



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

**Μεταπτυχιακή Διατριβή με Θέμα: Μελέτη Αυξητικών
Κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία**

**Συντζανάκης Αντώνιος
Α.Μ.: 2011019029**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής:

Τον κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη, ως επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την άψογη συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε. Λόγω της πολύχρονης εμπειρίας του μου έδωσε πολλές γνώσεις που σχετίζονται με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στην μελέτη στατικών και δυναμικών προβλημάτων. Επίσης τον ευχαριστώ για την συνεχή υποστήριξη του που συνετέλεσε στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Όλους τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για το αμείωτο ενδιαφέρον τους, τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές πάσης φύσεως που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των χρόνων φοίτησης μου στην προκειμένη πολυτεχνική σχολή.

Την οικογένειά μου, τους φίλους μου, για την ψυχολογική και υλική υποστήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαιτέρως, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Στην σχεδιαστική διαδικασία μηχανικών στοιχείων η επιλογή υλικού αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια καθώς δίνει στο προϊόν καθορισμένο σχήμα, μέγεθος, κόστος καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες. Η απόδοση του στοιχείου σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο έχει κατασκευαστεί. Στις περισσότερες εφαρμογές, ένα στοιχείο σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση του βάρους χωρίς αστοχία κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης. Τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές έχουν θετικό λόγο poisson (τα περισσότερα μέταλλα έχουν λόγο poisson κοντά στο $1/3$ ενώ τα ελαστικά έχουν κοντά στο $1/2$). Ένα νέο αρκετά ενδιαφέρον πεδίο αφορά υλικά που επιδεικνύουν αρνητικό λόγο poisson ή αλλιώς τα λεγόμενα αυξητικά υλικά. Τα αυξητικά υλικά επιδεικνύουν την αρκετά ασυνήθιστη ιδιότητα του να διογκώνονται πλευρικά όταν υπόκεινται σε εφελκυστική τάση και να συστέλλονται όταν συμπιέζονται, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν αρνητικό λόγο poisson. Εκτός από το επιστημονικό ενδιαφέρον της ύπαρξης υλικών που επιδεικνύουν μια τόσο ασυνήθιστη ιδιότητα, ο αρνητικός λόγος poisson δίνει σε ένα υλικό αρκετές ενισχυμένες ιδιότητες όπως αυξημένη διατμητική δυσκαμψία, αυξημένη αντοχή σε θραύση και ελαστικότητα. Αυτές οι ιδιότητες κάνουν τα αυξητικά υλικά να πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών υλικών σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή χρησιμοποιείται μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για να προσομοιώσει την επίδραση διεγέρσεων σε σύνθετα υλικά συγκρίνοντας τις περιπτώσεις μεταξύ συμβατικών και αυξητικών δομών.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
Περίληψη.....	3
Εισαγωγή	6
Μηχανισμός, δομή και τις λειτουργίες των Υλικών.....	7
2.1 Γενικά.....	7
2.2 Μηχανισμός και δομή	8
2.3 Κατάταξη και τύποι	10
Ιδιότητες των Υλικών.....	13
3.1 Μέτρο Young και Μέτρο Διάτμησης	13
3.2 Συμπεριφορά στην εντομή	15
3.3 Συμπεριφορά Παραμόρφωσης	16
3.4 Αντοχή σε Ρηγμάτωση	17
3.4.1 Συμπεριφορά σε ρηγμάτωση	17
3.4.2 Μορφολογία μικροδομής	20
3.4.3 Αντίσταση στην ρηγμάτωση.....	20
3.5 Απόσβεση και Απορρόφηση ήχου.....	22
Υλικά και γεωμετρικές ιδιότητες κυψελοειδών κατασκευών τύπου σάντουιτς.....	23
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
4.1 Ιδιότητες υλικών.....	24
4.2 Μοντέλο πάνελ τύπου σάντουιτς	25
Εντός επιπέδου Μοντέλο	26
Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων	28
5.1 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για εντός επιπέδου φόρτιση	28
5.2 Διακριτοποίηση	28
5.3 Περιορισμοί	29
5.4 Συνοριακές συνθήκες και Φορτίσεις.....	29
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	29
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	33
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	36
Θεωρητικός υπολογισμός λόγου Poisson για συμβατική και αυξητική δομή	39
6.1 Θεωρητικό μοντέλο	39
6.2 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για εντός επιπέδου φόρτιση	41
6.3 Διακριτοποίηση	41
6.4 Συνοριακές συνθήκες και Φορτίσεις.....	41
Δυναμική ανάλυση	45

7.1 Εισαγωγή.....	45
7.2 Μελέτη Περιπτώσεων	45
Συμπεράσματα & Προτάσεις Διερεύνησης.....	57
8.1 Σχολιασμός και Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	57
8.2 Προτάσεις Διερεύνησης	57

Εισαγωγή

Η σύγχρονη τεχνολογία απαιτεί νέα υλικά ειδικών ιδιοτήτων. Ένας από τους λόγους για τον οποίο υπάρχει ενδιαφέρον για υλικά με ασυνήθιστες μηχανικές ιδιοότητες προέρχεται από το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες για να σχηματίσουν σύνθετα με άλλα υλικά τα οποία έχουν κάποιες επιθυμητές ιδιότητες, π.χ. ηλεκτρικές, μαγνητικές, και άλλου τύπου ιδιότητες. Ένα νέο πεδίο δραστηριότητας είναι η μελέτη υλικών που παρουσιάζουν αρνητικό λόγο Poisson (NPR). Μεγάλης κλίμακας κυτταρικές δομές με ιδιότητες αρνητικού λόγου Poisson NPR εισήχθησαν για πρώτη φορά το 1982 με τη μορφή δισδιάστατων κυψελών από ελαστική σιλικόνη ή αλουμίνιο τα οποία παραμορφώθηκαν με την κάμψη των νευρώσεων (Gibson, et al, 1982 & 1988).

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 αυξητικός, 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. Αυτός ο τύπος υλικών μπορεί να βρεθεί στην φύση σε μερικά είδη πετρωμάτων και ορυκτά καθώς και σε ζώα, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το δέρμα που καλύπτει την θηλή των αγελάδων. 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 παράδειγμά 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 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 αμυντικής βιομηχανίας. Στην πραγματικότητα, μερικά υλικά με τέτοιου είδους ασυνήθιστες (π.χ. NPR) ιδιότητες έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπως είναι ο πυρολιθικός γραφίτης που χρησιμοποιείται για θερμική προστασία στην αεροδιαστημική καθώς και δομή κρυστάλλων Ni_3Al σε βάνες στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.

Μηχανισμός, δομή και τις λειτουργίες των Υλικών

2.1 Γενικά

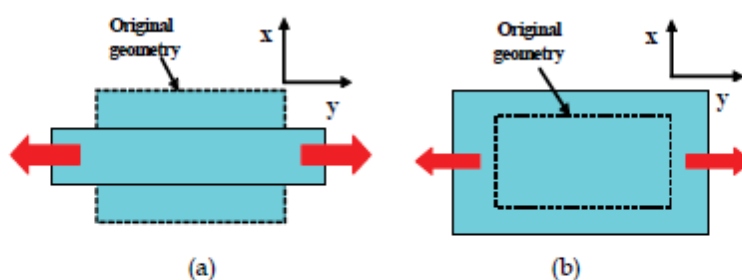
Είναι γνωστό ότι ο λόγος Poisson που ορίζεται από το λόγο της εγκάρσιας συστολής προς τον διαμήκη επέκταση σε μια απλή κατάσταση έντασης (Fung, 1968; Beer, et al, 2001).

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (1)$$

Δεδομένου ότι τα περισσότερα υλικά κατασκευών γίνονται λεπτότερα σε εγκάρσια τομή, όταν τεντώνονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 (α), ο λόγος Poisson σε αυτή την κατάσταση είναι θετικός, τυπικά παίρνει τιμές γύρω στο 0-0.5. Ο λόγος είναι ότι οι ενδο-ατομικοί δεσμοί ανασχηματίζονται λόγω της παραμόρφωσης. Ωστόσο, ορισμένα υλικά ή δομές συστέλλονται κατά την εγκάρσια κατεύθυνση υπό μονοαξονική θλίψη, ή εκτείνονται εγκάρσια, όταν τεντώνονται, βλέπε Σχήμα 1 (β). Αυτά τα υλικά ή οι δομές λέγεται ότι έχουν αρνητικό λόγο Poisson (NPR). Ένα τυπικό παράδειγμα είναι μία νέα δομή αφρού ή ένα αυξητικό υλικό, όπου το υλικό γίνεται παχύτερο όταν τεντώνεται. Αυτή η συμπεριφορά δεν έρχεται σε αντίθεση με την κλασσική θεωρία της ελαστικότητας: βασιζόμενοι στις θερμοδυναμικές θεωρήσεις της ενέργειας παραμόρφωσης, οι λόγοι Poisson των ιστροπικών υλικών όχι μόνο μπορούν να πάρουν αρνητικές τιμές, αλλά μπορούν να έχουν ένα εύρος αρνητικών τιμών διπλάσιο από αυτό των θετικών (Fung, 1968). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος του Poisson που οριοθετείται από δύο θεωρητικά όρια: πρέπει να είναι μεγαλύτερος από -1, και μικρότερος ή ίσος με 0,5, δηλαδή,

$$-1 < \nu \leq 0.5 \quad (2)$$

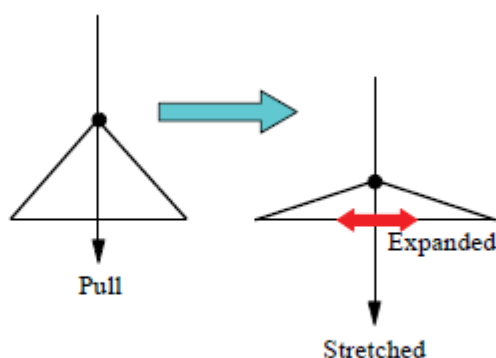
Το ανώτερο όριο του λόγου του Poisson αντιστοιχεί σε ελαστικά υλικά με ένα άπειρο συντελεστή όγκου (Lakes, 1987), ενώ το κατώτερο όριο αντιπροσωπεύει ένα άπειρο μέτρο διάτμησης.



Σχήμα 1: (α) Παραμόρφωση υλικού με θετικό λόγο Poisson και (β) Παραμόρφωση υλικού με αρνητικό λόγο Poisson όταν τεντώνεται.

2.2 Μηχανισμός και δομή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα υλικό με αρνητικό λόγο Poisson NPR διαστέλλεται (γίνεται παχύτερο) όταν τεντώνεται, σε αντίθεση με τα περισσότερα υλικά τα οποία τείνουν να γίνουν λεπτότερα. Ένας τυπικός μηχανισμός φαίνεται στο Σχήμα 2. Όταν μια δύναμη τραβά την δομή σε μία κατεύθυνση (π.χ., εδώ κατακόρυφα), η δομή ανοίγει προς τα πάνω ή επεκτείνεται στην κάθετη κατεύθυνση (εδώ, οριζόντια), δηλαδή, η κατασκευή γίνεται παχύτερη. Με βάση αυτόν το απλό μηχανισμό, μια δομή που μοιάζει με δίκτυο μπορεί να δημιουργηθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, όπου μια δισδιάστατη δομή (2D) από ένα τέτοιο υλικό αποτελείται από μια κανονική σειρά ορθογώνιων κόμβων που συνδέονται με ινίδια (Burke, 1997). Η παραμόρφωση της δομής προκύπτει από την στρέψη των ινιδίων. Για την «ανοικτή» γεωμετρία, τα κύτταρα επιμηκύνονται κατά μήκος της κατεύθυνσης της δύναμης και να συρρικνώνονται στην κάθετη διεύθυνση ως απόκριση στον εφελκυσμό του δικτύου, δίνοντας έναν θετικό λόγο Poisson ν , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 (α). Ωστόσο, η δομή έχει τροποποιηθεί για να υιοθετήσει μια νέα γεωμετρία, Σχήμα 3 (β), και το δίκτυο υποβάλλεται σε επιμήκυνση τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια προς το κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Με άλλα λόγια, πρόκειται για μια αυξητική δομή.

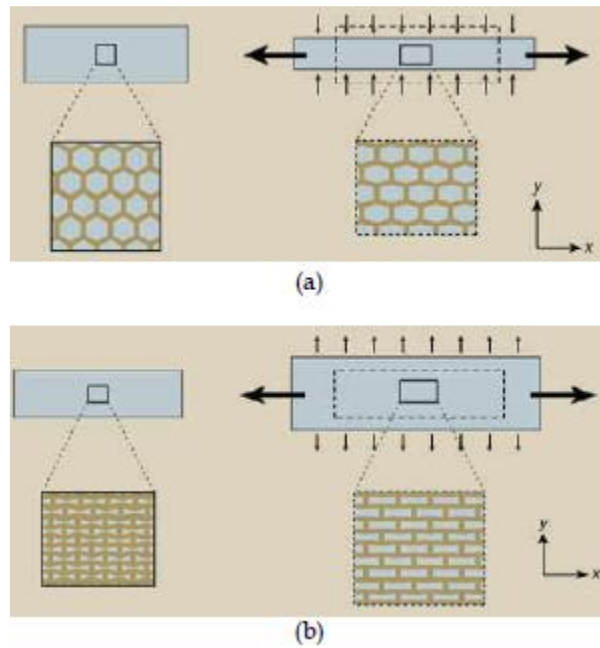


Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση βασικού μηχανισμού παραμόρφωσης στα αυξητικά υλικά.

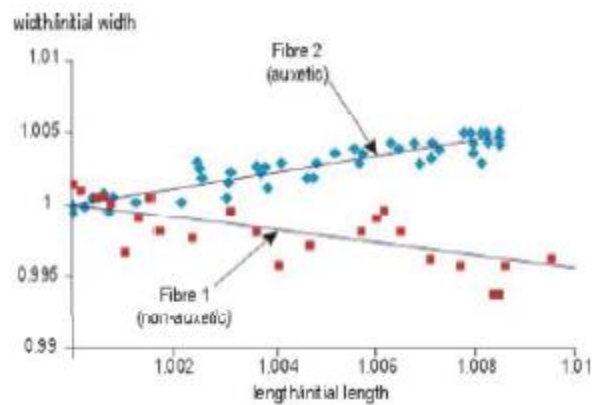
Το Σχήμα 4 απεικονίζει την μεταβολή στο πλάτος συναρτήσει της μεταβολής μήκους για δύο ίνες πολυπροπυλενίου (PP) οι οποίες τεντώνονται αξονικά. Η ίνα 1 είναι μια συμβατική ίνα PP και δείχνει μια συρρίκνωση στο πλάτος καθώς τεντώνεται, που αντιστοιχεί σε θετικό λόγο Poisson (ν). Η ίνα 2 υποβάλλεται σε επεξεργασία με τη χρήση θερμοκρασιών εξωθητή, η οποία οδηγεί στην μικροδομή κόμβων-ινιδίων. Το πλάτος του σε αυτή την περίπτωση αυξάνει μετά το τέντωμα και συνεπώς παρουσιάζει αυξητική συμπεριφορά.

Για αυξητικές κυψέλες, οι οποίες αποτελούν ένα ειδικό υποσύνολο των αυξητικών υλικών, η επίδραση του NPR οφείλεται στην γεωμετρική διάταξη της μονάδας κυττάρου της μικροδομής, οδηγώντας σε μια συνολική σκλήρυνση σε πολλές μηχανικές ιδιότητες, όπως η εντός επιπέδου αντίσταση σε παραμόρφωση, δυσκαμψία όσον αφορά το εγκάρσιο μέτρο διάτμησης και την κάμψη. Το Σχήμα 5 δείχνει τον μηχανισμό παραμόρφωσης κατά μήκος για αυξητική κυψέλη και για συμβατική κυψελοειδή δομή. Για μια συμβατική εξαγωνική γεωμετρία (Σχήμα 5 (α)), κάτω υπό εφελκυστική τάση στην κατεύθυνση Y, τα κύτταρα επιμηκύνονται κατά μήκος του άξονα Y και συρρικνώνονται στην κατεύθυνση X, γεγονός που οδηγεί σε θετικό λόγο του Poisson. Ωστόσο, για μια αυξητική δομή, τα κύτταρα

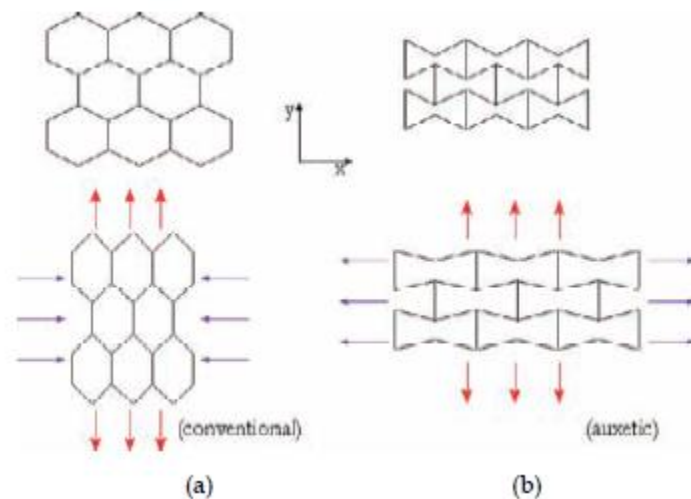
υποβάλλονται σε επιμήκυνση τόσο στην παράλληλη όσο και στην κάθετη προς την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου.



Σχήμα 3: Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης: (a) Συμβατικό Υλικό (b) Αυξητικό Υλικό (Alderson, 1999; Evans & Alderson, 2000; Lakes, 2001).

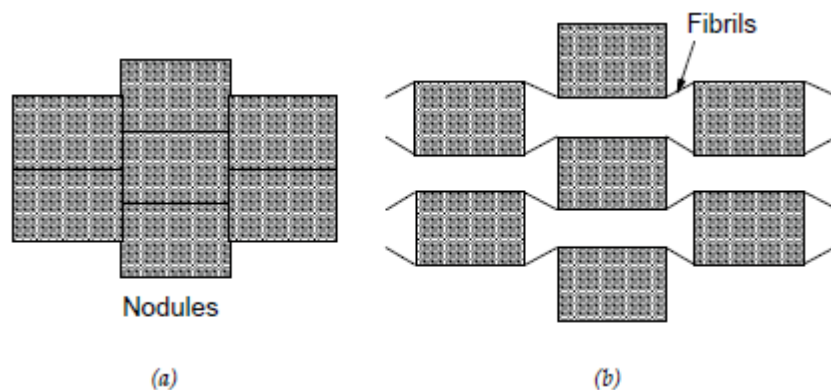


Σχήμα 4: Πλάτος συναρτήσει του μήκους για ίνες πολυπροπυλενίου (Scott, et al,2000).



Σχήμα 5: Δισδιάστατοι μηχανισμοί παραμόρφωσης οι οποίοι υπόκεινται σε φόρτιση κατά την y διεύθυνση (a) Δομή συμβατικής κυψέλης (b) Δομή αυξητικής κυψέλης (Evans & Alderson, 2000a; Evans & Alderson, 2000b).

Για αυξητικό μικροπορώδες πολυμερές, τα χαρακτηριστικά της μικροδομής μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα απλό δισδιάστατο μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Αυτό το μοντέλο αποτελείται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο κόμβων – ινιδίων. Εάν μια εφελκυστική τάση εφαρμοστεί, τα ινίδια προκαλούν πλευρική μετακίνηση των κόμβων, οδηγώντας σε έναν εξαρτώμενο από την παραμόρφωση αρνητικό λόγο Poisson.



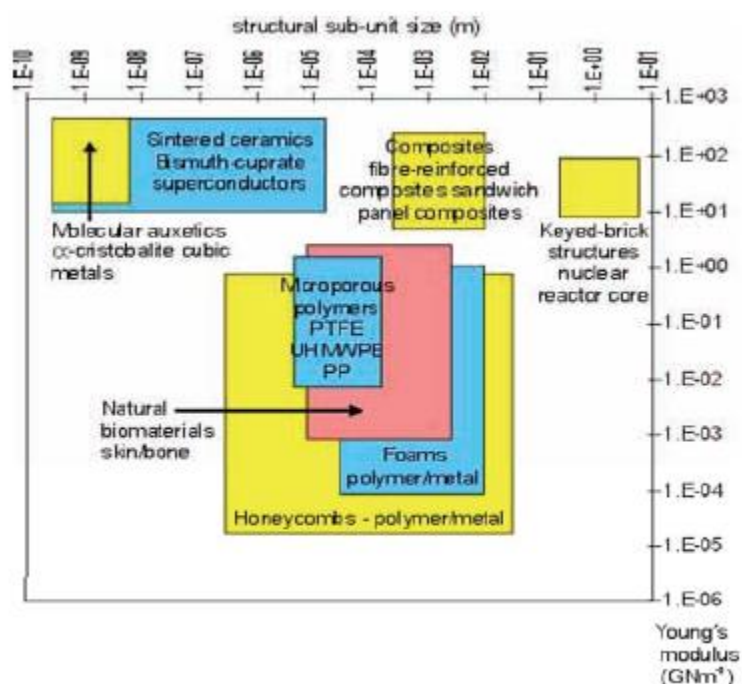
Σχήμα 6: σχηματική απεικόνιση της μικροδομής ενός τυπικού αυξητικού πολυμερούς. (a) το πολυμερές σε ηρεμία, (b) το πολυμερές υπό εφελκυστική τάση (Caddock & Evans, 1989 ; Evans & Caddock, 1989).

2.3 Κατάταξη και τύποι

Υλικά με αρνητικό λόγο Poisson διογκώνονται σε όλες τις κατευθύνσεις όταν τεντώνονται σε μία κατεύθυνση, συνεπώς συμπεριφέρονται με αντίστροφο τρόπο συγκριτικά με τα συμβατικά υλικά. Αφροί και κυψέλες αποτελούν ένα ειδικό υποσύνολο των αυξητικών υλικών. Οι επιδόσεις του αρνητικού λόγου Poisson, οφείλονται στο γεωμετρικό σχέδιο της

μονάδας κελιού της μικροδομής και οδηγούν σε ένα αποτέλεσμα συνολικής ακαμψίας σε πολλές μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η εντός επιπέδου αντίσταση σε παραμόρφωση, το εγκάρσιο μέτρο διάτμησης και η καμπτική ακαμψία. Υπό θλιπτική φόρτιση, η αύξηση της σχετικής πυκνότητας οδηγεί επίσης, σε ενισχυμένη μηχανική συμπεριφορά. Οι πυρήνες αυξητικών κυψελών, επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στην κατασκευή κυρτών πάνελ τύπου σάντουιτς, λόγω του καμπυλωτού συνκλαστικού χαρακτήρα τους που οφείλεται στη επίδραση του αρνητικού λόγου Poisson.

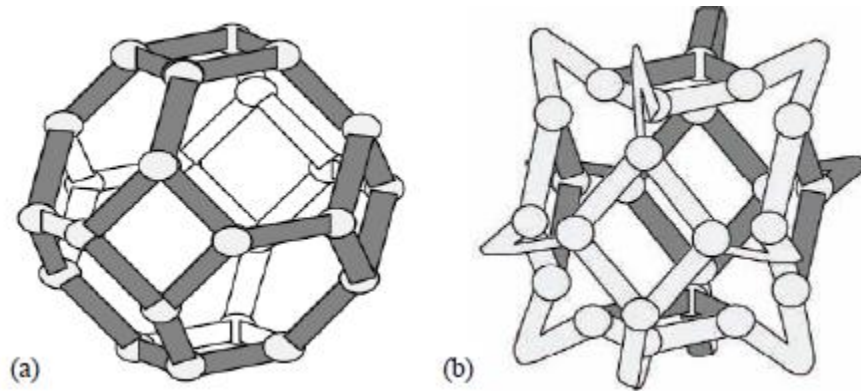
Ποικιλία αυξητικών υλικών και δομών, έχουν ανακαλυφθεί, κατασκευαστεί ή συντεθεί μέσα στα τελευταία είκοσι χρόνια, τα οποία κατατάσσονται από το μοριακό επίπεδο στο μικροσκοπικό έως κυριολεκτικά το μακροσκοπικό επίπεδο. Το Σχήμα 7, απεικονίζει τις κύριες κατηγορίες των υλικών (πολυμερή, σύνθετα, μέταλλα και κεραμικά) που πλέον υπάρχουν σε αυξητική μορφή, αυτά τα φυσικά και συνθετικά αυξητικά υλικά είναι γνωστά για πολλές τάξεις μεγέθους ακαμψίας ή συντελεστή όγκου Young, E . Λεπτομέρειες της επισκόπησης από φυσικά σε τεχνητά αυξητικά υλικά μπορούμε να δούμε στην δημοσίευση των Evans & Alderson(2000b).



Σχήμα 7: Τάξεις υλικών σε αυξητική μορφή(Stott, et al,2000).

Σχεδόν όλα τα συμβατικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων των αφρών επιδεικνύουν θετικό λόγο Poisson. Ο Lakes δημιούργησε έναν νέο τύπο αφρώδους υλικού που επιδεικνύει αρνητικό λόγο Poisson (Lakes, 1987a & b). Αυτό το υλικό παράχθηκε από την μετατροπή μιας συμβατικής δομής κελιών (Σχήμα 8(a)), έτσι ώστε οι νευρώσεις των κυττάρων να προεξέχουν προς τα μέσα και όχι προς τα έξω, παράδειγμα αυξητικής δομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 8(b). Όταν οι νευρώσεις που προεξέχουν στην κάθετη διεύθυνση είναι υπό εφελκυσμό, οι νευρώσεις στις πλευρικές διευθύνσεις θα τείνουν να κινηθούν προς τα έξω, οδηγώντας σε πλευρική διόγκωση. Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται θλιπτική φόρτιση οι νευρώσεις θα λυγίσουν περισσότερο προς τα μέσα και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την

πλευρική συστολή σαν απόκριση στην αξονική συμπίεση. Βασιζόμενοι σε αυτό το μοντέλο, πολυμερείς αφροί με αρνητικό λόγο Poisson θα μπορούσαν να κατασκευαστούν.



Σχήμα 8: Εξιδανικευμένα μοντέλα για κελιά αφρών. (a) Συμβατικό κελί (b) Αυξητικό κελί (Lakes & Witt,2002).

Ιδιότητες των Υλικών

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

3.1 Μέτρο Young και Μέτρο Διάτμησης

Άλλο ένα ειδικό χαρακτηριστικό των αυξητικών υλικών είναι ότι έχουν υψηλότερη αντίσταση στην διατμητική παραμόρφωση το οποίο οφείλεται στην συστροφή των δυνάμεων ρήξης. Η αντίσταση στην διάτμηση είναι ιδιαίτερα σημαντική στα δομικά στοιχεία όπως είναι τα ελάσματα ή οι δοκοί σε κτήρια, αυτοκίνητα και αεροσκάφη. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να επεξηγηθεί ποιοτικά από τις σχέσεις μεταξύ του συντελεστή διάτμησης (G), του συντελεστή Young (E), και του μέτρου ελαστικότητας όγκου (K) (το αντίστροφο της συμπίεστότητας) και του λόγου Poisson (ν). Για ισοτροπικά υλικά, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις (Fung, 1968; Beer, et al, 2001):

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

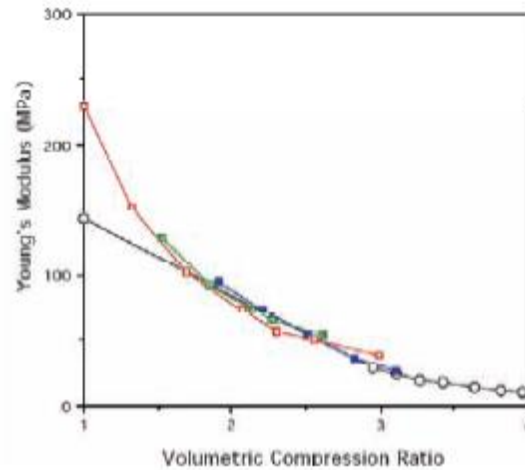
και

$$E = 2G(1+\nu) = 3K(1-2\nu) \quad (4)$$

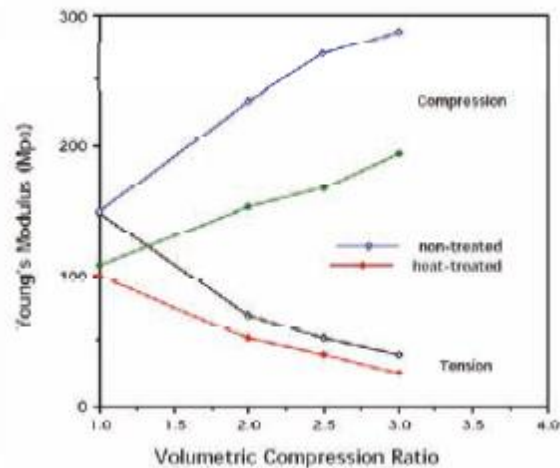
Για συμβατικά ισοτροπικά υλικά, ο συντελεστής Young (E) είναι τουλάχιστον διπλάσιος από τον συντελεστή διάτμησης (G). Παρόλα αυτά όταν ο λόγος Poisson γίνεται αρνητικός, οι δυο συντελεστές πλησιάζουν μέχρι την τιμή $\nu = -0,5$ όπου γίνονται ίσοι. Με άλλα λόγια, το υλικό γίνεται υψηλά συμπιέσιμο αλλά είναι δύσκολο να διατμηθεί. Το μέτρο ελαστικότητας όγκου και ο συντελεστής Young του υλικού είναι αρκετά μικρότερα από τον συντελεστή διάτμησης. Πέρα από την τιμή $\nu = -0,5$, ο συντελεστής διάτμησης υπερβαίνει τον συντελεστή ελαστικότητας (Choi & Lakes, 1992). Για παράδειγμα, ένα στερεό με $\nu = -1$ είναι δύσκολο να διατμηθεί αλλά εύκολο να παραμορφωθεί ογκομετρικά: $G \gg K$. Παρόλα αυτά, αν ο λόγος Poisson προσεγγίσει την τιμή $\nu = 0,5$, όπως συμβαίνει στα ελαστικά στερεά, το μέτρο ελαστικότητας όγκου (K) υπερβαίνει κατά πολύ τον συντελεστή διάτμησης (G) και το υλικό αναφέρεται ως ασυμπίεστο: $G \ll K$.

Για τέτοιο τύπο υλικού, ο συντελεστής Young επηρεάζεται από τον μόνιμο ογκομετρικό λόγο συμπίεσης. Γενικά, ο συντελεστής Young μειώνεται μονότονα με μόνιμη ογκομετρική

συμπίεση όταν βρίσκεται υπό φόρτιση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9. Η επίδραση του λόγου ογκομετρικής συμπίεσης στον συντελεστή Young υπό διαφορετική φόρτιση (εφελκυσμό-θλίψη) είναι διαφορετική, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 10. Υπο θλιπτική φόρτιση, ο συντελεστής Young αυξάνεται μαζί με τον λόγο ογκομετρικής συμπίεσης.



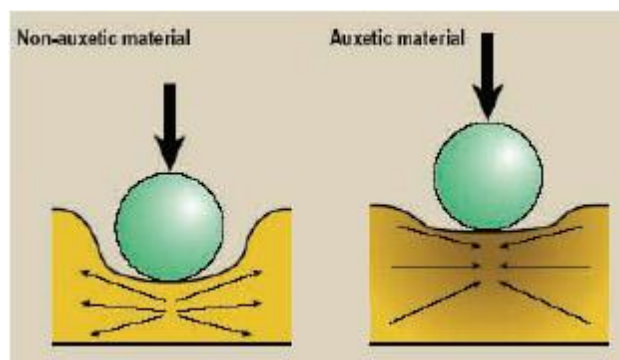
Σχήμα 9: Συντελεστής Young εξαρτώμενος από την αρχική σχετική πυκνότητα και από τον λόγο ογκομετρικής συμπίεσης; Αρχική σχετική πυκνότητα. Συμπαγή τετράγωνα -0,1; Ανοιχτά διαμάντια -0,09; Συμπαγή διαμάντια -0,08; Ανοιχτά τετράγωνα -0,04 (Choi & Lakes,1992).



Σχήμα 10: Συντελεστής Young ως συνάρτηση του μόνιμου ογκομετρικού λόγου συμπίεσης για ανοπτημένο και μη ανοπτημένο αφρό χαλκού για μια παραμόρφωση της τάξης του 0,5%; Μη-επεξεργασμένος, μη-ανοπτημένος; Θερμικά επεξεργασμένος, ανοπτημένος (Choi & Lakes,1992).

3.2 Συμπεριφορά στην εντομή

Τα αυξητικά υλικά δεν βαθουλώνουν τόσο εύκολα όσο τα μη αυξητικά υλικά και συνεπώς έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στην εντομή. Όταν ένα μη-αυξητικό υλικό υπόκειται σε δυναμικό φορτίο, η δύναμη συμπιέζει το υλικό και το υλικό συμπεριφέρεται απλώνοντάς στην κάθετη διεύθυνση και μακριά από την διεύθυνση της κρούσης (Σχήμα 11(α)). Από την άλλη πλευρά, όταν ένα αντικείμενο χτυπά ένα αυξητικό υλικό και το συμπιέζει σε μια διεύθυνση, το αυξητικό υλικό συστέλλεται κάθετα- το υλικό ρέει προς την γειτονία της κρούσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11(β). Αυτό δημιουργεί μια περιοχή πυκνότερου υλικού, η οποία είναι ανθεκτικότερη στην εντομή. Η έρευνα έχει δείξει ότι αυξητικοί αφροί έχουν υψηλότερο όριο θραύσης (σ_y) και λιγότερη ακαμψία (E) σε σχέση με συμβατικούς αφρούς με την ίδια σχετική πυκνότητα. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι όντως οι αυξητικοί αφροί αυξάνουν την πυκνότητα τους υπό εντομή εξαιτίας της αύξησης στον συντελεστή διάτμησης (Smith, et al, 1999).



Σχήμα 11: Απεικόνιση της συμπεριφοράς παραμόρφωσης για συμβατικό και αυξητικό υλικό που υπόκειται σε δυναμική θλιπτική φόρτιση (Alderson, 1999; Evans & Alderson, 2000).

Βασιζόμενοι στην κλασσική θεωρία ελαστικότητας (Timoshenko & Goodier, 1970), η αντίσταση στην εντομή ή αλλιώς σκληρότητα ενός ισотροπικού υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το $(1-\nu^2)$, το οποίο είναι:

$$H \propto \left[\frac{E}{(1-\nu^2)} \right]^\gamma \quad (5)$$

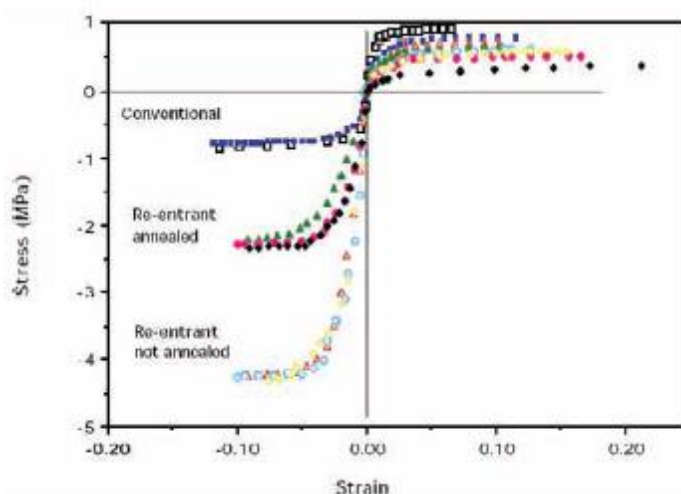
Όπου $\gamma=1$ για ομοιόμορφη κατανομή πίεσης και $\gamma=2/3$ για ερτζιανή εντομή.

Για μια δοσμένη τιμή του E , η αντίσταση σε εντομή αυξάνεται με αρνητικό λόγο Poisson(ν). Εάν η τιμή του ν προσεγγίζει το -1 , η σκληρότητα γίνεται άπειρη. Η σκληρότητα έχει διερευνηθεί για πολλά από τα συνθετικά αυξητικά υλικά που έχουν παραχθεί μέχρι σήμερα και έχουν βρεθεί βελτιώσεις σε όλους τους τομείς των υλικών τόσο διαφορετικές όσο οι πολυμερείς μεταλλικοί αφροί (Chan & Evens, 1998; Lakes & Elms, 1993), συνθετικά ελάσματα από ανθρακονήματα (Coenen, et al, 2001b) και μικροπορώδη πολυμερή (Alderson, et al, 2000). Για παράδειγμα, η σκληρότητα ενός αυξητικού μικροπορώδους υπερύψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλενίου (UHMWPE) βελτιώθηκε ως έναν συντελεστή 2 πάνω από το συμβατικό UHMWPE (Alderson, et al, 1994 & 2000). Επιπλέον, για χαμηλότερες φορτίσεις (π.χ. 10-100N) η δοκιμή εντομής έδειξε ότι είναι δυσκολότερο να βαθυλωθεί και η σκληρότητα είχε αυξηθεί ως έναν συντελεστή 8, εφόσον ο συντελεστής Poisson άλλαξε από την τιμή 0 σε περίπου $-0,8$ (Alderson, 1994; Yang, et al, 2004).

3.3 Συμπεριφορά Παραμόρφωσης

Πολύ πρόσφατες έρευνες που αφορούν την κρούση χαμηλής ταχύτητας σε συνθετικά ελάσματα από ανθρακονήματα έχουν δείξει βελτιώσεις στην απορρόφηση ενέργειας μέχρι και ένα τρίτο για το πρώτο σημείο αστοχίας (Coenen, et al, 2001a). Η ψυχρή κατεργασία σε ένα αυξητικό αφρώδες υλικό έχει κάποιες επιπτώσεις λόγω της τριαξονικής συμπίεσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Όμως, η θερμική κατεργασία (ανόπτηση) επιδρά εμφανώς στο συντελεστή Young. Το Σχήμα 12 δείχνει τις σχέσεις τάσης- παραμόρφωσης των συμβατικών και των αυξητικών αφρώδων υλικών. Η ανόπτηση λογικά μειώνει το συντελεστή Young σε ένα δοσμένο λόγο ογκομετρικής συμπίεσης (βλέπε Σχήμα 10). Με άλλα λόγια, το υλικό γίνεται λιγότερο άκαμπτο. Ως αποτέλεσμα, ο αυξητικός αφρός χαλκού είναι λιγότερο άκαμπτος από τον συμβατικό αφρό από τον οποίο προήλθε. Στους συμβατικούς αφρούς χαλκού οι ιδιότητες υπο εφελκυσμό και συμπίεση είναι παρόμοιες. Όμως, οι αυξητικοί αφροί δείχνουν διαφορετικές συμπεριφορές στον εφελκυσμό και τη συμπίεση. Επίσης, τόσο στον εφελκυσμό όσο και στην συμπίεση και τα δύο είδη αφρών παρουσιάζουν μία σχετικά μακριά σταθεροποίηση πάνω από το όριο αναλογίας. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στην πλαστική μόρφωση αρθρώσεων των πλευρών κελιού (Choi & Lakes, 1992). Από το Σχήμα 12 μπορούμε επίσης να δούμε ότι ο συμβατικός αφρός έχει μια τάση δυσκολίας στην παραμόρφωση σε αντίθεση με τον αυξητικό αφρό που δεν την έχει. Επομένως, αυτό το υλικό στην μοντελοποίηση μπορεί λογικά να θεωρηθεί ως απολύτως ελαστικό και τέλεια πλαστικό υλικό.



Σχήμα 12: Σχέσεις εφελκυσμού – παραμόρφωσης συμβατικών και αυξητικών αφρών. Αρχική σχετική πυκνότητα: 0,08. Κλειστά σύμβολα: ανοπτημένα. Ανοιχτά σύμβολα: μη ανοπτημένα

Τετράγωνα: συμβατικός αφρός, ογκομετρική συμπίεση 1. Τρίγωνα: αυξητικός αφρός, ογκομετρική συμπίεση 2.0. Κύκλοι: αυξητικός αφρός, ογκομετρική συμπίεση 2.5. Διαμάντια: αυξητικός αφρός, ογκομετρική συμπίεση 3.0 (Choi & Lakes, 1992).

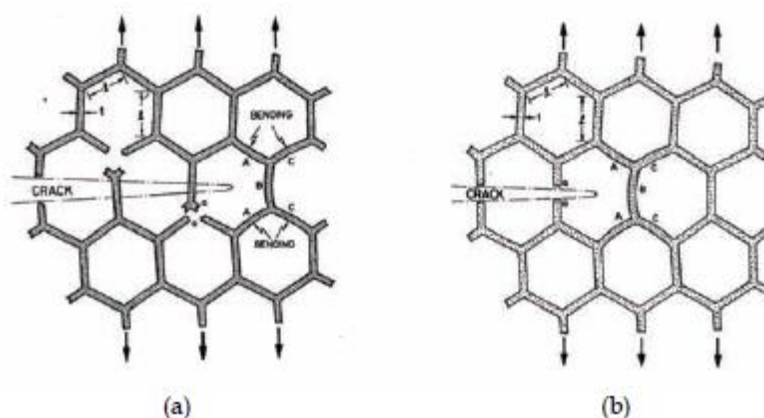
3.4 Αντοχή σε Ρηγμάτωση

3.4.1 Συμπεριφορά σε ρηγμάτωση

Η συμπεριφορά ρηγμάτωσης τόσο των συμβατικών όσο και των αυξητικών αφρών στον εφελκυσμό είναι όπως στην brittle. Η αστοχία συμβαίνει ξαφνικά χωρίς την εμφάνιση 'λαιμού' (Gibson & Ashby, 1988; Choi & Lakes, 1992). Από την άποψη της διάστασης των κελιών ένα ράγισμα διαδίδεται σταδιακά, κάθε βήμα του οποίου ενισχύει την ρηγμάτωση κατά ένα εύρος κελιού (Maiti, et al, 1984). Όταν η τάση στην άκρη της ρωγμής είναι αρκετά υψηλή στην ακμή ή στο τοίχωμα του κελιού, μια τοπική ρηγμάτωση συμβαίνει και το ράγισμα επεκτείνεται.

Όμως, η διάδοση της ρηγμάτωσης γίνεται με δυο διαφορετικούς τρόπους (Ashby, 1983):

- Μέσω της αστοχίας λυγισμού το μη-κάθετο τοιχώματος ή της άκρης κελιού (Σχήμα 13(α)).
- Από την ρηγμάτωση κάθετων στοιχείων υπο τον συνδυασμό εφελκυσμού και ροπής κάμψης (Σχήμα 13(β)).



Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση της διάδοσης ρωγμής που συμβαίνει σε κυττάρικο στερεό (α) Μέσω της αστοχίας λυγισμού των μη-κάθετων στοιχείων κελιού και (β) Μέσω της εφελκυστικής ρηγμάτωσης των κάθετων στοιχείων κελιού (Maiti, et al, 1984).

Αφού τα κελιά σε μη-συμβατικούς αφρούς έχουν μη-μηδενικό μέγεθος, τα ραγίσματα στο υλικό δεν μπορούν να έχουν τελείως οξεία μορφή (Σχήμα 14). Το μη μεμονωμένο πεδίο τάσεων σε απόσταση r (για $r > r_{tip}/2$) για μια ρωγμή της τάξης $2a$ με ακτίνα άκρης ρωγμής, r_{tip} , δίνεται από την σχέση (Ewards & Wanhill, 1986):

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{r_{tip}}{2r} \right) \quad (6)$$

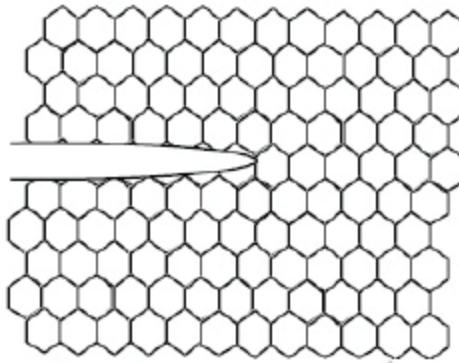
Όπου K_I είναι ο συντελεστής τάσεων καταπόνησης. Η δύναμη που επιδρά στην πλευρά του κελιού μπορεί να ανακτηθεί όταν το ολοκλήρωμα είναι πάνω από το πάχος μιας πλευράς, αυτό είναι,

$$F = \int_{r_{ap}/2}^{r_{ap}/2+t} \left[\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r_{ap}}{2r} \right) \right] r_{ap} dr \quad (7)$$

όπου το t είναι το πάχος της πλευράς. Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor και μια πρώτη προσέγγιση διάταξης, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εκφραστεί:

$$F = 2.38 K_I^* \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{l} \right) \quad (8)$$

όπου K_I^* είναι ο συντελεστής τάσεων καταπόνησης των συμβατικών αφρών και το l είναι το μήκος πλευρών (σχήμα 13 (α)).



Σχήμα 14: Δομικές και συνεχείς όψεις μιας ρωγμής σε αφρό, που προτείνουν τη χρήση μιας μη μηδενικής κυρτότητας άκρης της ρωγμής. (Choi & Lakes, 1996).

Δεδομένου ότι ο εφελκυστική τάση στις πλευρές των κελιών δεν είναι σημαντική σε σύγκριση με την κάμπτική, η κάμπτική ροπή κρίνεται ως η κύρια δύναμη που εφαρμόζεται στις πλευρές των κελιών (Choi & Lakes, 1996). Αυτό δεν ισχύει για αφρούς με πολύ υψηλή πυκνότητα. Η τάση που οφείλεται στην κάμπτική ροπή δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = 2.12 \frac{Fl}{t^3}. \quad (9)$$

Αντικαθιστώντας την Εξίσωση (8) στην παραπάνω εξίσωση, η τάση γίνεται:

$$\sigma = 5.05 K_I^* \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{l}{t} \right)^2 \quad (10)$$

Η ρωγμή θα αυξηθεί εάν $\sigma = \sigma_f$, όπου σ_f είναι η αντοχή σε ρηγμάτωση της πλευράς κελιού. Κατά συνέπεια, η αντοχή σε θραύση των συμβατικών αφρών, K_I^* , μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$K_I^* = 0.20 \sigma_f \sqrt{\pi l} \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad (11)$$

Από $\rho^*/\rho_s \propto (t/l)^n$, επομένως, ο συντελεστής τάσεων καταπόνησης των συμβατικών αφρών είναι ανάλογος προς την ομαλοποιημένη πυκνότητα, δηλ.,

$$\frac{K_{IC}^*}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0.19 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (12)$$

Όπου ρ^* είναι η πυκνότητα του αφρού, ρ_s η πυκνότητα του στερεού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο αφρός, α και n είναι σταθερές.

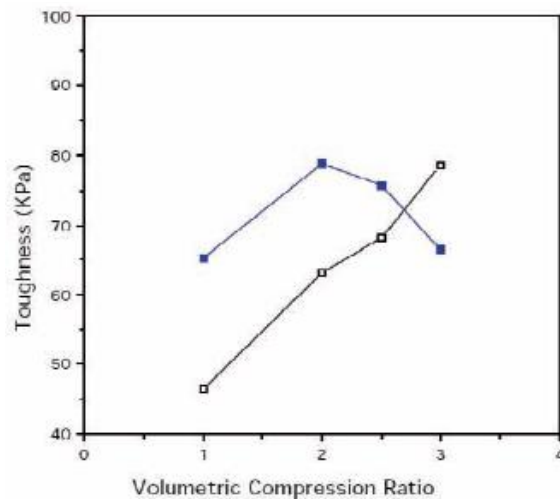
Για την αντοχή σε θραύση αυξητικών αφρών, μπορούν να ανακτηθούν οι παρόμοιες σχέσεις υπό την μορφή των εξισώσεων (11) και (12) εφόσον έχει αποφασιστεί η ειδική δομή για αυτόν τον τύπο υλικού. Η αντοχή σε θραύση στους μη-συμβατικούς αφρούς (π.χ. αυξητικούς) μπορεί να εκφραστεί από την σχέση (Choi & Lakes, 1996)

$$\frac{K_{IC}^*}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0.10 \sqrt{\frac{1 + \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi)}{1 + \cos 2\varphi}} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (13)$$

Όπου K_{IC} είναι η αντοχή σε θραύση για αυξητικούς αφρούς και φ είναι η γωνία πλευράς που σχετίζεται με το σχήμα του κελιού. Οι λεπτομέρειες της προέλευσης της εξίσωσης (12) είναι στην εργασία του Choi & Lakes (1996). Από τις σχέσεις (11) και (13), ο λόγος της αντοχής σε θραύση αυξητικών αφρών προς την αντοχή σε θραύση συμβατικών αφρών δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\frac{K_{IC}^*}{K_{IC}^*} = 0.53 \sqrt{\frac{1 + \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi)}{1 + \cos 2\varphi}} \quad (14)$$

Από τότε που το παραπάνω μοντέλο καθιερώθηκε στο απλοποιημένο μοντέλο, για λόγο ογκομετρικής συμπίεσης με τιμή 2.5 η μεγαλύτερη, τα αποτελέσματα μπόρεσαν να βελτιστοποιηθούν περαιτέρω, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αυξητικοί αφροί έχουν μια σύνθετη ανώμαλη μικροδομή. Συνεπώς, το αποτέλεσμα του λόγου ογκομετρικής συμπίεσης στην αντοχή είναι ελαφρώς περίπλοκη, εξαρτάται από την κατάσταση ανόπτησης του υλικού (Σχήμα 15). Εν συγκρίσει με αυτό των υλικών συμβατικών αφρών, η αντοχή αυξάνεται από παράγοντες της τάξης 1.4, 1.5, και 1.7 με αύξηση του λόγου ογκομετρικής συμπίεσης 2.0, 2.5, 3.0 αναλογικά (Choi & Lakes, 1992). Για μη ανοπτημένα υλικά, η αντοχή αυξάνεται μαζί με τον λόγο ογκομετρικής συμπίεσης, αλλά κάτω από συνθήκες ανόπτησης, η αντοχή αυξάνεται εως τον λόγο ογκομετρικής συμπίεσης περίπου 2.0. Περαιτέρω αύξηση στον λόγο ογκομετρικής συμπίεσης οδηγεί σε μείωση αντοχής.



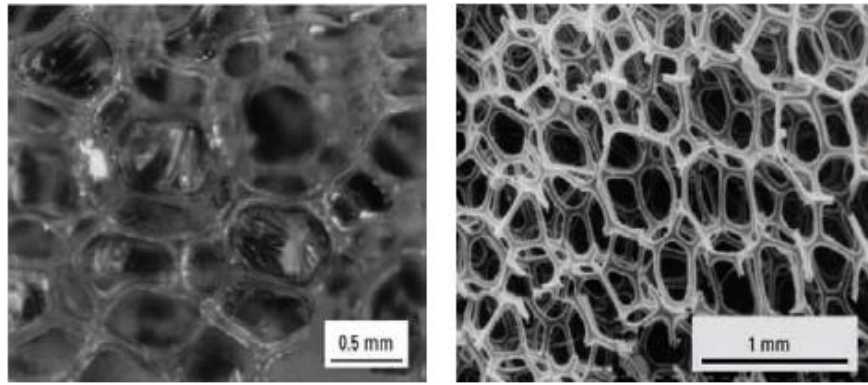
Σχήμα 15: Αντοχή ως εξίσωση της μόνιμης ογκομετρικής συμπίεσης για συμβατικούς και αυξητικούς αφρούς: ανοιχτά σύμβολα, μη-ανοπτημένα; συμπαγή σύμβολα, ανοπτημένα (Choi & Lakes, 1992).

3.4.2 Μορφολογία μικροδομής

Η μικροδομή του αφρού είναι περίπλοκη. Το Σχήμα 16 παρουσιάζει τις μικροδομές ανοιχτού κελιού και κλειστού κελιού πολυεστερικών αφρών πολυουρεθάνης. (Chan & Evans, 1997). Στον αφρό κλειστού κελιού, τα περισσότερα από τα μέτωπα των κελιών είναι κλειστά από λεπτές μεμβράνες. Οι πορώδεις ανοιχτού κελιού αφροί επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση του αέρα μέσα από το υλικό όταν τεντώνονται. Οι αυξητικοί αφροί έχουν μια πιο σύνθετη γεωμετρία (Σχήμα 17(α)). Ως εκ τούτου, είναι πολύ πιο πιθανό να παραμορφωθούν από στρέψη και κάμψη παρά να εκταθούν σε εφελκυσμό (Σχήμα 17(β)) και θλίψη (Σχήμα 17(γ)). Υπο εφελκυσμό, τα κελιά εκτείνονται εγκάρσια υπο την διαμήκη εφελκυστική δύναμη (Chan & Evans, 1997). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αυξητικοί αφροί αποτελούνται από κόμβους που διασυνδέονται από ινίδια (Caddock & Evans, 1989). Επίσης, οι συμβατικοί αφροί αποτελούνται από συμβατικά πολυεδρικά κελιά, ενώ οι αυξητικοί αφροί αποτελούνται από αρκετά πιο μπερδεμένες κυτταρικές δομές (Choi & Lakes, 1995; Chan & Evans, 1997), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 18. Ένα παράδειγμα είναι η μικροδομή του UHMWPE που απεικονίζεται στο Σχήμα 19 (Alderson & Evans, 1992).

3.4.3 Αντίσταση στην ρηγμάτωση

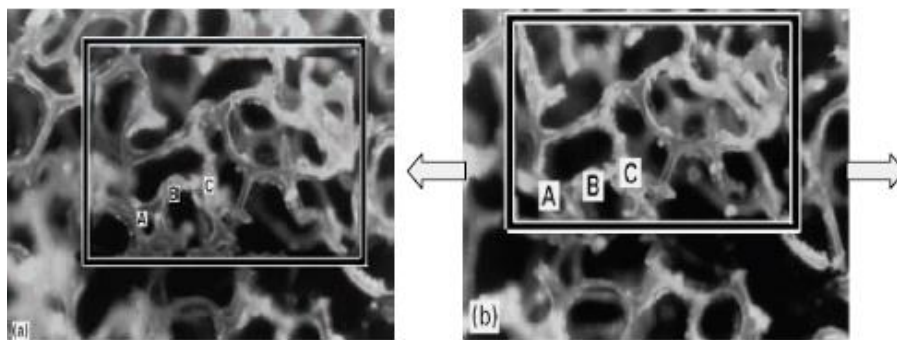
Συγκρινόμενα με τα μη αυξητικά υλικά, τα αυξητικά υλικά έχουν κάποιες επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, αν το υλικό έχει μια ρωγμή και τραβιέται ώστε να διαχωριστεί, αυτό διαστέλλεται με αποτέλεσμα να κλείνει η ρωγμή. Με άλλα λόγια, αυτός ο τύπος υλικού επιδεικνύει μεγαλύτερη αντοχή στην ρηγμάτωση. Επίσης, έχει μεγάλη αντοχή υλικού στην διατμητική παραμόρφωση. Η διατμητική αντοχή είναι αρκετά σημαντική σε δομικά υλικά όπως φύλλα ή δοκοί σε κτήρια, αυτοκίνητα και αεροσκάφη.



(α)

(β)

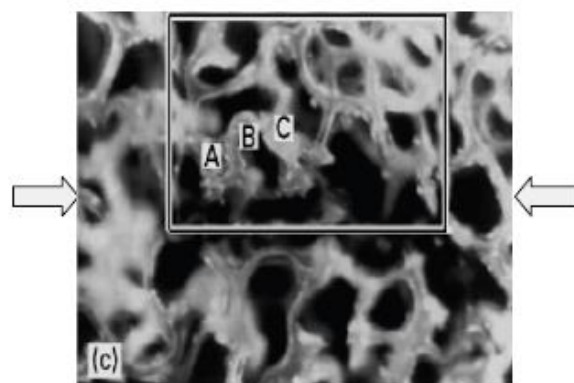
Σχήμα 16: Μικροδομές του συμβατικού αφρού πολυουρεθάνης: (α) Κλειστού κελιού (οπτική μικρογραφία) και (β) Ανοιχτού κελιού (Choi & Lakes, 1997)



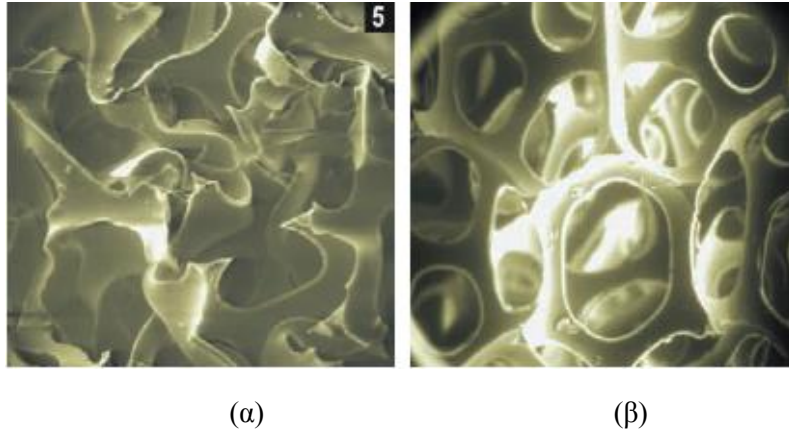
(α)

(β)

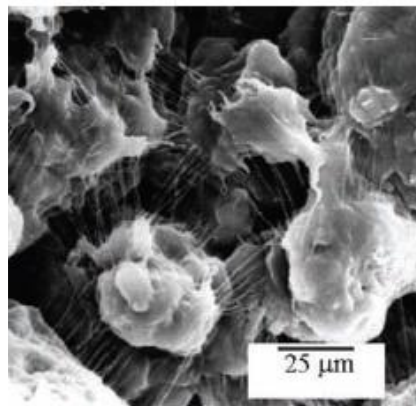
Σχήμα 17: (α) και (β) (Chan & Evans, 1997)



Σχήμα 17: Μικρογραφίες των αυξητικών αφρών πολυουρεθάνης παρουσιάζοντας τις ελαστικές παραμορφώσεις υπο διαφορετικούς τύπους φορτίσεων (α) Ελεύθερο (β) Υπο εφελκυσμό (γ) Υπο συμπίεση (Chan & Evans, 1997)



Σχήμα 18: Πολυμερείς αφροί ανοιχτού κελιού: (α) Μη-αυξητικοί (β) Αυξητικοί (Choi & Lakes, 1995; Chan & Evans, 1997)



Σχήμα 19: Μικρογραφία της μικροδομής του αυξητικού UHMWPE (Alderson & Evans, 1992)

3.5 Απόσβεση και Απορρόφηση ήχου

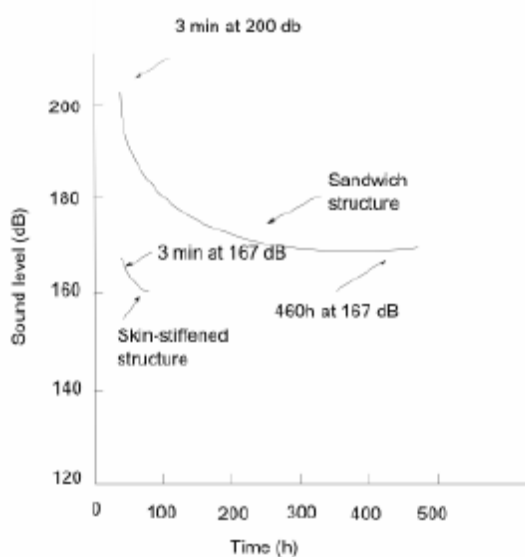
Οι αφροί αρνητικού λόγου Poisson που παρουσιάζονται επιδεικνύουν μια συνολική υπεροχή όσον αφορά τις ιδιότητες απόσβεσης και απορρόφησης ήχου εν συγκρίσει με τους συμβατικούς αφρούς (Scarpa, et al, 2004). Οι αυξητικοί αφροί μπορούν να έχουν καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ήχου σε σχέση με τους συμβατικούς αφρούς σε όλα τα επίπεδα των συχνοτήτων. Οι αυξητικοί αφροί με μικρότερο μέγεθος πόρων απορροφούν τον ήχο πιο αποτελεσματικά από αυτούς με μεγαλύτερους πόρους για συχνότητες άνω των 630 Hz (Howell, et al, 1994).

Υλικά και γεωμετρικές ιδιότητες κυψελοειδών κατασκευών τύπου σάντουιτς

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

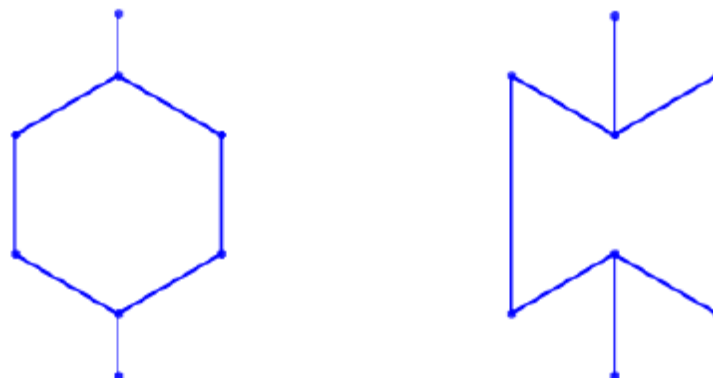
Η ιδέα για την κατασκευή στοιχείων τύπου σάντουιτς αναπτύχθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, ωστόσο η ανάπτυξη τους αυτή ολοκληρώθηκε τον 20^ο αιώνα. Η χρήση κατασκευών τύπου σάντουιτς επικράτησε σε πολλές κατασκευές χάρη στα ποικίλα πλεονεκτήματα που προσφέρει όσον αφορά την εξοικονόμηση βάρους και 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, στο Σχήμα 20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δοκιμή ηχητικής κόπωσης μεταξύ κυψελοειδούς πάνελ και δομής με ενισχυμένη επιφάνεια. Επισημαίνεται, ότι η κυψελοειδής δομή άντεξε 460 ώρες στα 167db ενώ η άλλη δομή άντεξε μόνο 3 λεπτά στα ίδια db. Ο λόγος για την μεγαλύτερη αντίσταση σε κόπωση της κυψελοειδούς δομής είναι ότι τα πάνελ είναι συνεχώς ενωμένα με τον πυρήνα και έτσι δεν έχουμε συγκεντρώσεις τάσεων. Ένας επιπλέον λόγος που χρησιμοποιούνται σάντουιτς κατασκευές με κυψελοειδή πυρήνα είναι ότι προσφέρουν υψηλή ακαμψία με παράλληλη εξοικονόμηση βάρους.



Σχήμα 20: Σύγκριση ηχητικής κόπωσης μεταξύ δομής τύπου σάντουιτς και δομής με ενισχυμένη επιφάνεια.

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. Στο Σχήμα 21 απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ συμβατικής και αυξητικής δομής όσον αφορά τις κυτταρικές μονάδες.



Σχήμα 21: Γεωμετρία κυτταρικών μονάδων συμβατικής και αυξητικής κυψέλης.

4.1 Ιδιότητες υλικών

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

Material	Young's Modulus E(Gpa)	Poisson's Ratio, ν	Density, ρ (Kg/m ³)
A5052-H34	68.97	0.34	2700

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

Οι Ashby και Gibson που έδωσαν δραστικές ιδιότητες της κυψέλης βασιζόμενοι στην θεωρία της δοκού. Σύμφωνα με τον Ashby και Gibson μια μοναδιαία κυψέλη μιας κυψελοειδούς δομής χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πάνελ τύπου σάντουιτς. Μια μοναδιαία κυψέλη της συμβατικής και αυξητικής δομής απεικονίζονται στο Σχήμα 22, μαζί με τις παραμέτρους που καθορίζουν την γεωμετρία κελιού της κυψέλης. Οι παράμετροι είναι οι ακόλουθες: h (ύψος κελιού), l (μήκος του τοιχώματος κελιού), d (βάθος του τοιχώματος κελιού) και θ (γωνία μεταξύ οριζόντιου και κεκλιμένου τοιχώματος κελιού). Επιπλέον, ως α ορίζεται ο λόγος που ισούται με h/l , ενώ ως β ορίζεται ο λόγος πάχους προς το μήκος t/l . Για την συμβατική κυψέλη, $\theta=30$ και $\alpha=1$, ενώ για την αυξητική ορίζεται ως $\theta=-30$ και $\alpha=2$. Με αυτήν την επιλογή παραμέτρων της αυξητικής μονάδας κελιού, ο ενεργός συντελεστής εντός του επιπέδου είναι το ίδιο στις δύο κάθετες διευθύνσεις, όπως είναι στην συμπεριφορά μιας συμβατικής κυψέλης. Οι παράμετροι του μοναδιαίου κελιού του πυρήνα της συμβατικής και της αυξητικής κυψέλης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Γεωμετρικές παράμετροι	Συμβατική Κυψέλη	Αυξητική Κυψέλη
Ύψος του τοιχώματος κελιού (mm)	4,23	8,46
Κεκλιμένο μήκος τοιχώματος κελιού (mm)	4,23	4,23
Πάχος του τοιχώματος κελιού	0,423	0,423
Γωνία κελιού (θ)	30	30
Συντελεστής αναλογίας κελιού (α)	1	2
Αναλογία πάχους προς μήκος	0,1	0,05

Πίνακας 2: Γεωμετρικοί παράμετροι συμβατικής και αυξητικής κυψέλης.

Οι συνολικές διαστάσεις μιας συμβατικής μονάδας κυψέλης δίνεται από τις σχέσεις:

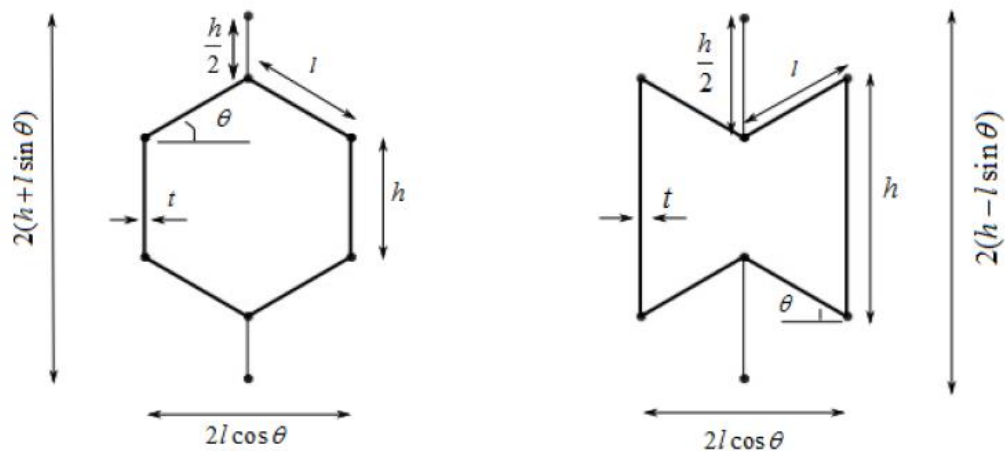
Το συνολικό πλάτος μονάδας κελιού: $L=2l \cos \theta$

Το συνολικό ύψος μονάδας κελιού: $H=2(h+l \sin \theta)$

Ενώ οι συνολικές διαστάσεις της αυξητικής μονάδας κελιού δίνονται από:

Το συνολικό πλάτος της μονάδας κελιού: $L=2l \cos \theta$

Το συνολικό ύψος μονάδας κελιού: $H=2(h-l \sin \theta)$



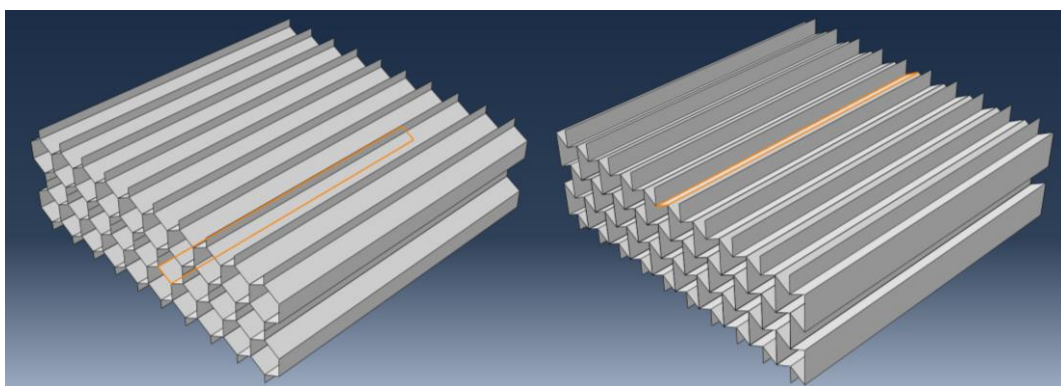
Σχήμα 22: Διαστάσεις συμβατικής και αυξητικής μονάδας κελιού.

4.2 Μοντέλο πάνελ τύπου σάντουιτς

Για την μοντελοποίηση του σύνθετου αλουμινένιου πάνελ τύπου σάντουιτς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Abaqus 6.13. Δημιουργήθηκε ένα σύνθετο μοντέλο τύπου σάντουιτς για τις δυο διαφορετικές επιλογές πυρήνα. Το εντός επιπέδου μοντέλο αναπαριστά ένα μοντέλο το οποίο δέχεται φόρτιση κατά μήκος της X1 ή της X2 διεύθυνσης.

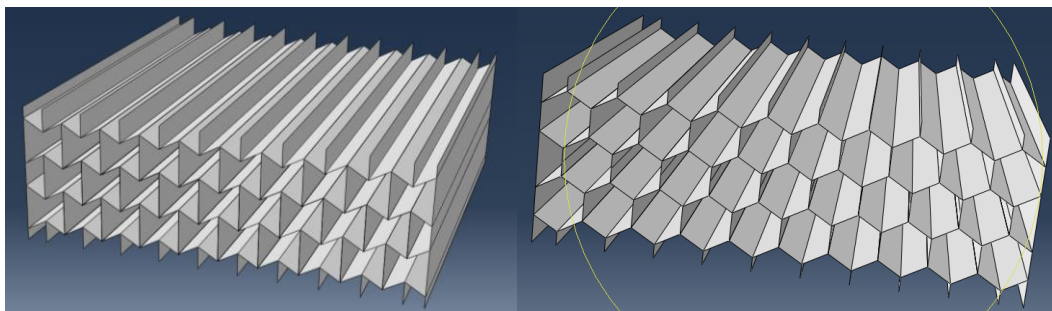
Εντός επιπέδου Μοντέλο

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε φόρτιση μόνο κατά μήκος της X1 και X2 διεύθυνσης. Ως εκ τούτου ο αριθμός των μονάδων κελιών κατά μήκος της X1 διεύθυνσης επιλέχθηκε να είναι 10 και κατά μήκος της X2 είναι 3. Σύμφωνα με τις διαστάσεις της μονάδας κελιού και των εξισώσεων που προαναφέρθηκαν, οι συνολικές διαστάσεις της κυψέλης είναι 73,20 στην X1 διεύθυνση και 25,38 στην X2 διεύθυνση. Το βασικό χαρακτηριστικό επιλέχθηκε να είναι παραμορφώσιμο κέλυφος με σκοπό να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Η κρίσιμη σημασίας διαμόρφωση της κυψέλης όσον αφορά το υλικό και το πάχος έγινε στο βήμα της ανάθεσης τμήματος (section assignment). Το Σχήμα 23 απεικονίζει τον συμβατικό και τον αυξητικό πυρήνα κυψέλης.

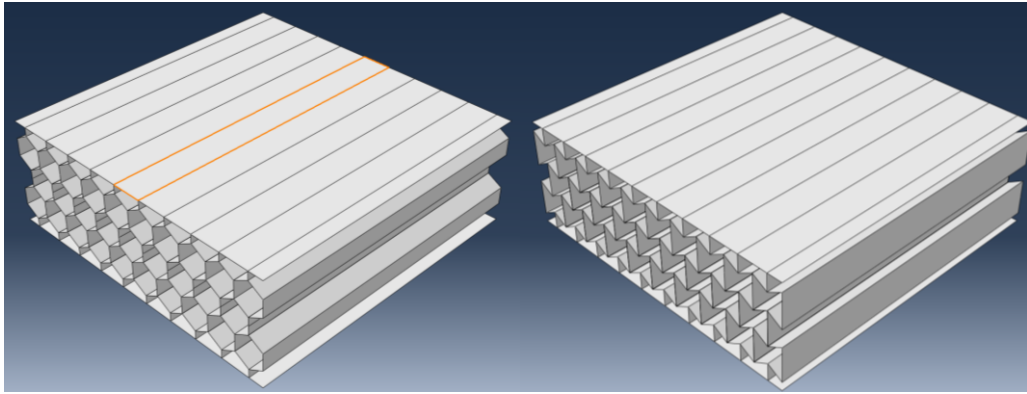


Σχήμα 23: Συνολικές διαστάσεις συμβατικού και αυξητικού πυρήνα για εντός επιπέδου μοντέλο

Για την φόρτιση στην X1 διεύθυνση δημιουργήθηκε ένα μετωπικό φύλο με διαστάσεις 73,27mm στο μήκος και 25,38mm στο πλάτος. Για την εντός επιπέδου φόρτιση στην X2 διεύθυνση, οι διαστάσεις του μετωπικού φύλλου είναι 73,27mm στο μήκος και 73,21mm στο πλάτος. Ο τύπος κελυφός επιλέχθηκε για τα επιφανειακά φύλλα και ως υλικό προσδιορίστηκε το αλουμίνιο. Ο κυψελοειδής πυρήνας εσωκλείστηκε μεταξύ των μετωπικών φύλλων. Στο Σχήμα 24 και Σχήμα 25 βλέπουμε τις πλήρως συναρμολογημένες σύνθετες πλάκες σάντουιτς.



Σχήμα 24: Απεικόνιση πλήρως συναρμολογημένης σύνθετης πλάκας τύπου σάντουιτς για εντός επιπέδου μοντέλο (Φόρτιση στην X1 διεύθυνση)



Σχήμα 25: Απεικόνιση πλήρως συναρμολογημένης σύνθετης πλάκας τύπου σάντουιτς για εντός επιπέδου μοντέλο (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση)

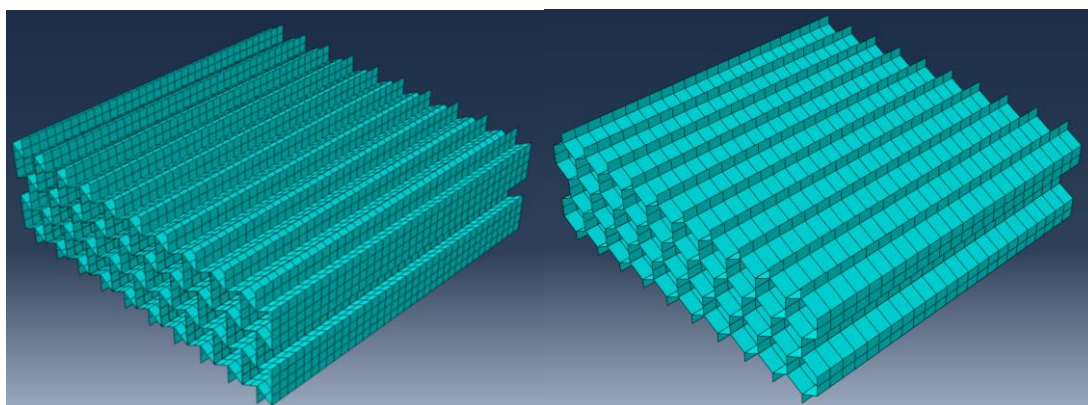
Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για εντός επιπέδου φόρτιση

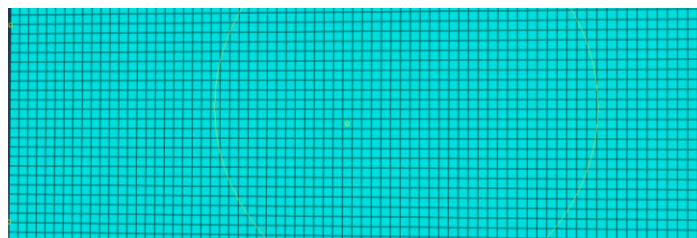
Μετά την δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου για την εντός επιπέδου φόρτιση, το μοντέλο καθορίστηκε και διακριτοποιήθηκε για την ανάλυση φόρτισης που θα προσομοιωθεί στο λογισμικό Abaqus. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι λεπτομέρειες των βημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη των μοντέλων για την στατική, μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

5.2 Διακριτοποίηση

Για το προαναφερθέν εντός επιπέδου μοντέλο φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν S4R τα οποία αναπαρίστανται από στοιχεία 4 κόμβων τύπου κελύφους τόσο στον πυρήνα της κυψέλης όσο και στα μετωπικά φύλλα. Ο κάθε κόμβος στοιχείου έχει 3 μεταφορικούς και 3 περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Το σχετικό ολικό μέγεθος στοιχείου είναι 1 mm. Το Σχήμα 26 (α) και Σχήμα 26 (β) παρουσιάζει τον πλεγματοποιημένο πυρήνα και μετωπικά φύλλα για τα δύο μοντέλα.



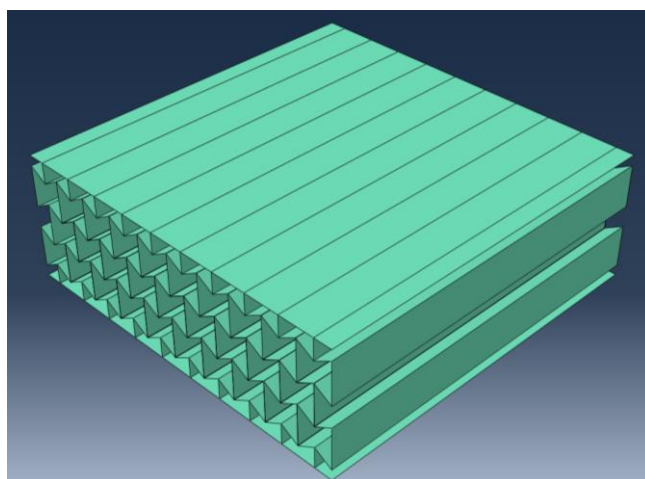
Σχήμα 26 (α): Πλεγματοποιημένος συμβατικός και Αυξητικός πυρήνας για το εντός επιπέδου μοντέλο.



Σχήμα 26 (β): Πλεγματοποιημένο μετωπικό φύλλο για εντός επιπέδου μοντέλο.

5.3 Περιορισμοί

Μετά την διαδικασία της συναρμολόγησης, τα επιμέρους κομμάτια (πυρήνας και τα δύο επιφανειακά φύλλα) συναρμολογούνται μαζί για να αποτελέσουν ένα μεμονωμένο κομμάτι. Περιορισμοί βασισμένοι στις επιφάνειες χρησιμοποιούνται για τα δυο μετωπικά φύλλα και τον πυρήνα του κάθε μοντέλου. Γενικά, η επιφάνεια με την μεγαλύτερη δυσκαμψία αποφασίστηκε να είναι η κύρια επιφάνεια. Οι περιορισμοί δένουν τον πυρήνα ως δευτερεύουσα επιφάνεια και τα μετωπικά φύλλα ως κύριες επιφάνειες. Η κύρια επιφάνεια έχει κοινή κίνηση περιορίζοντας κάθε κόμβο στην δευτερεύουσα επιφάνεια. Το Σχήμα 27 απεικονίζει τα μετωπικά φύλλα ως κύριες επιφάνειες συνδέονται στους δευτερεύοντες κόμβους του πυρήνα και από τις δύο πλευρές.



Σχήμα 27: Σύνδεση πυρήνα με μετωπικά φύλλα για εντός επιπέδου μοντέλο.

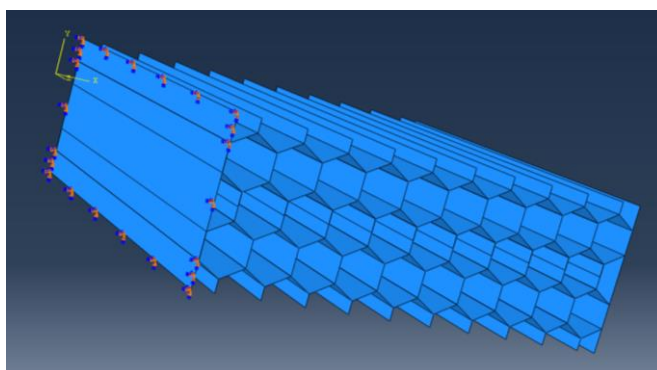
5.4 Συνοριακές συνθήκες και Φορτίσεις

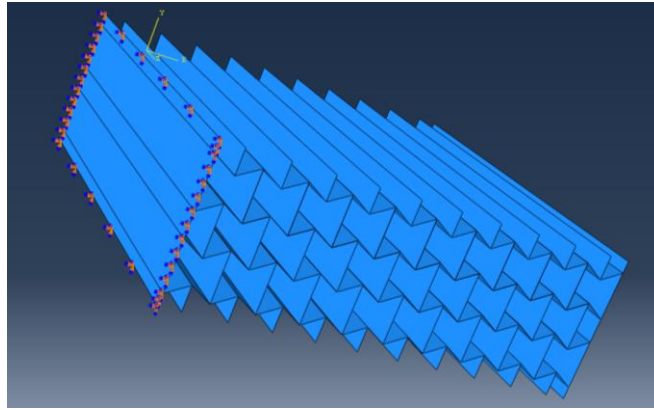
Για τα εντός επιπέδου μοντέλα, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί φορτίσεων και περιορισμών όσον αφορά τους 6 βαθμούς ελευθερίας (U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3).

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1

➤ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Σε αυτήν την περίπτωση οι άκρες του πίσω μετωπικού φύλλου της σύνθετης κατασκευής περιορίζονται στους 6 βαθμούς ελευθερίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.

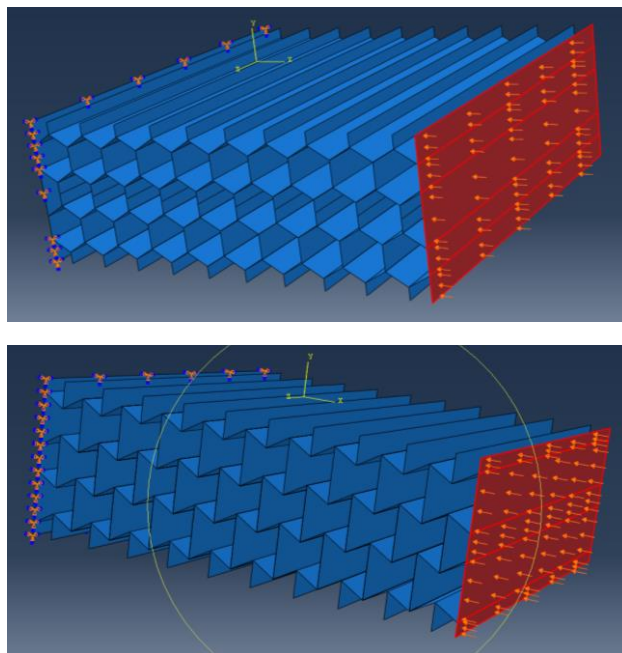




Σχήμα 28: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εντός επιπέδου μοντέλο για συμβατική και αυξητική δομή (Φόρτιση στην X1 διεύθυνση).

➤ ΦΟΡΤΙΣΗ

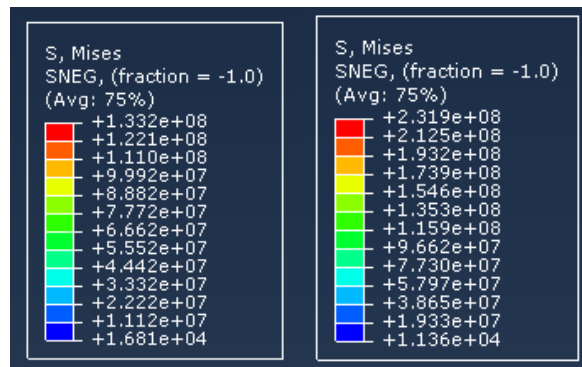
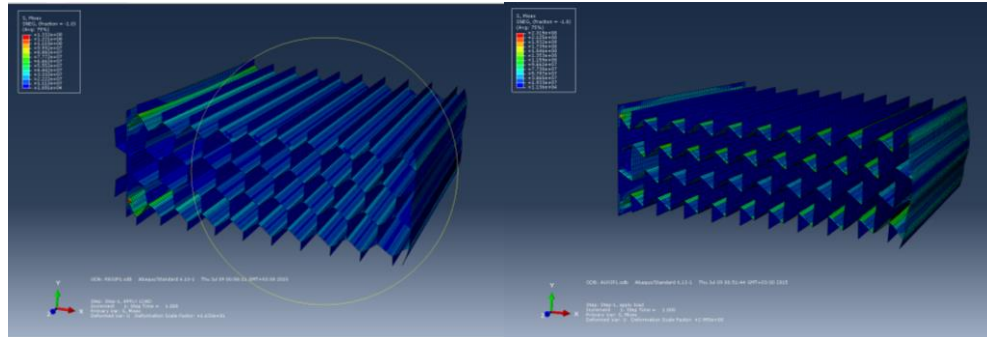
Στην παρούσα περίπτωση έχουμε φόρτιση με μέτρο 10KN υπό μορφή πίεσης στην επιφάνειά του μπροστινού μετωπικού φύλλου, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα.



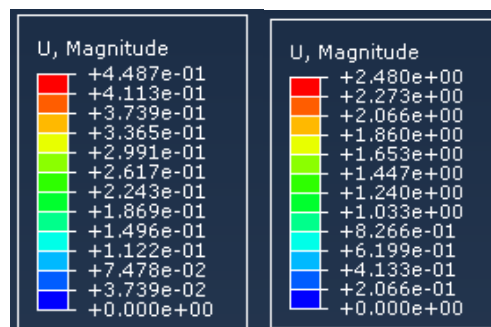
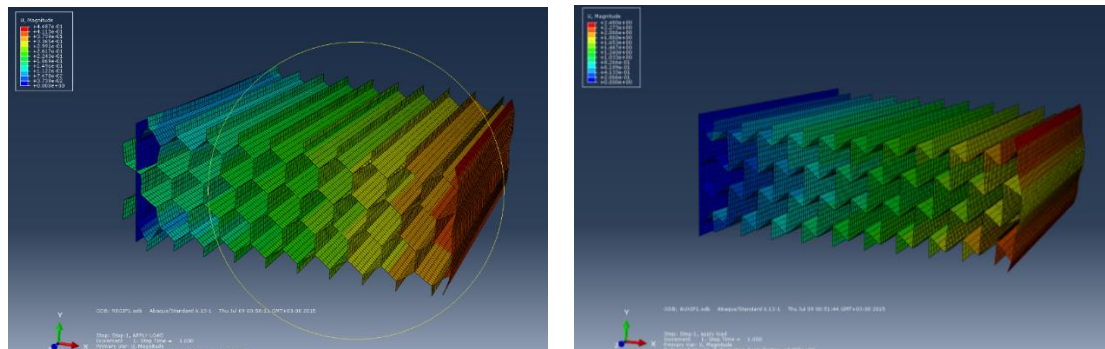
Σχήμα 29: Θλιπτική φόρτιση που επιβάλλεται στο εντός επιπέδου μοντέλο για συμβατική και αυξητική δομή (Φόρτιση στην X1 διεύθυνση).

➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

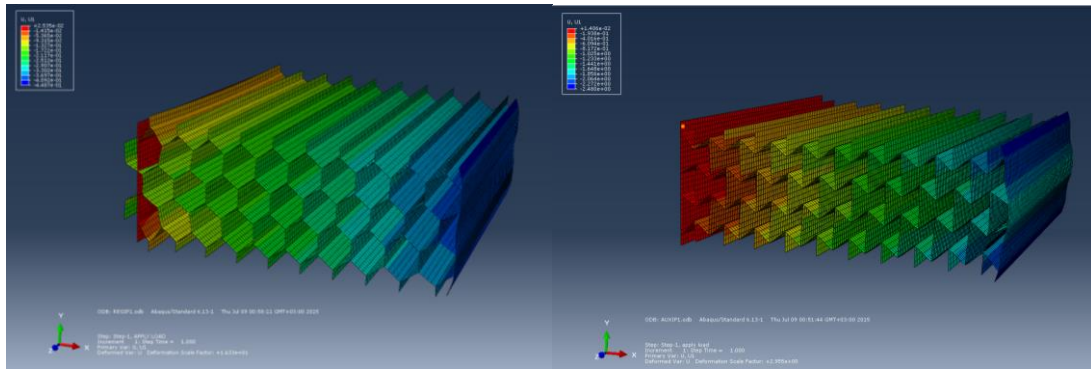
Από το Visualisation Module μπορούμε να επιβλέψουμε τα αποτελέσματα και συγκεκριμένα την κατανομή των τάσεων von Mises όπως και την παραμόρφωση, με τους αντίστοιχους χρωματισμούς, πάνω στο μοντέλο καθώς και την έγχρωμη κλίμακα όπου φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



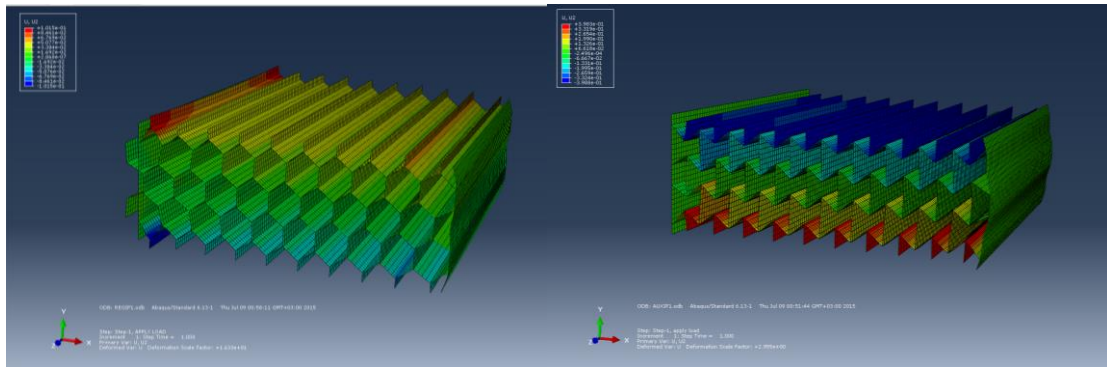
Σχήμα 30: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με συμβατική όσο και για αυξητική κυψέλη.



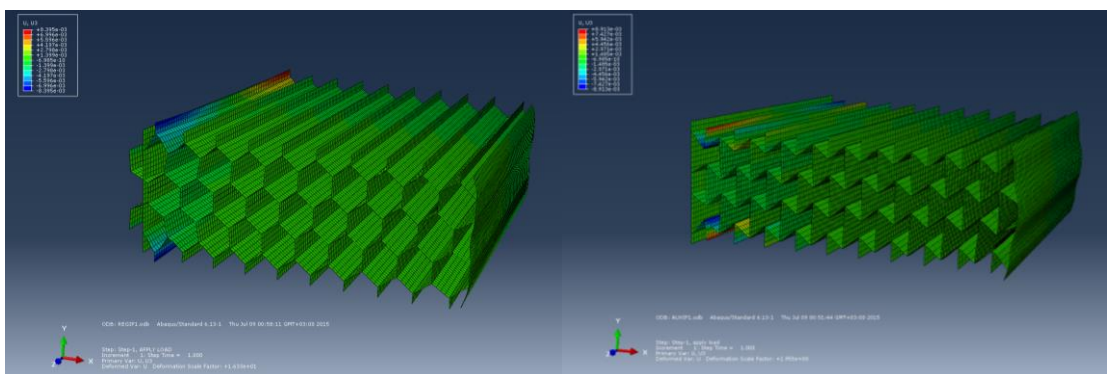
Σχήμα 31: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη.



Σχήμα 32: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον X-άξονα.



Σχήμα 33: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον Y-άξονα.

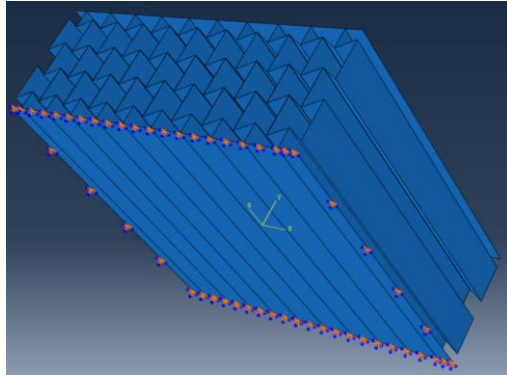


Σχήμα 34: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον Z-άξονα.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2

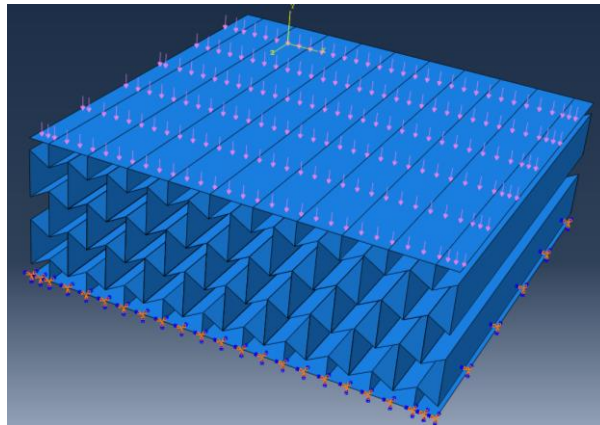
➤ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Σε αυτήν την περίπτωση οι άκρες του κάτω μετωπικού φύλλου της σύνθετης κατασκευής περιορίζονται στους 6 βαθμούς ελευθερίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



➤ ΦΟΡΤΙΣΗ

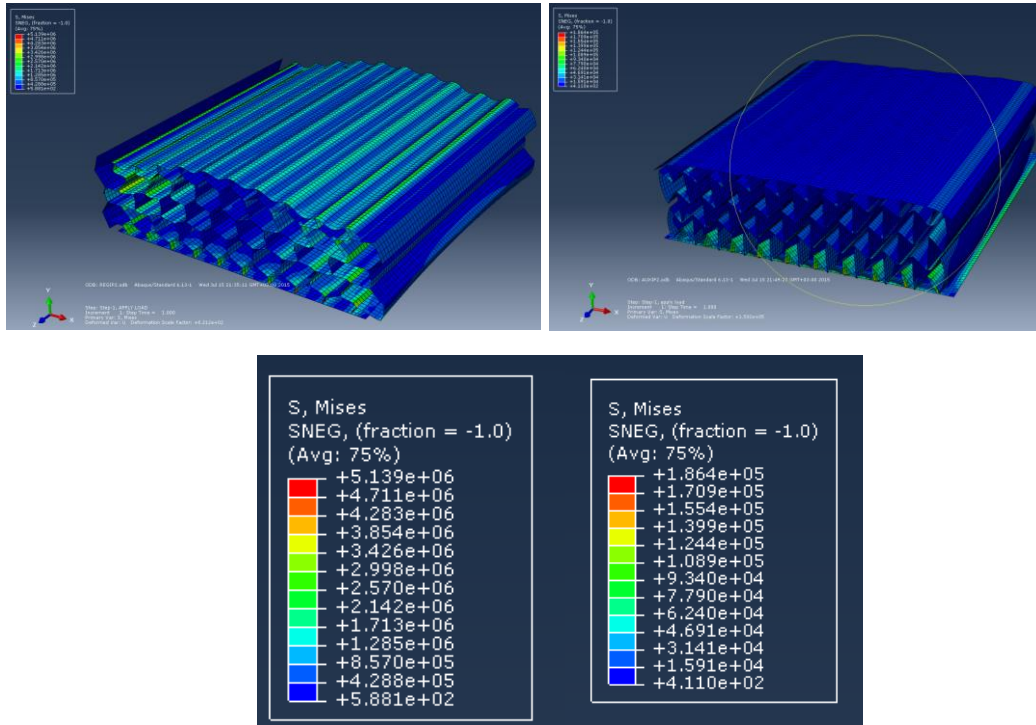
Στην παρούσα περίπτωση έχουμε φόρτιση με μέτρο 1 KN υπό μορφή πίεσης στην επιφάνειά του μπροστινού μετωπικού φύλλου, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα.



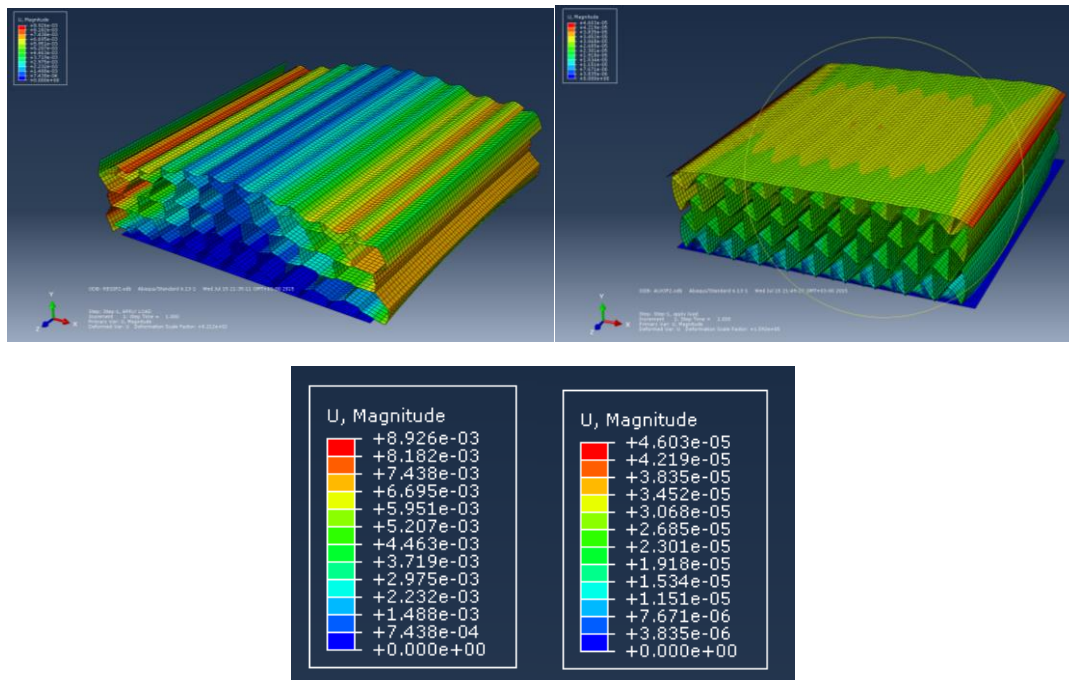
Σχήμα 35 : Θλιπτική φόρτιση που επιβάλλεται στο εντός επιπέδου μοντέλο για συμβατική και αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

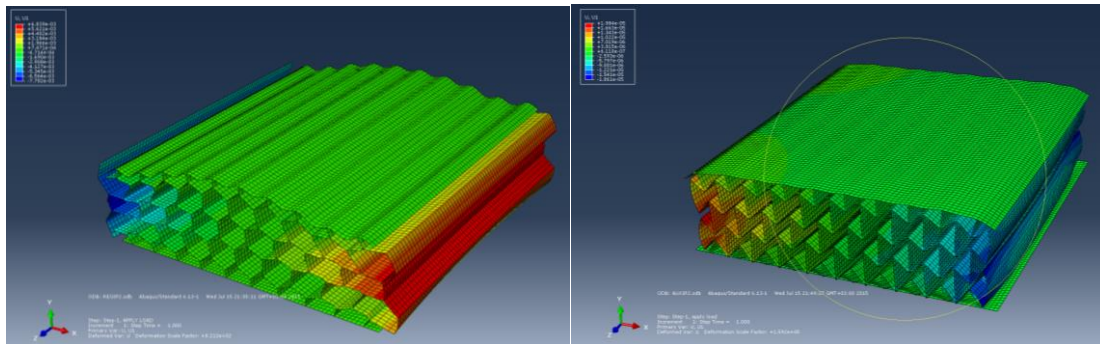
Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με συμβατική όσο και για αυξητική κυψέλη.



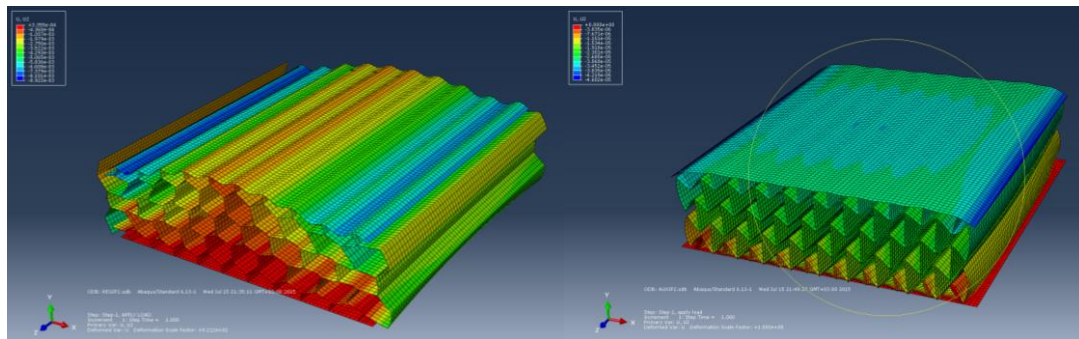
Σχήμα 36: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με συμβατική όσο και για αυξητική κυψέλη.



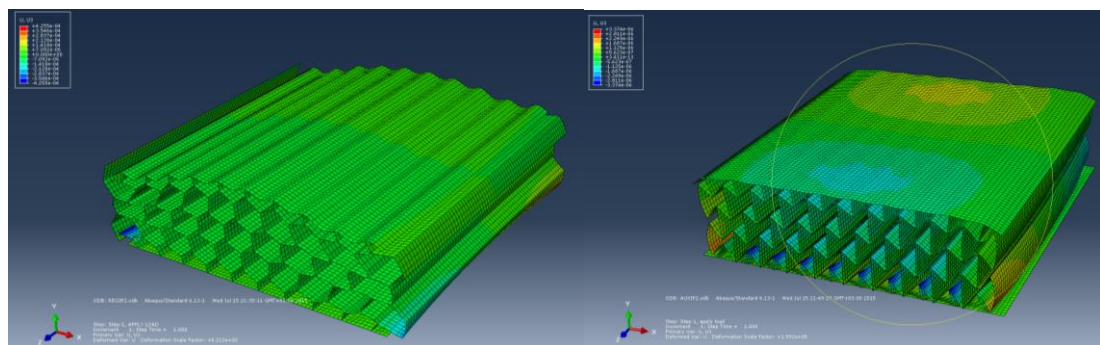
Σχήμα 37: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη.



Σχήμα 38: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον X-άξονα.



Σχήμα 39: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον Y-άξονα.

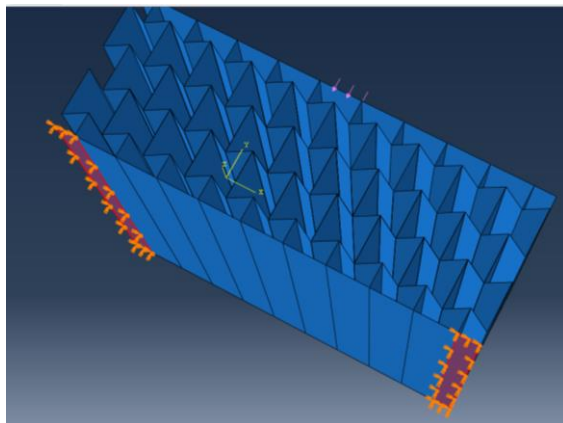


Σχήμα 40: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον Z-άξονα.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3

➤ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

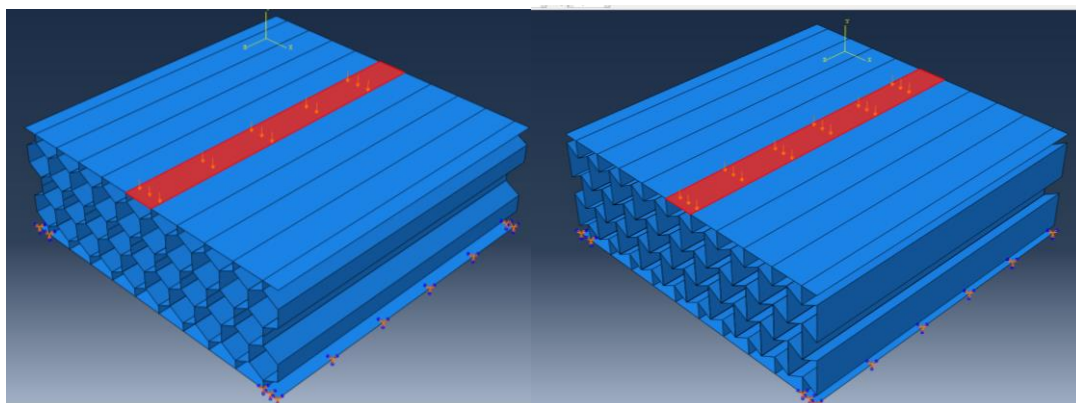
Σε αυτήν την περίπτωση οι δύο απέναντι άκρες του κάτω μετωπικού φύλλου της σύνθετης κατασκευής περιορίζονται στους 6 βαθμούς ελευθερίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 41: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εντός επιπέδου μοντέλο για συμβατική και αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΦΟΡΤΙΣΗ

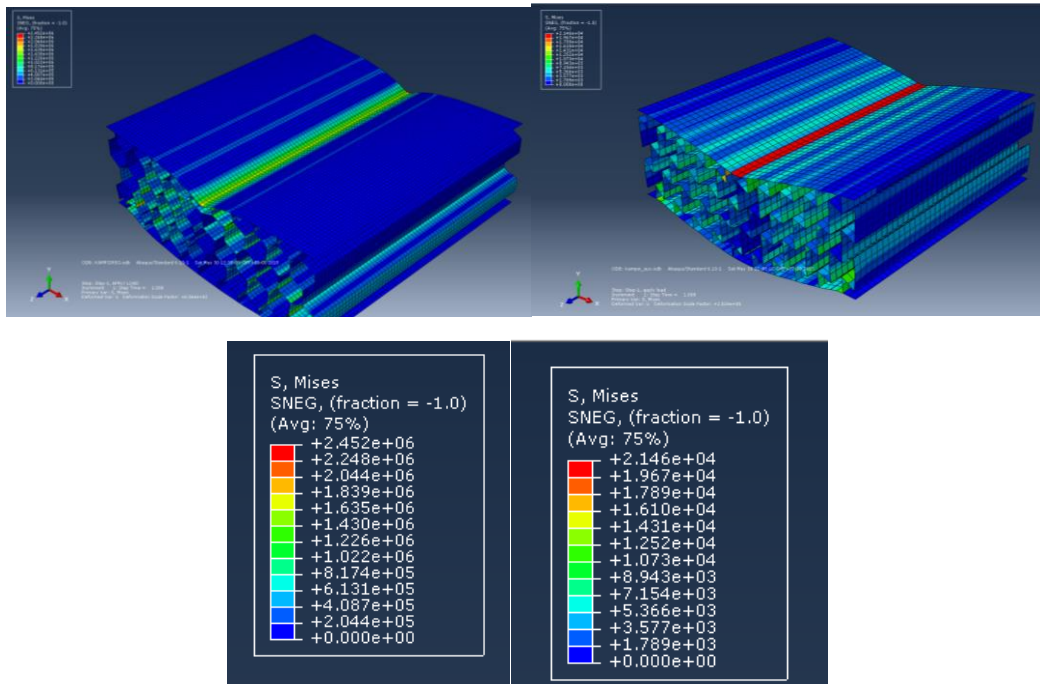
Στην παρούσα περίπτωση έχουμε καμπτική φόρτιση με μέτρο 1 KN υπό μορφή πίεσης στο κέντρο της επιφάνειάς του μπροστινού μετωπικού φύλλου, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα.



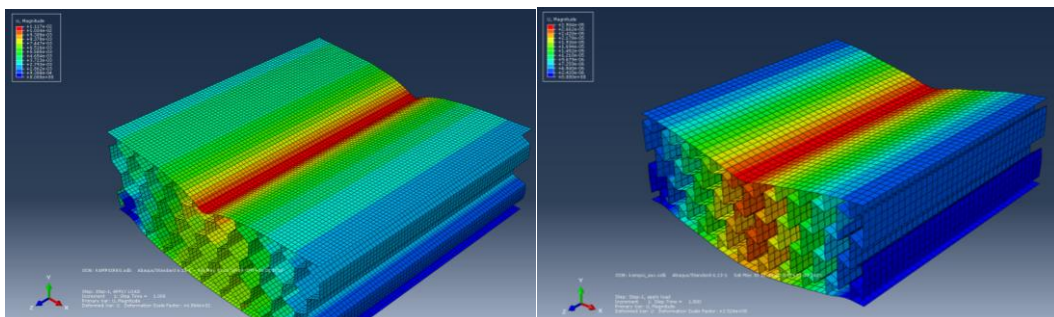
Σχήμα 42 : Καμπτική φόρτιση που επιβάλλεται στο εντός επιπέδου μοντέλο για συμβατική και αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

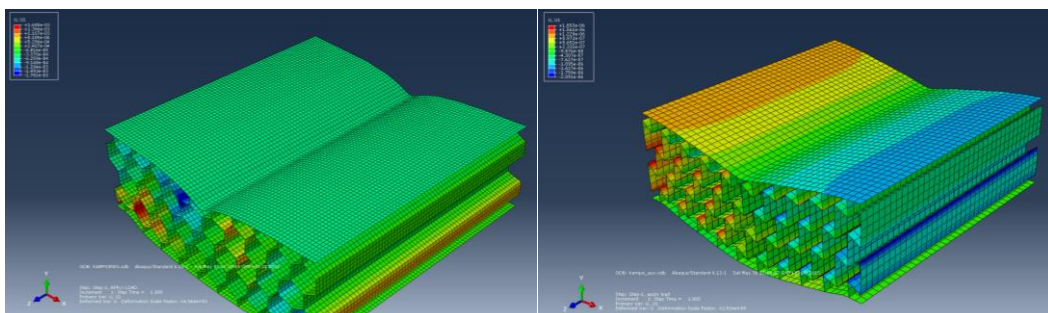
Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με συμβατική όσο και για αυξητική κυψέλη.



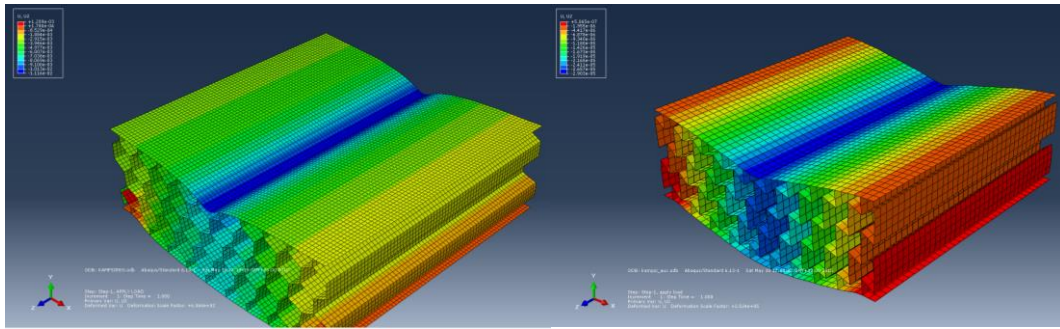
Σχήμα 43: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με συμβατική όσο και για αυξητική κυψέλη.



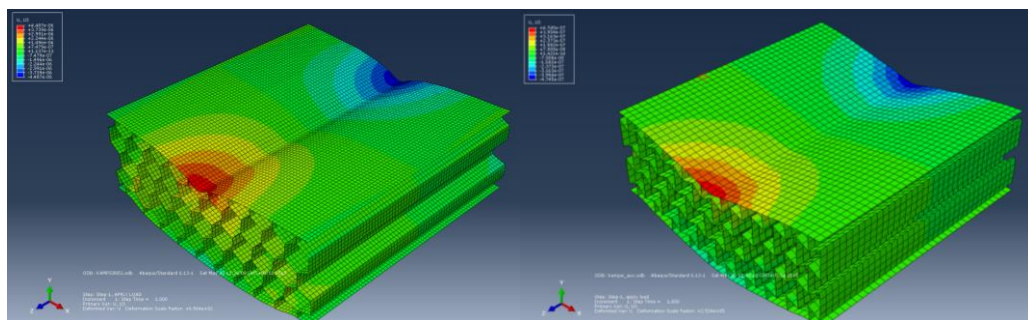
Σχήμα 44: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη.



Σχήμα 45: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον X-άξονα.



Σχήμα 46: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον Y-άξονα.



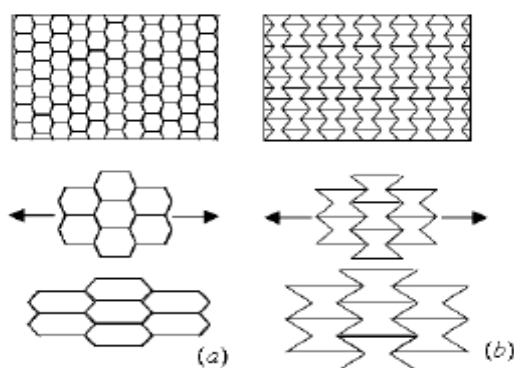
Σχήμα 47: Συνολικές παραμορφώσεις για συμβατική και αυξητική κυψέλη κατά τον Z-άξονα.

Θεωρητικός υπολογισμός λόγου Poisson για συμβατική και αυξητική δομή

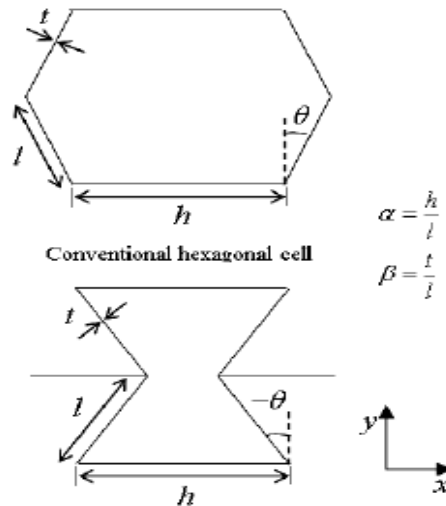
6.1 Θεωρητικό μοντέλο

Όταν μια κυψέλη φορτίζεται είτε στην X1 είτε στην X2 διεύθυνση, παραμορφώνεται με έναν γραμμικό ελαστικό τρόπο, τα τοιχώματα των κελιών κάμπτονται (Patel and Finnie, 1970; Abd El-Sayed, 1976; Abd El Sayed et al., 1979; Gibson et al., 1982; Warren and Kraynik, 1987). Η απόκριση περιγράφεται από πέντε συντελεστές: δύο συντελεστές Young E_1^* και E_2^* , ένα μέτρο διάτμησης G_{12}^* και δύο λόγους Poisson ν_{12}^* και ν_{21}^* .

Για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις πυρήνα κυψέλης, την συμβατική εξαγωνική κυψέλη με θετικό λόγο Poisson και την αυξητική κυψέλη με αρνητικό λόγο Poisson, σύμφωνα με την κυτταρική θεωρία υλικών (Gibson L.J., Ashby M.F., 1997) οι μηχανικές ιδιότητες της κυψελοειδούς δομής μπορούν να καθοριστούν από τις γεωμετρικές ιδιότητες της μονάδας κελιού και την μηχανική συμπεριφορά του υλικού της κυψέλης. Μονάδες κελιού για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάζουμε απεικονίζονται στο Σχήμα 49, όπου l είναι το μήκος της κεκλιμένης πλευράς του κελιού, h είναι το μήκος της οριζόντιας πλευράς κελιού, θ είναι η κεκλιμένη γωνιά, τα α και β καθορίζουν το σχετικό μήκος τοιχώματος κελιού και τον λόγο λεπτότητας. Οι προαναφερθείσες παράμετροι είναι σημαντικές όσον αφορά τις ιδιότητες κυψέλης. Οι σχέσεις που υιοθετούνται για τον θεωρητικό υπολογισμό ιδιοτήτων υλικού πυρήνα κυψέλης αναφέρονται στην συνέχεια.



Σχήμα 48: Πυρήνας κυψέλης σε πλάκα τύπου σάντουιτς (α) Μοντέλο συμβατικής εξαγωνικής κυψέλης (β) Μοντέλο αυξητικής εξαγωνικής κυψέλης.



Σχήμα 49: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κελιού του πυρήνα κυψέλης.

$$E_x^c = E \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{\cos \theta}{(h/l + \sin \theta) \sin^2 \theta} \quad (15)$$

$$E_y^c = E \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)}{\cos^3 \theta} \quad (16)$$

$$\nu_{xy}^c = \frac{\cos^2 \theta}{(h/l + \sin \theta) \sin \theta} \quad (17)$$

$$G_{xy}^c = E \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)}{(h/l)^2 (1 + 2h/l) \cos \theta} \quad (18)$$

$$G_{xz}^c = G \left(\frac{t}{l} \right) \frac{\cos \theta}{h/l + \sin \theta} \quad (19)$$

οπου το σύμβολο 'c' αντιπροσωπεύει το υλικό του πυρήνα, το E, το G και το ν είναι ο συντελεστής Young, ο συντελεστής διάτμησης και η πυκνότητα μάζας του υλικού. Βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις πυρήνα, στον πίνακα 3 υπολογίζουμε την θεωρητική τιμή του λόγου Poisson για την κάθε περίπτωση.

THEORITICAL CALCULATION OF POISSON RATIO											
DESIGN	H(mm)	L(mm)	Θ(RAD)	t _v	t _R	V ₁₂	V ₂₁	α	E(Gpa)	G(Gpa)	θ(DEG)
AUXETIC	8,46	4,23	-0,52	1	1	-1	-1	2	68,97	26	-30
CONVENTIONAL	4,23	4,23	0,524	1	1	1	1	1	68,97	26	30

Πίνακας 3: Υπολογισμός λόγου Poisson βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κελιού κυψέλης.

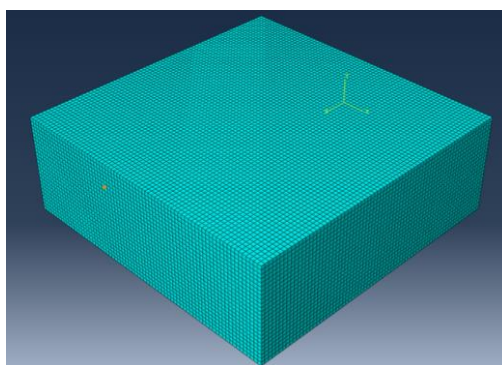
Δημιουργήθηκε λοιπόν ένα μοντέλο στο οποίο δόθηκαν οι ιδιότητες που προκύπτουν βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών για τις δυο διαφορετικές επιλογές πυρήνα. Στην συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση του θεωρητικού μοντέλου εν συγκρίσει με το μοντέλο που προσομοιώσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το εντός επιπέδου μοντέλο αναπαριστά ένα μοντέλο το οποίο δέχεται φόρτιση κατά μήκος της X1 ή της X2 διεύθυνσης.

6.2 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για εντός επιπέδου φόρτιση

Σύμφωνα με τις διαστάσεις της μονάδας κελιού και των εξισώσεων που προαναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4, οι συνολικές διαστάσεις της κυψέλης είναι 73,20 στην X1 διεύθυνση και 25,38 στην X2 διεύθυνση και 73,27 στην X3 διεύθυνση. Δίνουμε λοιπόν τις παραπάνω διαστάσεις στο δοκίμιο μας. Στην συνέχεια ορίζουμε τις υπολογισμένες ιδιότητες του υλικού που προκύπτουν για την κάθε γεωμετρία. Θα επικεντρωθούμε στην περίπτωση του αυξητικού πυρήνα κυψέλης καθώς στην περίπτωση του συμβατικού πυρήνα το θεωρητικό μοντέλο μας δίνει τιμή για τον λόγο Poisson εκτός των αποδεκτών ορίων. Μετά την δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου για την εντός επιπέδου φόρτιση, το μοντέλο καθορίστηκε και διακριτοποιήθηκε για την ανάλυση φόρτισης που θα προσομοιωθεί στο λογισμικό Abaqus.

6.3 Διακριτοποίηση

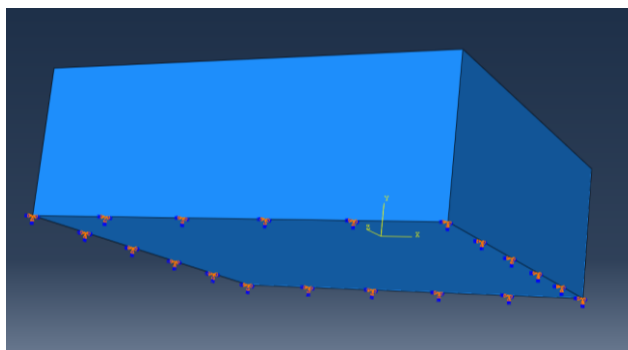
Για το προαναφερθέν εντός επιπέδου μοντέλο φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν HEX στοιχεία τα οποία αναπαρίστανται από εξάεδρα στοιχεία. Ο κάθε κόμβος στοιχείου έχει 3 μεταφορικούς και 3 περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας.



6.4 Συνοριακές συνθήκες και Φορτίσεις

➤ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

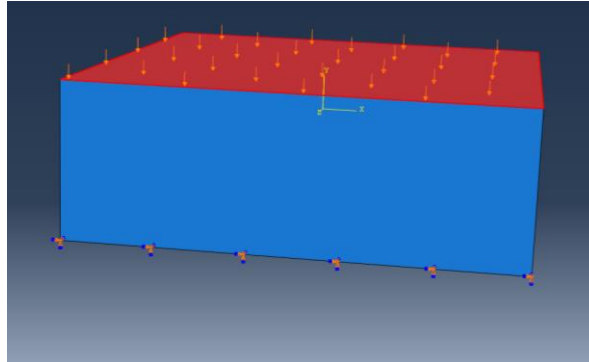
Σε αυτήν την περίπτωση οι άκρες του κάτω μετωπικού φύλλου της κατασκευής περιορίζονται στους 6 βαθμούς ελευθερίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 50: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εντός επιπέδου μοντέλο για αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΦΟΡΤΙΣΗ

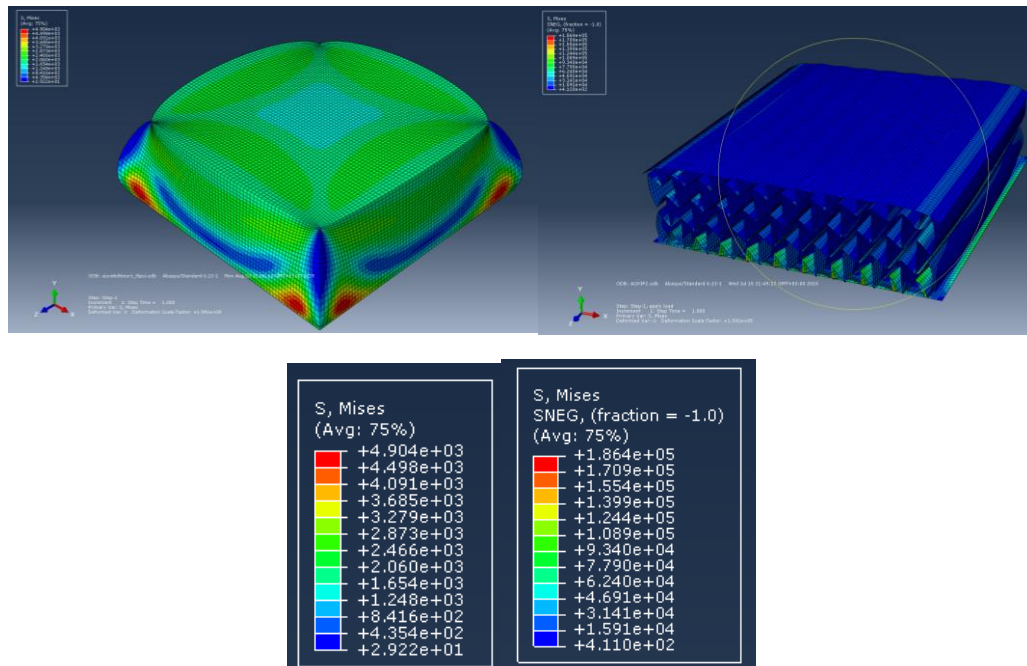
Στην παρούσα περίπτωση έχουμε φόρτιση με μέτρο 1 KN υπό μορφή πίεσης στην επιφάνειά του μπροστινού μετωπικού φύλλου, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα.



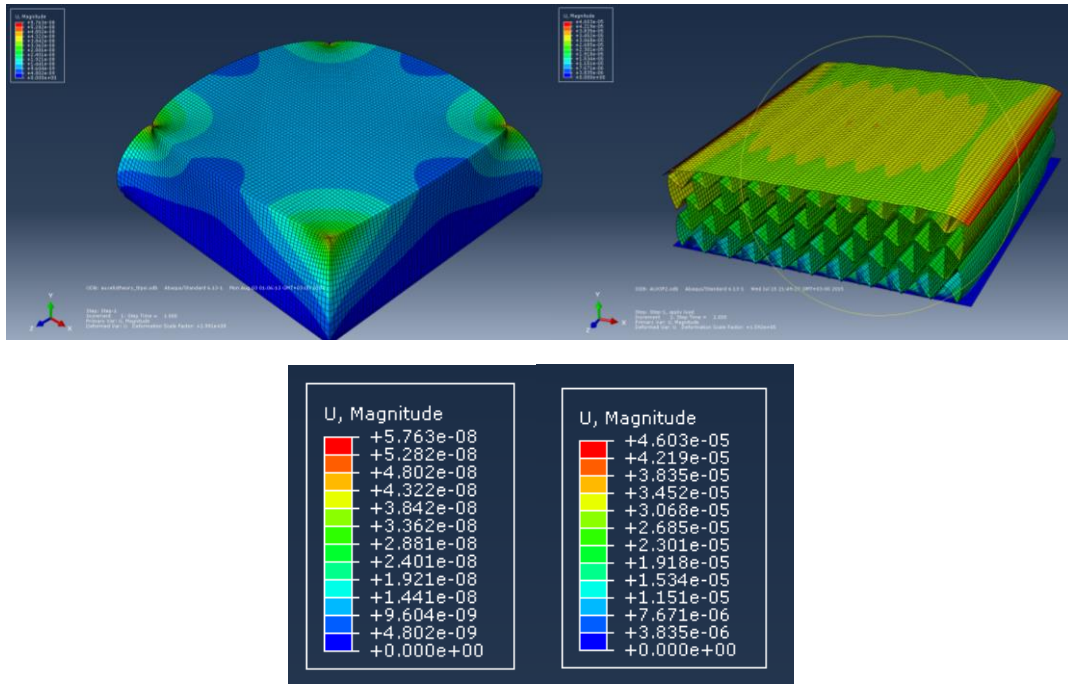
Σχήμα 51 : Θλιπτική φόρτιση που επιβάλλεται στο εντός επιπέδου μοντέλο για αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΜΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

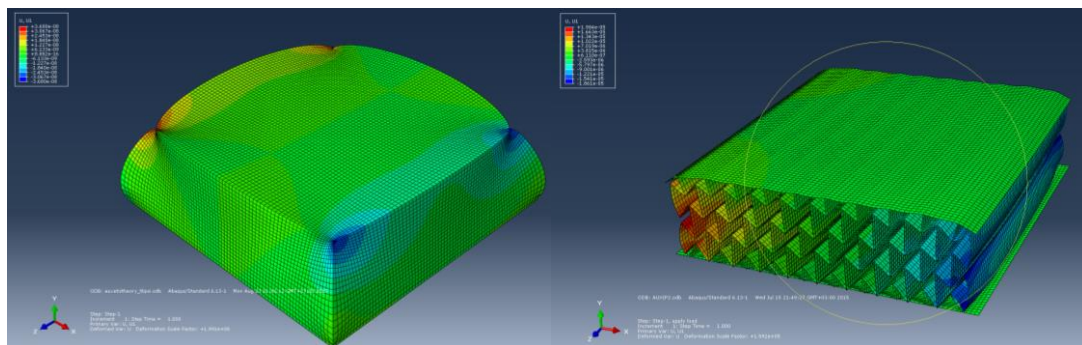
Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για πυρήνα με αυξητική κυψέλη.



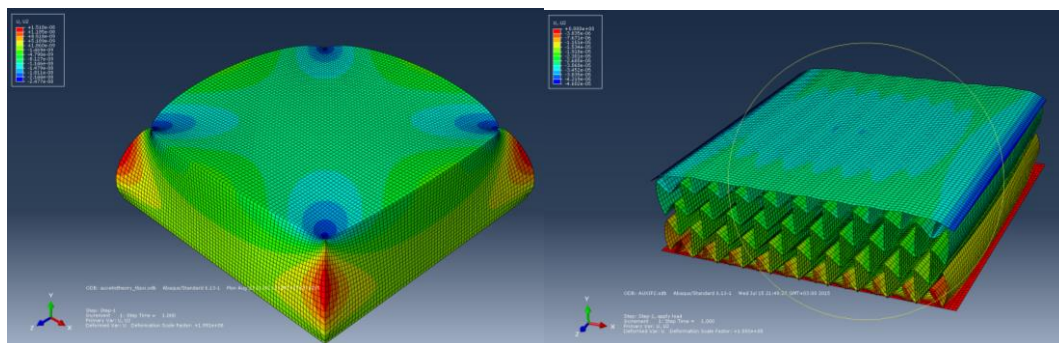
Σχήμα 52: Ισοδύναμη τάση κατά Von Mises για αυξητική κυψέλη.



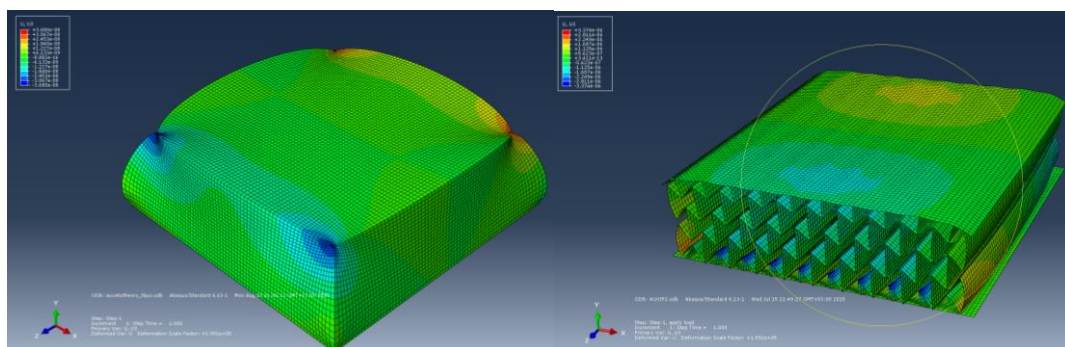
Σχήμα 53: Συνολικές παραμορφώσεις για αυξητική κυψέλη.



Σχήμα 54: Συνολικές παραμορφώσεις για αυξητική κυψέλη κατά τον X-άξονα.



Σχήμα 55: Συνολικές παραμορφώσεις για αυξητική κυψέλη κατά τον Y-άξονα.



Σχήμα 56: Συνολικές παραμορφώσεις για αυξητική κυψέλη κατά τον Z-άξονα.

Δυναμική ανάλυση

7.1 Εισαγωγή

Η σταθερής κατάστασης δυναμική ανάλυση μας παρέχει ένα σταθερής κατάστασης εύρος καθώς και την φάση της απόκρισης ενός συστήματος εξαιτίας μιας αρμονικής διέγερσης σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Συνήθως, αυτού του είδους η ανάλυση γίνεται ως μια εναλλαγή συχνοτήτων εφαρμόζοντας την φόρτιση σε μια σειρά διαφορετικών συχνοτήτων και καταγράφοντας την απόκριση.

Σε μια βασισμένη στις ιδιομορφές δυναμική ανάλυση σταθερής κατάστασης η απόκριση βασίζεται σε τεχνικές υπέρθεσης ιδιομορφών, επομένως πρέπει πρώτα να εξαχθούν οι ιδιομορφές του συστήματος χρησιμοποιώντας την διαδικασία εξαγωγής ιδιομορφών. Ο αριθμός των ιδιομορφών που θα εξαχθούν πρέπει να είναι επαρκής έτσι ώστε να είναι δυνατή η επαρκής μοντελοποίηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος.

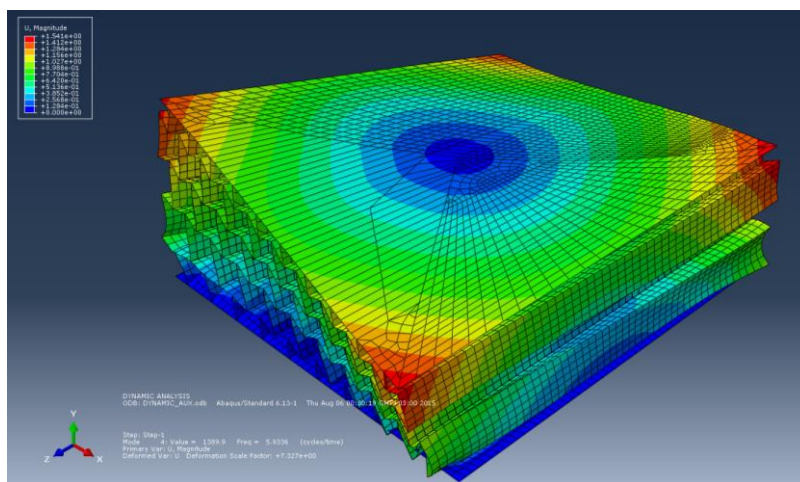
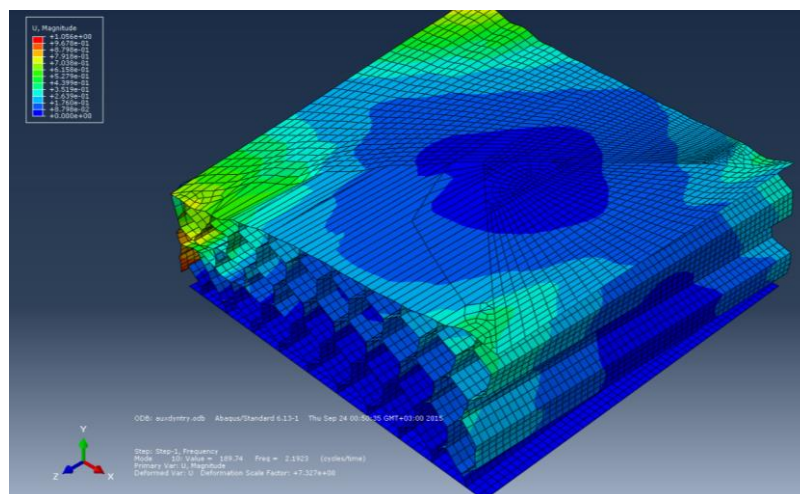
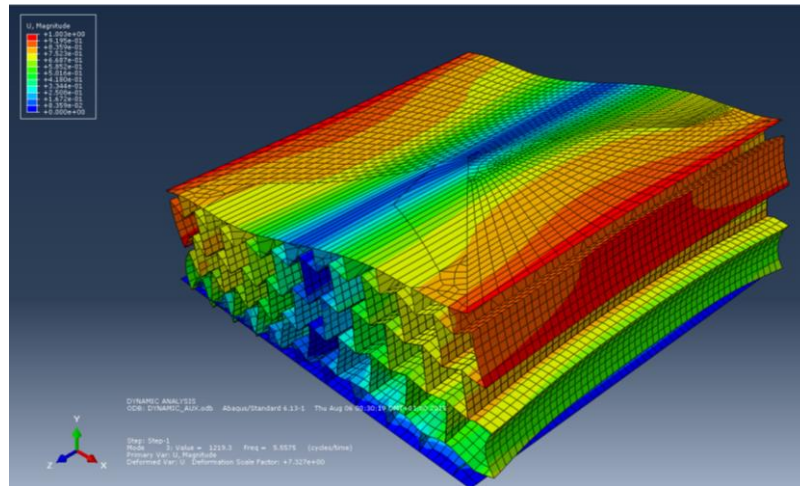
Στον καθορισμό ενός σταθερής κατάστασης δυναμικού βήματος το οποίο βασίζεται σε ιδιομορφές, προσδιορίζουμε τα εύρη συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν και τον αριθμό συχνοτήτων στις οποίες ζητούνται αποτελέσματα σε κάθε εύρος (συμπεριλαμβανομένων των ακραίων συχνοτήτων του εύρους). Επιπλέον, μπορούμε να καθορίσουμε τον τύπο διαμοιρασμού των συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθεί (γραμμικός ή λογαριθμικός), ως προεπιλογή χρησιμοποιείται ο λογαριθμικός. Οι συχνότητες δίνονται σε κύκλους/χρόνο.

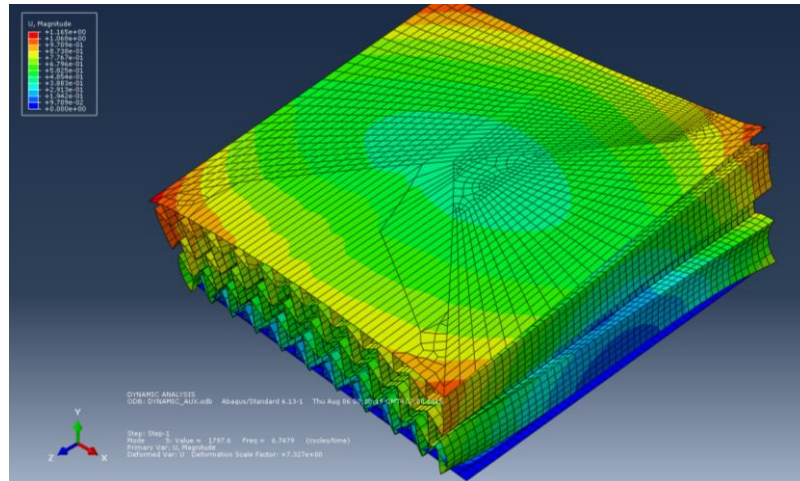
7.2 Μελέτη Περιπτώσεων

Οι δύο υπό μελέτη δομές (Συμβατική και Αυξητική) υπόκεινται σε δυναμική διέγερση. Ως προκαταρκτική ανάλυση διενεργείται ανάλυση δονήσεων με σκοπό την ανάκτηση δεκαπέντε ιδιομορφών και των φυσικών συχνοτήτων τους. Αναλυτικότερα τα βήματα που ακολουθούνται καθώς και οι παράμετροι της ανάλυσης περιγράφονται παρακάτω.

Βήμα 1: Εξαγωγή ιδιομορφών συστήματος

Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών ιδιομορφών που εξάχθηκαν για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες.





Βήμα 2: Modal dynamics

Στο δεύτερο βήμα της δυναμικής ανάλυσης εφαρμόζουμε τόσο στο συμβατικό όσο και στο αυξητικό μοντέλο δύναμη υπό μορφή παλμού όπως περιγράφεται παρακάτω.

Χρονική περίοδος: 0.05

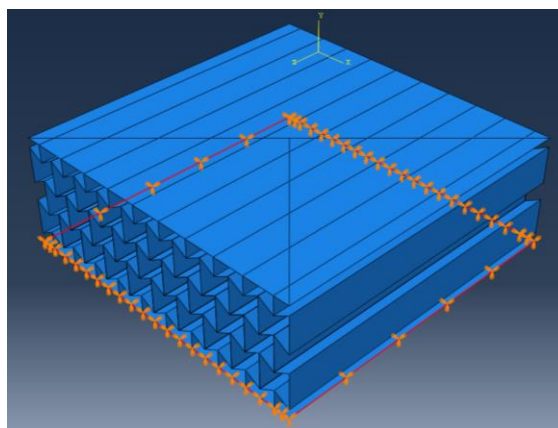
Χρονικό βήμα: 0.0004

Δηλαδή έχουμε στην διάθεση μας 125 data points.

Damping	start mode-end mode-critical damping fraction
1	-2- 0.06

➤ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Σε αυτήν την περίπτωση οι άκρες του κάτω μετωπικού φύλλου της κατασκευής περιορίζονται στους 6 βαθμούς ελευθερίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



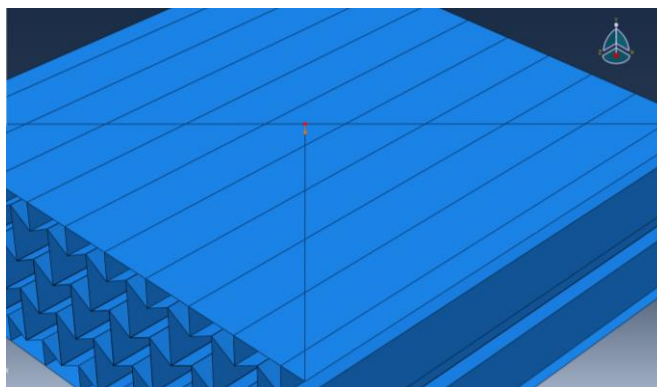
Σχήμα 57: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εντός επιπέδου μοντέλο για αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στην παρούσα περίπτωση έχουμε σημειακή φόρτιση στο κέντρο της επιφάνειάς του μπροστινού μετωπικού φύλλου, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα. Για το παρόν βήμα της ανάλυσης Modal Dynamics έχουμε δύναμη υπό μορφή παλμού που περιγράφεται από τον ακόλουθο πίνακα 4.

ΧΡΟΝΟΣ	ΔΥΝΑΜΗ
0	0
0,001	333
0,003	333
0,004	0

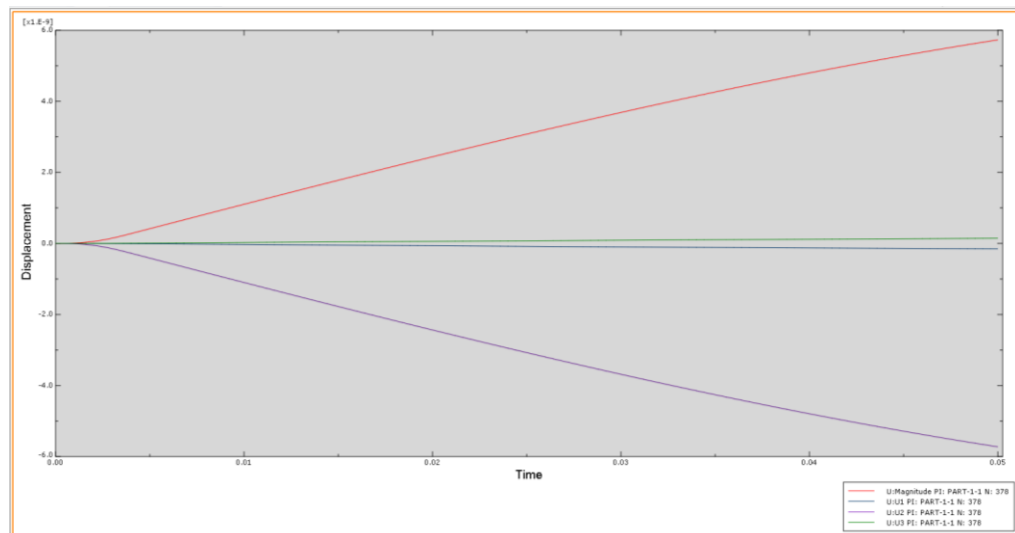
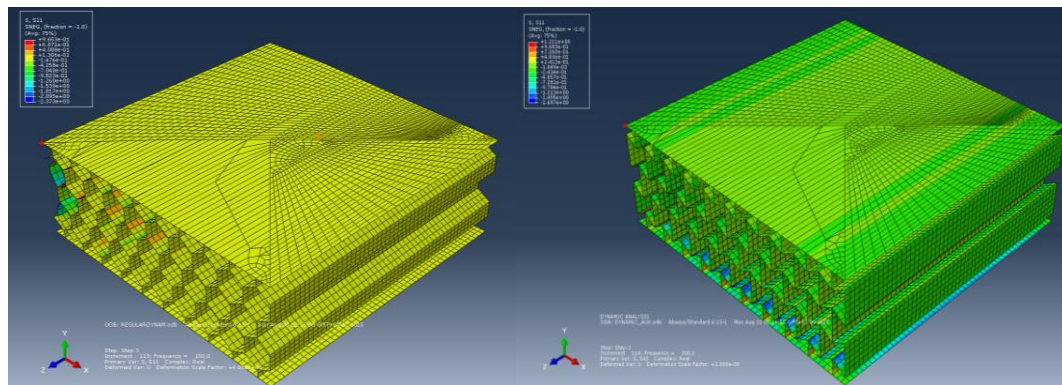
Πίνακας 4: Περιγραφή εφαρμοζόμενης δύναμης.



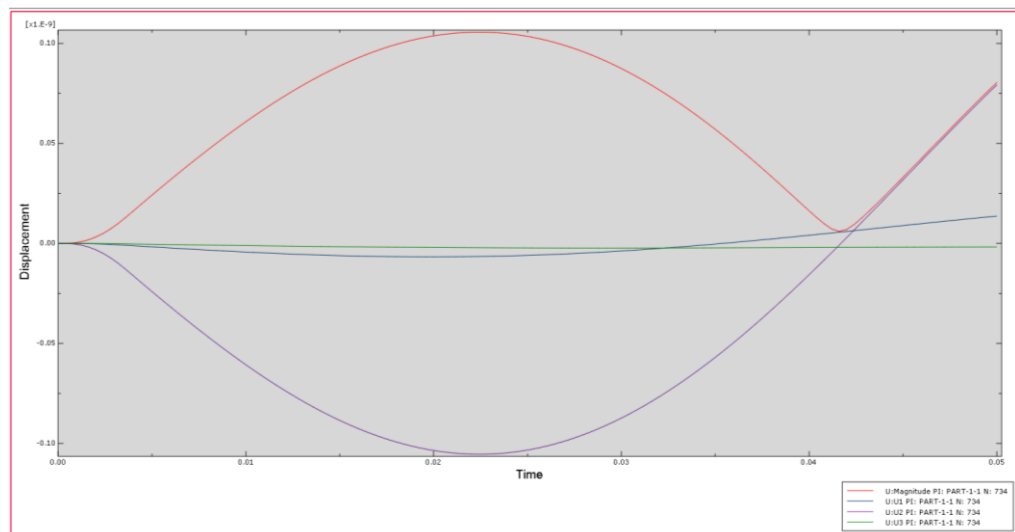
Σχήμα 58: Σημείο εφαρμογής δύναμης που επιβάλλεται στο εντός επιπέδου μοντέλο για αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συμπεριφορά (μετατόπιση ως προς τον χρόνο) του κόμβου στις ακμή αριστερά σύμφωνα με την παρούσα σχηματική απεικόνιση για τις δύο διαφορετικές δομές.

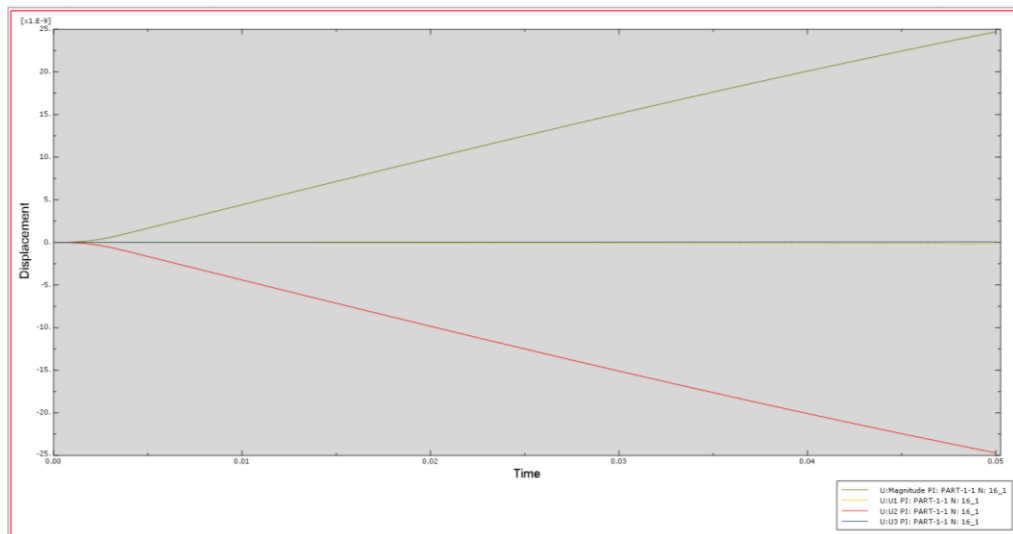
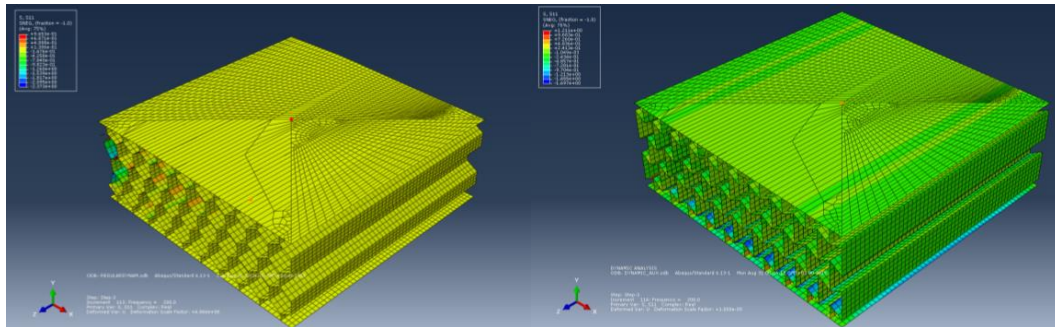


Σχήμα 59: Απεικόνιση σε γραμμική κλίμακα μετατόπισης ως προς τον χρόνο για το συμβατικό μοντέλο.

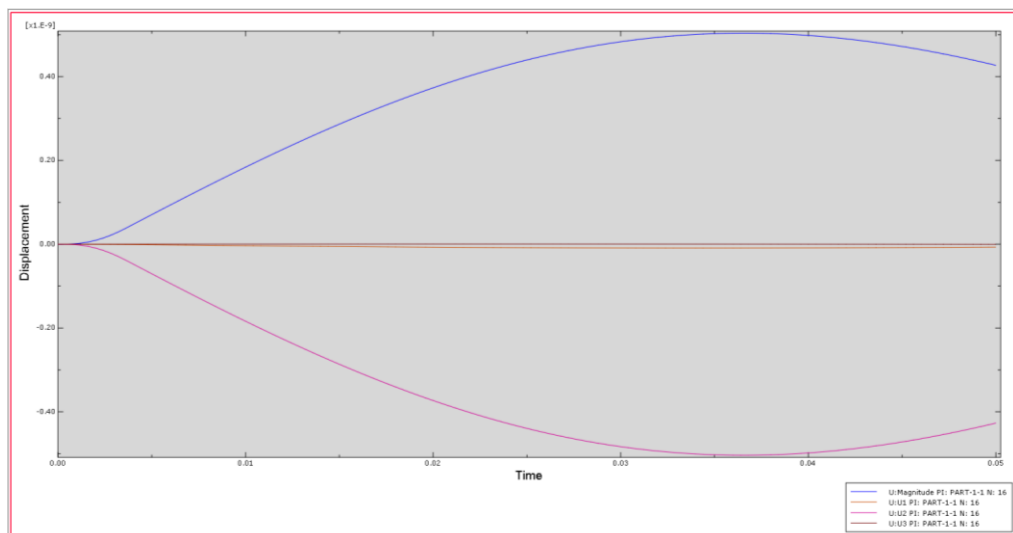


Σχήμα 60: Απεικόνιση σε γραμμική κλίμακα μετατόπισης ως προς τον χρόνο για το αυξητικό μοντέλο.

Συμπεριφορά (μετατόπιση ως προς τον χρόνο) του κόμβου στο κέντρο πάνω πλάκας όπου αποτελεί και σημείο εφαρμογής της δύναμης για τις δύο διαφορετικές δομές.



Σχήμα 61: Απεικόνιση σε γραμμική κλίμακα μετατόπισης ως προς τον χρόνο για το συμβατικό μοντέλο.

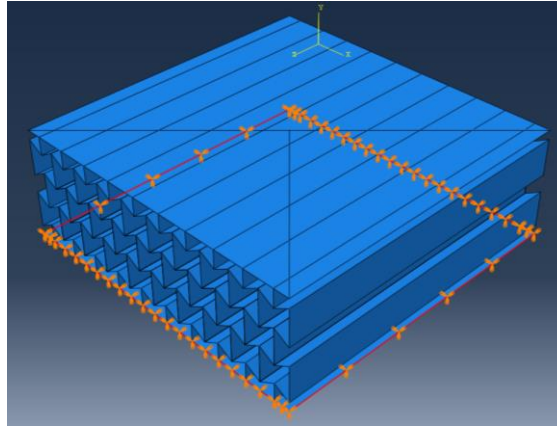


Σχήμα 62: Απεικόνιση σε γραμμική κλίμακα μετατόπισης ως προς τον χρόνο για το αυξητικό μοντέλο.

Βήμα 3: Steady state dynamics

➤ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

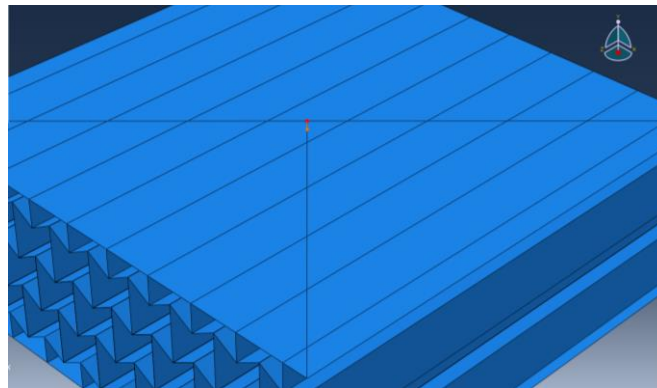
Σε αυτήν την περίπτωση οι άκρες του κάτω μετωπικού φύλλου της κατασκευής περιορίζονται στους 6 βαθμούς ελευθερίας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 63: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εντός επιπέδου μοντέλο για αυξητική δομή (Φόρτιση στην X2 διεύθυνση).

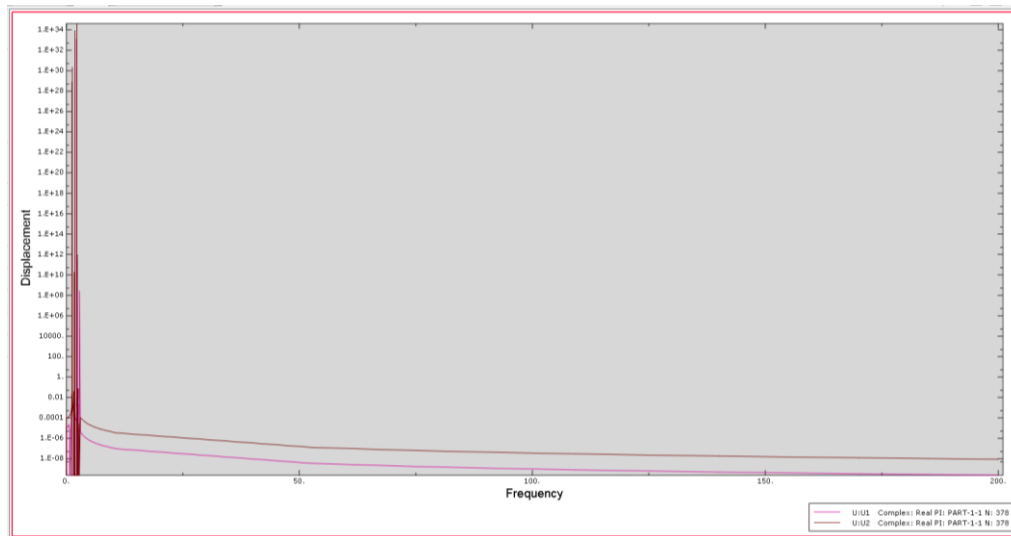
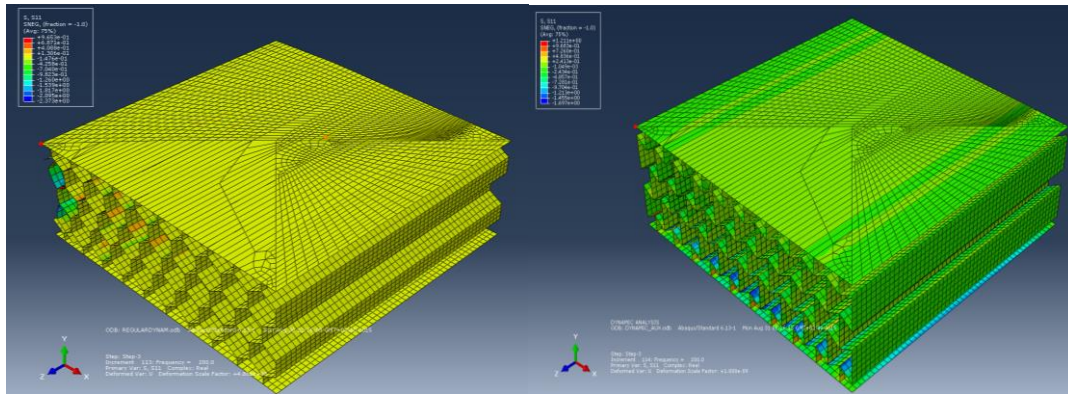
➤ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στην παρούσα περίπτωση έχουμε σημειακή φόρτιση στο κέντρο της επιφάνειάς του μπροστινού μετωπικού φύλλου, όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα. Για αυτό το βήμα της ανάλυσης έχουμε σταθερή σημειακή δύναμη μέτρου 100KN.

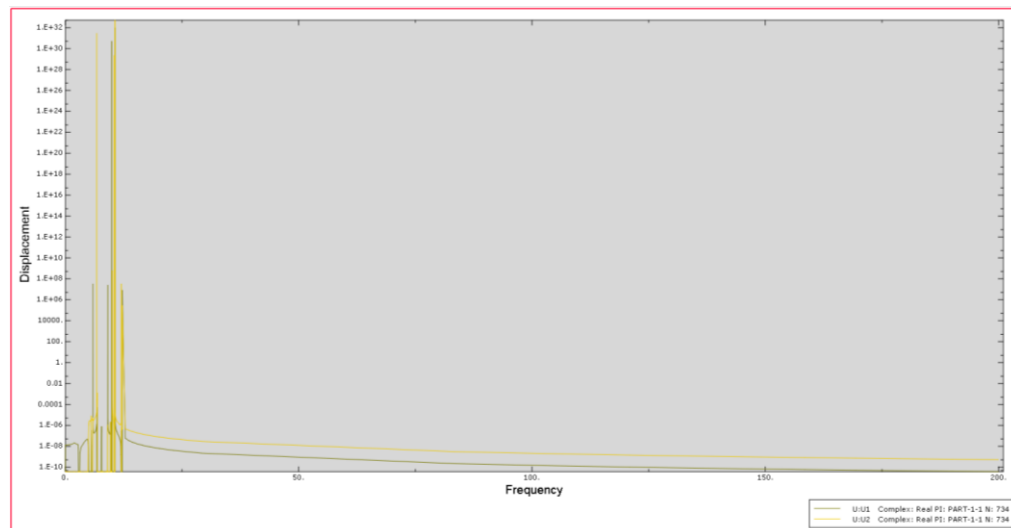


➤ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- Συμπεριφορά (μετατόπιση ως προς την συχνότητα) του κόμβου στις ακμή αριστερά σύμφωνα με την παρούσα σχηματική απεικόνιση για τις δύο διαφορετικές δομές.

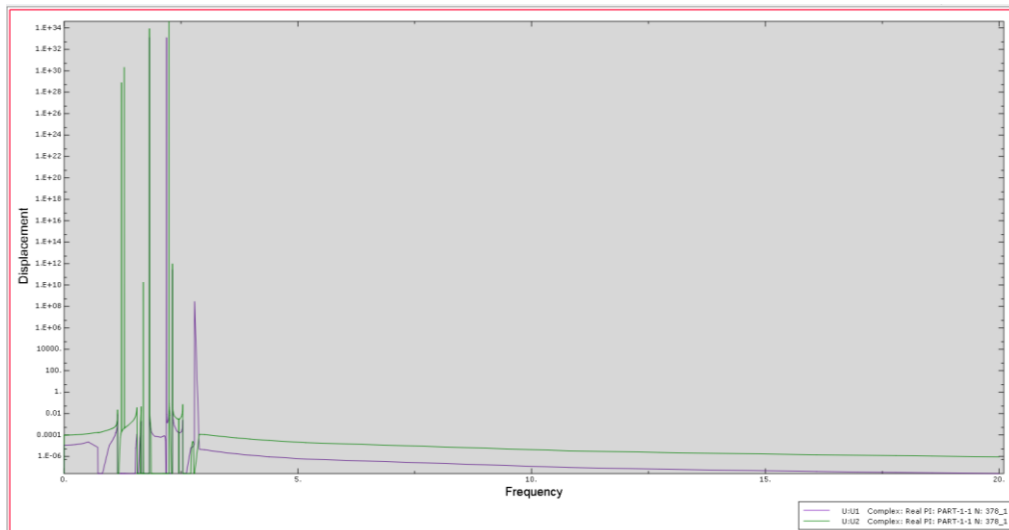


Σχήμα 64: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το συμβατικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-200Hz.

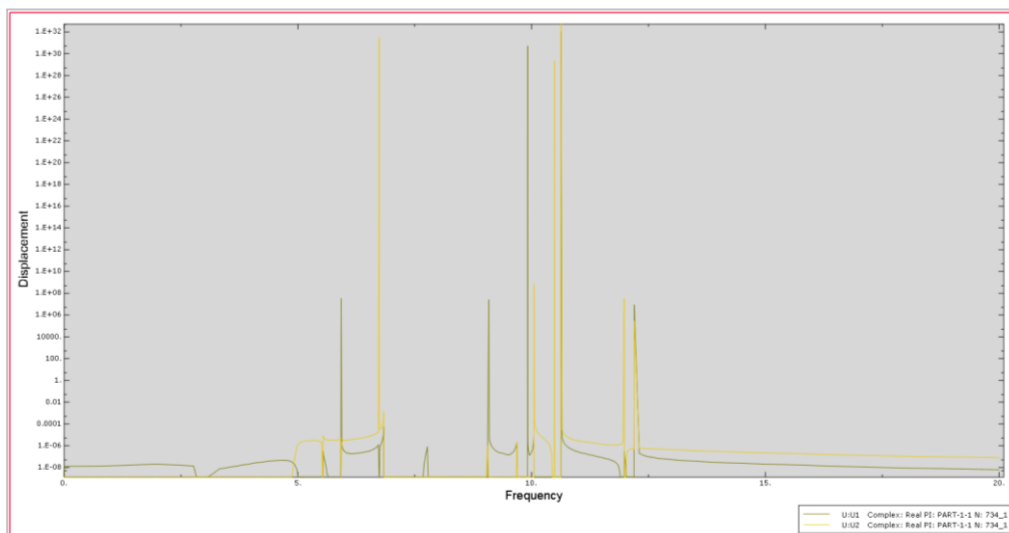


Σχήμα 65: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το αυξητικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-200Hz.

Για να έχουμε περισσότερη πληροφόρηση μειώνουμε το εύρος των υπο εξέταση συχνοτήτων για το διάστημα από 0-20 Hz.

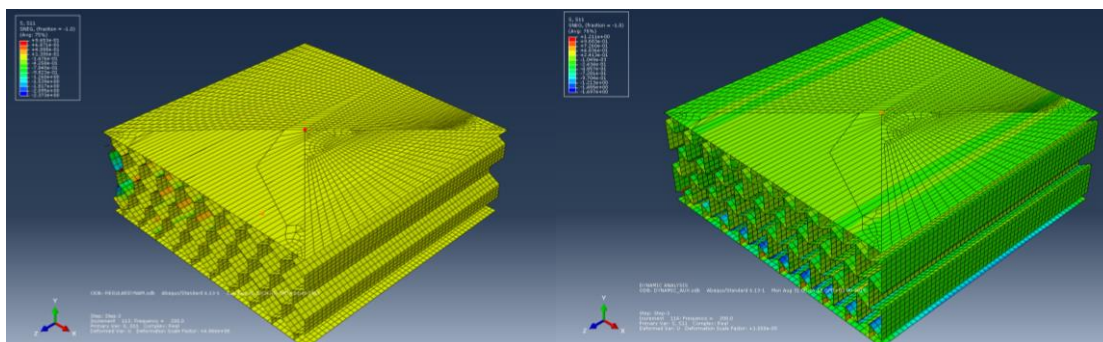


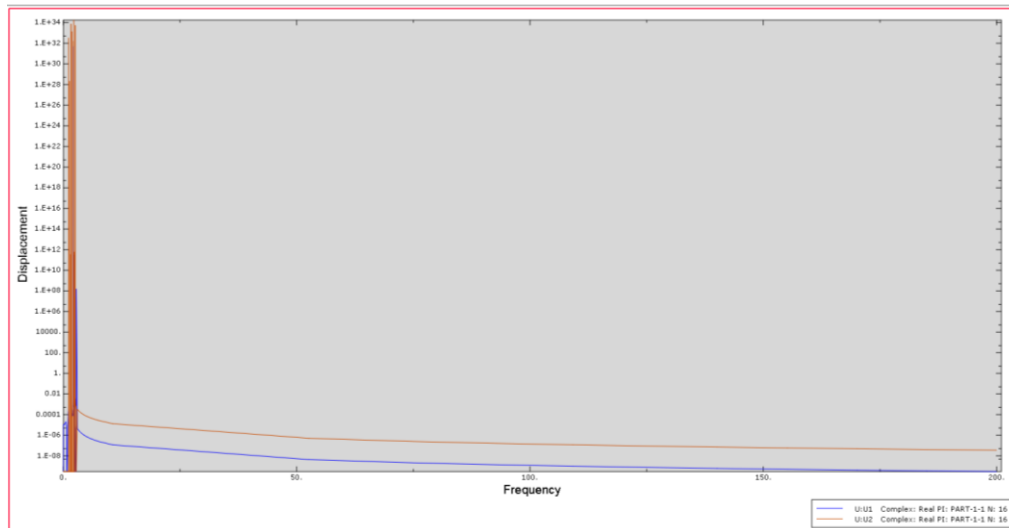
Σχήμα 66: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το συμβατικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-20Hz.



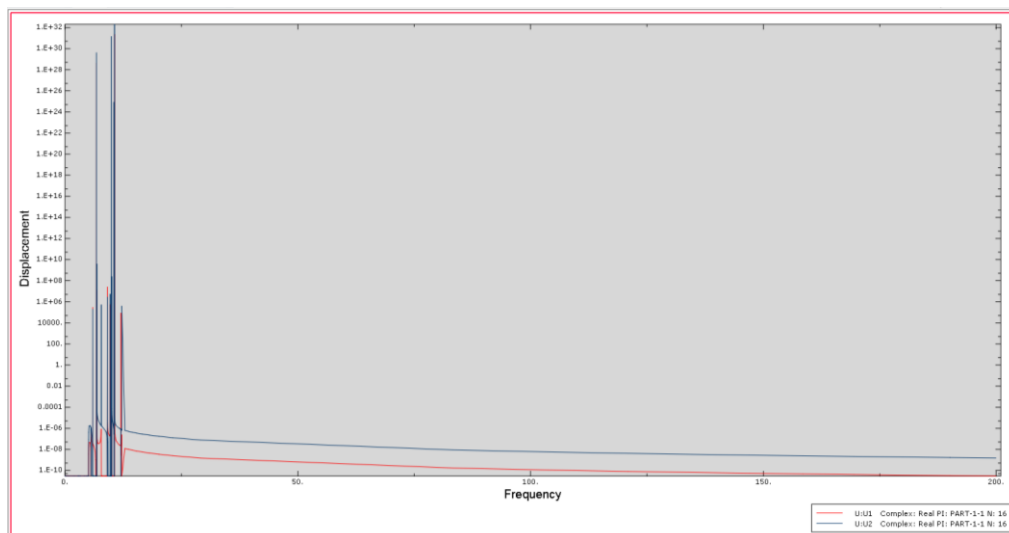
Σχήμα 67: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το αυξητικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-20Hz.

- Συμπεριφορά (μετατόπιση ως προς την συχνότητα) του κόμβου στο κέντρο πάνω πλάκας όπου αποτελεί και σημείο εφαρμογής της δύναμης για τις δύο διαφορετικές δομές.



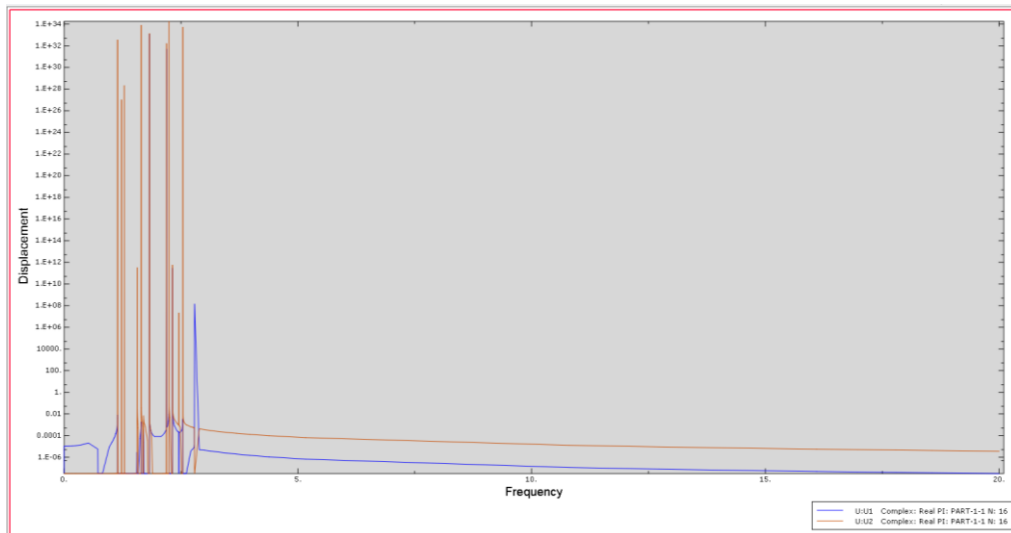


Σχήμα 68: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το συμβατικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-200Hz.

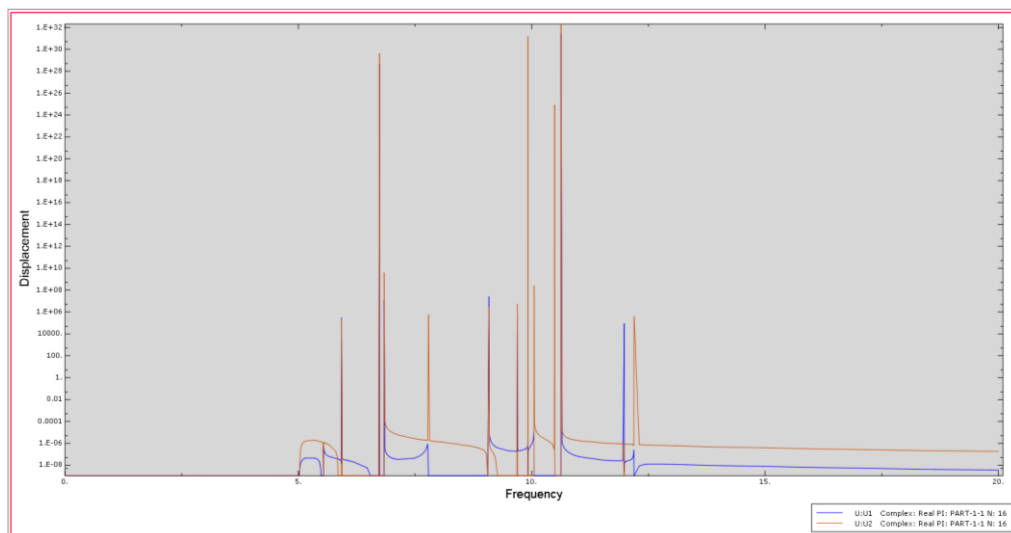


Σχήμα 69: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το αυξητικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-200Hz.

Για να έχουμε περισσότερη πληροφόρηση μειώνουμε το εύρος των υπο εξέταση συχνοτήτων για το διάστημα από 0-20 Hz.



Σχήμα 70: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το συμβατικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-20Hz.



Σχήμα 71: Απεικόνιση σε ημιλογαριθμική κλίμακα μετατόπισης ως προς την συχνότητα για το αυξητικό μοντέλο για εύρος συχνοτήτων από 0-20Hz.

Συμπεράσματα & Προτάσεις Διερεύνησης

8.1 Σχολιασμός και Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Σχετικά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διάφορες προσομοιώσεις που έγιναν στο Abaqus, μπορούμε να πούμε ότι το αυξητικό πάνελ παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στην παραμόρφωση έναντι αυτού που έχει συμβατική δομή πυρήνα.

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την διενέργεια της δυναμικής ανάλυσης παρατηρούμε ότι για ίδιου μεγέθους διέγερση στο συμβατικό μοντέλο έχουμε πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις εν συγκρίσει με το αυξητικό μοντέλο.

Επιπλέον, στην περίπτωση του συμβατικού μοντέλου έχουμε συντονισμό (παρουσίαση αιχμών) της δομής μας σε χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων σε σχέση με το αυξητικό.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν ενδείξεις ότι δομές με αυξητικό πυρήνα πλεονεκτούν λόγω των χαρακτηριστικών που τους δίνει η δομή τους έναντι των συμβατικών.

8.2 Προτάσεις Διερεύνησης

Ως μελλοντική διερεύνηση και επέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να προταθεί η διερεύνηση και σε πειραματικό επίπεδο έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς υλικών αυτού του τύπου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Cellular solids: Structure and properties, Lorna J. Gibson and Michael F.Ashby, Cambridge University Press.
2. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, Li Yang, Ola Harrysson, Harvey West, Denis Cormier, 2015.
3. Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to aerospace and Defence, Q. Liu, 2006.
4. Theoretical characteristics of the vibration of sandwich plates with in-plane negative Poisson's Ratio values, F. Scarpa and G. Tomlinson, 1999.
5. Composite Sandwich Structures with Honeycomb Core subjected to impact, Lei He, 2012.
6. Wave Propagation in Sandwich Panel with Auxetic Core, D. Qing-Tian, Y.Zhi-Chun, 2010.
7. Computational Modeling of Auxetics, Tomasz Strek, Bogdan Maruszewski, Artur A. Pozniak and Krzysztof W. Wojciechowski, 2010.
8. Abaqus Analysis User's Manual.