλύει ένα σύστημα εξισώσεων «σιωπηρά» σε κάθε βήμα επίλυσης, ενώ σε αντίθεση το Abaqus/Explicit υλοποιεί μία λύση κατά την έννοια του χρόνου σε μικρά χρονικά βήματα χωρίς να επιλύει το αντίστοιχο σύστημα εξισώσεων σε κάθε βήμα επιλύοντας τις δυναμικές εξισώσεις ισορροπίας χωρίς να απαιτείται κάθε φορά η δημιουργία του γενικού μητρώου στιβαρότητας. Επιπλέον, το Abaqus/Explicit είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης ειδικού σκοπού, το οποίο χρησιμοποιεί μία ρητή, δυναμική διατύπωση πεπερασμένων στοιχείων. Είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση σύντομων και παροδικών δυναμικών φαινομένων και επίσης είναι αρκετά αποτελεσματική σε έντονα μη-γραμμικά προβλήματα που σχετίζονται και με την αλλαγή της επιφάνειας επαφής δύο σωμάτων που αλληλεπιδρούν

Όσον αφορά την επιλογή ανάμεσα στο Abaqus/Standard και στο Abaqus/Explicit για διάφορες αναλύσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης μπορούμε να κρίνουμε ποιο από τα δύο είναι καταλληλότερο. Υπάρχουν συγκεκριμένα στατικά ή ημι-στατικά προβλήματα (όπως για παράδειγμα οι μοντελοποιήσεις διαδικασιών διαμόρφωσης υλικών όπου έχουμε την αλλαγή των επιφανειών επαφής) που μπορούν να επιλυθούν με οποιοδήποτε από τα δύο προγράμματα. Τυπικά, αυτά είναι προβλήματα που θα μπορούσαν να επιλυθούν με το Abaqus/Standard όμως είναι πιθανό να υπάρχει δυσκολία σύγκλισης εξαιτίας επαφής ή συνθετότητα των ιδιοτήτων των υλικών, με συνέπεια να έχουμε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Τέτοιου είδους ανάλυση είναι αρκετά δαπανηρή στο Abaqus/Standard επειδή σε κάθε επανάληψη χρειάζεται να επιλυθεί ένα σύστημα από γραμμικές εξισώσεις. Ενώ λοιπόν το Abaqus/Standard πρέπει να πραγματοποιήσει επαναλήψεις για να καθορίσει τη λύση ενός μη – γραμμικού προβλήματος, το Abaqus/Explicit καθορίζει τη λύση χωρίς επαναλήψεις αλλά επάγοντας άμεσα την κινηματική κατάσταση από το προηγούμενο βήμα. Ακόμη και αν μία δεδομένη ανάλυση χρειάζεται πολλά χρονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας την άμεση (explicit) μέθοδο, η ανάλυση σε Abaqus/Explicit είναι πιο αποτελεσματική αν η ίδια ανάλυση σε Abaqus/Standard απαιτεί αρκετές επαναλήψεις. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της ανάλυσης σε Abaqus/Explicit είναι ότι απαιτεί σημαντικά μικρότερη

μνήμη και χώρο στο δίσκο σε σχέση με το Abaqus/Standard για την ίδια ανάλυση. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι όλες οι αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούν το πρόγραμμα Abaqus/Standard για την εύρεση της λύσης ικανοποιώντας τις σχέσεις στατικής ισορροπίας.

## 5. Προσομοίωση αυξητικού και συμβατικού υλικού

### 5.1 Πάνελ τύπου σάντουιτς

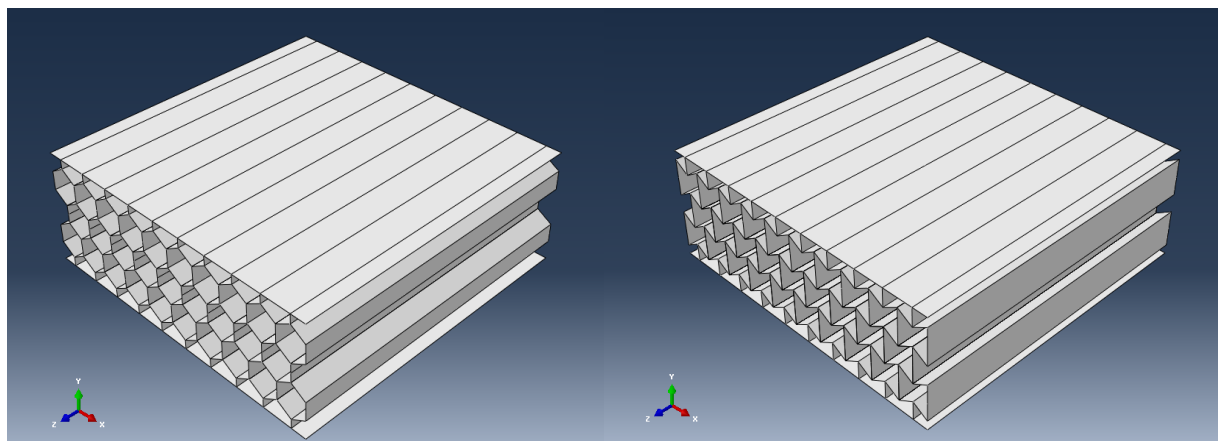
Η ιδέα για την κατασκευή στοιχείων τύπου σάντουιτς αναπτύχθηκε στις αρχές του 19ου αιώνα, ωστόσο η ανάπτυξη τους αυτή ολοκληρώθηκε τον 20ο αιώνα. Η χρήση κατασκευών τύπου σάντουιτς επικράτησε σε πολλές κατασκευές χάρη στα ποικίλα πλεονεκτήματα που προσφέρει όσον αφορά την εξοικονόμηση βάρους και την υψηλή ακαμψία. Γενικά, τα πάνελ τύπου σάντουιτς αποτελούνται από τον πυρήνα που βρίσκεται στην μέση και είναι από ελαφρύ υλικό και έχει ως κύριο σκοπό την μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο επιστρώσεων, οι οποίες με την σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης που εφαρμόζονται στο επίπεδο τους. Οι επιστρώσεις είναι κολλημένες στις κύριες επιφάνειες του πυρήνα με κατάλληλο τρόπο που εξαρτάται από τον τύπο του στρωματοειδούς. Κάθε μέρος αυτής δομής από μόνο του είναι αδύναμο και εύκαμπτο, όταν λειτουργεί όμως ως σύνολο παρέχει μια άκαμπτη, ισχυρή και ελαφριά δομή. Τέτοιου είδους σάντουιτς πάνελ προσφέρουν πολλαπλές εφαρμογές στον τομέα της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο πυρήνας κατασκευάζεται από αφρώδη υλικά, δικτυώματα και κυψέλες. Πολλές μελέτες έχουν προσπαθήσει να μοντελοποιήσουν τις μηχανικές ιδιότητες δομών τύπου σάντουιτς με χρήση μαθηματικής μοντελοποίησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA).

Συμβατικές εξαγωνικές κυψέλες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του πυρήνα κατασκευών σάντουιτς. Ένα πλεονέκτημα της κυψελοειδούς δομής είναι η αντίσταση της στη κόπωση. Οι αυξητικές κυψέλες είναι κυτταρικές δομές στις οποίες αντιστρέφεται η γωνιά μιας μονάδας κελιού σε αρνητική. Στην αυξητική δομή με την αντιστροφή της γωνίας μεταβάλλεται και ο λόγος Poisson σε αρνητικές τιμές.

## 5.2 Βήματα προσομοίωσης

Οι μικροδομές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της μελέτης αποτελούν προϊόν προηγούμενης μελέτης σχετικά με την γενικότερη συμπεριφορά των αυξητικών υλικών κατά την διατριβή του Συντζανάκη Αντώνιου με θέμα “ *Μελέτη Αυξητικών Κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία* “. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια εφαρμογής του συγκεκριμένου μοντέλου ώστε να διαπιστώσουμε αν τα αυξητικά υλικά υπερτερούν των κλασσικών σε κάθε περίπτωση. Δεδομένου ότι το πρόβλημα των δονήσεων και οι δυναμικές αποκρίσεις είναι ένα περίπλοκο ζήτημα που χρήζει επίλυσης, δεν είναι δεδομένο ότι το αυξητικό υλικό θα έχει καλύτερη συμπεριφορά.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το ABAQUS/cae είναι χωρισμένο σε ενότητες, η κάθε μία εκ των οποίων είναι ένα λογικό βήμα στη διαδικασία της μοντελοποίησης: ορισμός γεωμετρίας, ορισμός ιδιοτήτων των υλικών, επιλογή του είδους επίλυσης και κατασκευή πλέγματος. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα της προσομοίωσης των δύο μοντέλων.



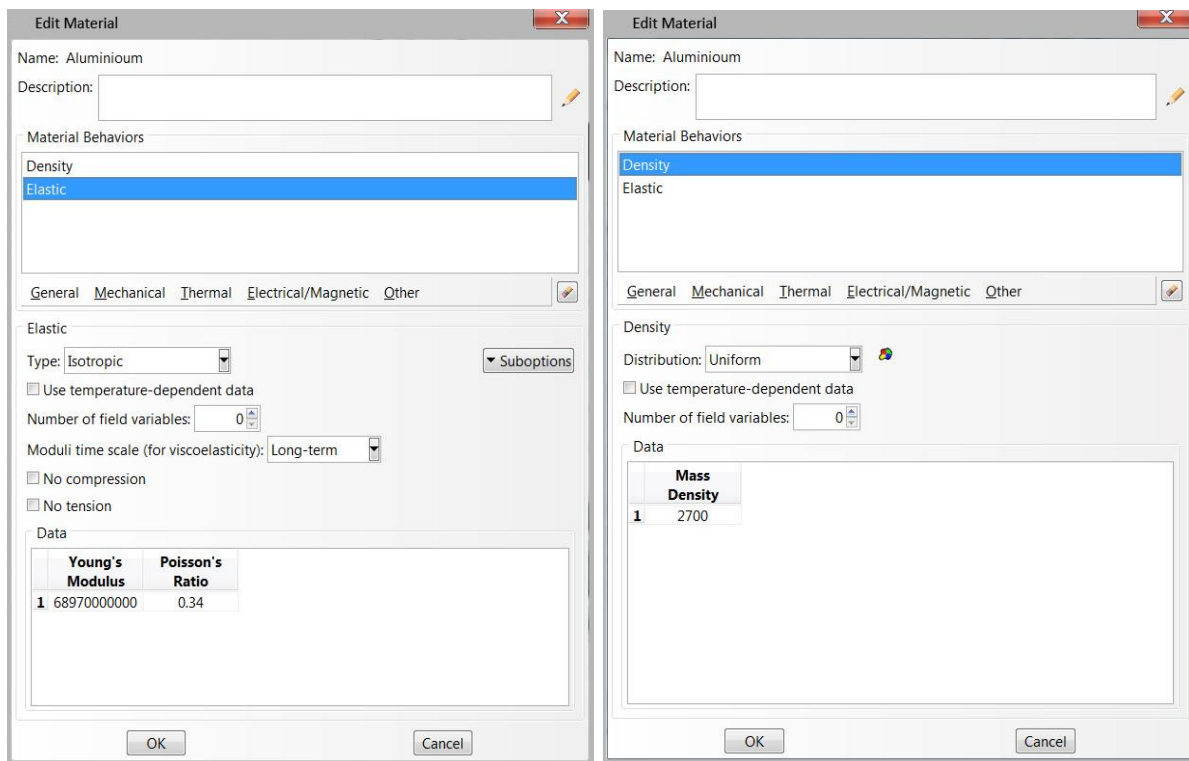
Εικόνα 5. Αυξητικό και κλασσικό μοντέλο

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Abaqus προχωρήσαμε σε μια διαδικασία ανάλυσης των μικροδομών. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά κάποια από τα στάδια της προσομοίωσης.

Αρχικά καθορίζουμε τις ιδιότητες του υλικού. Επιλέγουμε αλουμίνιο με τα εξής χαρακτηριστικά:

Material	Young's Modulus E(Gpa)	Poisson's Ratio, $\nu$	Density, $\rho$ (Kg/m3)
A5052-H34	68.97	0.34	2700

Πίνακας 1. Ιδιότητες κράματος αλουμινίου που χρησιμοποιείται για το σύνθετο πάνελ τύπου σάντουιτς

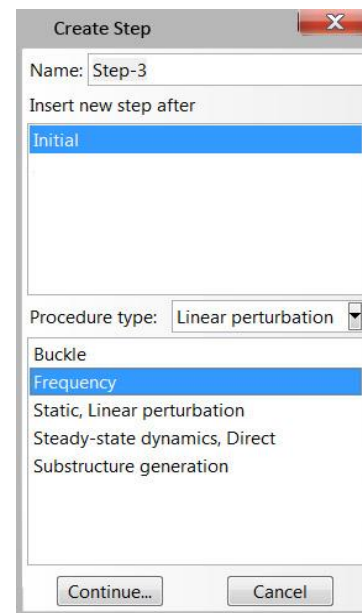


Εικόνα 6. Επίλογη υλικού και καθορισμός παραμέτρων

Ως βασικό υλικό του κυψελοειδούς πάνελ τύπου σάντουιτς επιλέχθηκε κράμα αλουμινίου (A5052-H34).

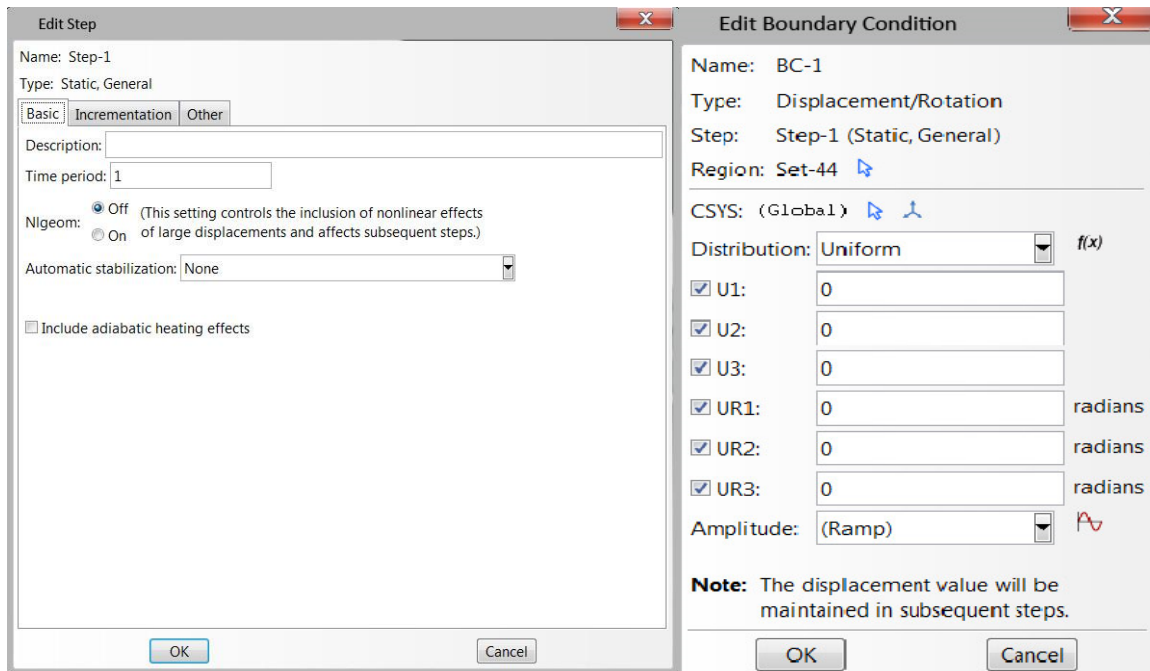
Επόμενο στάδιο είναι ο καθορισμός των steps κατά το οποίο καθορίζουμε την μέθοδο της επίλυσης που επιθυμούμε. Αρχικά στο αυξητικό μοντέλο γίνεται προκαταρκτική ανάλυση με σκοπό την ανάκτηση δέκα ιδιομορφών και των φυσικών συχνότητών τους.

Επιλέγουμε Step → linear perturbation → Frequency

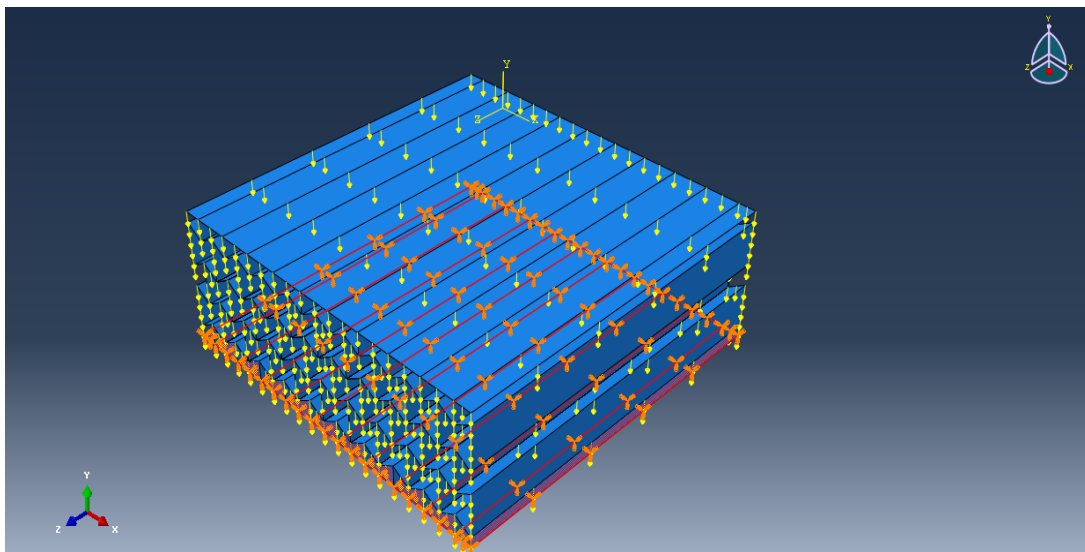


Εικόνα 7 Καθορισμός του step

Στη συνέχεια της διαδικασίας επιλέγουμε στατικό step. Στο συγκεκριμένο βήμα ασκούμε τη δύναμη του βάρους του μοντέλου με τη μορφή gravity load. Ως boundary conditions (οριακές συνθήκες) θεωρούμε πως σε αυτήν την περίπτωση η κάτω επιφάνεια της κατασκευής περιορίζεται στους έξι βαθμούς ελευθερίας.



Εικόνα 8. Καθορισμός του step και των οριακών συνθηκών



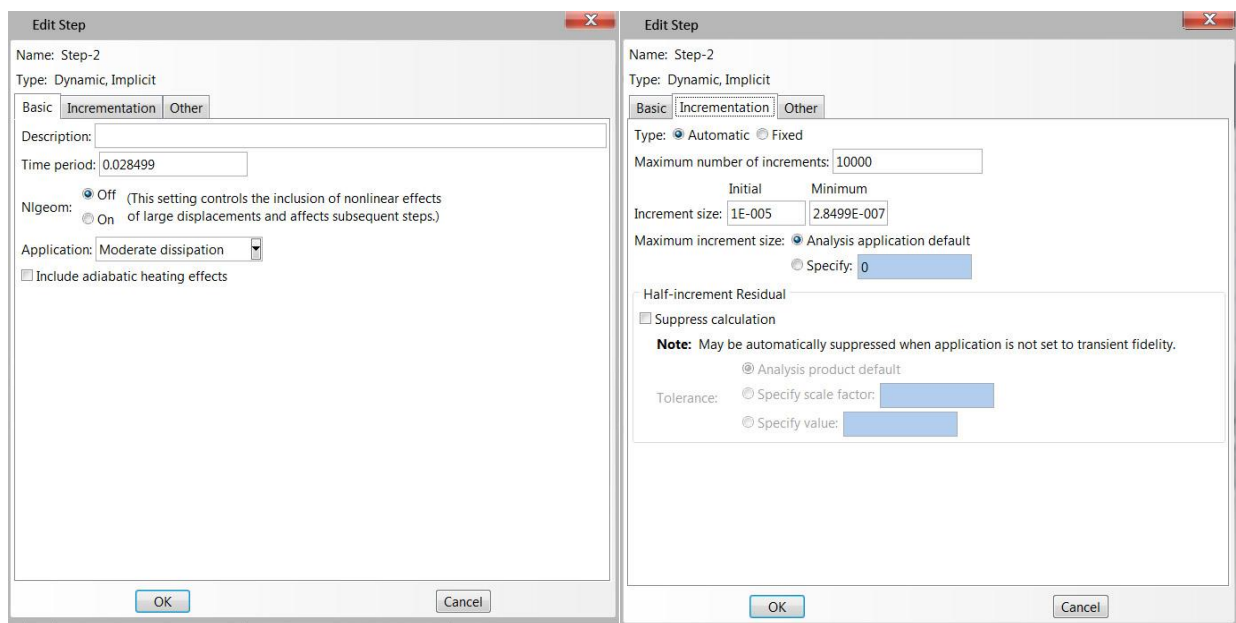
Εικόνα 9. Πακτωμένη βάση υπο την επίδραση gravity load



Το επόμενο κομμάτι της προσομοίωσης αποτελεί το κύριο στάδιο κατά το οποίο θα εισάγουμε την δυναμική διέγερση με την μορφή των δεδομένων επιταχύνσεων. Η ανάλυση που χρησιμοποιήσαμε για να δούμε τις αποκρίσεις του μοντέλου μέσω του Abaqus είναι η δυναμική ανάλυση με έμμεση ολοκλήρωση (*implicit dynamic analysis*). Χρησιμοποιείται για τη μελέτη μεγάλου αριθμού εφαρμογών, όπως οι δυναμικές αποκρίσεις με ελάχιστη απορρόφηση ενέργειας από το σύστημα, δυναμικές αποκρίσεις που περιλαμβάνουν μη γραμμικότητα, επαφή και μέτρια απορρόφηση ενέργειας από το σύστημα και ψευδο - στατικές αποκρίσεις, όπου η σημαντική απορρόφηση ενέργειας παρέχει ευστάθεια και βελτιώνει τη σύγκλιση καθορίζοντας ουσιαστικά μια στατική λύση.

Η γενική, μη γραμμική δυναμική ανάλυση του Abaqus/Standard χρησιμοποιεί έμμεση ολοκλήρωση του χρόνου για να υπολογίσει την προσωρινά δυναμική ή ψευδο-στατική απόκριση του συστήματος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

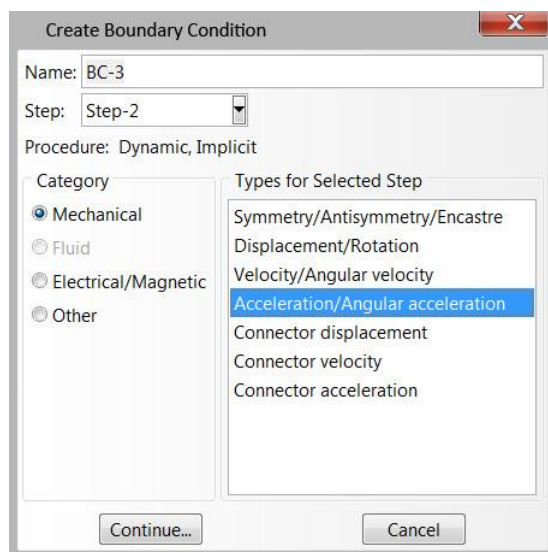
Επιλέγουμε Step → General → Dynamic,Implicit και δίνουμε τα στοιχεία όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



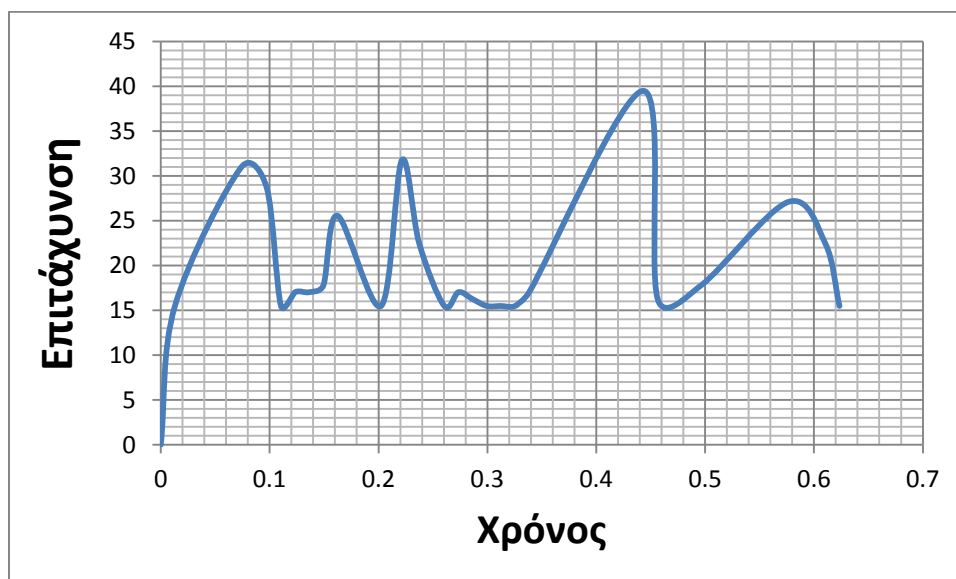
Εικόνα 10. Καθορισμός του step για δυναμική επίλυση



Έπειτα ορίζουμε τις οριακές συνθήκες, δηλαδή εισάγουμε το δεδομένο επιταχυνσιογράφημα με τη μορφή amplitude. Οι επιταχύνσεις ασκούνται στο κάτω μέρος του μοντέλου, δηλαδή την κάτω επιφάνειά του και στη διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα. Παρακάτω φαίνεται συνοπτικά η διαδικασία.

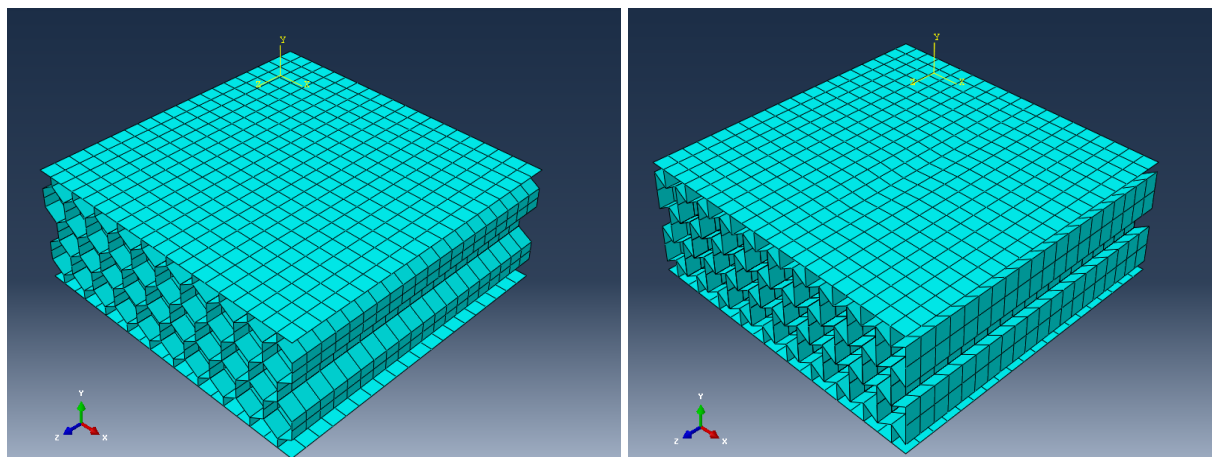


Εικόνα 8. Είσαγωγή επιταχύνσεων - οριακές συνθήκες



Διάγραμμα 1. Επιταχύνσεις κατά την δυναμική διέγερση του φορέα

Τέλος, σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας της μοντελοποίησης γίνεται η διακριτοποίηση του φορέα με πεπερασμένα στοιχεία. Παρακάτω φαίνεται η διακριτοποιημένη μορφή του φορέα, της αυξητικής και της κλασσικής δομής.



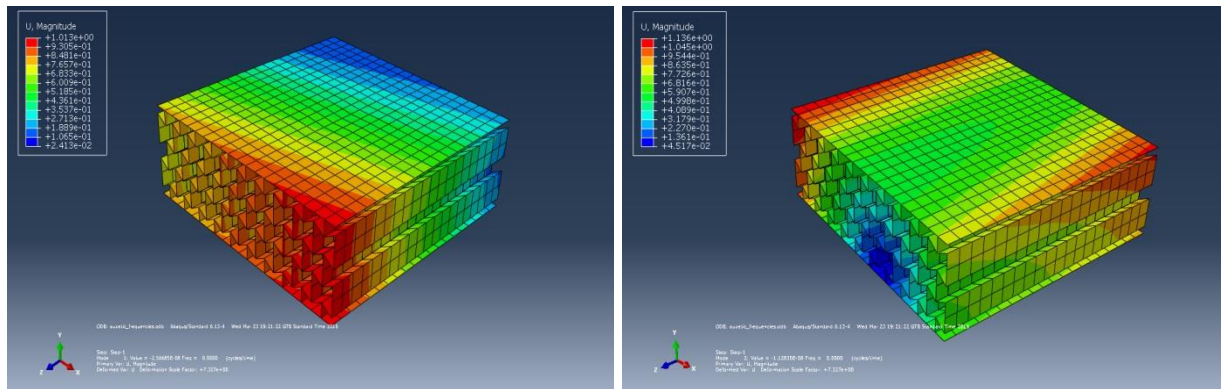
Εικόνα 12. Διακριτοποιημένη μορφή των μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία

## 6. Αποτελέσματα προσομοίωσης Αυξητικού – κλασσικού μοντέλου

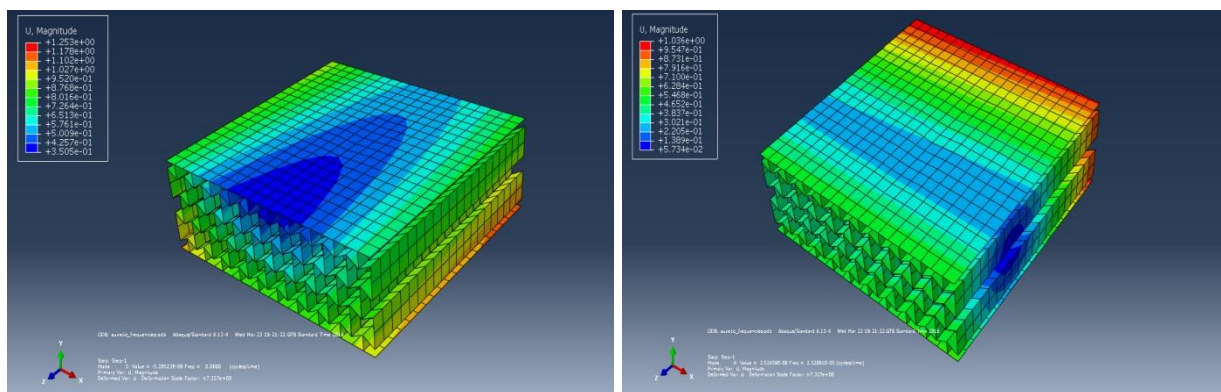
### 6.1 Ανάλυση ιδιοτιμών ιδιομορφών

Σχεδόν όλα τα σώματα τείνουν να δονούνται κατά κύριο λόγο σε συγκεκριμένη συχνότητα (ή συχνότητες) όταν τρίβονται, τεντώνονται, αφήνονται απότομα και διαταράσσονται ξαφνικά. Οι συχνότητες αυτές καλούνται **φυσικές συχνότητες ή ιδιοσυχνότητες** των συγκεκριμένων αντικειμένων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ως προκαταρκτική ανάλυση γίνεται η επίλυση ιδιοτιμών – ιδιομορφών με σκοπό την ανάκτηση δέκα ιδιομορφών και των φυσικών συχνοτήτων τους. Στις παρακάτω ενότητες παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς και ο συγκεντρωτικός πίνακας.

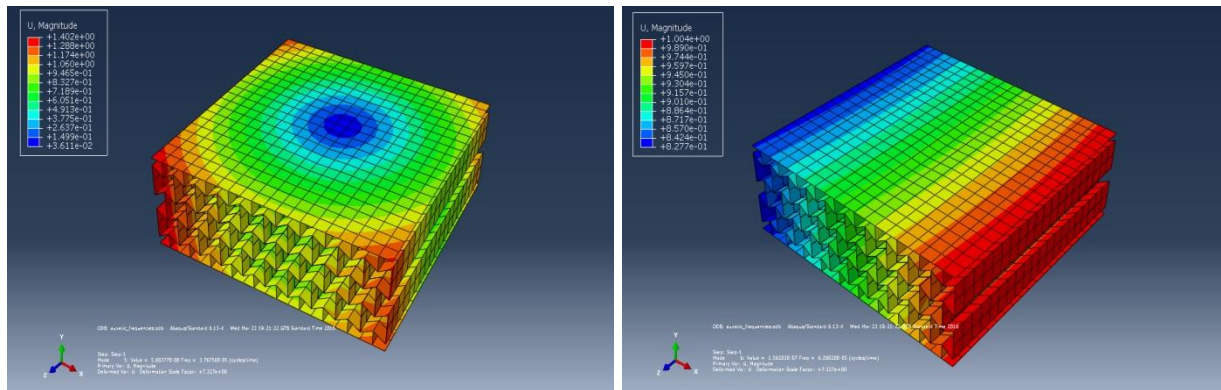
#### 6.1.1 Ανάλυση ιδιοτιμών ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο



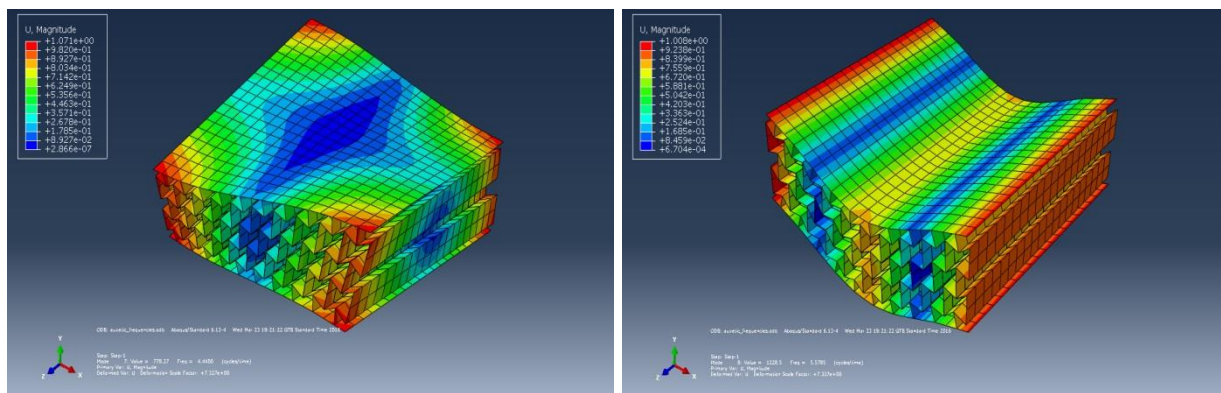
Εικόνα 13. Ανάλυση Ιδιοτιμών - Ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο



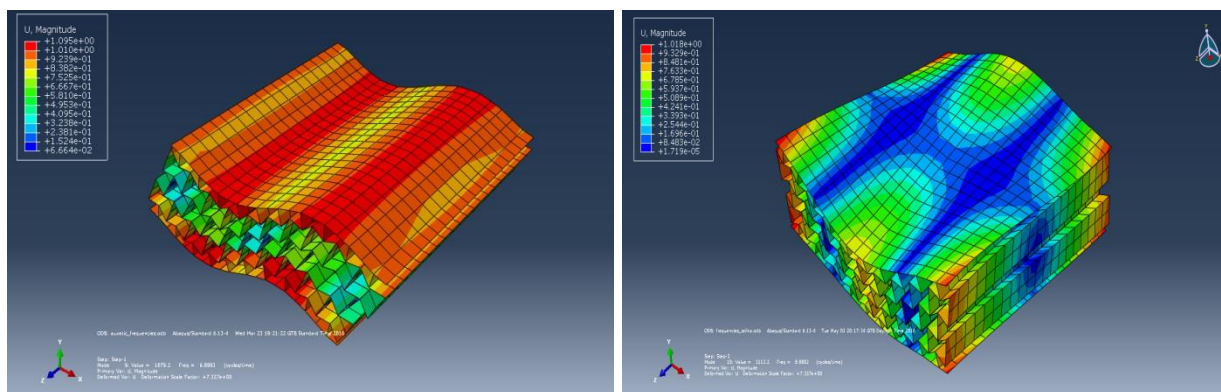
Εικόνα 14. Ανάλυση Ιδιοτιμών - Ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο



Εικόνα 15. Ανάλυση Ιδιοτιμών - Ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο



Εικόνα 16. Ανάλυση Ιδιοτιμών - Ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο



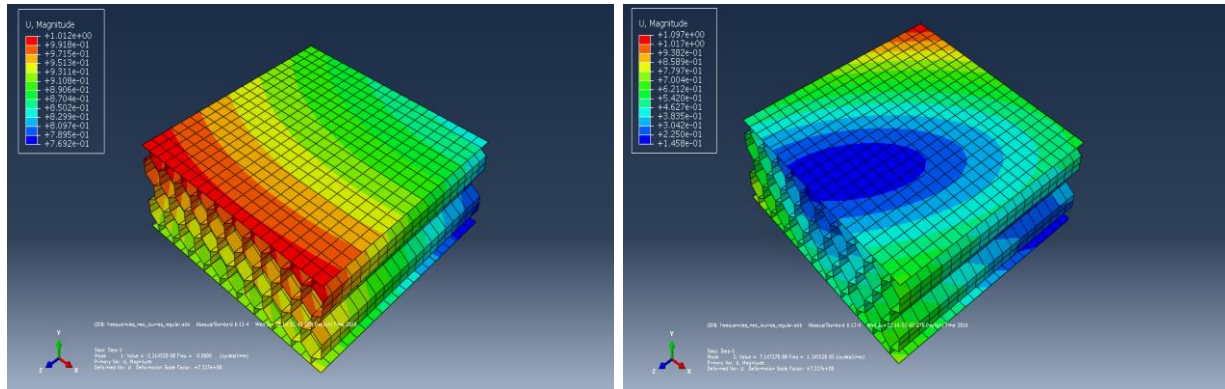
Εικόνα 17. Ανάλυση Ιδιοτιμών - Ιδιομορφών για το αυξητικό μοντέλο

EIGENVALUE OUTPUT					
No	EIGENVALUE	FREQUENCY		GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING
		(RAD/TIME) (CYCLES/TIME)			
1*	-2.56685E-08	0.0000	0.0000	6.44943E+07	0.0000
2*	-1.12830E-08	0.0000	0.0000	7.84188E+07	0.0000
3*	-5.28523E-09	0.0000	0.0000	1.41162E+08	0.0000
4*	2.52459E-08	1.58890E-04	2.52881E-05	5.89286E+07	0.0000
5*	5.60377E-08	2.36723E-04	3.76756E-05	1.26370E+08	0.0000
6*	1.56203E-07	3.95225E-04	6.29020E-05	1.90486E+08	0.0000
7	778.27	27.897	4.4400	4.00680E+07	0.0000
8	1228.5	35.051	5.5785	7.18286E+07	0.0000
9	1879.2	43.349	6.8993	1.33973E+08	0.0000
10	3113.2	55.796	8.8803	3.03812E+07	0.0000

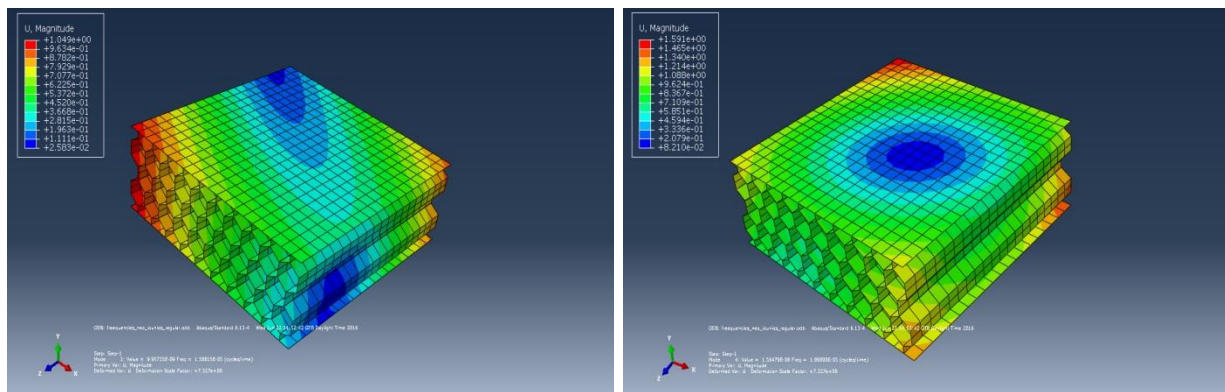
Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας ανάλυσης Ιδιοτιμών - Ιδιομορφών



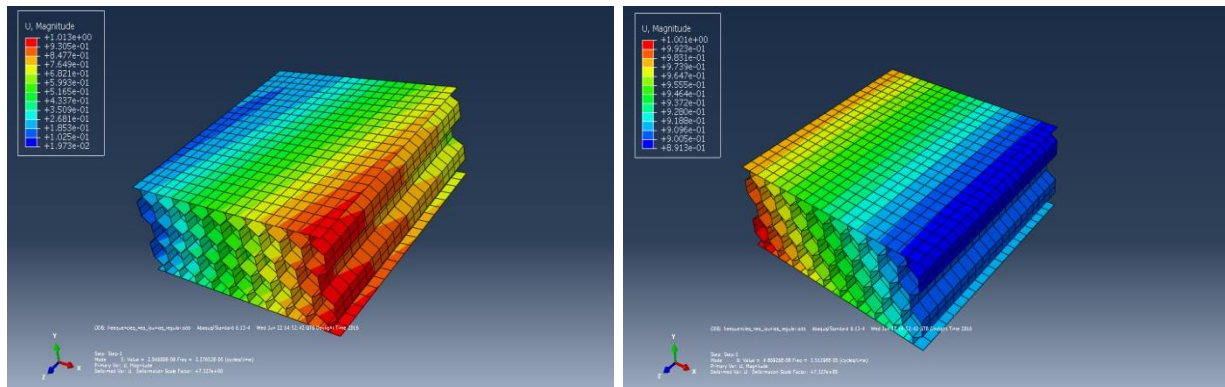
## 6.1.2 Ανάλυση ιδιοτιμών ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο



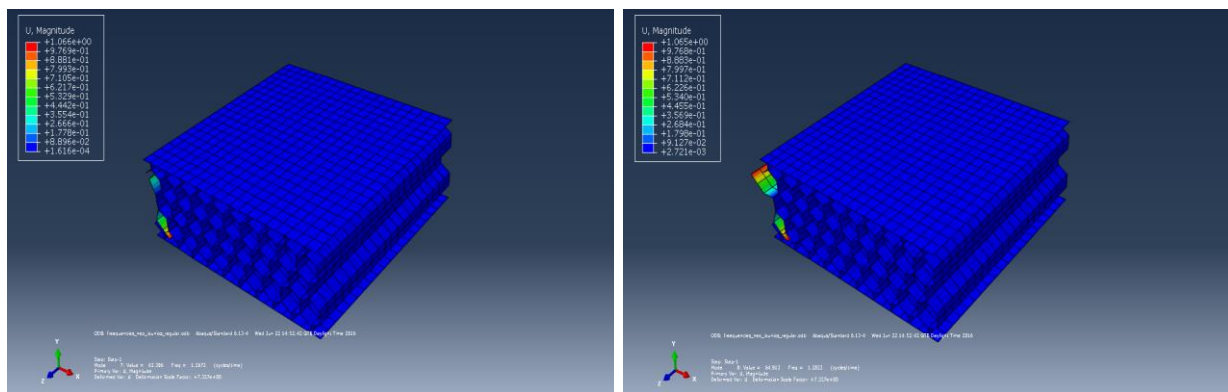
Εικόνα 18. Ανάλυση Ιδιοτιμών-Ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο



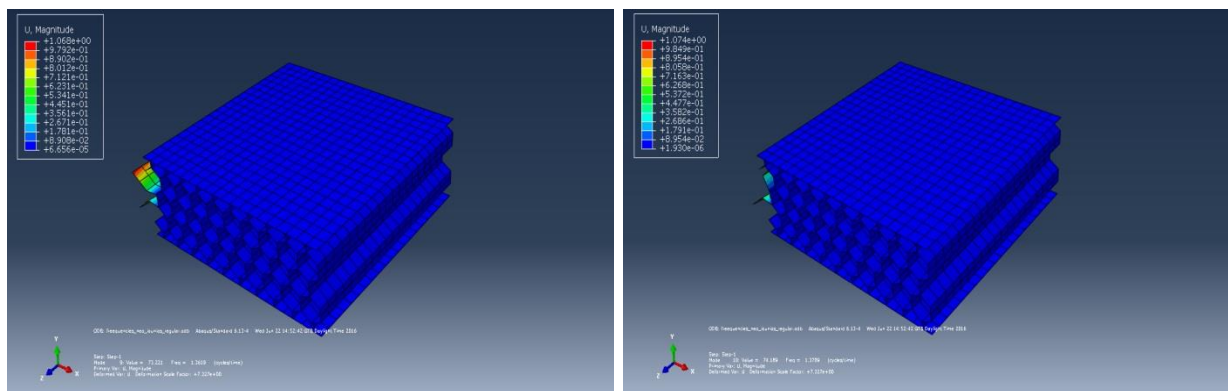
Εικόνα 29. Ανάλυση Ιδιοτιμών-Ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο



Εικόνα 20. Ανάλυση Ιδιοτιμών-Ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο



Εικόνα 23. Ανάλυση Ιδιοτιμών-Ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο



Εικόνα 22. Ανάλυση Ιδιοτιμών-Ιδιομορφών για το κλασσικό μοντέλο

EIGENVALUE OUTPUT					
No	EIGENVALUE	FREQUENCY		GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING
		(RAD/TIME)	(CYCLES/TIME)		
1*	-2.21455E-08	0.0000	0.0000	1.07274E+07	0.0000
2*	7.14727E-09	8.45415E-05	1.34552E-05	3.25037E+06	0.0000
3*	9.95735E-09	9.97865E-05	1.58815E-05	2.61635E+06	0.0000
4*	1.56479E-08	1.25092E-04	1.99090E-05	8.18092E+06	0.0000
5*	2.04600E-08	1.43039E-04	2.27653E-05	3.44473E+06	0.0000
6*	4.86926E-08	2.20664E-04	3.51198E-05	1.21155E+07	0.0000
7	63.396	7.9622	1.2672	97039.	0.0000
8	64.913	8.0569	1.2823	1.02310E+05	0.0000
9	73.221	8.5569	1.3619	33544.	0.0000
10	74.189	8.6133	1.3709	35749.	0.0000

## 6.2 Δυναμική ανάλυση

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σχετικά με τις αποκρίσεις των δύο υπό εξέταση μοντέλων κατά την δυναμική διέγερση. Αρχικά, η πρώτη επίλυση η οποία έγινε αφορά στις πραγματικές τιμές του επιταχυνσιογραφήματος που έχουμε, με συνολικό χρόνο **0.6234 s**. Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται συνοπτικά τα αποτελέσματα σχετικά με τις αποκρίσεις των μοντέλων όσον αφορά τις επιταχύνσεις που επιδρούν στην πάνω επιφάνεια του μοντέλου, αλλά και στις συνολικές παραμορφώσεις για το δεδομένο επιταχυνσιογράφημα.

Στη συνέχεια, λόγω του ότι η πρώτη ανάλυση δεν είναι αρκετή για να κατανοήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου, συνεχίζουμε βασιζόμενοι στις φυσικές συχνότητες της αυξητικής κατασκευής. Για την επίλυση αυτή χρησιμοποιούμε την ανάλυση ιδιοτιμών – ιδιομορφών που έγινε σε προηγούμενο στάδιο, επιλέγουμε την 8η ιδιοτιμή με φυσική συχνότητα **5,5785 (CYCLES/TIME)** και υπολογίζουμε την περίοδο της δυναμικής διέγερσης σύμφωνα με τον τύπο:

$$T = \frac{1}{2\pi f}$$

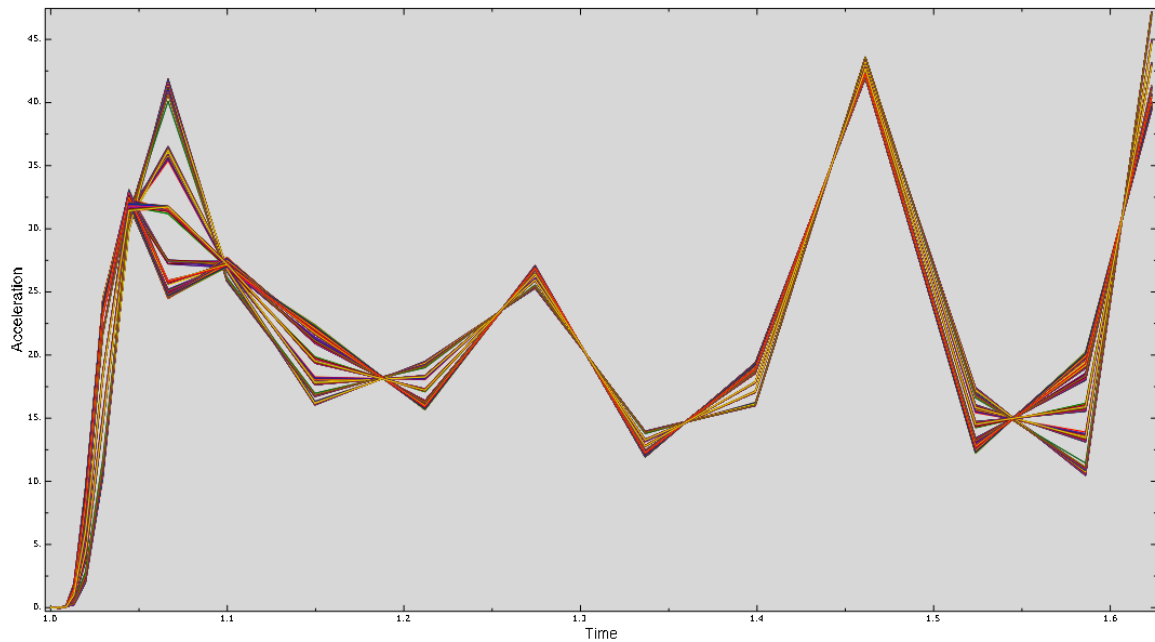
Με βάση τον παραπάνω τύπο ορίζουμε την περίοδο, στην οποία θα ασκηθούν οι δεδομένες επιταχύνσεις. Μετά από υπολογισμούς βρίσκουμε ότι η περίοδος είναι ίση με **0,02850 s**.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι κατά κύριο λόγο, μας ενδιαφέρουν τα αποτελέσματα κατά τον κατακόρυφο άξονα, δεδομένου του ότι η φόρτιση που έχουμε γίνεται κατά τον άξονα αυτό.

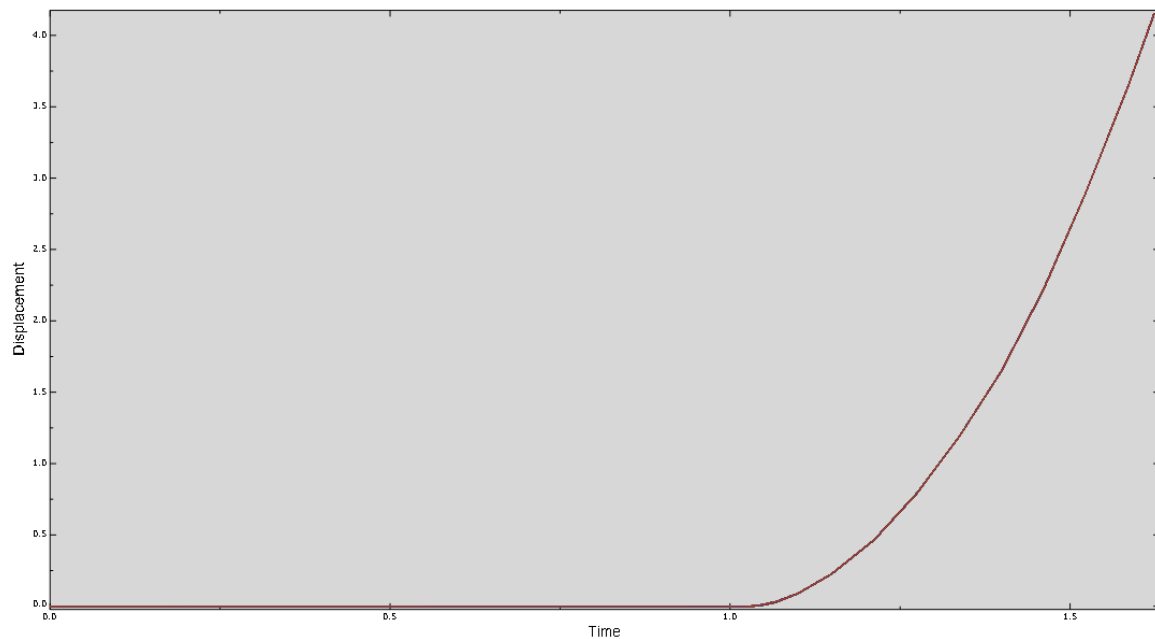


### 6.2.1 Αυξητικό μοντέλο

Η πρώτη επίλυση η οποία έγινε αφορά, στις πραγματικές τιμές του επιταχυνσιογραφήματος σε συνολικό χρόνο **0.6234**. Τα αποτελέσματα των αποκρίσεων της επιτάχυνσης και των μετατοπίσεων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



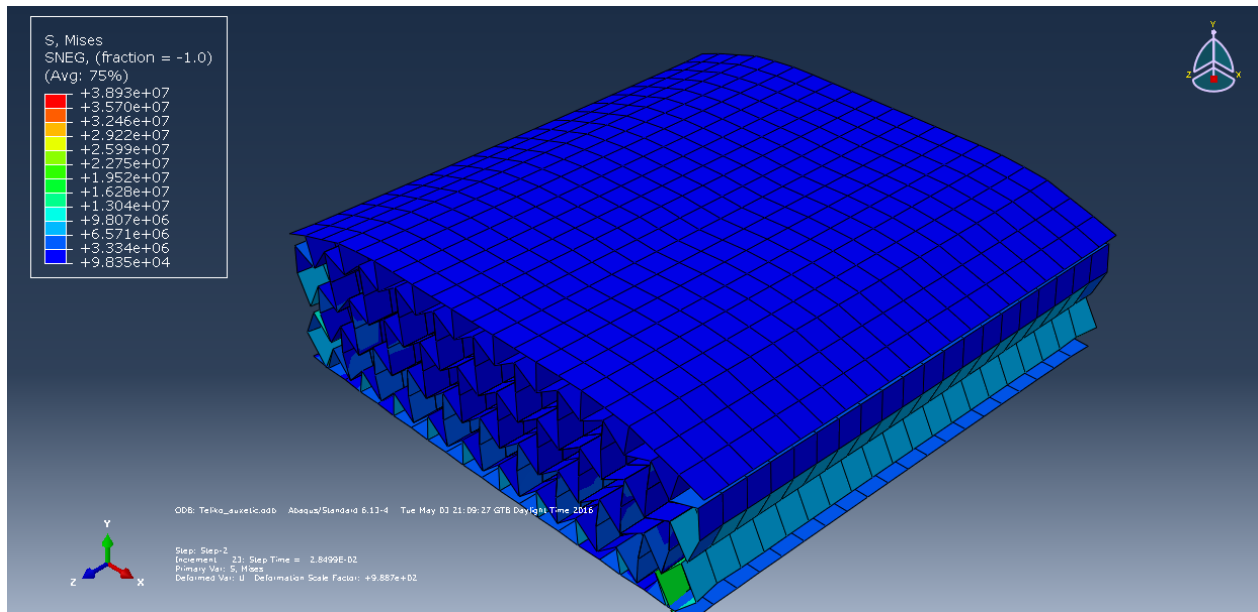
Διάγραμμα 2. Επιτάχυνση - Χρόνος για το αυξητικό μοντέλο σε όλη την επιφάνεια



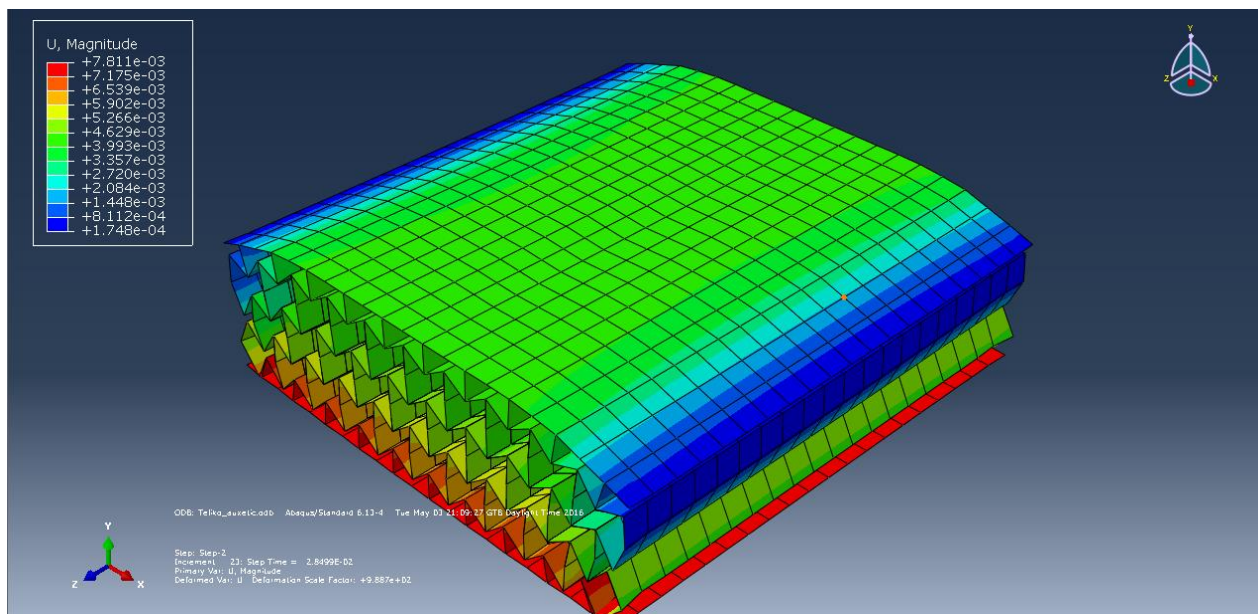
Διάγραμμα 3. Μετατόπιση - Χρόνος για το αυξητικό μοντέλο σε όλη την πάνω επιφάνεια

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για επιταχυνσιογράφημα με περίοδο **0,02850**. Παρουσιάζονται επίσης οι τάσεις Von Mises, οι επιταχύνσεις που επιδρούν ανά άξονα, καθώς και οι συνολικές παραμορφώσεις.

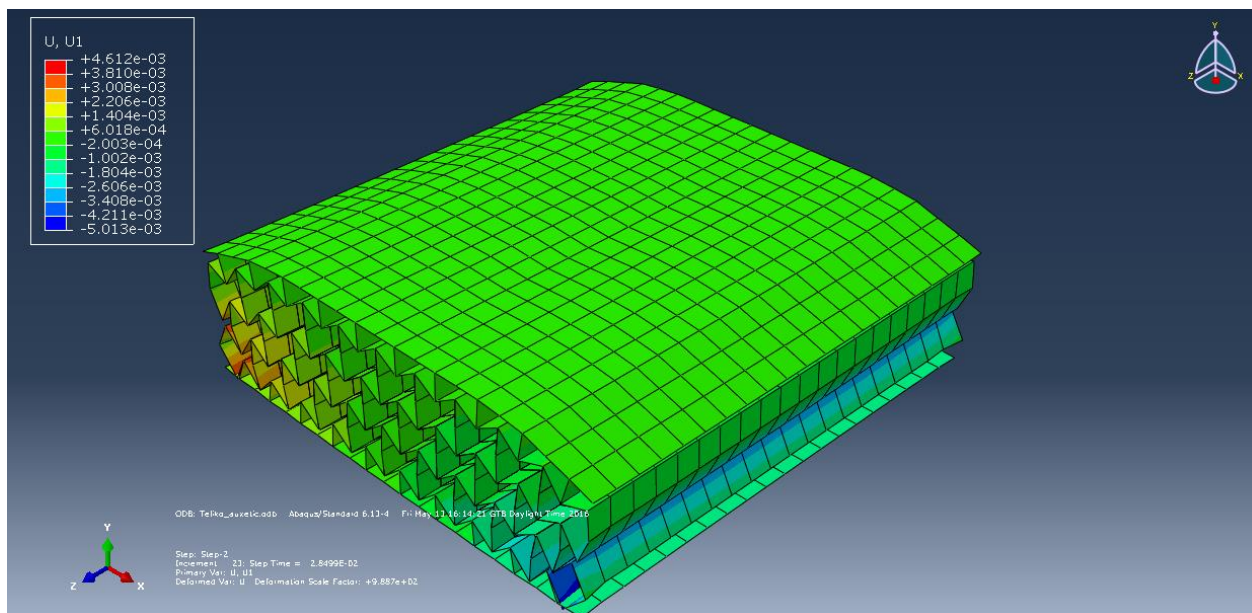
Η τάση Von Mises χρησιμοποιείται ως κριτήριο στον προσδιορισμό της έναρξης της αστοχίας σε ελατά υλικά. Το κριτήριο αστοχίας ορίζει ότι η τάση von Mises πρέπει να είναι μικρότερη από την τάση διαρροής διαφορετικά το υλικό αστοχεί.



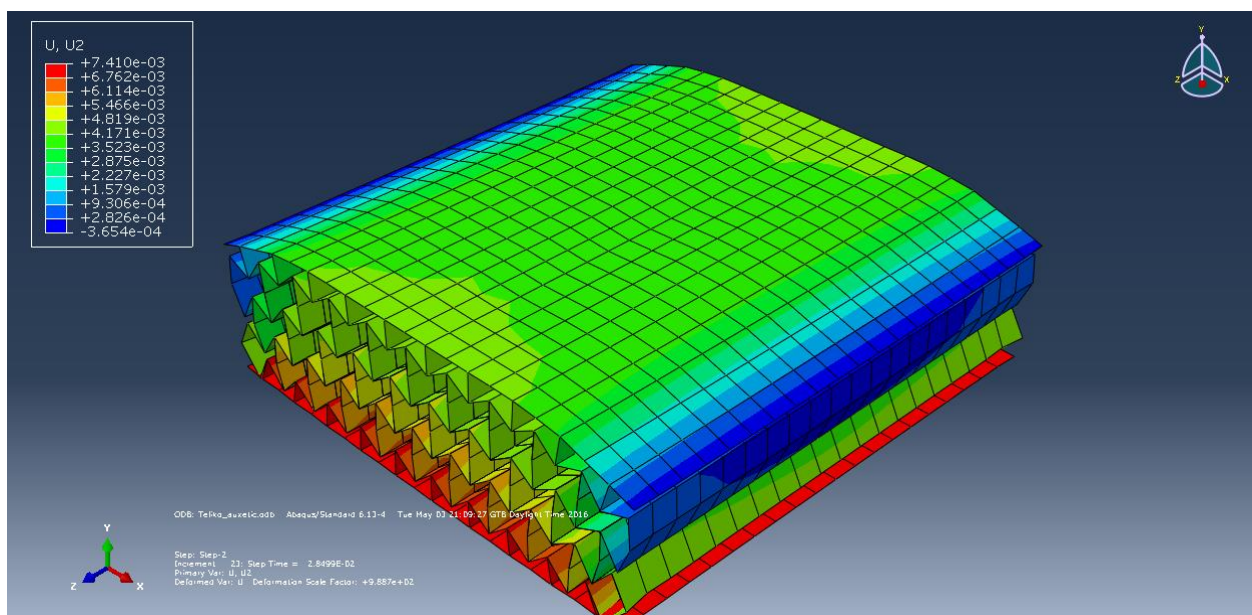
**Εικόνα 23. Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με αυξητική κυψέλη**



**Εικόνα 24. Συνολικές παραμορφώσεις για την αυξητική κυψέλη**

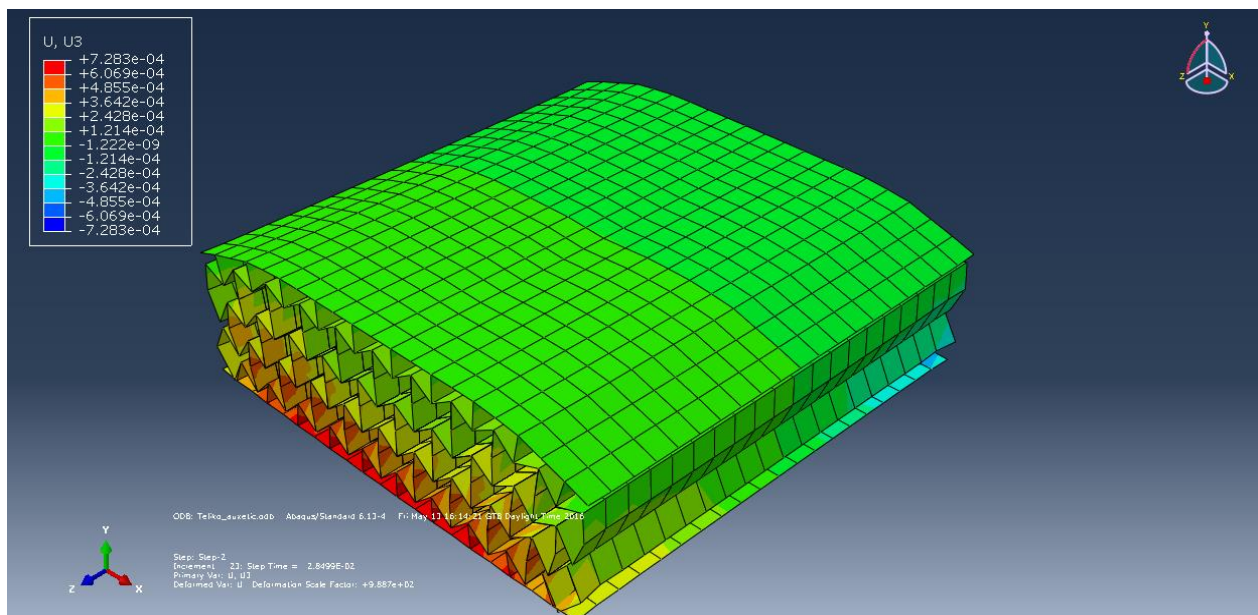


Εικόνα 25. Συνολικές παραμορφώσεις για την αυξητική κυψέλη για τον οριζόντιο άξονα X

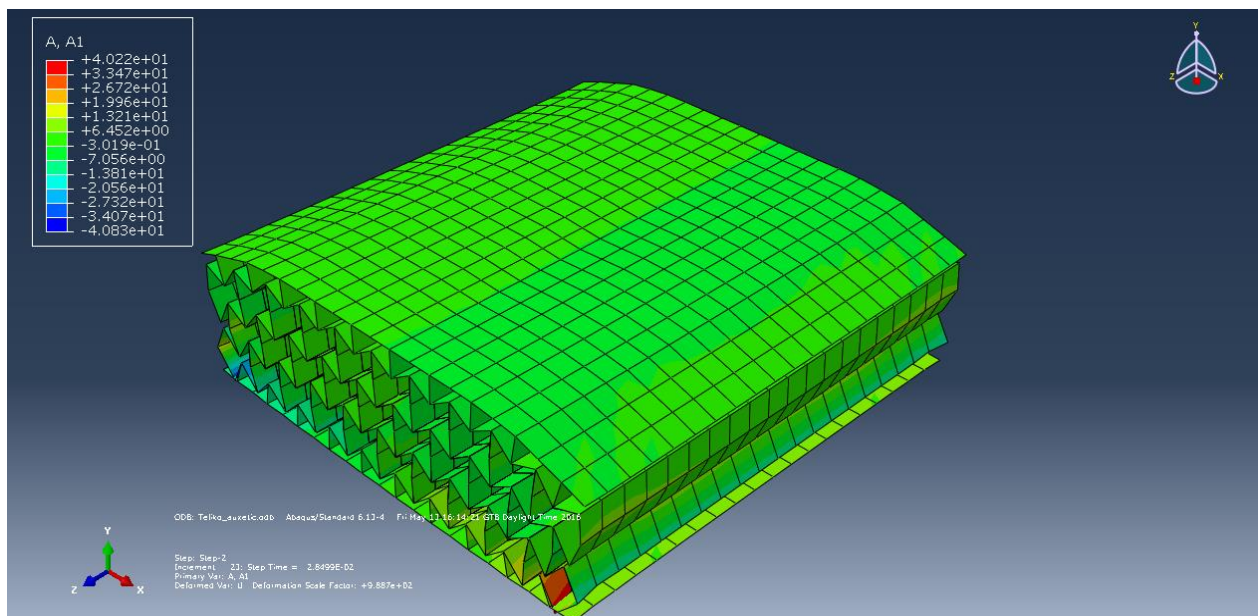


Εικόνα 26. Συνολικές παραμορφώσεις για την αυξητική κυψέλη κατά τον κατακόρυφο άξονα Y

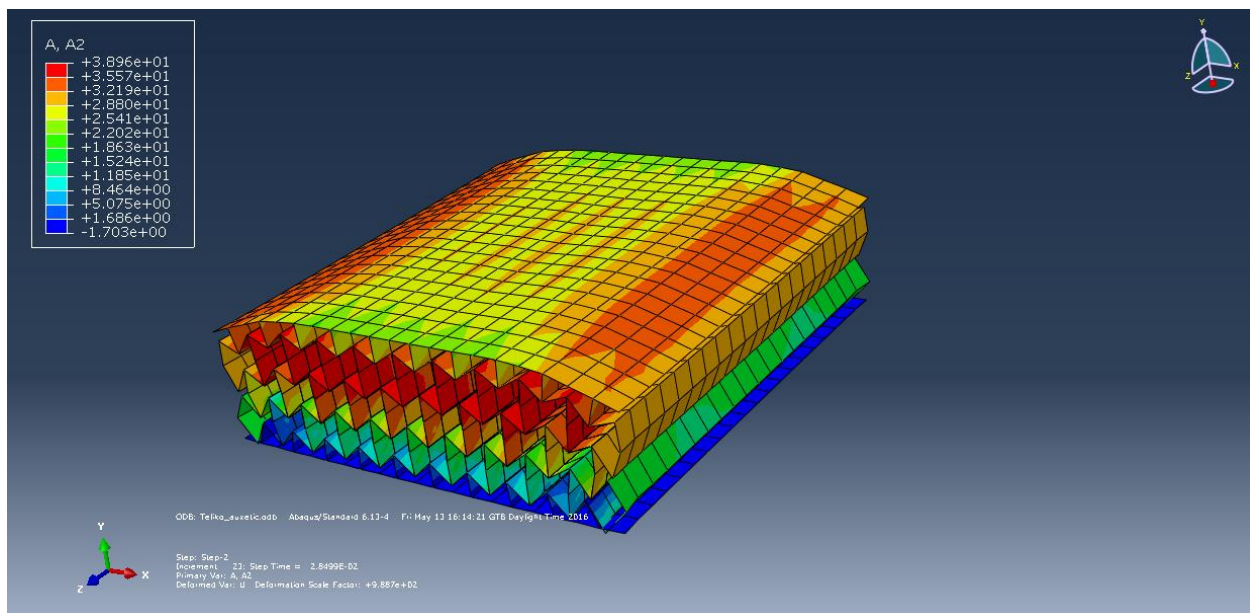




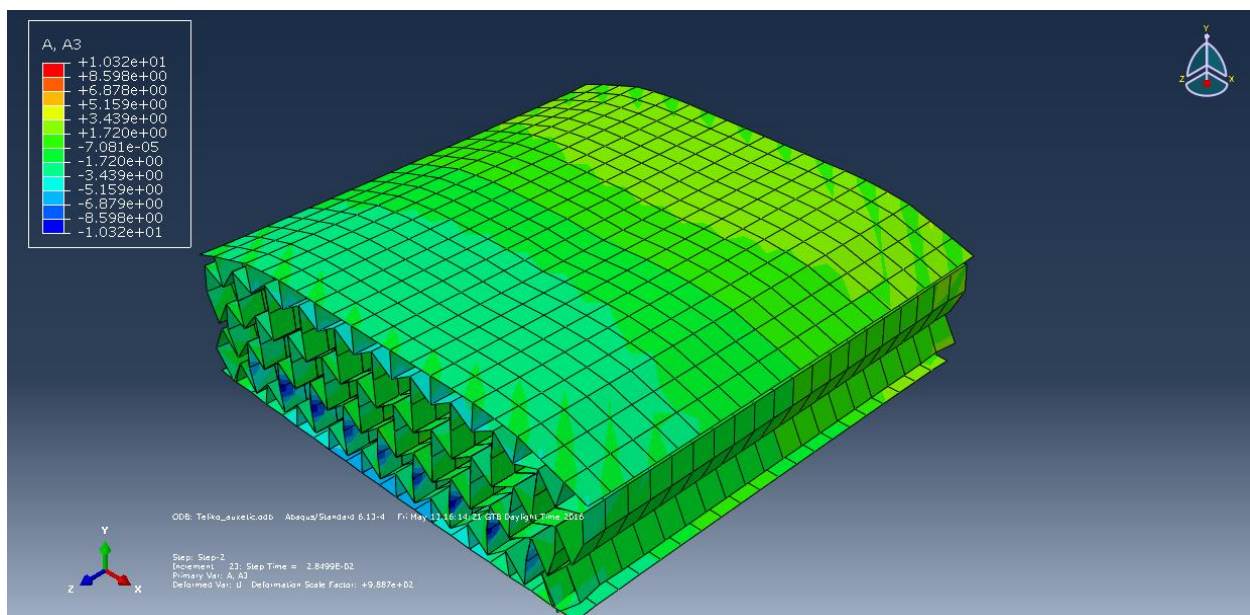
Εικόνα 27. Συνολικές παραμορφώσεις για την αυξητική κυψέλη κατά τον άξονα Z



Εικόνα 28. Επιταχύνσεις κατά τον οριζόντιο άξονα X

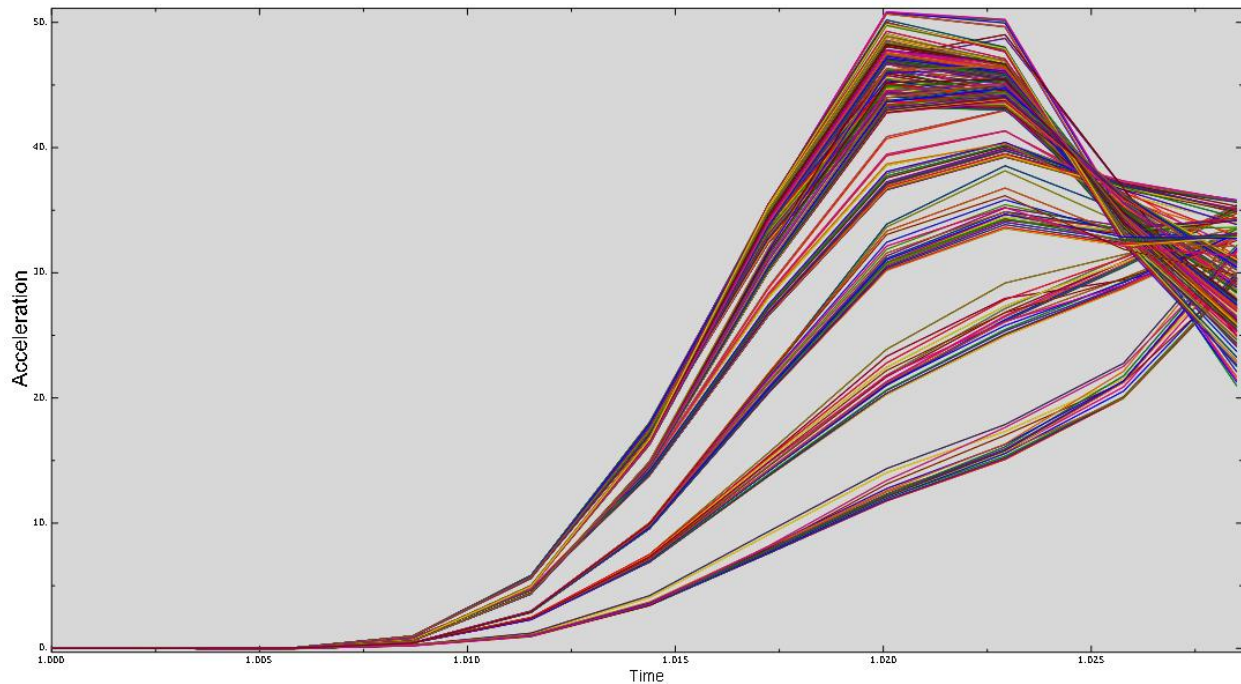


Εικόνα 29. Επιταχύνσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα Y

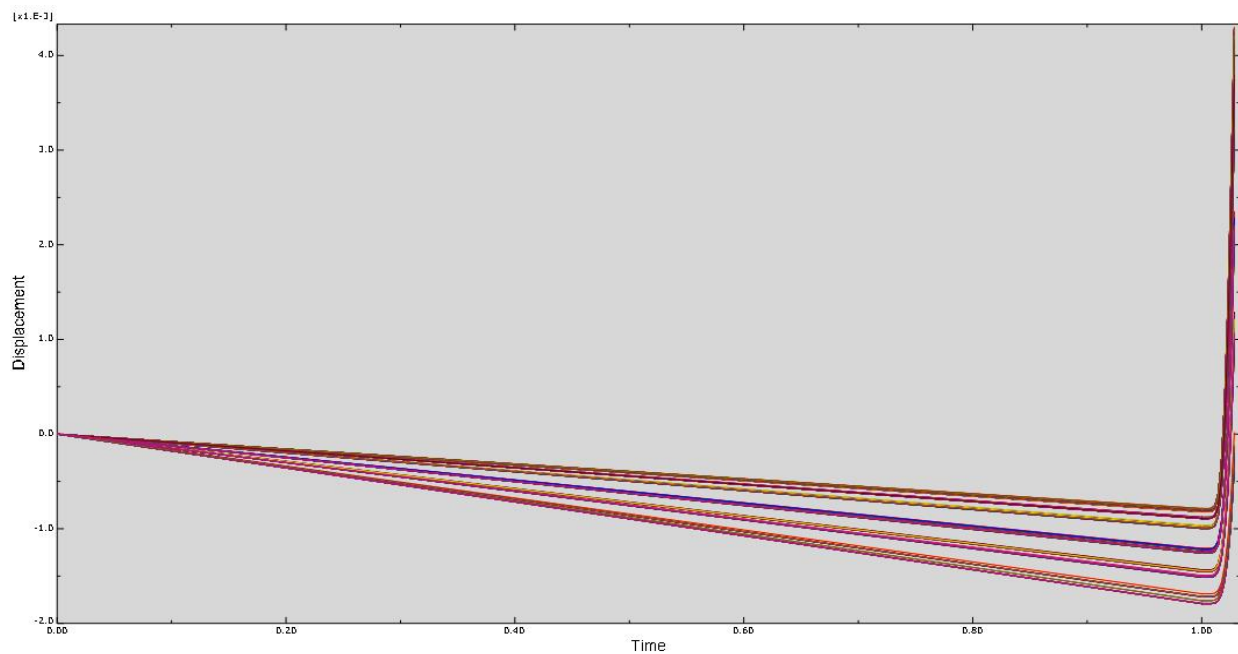


Εικόνα 30. Επιταχύνσεις στον άξονα Z

Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα των επιταχύνσεων, σε όλη την πάνω επιφάνεια του μοντέλου. Παρατηρούμε ότι κατά την δυναμική επίλυση που έγινε, το αρχικό συμπέρασμα είναι ότι το μοντέλο δεν έχει την ίδια συμπεριφορά σε όλα τα σημεία. Αυτό που φαίνεται, είναι ότι υπάρχουν σημεία όπου το μοντέλο λειτουργεί με καλύτερο τρόπο καθώς και άλλα στα οποία λειτουργεί με χειρότερο τρόπο.



**Διαγραμμα 4.** Το διάγραμμα των επιταχύνσεων, στην πάνω επιφάνεια του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο

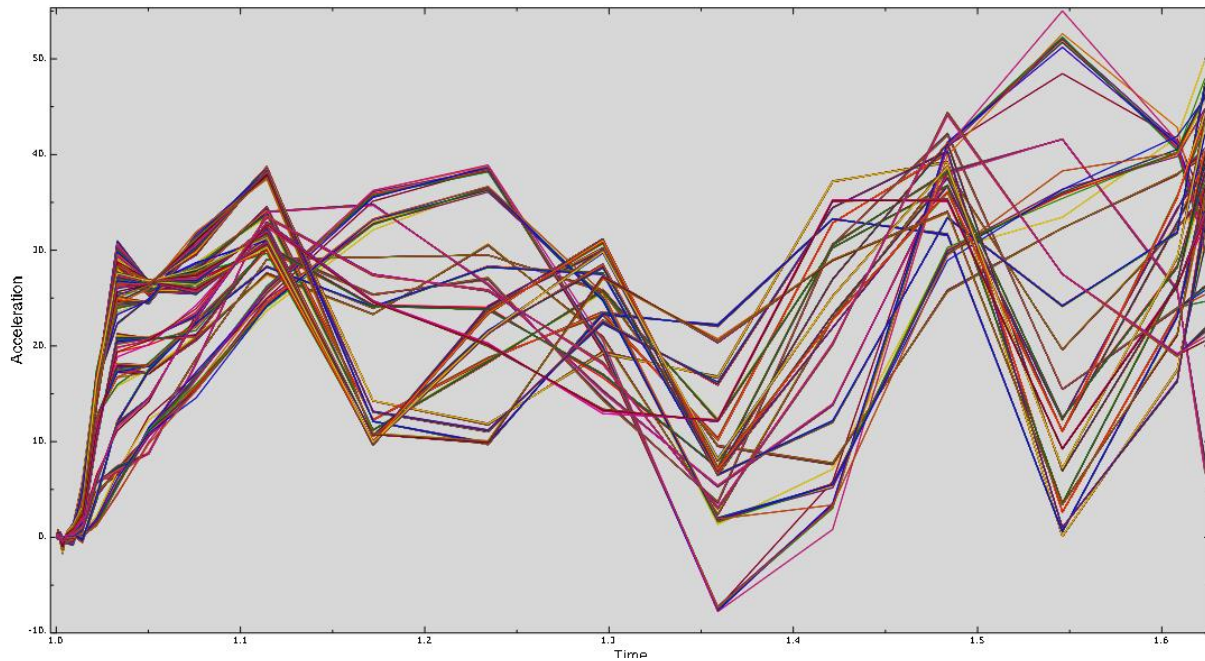


**Διάγραμμα 5.** Παραμόρφωση - Χρόνος, για την πάνω επιφάνεια του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο

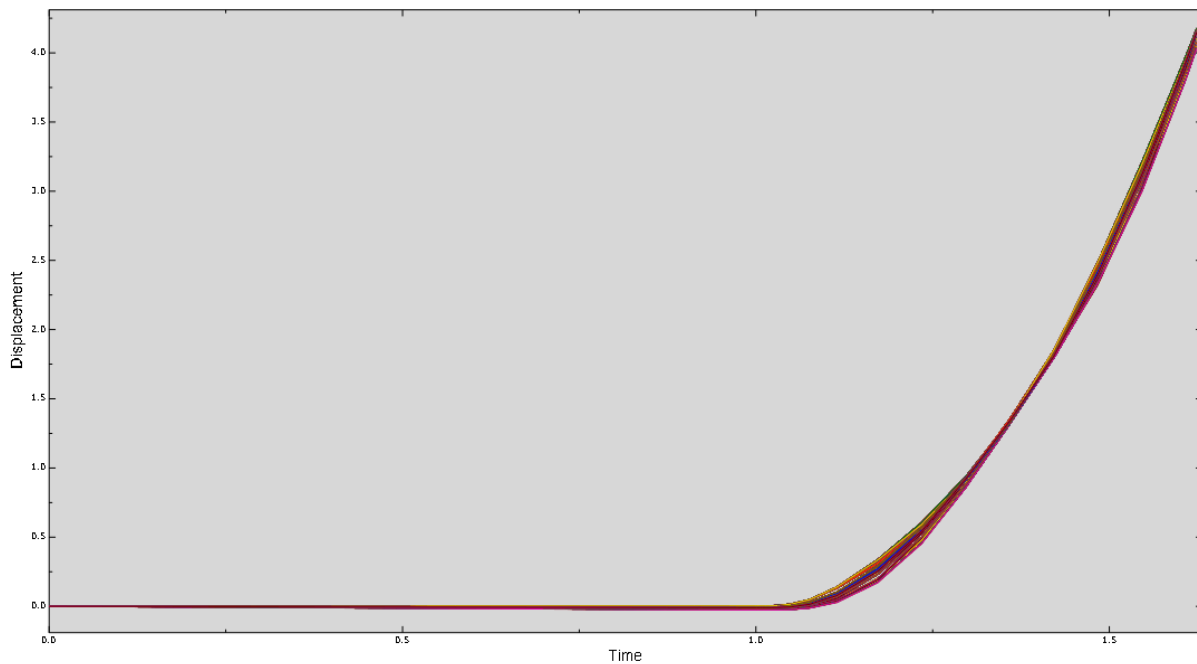


### 6.2.2 Κλασσικό μοντέλο

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το κλασσικό μοντέλο. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα επιτάχυνσης – χρόνου και παραμόρφωσης – χρόνου για περίοδο φόρτισης **0,6234**.

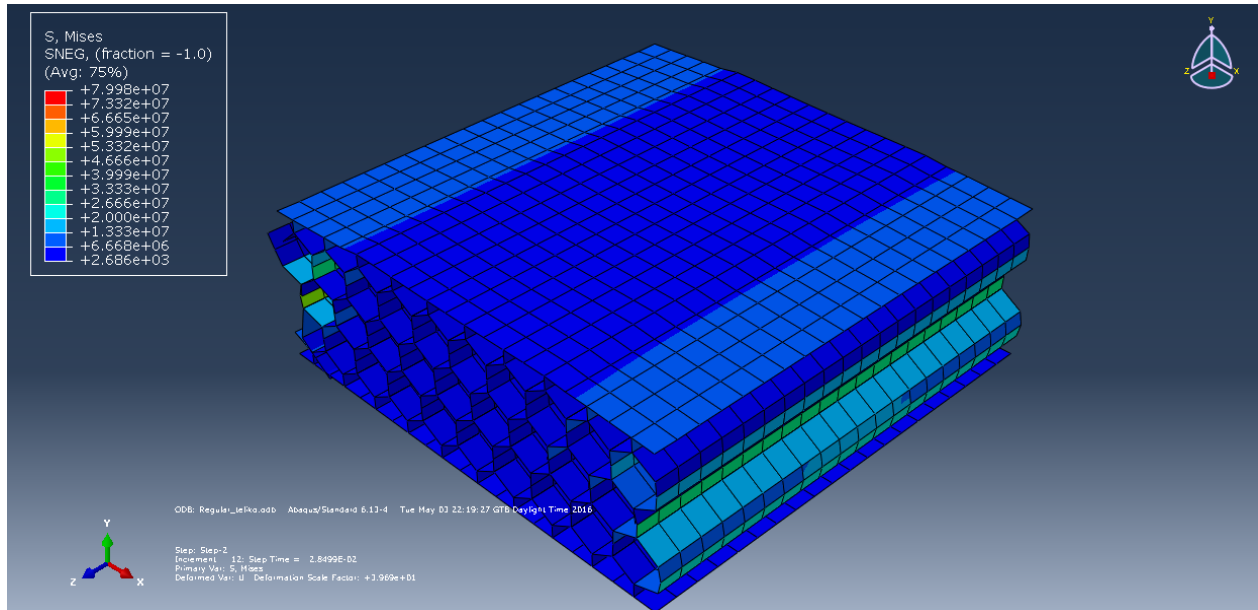


Διάγραμμα 6. Το διάγραμμα των επιταχύνσεων, στην πάνω επιφάνεια του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο

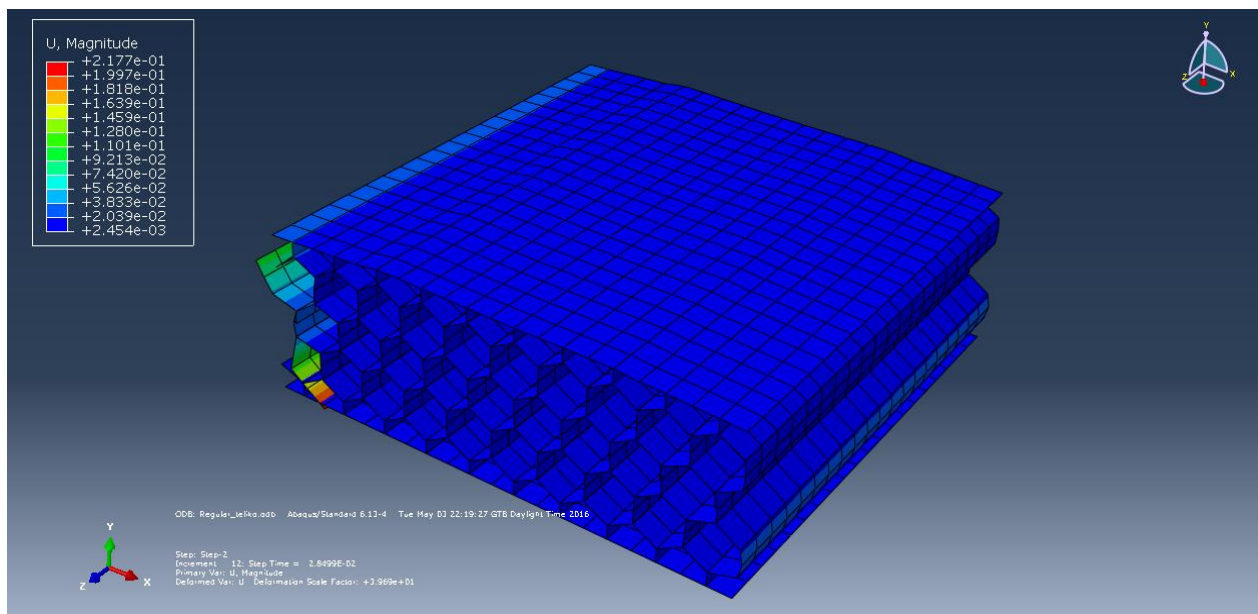


Διάγραμμα 7. Παραμόρφωση - Χρόνος για το κλασσικό μοντέλο

Έπειτα, ακολουθούν τα αποτελέσματα για την προσομοίωση με περίοδο φόρτισης ίση με **0,02850s**. Στις παρακάτω εικόνες και διαγράμματα βλέπουμε τις επιταχύνσεις, τις μετατοπίσεις ανά άξονα και τις τάσεις Von Mises.

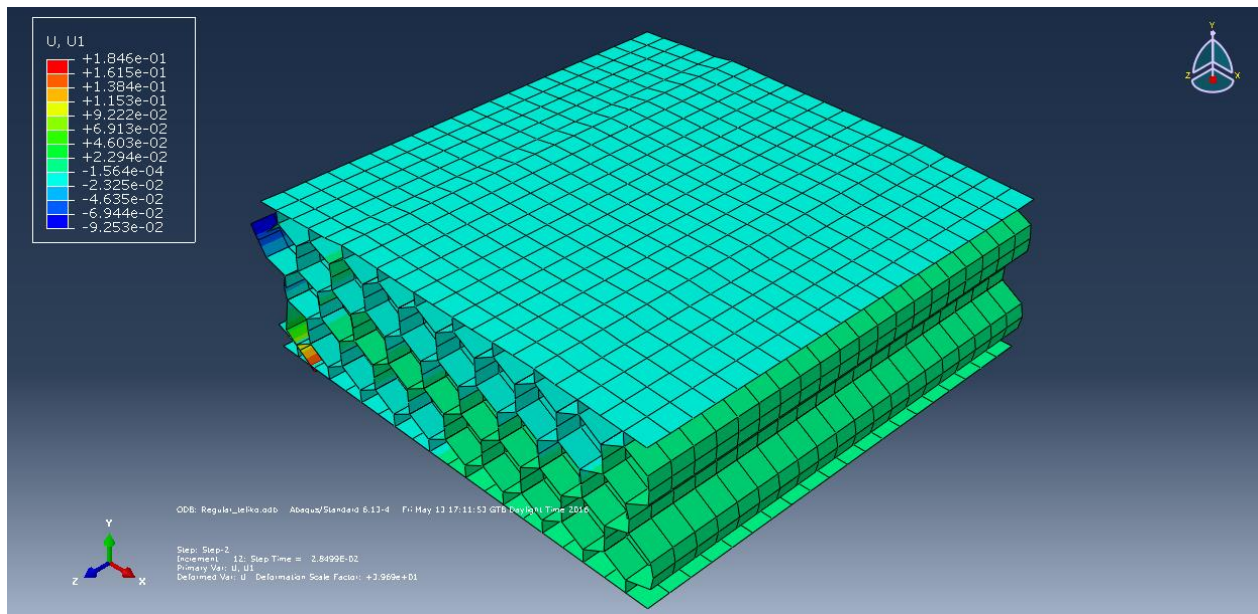


**Εικόνα 31. Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με κλασσική κυψέλη**

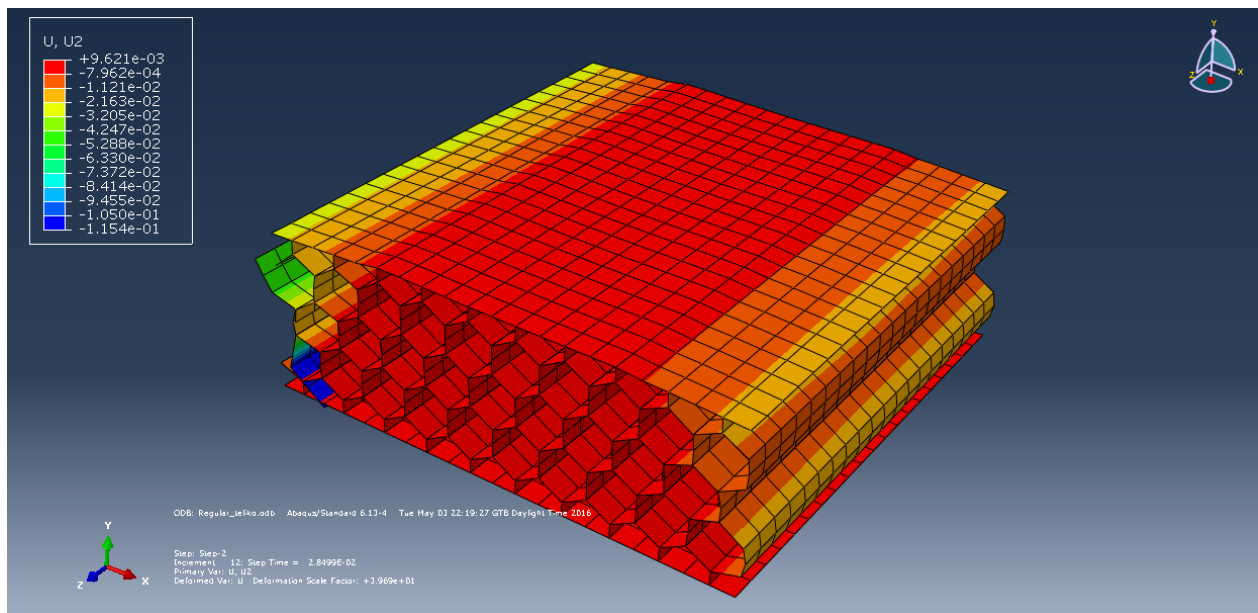


**Εικόνα 32. Συνολικές παραμορφώσεις για το κλασσικό μοντέλο**

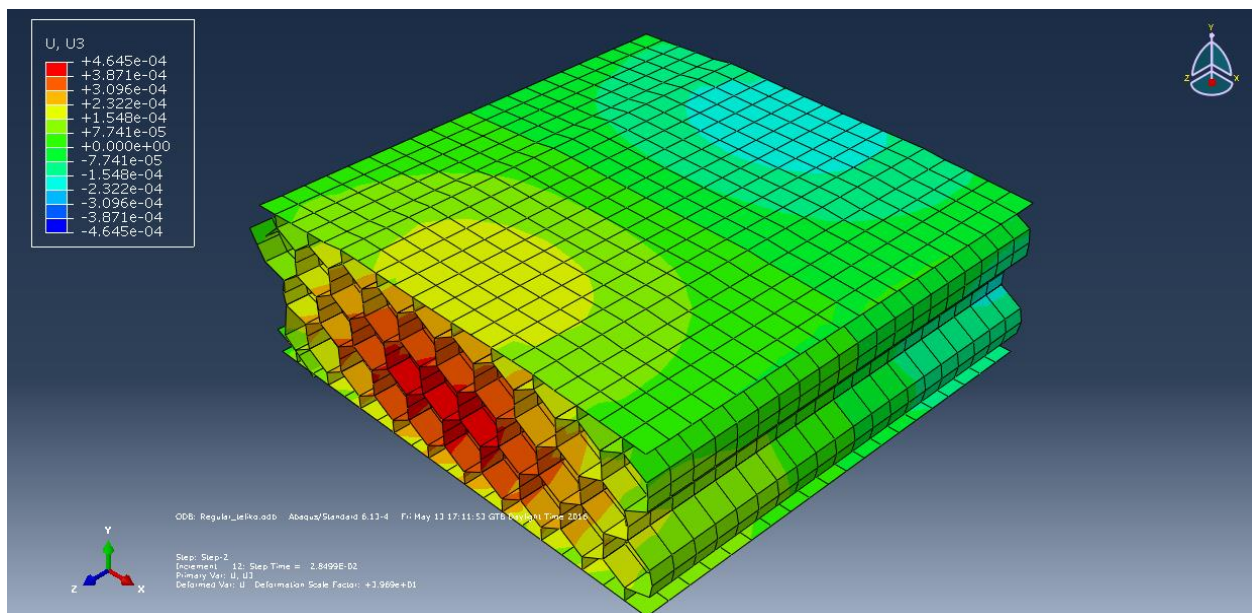




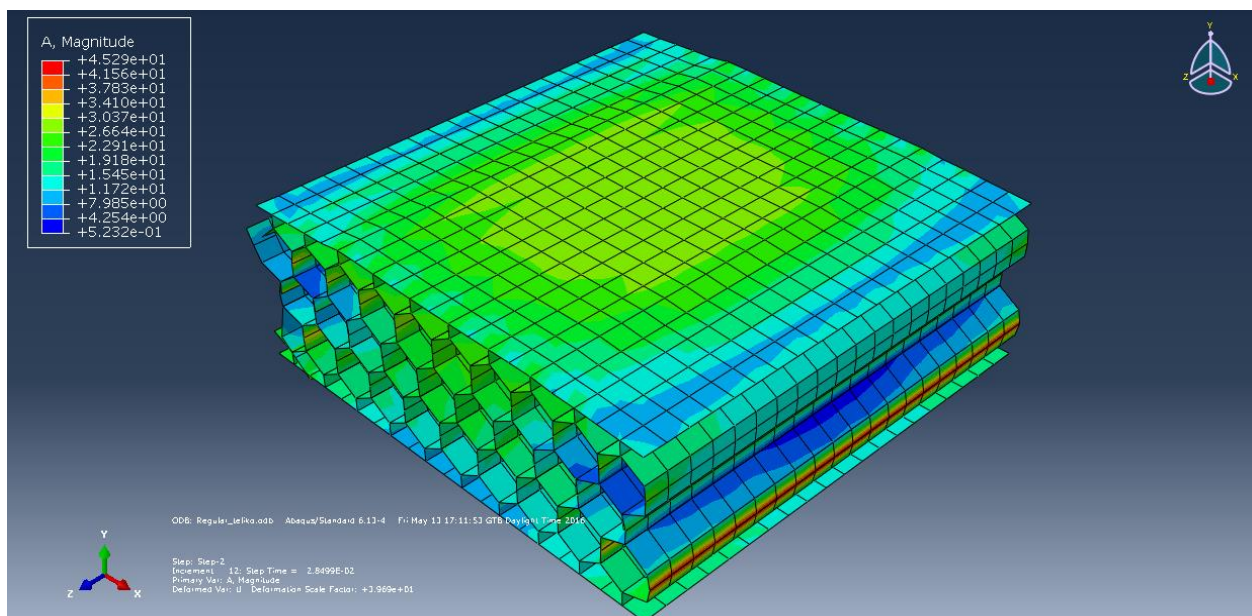
Εικόνα 33. Συνολικές παραμορφώσεις στον οριζόντιο άξονα X



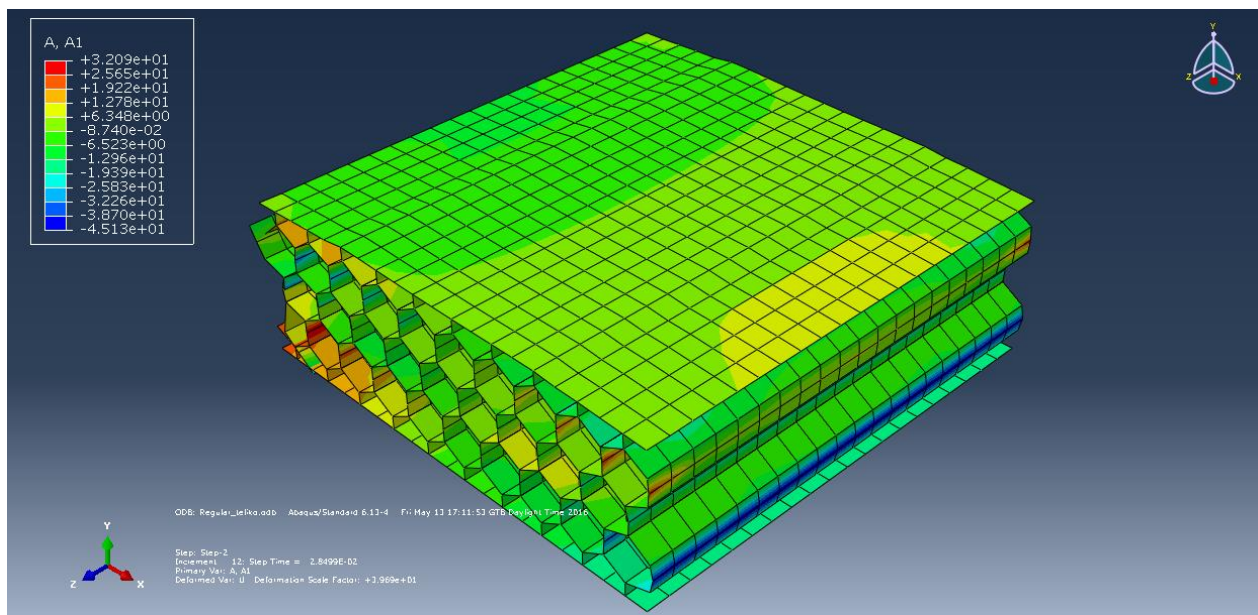
Εικόνα 34. Συνολικές παραμορφώσεις στον κατακόρυφο άξονα Y



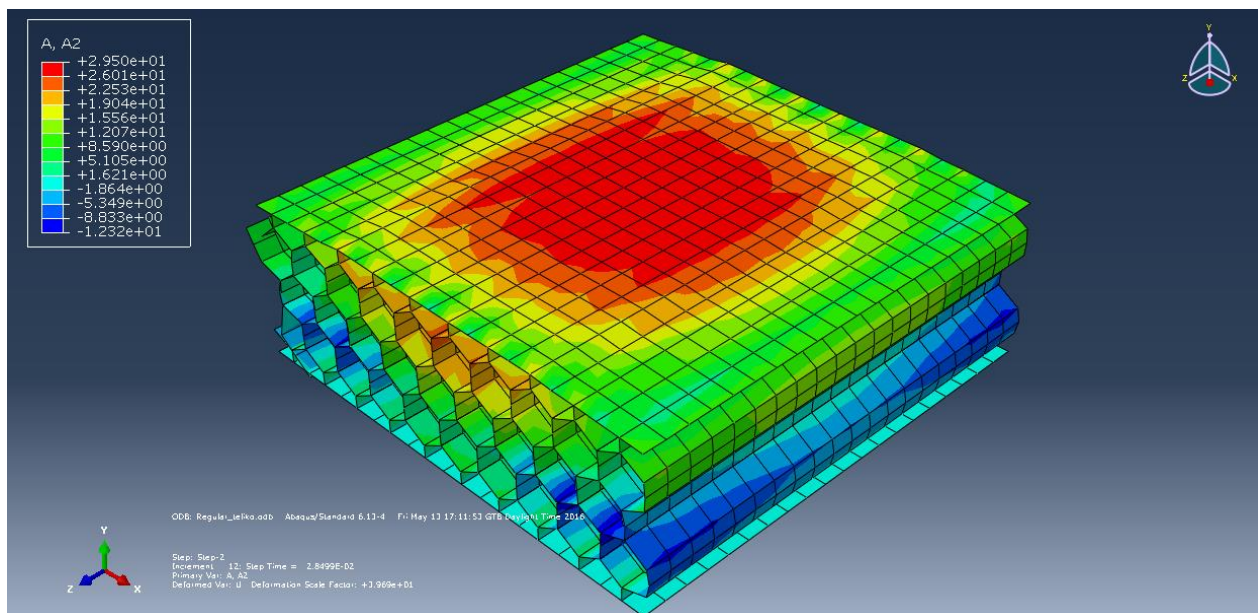
Εικόνα 35. Συνολικές παραμορφώσεις στον άξονα Z



Εικόνα 36. Συνολικό μέγεθος επιταχυνσεων που ενεργούν στο μοντέλο

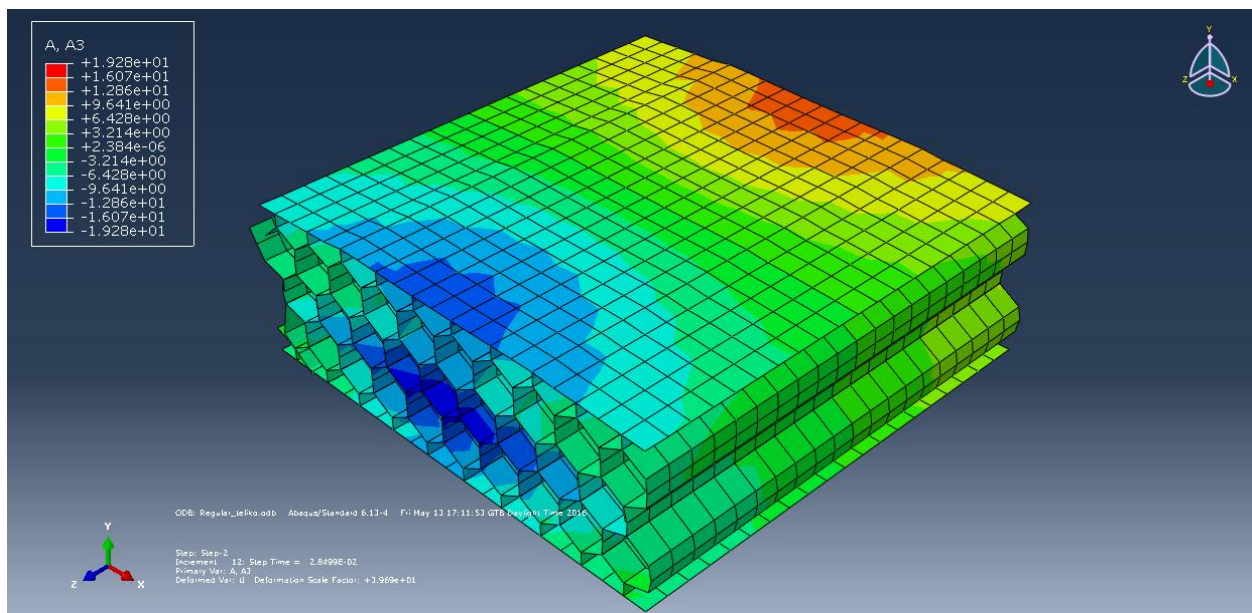


Εικόνα 37. Επιταχύνσεις κατά τον οριζόντιο άξονα X



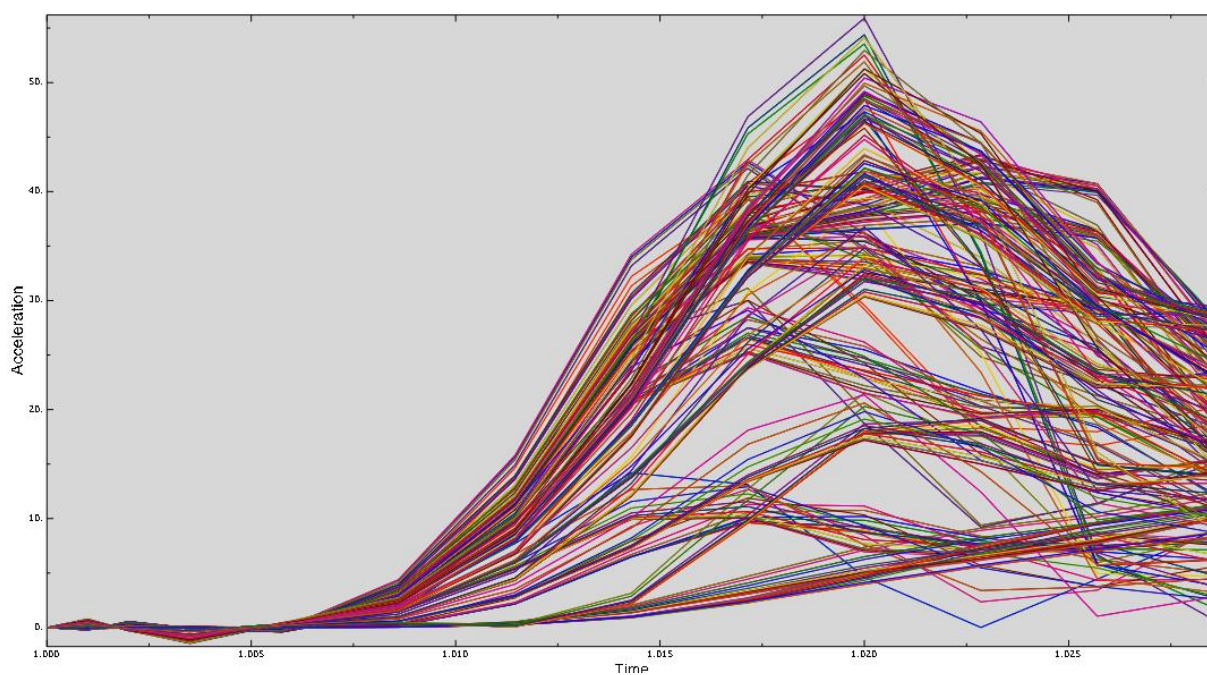
Εικόνα 38. Επιταχύνσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα Y



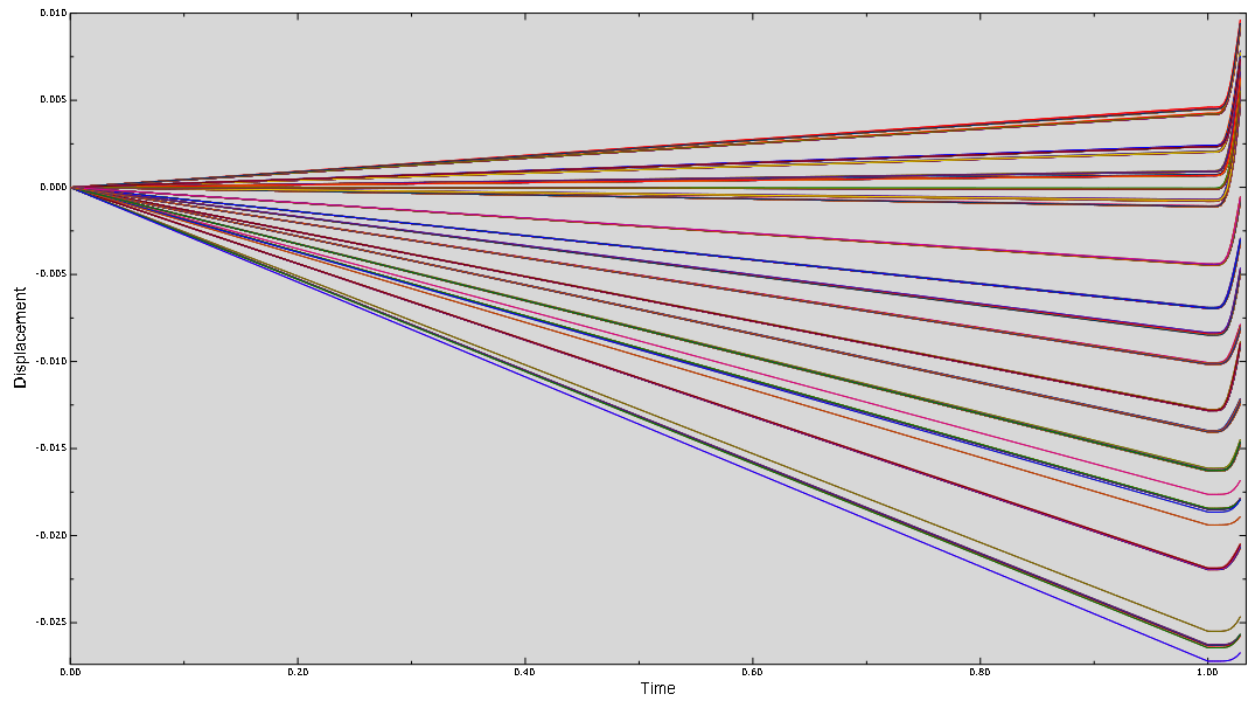


Εικόνα 39. Επιταχύνσεις κατά τον άξονα Z

Παρακάτω βλέπουμε τις επιταχύνσεις που ενεργούν στο μοντέλο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι επιταχύνσεις που ενεργούν είναι διαφορετικές σε κάθε σημείο. Το συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι σε μερικά σημεία το μέγεθος των επιταχύνσεων που ενεργούν είναι σχετικά μικρό. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν σημεία στα οποία οι τιμές της επιτάχυνσης ξεπερνούν τα **55 m/s**.



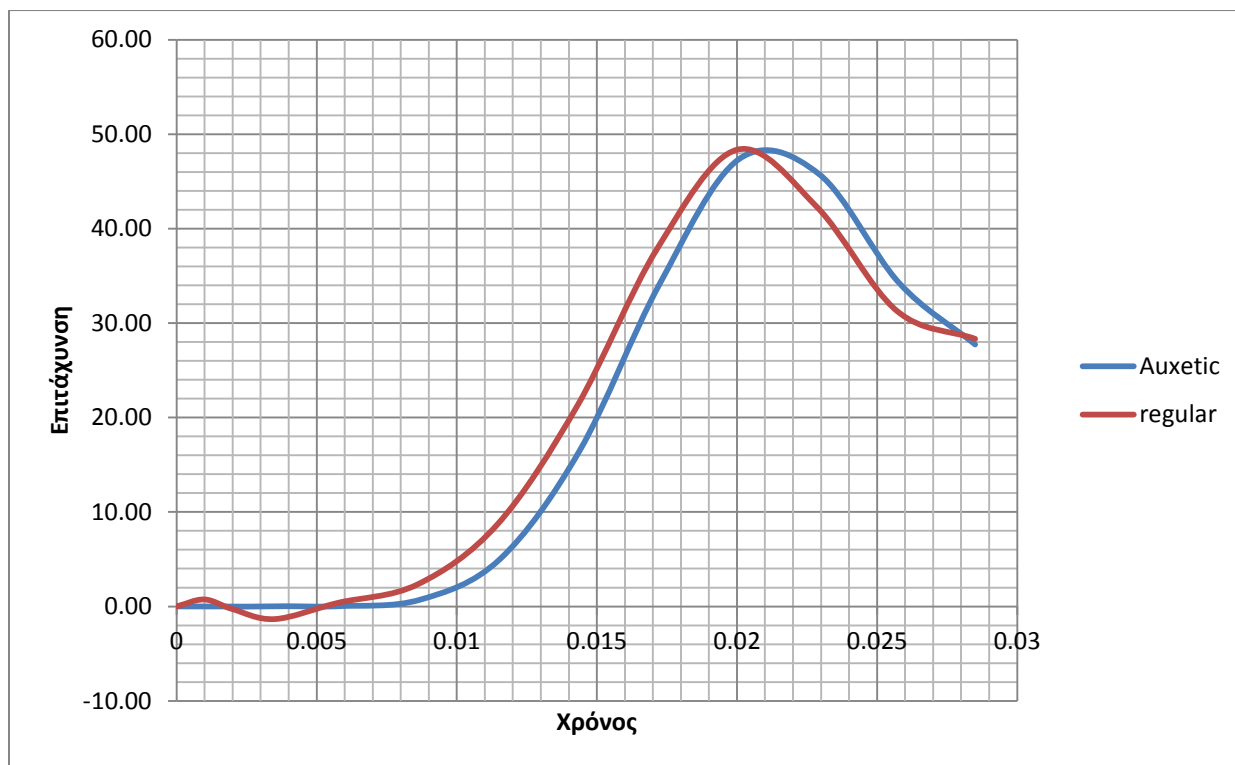
Διάγραμμα 8. Το διάγραμμα των επιταχύνσεων, στην πάνω επιφάνεια του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο



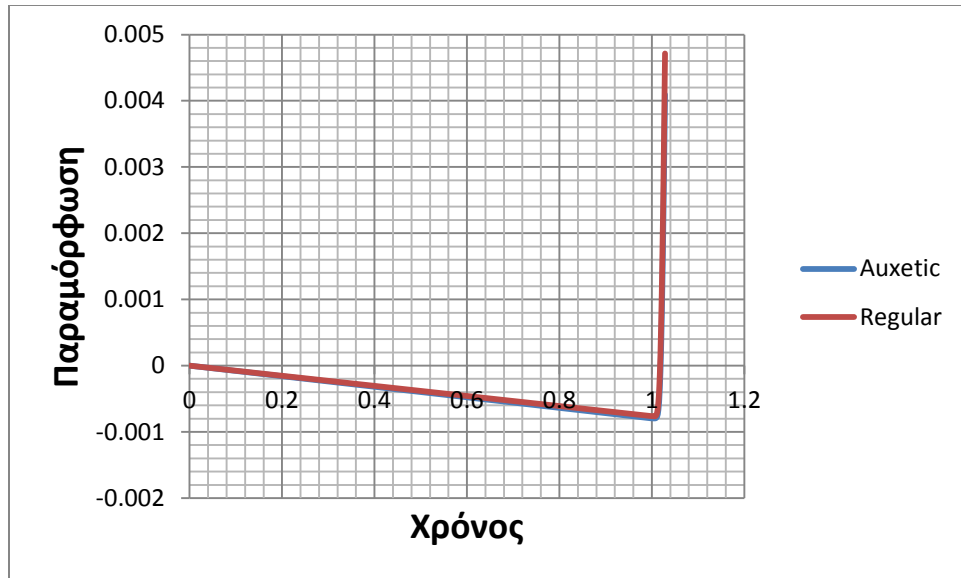
Διάγραμμα 9. Παραμόρφωση - Χρόνος για το κλασσικό μοντέλο

### 6.3 Συγκριτικά αποτελέσματα αυξητικού – συμβατικού μοντέλου

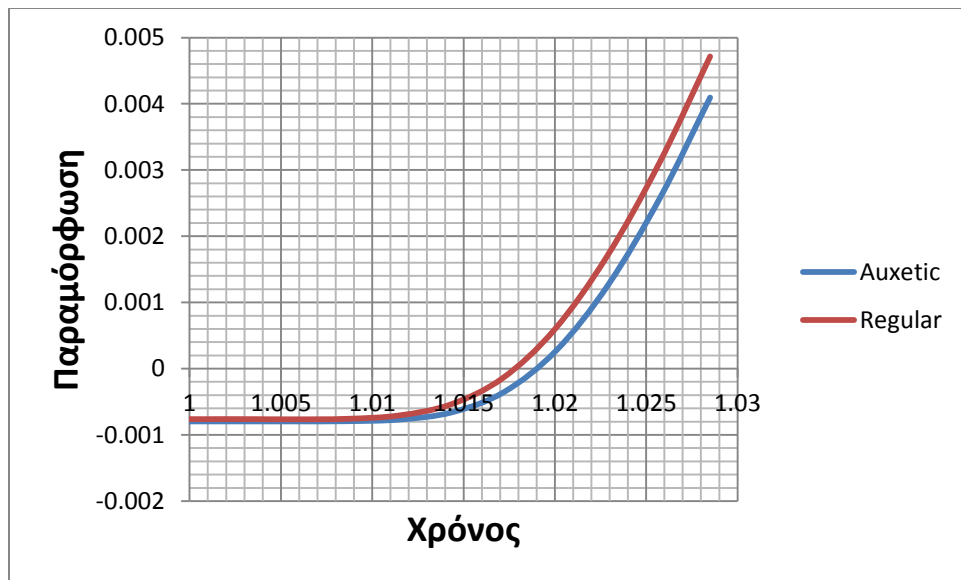
1. **Συγκριτικά αποτελέσματα των επιταχύνσεων και των παραμορφώσεων στο κέντρο των κατασκευών για τον κατακόρυφο άξονα για περίοδο φόρτισης ίση με 0,02850s.**  
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης σε σχέση με τις αποκρίσεις του μοντέλου στο κέντρο της κατασκευής. Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε εξετάζοντας το συγκριτικό διάγραμμα των επιταχύνσεων στον κατακόρυφο άξονα, είναι ότι στο σημείο αυτό οι διαφορές μεταξύ των δύο μικροδομών είναι ελάχιστες, καθώς παρατηρούμε ότι συμπεριφέρονται με όμοιο τρόπο. Παράλληλα παρατηρούμε ότι για χρόνο περίπου ίσο με 0,02s το αυξητικό μοντέλο παρουσιάζει μικρότερο μέγεθος επιταχύνσεων σε σχέση με το κλασσικό. Όσον αφορά τις παραμορφώσεις του φορέα, αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως για το σημείο αυτό καθ' όλη τη διάρκεια της δυναμικής διέγερσης, φαίνεται πως το αυξητικό μοντέλο παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το κλασσικό. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα επιτάχυνσης – χρόνου και παραμόρφωσης – χρόνου.



**Διάγραμμα 10. Συγκριτικά αποτελέσματα των επιταχύνσεων στο κέντρο των κατασκευών για τον κατακόρυφο άξονα**



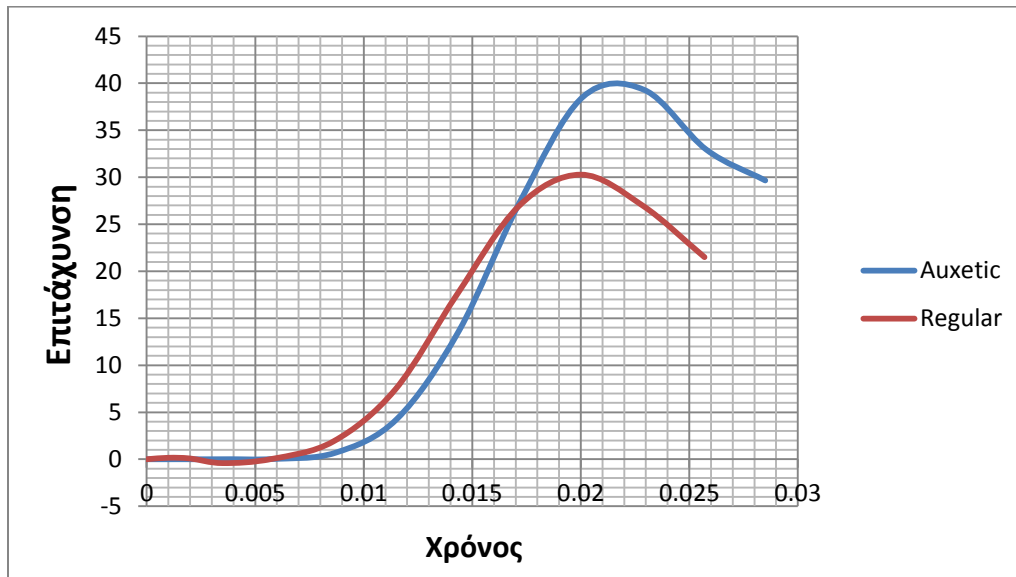
Διάγραμμα 11. Παραμορφώσεις στο κέντρο των κατασκευών για τον κατακόρυφο άξονα για το σύνολο του χρόνου



Διάγραμμα 12. Παραμορφώσεις στο κέντρο των κατασκευών για τον κατακόρυφο άξονα για το αυξητικό και το κλασσικό μοντέλο για χρόνο 1 – 1.02850 s

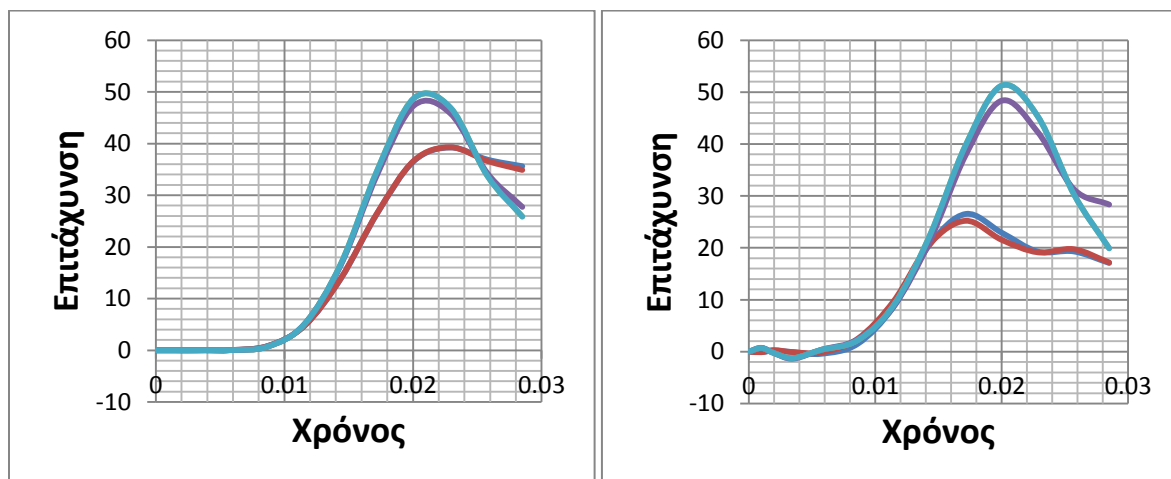
2. **Μέσοι όροι επιταχύνσεων για το αυξητικό και το συμβατικό υλικό για περίοδο φόρτισης ίση με 0,02850s.** Χρησιμοποιούμε τον μέσο όρο για να εξετάσουμε πώς συμπεριφέρεται το υλικό λαμβάνοντας υπόψιν, όλα τα σημεία της πάνω επιφάνειας του μοντέλου. Παρόλα αυτά, ο μέσος όρος είναι ένα ενδεικτικό μέγεθος το οποίο δεν μπορεί με ακρίβεια να χαρακτηρίσει την συμπεριφορά των μοντέλων που εξετάζουμε. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι αποκρίσεις στην επιφάνεια του μοντέλου δεν είναι ίδιες σε όλα τα σημεία. Σύμφωνα με αυτό, είναι φυσικό να υπάρχει ένα εύρος σημείων με

καλύτερες αποκρίσεις. Το συμπέρασμα που βγαίνει από την μελέτη αυτή είναι ότι το συμβατικό μοντέλο της κλασσικής κυνέλης συμπεριφέρεται καλύτερα σε σχέση με το αυξητικό παρόλα αυτά υπάρχουν σημεία στα οποία συμβαίνει το αντίθετο. Για αυτό το λόγο, στην προσπάθεια να υπάρξει μια πιο σφαιρική εικόνα σχετικά με την συμπεριφορά των υπό εξέταση μοντέλων, εξετάζουμε και τα αποτελέσματα των επιταχύνσεων σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας.



Διάγραμμα 13. Επιταχύνσεις κατά μέσο όρο για το αυξητικό και το κλασσικό μοντέλο

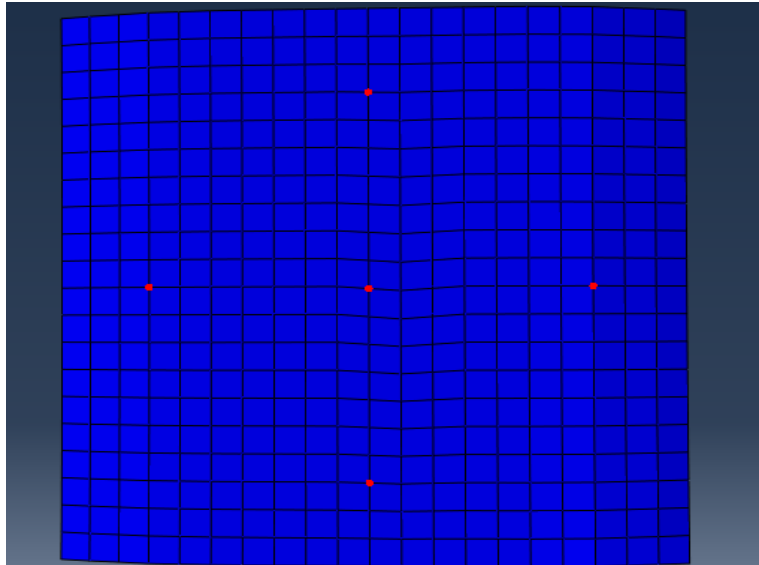
3. *Απόκριση επιταχύνσεων σε συγκεκριμένα σημεία στην επιφάνεια του μοντέλου για περίοδο φόρτισης ίση με 0,02850s.* Για την ακριβέστερη μελέτη των αποκρίσεων επιλέγουμε κάποια σημεία της επιφάνειας για να δούμε αναλυτικότερα την συμπεριφορά του φορέα.



Διάγραμμα 14. Επιταχύνσεις σε τυχαία σημεία της επιφάνειας για το αυξητικό μοντέλο ( αριστερά ) και το κλασσικό μοντέλο ( δεξιά )

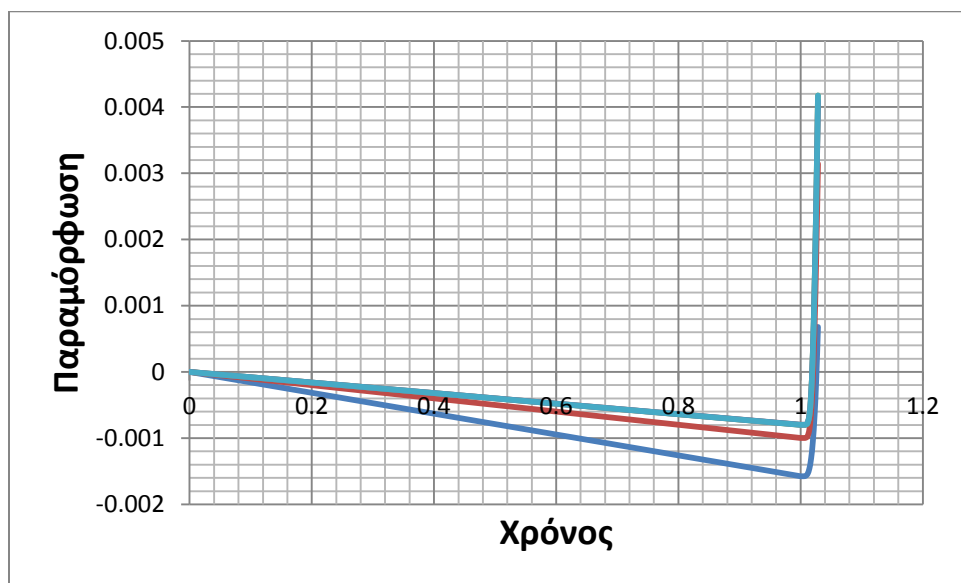


Αυτό που συμπεραίνουμε, είναι ότι στο κλασσικό μοντέλο υπάρχουν καλύτερες αποκρίσεις σε κάποια από τα σημεία που επιλέχθηκαν, παρόλα αυτά παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στο αυξητικό υλικό είναι μικρότερη από το κλασσικό. Τα σημεία που μελετήθηκαν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



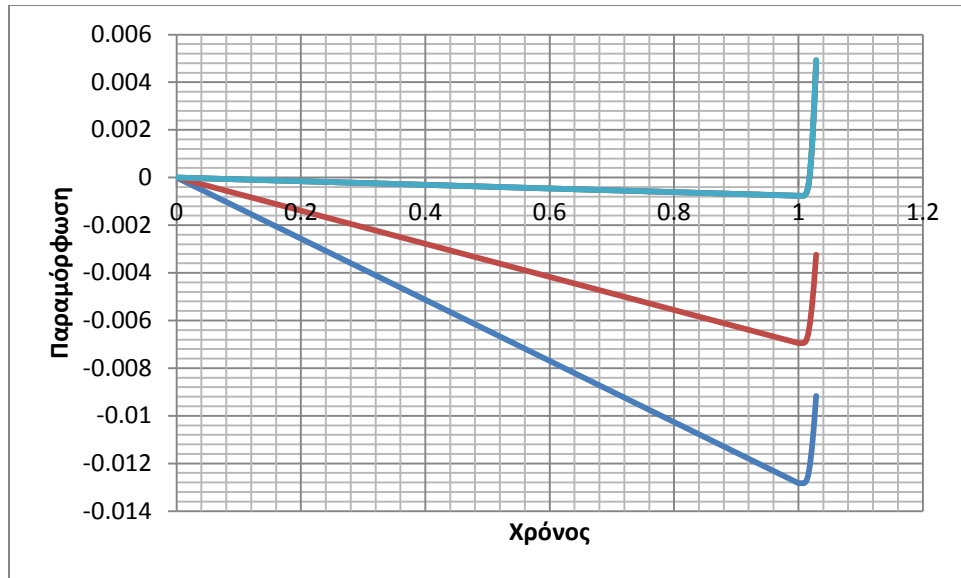
Εικόνα 40. Σημεία που εξετάστηκαν

4. *Μετατοπίσεις του φορέα κατά τον κατακόρυφο άξονα σε συγκεκριμένα σημεία για περίοδο φόρτισης ίση με 0,02850s.* Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που έγιναν, οι παραμορφώσεις του αυξητικού μοντέλου είναι μικρότερες από αυτές του κλασσικού μοντέλου. Για την αυξητική δομή η μέγιστη τιμή της μετατόπισης του φορέα προς τη θετική φορά του άξονα, δηλαδή προς τα πάνω, για αυτά σημεία που μελετήθηκαν είναι **0.00429971** ενώ προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά **0.00179259**

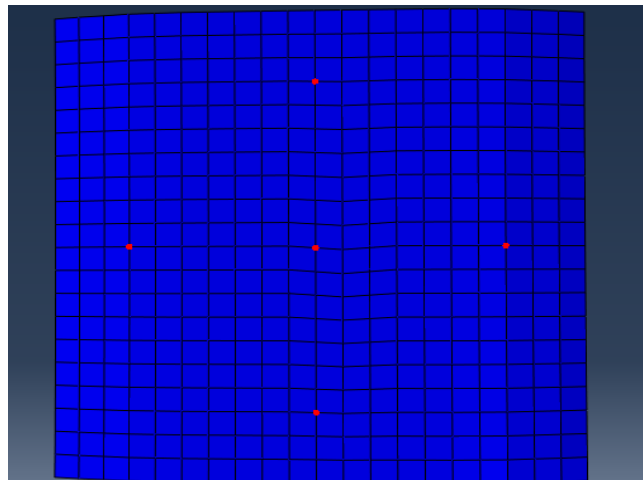


Διάγραμμα 15. Παραμόρφωση Χρόνος σε σημεία για το αυξητικό μοντέλο

Για την κλασσική δομή η μέγιστη τιμή της μετατόπισης του φορέα για αυτά τα σημεία που μελετήθηκαν προς τη θετική φορά του άξονα δηλαδή προς τα πάνω, είναι **0.00492802** ενώ προς την αντίθετη κατεύθυνση είναι **0.0128281**



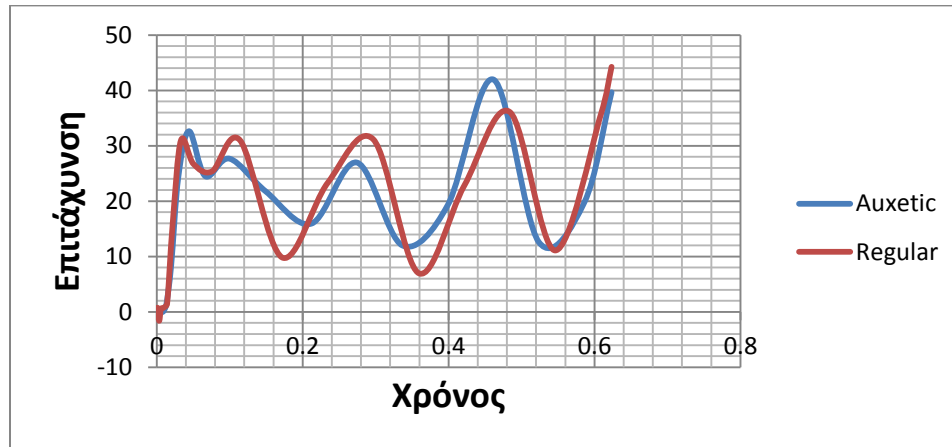
Διάγραμμα 16. Παραμόρφωση - Χρόνος σε σημεία για το κλασσικό μοντέλο



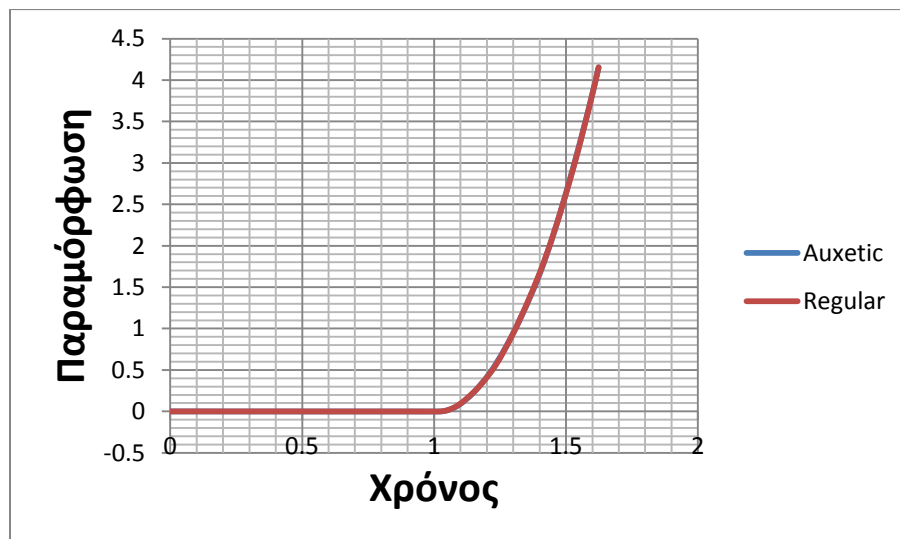
Εικόνα 41. Σημεία που εξετάστηκαν

5. **Μετατοπίσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα για περίοδο φόρτισης ίση με 0,02850s.**  
Αξίζει να αναφερθεί ότι στο σύνολο των σημείων της πάνω επιφάνειας των μοντέλων, βρίσκουμε ότι η μέγιστη τιμή της μετατόπισης για την αυξητική δομή, κατά την θετική διεύθυνση είναι **0.00429971** ενώ κατά την αρνητική διεύθυνση είναι **0.00179259**. Για την κλασσική δομή βρίσκουμε ότι η μέγιστη τιμή της μετατόπισης, κατά την θετική διεύθυνση είναι **0.00962122** ενώ κατά την αρνητική διεύθυνση είναι **0.0272116**.

6. Συγκριτικά αποτελέσματα των επιταχύνσεων και παραμορφώσεων στο κέντρο των κατασκευών για τον κατακόρυφο άξονα για διάρκεια φόρτισης ίση με 0,6234 s

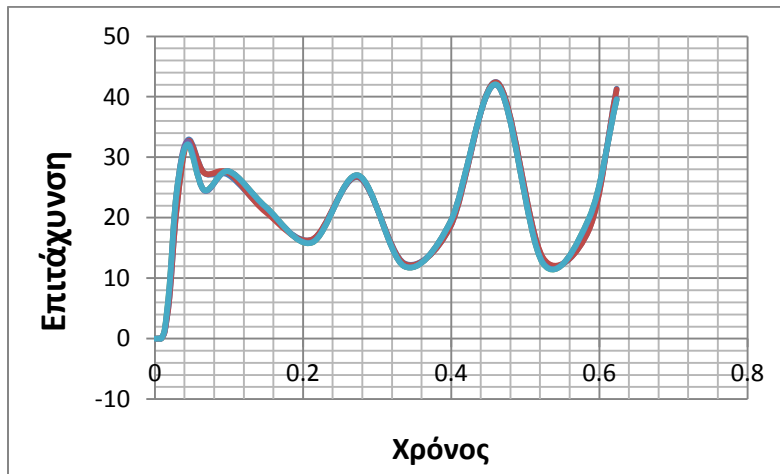


Διάγραμμα 17. Συγκριτικά αποτελέσματα Επιτάχυνσης για το κέντρο των κατασκευών

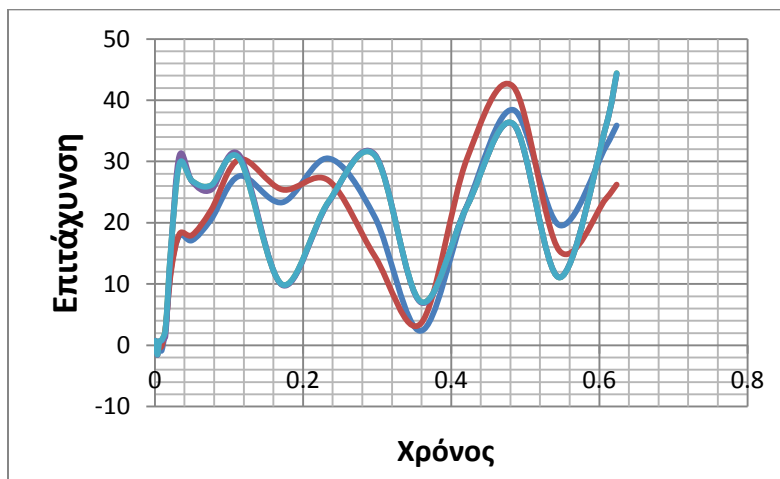


Διάγραμμα 18. Συγκριτικά αποτελέσματα παραμορφώσεων για το κέντρο των κατασκευών

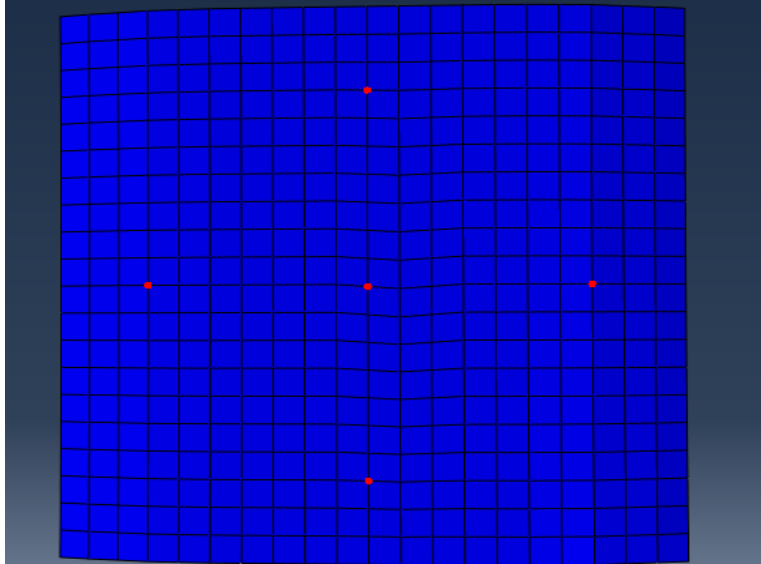
7. Απόκριση επιταχύνσεων σε σημεία στην επιφάνεια του μοντέλου για περίοδο φόρτισης ίση με 0,6234 s.



Διάγραμμα 19. Επιτάχυνση - Χρόνος για σημεία στο αυξητικό μοντέλο



Διάγραμμα 20. Επιτάχυνση - Χρόνος για σημεία στο κλασσικό μοντέλο



Εικόνα 42. Σημεία που εξετάστηκαν

## 7. Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση των δύο μικροδομών. Σκοπός της εργασίας είναι να μελετήσουμε το αν η συγκεκριμένη μικροδομή μπορεί να εφαρμοστεί σε δομικά μέρη ενός ταχύπλοου σκάφους, ώστε να υπάρχει καλύτερη συμπεριφορά του σκάφους στις δονήσεις που δημιουργούνται. Από τις διάφορες επιλύσεις που έγιναν για την εφαρμογή που μελετάμε, το **γενικό συμπέρασμα** είναι πως η δομή αυτή δεν λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει απόσβεση των δονήσεων που δημιουργούνται και η συμπεριφορά του είναι σχετικά όμοια με εκείνη του κλασσικού μοντέλου.

Αρχικά είναι δεδομένο ότι για κάθε σημείο των υπό εξέταση μοντέλων, υπάρχουν διαφορές στις αποκρίσεις τους, είτε αναφερόμαστε στις συνολικές παραμορφώσεις είτε στις επιταχύνσεις που ενεργούν. Έτσι αυτό που παρατηρούμε είναι ότι σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου υπάρχουν σημεία στα οποία λειτουργούν με καλύτερο και άλλα με χειρότερο τρόπο. Τα χρήσιμα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη που έγινε είναι τα εξής:

1. Οι συνολικές παραμορφώσεις στον κατακόρυφο άξονα, τον άξονα δηλαδή στον οποίο ενεργούν οι επιταχύνσεις, είναι μικρότερες για το αυξητικό υλικό σε σχέση με το κλασσικό.
2. Δεν υπάρχει κάποια σημαντική διαφορά στις επιταχύνσεις που ενεργούν στο πάνω μέρος του μοντέλου ανάμεσα στο αυξητικό και το κλασσικό μοντέλο. Όμως αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι, πως υπάρχουν σημεία της πάνω επιφάνειας του κλασσικού μοντέλου στα οποία παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το αυξητικό. Παράλληλα όμως, παρατηρούμε ότι κατά μέγιστη τιμή σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου, η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης για το αυξητικό μοντέλο είναι μικρότερη από την μέγιστη τιμή που εμφανίζει το κλασσικό μοντέλο.

Τα παραπάνω αποτελούν τα βασικά αποτελέσματα της μελέτης που έγινε. Αυτό στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι η συγκεκριμένη μικροδομή που εξετάστηκε, δεν βοηθάει σε μεγάλο βαθμό στο να αντιμετωπιστούν οι δονήσεις που ενεργούν σε ένα ταχύπλοο σκάφος. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι το αυξητικό μοντέλο λειτουργεί καλύτερα όσον αφορά τις μετατοπίσεις, σε σχέση με την κλασσική δομή. Για την καλύτερη προσέγγιση του ζητήματος και μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, η σχεδίαση εκ νέου του μοντέλου και η καλύτερη παραμετροποίηση μπορεί να δώσει μια πιο σαφή εικόνα για την συνολική συμπεριφορά του μοντέλου στην εφαρμογή που μελετάμε σχετικά με την δυναμική απόκριση αυξητικής δομής σε ταχύπλοο σκάφος.



## 7.1 Προτάσεις διερεύνησης

Η δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα το οποίο χρειάζεται σοβαρή μελέτη. Ως μελλοντική διερεύνηση και επέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να προταθεί η σχεδίαση του αυξητικού μοντέλου με καλύτερη παραμετροποίηση είτε σχεδίαση του ταχύπλοου σκάφους στο οποίο θα γίνει ακριβής ανάλυση των δυνάμεων που ενεργούν. Τέλος, θα μπορούσε να προταθεί η διερεύνηση και σε πειραματικό επίπεδο έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς υλικών αυτού του τύπου.



## Βιβλιογραφία

*Abaqus Analysis User's Guide*

Antonatos, A., 2012. *Parametric FE - modeling of High-speed Craft Structures*, Stockholm: Royal Institute of Technology.

Ghiasi, E. K., 2015. *Numerical Investigation of Auxetic Materials Due to the Elastic*. Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad.

Keams, S. D., 2001. *Analysis and Mitigation of Mechanical Shock Effects*, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Liam, C., 2011. *Testing and Modeling of Shock Mitigating Seats for High Speed Craft*, Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University.

Olausson, K., 2015. *On Evaluation and Modelling of Human Exposure to Vibration and Shock on Planing High-Speed Craft*, Stockholm: Royal Institute of Technology.

Smardzewski, J., 2013. Auxetic springs for seating. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*.

Stavroulakis, G., 2005. Auxetic Behavior: Appearance and Engineering Applications. *Physica Status Solidi (b)*, Τόμος 242.

Κατρανίδης, Β., 2013. *Μελέτη αυξητικών υλικών: Ανάλυση μηχανικών συνδέσμων σε πολύστρωτα σύνθετα και μεταλλικούς αφρούς*, Ερμούπολη: Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Παπαδογιάννη, Ν., 2015. *Μελέτη της επιρροής μη γραμμικών φαινομένων υλικού και επαφής - τριβής στη μηχανική αποκριση αυξητικών υλικών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Συντζανάκης, Α., 2015. *Μελέτη Αυξητικών Κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία*, Χανια: Πολυτεχνείο Κρήτης.

## Παράρτημα

Χρόνος(s)	Επιτάχυνση (m/s <sup>2</sup> )	Χρόνος (s)
0	0	0
0.013	15.48999	0.000838
0.074	30.97017	0.001676
0.0974	28.6452	0.002515
0.1104	15.48999	0.003353
0.1234	17.03016	0.004191
0.1364	17.03016	0.005029
0.1494	17.80515	0.005868
0.1624	25.55505	0.006706
0.2024	15.48999	0.007544
0.2214	31.74516	0.008382
0.2374	22.45509	0.009221
0.2604	15.48999	0.010059
0.2734	17.03016	0.010897
0.2864	16.25517	0.011735
0.2994	15.48999	0.012574
0.3124	15.48999	0.013412
0.3254	15.48999	0.01425
0.3384	17.03016	0.015088
0.4434	39.48525	0.015926
0.4564	16.25517	0.016765
0.4964	17.80515	0.017603
0.5764	27.09522	0.018441
0.6104	22.45509	0.019279
0.6234	15.48999	0.020118
	0	0.020956
	0	0.021794
	0	0.022632
	0	0.023471
	0	0.024309
	0	0.025147
	0	0.025985
	0	0.026824
	0	0.027662
	0	0.0285

Πίνακας Επιτάχυνση - Χρόνος για κάθε περίοδο φόρτισης