



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΩΣΗΣ ΑΥΞΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ  
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**ΧΑΝΙΑ 2017**

**ΜΑΙΡΗ ΓΛΕΝΗ**  
**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ**



## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Ευχαριστίες.....  | 3  |
| Περίληψη.....   | 4  |
| 1. Εισαγωγή .....   | 5  |
| 1.1 Γενικά στοιχεία .....                                 | 5  |
| 1.2 Σκοπός εργασίας .....                                 | 6  |
| 2. Αυξητικά υλικά .....                                   | 7  |
| 2.1 Γενική περιγραφή .....                                | 7  |
| 2.2 Αρνητικός λόγος Poisson .....                         | 8  |
| 2.3 Εφαρμογές αυξητικών υλικών .....                      | 9  |
| 3. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων .....             | 11 |
| 3.1 Το λογισμικό ABAQUS .....                             | 11 |
| 4. Προσομοίωση αυξητικού και συμβατικού υλικού.....       | 12 |
| 4.1. Διάταξη σάντουιτς.....                               | 12 |
| 4.2. Βήματα προσομοίωσης .....                            | 13 |
| 4.3. Παρουσίαση στατικής ανάλυσης .....                   | 14 |
| 4.4. Παρουσίαση steady-state dynamic ανάλυσης.....        | 15 |
| 4.5. Παρουσίαση δυναμικής ανάλυσης .....                  | 16 |
| 4.6. Παρουσίαση σεισμικής ανάλυσης .....                  | 17 |
| 5. Αποτελέσματα προσομοίωσης των αναλύσεων .....          | 19 |
| 5.1. Αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης.....              | 19 |
| 5.1.1. 1 <sup>η</sup> περίπτωση .....                     | 19 |
| 5.1.2. 2 <sup>η</sup> περίπτωση .....                     | 25 |
| 5.2. Αποτελέσματα της steady-state dynamic ανάλυσης ..... | 29 |
| 5.2.1 Ανάλυση ιδιοτιμών-ιδιοσυχνοτήτων.....               | 29 |
| 5.3. Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης.....                 | 35 |
| 5.4. Αποτελέσματα σεισμικής ανάλυσης .....                | 40 |
| 5.4.1. 1 <sup>η</sup> περίπτωση .....                     | 40 |
| 5.4.2. 2 <sup>η</sup> περίπτωση .....                     | 45 |
| 6. Συμπεράσματα .....                                     | 49 |
| 6.1. Προτάσεις διερεύνησης .....                          | 49 |
| Αναφορές .....  | 50 |

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο για την ανάθεση, βοήθεια και συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κουτσιανίτη Παναγιώτη για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και τον χρόνο που αφιέρωσε παρ' όλη την απουσία του από τα Χανιά, καθώς και τον Δρ. Ταϊρίδη Γεώργιο. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την υποστήριξη τους στην διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Στη διαδικασία της παραγωγής η επιλογή του κατάλληλου υλικού αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια λόγω του ότι καθορίζει τη συμπεριφορά της κατασκευής. Για αυτό το λόγο η αξιοποίηση νέων υλικών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες κρίνεται επιτακτική. Μια τέτοια κατηγορία υλικών είναι τα αυξητικά. Τα αυξητικά υλικά είναι ουσιαστικά μικροδομές, οι οποίες όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Τα αυξητικά υλικά λόγω της ασυνήθιστης συμπεριφοράς τους έχουν πλέον πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη μόνωσης αυξητικού υλικού με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Θα δημιουργηθούν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα σε μορφή σάντουιτς. Οι δομές θα έχουν ως εξής: όλες οι πλάκες με κανονικό υλικό - η μεσαία πλάκα με αυξητικό υλικό- όλες οι πλάκες με αυξητικό υλικό – η μεσαία πλάκα με κανονικό υλικό. Τα τέσσερα αυτά μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν σε δυο εφαρμογές. Η πρώτη περιλαμβάνει στατική, δυναμική και ανάλυση για απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων. Η δεύτερη εφαρμογή που θα εξεταστεί είναι πάνω στην ίδια διάταξη στην οποία θα εφαρμόσουμε έναν σεισμό και με βάση τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια του θα κατανοήσουμε πως αντιδρά η διάταξη όταν είναι ενισχυμένη με αυξητικό υλικό και όταν δεν είναι.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά στοιχεία

Η σεισμική μόνωση έχει βρει έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε όλο τον κόσμο και έχει αποδειχθεί αποτελεσματική και πρακτική προσέγγιση για την επίτευξη ικανοποιητικής σεισμικής απόδοσης για μια ποικιλία δομικών συστημάτων. Η αρχική ιδέα πίσω από την σεισμική μόνωση περιλαμβάνει την αποσύνθεση της δομής από την οριζόντια κίνηση εδάφους παρέχοντας ευελιξία και εξοικονόμηση ενέργειας χωρητικότητας. Με αυτά τα μέσα η δομική ανακίνηση μπορεί να μετριαστεί και η ζημιά κατά την διάρκεια των σεισμών μπορεί να μειωθεί, αν δεν εξαλειφθεί. Έτσι η επιλογή του κατάλληλου υλικού και τεχνολογίας κατά την διαδικασία της παραγωγής αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια για την συμπεριφορά της κατασκευής. Μια από τις πιο απλές μεθόδους απομόνωσης στον σεισμό είναι τα ρουλεμάν από καουτσούκ, τα οποία δημιουργούνται με συγκόλληση σε φύλλα από καουτσούκ και λεπτές πλάκες ενισχυμένου χάλυβα. Τα ρουλεμάν αυτά είναι πολύ δύσκαμπτα στη κατακόρυφη κατεύθυνση και είναι πολύ εύκαμπτα στην οριζόντια λόγω του ότι οι κατακόρυφες επιταχύνσεις δεν αποτελούν πρόβλημα στα περισσότερα κτίρια. Μια άλλη δοκιμασμένη τεχνολογία που βοηθάει τα κτίρια να αντέξουν τις σεισμικές δονήσεις είναι τα αμορτισέρ ή αποσβεστήρες, οι οποίοι επιβραδύνουν και μειώνουν το μέγεθος των δονητικών κινήσεων, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε θερμική, η οποία μπορεί να εξαλειφθεί μέσω του υδραυλικού υγρού. [2]

Όσον αφορά τα αυξητικά υλικά, τα οποία έχουν μελετηθεί ευρέως για τις ειδικές ιδιότητες τους που συνδέονται με αρνητικό λόγο Poisson, έχουν επίσης ενδιαφέρουσες ιδιότητες σταματήματος, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της προστασίας σεισμικών κυμάτων. Η χρήση συστοιχιών αυξητικών κυττάρων για σεισμική δομική προστασία είναι ένας νέος τρόπος για την εκτέλεση ελαστικών κενών ζωνών προκειμένου να αποτραπεί η διάδοση σεισμικών κυμάτων σε συγκεκριμένες περιοχές συχνότητων. [3]

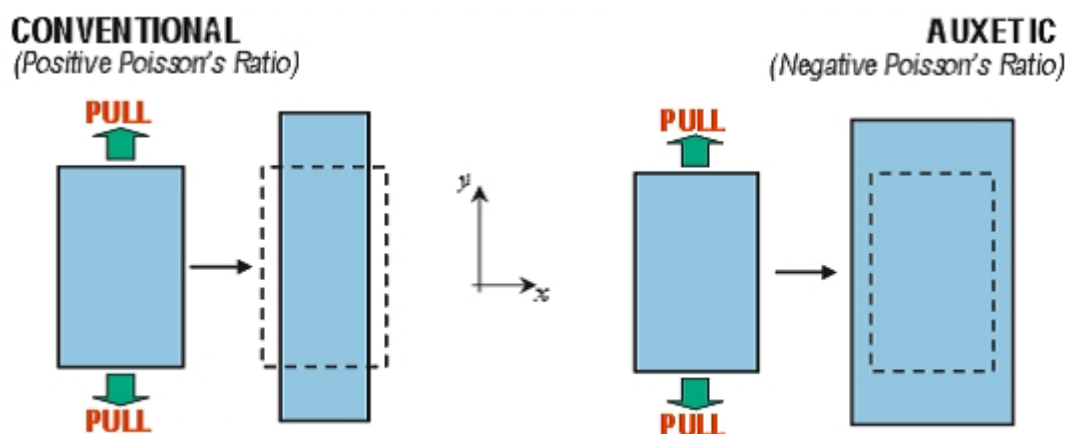
## 1.2 Σκοπός εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό τη μελέτη μόνωσης αυξητικού υλικού με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων πάνω σε δύο εφαρμογές. Με βάση τις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν θέλουμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των αυξητικών υλικών όταν είναι στην ίδια κατασκευή και είναι σαν να είναι κολλημένα. Πιο συγκεκριμένα, θα συγκρίνουμε τις 4 διαφορετικές διατάξεις, ώστε να κατανοήσουμε τις όποιες διαφορές τους και τέλος να δούμε αν μπορούν να λειτουργήσουν σαν μόνωση.

## 2. Αυξητικά υλικά

### 2.1 Γενική περιγραφή

Η εφαρμογή εφελκυσμού σε ένα κοινό υλικό, όπως το αλουμίνιο, προς μία κατεύθυνση, προκαλεί μεταβολή του μήκους του σε κατεύθυνση κάθετη προς εκείνη που υπάρχει η φόρτιση, παρατηρείται δηλαδή μείωση της διατομής του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συρρίκνωση. Αντίστοιχα, όταν το ίδιο υλικό υπόκειται σε συμπίεση, σε κατεύθυνση κάθετη στην κατεύθυνση που εφαρμόζεται η κλίση, παρατηρείται το φαινόμενο της επιμήκυνσης. Η μεταβολή αυτή μετριέται με τον λόγο Poisson, ο οποίος αντιστοιχεί συνήθως σε ένα θετικό αριθμό ( $0 < \nu < 0.5$ ) και ορίζεται ως το αρνητικό κλάσμα της εγκάρσιας 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, αυξητικά υλικά, προήλθε από την αυξανόμενη διατομή που παρουσιάζουν, είναι όμως γνωστά και με άλλες ονομασίες, όπως αντί-καουτσούκ (anti-rubber), καθώς όταν βρίσκονται σε εφελκυσμό γίνονται παχύτερα, σε αντίθεση με το καουτσούκ που γίνεται λεπτότερο. Ονομάζονται επίσης και dilatational materials (υλικά που διογκώνονται), γιατί 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.[1]



Εικόνα 1. Χαρακτηριστικά κλασσικού και αυξητικού μοντέλου



## 2.2 Αρνητικός λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson εκφράζει την αναλογία της εγκάρσιας συστολής σε σχέση με την διαμήκη διαστολή στην κατεύθυνση της εφελκυστικής δύναμης.

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

Στα γραμμικά ελαστικά υλικά, οι σχέσεις τάσεις-παραμόρφωσης προέρχονται από τον γενικευμένο κανόνα του Hooke. Τέσσερα είναι τα βασικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουμε τη συμπεριφορά ενός ισότροπου γραμμικού ελαστικού υλικού:

- Το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ )
- Το μέτρο διάτμησης (ή μέτρο δυσκαμψίας) ( $G$ )
- Το μέτρο ελαστικότητας όγκου ( $K$ )
- Την αναλογία Poisson ( $\nu$ ),

τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

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

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

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

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

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

Σύμφωνα με τις δύο πρώτες εξισώσεις ο λόγος Poisson ενός υλικού δεν μπορεί να παίρνει τιμές εκτός του διαστήματος  $(-1.0, 0.5)$  εφόσον είναι αναγκαία συνθήκη το μέτρο ελαστικότητας όγκου και το μέτρο διάτμησης να έχουν θετικές τιμές. Με δεδομένο ότι το μέτρο ελαστικότητας αφορά την παραμόρφωση τρισδιάστατων υλικών ενώ το μέτρο διάτμησης και το μέτρο ελαστικότητας όγκου αφορά εκείνη των τρισδιάστατων, προκύπτει ότι ο ομογενοποιημένος λόγος Poisson αντιστοιχεί σε τιμές από  $-1.0$  μέχρι  $0.5$  σε τρισδιάστατες δομές και  $-1.0$  μέχρι  $1.0$  σε δισδιάστατες. [5]

## 2.3 Εφαρμογές αυξητικών υλικών

Τα αυξητικά υλικά έχουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς και προσφέρουν μια εναλλακτική πρόταση στην επιλογή υλικών για πολλά προϊόντα και χρήσεις.

### ➤ **Βιοϊατρική**

Μια χαρακτηριστική εφαρμογή των αυξητικών υλικών στον κλάδο της βιοϊατρικής είναι εκείνη με τις αυξητικές τεχνητές αρτηρίες. Οι τεχνητές αρτηρίες τείνουν να λεπταίνουν στο πάχος των τοιχωμάτων τους εξαιτίας του αίματος που προκύπτει από τον παλμό της καρδιάς. Αυτό μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες, καθώς αυξάνονται οι πιθανότητες για ρήξη της αρτηρίας. Για αυτό το λόγο, προτάθηκε η χρήση αυξητικού υλικού. Άλλες βιοϊατρικές εφαρμογές είναι στο οδοντικό νήμα και στα χειρουργικά ράμματα.

### ➤ **Αισθητήρες**

Τα αυξητικά υλικά είναι διαδεδομένη 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 περιβάλλοντος τους. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται και οι συνδυαστικές εφαρμογές με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.

➤ **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.

➤ **Δομές απόσβεσης**

Η περίπλοκη εσωτερική γεωμετρία των αυξητικών υλικών διευκολύνει την διασπορά και την απορρόφηση των ηχητικών κυμάτων. Προϊόντα που χρησιμοποιούνται στην ηχομόνωση και στην απορρόφηση ενέργειας κρούσης είναι από τις πιθανές διεξόδους που μπορούν να βρουν οι αυξητικές εφαρμογές στην αγορά, όπως είναι οι ωτοασπίδες, υλικό ηχομόνωσης, προφυλακτήρες αυτοκινήτων.[6]

### 3. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξη της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Η μέθοδος αυτή είναι η κυρίαρχη τεχνική διακριτοποίησης στην κατασκευαστική μηχανική και χρησιμοποιείται ευρέως στη ανάλυση των πολύπλοκων κατασκευών. Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες. [4]

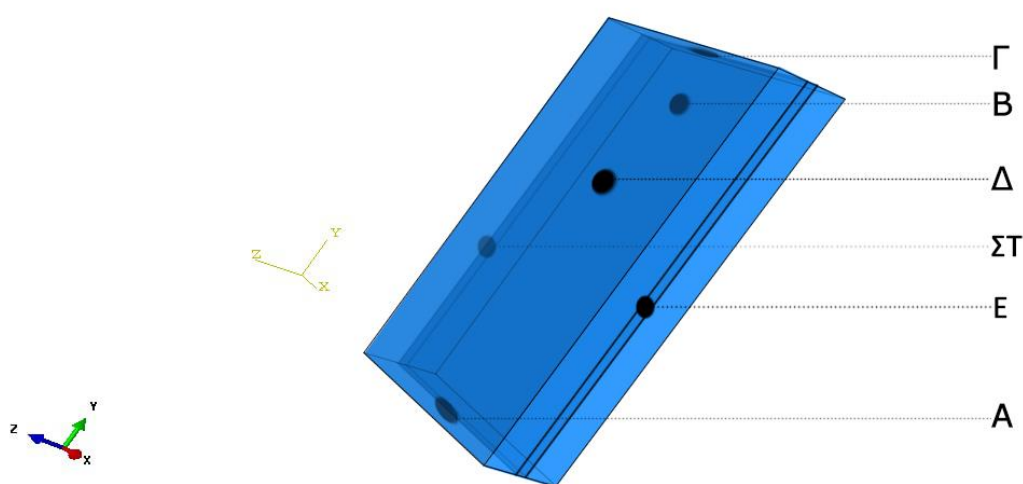
#### 3.1 Το λογισμικό ABAQUS

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας είναι το ABAQUS/cae. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον στο οποίο ο χρήστης μπορεί γρήγορα και αποτελεσματικά να δημιουργήσει, να επεξεργαστεί, να εκτελέσει, να ελέγξει και τέλος να αξιολογήσει τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις Abaqus/standard ,Abaqus/explicit κτλ. Το Abaqus/cae είναι χωρισμένο σε ενότητες, όπως ο ορισμός γεωμετρίας, ο ορισμός ιδιοτήτων, φόρτιση, κατασκευή πλέγματος, οι οποίες θα εξηγηθούν αναλυτικότερα κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος. [7]

## 4. Προσομοίωση αυξητικού και συμβατικού υλικού

### 4.1. Διάταξη σάντουιτς

Με σκοπό να εξετάσουμε κατά πόσο θα αποτελέσουν μόνωση οι στρώσεις του αυξητικού υλικού στις διάφορες εκδοχές που μελετήθηκαν, επιλέχτηκε η διάταξη σάντουιτς, η οποία με τη χρήση του λογισμικού ABAQUS/cae σχεδιάστηκε όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Η ιδιαιτερότητα, όπως φαίνεται και στην εικόνα, είναι η αυξητική δομή δεν έχει γεωμετρία που να αποδίδει αυξητικές ιδιότητες στην διάταξη, χρησιμοποιούμε το ίδιο υλικό και στις τρεις στρώσεις της διάταξης. Ο παράγοντας που θα διαφοροποιήσει το αυξητικό από το συμβατικό υλικό είναι ο λόγος Poisson, που στα αυξητικά υλικά θα ορίζεται ως αρνητικός.



Εικόνα 2. Διάταξη σάντουιτς

## 4.2. Βήματα προσομοίωσης

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό ABAQUS/cae είναι χωρισμένο σε ενότητες μέσα από τις οποίες ο χρήστης μπορεί να φέρει εις πέρας τη διαδικασία της προσομοίωσης. Τα βήματα που ακολουθήσαμε για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι τα εξής:

- Καθορισμός γεωμετρίας της διάταξης: σχεδιάζουμε τη διάταξη
- Καθορισμός ιδιοτήτων του υλικού: εισάγουμε τις ιδιότητες του υλικού του μοντέλου.
- Χρήση της επιλογής assembly με σκοπό να ενώσουμε τις 3 πλάκες για την διάταξη σάντουιτς.
- Καθορισμός του step: επιλογή της μεθόδου επίλυσης που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε.
- Καθορισμός του interaction: επιλέγουμε τον τύπο της συνδεσμολογίας για τις πλάκες της διάταξης.
- Καθορισμός του load: καθορίζουμε τον τύπο φόρτισης που θα ασκηθεί στο μοντέλο μας καθώς και τις συνοριακές συνθήκες.
- Καθορισμός του mesh: αυτό είναι και το τελικό στάδιο, πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας με την εκτέλεση job, όπου γίνεται η διακριτοποίηση του φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία είναι τετραγωνικά.

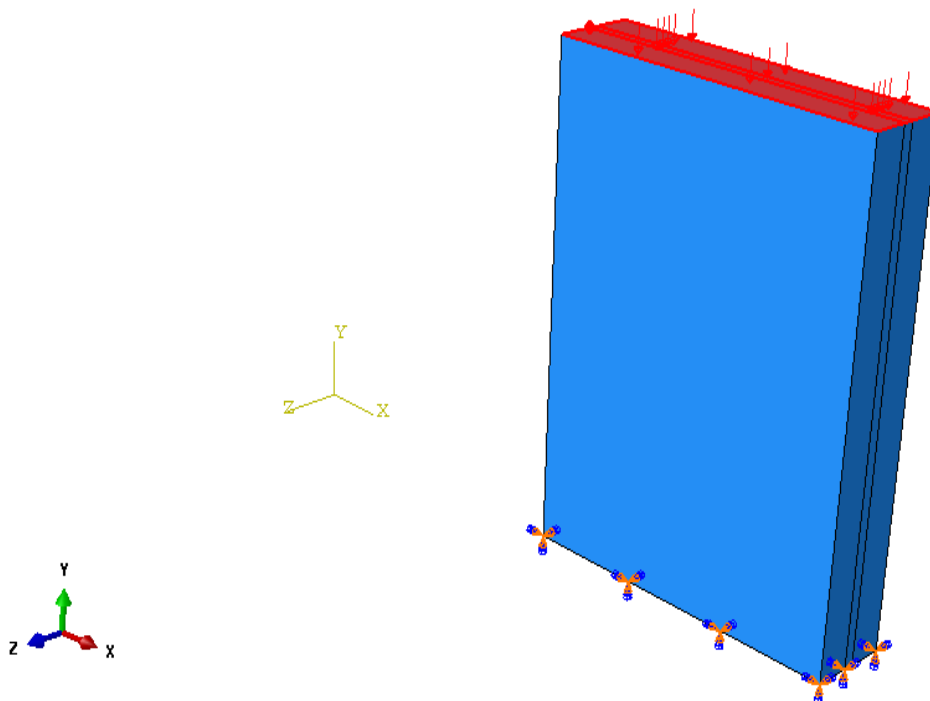
Για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν η γεωμετρία της διάταξης είναι ίδια. Το μέγεθος της κατασκευής είναι 1m\*1.5m με τις εξωτερικές πλάκες να έχουν πάχος 0.1m και την μεσαία 0.03m. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το αλουμίνιο με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Young's Modulus (GPa) | Poisson'Ratio |
|------------------------------|-----------------------|---------------|
| 2.7                          | 68.97                 | 0.34          |

### 4.3. Παρουσίαση στατικής ανάλυσης

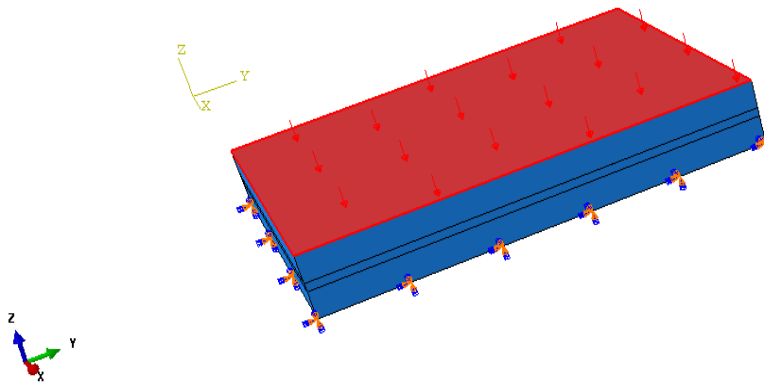
Πραγματοποιήθηκαν δύο στατικές αναλύσεις και για τα τέσσερα μοντέλα της διάταξης. Η διαφορά των δύο αναλύσεων είναι ως προς τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στην κατασκευή.

Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση το μοντέλο, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, έχει την πάκτωση στην επιφάνεια Α και δέχεται πίεση ίση με 10kPa στην επιφάνεια Γ.



Εικόνα 3. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση-1<sup>η</sup> περίπτωση

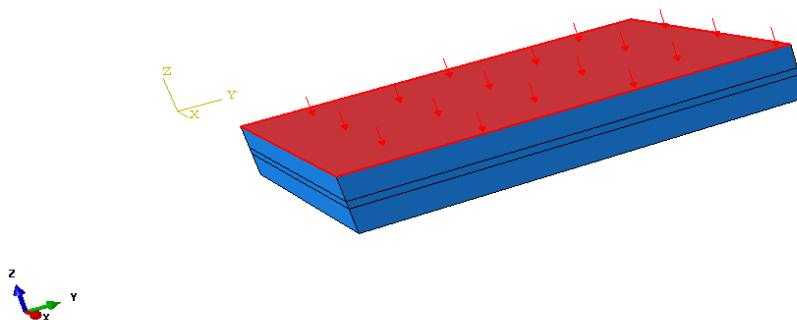
Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση το μοντέλο έχει την πάκτωση στην επιφάνεια Β και δέχεται πίεση 10kPa στην επιφάνεια Δ όπως φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 4. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση-2<sup>η</sup> περίπτωση

#### 4.4. Παρουσίαση steady-state dynamic ανάλυσης

Η ανάλυση steady-state dynamic γίνεται για απόκριση στο πεδίο των συχνοτήτων και εξαρτάται από τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές. Η ιδιοσυχνότητα υποδηλώνει την συχνότητα στην οποία η κατασκευή μπορεί να υποστεί συντονισμό. Οι οριακές συνθήκες ορίζονται στην επιφάνεια Α και η διάταξη δέχεται πίεση 100kPa, όπως φαίνεται στην εικόνα.

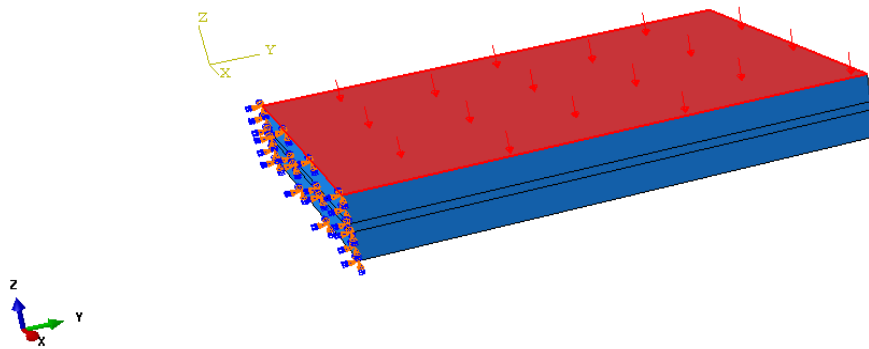


Εικόνα 5. Steady-state dynamic- φορτίο

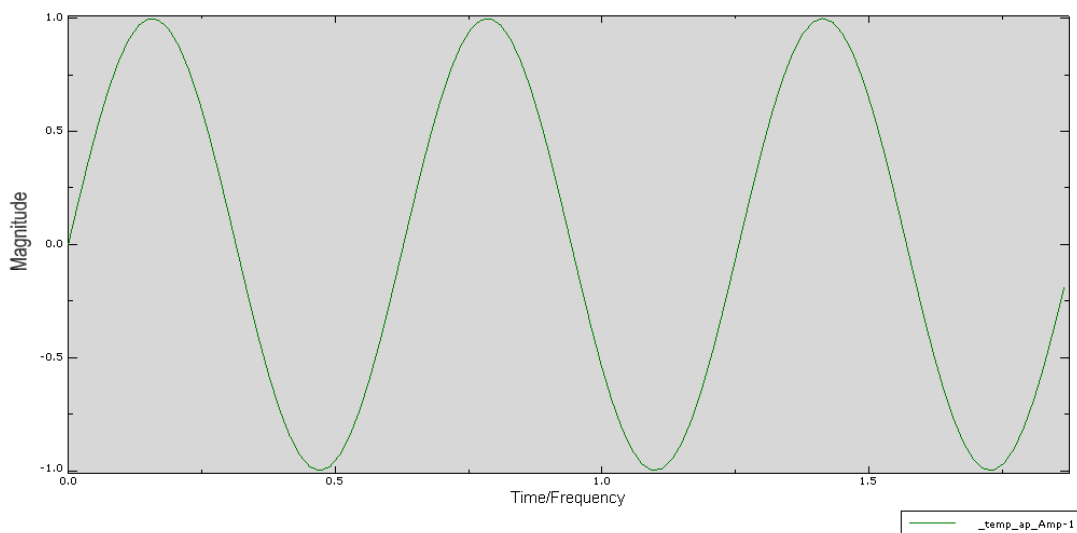


#### 4.5. Παρουσίαση δυναμικής ανάλυσης

Κατά την δυναμική ανάλυση η διάταξη δέχεται πίεση φορτίου 100kPa στην επιφάνεια Δ ημιτονοειδούς μορφής και οι οριακές συνθήκες τοποθετούνται στην επιφάνεια Δ, όπως φαίνονται στις δύο επόμενες εικόνες. Η ανάλυση γίνεται για να εξετάσουμε κατά πόσο υπάρχει μετατόπιση των κόμβων ανά τον χρόνο.



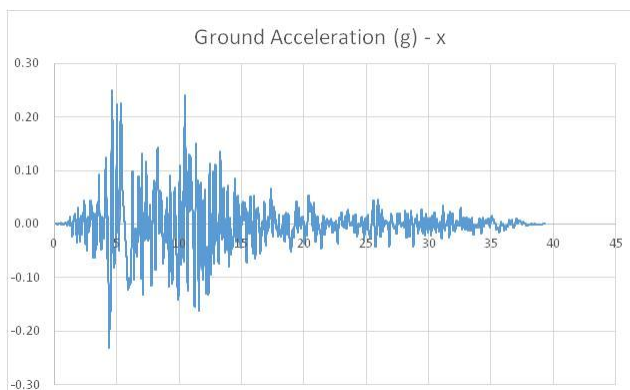
Εικόνα 6. Οριακές συνθήκες και φορτίο



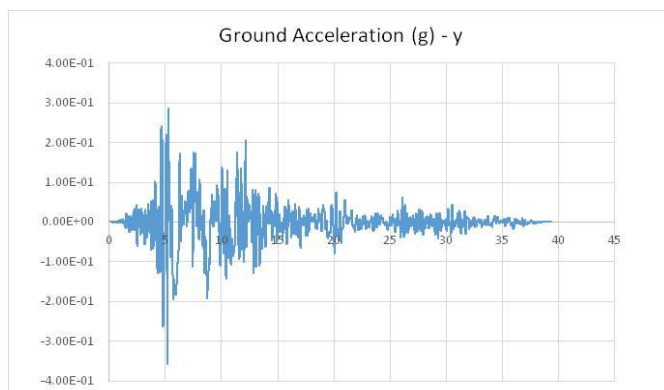
Εικόνα 7. Φορτίο που εφαρμόζεται

#### 4.6. Παρουσίαση σεισμικής ανάλυσης

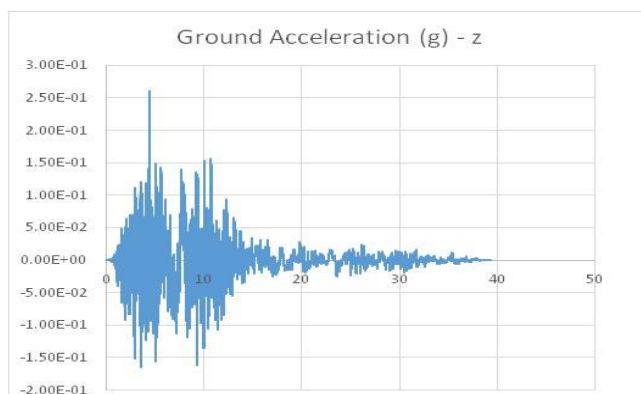
Σε αυτό το κομμάτι της ανάλυσης διεγείρουμε τη διάταξη με έναν σεισμό. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα είναι μετρήσεις υπαρκτού σεισμού, 6.9 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, 39.34 δευτερολέπτων. Αρχικά, εφαρμόζεται το βάρος της κατασκευής και μετά ο σεισμός. Στην συγκεκριμένη ανάλυση θα πραγματοποιηθούν δυο διερευνήσεις κατά τις οποίες θα αλλάξει η τοποθέτηση των οριακών συνθηκών. Ο σεισμός που εφαρμόστηκε είναι επιταχύνσεις στις τρεις διευθύνσεις και τα επιταχυνσιογράφημα [8] που επελέγησαν είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 8. Επιταχυνσιογράφημα κατά x

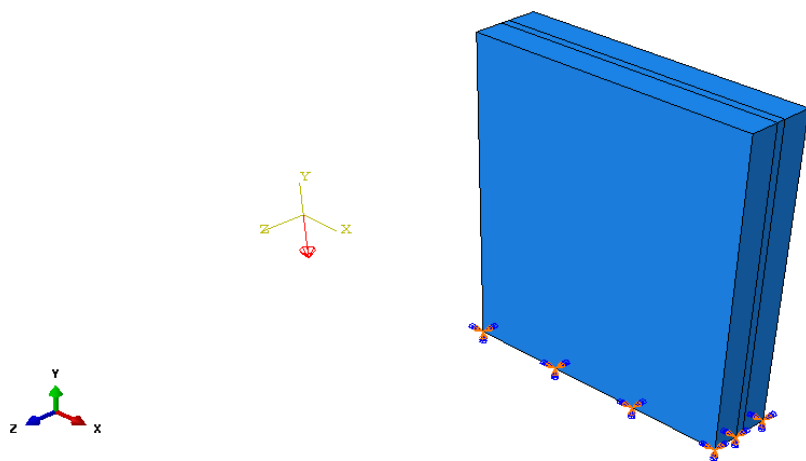


Εικόνα 9. Επιταχυνσιογράφημα κατά y



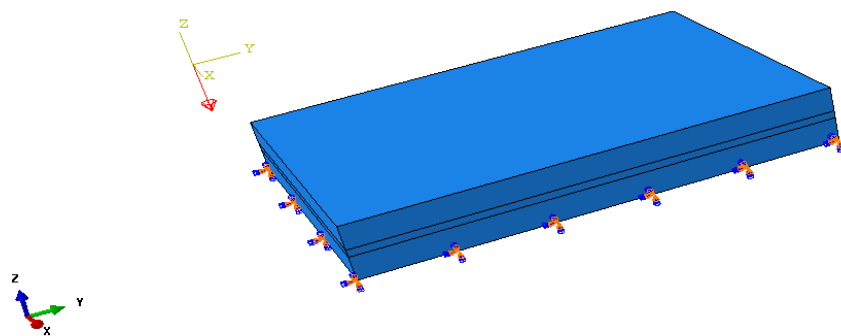
Εικόνα 10. Επιταχυνσιογράφημα κατά z

Στην 1<sup>η</sup> διερεύνηση η πάκτωση τοποθετείται στην πλευρά που φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 11. Οριακές συνθήκες 1<sup>ης</sup> διερεύνησης

Στην 2<sup>η</sup> διερεύνηση η πάκτωση βρίσκεται στην κάτω πλευρά όπως φαίνεται στην εικόνα.



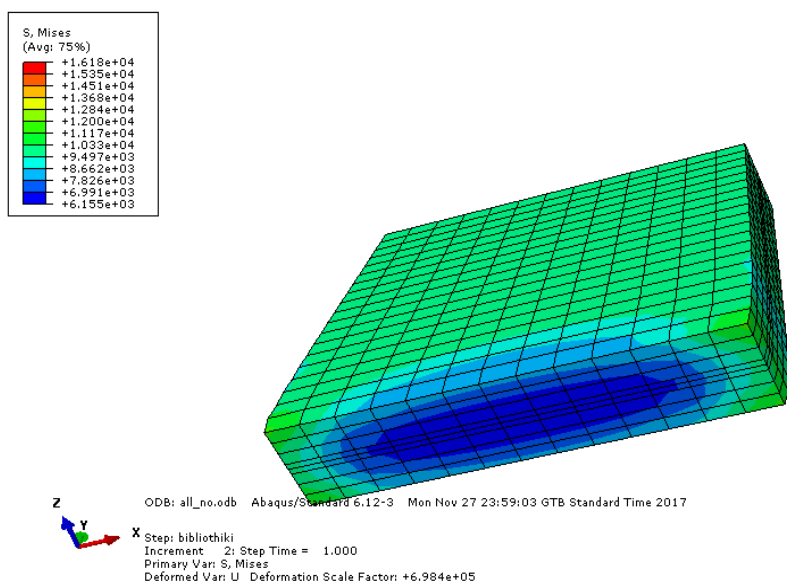
Εικόνα 12. Οριακές συνθήκες 2<sup>ης</sup> διερεύνησης

## 5. Αποτελέσματα προσομοίωσης των αναλύσεων

### 5.1. Αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης

#### 5.1.1. 1<sup>η</sup> περίπτωση

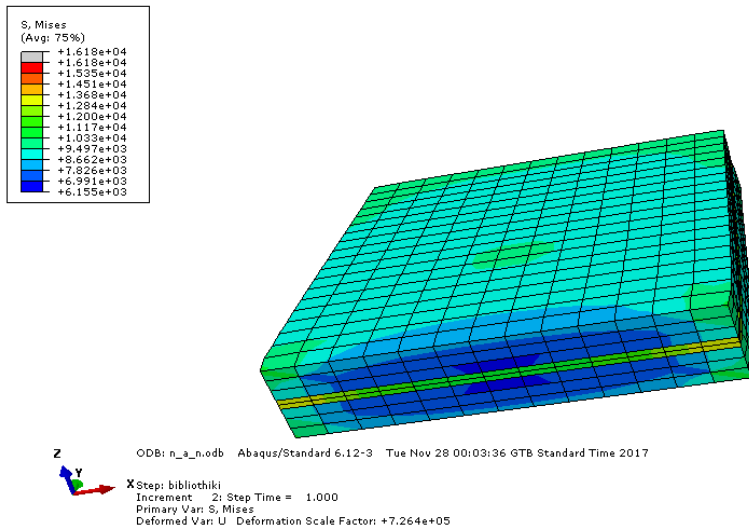
Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση στατικής ανάλυσης, κατά την οποία η πάκτωση βρίσκεται στην επιφάνεια όπου οι τάσεις παίρνουν χαμηλότερες τιμές (εν προκειμένω οι μπλε) και η πίεση μέτρου 10kPa, στην απέναντι επιφάνεια, διεύθυνσης γ με αντίθετο πρόσημο, παρουσιάζονται για τα 4 διαφορετικά μοντέλα οι τάσεις Von Mises .



Εικόνα 13. Μοντέλο όλα κανονικά

Στο μοντέλο όλα κανονικά η μέγιστη τάση είναι 11487,5Pa και η ελάχιστη 6155,07Pa.

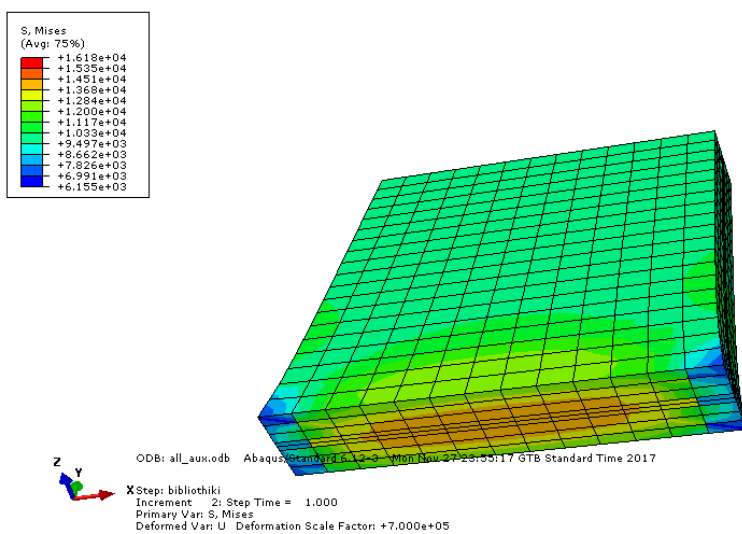
Παρατηρείται ότι οι χαμηλότερες τάσεις συγκεντρώνονται στο κέντρο της πάκτωσης με τις άκρες της διάταξης να δέχονται μεγαλύτερες και καθώς απομακρυνόμαστε αυξάνουν.



Εικόνα 14. Μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό

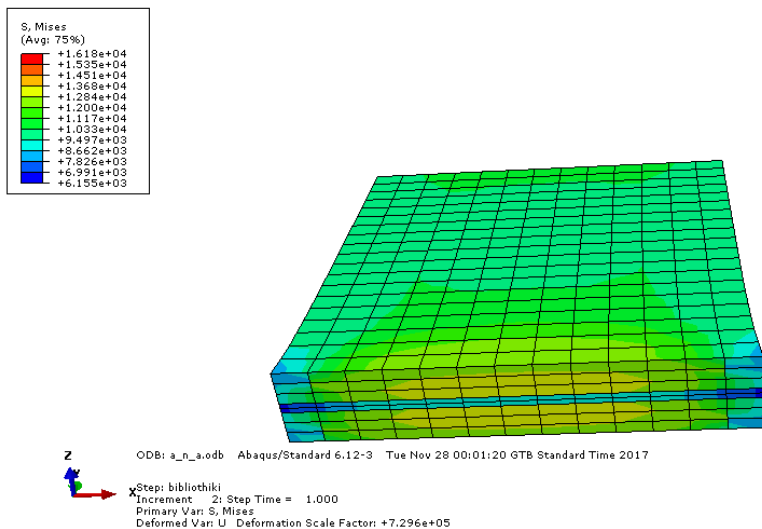
Στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό η μέγιστη τάση είναι 16181,7Pa και η ελάχιστη 6960.65Pa. Εδώ βλέπουμε τις χαμηλότερες τάσεις να τις δέχονται οι δύο εξωτερικές πλάκες ενώ η μεσαία υψηλότερες στην μεριά της πάκτωσης. Όσο προχωράμε στην υπόλοιπη διάταξη αυξάνονται οι τάσεις και των τριών στρωμάτων με τις άκρες της διάταξης να δέχονται μεγαλύτερες. Το μεσαίο στρώμα συγκεντρώνει τις υψηλότερες τάσεις σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης.

Μεταξύ των δύο παραπάνω μοντέλων παρατηρείται μεγάλη διαφορά των τάσεων Von Mises κυρίως στο μεσαίο στρώμα που είναι αυξητικό, καταπονείται περισσότερο σε όλη την έκταση του και φαίνεται να βοηθάει τη διάταξη ως προς την αντοχή των στρωμάτων με κανονικό υλικό.



Εικόνα 15. Μοντέλο όλα αυξητικά

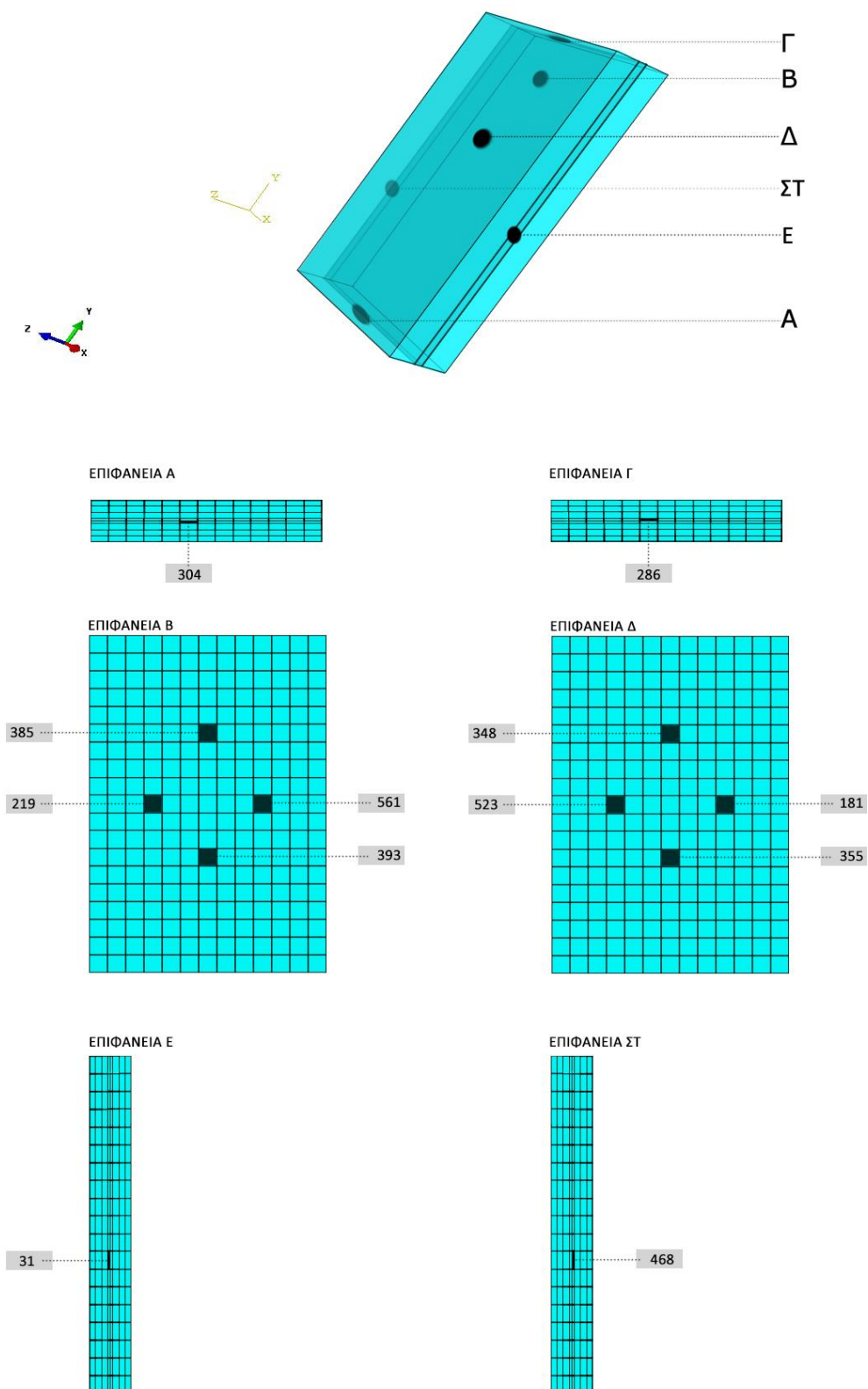
Στο μοντέλο όλα αυξητικά η μέγιστη τάση είναι 14368.1Pa και η ελάχιστη 6835.45Pa. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι υψηλότερες τάσεις εμφανίζονται στο κέντρο της επιφάνειας που είναι η πάκτωση και μετά διαχέονται προς την υπόλοιπη διάταξη.



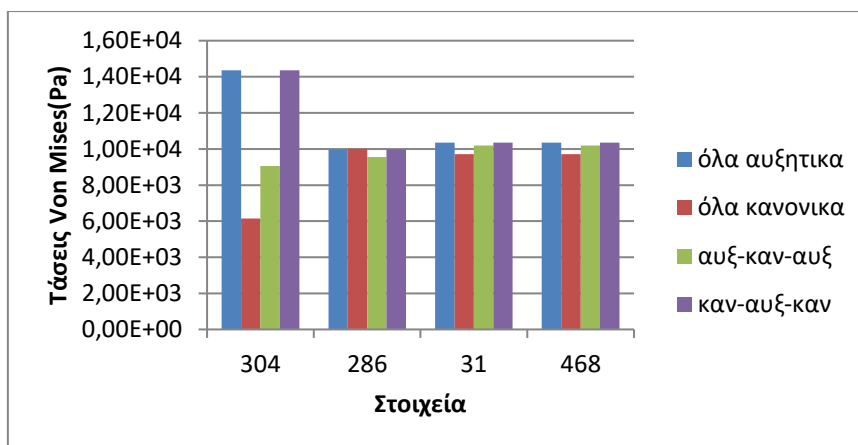
Εικόνα 16. Μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό

Στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό η μέγιστη τάση είναι 13249 Pa και η ελάχιστη 6807,26 Pa. Οι μεγαλύτερες τάσεις συγκεντρώνονται στις εξωτερικές πλάκες που είναι από αυξητικό υλικό από την πλευρά της πάκτωσης. Φαίνεται ότι στη μεσαία πλάκα οι τάσεις παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα σε όλη την έκτασή της. Η συμπεριφορά του αυξητικού υλικού σε αυτό το μοντέλο είναι ικανοποιητική λόγω του ότι προστατεύει το μεσαίο στρώμα.

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται συγκεκριμένα στοιχεία(elements). Θα μελετηθεί η τάση Von Mises ως προς τις πλάκες των τεσσάρων μοντέλων της διάταξης και η συμπεριφορά των αυξητικών στρωμάτων ως προς των συμβατικών.

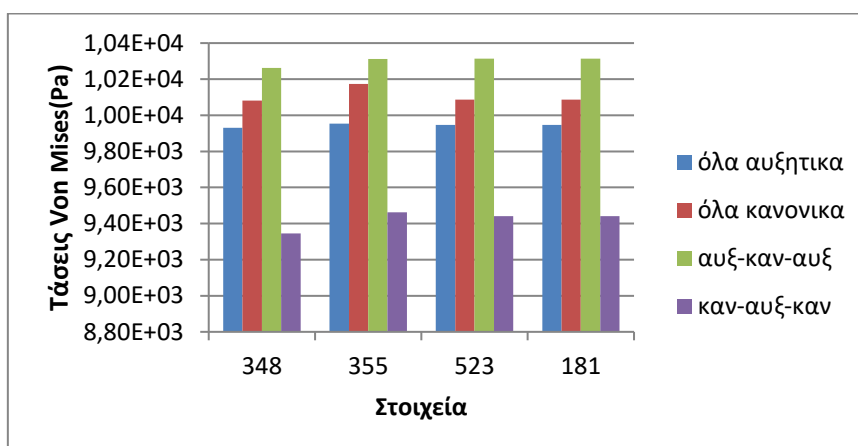


Εικόνα 17. Στοιχεία (elements) και στις 3 πλάκες



Διάγραμμα 1. Στοιχεία μεσαίας πλάκας

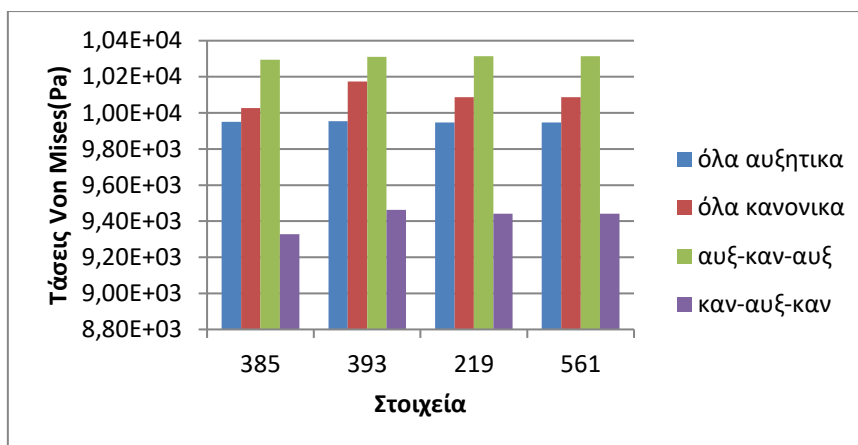
Για την μεσαία πλάκα, το στοιχείο 304 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις όταν βρίσκεται στα μοντέλα όλα αυξητικά και κανονικό-αυξητικό-κανονικό και μάλιστα το ίδιο μέγεθος τάσης. Στο μοντέλο όλα κανονικά δέχεται την μικρότερη τάση. Για το στοιχείο 286 δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά τάσεων ανάμεσα στα μοντέλα αλλά την μεγαλύτερη την δέχεται στο μοντέλο όλα κανονικά και την μικρότερη στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Τα στοιχεία 31 και 468 δέχονται ακριβώς ίδιες τάσεις με υψηλότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά και κανονικό-αυξητικό-κανονικό και χαμηλότερες στο μοντέλο όλα κανονικά. Όπως και στο στοιχείο 286 έτσι και στα στοιχεία αυτά δεν παρατηρείται μεγάλη αυξομείωση στα μεγέθη των τάσεων μεταξύ των τεσσάρων μοντέλων.



Διάγραμμα 2. Μπροστά πλάκα

Στην μπροστά πλάκα της διάταξης το στοιχείο 348 δέχεται την υψηλότερη τάση στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Στο μοντέλα όλα κανονικά και όλα αυξητικά παρατηρείται μια μικρή μείωση ενώ στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό οι τάσεις παίρνουν τις μικρότερες τιμές. Το στοιχείο 355 όπως φαίνεται και στο διάγραμμα έχει παρόμοια συμπεριφορά με το 348 με μια μικρή αύξηση του μεγέθους των τάσεων σε όλα τα μοντέλα. Τα στοιχεία 523 και 181 έχουν ακριβώς τις ίδιες τάσεις και στα τέσσερα μοντέλα, και όπως και στα προηγούμενα στοιχεία, έτσι και εδώ η υψηλότερες τάσεις συγκεντρώνονται στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό, οι χαμηλότερες στο κανονικό-αυξητικό-κανονικό ενώ στα άλλα δυο μοντέλα οι τάσεις παίρνουν ενδιάμεσες τιμές.



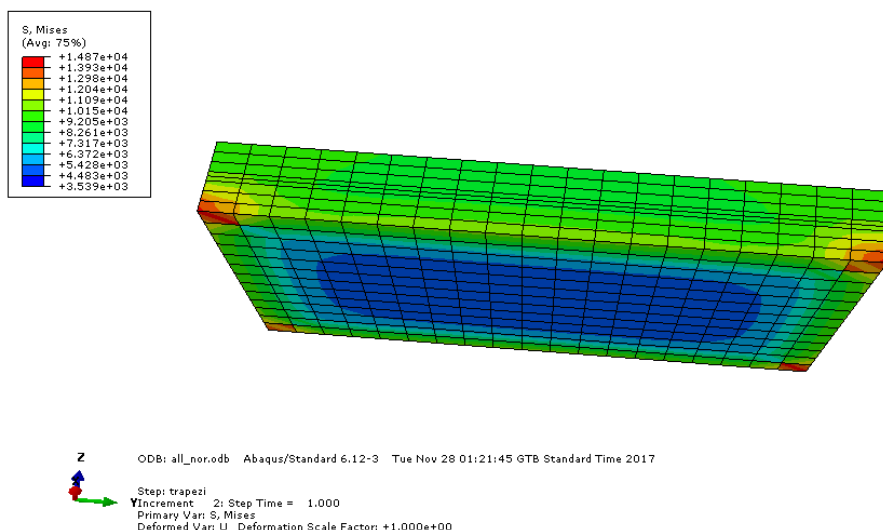


Διάγραμμα 3. Πίσω πλάκα

Στην πίσω πλάκα της διάταξης το στοιχείο 385 στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό παρουσιάζει την μεγαλύτερη απορρόφηση τάσεων με τα μοντέλα όλα κανονικά και όλα αυξητικά να ακολουθούν με ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους. Η μικρότερη τιμή στις τάσεις βρίσκεται στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Το στοιχείο 393 όπως φαίνεται στην εικόνα έχει την ίδια συμπεριφορά στα διάφορα μοντέλα με το στοιχείο 385 με μια μικρή διαφορά στις τιμές. Τα στοιχεία 219 και 561 έχουν ακριβώς τις ίδιες τιμές στις τάσεις στις περιπτώσεις που μελετάμε καθώς και την ίδια αλληλουχία μεταξύ των μοντέλων με όλα τα προηγούμενα στοιχεία όπως φαίνεται και στο διάγραμμα.

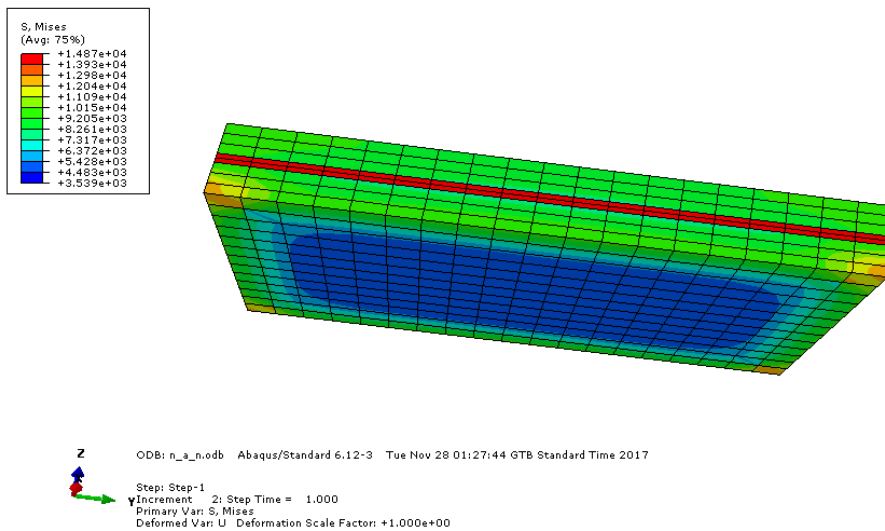
### 5.1.2. 2<sup>η</sup> περίπτωση

Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση στατικής ανάλυσης, όπου η πάκτωση τοποθετείται στην κάτω μεγάλη επιφάνεια (μπλε περιοχή) και η πίεση μέτρου 10kPa στην απέναντί της επιφάνεια, διεύθυνσης z με αντίθετο πρόσημο, παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises για τα 4 διαφορετικά μοντέλα της διάταξης.



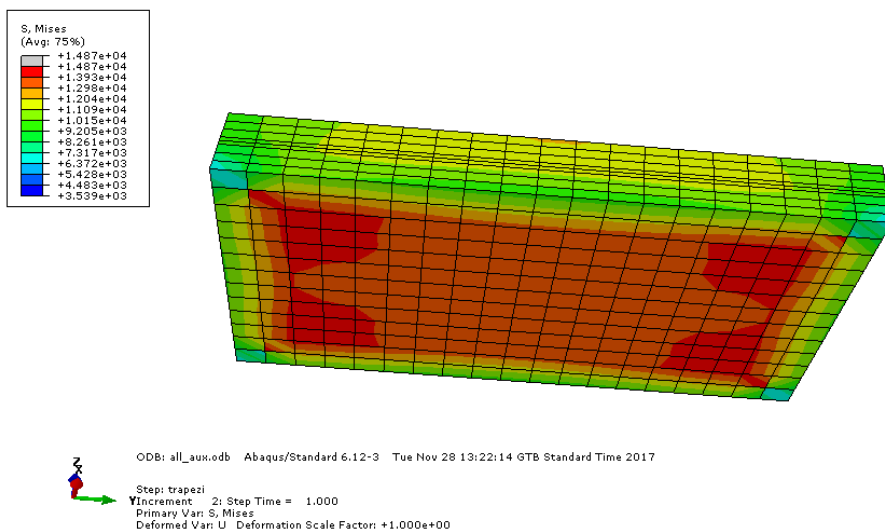
Εικόνα 18. Μοντέλο όλα κανονικά

Στο μοντέλο όλα κανονικά η μέγιστη τάση είναι 14312.7Pa και η ελάχιστη είναι 4673.24Pa. Οι χαμηλότερες τάσεις συγκεντρώνονται στην επιφάνεια της πάκτωσης εκτός από τις άκρες που φαίνεται να καταπονούνται περισσότερο ως προς το σύνολο της διάταξης. Καθώς φεύγουμε από τη πάκτωση οι τάσεις αυξάνονται μέχρι να φτάσουμε στο κέντρο της πάνω πλάκας που εκεί αρχίζουν να μειώνονται.



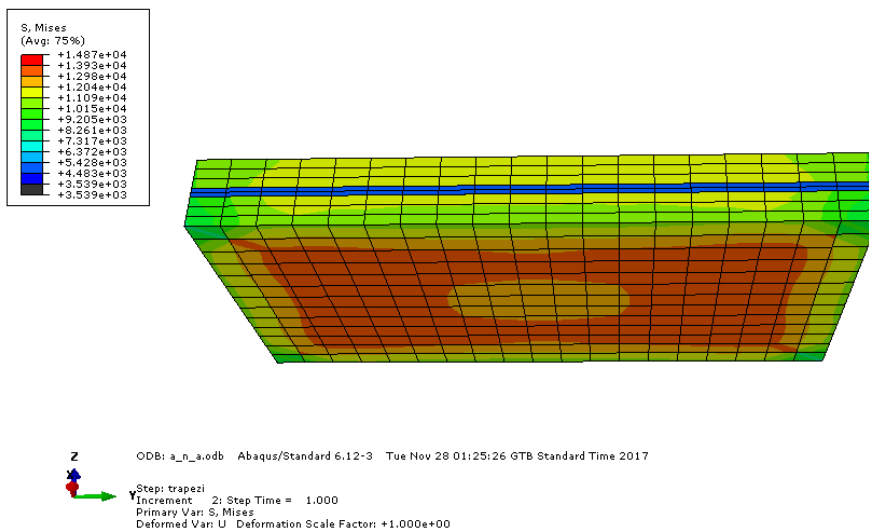
Εικόνα 19. Μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό

Στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό η μέγιστη τάση είναι 14821.5Pa και η ελάχιστη 4701.47Pa. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μεσαία πλάκα που αποτελείται από αυξητικό υλικό δέχεται τις μέγιστες τάσεις σε όλη την έκταση της κατά την φόρτιση, φαίνεται να λειτουργεί σαν ενίσχυση της κατασκευής. Οι δύο εξωτερικές πλάκες δέχονται αισθητά χαμηλότερες τάσεις.



Εικόνα 20. Μοντέλο όλα αυξητικά

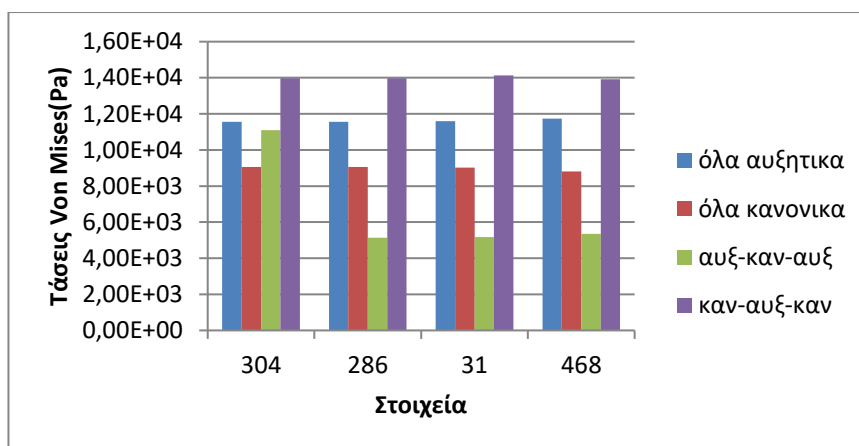
Στο μοντέλο όλα αυξητικά η μέγιστη τάση είναι 14871.4Pa και η ελάχιστη 6418.05Pa. Οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται στην κάτω πλευρά της πάκτωσης και στις περιοχές που φαίνεται στην εικόνα παραπάνω. Στην πάνω πλάκα αυξητικού υλικού παρουσιάζονται και εκεί υψηλές τάσεις.



Εικόνα 21. Μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό

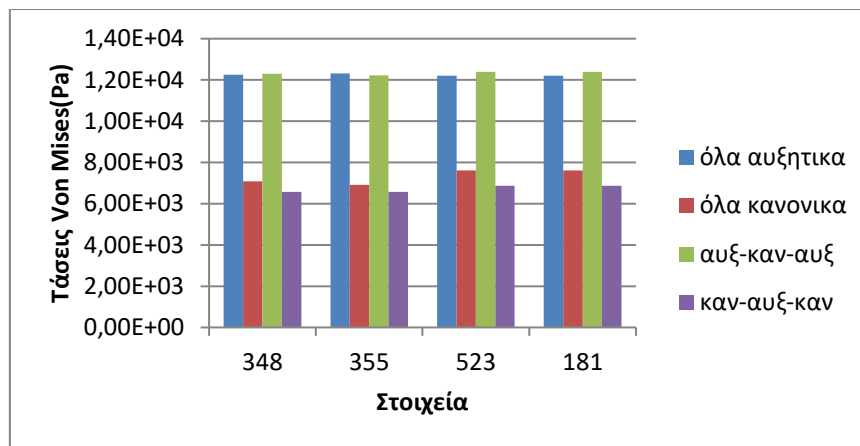
Στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό η μέγιστη τάση είναι 13578.8Pa και η ελάχιστη 3539.12Pa. Η συμπεριφορά της διάταξης για την συγκεκριμένη φόρτιση χωρίζεται εμφανώς σε δυο καταστάσεις. Βλέπουμε ότι το μεσαίο στρώμα, που είναι κανονικό υλικό, δέχεται τις πιο μικρές τάσεις που αναπτύσσονται συνολικά. Όσον αφορά τα εξωτερικά στρώματα καταπονούνται πολύ περισσότερο σε όλη την έκτασή τους.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρατηρούμε τα ίδια στοιχεία πως συμπεριφέρονται με βάση τη συγκεκριμένη ανάλυση.



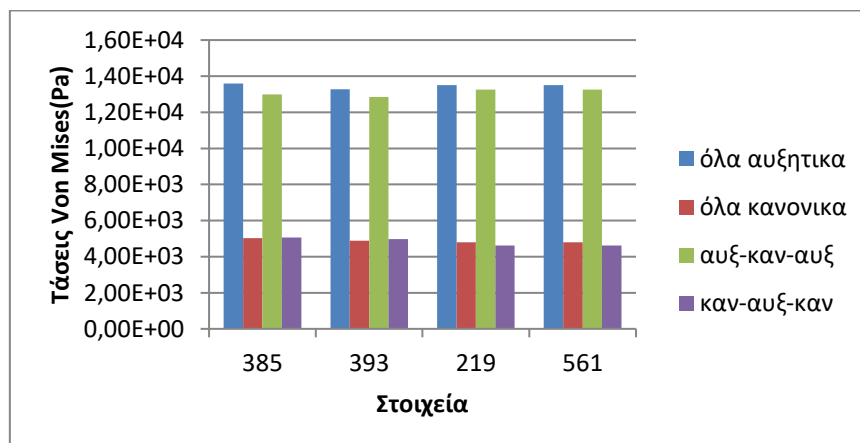
Διάγραμμα 4. Μεσαία πλάκα

Στο μεσαίο στρώμα της διάταξης, το στοιχείο 304 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Ελαφρώς χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στα άλλα τρία μοντέλα με το μοντέλο όλα κανονικά να έχει την μικρότερη τιμή. Το στοιχείο 286 έχει την ίδια συμπεριφορά άλλα και ακριβώς τις ίδιες τιμές με το προηγούμενο στοιχείο με μόνη διαφορά ότι τις μικρότερες τάσεις τις βλέπουμε στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Οι τάσεις που δέχονται τα δυο επόμενα στοιχεία 31 και 468 είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους και η συμπεριφορά τους όπως φαίνεται και στο διάγραμμα είναι όμοια με του στοιχείου 286.



Διάγραμμα 5. Πάνω πλάκα

Για την πάνω πλάκα, το στοιχείο 348 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις στα μοντέλα όλα αυξητικά και αυξητικό-κανονικό-αυξητικό με τις τιμές να είναι σχεδόν ίδιες. Στα μοντέλα όλα κανονικά και κανονικά-αυξητικά-κανονικά, οι τιμές των τάσεων έχουν μειωθεί σχεδόν στο μισό από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Για το στοιχείο 355 έχει μικρές διαφορές με το 348. Οι υψηλότερες τάσεις βρίσκονται όταν μελετάμε τα μοντέλα όλα αυξητικά και αυξητικό-κανονικό-αυξητικό και οι χαμηλότερες στα άλλα δυο μοντέλα. Τα στοιχεία 523 και 181 ακολουθούν το ίδιο μοτίβο με τα προηγούμενα όπως φαίνεται στο διάγραμμα και οι τιμές των τάσεων είναι ακριβώς ίδιες και για τα δυο στοιχεία.



Διάγραμμα 6. Κάτω πλάκα

Στην κάτω πλάκα για τα στοιχεία 385 και 393 οι υψηλότερες τάσεις παρατηρούνται στα μοντέλα όλα αυξητικά και αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Στα άλλα δύο μοντέλα οι τιμές των τάσεων βρίσκονται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα. Για τα επόμενα στοιχεία 219 και 561 οι τιμές των τάσεων έχουν ακριβώς τα ίδια μεγέθη και η συμπεριφορά τους μεταξύ των μοντέλων όμοια με των προηγούμενων.

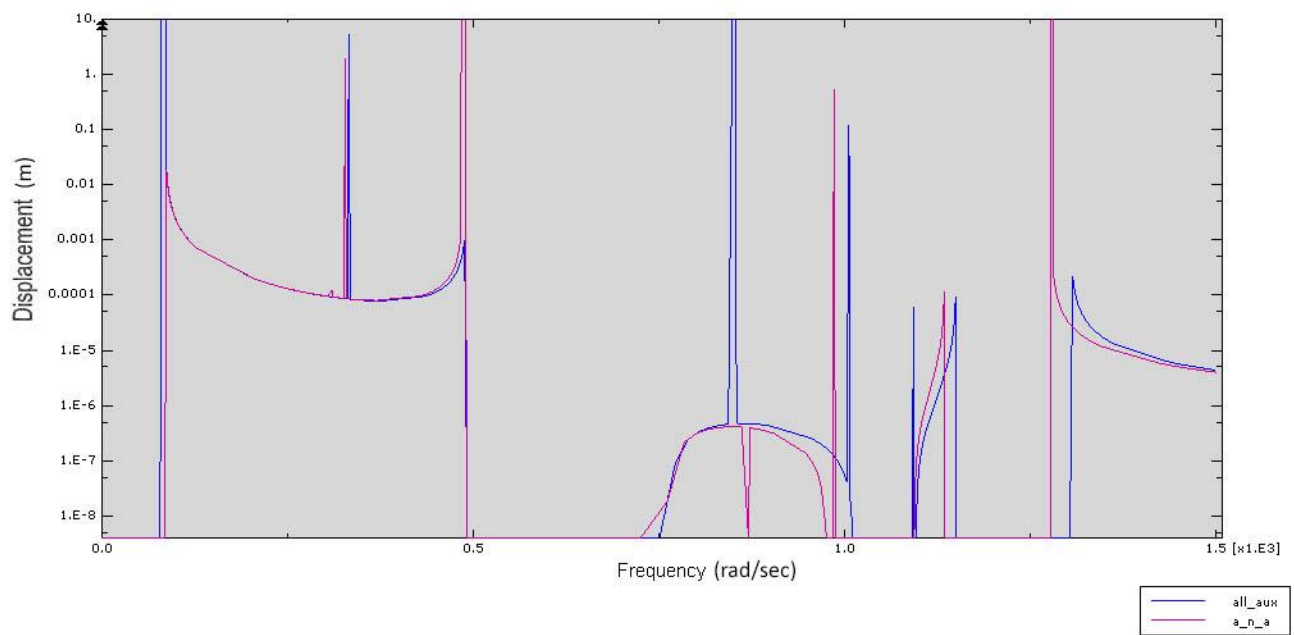
## 5.2. Αποτελέσματα της steady-state dynamic ανάλυσης

### 5.2.1 Ανάλυση ιδιοτιμών-ιδιοσυχνοτήτων

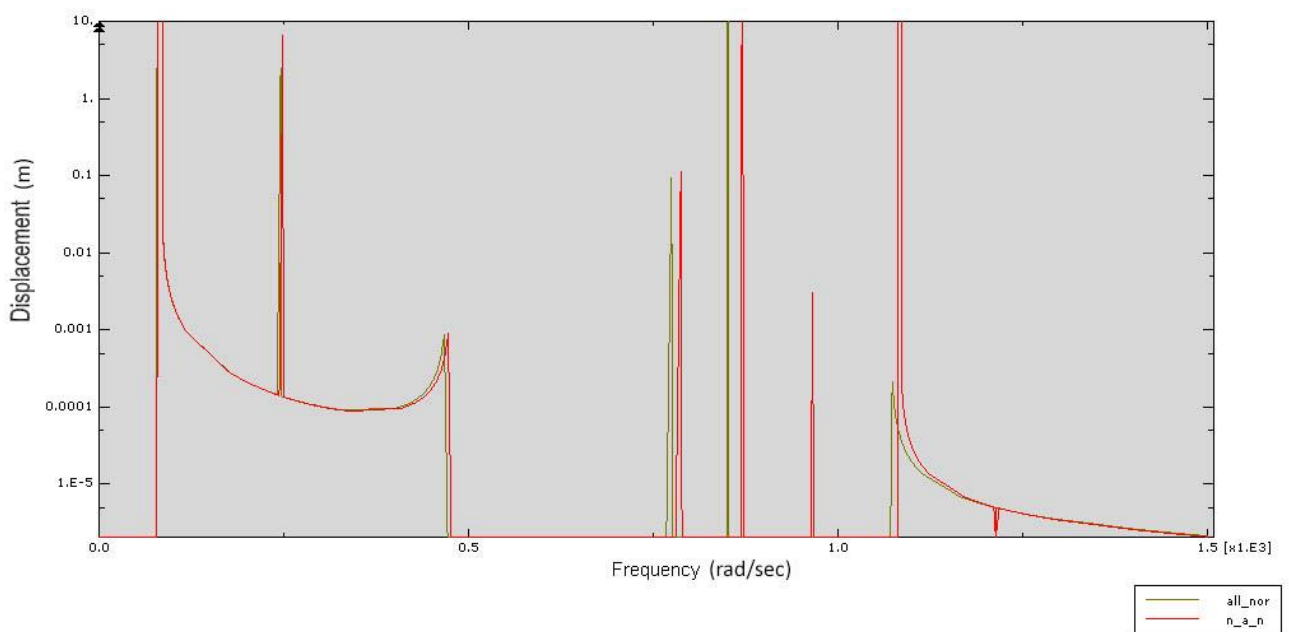
Όπως αναφέρθηκε και στην παρουσίαση της συγκεκριμένης ανάλυσης, σε αυτό το κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιοτιμών των μοντέλων. Η ιδιοσυχνότητα είναι ένα φυσικό μέγεθος που είναι διαφορετικό σε κάθε κατασκευή και εξαρτάται από τη μάζα και τη δυσκαμψία του. Παρακάτω, παρατίθενται οι δέκα πρώτες ιδιοτιμές με τις ιδιοσυχνότητες τους.

| No | όλα αυξητικά | όλα κανονικά | αυξητικό-<br>κανονικό-<br>αυξητικό | κανονικό-<br>αυξητικό-<br>κανονικό |
|----|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1  | 84.57        | 83.75        | 84.37                              | 83.96                              |
| 2  | 307.29       | 245.50       | 309.30                             | 248.44                             |
| 3  | 331.67       | 283.50       | 326.53                             | 292.08                             |
| 4  | 491.42       | 471.23       | 485.93                             | 476.30                             |
| 5  | 851.42       | 774.24       | 870.07                             | 786.94                             |
| 6  | 1005.30      | 850.49       | 985.23                             | 870.01                             |
| 7  | 1092.20      | 924.79       | 1090.20                            | 964.86                             |
| 8  | 1149.90      | 1070.50      | 1134.40                            | 1083.00                            |
| 9  | 1302.90      | 1208.70      | 1231.70                            | 1212.70                            |
| 10 | 1722.20      | 1208.70      | 1277.40                            | 1212.80                            |

Στην συνέχεια βλέπουμε τις μετατοπίσεις που εμφανίζονται σε σχέση με τις συχνότητες στην δυναμική ανάλυση.

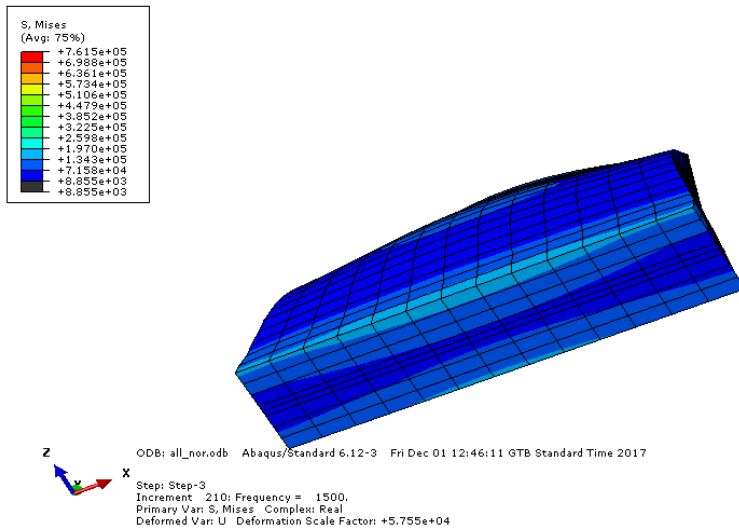


Διάγραμμα 8. Μετατόπισης- συχνότητας για τα μοντέλα όλα αυξητικά και αυξ-καν-αυξ.



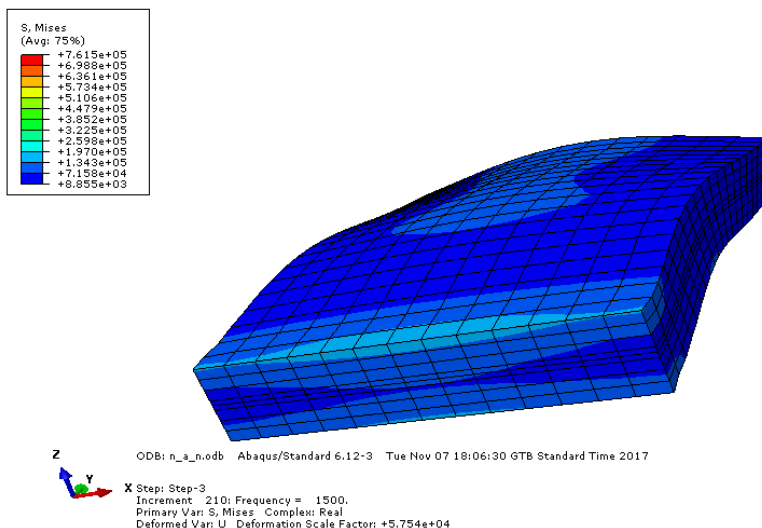
Διάγραμμα 9. Μετατόπισης- συχνότητας για τα μοντέλα όλα κανονικά και καν-αυξ-καν

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises για την steady-state dynamic ανάλυση και στα τέσσερα μοντέλα της διάταξης καθώς και συγκεκριμένα στοιχεία στα τρία στρώματα ξεχωριστά με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του αυξητικού υλικού σε σχέση με το κανονικό. Οι τέσσερις εικόνες που ακολουθούν είναι στην ίδια συχνότητα.



Εικόνα 22. Μοντέλο όλα κανονικά

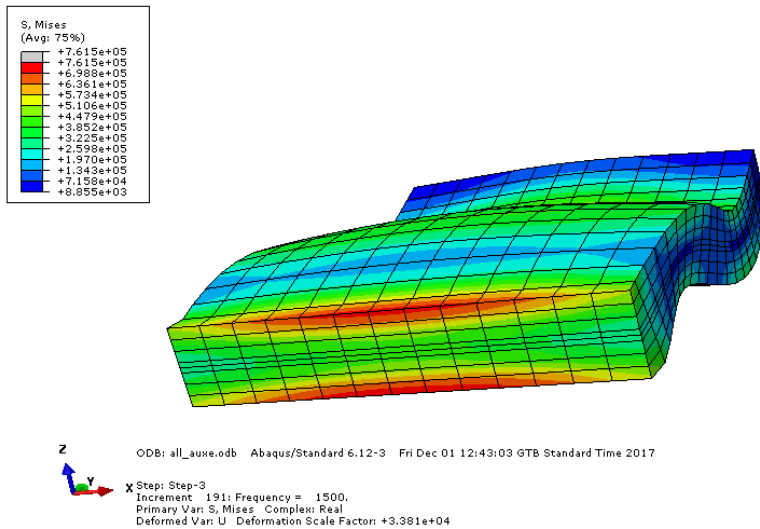
Στο μοντέλο όλα κανονικά η μέγιστη τάση είναι 160261Pa και η ελάχιστη 8855.43Pa. Το μοντέλο στο σύνολο του έχει τις χαμηλότερες τάσεις ως προς τα άλλα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα παραπάνω οι τάσεις αυξάνονται λίγο σε σημεία πάνω στη πάκτωση και στο κέντρο της επάνω πλάκας.



Εικόνα 23. Μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό

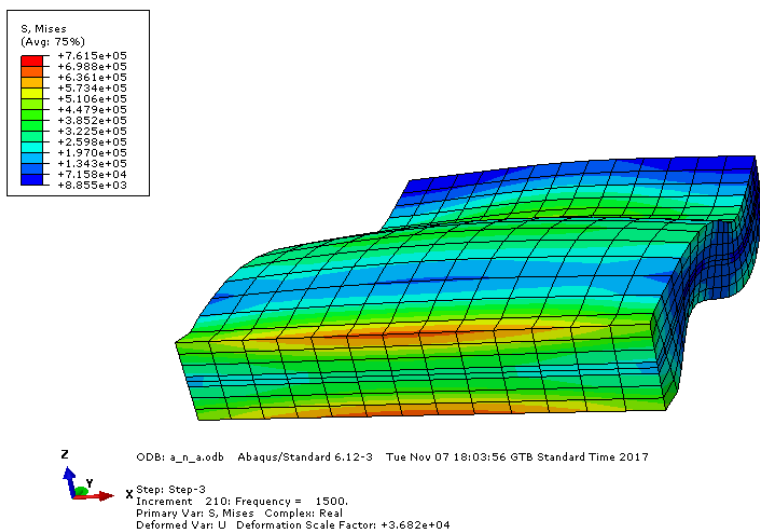


Στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό η μέγιστη τάση είναι 157947Pa και η ελάχιστη είναι 9084.21Pa. Οι τάσεις κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα σε όλη την έκταση του μοντέλου. Παρατηρείται μία μικρή διαφορά αύξησης των τάσεων στο μεσαίο στρώμα.



Εικόνα 24. Μοντέλο όλα αυξητικά

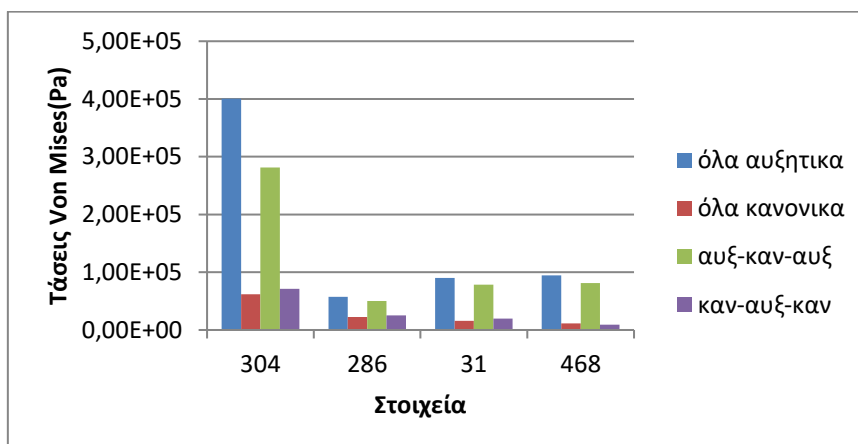
Στο μοντέλο όλα αυξητικά η μέγιστη τάση είναι 761547Pa και η ελάχιστη 26460.1Pa. Με βάση την παραπάνω εικόνα, παρατηρούμε μεγάλες διακυμάνσεις στις τάσεις. Στην επιφάνεια της πάκτωσης έχουμε υψηλότερες τάσεις και όσο προχωράμε προς το ελεύθερο άκρο συναντάμε αρκετές εναλλαγές τάσεων.



Εικόνα 25. Μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό

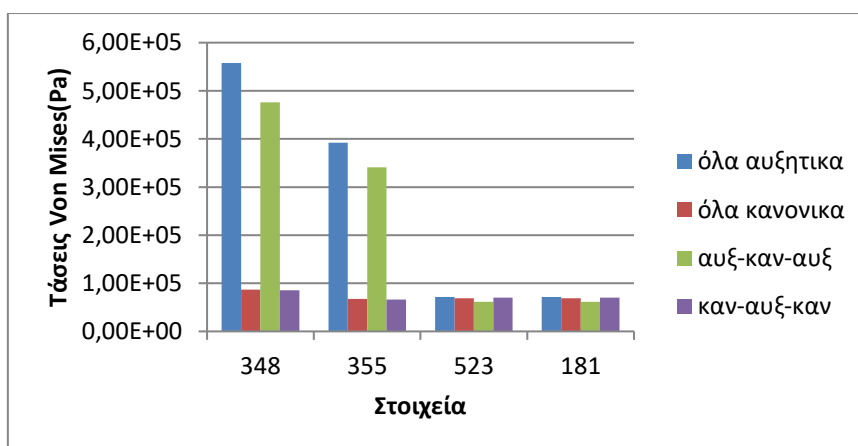
Στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό η μέγιστη τάση είναι 684286Pa και η ελάχιστη είναι 22055.2Pa. Τα δύο εξωτερικά στρώματα δέχονται τις πιο υψηλές τάσεις σε σχέση με το μεσαίο.

Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζονται οι τάσεις Von Mises στα στοιχεία(elements) που επιλέχθηκαν από τις τρεις πλάκες της διάταξης.



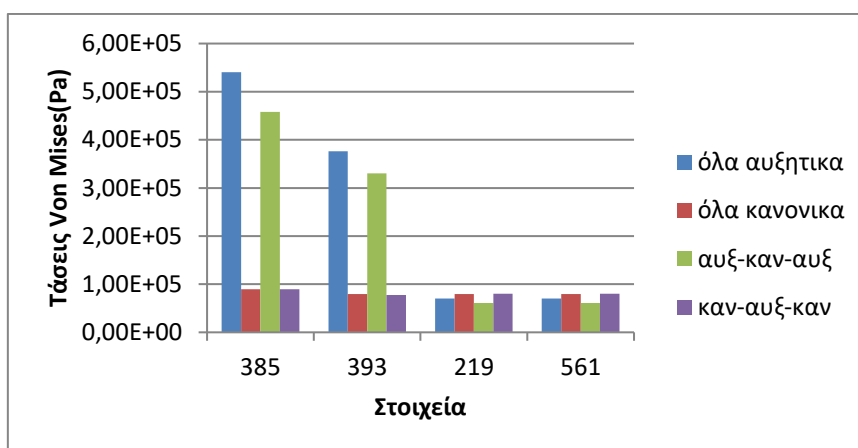
Διάγραμμα 10. Μεσαία πλάκα

Για την μεσαία πλάκα, παρατηρείται μεγάλη αυξομείωση στις τάσεις μεταξύ των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα το στοιχείο 304 δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις μικρότερες στο μοντέλο όλα κανονικά. Στο στοιχείο 286 που σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία δέχεται τις χαμηλότερες τάσεις, στο μοντέλο όλα αυξητικά δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις και στο μοντέλο όλα κανονικά τις μικρότερες. Το στοιχείο 31 απορροφά τις μεγαλύτερες τάσεις στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις μικρότερες στο όλα κανονικά. Τέλος στο στοιχείο 468 οι υψηλότερες τάσεις παρατηρούνται στο μοντέλο όλα αυξητικά και οι χαμηλότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό.



Διάγραμμα 11. Πάνω πλάκα

Για την πάνω πλάκα, στο στοιχείο 348 οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις ελάχιστες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Στο στοιχείο 355 οι υψηλότερες τάσεις εμφανίζονται στο μοντέλο όλα αυξητικά και οι χαμηλότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Τέλος, τα στοιχεία 523 και 181 έχουν τις ίδιες τιμές στις τάσεις τους σε όλα τα μοντέλα με τις μέγιστες τάσεις στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις ελάχιστες στο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό.

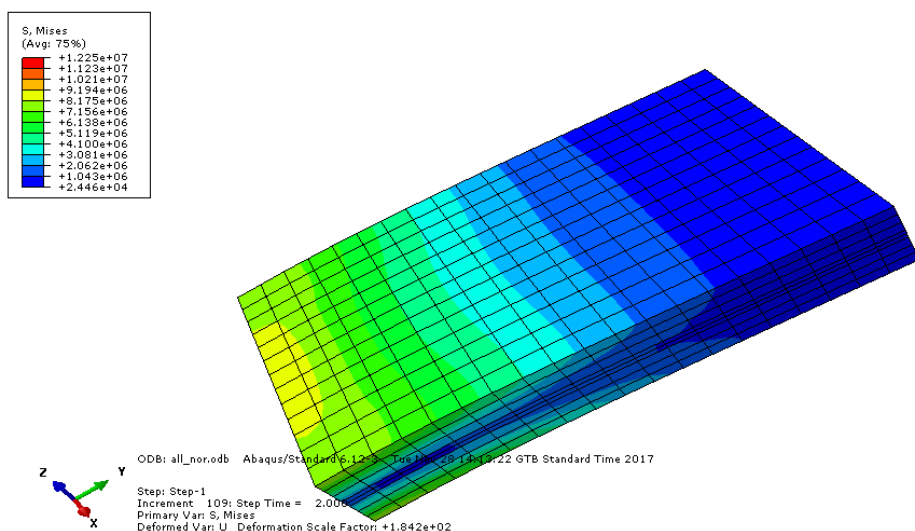


Διάγραμμα 12. Κάτω πλάκα

Για την κάτω πλάκα της διάταξης βλέπουμε παρόμοια συμπεριφορά των τάσεων με την πάνω πλάκα, παρατηρείται δηλαδή έντονη διαφορά τάσεων ανάμεσα στα στοιχεία. Τα στοιχεία 385 και 393 δέχονται τις μεγαλύτερες τάσεις στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Από την άλλη μεριά τα στοιχεία 219 και 561, που έχουν τις ίδιες τιμές στις τάσεις σε όλα τα μοντέλα, δέχονται τις υψηλότερες τάσεις στο μοντέλο όλα κανονικά και τις χαμηλότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό.

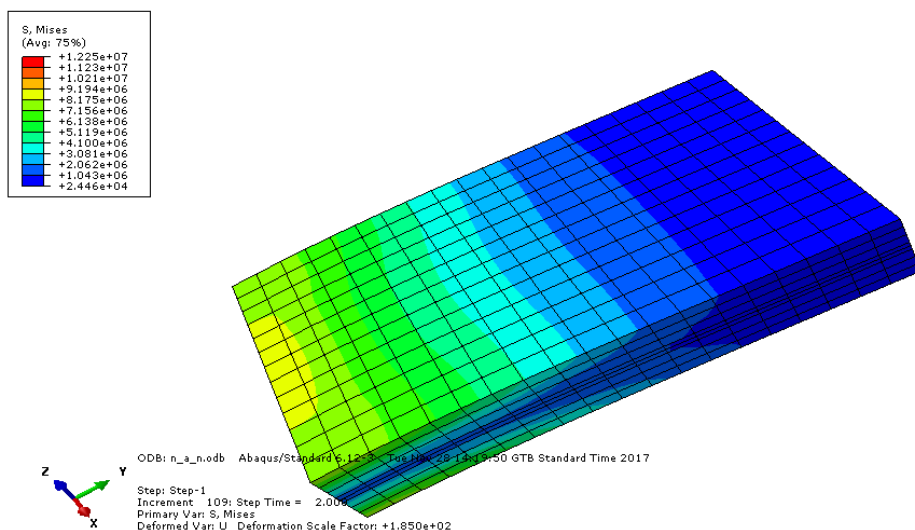
### 5.3. Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης

Για την δυναμική ανάλυση, όπου το φορτίο είναι 100kPa και η πάκτωση βρίσκεται στην επιφάνεια Δ, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα των τάσεων Von Mises της διάταξης καθώς και ένα συνολικό διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για τα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα.



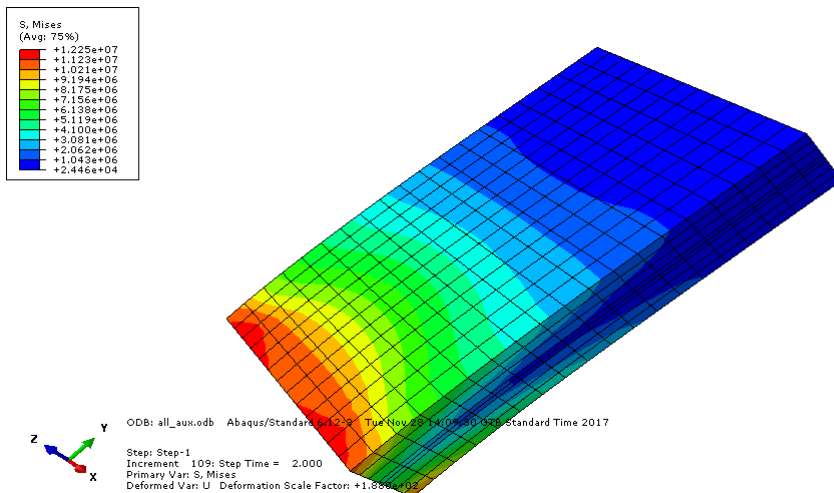
Εικόνα 26. Μοντέλο όλα κανονικά

Στο μοντέλο όλα κανονικά η μέγιστη τάση είναι 8748230 Pa και η ελάχιστη 32932.2Pa. Σε αυτό το σημείο οι υψηλότερες τάσεις εμφανίζονται στις δύο εξωτερικές πλάκες κοντά στην πάκτωση και όσο κατευθυνόμαστε προς το ελεύθερο άκρο μειώνονται.



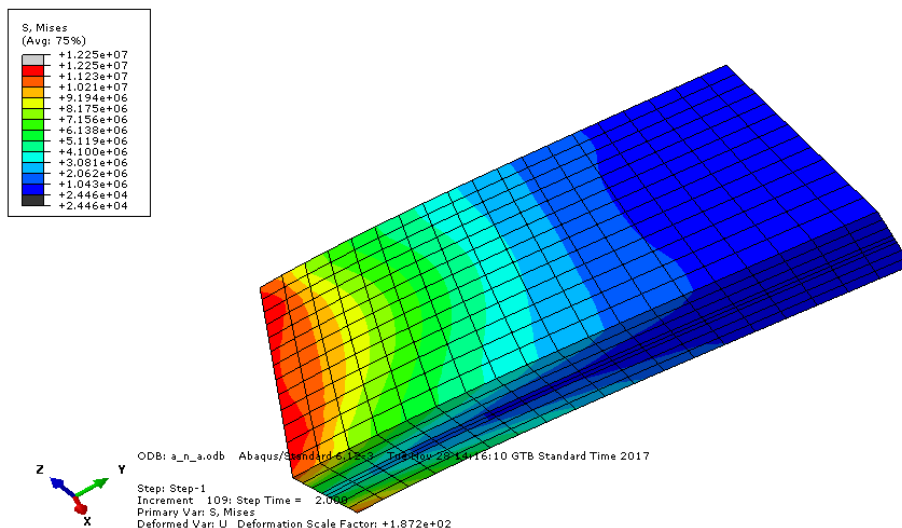
Εικόνα 27. Μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό

Στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό η μέγιστη τάση είναι 8684990Pa και η ελάχιστη είναι 35330.9Pa. Το μεσαίο στρώμα, σε σχέση με το μεσαίο του μοντέλου όλα κανονικά, δέχεται λίγο υψηλότερες τάσεις αλλά χωρίς να έχει μεγάλη διαφορά. Οι υψηλότερες τάσεις εμφανίζονται στα δύο εξωτερικά στρώματα κοντά στην πάκτωση.



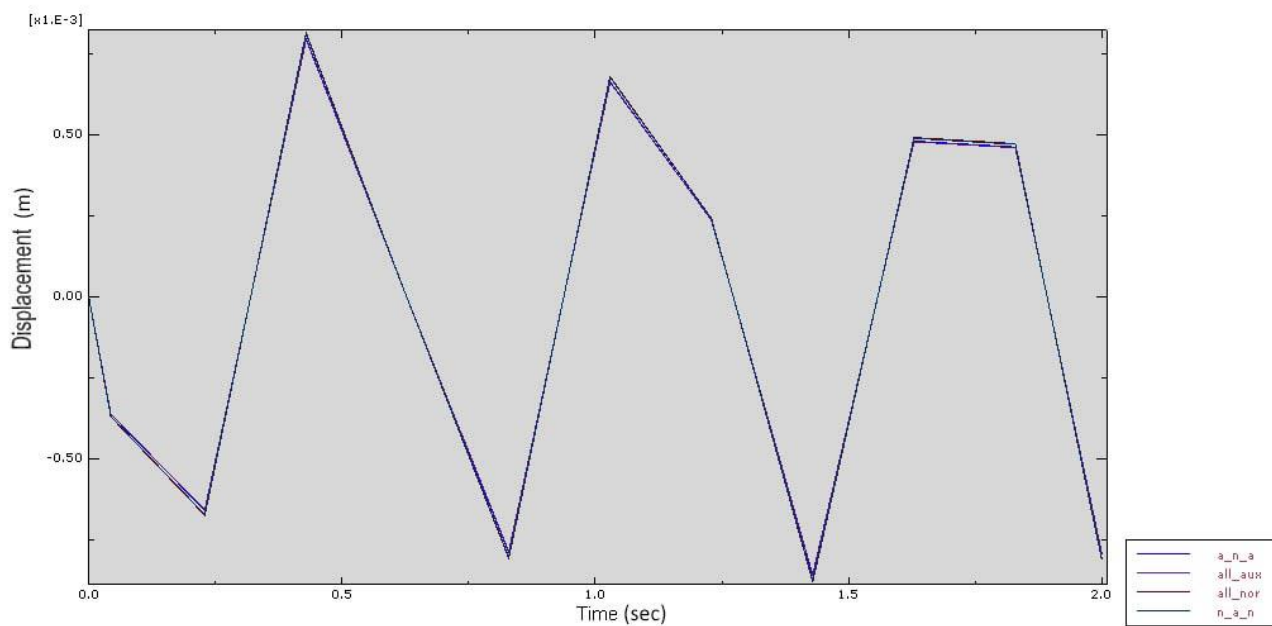
Εικόνα 28. Μοντέλο όλα αυξητικά

Στο μοντέλο όλα αυξητικά η μέγιστη τάση είναι 12132300Pa και η ελάχιστη είναι 32339.9Pa. Στην συγκεκριμένη περίπτωση συναντάμε τις μέγιστες τάσεις που δημιουργούνται κατά την φόρτιση. Είναι κυρίως στην πάκτωση στις δυο εξωτερικές πλάκες.



Εικόνα 29. Μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό

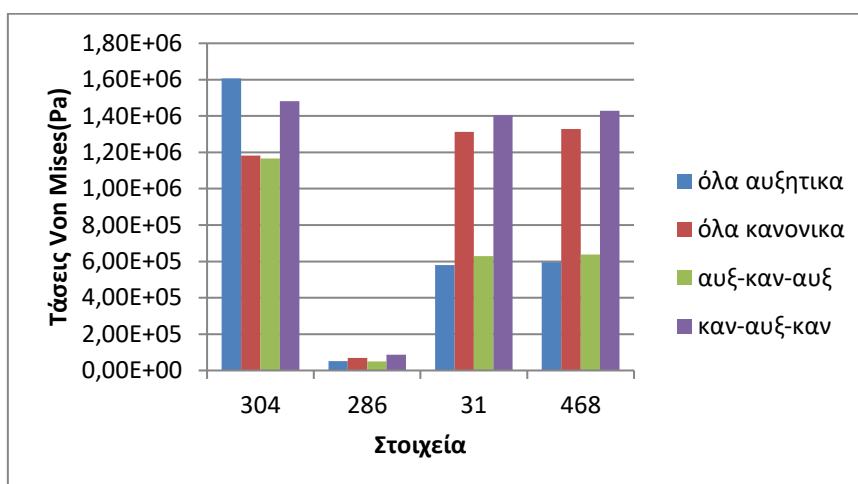
Στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό η μέγιστη τάση είναι 12250800Pa και η ελάχιστη είναι 24457.5Pa. Οι συνολικές τάσεις στη περίπτωση αυτή αυξάνονται λόγω της ύπαρξης πλάκας με κανονικό υλικό. Οι δύο εξωτερικές πλάκες δέχονται μεγαλύτερες τάσεις κοντά στην πάκτωση προστατεύοντας τη μεσαία.



Διάγραμμα 13. Μετατόπισης- χρόνου

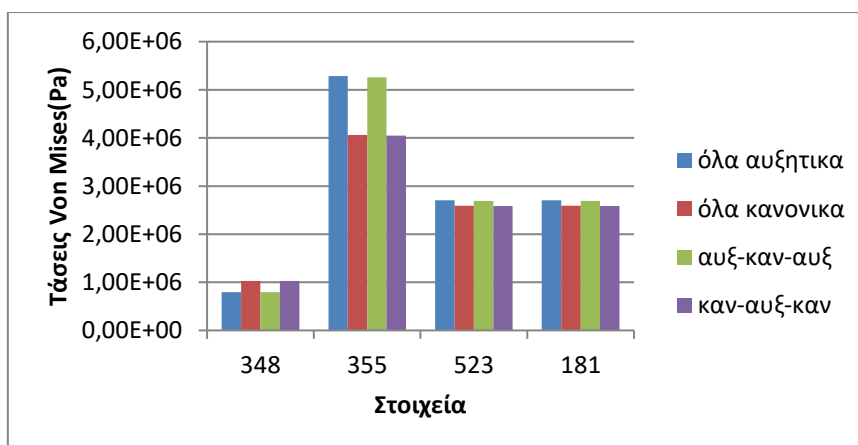
Στο παραπάνω διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου παρατηρούνται αρκετά μικρές διαφορές ανάμεσα στα τέσσερα μοντέλα της διάταξης. Τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις ως προς τον χρόνο της έχει το μοντέλο όλα αυξητικά, τις αμέσως μικρότερες το μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό, ακολουθεί το μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και τέλος το μοντέλο όλα κανονικά.

Στη συνέχεια, παρατίθενται διαγράμματα με τις τάσεις Von Mises των στοιχείων που επιλέχθηκαν από τις τρεις πλάκες της διάταξης .



Διάγραμμα 14. Μεσαία πλάκα

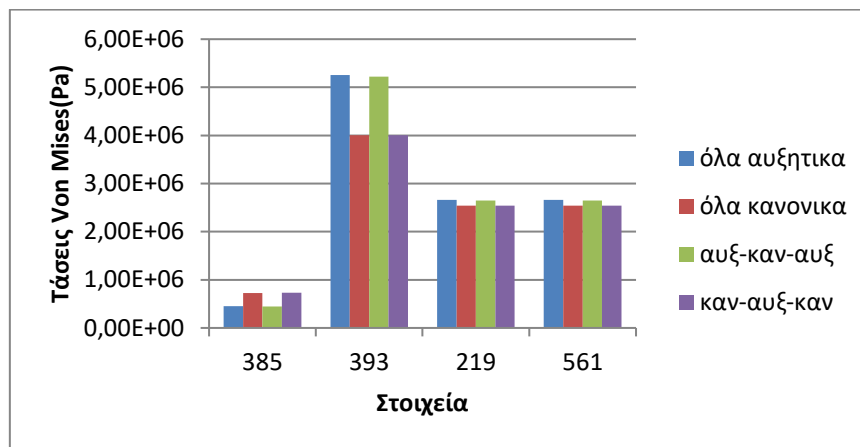
Για την μεσαία πλάκα της διάταξης παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην συμπεριφορά των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα στο στοιχείο 304 οι μέγιστες τάσεις που δέχεται είναι στο μοντέλο όλα αυξητικά, οι αμέσως μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και οι ελάχιστες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Το στοιχείο 286, που βρίσκεται στο ελεύθερο άκρο και δέχεται στο σύνολο του τις χαμηλότερες τάσεις σε σχέση με τα άλλα στοιχεία, οι υψηλότερες τάσεις τις απορροφά στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και τις χαμηλότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Τέλος τα στοιχεία 31 και 468 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στις τάσεις ως προς τα μοντέλα, τις μεγαλύτερες τάσεις τις δέχονται στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και τις μικρότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά.



Διάγραμμα 15. Πάνω πλάκα

Στην πάνω πλάκα της διάταξης, το στοιχείο 348 φαίνεται ότι δέχεται πολύ χαμηλές τάσεις σε σχέση με τα άλλα στοιχεία, τις υψηλότερες όμως τις δέχεται στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και τις χαμηλότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Το στοιχείο 355 σε σχέση με τα άλλα συγκεντρώνει τις υψηλότερες τάσεις όπου είναι στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις χαμηλότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Όσον αφορά τα στοιχεία 523 και 181

εμφανίζουν ακριβώς τις ίδιες τιμές στις τάσεις που συγκεντρώνουν σε όλα τα μοντέλα. Οι μέγιστες τάσεις που δέχονται τα στοιχεία είναι στο μοντέλο όλα αυξητικά και οι ελάχιστες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό.



Διάγραμμα 16. Κάτω πλάκα

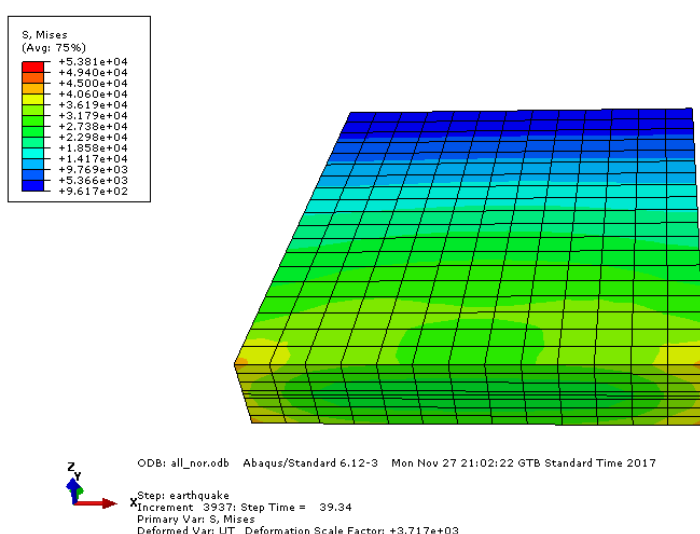
Για την κάτω πλάκα, το σημείο 385 δέχεται σχεδόν μηδενικές τάσεις σε όλα τα μοντέλα. Αυτό είναι λογικό καθώς το στοιχείο βρίσκεται κοντά στο ελεύθερο άκρο της διάταξης. Το στοιχείο 393 στα μοντέλα όλα αυξητικά και αυξητικό-κανονικό-αυξητικό συγκεντρώνει τις μεγαλύτερες τάσεις. Στα μοντέλα όλα κανονικά και κανονικό-αυξητικό-κανονικό οι τιμές των τάσεων είναι χαμηλότερες. Όσον αφορά τα στοιχεία 219 και 561 οι τιμές στις τάσεις είναι ακριβώς ίδιες ενώ παράλληλα δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα τέσσερα μοντέλα.



## 5.4. Αποτελέσματα σεισμικής ανάλυσης

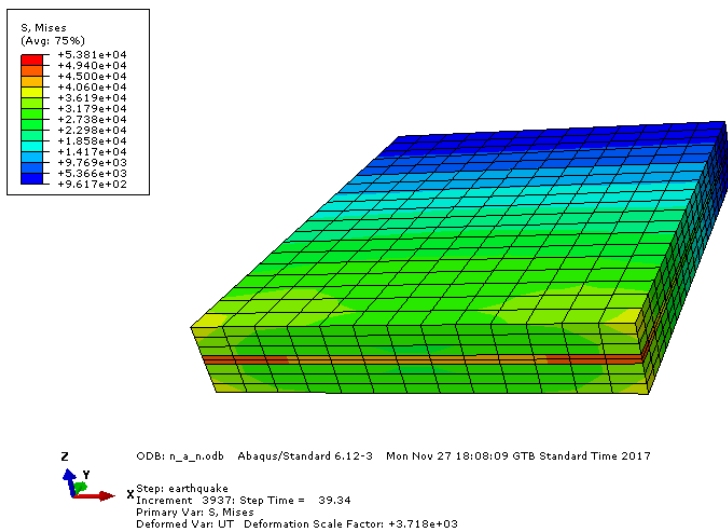
### 5.4.1. 1<sup>η</sup> περίπτωση

Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση της σεισμικής ανάλυσης, οι οριακές συνθήκες τοποθετούνται στην κάτω μικρή επιφάνεια και μετά την φόρτιση που ενεργοποιείται λαμβάνουμε τις τάσεις Von Mises και για τα μοντέλα της διάταξης.



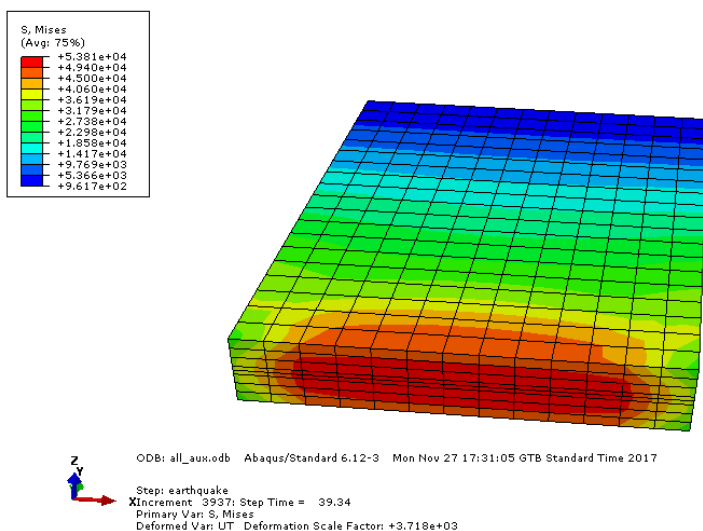
Εικόνα 30. Μοντέλο όλα κανονικά

Στο μοντέλο όλα κανονικά η μέγιστη τάση είναι 42169.6Pa και η ελάχιστη 1012.42Pa. Ο σεισμός ξεκινάει στην βάση της κατασκευής και εκεί παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες τάσεις, κινούνται όμως σε μεσαία επίπεδα στο σύνολο τους. Η κατασκευή φαίνεται να καταπονείται στις τέσσερις άκρες της πάκτωσης.



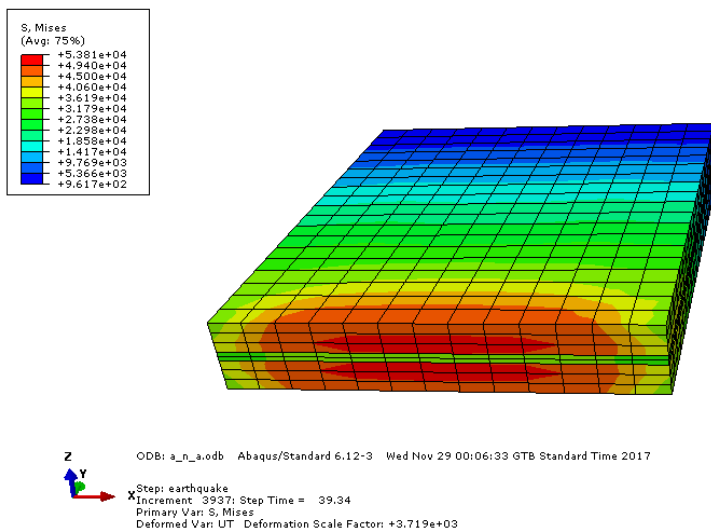
Εικόνα 31. Μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό

Στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό η μέγιστη τάση είναι 53662.1Pa και η ελάχιστη είναι 961.745Pa. Σε αυτήν τη περίπτωση βλέπουμε ότι η πλάκα με αυξητικό υλικό αντιδρά αρκετά έντονα στον σεισμό, δέχεται πολύ μεγάλες τάσεις κοντά στην πάκτωση που διατηρούνται μέχρι τη μέση της κατασκευής. Τα δύο εξωτερικά στρώματα δέχονται σχεδόν τις μισές και προχωρώντας προς το ελεύθερο άκρο μειώνονται ακόμη περισσότερο.



Εικόνα 32. Μοντέλο όλα αυξητικά

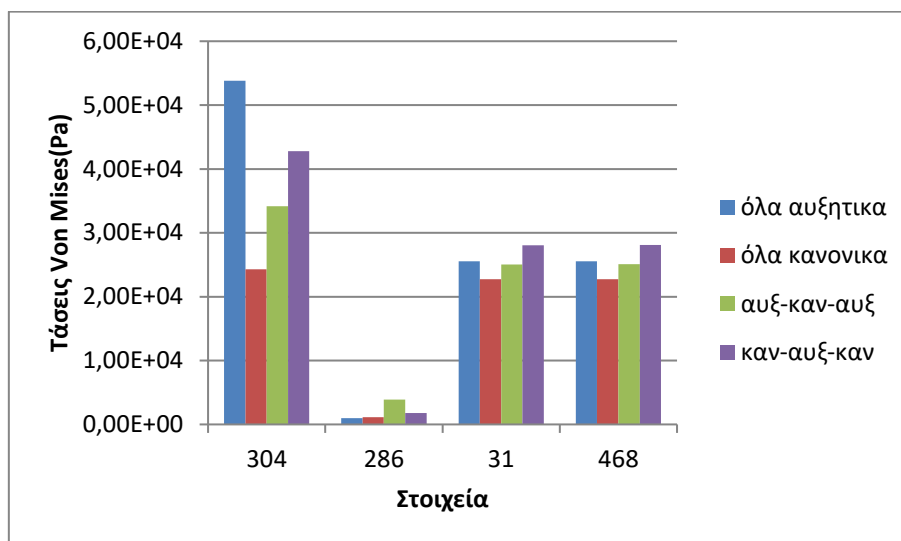
Στο συγκεκριμένο μοντέλο η μέγιστη τάση είναι 53808.2Pa και η ελάχιστη 988.366Pa. Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι υψηλότερες τάσεις συγκεντρώνονται στην πάκτωση και φεύγοντας από αυτήν αρχίζουν να μειώνονται.



**Εικόνα 33. Μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό**

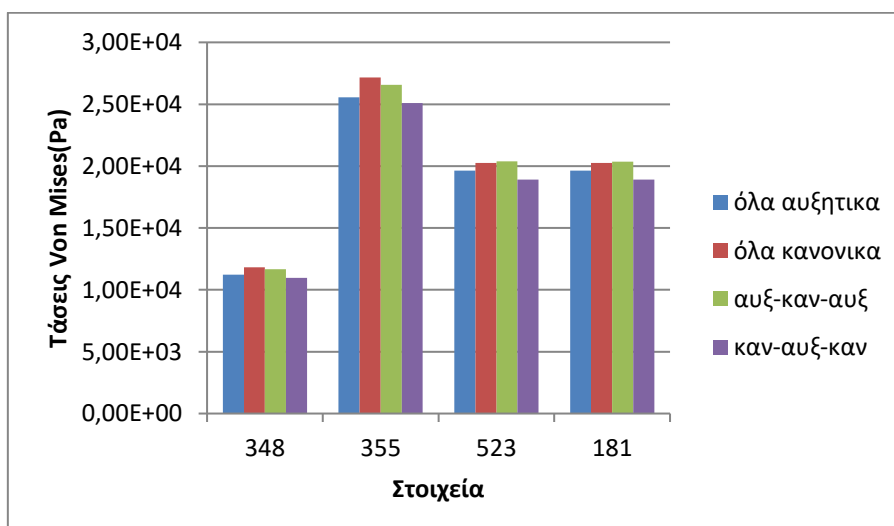
Στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό η μέγιστη τάση είναι 50188.2Pa και η ελάχιστη 1024.46Pa. Η κύρια παρατήρηση είναι ότι τις μεγαλύτερες τάσεις τις δέχονται οι πλάκες με αυξητικό υλικό στο σημείο όπου ξεκινάει ο σεισμός και όσο απομακρυνόμαστε εξασθενούν σε αντίθεση με τη μεσαία πλάκα κανονικού υλικού που σε όλη την επιφάνεια της δέχεται μικρότερες τάσεις.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα στοιχεία και οι τάσεις τους στα τρία στρώματα της πλάκας.



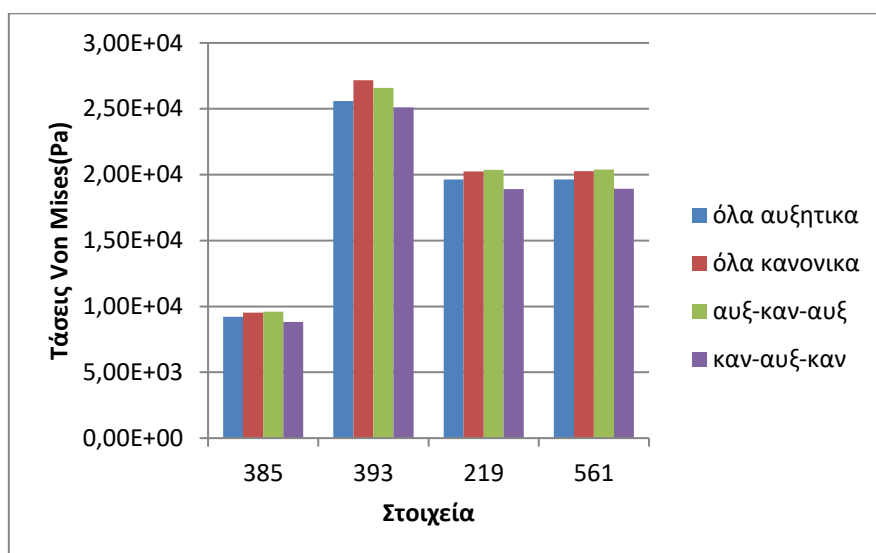
Διάγραμμα 17. Μεσαία πλάκα

Για την μεσαία πλάκα, το στοιχείο 304 δέχεται συνολικά τις μεγαλύτερες τάσεις από όλα τα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα δέχεται τις υψηλότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις χαμηλότερες στο μοντέλο όλα κανονικά. Το στοιχείο 286 δέχεται αισθητά πολύ χαμηλές τάσεις αλλά τις μεγαλύτερες τάσεις τις απορροφά στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό και τις μικρότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά. Όσον αφορά τα στοιχεία 31 και 468 παρουσιάζουν τις ίδιες τιμές στις τάσεις με τις μεγαλύτερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και τις μικρότερες στο μοντέλο όλα κανονικά.



Διάγραμμα 18. Μπροστά πλάκα

Για την πάνω πλάκα, το στοιχείο 348 τις μεγαλύτερες τάσεις τις δέχεται στο μοντέλο όλα κανονικά και τις μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Το στοιχείο 355 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις στο μοντέλο όλα κανονικά, τις χαμηλότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και στο σύνολο των τάσεων στο διάγραμμα δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με τα άλλα στοιχεία. Όσον αφορά τα στοιχεία 523 και 181 δέχονται τις ίδιες τάσεις σε όλα τα μοντέλα, τις μεγαλύτερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό και τις μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό.

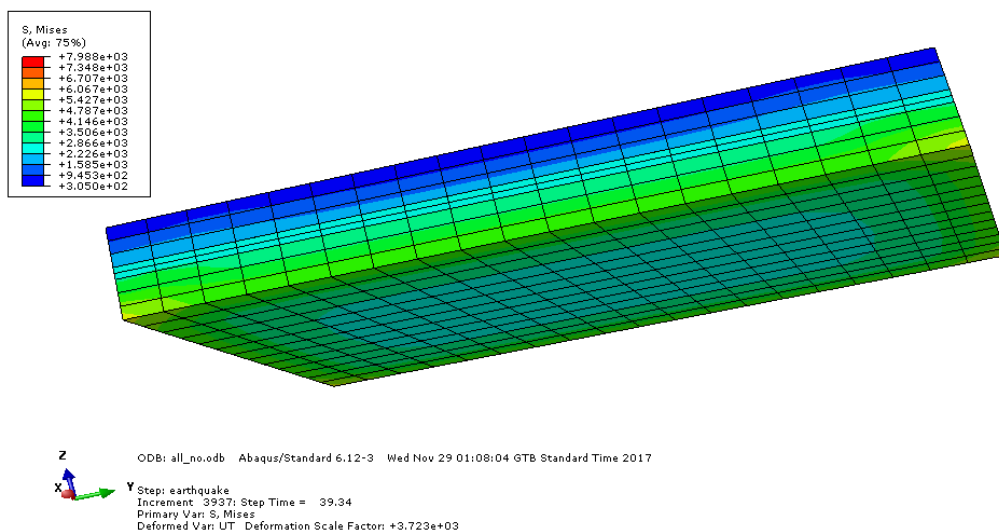


Διάγραμμα 19. Πίσω πλάκα

Για την κάτω πλάκα, το στοιχείο 385 τις μεγαλύτερες τάσεις τις δέχεται στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό και τις μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό. Το στοιχείο 393 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις στο μοντέλο όλα κανονικά, τις χαμηλότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και στο σύνολο των τάσεων στο διάγραμμα δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με τα άλλα στοιχεία. Όσον αφορά τα στοιχεία 219 και 561 δέχονται τις ίδιες τάσεις σε όλα τα μοντέλα, τις μεγαλύτερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό και τις μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό.

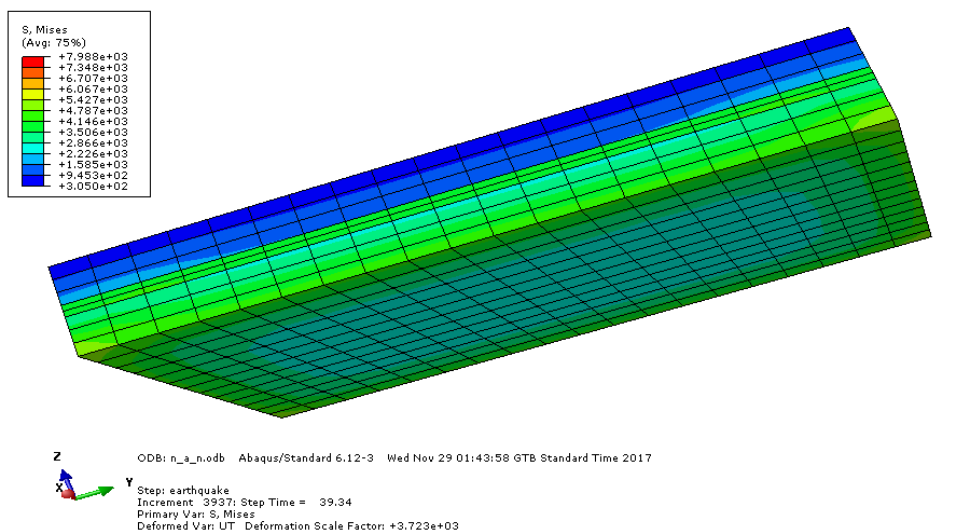
## 5.4.2. 2<sup>η</sup> περίπτωση

Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση, της σεισμικής ανάλυσης, οι οριακές συνθήκες τοποθετούνται στην κάτω μεγάλη οριζόντια επιφάνεια και μετά το πέρας της σεισμικής δραστηριότητας εξάγονται οι τάσεις Von Mises για τα προκαθορισμένα μοντέλα όπως φαίνονται στις εικόνες.



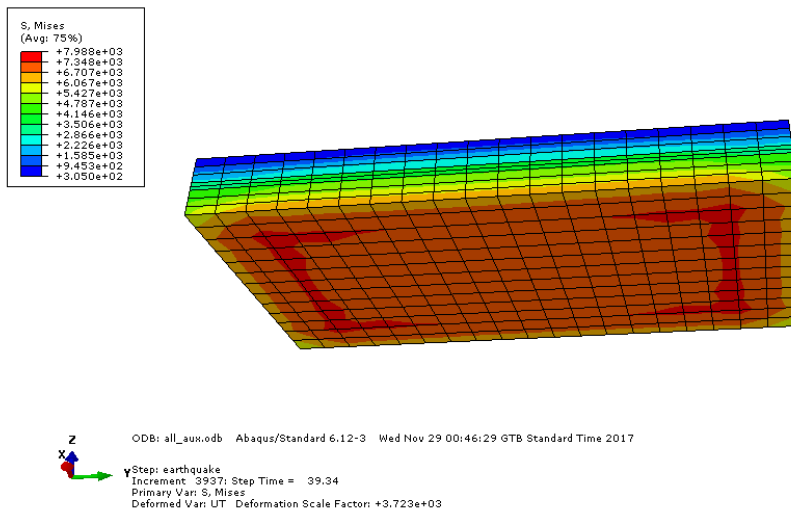
Εικόνα 34. Μοντέλο όλα κανονικά

Στο μοντέλο όλα κανονικά η μέγιστη τάση είναι 5725.47Pa και η ελάχιστη είναι 491.732Pa. Οι τάσεις που δημιουργούνται στο κέντρο της πάκτωσης είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις άκρες της. Όσο προχωράμε στο μεσαίο και στο πάνω στρώμα μειώνονται αισθητά.



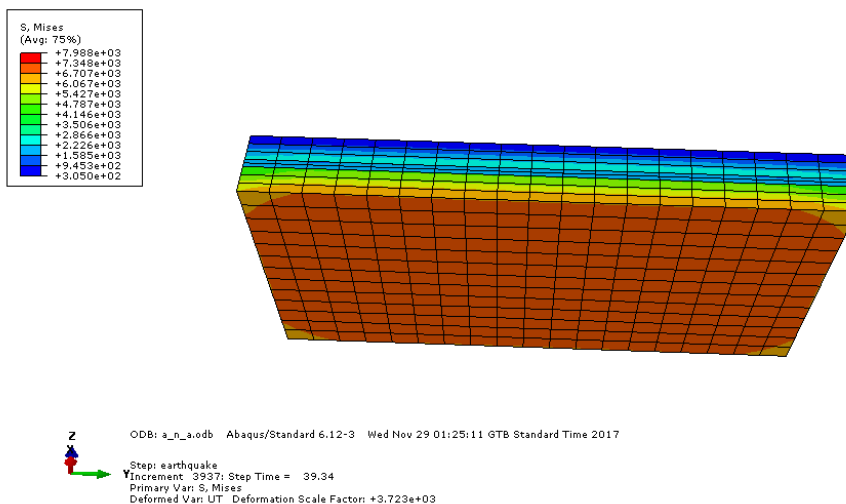
Εικόνα 35. Μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό

Στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό η μέγιστη τάση είναι 5279.06Pa και η ελάχιστη 480.421Pa. Οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στη μεσαία πλάκα που είναι αυξητικό υλικό και στις άκρες της πάκτωσης. Όσον αφορά το πάνω στρώμα δεν επηρεάζεται τόσο από τη σεισμική φόρτιση.



Εικόνα 36. Μοντέλο όλα αυξητικά

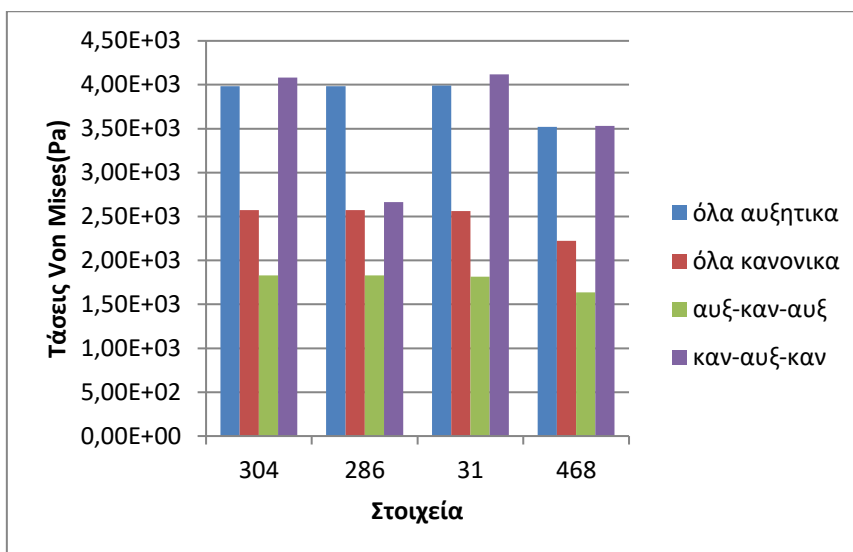
Στο μοντέλο όλα αυξητικά η μέγιστη τάση είναι 7987.91Pa και η ελάχιστη 305.014Pa. Τις υψηλότερες τάσεις τις βλέπουμε στην πάκτωση και συγκεκριμένα στα σημεία που φαίνονται στην εικόνα. Όσο απομακρυνόμαστε από την βάση οι τάσεις μειώνονται.



Εικόνα 37. Μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό

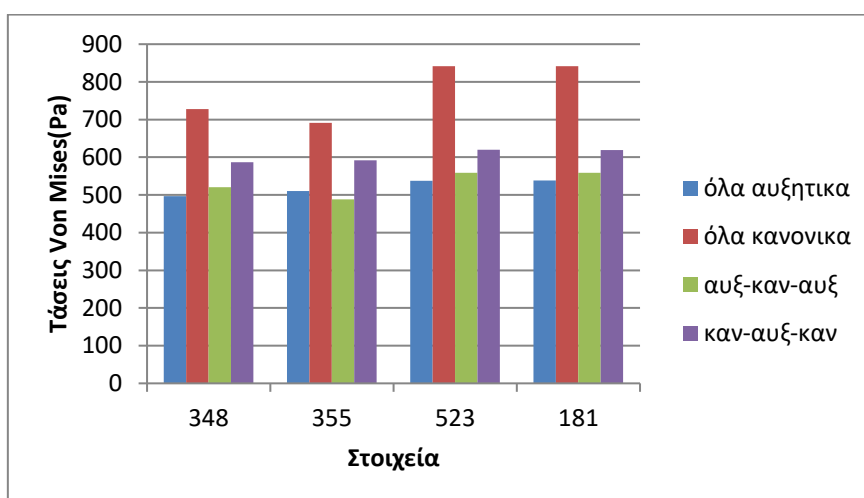
Στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό η μέγιστη τάση είναι 7317.98Pa και η ελάχιστη 415.055Pa. Εδώ σε σύγκριση με μοντέλο όλα αυξητικά βλέπουμε διαφορετική κατανομή στις τάσεις της κάτω πλάκας, είναι μοιρασμένες σε όλη την έκταση της και μεγαλύτερες σε σχέση με τη μεσαία πλάκα που είναι κανονικό υλικό. Η πάνω πλάκα δέχεται τις χαμηλότερες τάσεις.

Τέλος, παρουσιάζονται με τη μορφή διαγράμματος τα στοιχεία(elements)-τάσεις Von Mises στις πλάκες της διάταξης.



Διάγραμμα 20. Μεσαίο στρώμα

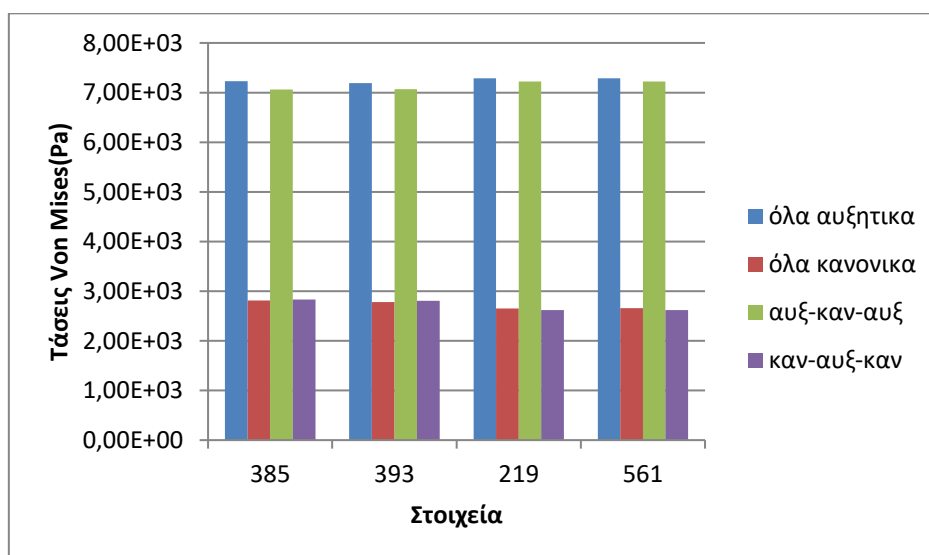
Για την μεσαία πλάκα, το στοιχείο 304 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις όταν βρίσκεται στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και ελάχιστα χαμηλότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά ενώ τις μικρότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Το στοιχείο 286 δέχεται τις υψηλότερες τάσεις στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις χαμηλότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Όσον αφορά το στοιχείο 31, οι υψηλότερες τάσεις παρατηρούνται στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και οι μικρότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Τέλος το στοιχείο 468 δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό, ελάχιστα μικρότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις χαμηλότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό.



Διάγραμμα 21. Πάνω πλάκα



Για την πάνω πλάκα, οι υψηλότερες τάσεις που δέχεται το στοιχείο 348 είναι στο μοντέλο όλα κανονικά, οι αμέσως μικρότερες στο μοντέλο κανονικό-αυξητικό-κανονικό και τις μικρότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά. Το στοιχείο 355 απορροφά τις μεγαλύτερες τάσεις στο μοντέλο όλα κανονικά και τις μικρότερες στο μοντέλο αυξητικό-κανονικό-αυξητικό. Για τα στοιχεία 523 και 181 οι τάσεις κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, τις υψηλότερες τάσεις τις δέχονται στο μοντέλο όλα αυξητικά και τις μικρότερες στο μοντέλο όλα αυξητικά. Αξιοσημείωτο για αυτήν την πλάκα είναι η μεγάλη διαφορά στις τιμές των τάσεων σε σχέση με τις άλλες δυο.



Διάγραμμα 22. Κάτω πλάκα

Για την κάτω πλάκα, το στοιχείο 385 στα μοντέλα όλα αυξητικά και αυξητικό-κανονικό-αυξητικό, παρουσιάζει την μεγαλύτερη απορρόφηση τάσεων με τις τιμές των δύο να διαφέρουν ελάχιστα. Στα μοντέλα όλα κανονικά και κανονικό-αυξητικό-κανονικό το στοιχείο συγκεντρώνει τις μικρότερες τάσεις οι τιμές των οποίων είναι σχεδόν ίδιες και έχουν πέσει κάτω από το μισό σε σχέση με τις προηγούμενες. Τα υπόλοιπα στοιχεία της κάτω πλάκας 393, 219 και 561 έχουν ακριβώς ίδια συμπεριφορά με το πρώτο σε όλα τα μοντέλα της διάταξης.

## 6. Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν να μελετήσουμε τη μόνωση του αυξητικού υλικού με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με βάση τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Οι τάσεις Von Mises, που δέχονται τα μοντέλα με αυξητικό υλικό σε όλες τις αναλύσεις, είναι αισθητά μεγαλύτερες από ότι στα μοντέλα με κανονικό υλικό.
- Όπου υπάρχει πλάκα αυξητικού υλικού δέχεται μεγαλύτερες τάσεις και φαίνεται να προστατεύει τις πλάκες κανονικού υλικού, να λειτουργεί δηλαδή σαν μόνωση.

Τα δυο παραπάνω ισχύουν και στην σεισμική ανάλυση.

### 6.1. Προτάσεις διερεύνησης

Ως μελλοντική διερεύνηση και επέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να προταθεί η σχεδίαση μιας μικροδομής, η οποία θα έχει εξ' αρχής αυξητικές ιδιότητες, για να δούμε στις αντίστοιχες αναλύσεις την συμπεριφορά της διάταξης και κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μόνωση στα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα. Όσον αφορά την σεισμική ανάλυση, μια πρόταση διερεύνησης είναι η τοποθέτηση ενός αντικειμένου που θα είναι σε επαφή με την διάταξη με σκοπό την καλύτερη κατανόηση συμπεριφοράς της διάταξης σάντουιτς.

## Αναφορές

- [1] Stavroulakis, G., 2005. Auxetic Behavior: Appearance and Engineering Applications. *Physica Status Solidi (b)*, Τόμος 242.
- [2] Tsopelas, P., Kunnath, S., 2010. Recent Advances in Seismic Isolation: Methods and Tools.
- [3] Unqureanu, B., Achaoui, Y., Enach, S., Brule, S., Guenneau, S., 2015. Auxetic-like Metamaterials as novel earthquake protections.
- [4] Κουμούσης, Β., 1998. Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [5] Γεωργέλλης, Α., 2016. Μελέτη δυναμικής απόκρισης αυξητικού και κλασσικού υλικού με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [6] Κατρανίδης, Β., 2013. Μελέτη αυξητικών υλικών: Ανάλυση μηχανικών συνδέσμων σε πολύστρωτα σύνθετα και μεταλλικούς αφρούς, Ερμούπολη: Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- [7] Abaqus Analysis user's guide
- [8] Στατική μελέτη, Φραγκοκάστελλο Σφακίων: διερεύνηση φθορών- αποκατάσταση- προτάσεις χρήσεων και διαμόρφωσης περιβάλλοντος χώρου για την ανάδειξη του μνημείου, 2015.