



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

*«Βέλτιστος σχεδιασμός κυψελωτών πλακών με χρήση  
αυξητικών δομών για μείωση του βάρους και αύξηση  
της δυσκαμψίας»*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΚΕΣΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Βασίλειος Σπιτάς

**ΑΘΗΝΑ 2020**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται η συγκριτική μελέτη αεροτομών με πυρήνα αυξητικών δομών τύπου hexachiral και δομών honeycomb για τη μείωση του βάρους των κατασκευών όπως π.χ. αεροσκάφη. Ταυτόχρονα μελετούνται συγκριτικά οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μπορέσει να υπάρξει μια πλήρης εικόνα ως προς τους παράγοντες που τα καθορίζουν λειτουργικά και αποτελεσματικά στα φορτία και τις καταπονήσεις που θα ασκηθούν.

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη:

- Το πρώτο αφορά την εξεύρεση του μητρώου δυσκαμψίας των δύο ομοιογενών ανισότροπων δομών από ισότροπο υλικό με σκοπό την δημιουργία ενός ομοιογενούς ανισότροπου μοντέλου ως βασικό στοιχείο για την επίτευξη της μελέτης σε μεγάλες κατασκευές λόγω συνθετότητας και της δυσκολίας του υπολογιστικού μοντέλου στα αντίστοιχα προγράμματα. Έπειτα γίνεται σύγκριση των αποκλίσεων του μοντέλου με το πραγματικό.
- Το δεύτερο κομμάτι αφορά τη συγκριτική μελέτη των δύο δομών με βάση συγκεκριμένα κριτήρια -ενδεικτικά αναφέρονται βάρος, αντοχή σε κάμψη, ιδιοσυχυρότητες- μεταξύ τους καθώς και την πραγμάτωση μηχανικών δοκιμών κάμψης που τυπώθηκαν σε 3d printer με υλικό PET και PL.

Ως αποτελέσματα της έρευνας χρειάζεται να επισημανθεί το γεγονός ότι στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την δομή αυτή σε πραγματικές συνθήκες πτήσης. Με βάση τα κριτήρια που τέθηκαν και παραπάνω αλλά και παρουσιάζονται στο κείμενο της διπλωματικής διαπιστώνεται η μεγαλύτερη πληρότητα της δομής hexachiral σε σχέση με την δομή honeycomb.

Τέλος γίνεται μια αναφορά σε προτάσεις ως προς την βελτίωση των συγκεκριμένων δομών για αξιοποίηση σε περαιτέρω έρευνα.



# ABSTRACT

In this thesis, the comparative study of airfoils with a core of hexachiral type auxetic structures and honeycomb structures for the reduction of structural (i.e aircraft) weight is carried out. At the same time, the mechanical properties of the tests used are studied comparatively so that there can be a complete picture of the factors that determine them functionally and effectively in the loads and stresses that will be exerted.

This thesis is divided into two parts:

- The first concerns the finding of the stiffness matrix of the two anisotropic structures in order to create a homogeneous anisotropic model as a key element for facilitating the study in large structures due to the complexity and difficulty of the computational model in the respective FEA platforms. Then the deviations of the model with the real one are compared.
- The second part concerns the comparative study of the two structures based on specific criteria - indicatively mentioned weight, flexural strength, specific strength - among them as well as the performance of mechanical bending tests printed in 3d printer with PET and PLA material.

As a result of the research, it is necessary to point out the fact that in the context of this thesis, not all the factors that can affect this structure in real flight conditions can be taken into account. Based on the criteria set out above and presented in this thesis, it is ascertained that the Hexachiral structure is more complete than the honeycomb structure.

Finally, a reference is made to proposals for the improvement of the specific structures for utilization in further research.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η σταδιοδρομία ενός νέου μηχανολόγου μηχανικού στη σχολή θα μπορούσε κανείς να πει κοιτάζοντας πίσω στα προηγούμενα έτη ότι ήταν μια πολύπλοκη αλλά και όμορφη διαδικασία μέσα από την οποία δίνεται πλέον την δυνατότητα να μπορούμε να μελετάμε το επιστημονικό αντικείμενο όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένα ώστε να η γνώση αυτή να τεθεί στην υπηρεσία της κοινωνίας, την ανθρωπότητα συνολικότερα να ανεβάσει το επίπεδο ζωής της.

Στη προσπάθεια για την εκπόνηση της διπλωματικής υπάρχουν κάποιοι άνθρωποι που με βοήθησαν να αναπτύξω και να καταλάβω εις βάθος το αντικείμενο που μελετώ να σκεφτώ και να δω αυτά που μάθαινα όλα αυτά τα χρόνια θεωρητικά στη πράξη και να διαπιστώσω την διαφορά ενός μαθήματος και της ίδιας της πραγματικότητας από την άποψη της πληθώρας των προβλημάτων που προκύπτουν στην υλοποίηση μιας κατασκευής ακόμα και ενός απλού εξαρτήματος.

Θέλω να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Δρ Σπιτά Βασίλειο αρχικά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου παρέδωσε αυτό το θέμα. Θέλω επίσης να τον ευχαριστήσω που πάντα με ενθάρρυνε να ρωτάω και να μαθαίνω χωρίς ο ίδιος να υπολογίζει κούραση ή ωράριο σε αυτή την διαδικασία κάτι το οποίο το έκανε και με τους υπόλοιπους συμφοιτητές. Οι γνώσεις και η βοήθεια που πήρα θεωρώ ότι είναι πέρα από την εκπόνηση αυτού του θέματος. Επενδύουν στην μεθοδολογία, στη σκέψη που χρειάζεται να έχει ένας μηχανολόγος μηχανικός.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Χρήστο Βαφκουφτη για όλη την βοήθεια που μου έδωσε σε αυτή την προσπάθεια και σε ότι τον χρειάστηκα. Χωρίς την βοήθεια του θα ήταν αδύνατη διεκπεραίωση των πειραμάτων που έπρεπε να γίνουν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον επίκουρο καθηγητή κύριο Μαρκόπουλο Άγγελο για την παραχώρηση του εργαστηριακού εξοπλισμού καθώς και τον κύριο Παπαντωνίου Ιωάννη που με βοήθησε στην διεξαγωγή του πειράματος κάμψης τριών σημείων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιστήμονες όπου γης που μπορεί να μην τους γνωρίζω και να μην με γνωρίζουν όμως οι δημοσιεύσεις τους ήταν καθοριστικές για να εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας παρόλο που λόγω της έκτασης της δεν αναφέρονται ούτε χρησιμοποιούνται όλα τα στοιχεία που θα μπορούσαν να ενταχθούν.

Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τα οικεία μου πρόσωπα που με βοήθησαν να φτάσω ως εδώ. Θεωρώ ότι θα ήταν ανούσιο να

αναφέρω πως με βοήθησαν σε αυτή την προσπάθεια καθώς δεν είναι μόνο τα χρόνια του πανεπιστημίου είναι μια ολόκληρη ζωή και το ευχαριστώ είναι λίγο.

## Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
Λόγος Poisson.....	15
Αυξητικές δομές.....	16
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΩΝ HEXACHIRAL ΚΑΙ HONEYCOMB.....	20
ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	21
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΟΜΕΣ HEXACHIRAL ΚΑΙ HONEYCOMB.....	24
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	25
HEXACHIRAL.....	27
Υπολογισμός λόγων Poisson.....	30
Διεύθυνση ΧΥ.....	30
Διεύθυνση ΥΧ.....	33
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΜΗ HEXACHIRAL.....	37
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	37
Για τον άξονα xx.....	37
Για τον άξονα yy.....	38
Για τον άξονα zz.....	39
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	41
Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ΥΧ.....	41
Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ΖΥ.....	42
Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ΖΧ.....	43
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΗΤΡΩΟΥ.....	44
ΚΥΨΕΛΩΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ-HONEYCOMB.....	45
Υπολογισμός λόγων Poisson.....	48
Διεύθυνση ΧΥ.....	48
Διεύθυνση ΥΧ.....	51
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΜΗ HONEYCOMB.....	55
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	55
Για τον άξονα ΧΧ.....	55



Για τον άξονα YY .....	56
Για τον άξονα ZZ .....	57
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	58
Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο YX.....	58
Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ZY .....	60
Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο YZ.....	61
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΗΤΡΩΟΥ .....	62
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ .....	63
NACA HEXACHIRAL FILL.....	65
NACA HONEYCOMB FILL .....	65
ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ .....	66
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ .....	67
ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ .....	72
ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΜΩΝ .	77
ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

## Εικόνες στο έγγραφο

Εικόνα 1-Λόγος Poisson .....	15
Εικόνα 2-Αυξητικά υλικά-Συμβατικά υλικά.....	16
Εικόνα 3-Hexachiral.....	16
Εικόνα 4-Reentrant.....	17
Εικόνα 5-DIRIS .....	17
Εικόνα 6-Rotating rectangles .....	17
Εικόνα 7-Σύγκριση συμπεριφοράς συμβατικών υλικών με αυξητικά υλικά.....	18
Εικόνα 8-Σόλες παπουτσιών με αυξητική συμπεριφορά .....	18
Εικόνα 9- α) Κυρτή (θολωτή) συνκαλστική μορφή αυξητικών υλικών σε κάμψη β) Σαγματοειδής (αντικλαστική) μορφή κλασικών υλικών σε κάμψη .....	19
Εικόνα 10- Εφαρμογή reentrant στο γόνατο.....	19
Εικόνα 11- Τάσεις σε κυβικό μοντέλο .....	21
Εικόνα 12-Ονομασία πλευρών .....	22
Εικόνα 13-Hexachiral ονομασία πλευρών.....	23
Εικόνα 14-Honeycomb ονομασία πλευρών.....	23
Εικόνα 15-Unit cell hexachiral .....	27
Εικόνα 16-Δομή Hexachiral: Ορισμός δοκιμίων για την μέτρηση των λόγων Poisson .....	28
Εικόνα 17-Δοκίμιο για μέτρηση αξονικής μετατόπισης .....	29
Εικόνα 18-Δοκίμιο για μέτρηση εγκάρσιας μετατόπισης.....	29
Εικόνα 19-Hexachiral εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	31
Εικόνα 20-παραμορφωμένη δομή Hexachiral κατά την μέτρηση λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	31
Εικόνα 21-Μηχανισμός λειτουργίας της Δομής Hexachiral κατά την μέτρηση λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	32
Εικόνα 22-Hexachiral εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	34
Εικόνα 23-Παραμορφωμένη δομή Hexachiral για μέτρηση λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	34
Εικόνα 24-Παραμόρφωση της δομής Hexachiral .....	35
Εικόνα 25-HONEYCOMB UNIT CELL.....	45
Εικόνα 26-Σύγκριση Hexachiral unit-Honeycomb unit .....	46
Εικόνα 27-Δομή Honeycomb: Δοκίμιο για μέτρηση αξονικής μετατόπισης.....	47
Εικόνα 28- Δομή Honeycomb: Δοκίμιο για μέτρηση αξονικής μετατόπισης.....	47
Εικόνα 29- Δομή Honeycomb: Ορισμός δοκιμίων για την μέτρηση των λόγων Poisson .....	48
Εικόνα 30- Honeycomb εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	49
Εικόνα 31-Παραμορφωμένη δομή Honeycomb για μέτρηση λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	50
Εικόνα 32-Honeycomb εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	52
Εικόνα 33-Παραμορφωμένη δομή Honeycomb για μέτρηση λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	53
Εικόνα 34-NACA 64A-010 10.0% .....	63
Εικόνα 35-F-22 RAPTOR.....	63
Εικόνα 36-Διαστάσεις πτέρυγας .....	64
Εικόνα 37-NACA HEXACHIRAL FILL (SECTION).....	65
Εικόνα 38-NACA HONEYCOMB FILL (SECTION).....	65
Εικόνα 39-Modal analysis.....	66
Εικόνα 40-Κάτοψη πτέρυγας δομής Honeycomb κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού.....	67
Εικόνα 41- Δομή Honeycomb κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού .....	68
Εικόνα 42-Κάτοψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Honeycomb.....	68
Εικόνα 43-Πλάγια όψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Honeycomb .....	69
Εικόνα 44-Πτέρυγα με εσωτερική δομή Honeycomb.....	69
Εικόνα 45-Κάτοψη πτέρυγας δομής Hexachiral κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού .....	69
Εικόνα 46-Η Δομή Hexachiral κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού.....	70

<i>Εικόνα 47-Κάτοψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Hexachiral.....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 48-Πλάγια όψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Hexachiral .....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 49-Πτέρυγα με εσωτερική δομή Hexachiral.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 50-INSTRON 4482 .....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 51-Διάταξη πειράματος κάμψης τριών σημείων.....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 52-Δομή Honeycomb: Διάταξη πειράματος κάμψης τριών σημείων .....</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 53-Δομή Honeycomb: διάταξη κάμψης τριών σημείων .....</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 54-Δομή Hexachiral: Διάταξη πειράματος κάμψης τριών σημείων .....</i>	<i>75</i>
<i>Εικόνα 55-Δομή Hexachiral: Διάταξη κάμψης τριών σημείων .....</i>	<i>75</i>

## Πίνακες στο έγγραφο

Πίνακας 1-Αδιαστατοποίηση πλέγματος.....	26
Πίνακας 2-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	31
Πίνακας 3- Hexachiral αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	32
Πίνακας 4-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	34
Πίνακας 5-Hexachiral αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	35
Πίνακας 7-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα $X$ .....	37
Πίνακας 8- Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $X$ .....	38
Πίνακας 9-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $X$ .....	38
Πίνακας 10-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα $Y$ .....	39
Πίνακας 11-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $Y$ .....	39
Πίνακας 12-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $Y$ .....	39
Πίνακας 13-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα $Z$ .....	40
Πίνακας 14-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $Z$ .....	40
Πίνακας 15-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $Z$ .....	40
Πίνακας 16-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο $YX$ .....	41
Πίνακας 17-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο $XY$ .....	41
Πίνακας 18-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο $XY$ ..	41
Πίνακας 19-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο $YZ$ .....	42
Πίνακας 20-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο $YZ$ .....	42
Πίνακας 21-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο $YZ$ ..	42
Πίνακας 22-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο $XZ$ .....	43
Πίνακας 23-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο $XZ$ .....	43
Πίνακας 24- Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο $XZ$ .	44
Πίνακας 25-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	49
Πίνακας 26 -Honeycomb αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	50
Πίνακας 27-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson $V_{yx}$ .....	52
Πίνακας 28-Hexachiral αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson $V_{xy}$ .....	53
Πίνακας 29-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα $X$ .....	55
Πίνακας 30-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $X$ .....	55
Πίνακας 31-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα $X$ .....	55

Πίνακας 32-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα Y.....	56
Πίνακας 33 -Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Y.....	56
Πίνακας 34-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Y.....	57
Πίνακας 35-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα Z.....	57
Πίνακας 36-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Z.....	57
Πίνακας 37-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Z.....	58
Πίνακας 38-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο YX.....	59
Πίνακας 39-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YX.....	59
Πίνακας 40-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YX	59
Πίνακας 41-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο YZ.....	60
Πίνακας 42-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YZ.....	60
Πίνακας 43-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YZ	60
Πίνακας 44-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο ZX.....	61
Πίνακας 45-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XZ.....	61
Πίνακας 46-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XZ	61
Πίνακας 47-Συγκριτική παρουσίαση ιδιοσυχνότητων πτέρυγας με ενσωματωμένες δομές Hexachiral-Honeycomb.....	66
Πίνακας 48-Συγκριση μηχανικών ιδιοτήτων σε κάμψη υλικών PLA-PET.....	67
Πίνακας 49-Συγκριτικός πίνακας κριτηρίων των δομών Hexachiral-Honeycomb.....	77

## Διαγράμματα στο έγγραφο

Διάγραμμα 1-Αδιαστατοποίηση πλέγματος.....	26
Διάγραμμα 2-Λόγος Poisson συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας κράματος αλουμινίου.....	30
Διάγραμμα 3- Hexachiral λόγος Poisson $V_{xy}$ .....	33
Διάγραμμα 4-Hexachiral λόγος Poisson $V_{yx}$ .....	36
Διάγραμμα 5-Hexachiral $V_{xy}$ - $V_{yx}$ .....	36
Διάγραμμα 6 -Honeycomb λόγος Poisson $V_{xy}$ .....	51
Διάγραμμα 7-Honeycomb λόγος Poisson $V_{yx}$ .....	53
Διάγραμμα 8- Honeycomb $V_{xy}$ - $V_{yx}$ .....	54
Διάγραμμα 9-Δομή Honeycomb: Πείραμα κάμψης τριών σημείων (Δύναμη- επιμήκυνση).....	74
Διάγραμμα 10-Δομή Hexachiral: Πείραμα κάμψης τριών σημείων (Δύναμη- επιμήκυνση).....	76
Διάγραμμα 11-Σύγκριση διαγραμμάτων κάμψης τριών σημείων Hexachiral-Honeycomb.....	76
Διάγραμμα 12- ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΓΡΑΦΗΜΑ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ HEXACHIRAL-HONEYCOMB.....	78

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας έχει δώσει στον άνθρωπο νέες δυνατότητες ώστε να μπορέσει να κάνει την ίδια την ζωή του πιο ασφαλή, πιο αποτελεσματική στην κάλυψη των αναγκών του.

Οι επιστήμονες, οι μηχανικοί, οι εργαζόμενοι σε όλη την Γη έχουν καταφέρει να δώσουν στην ανθρωπότητα την δυνατότητα με την εργασία τους να επιλύσουν σημαντικά προβλήματα που τους έθετε η ίδια η ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης, η ίδια η ζωή.

Στην διάρκεια αυτής της επίπονης προσπάθειας είναι εντυπωσιακή η άνοδος νέων δομών ουσιαστικά ανατρέποντας τα δεδομένα. Ειδικά στην αεροπορική βιομηχανία όπου η παραμικρή λεπτομέρεια μετράει η άνοδος που έχει καταγραφεί και η εξέλιξη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται θα έλεγε κανείς ότι είναι εντυπωσιακή.

Συγκεκριμένα λόγω της ίδιας της φύσης του μέσου μεταφοράς τίθενται ως βασικό ζήτημα η διαμόρφωση αρχικά ασφαλών μέσων μεταφοράς για τους ανθρώπους αλλά και η μείωση του κόστους μεταφοράς σε συνδυασμό με την μείωση του χρόνου μεταφοράς γεγονός αρκετά απαιτητικό για μια τόσο σύνθετη κατασκευή.

Ειδικά με βάση τα προηγούμενα χρόνια έχει παρατηρηθεί ότι στα αεροπλάνα είτε της πολιτικής αεροπορίας είτε των στρατιωτικών αεροσκαφών εφαρμόζονται τεχνολογίες όπου είναι δύσκολο να τις συλλάβει ο νους ενός απλού ανθρώπου που όμως αυξάνουν την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας της ίδιας της κατασκευής. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι τα φτερά των αεροπλάνων είναι κολλημένα με κόλλα για να αποφεύγεται η συγκέντρωση τάσεων κάτι που όντως εντυπωσιάζει αλλά και μπορεί να τρομάξει έναν άνθρωπο.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες βασικές θεωρητικές γνώσεις ώστε να μπορέσει να γίνει καλύτερα κατανοητή η εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

## Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson είναι το μέγεθος εκείνο που δείχνει ποια είναι η σχέση μεταξύ της συμπεριφοράς ενός υλικού σε έναν άξονα σε σχέση με τους άλλους. Δηλαδή αν ασκηθεί μια παραμόρφωση στον άξονα XX για παράδειγμα το υλικό θα επηρεαστεί και θα αναπτύξει παραμόρφωση και δυνάμεις κατά τον Y και τον Z.

Για παράδειγμα ένα σφουγγάρι όταν το ασκηθεί μια μετατόπιση από τη μια πλευρά θα «ανοίξει» από την άλλη με απλά λόγια. Αυτός το φαινόμενο πήρε το όνομα του από τον γάλλο μαθηματικό και φυσικό Siméon Poisson.

Ο λόγος Poisson ορίζεται ως το πηλίκο της ανοιγμένης παραμόρφωσης που εφαρμόζεται σε ένα υλικό σε έναν άξονα προς την αντίστοιχη ανοιγμένη παραμόρφωση ως προς τον κάθετο άξονα.

$$v = -\frac{dE_{trans}}{dE_{axial}} \quad (\text{εξίσωση 1})$$

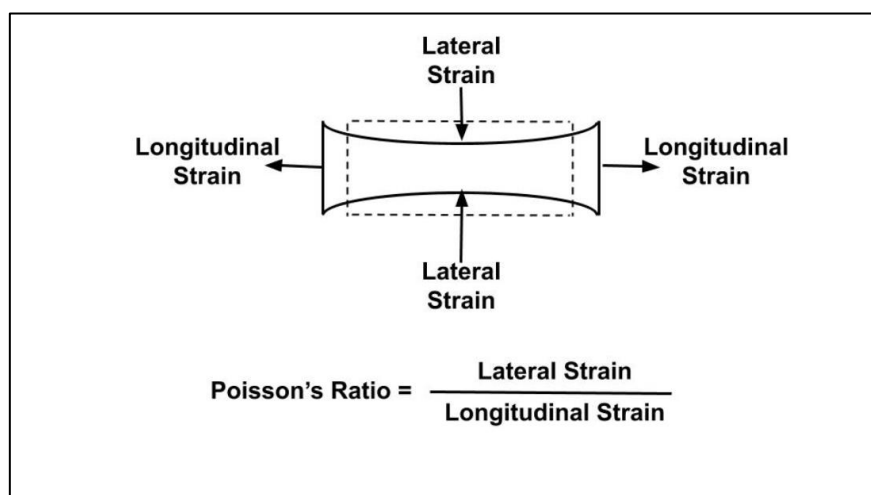
Όπου

$v$ : ο λόγος poisson

$dE_{trans}$ : η ανοιγμένη μετατόπιση στον εγκάρσιο άξονα

$dE_{axial}$ : η ανοιγμένη μετατόπιση στον διαμήκη άξονα

Στο παρακάτω σχήμα<sup>[1]</sup> φαίνεται η συμπεριφορά του φαινομένου Poisson



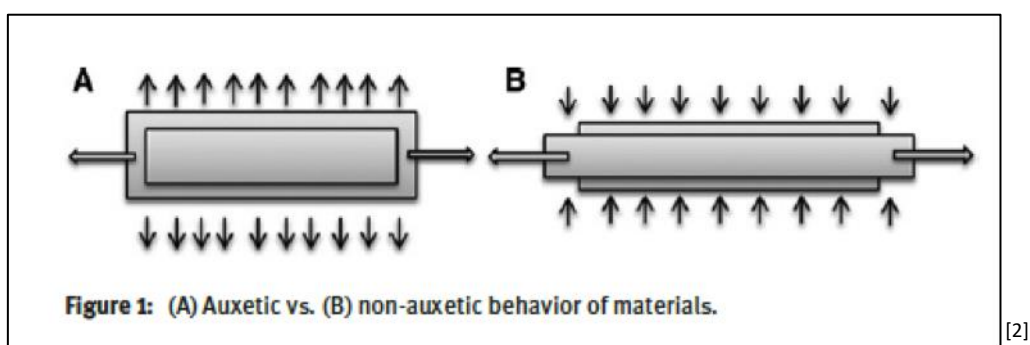
Εικόνα 1-Λόγος Poisson

## Αυξητικές δομές

Αυξητικές δομές ή αυξητικά υλικά καλούνται δομές που έχουν αρνητικό λόγο Poisson. Οι αυξητικές δομές έχουν την ιδιότητα χωρίς να μεταβληθεί η σύσταση του υλικού να επιτυγχάνεται αρνητικός λόγος Poisson.

Η φυσική σημασία εκφράζεται στο γεγονός ότι όταν εφελκύεται η θλίβεται στον εγκάρσιο άξονα ίδια συμπεριφορά θα παρουσιάζει και στον διαμήκη. Υπάρχουν διάφορες αυξητικές δομές ανάλογα με το σχήμα αλλά και τις διαστάσεις τους εμφανίζουν και διαφορετικές ιδιότητες.

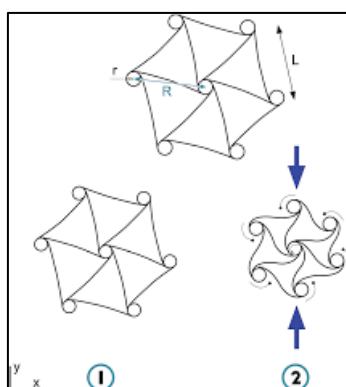
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια αναπαράσταση των αυξητικών υλικών σε σύγκριση με ένα συμβατικό υλικό.



Εικόνα 2-Αυξητικά υλικά-Συμβατικά υλικά

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις πιο γνωστές δομές

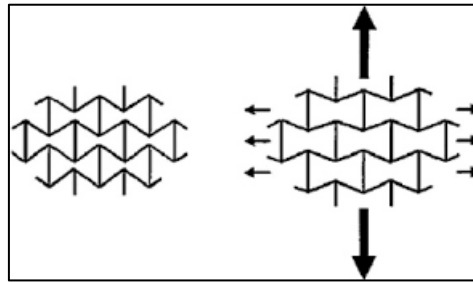
- Η δομή Hexachiral:



Εικόνα 3-Hexachiral<sup>[3]</sup>

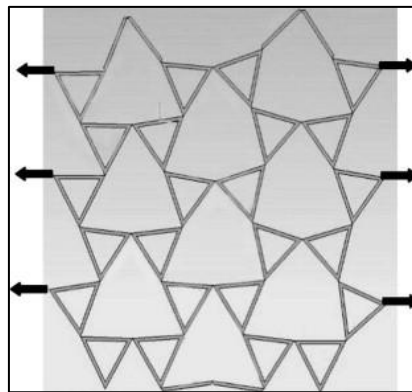


- Δομή reentrant:



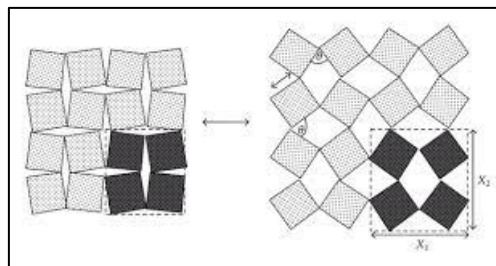
Εικόνα 4-Reentrant<sup>[4]</sup>

- Δομή DIRIS:



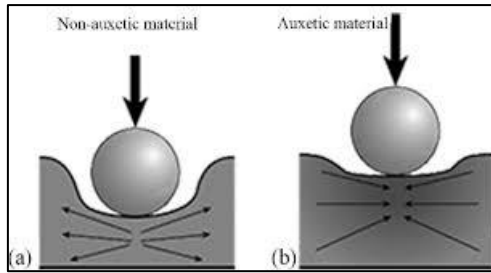
Εικόνα 5-DIRIS<sup>[5]</sup>

- Rotating Rectangles:



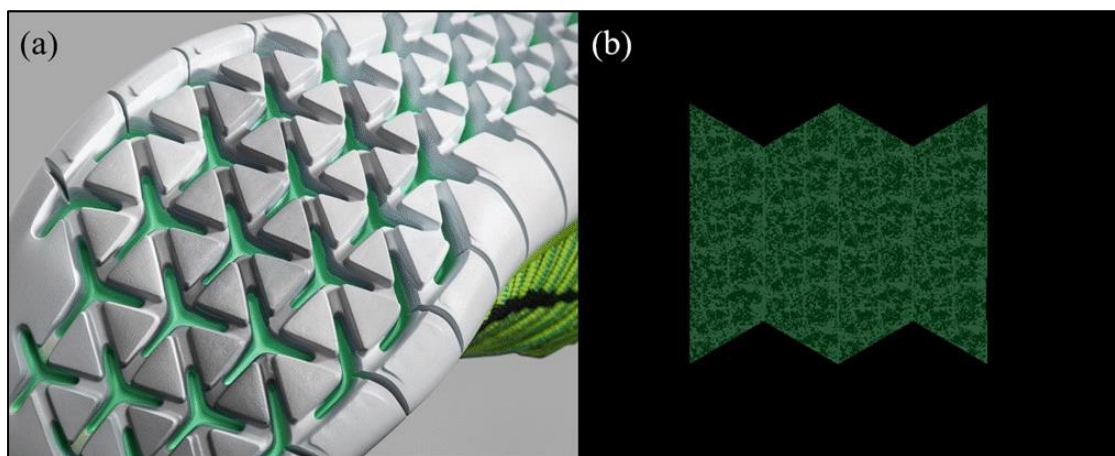
Εικόνα 6-Rotating rectangles<sup>[6]</sup>

Οι αυξητικές δομές βρίσκουν πλέον ευρείες εφαρμογές σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής. Σημαντικότερο όμως στοιχείο είναι η δυναμική στη χρησιμοποίησή τους σε ακόμα περισσότερα πεδία κάτι το οποίο με την κατάλληλη έρευνα θα μπορέσει να επεκταθεί. Μια από τις βασικές ιδιότητες έχει ως αποτέλεσμα ότι σε περίπτωση θλίψης στο σημείο εκείνο να αυξάνεται η πυκνότητα τους όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αυτή η ιδιότητα τους δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές άμυνας (π.χ αλεξίσφαιρα κ.α.)



Εικόνα 7-Σύγκριση συμπεριφοράς συμβατικών υλικών με αυξητικά υλικά<sup>[7]</sup>

Επίσης πλέον χρησιμοποιούνται και σε αθλητικά παπούτσια στον πάτο του παπουτσιού καθώς λόγω της παραπάνω ιδιότητας σε κάθε βήμα γίνεται «πυκνό» το πέλμα του παπουτσιού και απορροφάει κραδασμούς.



Εικόνα 8-Σόλες παπουτσιών με αυξητική συμπεριφορά<sup>[8]</sup>

Μια από τις βασικές ιδιότητες επίσης των αυξητικών δομών είναι το μέτρο διάτμησης. Το μέτρο διάτμησης ορίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο

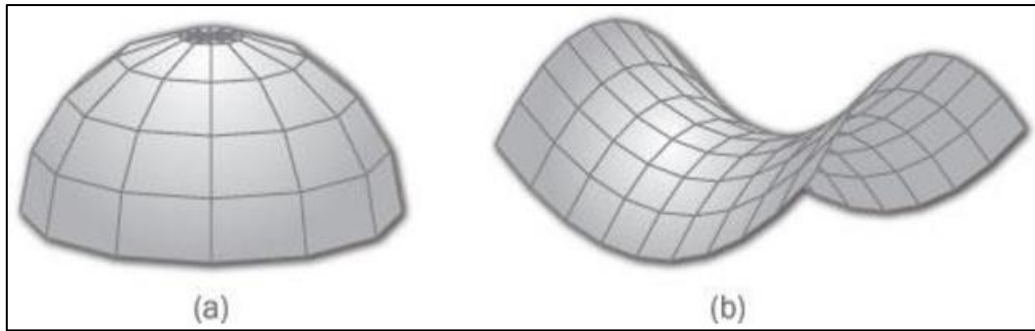
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{εξίσωση 2})$$

Όπου

$E$ : Young modulus

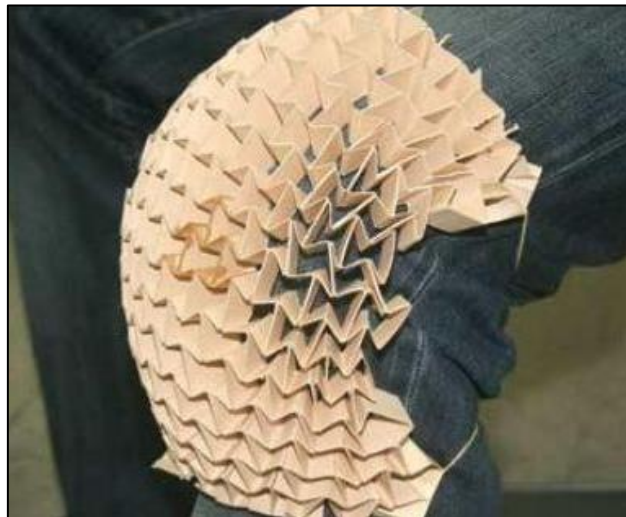
$\nu$ : Poisson's ratio

Με βάση την εξίσωση 2 αν ο λόγος Poisson  $\nu$  τείνει να γίνει -1 τότε το μέτρο διάτμησης τείνει προς το άπειρο. Η φυσική σημασία της παραπάνω διατύπωσης αποτυπώνεται στο γεγονός ότι επιτυγχάνεται να αυξηθεί το μέτρο διάτμησης χωρίς να αλλάξει την σύσταση του υλικού. Ταυτόχρονα μια ακόμα εντυπωσιακή ιδιότητα των αυξητικών δομών είναι ότι μπορούν να διαμορφώσουν το σχήμα του θόλου αντί για το σχήμα του σάγματος που αποκτούν τα συμβατικά υλικά.



Εικόνα 9- a) Κυρτή (θολωτή) συνκαλοτική μορφή αυξητικών υλικών σε κάμψη b) Σαγματοειδής (αντικλαστική) μορφή κλασσικών υλικών σε κάμψη<sup>[9]</sup>

Με βάση αυτήν την ιδιότητα μπορούν να εφαρμοστούν σε προστατευτικά κεφαλιού κράνη ή επιγονατίδες δηλαδή γεωμετρίες του ανθρώπινου σώματος που σχηματίζονται κοιλότητες. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά που για να μπορέσει να επιτευχθεί αυτό θα απαιτούνταν επιπλέον κατεργασία.



Εικόνα 10- Εφαρμογή reentrant στο γόνατο<sup>[10]</sup>

## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΩΝ HEXACHIRAL ΚΑΙ HONEYCOMB

Για να μπορέσει να υπάρξει πραγματική αξιοποίηση αυτών των δομών λόγω του πολύ μεγάλου υπολογιστικού κόστους που οφείλεται στη σύνθετη δομή τους αλλά και σε εφαρμογές μεγάλου μεγέθους όπως είναι οι πτέρυγες αεροσκαφών. Η συνθετότητα και το μέγεθος των εφαρμογών αυτών διαμορφώνει σοβαρές δυσκολίες στην αξιοποίηση αυτών των δομών λόγω των πολύπλοκων γεωμετριών του μοντέλου δημιουργώντας σοβαρές δυσκολίες στη διαδικασία δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος (mesh) καθιστώντας ουσιαστικά αδύνατο την αξιοποίησή τους.

Η δημιουργία ενός ομοιογενούς ανισότροπου μοντέλου διευκολύνει την διαδικασία και την μελέτη καθώς μειώνει το υπολογιστικό κόστος που απαιτείται απλοποιώντας την γεωμετρία της δομής. Σκοπός είναι να υπολογιστεί το μητρώο δυσκαμψίας ή στιβαρότητας όπου θα αντικατασταθεί στο ANSYS και πραγματοποιώντας επαλήθευση θα ελεγχθούν οι αποκλίσεις ως προς τα αρχικά αποτελέσματα.

Ως γνωστόν το μητρώο δυσκαμψίας ή στιβαρότητας υπολογίζεται από τον τύπο στην γενική περίπτωση ως επέκταση του νόμου του Hooke

$$\sigma = E\varepsilon \text{ (εξίσωση 3)}$$

Η παραπάνω εξίσωση επεκτείνεται ως πίνακας με τα παρακάτω στοιχεία:

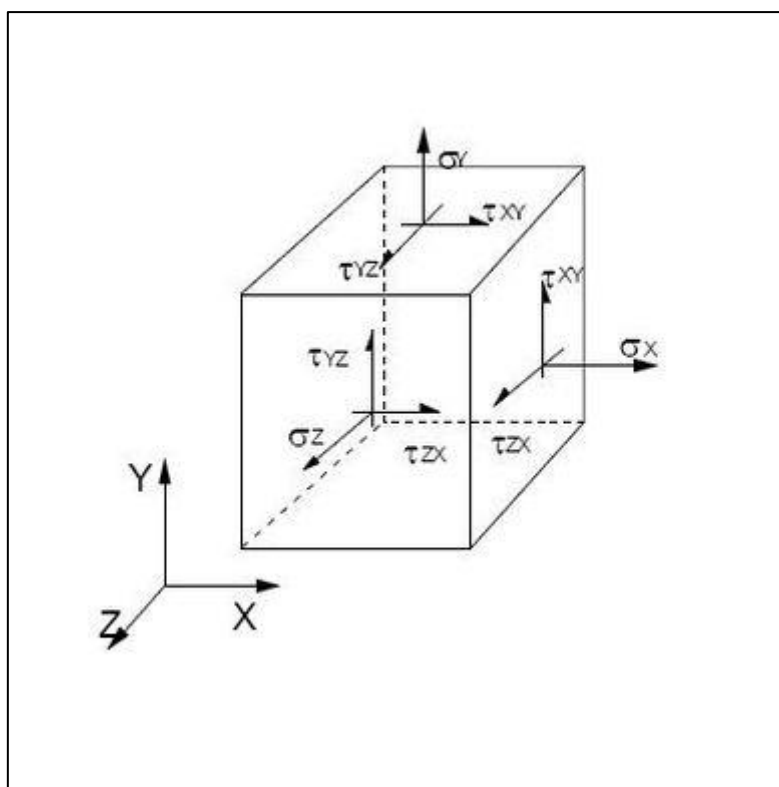
$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \text{ (εξίσωση 4)}$$

Σκοπός είναι να υπολογιστεί το μητρώο C. Για να μπορέσει να υπολογιστεί θα εφαρμοστούν αντίστοιχες παραμορφώσεις και παίρνοντας τις αντίστοιχες δυνάμεις θα υπολογιστούν οι τάσεις. Θα εφαρμοστούν ουσιαστικά 6 προσομοιώσεις σε κάθε δομή. Χρειάζεται να επισημανθεί ότι το παραπάνω μητρώο C είναι συμμετρικό ως προς την κύρια διαγώνιο. Δηλαδή κάθε στοιχείο  $C_{ij}=C_{ji}$  όπου i είναι οι γραμμές και j οι στήλες του πίνακα C.

Στο επόμενο βήμα της προσπάθειας ορισμού του μητρώου χρειάζεται να επιλεγθεί από κάθε δομή το μοντέλο εκείνο όπου θα λάβουν χώρα οι παραπάνω προσομοιώσεις. Τα μοντέλα που θα εξεταστούν αποτελούνται από τις αρχικές δομές (unit cell) -που ορίζονται για το καθένα παρακάτω- οι οποίες κατά τις διευθύνσεις του άξονα X και του άξονα Y επαναλαμβάνονται και διαμορφώνουν ένα πλέγμα.

## ΒΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μέθοδος ώστε να διαμορφωθεί ένα ομοιογενές ανισότροπο μοντέλο απαιτεί να οριστούν οι βασικές αρχές με τις οποίες θα μελετηθούν τα δύο μοντέλα. Αυτές οι αρχές χρειάζεται να είναι ενιαίες και για τις δύο δομές . Δημιουργείται ένα αντίστοιχο εξάεδρο πρισματικό αντικείμενο που θα αντικαταστήσει αυτές τις δομές διατηρώντας τις ιδιότητες τους με το μητρώο που περιγράφηκε ανωτέρω.

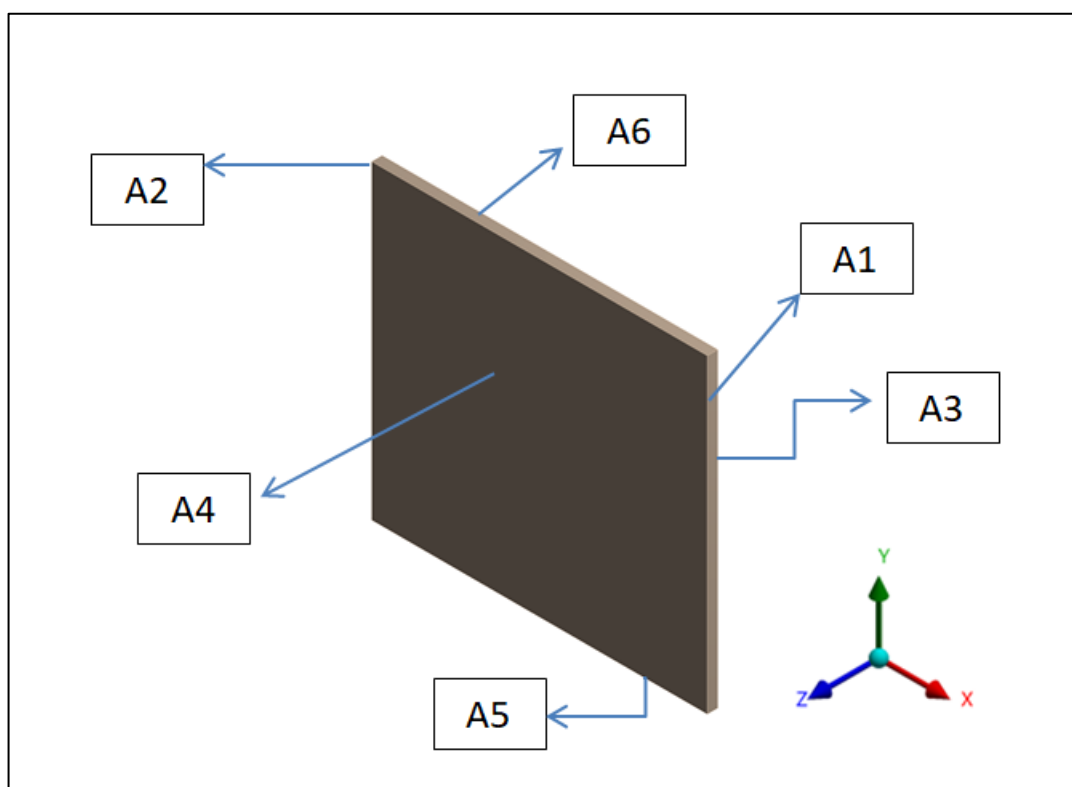


Εικόνα 11- Τάσεις σε κυβικό μοντέλο<sup>[11]</sup>

Στην ανωτέρω εικόνα φαίνεται ο ορισμός των κύριων και διατμητικών τάσεων για κάθε πλευρά ενός κύβου. Αντίστοιχα στις δομές που θα λάβουν χώρα οι προσομοιώσεις χρειάζεται να μετρηθούν οι δυνάμεις σε κάθε πλευρά για κάθε

διεύθυνση X,Y,Z και έπειτα με την διαίρεση των αντίστοιχων επιφανειών να υπολογιστούν οι τάσεις.

Για να μπορέσει να επιτευχθούν τα ανωτέρω ορίζονται την ονομασία των επιφανειών ενός εξαέδρου πρισματικού αντικειμένου. Η ονομασία φαίνεται στην κάτωθι εικόνα.

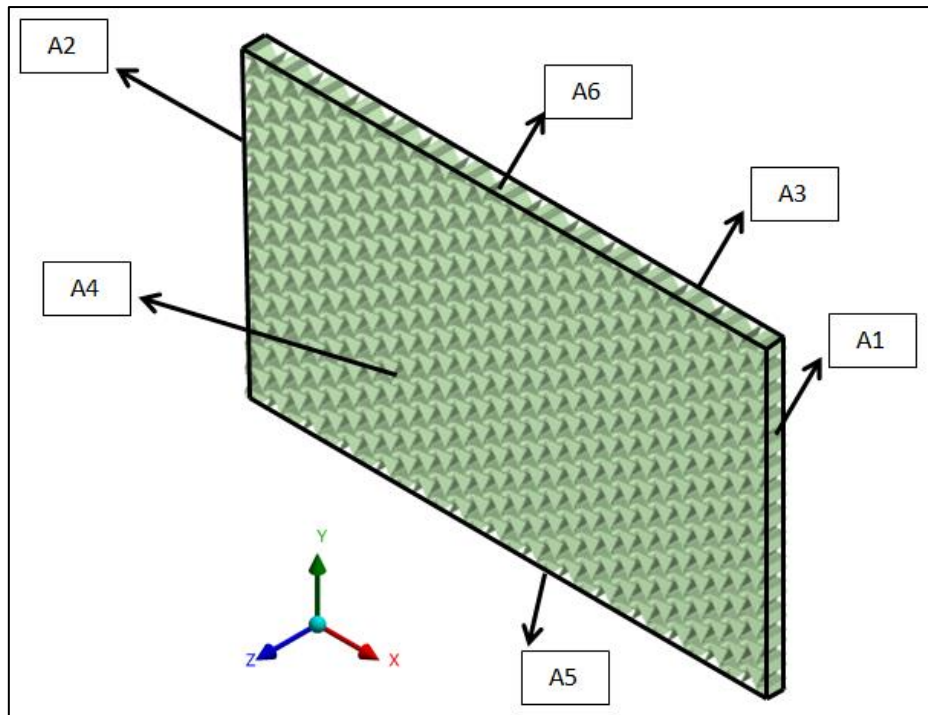


Εικόνα 12-Ονομασία πλευρών

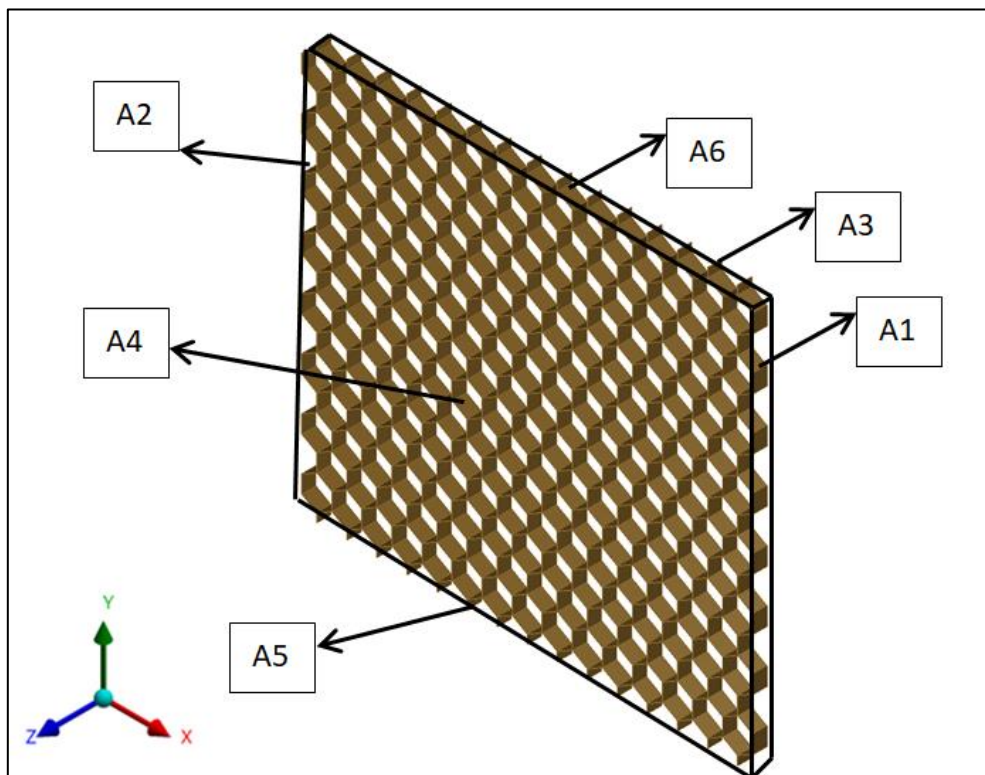
- Στον άξονα X ορίζονται οι επιφάνειες A1 και A2
- Στον άξονα Y ορίζονται οι επιφάνειες A5 και A6
- Στον άξονα Z ορίζονται οι επιφάνειες A3 και A4

Παρακάτω φαίνεται μια ισομετρική όψη των αντιστοιχών δομών και οι παραπάνω πλευρές είναι αντιστοίχως ορισμένες για κάθε δομή.

Οι επιφάνειες αυτές είναι ίδιες ως προς τον ορισμό και τα ονόματα και για το hexachiral και για το honeycomb.



Εικόνα 13-Hexachiral ονομασία πλευρών



Εικόνα 14-Honeycomb ονομασία πλευρών

Το υλικό που χρησιμοποιείται και για τις δύο δομές σε όλα τις προσομοιώσεις είναι

### **ALUMINIUM ALLOY**

- Πυκνότητα: 2770 kg/m<sup>3</sup>
- Μέτρο ελαστικότητας: 7,1X10<sup>10</sup> Pa
- Λόγος Poisson: 0,33
- Μέτρο όγκου: 6,96 X10<sup>10</sup> Pa
- Μέτρο διάτμησης: 2,66 X10<sup>10</sup> Pa

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν σχεδιαστικά προγράμματα SOLIDWORKS 2019, ANSYS Mechanical APDL.

## **ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΟΜΕΣ HEXACHIRAL ΚΑΙ HONEYCOMB**

Στην διάταξη που θα επιλεχθεί εφαρμόζονται οριακές συνθήκες ώστε να υπολογιστούν οι ιδιότητες του υλικού. Διεξάγονται προσομοιώσεις ώστε να υπολογιστούν οι ορθές τάσεις σε κάθε άξονα και έπειτα για τις διατμητικές τάσεις.

Ως αποτέλεσμα της υπολογιστικής ανάλυσης μέσω των αντιδράσεων των κόμβων υπολογίζονται οι δυνάμεις σε κάθε επιφάνεια για κάθε άξονα. Έπειτα διαιρώντας τις δυνάμεις με τις αντίστοιχες επιφάνειες που έχουν οριστεί ανωτέρω υπολογίζονται οι τάσεις και με βάση αυτό υπολογίζεται ο τανυστής για κάθε περίπτωση.

Η επιφάνεια που διαιρείται η δύναμη είναι η ονομαστική και όχι η πραγματική. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να μπορέσει να υπολογιστεί η μέση τάση.

Στις παρακάτω σχέσεις φαίνεται ότι η δύναμη υπολογίζεται ως ολοκλήρωμα της τάσης στην επιφάνεια στην οποία ασκείται.

$$F = \int_{A_{real}} \sigma_{real} dA \text{ (εξίσωση 5)}$$



Η μέση τάση είναι η διαίρεση της δύναμης με την ονομαστική επιφάνεια άρα

$$F = \sigma_{eq} A_{nom} \text{ (εξίσωση 6)}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{F}{A_{nom}} = \frac{\int_{A_{real}} \sigma_{real} dA}{A_{nom}} \text{ (εξίσωση 7)}$$

Η ονομαστική επιφάνεια αποτυπώνει την επιφάνεια που θα δημιουργηθεί στο αντίστοιχο ανισότροπο ομοιογενές μοντέλο.

## ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η επιλογή του πλέγματος αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στην υπολογιστική ανάλυση. Για να μπορέσει να επιλεγθεί το σωστό πλέγμα ως προς το μέγεθος του πραγματοποιείται σειρά δοκιμών με διαφορετικού μεγέθους πλέγμα έχοντας ως παράμετρο το βασικό κριτήριο που έχει τεθεί την αντοχή ως προς τον άξονα ZZ.

Στην αρχή της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο αυτόματος πλεγματοποιητής δημιουργώντας τετραεδρικά στοιχεία για τους υπολογισμούς των λόγων Poisson (η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω). Έπειτα κατά την διεξαγωγή των προσομοιώσεων για τον υπολογισμό του μητρώου C διαπιστώθηκε ότι τα τετραεδρικά στοιχεία απαιτούσαν πολύ χρόνο ώστε να βγουν τα αποτελέσματα και έτσι επιλέχθηκε η μέθοδο με εξαεδρικά στοιχεία. Εν τέλει τα αποτελέσματα και με τις δύο μεθόδους είχαν ελάχιστη απόκλιση.

Για την δομή Hexachiral και Honeycomb επιλέχθηκαν εξαεδρικά στοιχεία το πλάτος των οποίων στις δοκιμές ξεκινάει από τα 7mm έως τα 3mm. Στο παρακάτω πίνακα και στο αντίστοιχο διάγραμμα στον άξονα Y φαίνεται η αδιάστατη παράμετρος που έχει οριστεί ως το πηλίκο της τιμής  $\sigma_{zz}$  για κάθε μέγεθος στοιχείου προς την τελική τιμή σύγκλισης. Για το hexachiral είναι δηλαδή το 408,80. Στον άξονα X φαίνονται τα μεγέθη των τετραγωνικών στοιχείων.

Η σύγκλιση εμφανίζεται στο μέγεθος στοιχείου 4mm καθώς μέχρι τα 2mm οι διαφοροποιήσεις στις τιμές εμφανίζονται μετά το τρίτο δεκαδικό ψηφίο όπου θεωρείται ότι πλέον είναι σωστή η παράμετρος στην ανάλυση. Η τελική τιμή σύγκλισης για το hexachiral είναι 415 MPa και για το honeycomb 120 MPa.

Οπότε στην ανάλυση επιλέγεται η πλευρά του τετραγωνικού στοιχείου να είναι 3mm. Τα παραπάνω στοιχεία που αναφέρονται φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα και στον πίνακα.

ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΛΕΥΡΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (mm)	HEXACHIRAL		HONEYCOMB	
	$\sigma_{zz}$ (MPa)	ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	$\sigma_{zz}$ (MPa)	ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ
7	422,63	1,017	122,630	1,016
5	417,34	1,004	120,920	1,002
4	415,81	1,000	120,750	1,000
3	415,80	1,000	120,691	1,000
2	415,80	1,000	120,691	1,000

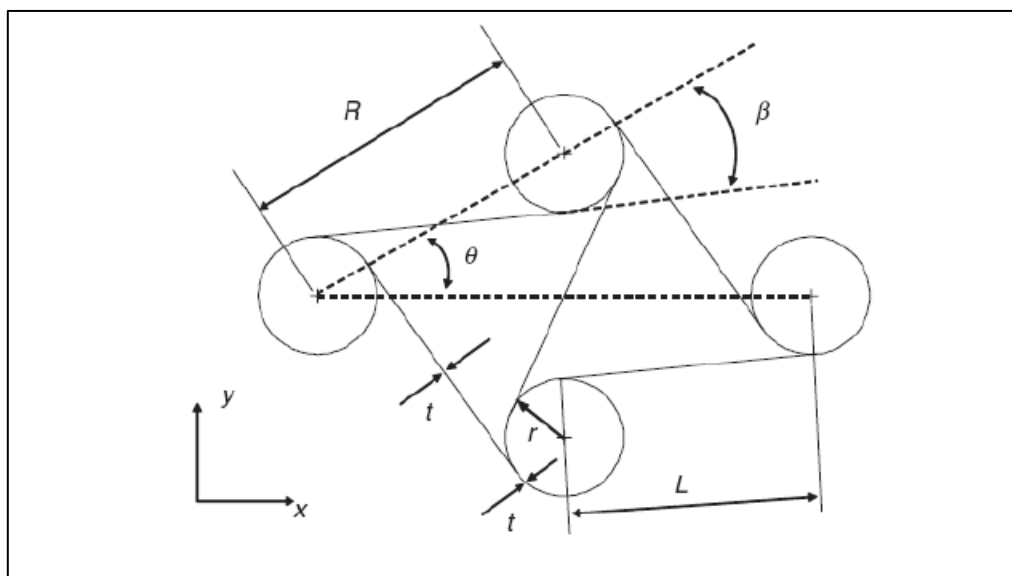
Πίνακας 1-Αδιαστατοποίηση πλέγματος



Διάγραμμα 1-Αδιαστατοποίηση πλέγματος

# HEXACHIRAL

Η δομή του Hexachiral αποτελείται από τέσσερις κύκλους που ενώνονται μεταξύ τους με ίδιου υλικού στηρίγματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι βασικές διαστάσεις που ορίζουν την αρχική δομή.



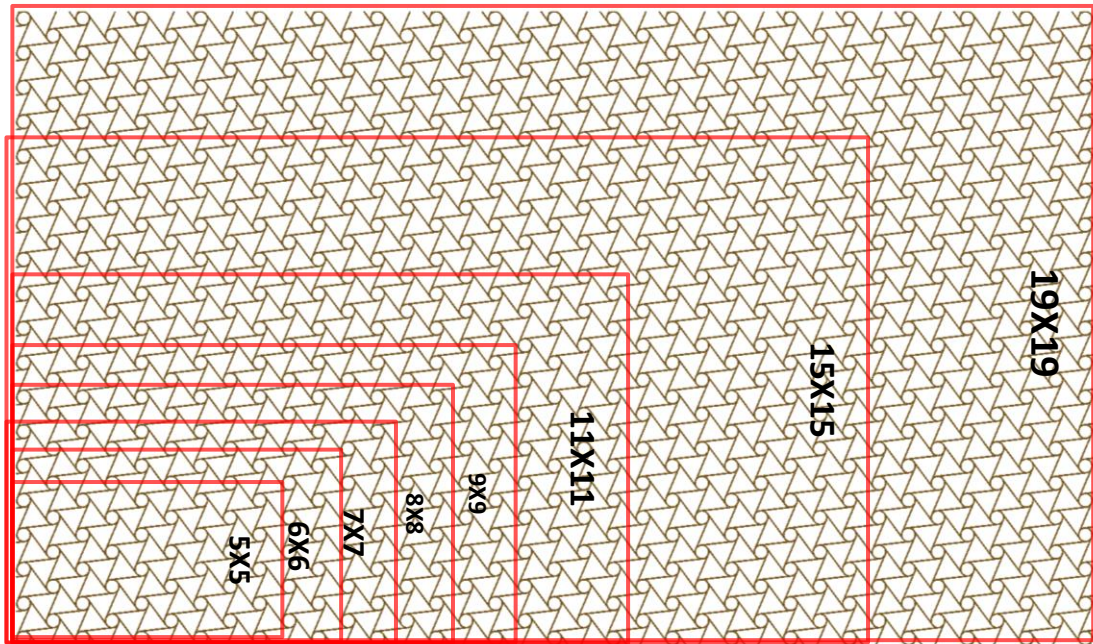
Εικόνα 15-Unit cell hexachiral<sup>[12]</sup>

Στην δομή ορίζονται τα εξής:

- $R=30$  mm
- $\theta=30^\circ$
- $t=1$  mm
- $\beta=23.48^\circ$
- $r=6$  mm (μέση διάμετρος)
- $L=25,98$  mm

Για να διαμορφωθεί η δομή που θα επιλεγεί ώστε να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές και να υπολογιστεί το αντίστοιχο μητρώο διαμορφώνονται αντίστοιχα μοντέλα npx.

Σκοπός είναι να εντοπιστεί σε ποια δομή ουσιαστικά φαινόμενα που επηρεάζουν το αποτέλεσμα σταματάνε να επηρεάζουν λόγω του μεγέθους της. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ο λόγος Poisson ως μέτρο ώστε να βρεθεί σε ποιο πλέγμα υπάρχει σύγκλιση και να επιλεγεί το αντίστοιχο μοντέλο.



Εικόνα 16-Δομή Hexachiral: Ορισμός δοκιμών για την μέτρηση των λόγων Poisson

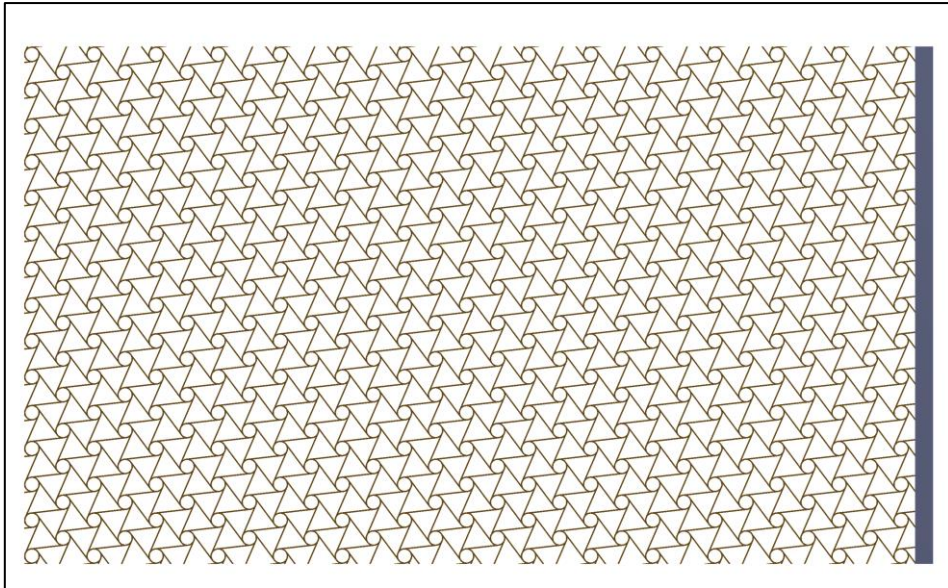
Για να υπολογιστεί ο λόγος Poisson εφαρμόστηκε σε όλα τα παραπάνω δοκίμια ξεχωριστά μετατόπιση 1mm στον άξονα X και Y και μετρήθηκε η μετατόπιση στους άξονες Y και X αντιστοίχως.

Λόγω της διακοπτόμενης γεωμετρίας χρησιμοποιείται ένα δοκίμιο πακτωμένο στις επαφές της αντίστοιχης διεύθυνσης που πρέπει να μετρηθεί η μετατόπιση της. Για να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα χρειάζεται να είναι άκαμπτο σε σχέση με την υπόλοιπη δομή. Για αυτό διεξάγεται ανάλυση ώστε να εντοπιστεί το μέτρο ελαστικότητας που απαιτείται ως πολλαπλάσιο του υλικού που χρησιμοποιείται δηλαδή του αλουμινίου.

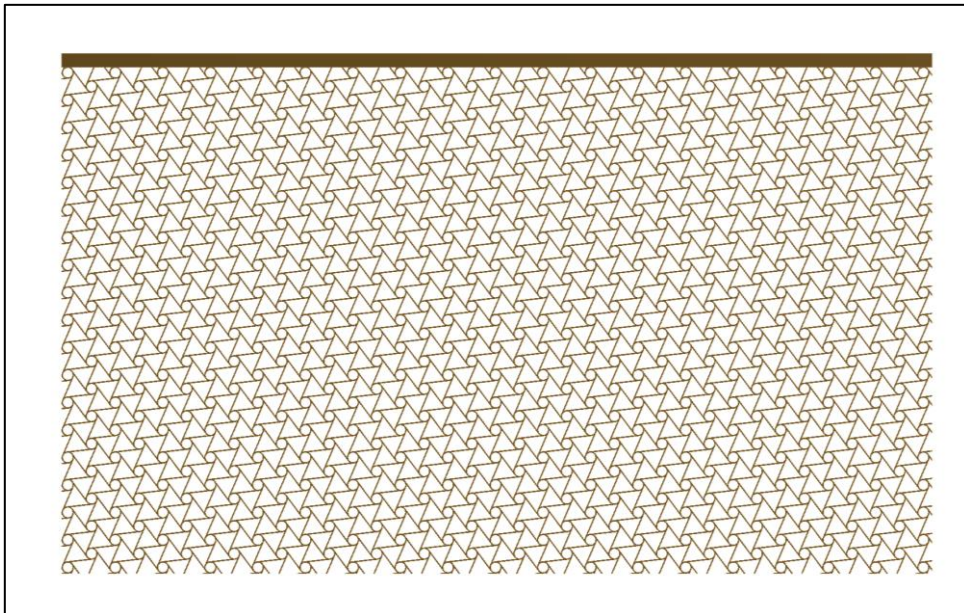
Επιλέγεται το πλέγμα 15X15 και μελετάται ο λόγος Poisson ως συνάρτηση του πολλαπλάσιου του μέτρου ελαστικότητας του αλουμινίου στο αντίστοιχο δοκίμιο.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται ότι 10 φορές μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου ουσιαστικά δεν επηρεάζει τον λόγο Poisson οπότε και το επιλέγεται για το δοκίμιο.

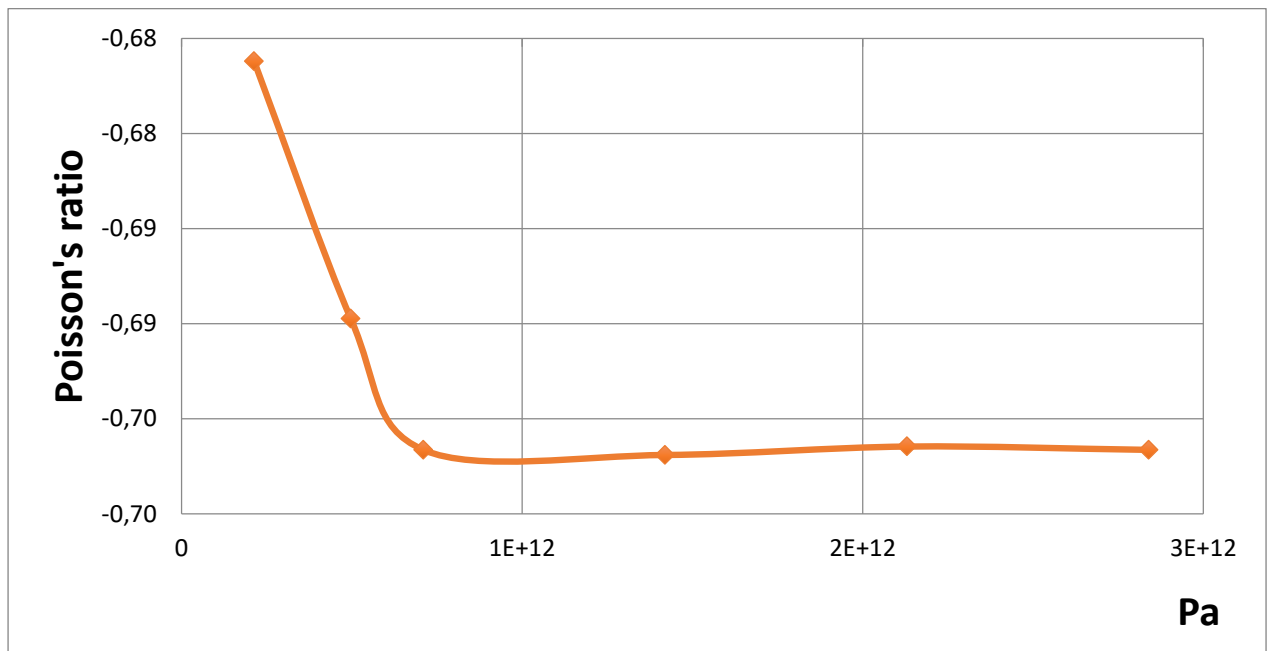




Εικόνα 17-Δοκίμο για μέτρηση αξονικής μετατόπισης



Εικόνα 18-Δοκίμο για μέτρηση εγκάρσιας μετατόπισης



Διάγραμμα 2-Λόγος Poisson συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας κράματος αλουμινίου

## Υπολογισμός λόγων Poisson

### Διεύθυνση ΧΥ

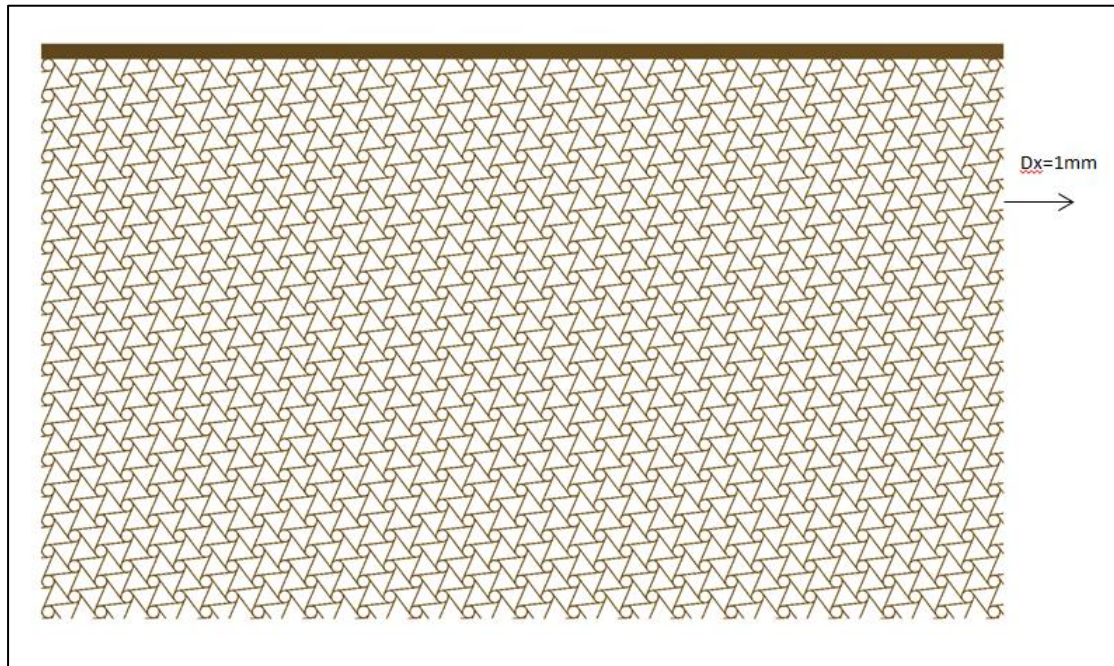
Παρακάτω περιγράφονται οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μετρηθεί ο λόγος Poisson στο επίπεδο ΧΥ.

- Εφαρμόζεται μετατόπιση 1mm στην πλευρά Α1 στην διεύθυνση του άξονα Χ.
- Στην επιφάνεια Α2 και Α5 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο στο επίπεδο των αντίστοιχων επιφανειών. Δηλαδή στην επιφάνεια Α1 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες Χ και Ζ και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα Υ. Στην επιφάνεια Α5 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες Υ και Ζ και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα Χ.
- Στις υπόλοιπες επιφάνειες Α3, Α4, Α6 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο ως προς τους άξονες Χ και Υ.
- Η επιφάνεια που μετράται είναι η επιφάνεια Α6.
- Αντίστοιχα στο δοκίμιο εφαρμόζεται οριακή συνθήκη με την οποία επιτρέπεται η μετατόπιση μόνο κατά την διεύθυνση που θα μετρηθεί δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση κατά τον Υ.

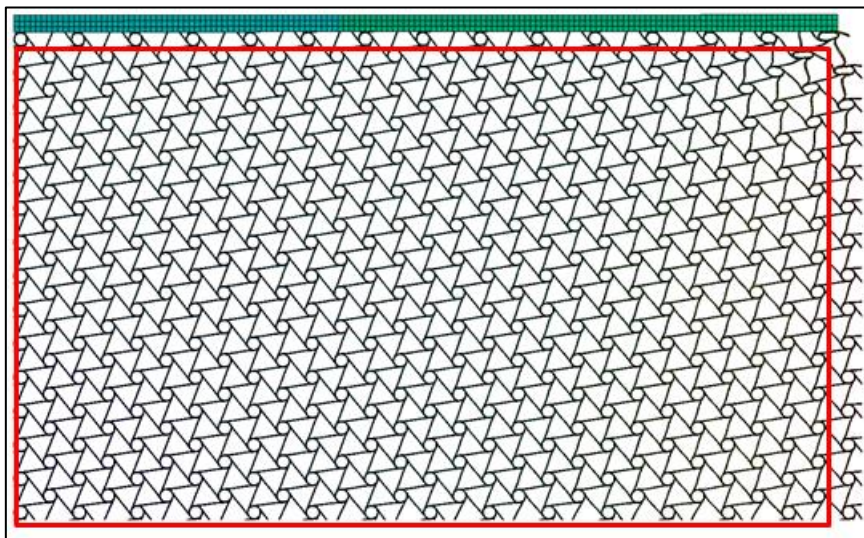


BOUNDARIES $V_{xy}$ (mm)			
	$U_x$	$U_y$	$U_z$
A1	1	-	0
A2	0	-	0
A3	-	-	0
A4	-	-	0
A5	-	0	0
A6	-	-	0

Πίνακας 2-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson  $V_{xy}$



Εικόνα 19-Hexachiral εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson  $V_{xy}$



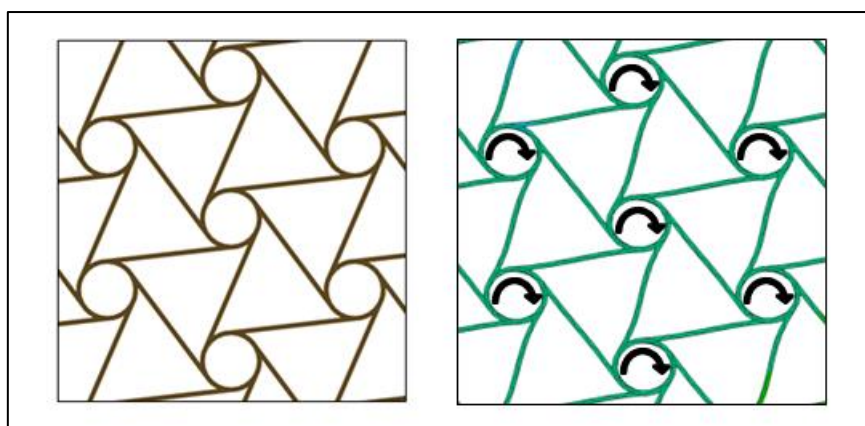
Εικόνα 20-παραμορφωμένη δομή Hexachiral κατά την μέτρηση λόγου Poisson  $V_{xy}$

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρείται ότι ως προς την βασική τους ιδιότητα η συγκεκριμένη δομή συμπεριφέρεται ως αυξητική δομή. Στο κόκκινο πλαίσιο φαίνεται το αρχικό μέγεθος της δομής σε σύγκριση με το παραμορφωμένο. Η θετική μετατόπιση ως προς τους δύο άξονες X και Y είναι εμφανής κάτι το οποίο παρουσιάζεται και στον παρακάτω πίνακα.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συμπεριφορά της αρχικής δομής που επιφέρει τα ανωτέρω αποτελέσματα.

Ο μηχανισμός αυτής της τοπολογίας λειτουργεί με τον εξής τρόπο:

- Οι κύκλοι λόγω του εφελκυσμού στην διεύθυνση X τείνουν να απομακρυνθούν ο ένας από τον άλλον.
- Αυτό το φαινόμενο επιδρά και στα στηρίγματα που είναι εφαιπτομενικά δεμένα στους κύκλους
- Έπειτα ο κύκλος στρέφεται και ουσιαστικά δίνει προς όλες τις διευθύνσεις μετατόπιση



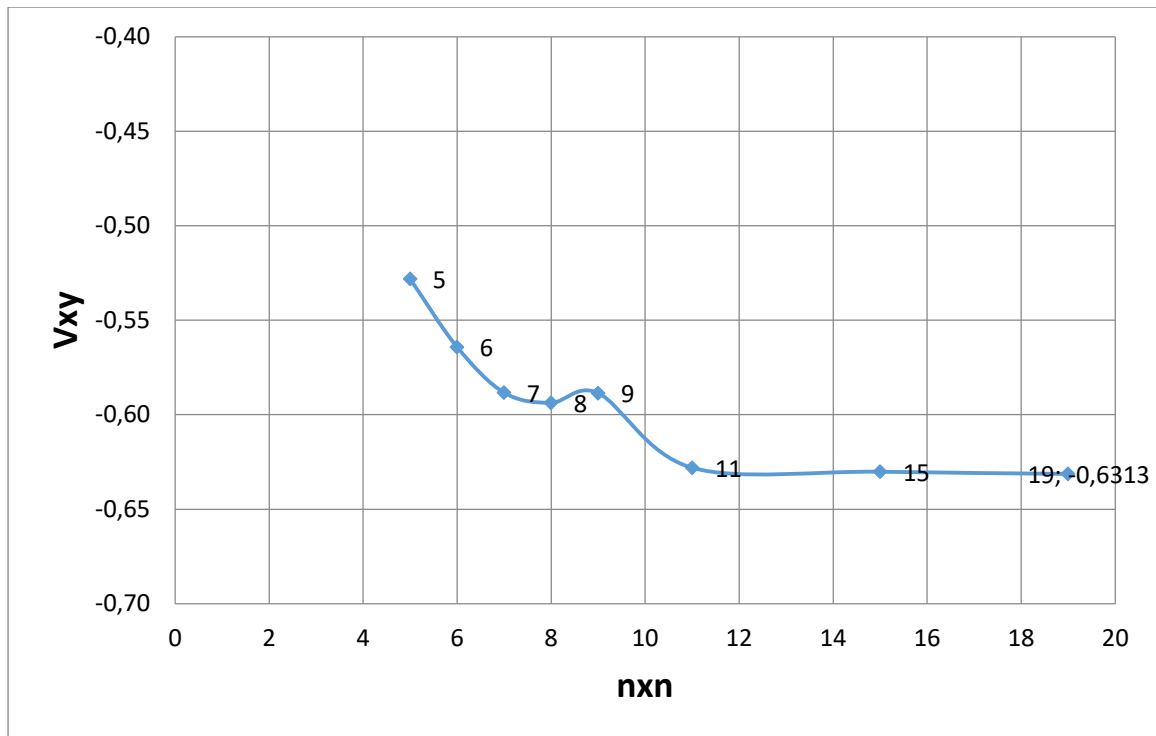
Εικόνα 21-Μηχανισμός λειτουργίας της Δομής Hexachiral κατά την μέτρηση λόγου Poisson  $\nu_{xy}$

Τα αποτελέσματα φαίνονται για τον λόγο Poisson φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στο αντίστοιχο διάγραμμα

$\nu_{xy}$								
$n \times n$	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9	11X11	15X15	19X19
<b>dy</b>	0,307	0,328	0,341	0,344	0,341	0,384	0,366	0,367
<b>Y</b>	133	163	193	223	253	313	433	552
<b>dx</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>X</b>	228,76	280,72	332,68	384,7	436,66	511,29	745,58	951,1
<b><math>\nu_{xy}</math></b>	-0,5282	-0,5642	-0,5883	-0,5937	-0,5886	-0,6281	-0,6302	-0,6313

Πίνακας 3- Hexachiral αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson  $\nu_{xy}$





Διάγραμμα 3- Hexachiral λόγος Poisson  $\nu_{xy}$

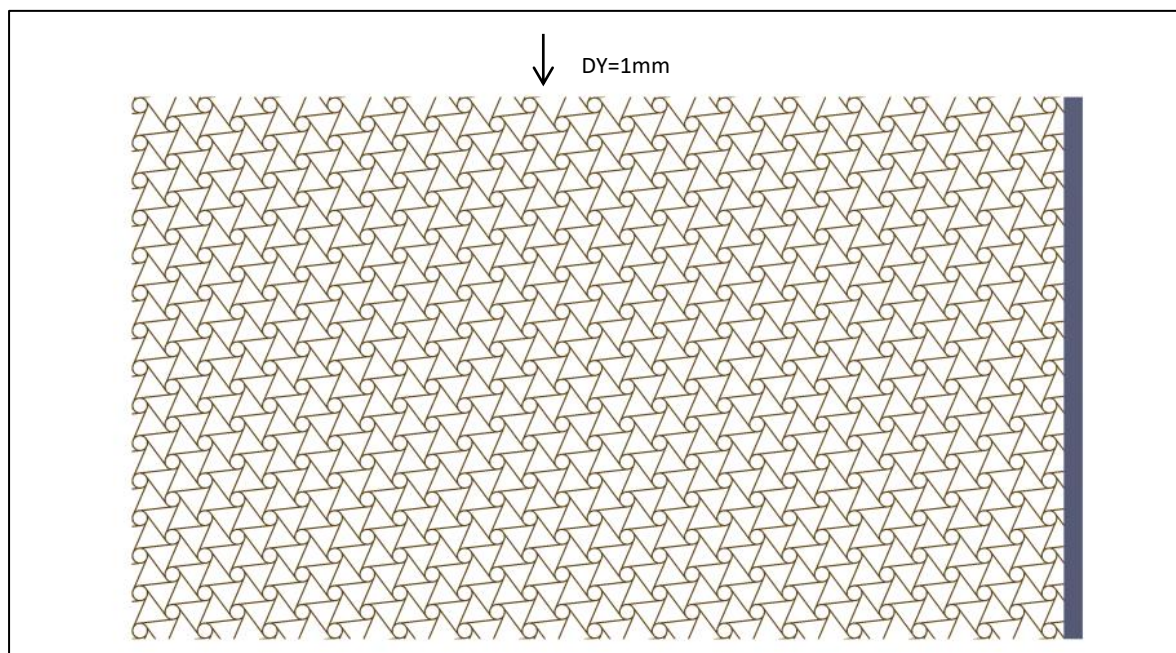
## Διεύθυνση YX

Παρακάτω περιγράφονται οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μετρηθεί ο λόγος Poisson.

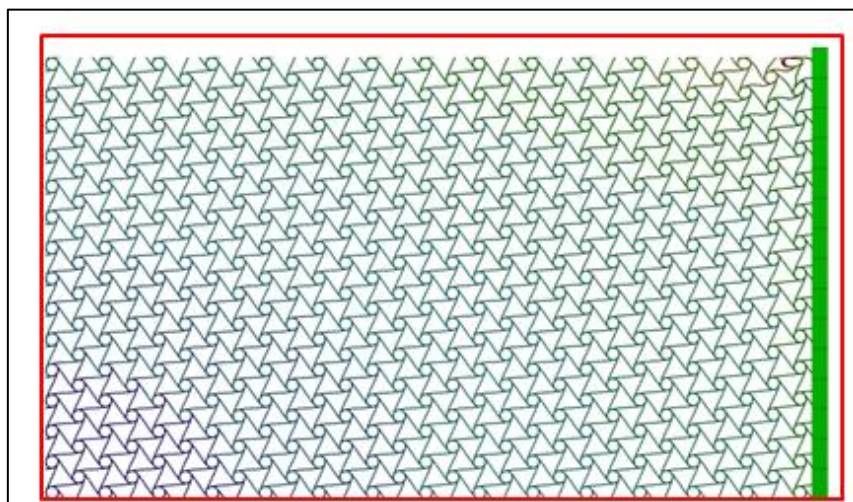
- Εφαρμόζεται μετατόπιση -1 mm στην πλευρά A6 στην διεύθυνση του άξονα Y.
- Στην επιφάνεια A2 και A5 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο στο επίπεδο των αντίστοιχων επιφανειών. Δηλαδή στην επιφάνεια A2 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες X και Z και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα Y. Στην επιφάνεια A5 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες Y και Z και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα X.
- Στις υπόλοιπες επιφάνειες A3, A4, A1 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο ως προς τους άξονες X και Y.
- Η επιφάνεια που μετράται η μετατόπιση είναι η επιφάνεια A1.
- Αντίστοιχα στο δοκίμιο εφαρμόζεται οριακή συνθήκη με την οποία επιτρέπεται η μετατόπιση μόνο κατά την διεύθυνση που θα μετρηθεί δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση κατά τον X.

BOUNDARIES $v_{yx}$ (mm)			
	$U_x$	$U_y$	$U_z$
A1	-	-	0
A2	0	-	0
A3	-	-	0
A4	-	-	0
A5	-	0	0
A6	-	-1	0

Πίνακας 4-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson  $v_{yx}$



Εικόνα 22-Hexachiral εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson  $v_{yx}$

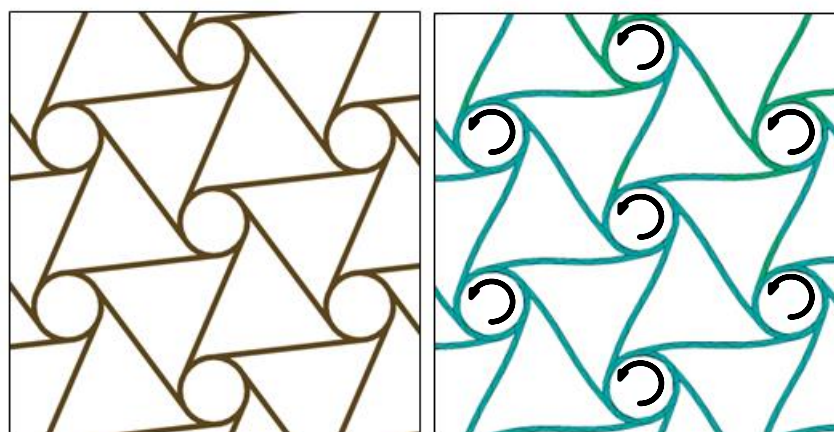


Εικόνα 23-Παραμορφωμένη δομή Hexachiral για μέτρηση λόγου Poisson  $v_{yx}$

Στην περίπτωση της αρνητικής μετατόπισης που εφαρμόζεται στην δομή φαίνεται ότι η συμπίεση εφαρμόζεται και στους δύο άξονες. Το αρχικό μέγεθος ορίζεται με κόκκινο χρώμα.

Ο μηχανισμός αυτού του φαινομένου εξηγείται ως εξής:

- Οι κύκλοι στην συμπίεση τείνουν να μετατοπιστούν ο ένας πιο κοντά στον άλλον λόγω της μετατόπισης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια A6 και της αντίδρασης στην επιφάνεια A5.
- Οι σύνδεσμοι μεταξύ των κύκλων λόγω της μετατόπισης των κύκλων συμπιέζονται και καμπυλώνονται. Λόγω αυτής της παραμόρφωσης ουσιαστικά πιέζουν τους κύκλους στο σημείο που εφάπτονται.
- Ο κύκλος αξιοποιεί αυτήν την μετατόπιση στρέφεται και έτσι ουσιαστικά απορροφάει την πίεση των συνδέσμων και ταυτόχρονα μειώνει την απόσταση μεταξύ των γειτονικών του κύκλων οι οποίοι μάλιστα συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Για αυτό το λόγο στις παρακάτω εικόνες φαίνεται πως η δομή λόγω της γεωμετρίας της συρρικνώνεται και στους δυο άξονες.

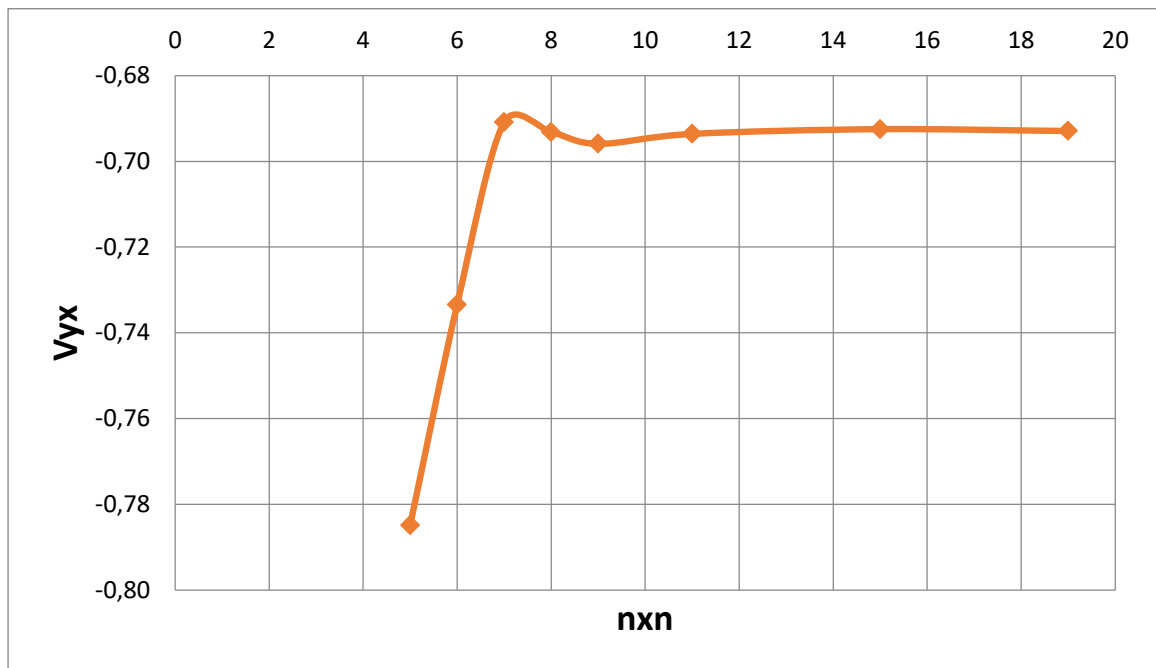


Εικόνα 24-Παραμόρφωση της δομής Hexachiral

V <sub>γχ</sub>								
n <sub>χ</sub> n	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9	11X11	15X15	19X19
d <sub>Y</sub>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Y	133	163	193	223	253	313	433	552
d <sub>X</sub>	-1,350	-1,263	-1,191	-1,196	-1,201	-1,133	-1,192	-1,193
X	228,76	280,72	332,68	384,7	436,66	511,29	745,58	951,1
V <sub>γχ</sub>	-0,7849	-0,7334	-0,6909	-0,6932	-0,6959	-0,6936	-0,6925	-0,6929

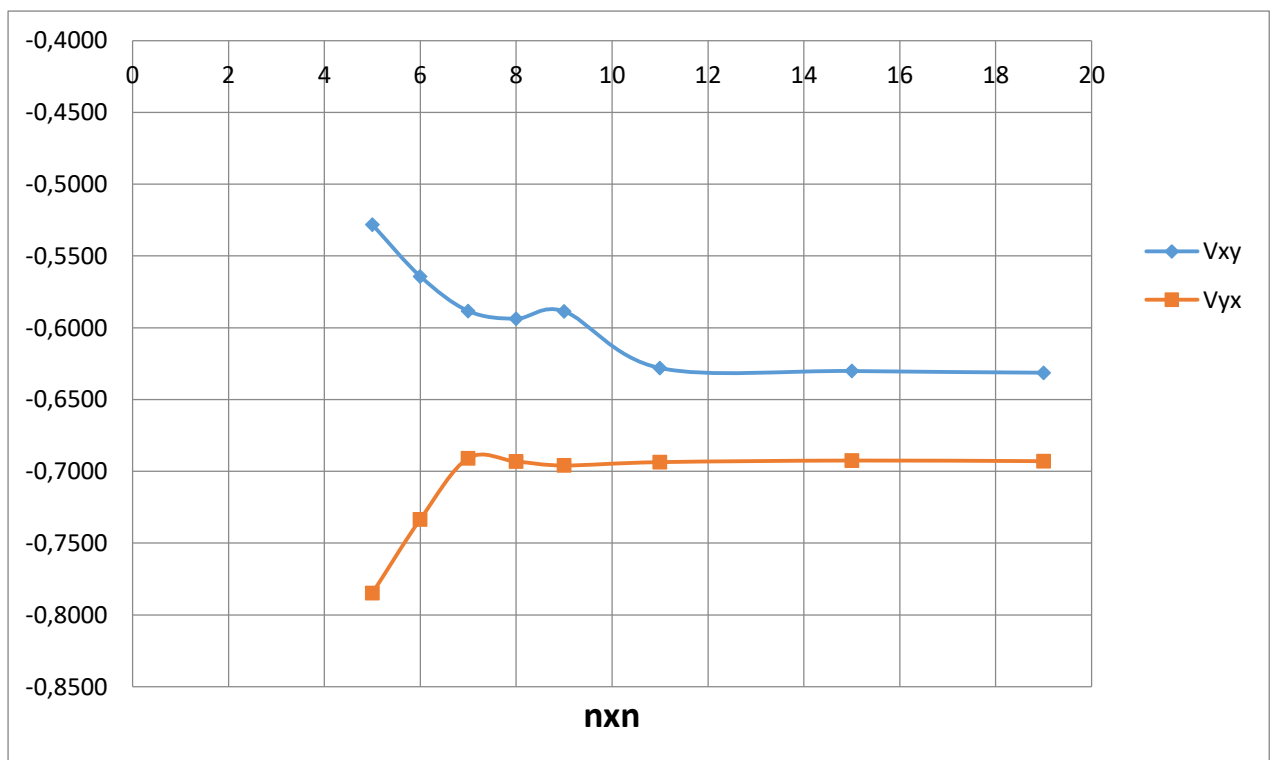
Πίνακας 5-Hexachiral αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson V<sub>γχ</sub>

Και το αντίστοιχο διάγραμμα:



Διάγραμμα 4-Hexachiral λόγος Poisson  $\nu_{y\chi}$

Και οι δύο λόγοι Poisson:



Διάγραμμα 5-Hexachiral  $\nu_{xy}$ - $\nu_{y\chi}$

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΜΗ HEXACHIRAL

Στο παραπάνω διάγραμμα 5 της δομής Hexachiral παρουσιάζονται αυξομειώσεις στους δύο λόγους Poisson όπου υπολογίστηκαν μέχρι να επιτευχθεί την διάταξη σύγκλισης. Αυτές οι αυξομειώσεις οφείλονται στα φαινόμενα που περιγράφτηκαν ανωτέρω. Πιθανές αιτίες είναι σημεία στη διάταξη που παραμορφώνονται περισσότερο σε σχέση με την υπόλοιπη δομή. Τέτοια για παράδειγμα είναι τα στοιχεία που βρίσκονται στις ακριανές γεωμετρίες της δομής.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι μετά την διάταξη 11X11 ουσιαστικά η καμπύλη συγκλίνει. Αξιοποιώντας το γεγονός ότι είναι ουσιαστικά η πρώτη τιμή σύγκλισης και η τελευταία διεξήχθη ανάλυση είναι η διάταξη 19X19 με δεδομένο ότι σε αυτές της δομές έχω τους ίδιους λόγους Poisson επιλέγω την διάταξη 15X15 παίρνοντας υπόψη το υπολογιστικό κόστος.

## ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

### Για τον άξονα xx

Εφαρμόζεται παραμόρφωση 1mm στην πλευρά A2.

$$E_{xx} = \frac{dU_x}{dx} \text{ (εξίσωση 8)}$$

Όπου  $dU_x=1\text{mm}$  και  $dx=745\text{ mm}$  άρα  $E_{xx}=0,0013$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται για τις πλευρές που ορίστηκαν παραπάνω

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	$U_x$	$U_y$	$U_z$
A1	0	0	0
A2	1	0	0
A3	-	0	0
A4	-	0	0
A5	-	0	0
A6	-	0	0

Πίνακας 6-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα X

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

$\epsilon$		x	y	z
	x	0,0013	0	0
	y	0	0	0
	z	0	0	0

Πίνακας 7- Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα X

$\sigma$ (MPa)		x	y	z
	x	1,47	0	0
	y	0	-0,90	0
	z	0	0	1,79

Πίνακας 8-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα X

Τα παραπάνω αποτελέσματα εισάγονται στο μητρώο και υπολογίζεται η πρώτη στήλη του πίνακα C όλα τα στοιχεία  $C_{i1}$ . Ο πίνακας όπως αναφέρθηκε ανωτέρω είναι συμμετρικός ως προς την κύρια διαγώνιο άρα η πρώτη γραμμή είναι ίδια με την πρώτη στήλη έτσι συμπληρώνονται τα στοιχεία της πρώτης γραμμής.

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται τα στοιχεία της 1<sup>ης</sup> γραμμής:

$$\begin{bmatrix} 1,47 \\ -0,90 \\ 1,79 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ 1378 & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ 0 & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0013 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Για τον άξονα ΥΥ

Εφαρμόζεται παραμόρφωση 1mm στην πλευρά A6

$$E_{yy} = \frac{dU_y}{dy} \text{ (εξίσωση 9)}$$

Όπου  $dU_y=1\text{mm}$  και  $dy=433 \text{ mm}$  άρα  $E_{yy}= 0,0023$

Και ως οριακές συνθήκες:

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
A1	0	-	0
A2	0	-	0
A3	0	-	0
A4	0	-	0
A5	0	0	0
A6	0	1	0

Πίνακας 9-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα Y

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0,0023	0
	z	0	0	0

Πίνακας 10-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Y

σ (MPa)		x	y	z
	x	-0,73	0	0
	y	0	2,594739	0
	z	0	0	4,17

Πίνακας 11-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Y

Υπολογίζονται τα στοιχεία της 2<sup>ης</sup> γραμμής.

$$\begin{bmatrix} -1,60 \\ 2,58 \\ 4,17 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & 1123 & 1815 & 0 & 0 & 0 \\ 1378 & 1815 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ 0 & 0 & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0,0023 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Για τον άξονα ZZ

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$E_{zz} = \frac{dU_z}{dz} \quad (\text{εξίσωση 10})$$

Όπου dU<sub>y</sub>=1mm και dy=25mm άρα E<sub>zz</sub>= 0,04



Και ως οριακές συνθήκες :

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	Ux	Uy	Uz
A1	0	0	-
A2	0	0	-
A3	0	0	0
A4	0	0	1
A5	0	0	-
A6	0	0	-

Πίνακας 12-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα Z

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0	0
	z	0	0	0,04

Πίνακας 13-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Z

σ (MPa)		x	y	z
	x	55,13	-9,36	0,00
	y	-9,36	72,62	0,00
	z	0,00	0,00	415,34

Πίνακας 14-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Z

Υπολογίζονται τα στοιχεία της 3<sup>ης</sup> γραμμής

$$\begin{bmatrix} 55,13 \\ 72,62 \\ 415,34 \\ -9,36 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & 1123 & 1815 & 0 & 0 & 0 \\ 1378 & 1815 & 10383 & -234 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -234 & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,04 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Εδώ παρατηρείται ένα πολύ σημαντικό στοιχείο το οποίο ουσιαστικά αποδίδει την βασική λειτουργία της δομής. Κατά τον άξονα ZZ προκύπτει ότι οι τάσεις που έχει δυνατότητα να παραλάβει αυτή η δομή είναι πολύ μεγαλύτερες από τους άλλους δυο άξονες αυτό το στοιχείο είναι που δίνει την ιδιότητα στην συγκεκριμένη δομή να παραλαμβάνει μεγάλα διατμητικά φορτία.



## ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Στις παρακάτω περιπτώσεις εφαρμόζεται γωνιακή παραμόρφωση σε απλή διάτμηση. Όποτε εφαρμόζεται παραμόρφωση στα αντίστοιχα επίπεδα των αξόνων και μετρούνται οι τάσεις που αναπτύσσονται με την αντίστοιχη διεύθυνση.

### Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο YX

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$\gamma_{yx} = \frac{dUx}{Y} = \frac{1}{433} = 0,0023 \text{ (εξίσωση 11)}$$

$$E_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = 0,00115$$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται για τις πλευρές που ορίστηκαν παραπάνω

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	Ux	Uy	Uz
A1	-	-	0
A2	-	-	0
A3	-	-	0
A4	-	-	0
A5	0	0	0
A6	1	0	0

Πίνακας 15-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο YX

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0,00115	0
	y	0,00115	0	0
	z	0	0	0

Πίνακας 16-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XY

σ (MPa)		x	y	z
	x	0	0,62	0
	y	0,62	0	0
	z	0	0	0

Πίνακας 17-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XY

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζεται το στοιχείο  $C_{44}$ .

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,62 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & 1123 & 1815 & 0 & 0 & 0 \\ 1378 & 1815 & 10383 & -234 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -234 & 272 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0023 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ZY

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$\gamma_{zy} = \frac{dU_y}{z} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ (εξίσωση 12)}$$

$$E_{zy} = \frac{\gamma_{zy}}{2} = 0,02$$

Ως οριακές συνθήκες ορίζονται :

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
A1	0	-	-
A2	0	-	-
A3	0	0	0
A4	0	1	0
A5	0	-	-
A6	0	-	-

Πίνακας 18-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο YZ

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0	0,02
	z	0	0,02	0

Πίνακας 19-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YZ

σ (MPa)		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0	71,39
	z	0	71,39	0

Πίνακας 20-Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YZ

Με βάση τον παραπάνω τανυστή τάσεων και παραμορφώσεων συμπληρώνεται ο πίνακας των τάσεων και των παραμορφώσεων. Υπολογίζεται η 5<sup>η</sup> γραμμή και κυρίως το στοιχείο  $C_{55}$  αφού τα υπόλοιπα είναι μηδέν.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 71,39 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & 1123 & 1815 & 0 & 0 & 0 \\ 1378 & 1815 & 10383 & -234 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -234 & 226 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1784 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,04 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ZX

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$\gamma_{zx} = \frac{dU_x}{z} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ (εξίσωση 13)}$$

$$E_{zx} = \frac{\gamma_{zx}}{2} = 0,02$$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται:

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	$U_x$	$U_y$	$U_z$
A1	-	0	-
A2	-	0	-
A3	0	0	0
A4	1	0	-
A5	-	0	-
A6	-	0	-

Πίνακας 21-Δομή Hexachiral: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο XZ

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

$\epsilon$		x	y	z
	x	0	0	0,02
	y	0	0	0
	z	0,02	0	0

Πίνακας 22-Δομή Hexachiral: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XZ

<b>σ (MPa)</b>		<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
	<b>x</b>	0	0	70,82
	<b>y</b>	0	0	0
	<b>z</b>	70,82	0	0

Πίνακας 23- Δομή Hexachiral: Τανυστής τάσεων για για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XZ

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία υπολογίζεται η τελευταία γραμμή και κυρίως το στοιχείο  $C_{66}$  καθώς όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της γραμμής είναι 0.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 70,82 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & 1123 & 1815 & 0 & 0 & 0 \\ 1378 & 1815 & 10383 & -234 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -234 & 226 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1784 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1770 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,04 \end{bmatrix}$$

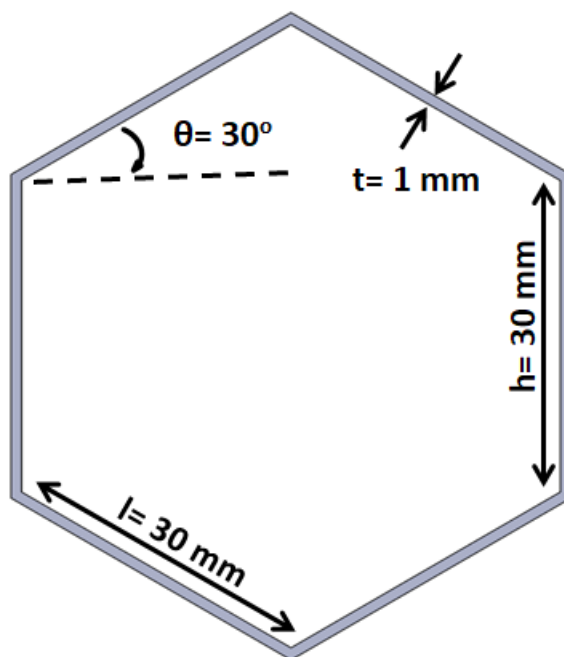
## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΗΤΡΩΟΥ

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα διαμορφώνεται το παρακάτω μητρώο για την δομή Hexachiral

$$C_{hexachiral} = \begin{bmatrix} 1132 & -699 & 1378 & 0 & 0 & 0 \\ -699 & 1123 & 1815 & 0 & 0 & 0 \\ 1378 & 1815 & 10383 & -234 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -234 & 226 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1784 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1770 \end{bmatrix}$$

## ΚΥΨΕΛΩΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ-HONEYCOMB

Η αρχική δομή honeycomb αποτελείται από ένα εξάγωνο στο οποίο ορίζονται οι διαστάσεις των πλευρών του την γωνία  $\theta$  και το πλάτος του. Το εξάγωνο επαναλαμβάνεται και ενώνεται με ίδια δημιουργώντας τη δομή honeycomb.

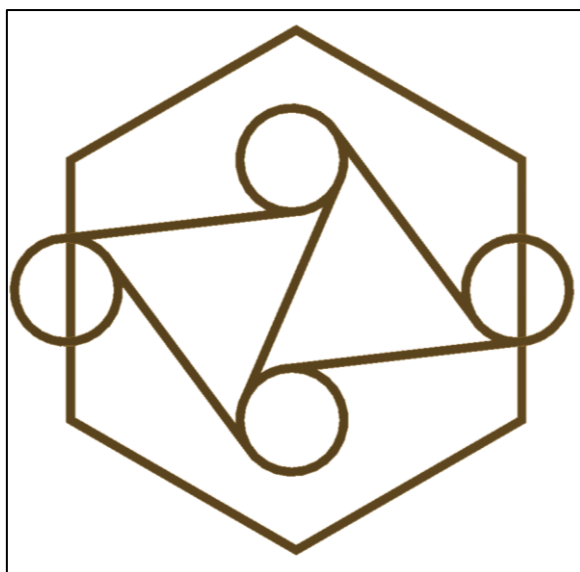


Εικόνα 25-HONEYCOMB UNIT CELL

Στη συγκριτική μελέτη που λαμβάνει χώρα χρειάζεται οι διαστάσεις αυτές να οριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε η δομή Honeycomb να είναι αντίστοιχη της δομής του Hexachiral.

Με βάση αυτό ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- $t=1 \text{ mm}$
- $h=30 \text{ mm}$
- $l=30 \text{ mm}$
- $\theta=30^\circ$



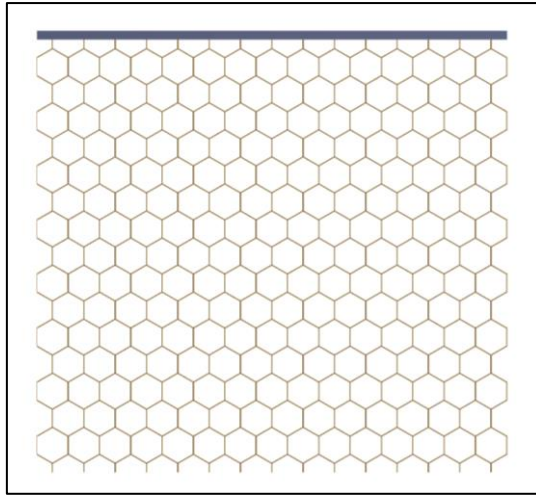
Εικόνα 26-Σύγκριση Hexachiral unit-Honeycomb unit

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι με βάση τις διαστάσεις που έχουν οριστεί οι δύο δομές διέπονται από την σωστή αντιστοιχία ώστε να διεξαχθεί ολοκληρωμένα η σύγκριση και ταυτόχρονα έχουν το ίδιο πάχος  $t=1\text{mm}$ .

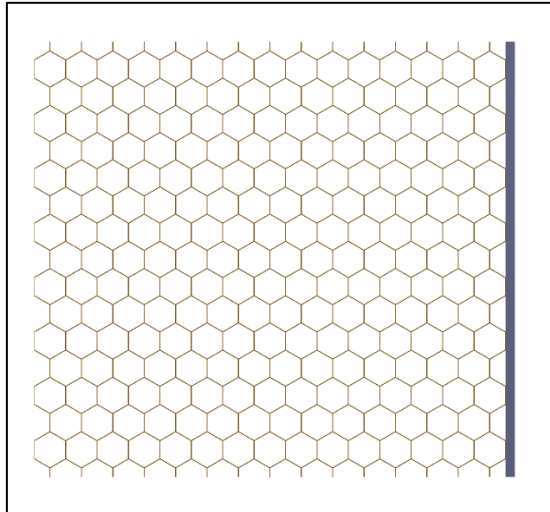
Η μεθοδολογία για την διαμόρφωση του μητρώου της δομής Honeycomb θα ακολουθηθεί η ίδια μεθοδολογία με την δομή Hexachiral. Θα διαμορφωθούν δομές nxn και σκοπός είναι να εντοπιστεί η δομή εκείνη στην οποία εξαλείφονται φαινόμενα που επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Και εδώ θα υπολογιστεί ο λόγος Poisson ως μέτρο για να επιτευχθούν τα ανωτέρω.

Για να υπολογιστεί ο λόγος Poisson εφαρμόστηκε σε όλα τα παραπάνω δοκίμια ξεχωριστά μετατόπιση στον άξονα X και Y και μετρήθηκε η μετατόπιση στους άξονες Y και X αντιστοίχως.

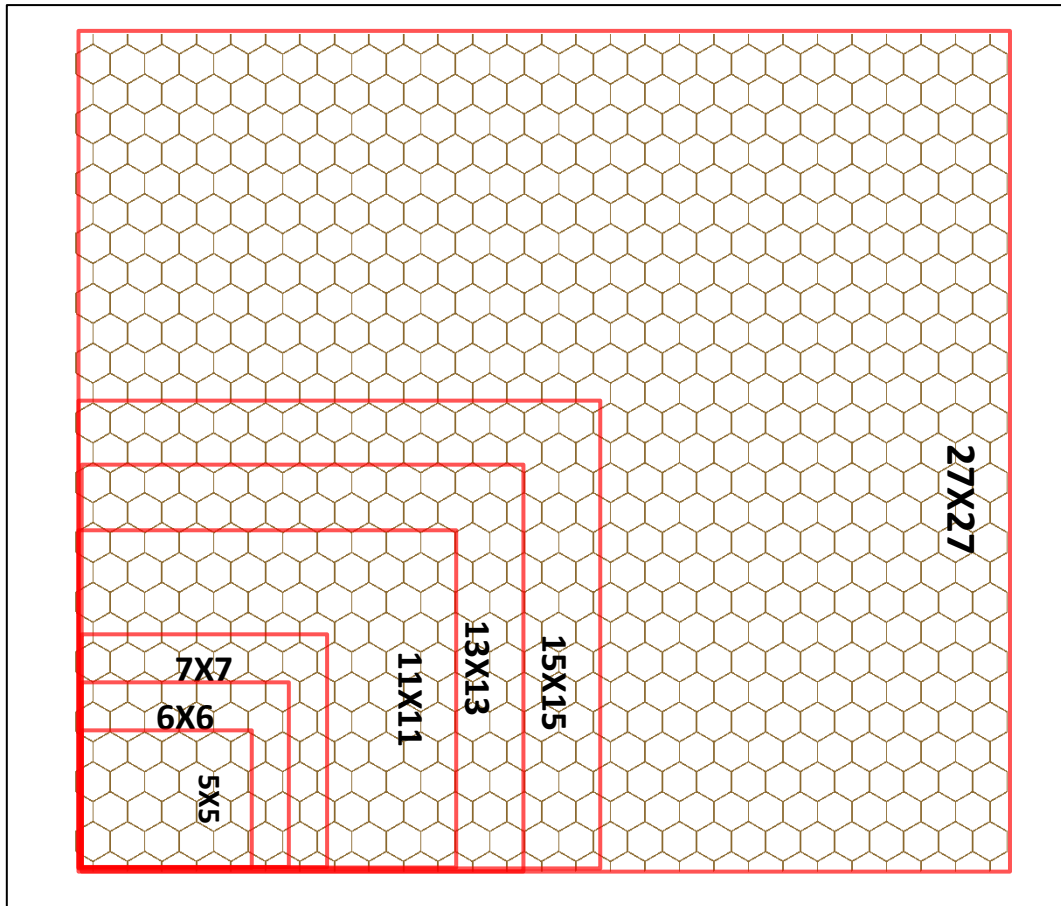
Αντιστοίχως με την δομή Hexachiral εφαρμόζεται δοκίμιο για την μέτρηση της μετατόπισης λόγω της διακοπτόμενης γεωμετρίας με τα χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 27-Δομή Honeycomb: Δοκίμο για μέτρηση αξονικής μετατόπισης



Εικόνα 28- Δομή Honeycomb: Δοκίμο για μέτρηση αξονικής μετατόπισης



Εικόνα 29- Δομή Honeycomb: Ορισμός δοκιμών για την μέτρηση των λόγων Poisson

## Υπολογισμός λόγων Poisson

### Διεύθυνση ΧΥ

Οι οριακές συνθήκες για την μέτρηση του λόγου Poisson:

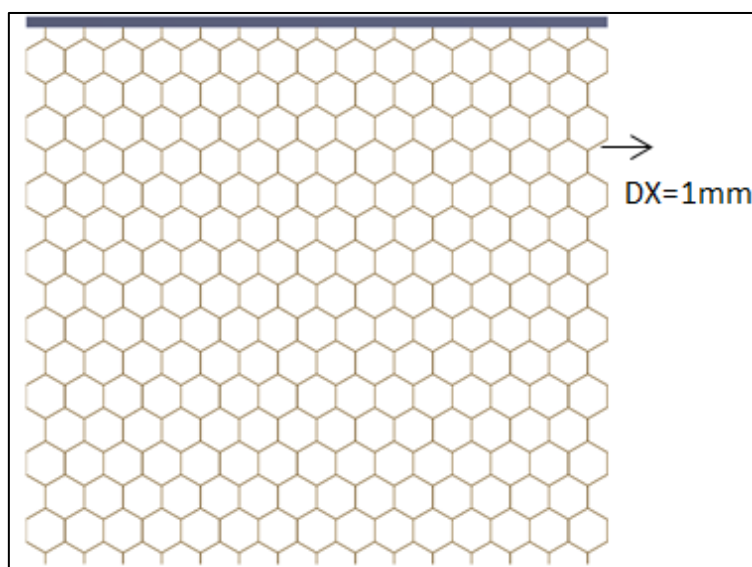
- Εφαρμόζεται μετατόπιση 1mm στην πλευρά A1 στην διεύθυνση του άξονα Χ.
- Στην επιφάνεια A2 και A5 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο στο επίπεδο των αντίστοιχων επιφανειών. Δηλαδή στην επιφάνεια A1 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες Χ και Ζ και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα Υ. Στην επιφάνεια A5 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες Υ και Ζ και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα Χ.
- Στις υπόλοιπες επιφάνειες A3, A4, A6 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο ως προς τους άξονες Χ και Υ.
- Η επιφάνεια που μετράται είναι η επιφάνεια A6.



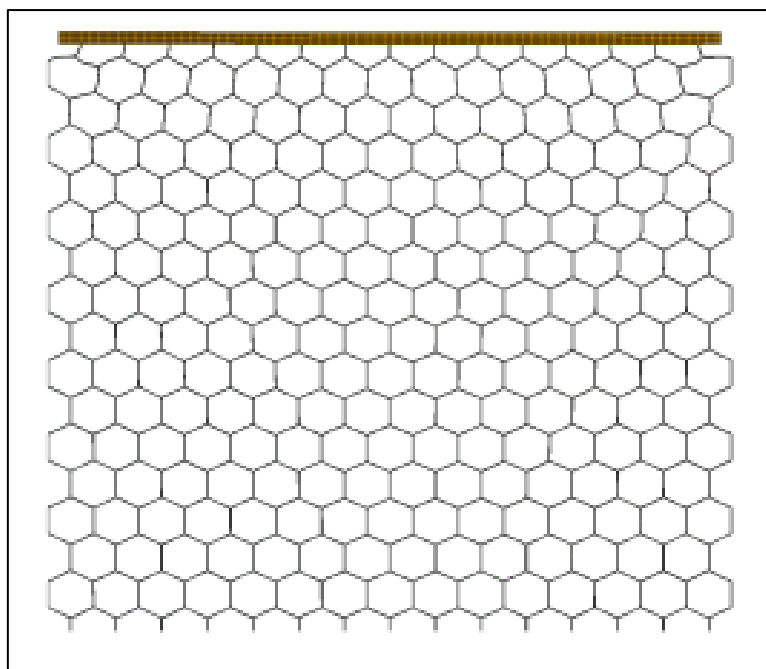
- Αντίστοιχα στο δοκίμιο εφαρμόζεται οριακή συνθήκη με την οποία επιτρέπεται η μετατόπιση μόνο κατά την διεύθυνση που θα μετρηθεί δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση κατά τον Y.

BOUNDARIES $V_{xy}$ (mm)			
	$U_x$	$U_y$	$U_z$
<b>A1</b>	1	-	0
<b>A2</b>	0	-	0
<b>A3</b>	-	-	0
<b>A4</b>	-	-	0
<b>A5</b>	-	0	0
<b>A6</b>	-	-	0

Πίνακας 24-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson  $V_{xy}$



Εικόνα 30- Honeycomb εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson  $V_{xy}$

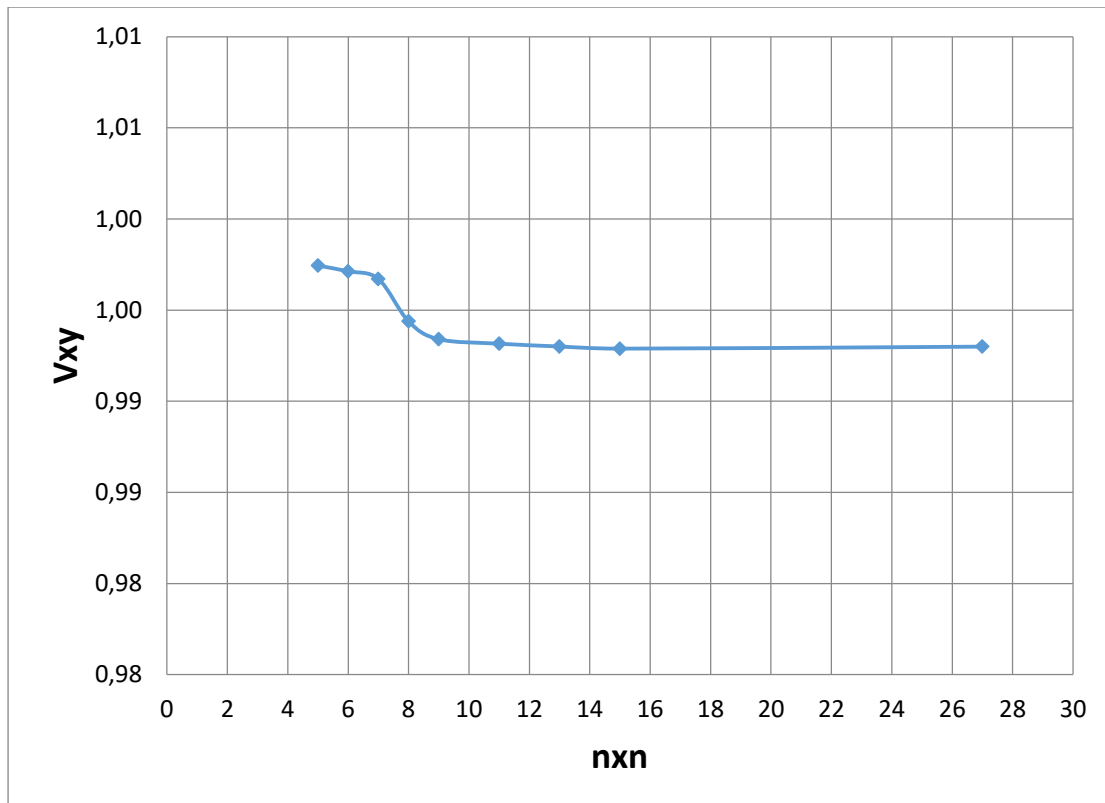


Εικόνα 31-Παραμορφωμένη δομή Honeycomb για μέτρηση λόγου Poisson  $\nu_{xy}$

Τα αποτελέσματα και το αντίστοιχο διάγραμμα φαίνονται παρακάτω:

$\nu_{xy}$									
$n \times n$	5X5	6X6	7x7	8x8	9x9	11X11	13X13	15X15	27x27
<b>dy</b>	-1,0347	-0,8623	-0,9852	-0,8622	-0,9550	-0,9376	-0,9255	-0,9167	-0,8916
<b>Y</b>	275,21	275,21	366,94	367,79	458,68	550,42	642,15	733,89	1284,30
<b>dx</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>X</b>	265,30	318,26	371,22	424,18	477,14	583,06	688,98	794,90	1430,42
<b><math>\nu_{xy}</math></b>	0,9974	0,9971	0,9967	0,9944	0,9934	0,9932	0,9930	0,9929	0,9930

Πίνακας 25 -Honeycomb αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson  $\nu_{xy}$



Διάγραμμα 6 -Honeycomb λόγος Poisson  $\nu_{xy}$

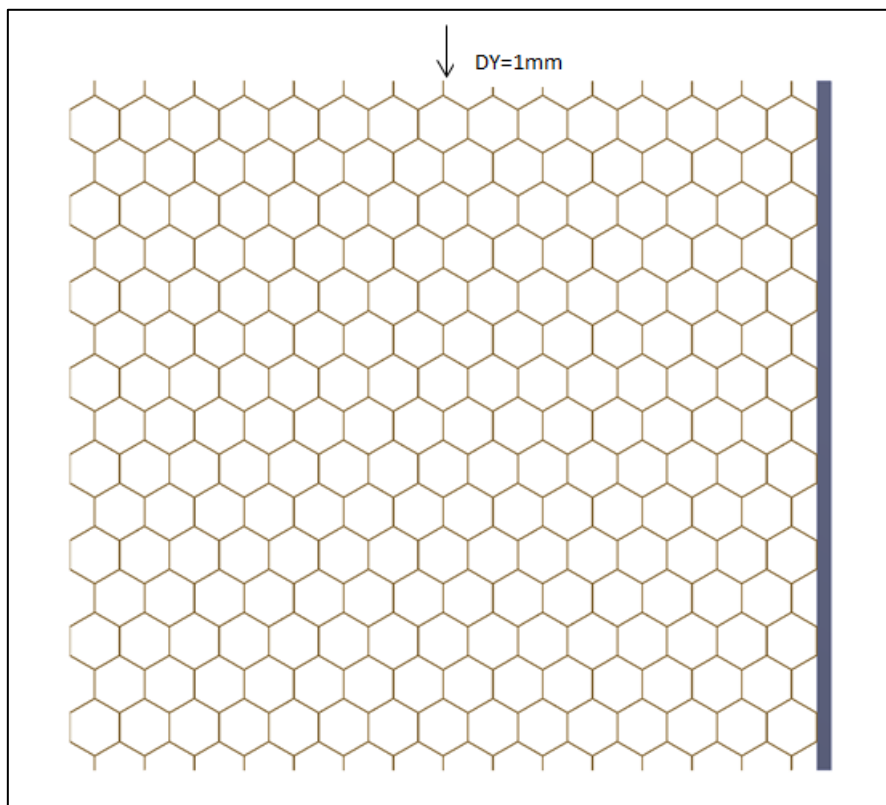
## Διεύθυνση YX

Παρακάτω περιγράφονται οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μετρηθεί ο λόγος Poisson.

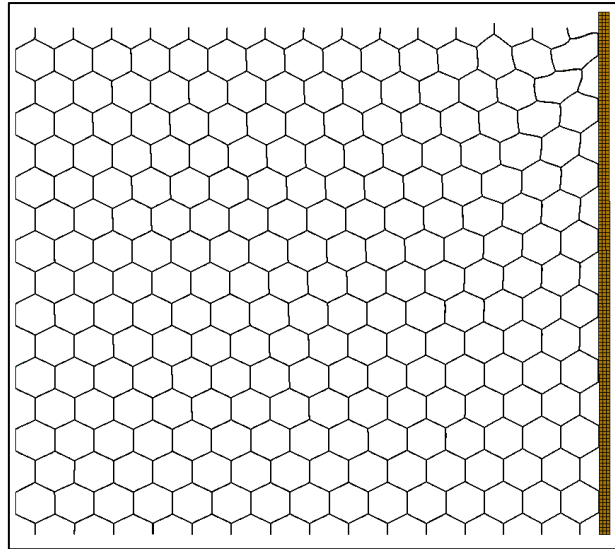
- Εφαρμόζεται μετατόπιση -1 mm στην πλευρά A6 στην διεύθυνση του άξονα Y.
- Στην επιφάνεια A2 και A5 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο στο επίπεδο των αντίστοιχων επιφανειών. Δηλαδή στην επιφάνεια A2 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες X και Z και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα Y. Στην επιφάνεια A5 δεν επιτρέπεται η μετατόπιση ως προς τους άξονες Y και Z και επιτρέπεται μόνο ως προς τον άξονα X.
- Στις υπόλοιπες επιφάνειες A3, A4, A1 εφαρμόζεται οριακή συνθήκη που επιτρέπει την μετατόπιση μόνο ως προς τους άξονες X και Y.
- Η επιφάνεια που μετράται η μετατόπιση είναι η επιφάνεια A1.
- Αντίστοιχα στο δοκίμιο εφαρμόζεται οριακή συνθήκη με την οποία επιτρέπεται η μετατόπιση μόνο κατά την διεύθυνση που θα μετρηθεί δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση κατά τον X.

BOUNDARIES $v_{yx}$ (mm)			
α/α Επιφάνειας	$U_x$	$U_y$	$U_z$
A1	-	-	0
A2	0	-	0
A3	-	-	0
A4	-	-	0
A5	-	0	0
A6	-	-1	0

Πίνακας 26-Οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του λόγου Poisson  $v_{yx}$



Εικόνα 32-Honeycomb εφαρμογή μετατόπισης για μέτρηση λόγου Poisson  $v_{yx}$

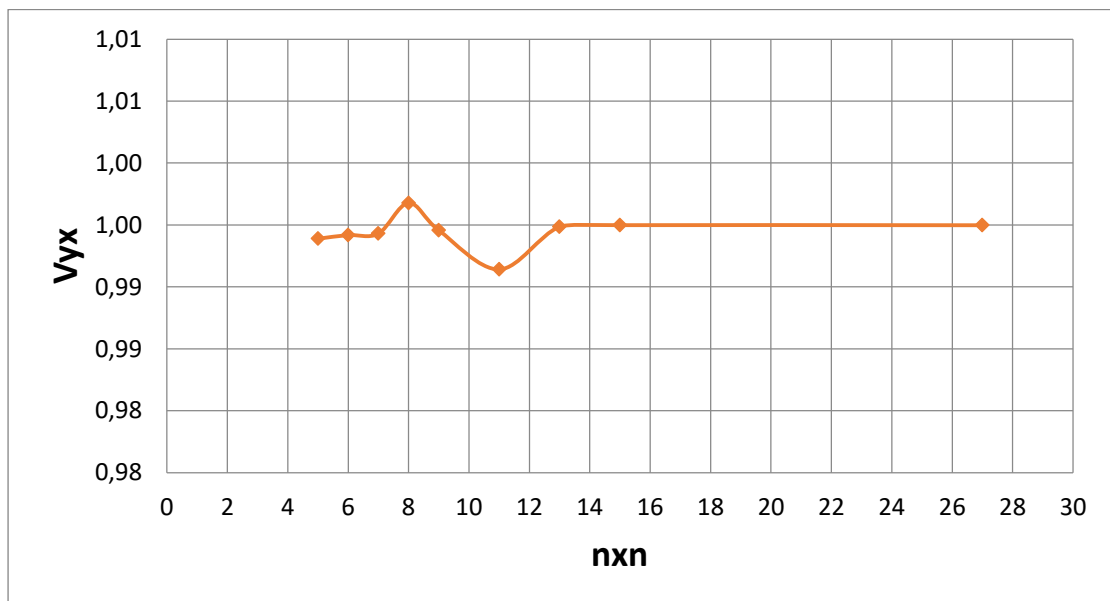


Εικόνα 33-Παραμορφωμένη δομή Honeycomb για μέτρηση λόγου Poisson  $\nu_{yx}$

Τα αποτελέσματα και το αντίστοιχο διάγραμμα:

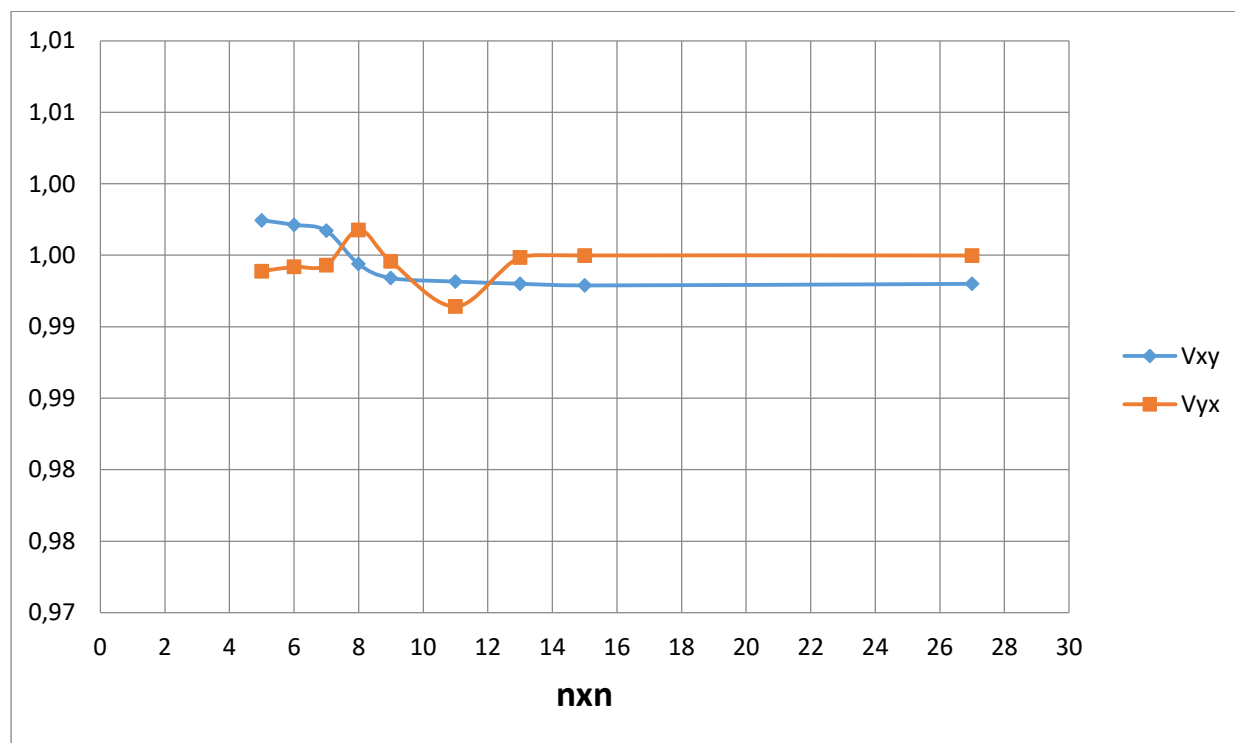
$\nu_{yx}$									
$n \times n$	5X5	6X6	7x7	8x8	9x9	11X11	13X13	15X15	27x27
<b>dy</b>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<b>Y</b>	275,21	275,21	366,94	367,79	458,68	550,42	642,15	733,89	1284,30
<b>dx</b>	0,958	1,150	1,006	1,150	1,035	1,050	1,067	1,078	1,108
<b>X</b>	265,30	318,26	371,22	424,18	477,14	583,06	688,98	794,90	1430,42
<b><math>\nu_{yx}</math></b>	0,9939	0,9942	0,9943	0,9968	0,9946	0,9914	0,9948	0,9950	0,9950

Πίνακας 27-Hexachiral αποτελέσματα μέτρησης λόγου Poisson  $\nu_{yx}$



Διάγραμμα 7-Honeycomb λόγος Poisson  $\nu_{yx}$

Και οι δυο λόγοι Poisson σε σύγκριση:



Διάγραμμα 8- Honeycomb Vxy-Vyx

Στα παραπάνω διαγράμματα μέχρι να επιτευχθεί η τιμή σύγκλισης για τον κάθε λόγο Poisson εμφανίζονται όπως περιγράφηκαν και ανωτέρω αυξομειώσεις στις τιμές. Αντιστοίχως με το Hexachiral παρατηρείται τα ακριανά στοιχεία να επιδρούν στην γενικότερη εξέλιξη του φαινομένου.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι μετά την διάταξη 13X13 ουσιαστικά υπάρχει σύγκλιση της καμπύλης. Αξιοποιώντας το γεγονός ότι είναι ουσιαστικά η πρώτη τιμή σύγκλισης αλλά και παίρνοντας υπόψη το υπολογιστικό κόστος επιλέγεται την διάταξη 15X15 για το honeycomb όπως και για το Hexachiral.

Αποτελεί ενδιαφέρον στοιχείο για περαιτέρω έρευνα ως προς την μοντελοποίηση ότι παρουσιάζουν όμοιες ιδιότητες ως προς την σύγκλιση τους.

# ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE) ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΜΗ HONEYCOMB

## ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

### Για τον άξονα XX

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$E_{xx} = \frac{dU_x}{X} \text{ (εξίσωση 14)}$$

Όπου  $dU_x=1\text{mm}$  και  $dx=794.9\text{ mm}$  άρα  $E_{xx}= 0,0012$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται:

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	$U_x$	$U_y$	$U_z$
A1	0	0	0
A2	1	0	0
A3	-	0	0
A4	-	0	0
A5	-	0	0
A6	-	0	0

Πίνακας 28-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα X

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

$\epsilon$		x	y	z
	x	0,0012	0	0
	y	0	0	0
	z	0	0	0

Πίνακας 29-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα X

$\sigma$ (MPa)		x	y	z
	x	1,105	0	0
	y	0	1,010	0
	z	0	0	1,461

Πίνακας 30-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα X

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα που προκύπτουν από τον ταυστή των τάσεων και των παραμορφώσεων υπολογίζεται η πρώτη στήλη και η πρώτη γραμμή του μητρώου.

$$\begin{bmatrix} 1,105 \\ 1,010 \\ 1,461 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ 1218 & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ 0 & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0012 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Για τον άξονα ΥΥ

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$E_{yy} = \frac{dU_y}{y} \text{ (εξίσωση 15)}$$

Όπου  $dU_y=1\text{mm}$  και  $dy=733,89 \text{ mm}$  άρα  $E_{yy}= 0,0013$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται:

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
A1	0	-	0
A2	0	-	0
A3	0	-	0
A4	0	-	0
A5	0	0	0
A6	0	1	0

Πίνακας 31-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα Υ

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0,0013	0
	z	0	0	0

Πίνακας 32 -Δομή Honeycomb: Ταυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Υ



<b>σ (MPa)</b>		<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
	x	1,09	0	0
	y	0	0,937	0
	z	0	0	0,688

Πίνακας 33-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Y

Με βάση τα αποτελέσματα συμπληρώνεται την υπόλοιπη δεύτερη γραμμή και στήλη.

$$\begin{bmatrix} 1,09 \\ 1,015 \\ 0,688 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & 782 & 530 & 0 & 0 & 0 \\ 1218 & 530 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ 0 & 0 & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0,0013 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### Για τον άξονα ZZ

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$E_{zz} = \frac{dU_z}{z} \quad (\text{εξίσωση 16})$$

Όπου  $dU_y=1\text{mm}$  και  $dy=25\text{mm}$  άρα  $E_{zz}=0,04$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται:

<b>BOUNDARIES (mm)</b>			
<b>α/α Επιφάνειας</b>	<b>U<sub>x</sub></b>	<b>U<sub>y</sub></b>	<b>U<sub>z</sub></b>
<b>A1</b>	0	0	-
<b>A2</b>	0	0	-
<b>A3</b>	0	0	0
<b>A4</b>	0	0	1
<b>A5</b>	0	0	-
<b>A6</b>	0	0	-

Πίνακας 34-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά τον άξονα Z

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

<b>ε</b>		<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
	x	0	0	0
	y	0	0	0
	z	0	0	0,04

Πίνακας 35-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Z

<b>σ (MPa)</b>		<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
	<b>x</b>	48,72	0	0
	<b>y</b>	0	21,18	0
	<b>z</b>	0	0	120,68

Πίνακας 36-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα Z

$$\begin{bmatrix} 48,72 \\ 21,18 \\ 120,68 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & 782 & 530 & 0 & 0 & 0 \\ 1218 & 530 & 3017 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,04 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Αντιστοίχως με την δομή hexachiral παρατηρείται ότι οι ορθή τάση κατά τον zz ανεβαίνει η αντοχή του αντιστοίχως και στις διευθύνσεις x και y. Η πιο ολοκληρωμένη σύγκριση γίνεται παρακάτω.

## ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Στις παρακάτω περιπτώσεις εφαρμόζεται γωνιακή παραμόρφωση σε απλή διάτμηση. Όποτε εφαρμόζεται παραμόρφωση στα αντίστοιχα επίπεδα των αξόνων και μετρούνται οι τάσεις που αναπτύσσονται με την αντίστοιχη διεύθυνση.

### Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο YX

Εφαρμόζεται στο επίπεδο XY παραμόρφωση (strain)

$$\gamma_{yx} = \frac{dUx}{Y} = \frac{1}{733,89} = 0,0013 \text{ (εξίσωση 17)}$$

$$E_{yx} = \frac{\gamma_{yx}}{2} = 0,00065$$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται:

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	Ux	Uy	Uz
A1	-	-	0
A2	-	-	0
A3	-	-	0
A4	-	-	0
A5	0	0	0
A6	1	0	0

Πίνακας 37-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο YX

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0,00065	0
	y	0,00065	0	0
	z	0	0	0

Πίνακας 38-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YX

σ (MPa)		x	y	z
	x	0	0,0011	0
	y	0,0011	0	0
	z	0	0	0

Πίνακας 39-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YX

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0022 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & 782 & 530 & 0 & 0 & 0 \\ 1218 & 530 & 3017 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,0013 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο ZY

Εφαρμόζεται παραμόρφωση (strain)

$$\gamma_{zy} = \frac{dU_y}{z} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ (εξίσωση 18)}$$

$$E_{zy} = \frac{\gamma_{zy}}{2} = 0,02$$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται για τις πλευρές που ορίστηκαν παραπάνω

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
A1	0	-	-
A2	0	-	-
A3	0	0	0
A4	0	1	0
A5	0	-	-
A6	0	-	-

Πίνακας 40-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο YZ

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0	0,02
	z	0	0,02	0

Πίνακας 41-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YZ

σ (MPa)		x	y	z
	x	0	0	0
	y	0	0	20,47
	z	0	20,47	0

Πίνακας 42-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο YZ

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 20,47 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & 782 & 530 & 0 & 0 & 0 \\ 1218 & 530 & 3017 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 511 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,04 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## Διατμητική Παραμόρφωση κατά το επίπεδο YZ

Εφαρμόζεται διατμητική παραμόρφωση (strain)

$$\gamma_{zx} = \frac{dUx}{z} = 1/25 = 0,04 \text{ (εξίσωση 19)}$$

$$E_{zx} = \frac{\gamma_{zx}}{2} = 0,02$$

Και ως οριακές συνθήκες ορίζονται για τις πλευρές που ορίστηκαν παραπάνω

BOUNDARIES (mm)			
α/α Επιφάνειας	Ux	Uy	Uz
A1	0	-	-
A2	0	-	-
A3	0	0	0
A4	1	0	0
A5	0	-	-
A6	0	-	-

Πίνακας 43-Δομή Honeycomb: Οριακές συνθήκες για την εφαρμογή διατμητικής παραμόρφωσης κατά το επίπεδο ZX

Τα αποτελέσματα ύστερα από την ανάλυση μέσω αντιδράσεων των κόμβων έχουν ως εξής:

ε		x	y	z
	x	0	0	0,02
	y	0	0	0
	z	0,02	0	0

Πίνακας 44-Δομή Honeycomb: Τανυστής παραμορφώσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XZ

σ (MPa)		x	y	z
	x	0	0	20,37
	y	0	0	0
	z	20,37	0	0

Πίνακας 45-Δομή Honeycomb: Τανυστής τάσεων για διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XZ

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 20,37 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & 782 & 530 & 0 & 0 & 0 \\ 1218 & 530 & 3017 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 511 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 510 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,04 \end{bmatrix}$$

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΗΤΡΩΟΥ

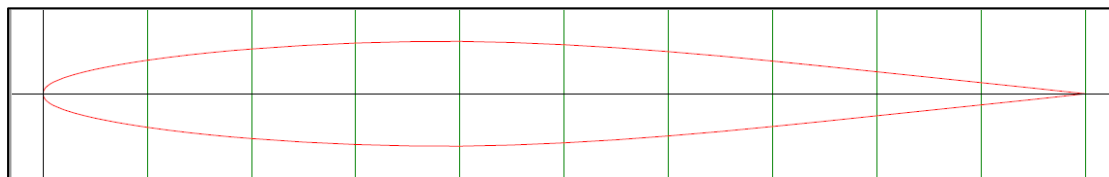
Το μητρώο για την δομή honeycomb με βάση την ανάλυση είναι το εξής:

$$C_{honeycomb} = \begin{bmatrix} 920 & 842 & 1218 & 0 & 0 & 0 \\ 842 & 782 & 530 & 0 & 0 & 0 \\ 1218 & 530 & 3017 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 511 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 510 \end{bmatrix}$$

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ

Σε αυτό το κομμάτι της διπλωματικής επιλέγεται μια αεροτομή από την οποία θα δημιουργηθεί πτέρυγα στην οποία ως πυρήνα θα ενσωματωθούν οι δύο δομές.

Συγκεκριμένα επιλέγεται η αεροτομή  $NACA\ 64A-010\ 10.0\%$ <sup>[13]</sup>



Εικόνα 34-NACA 64A-010 10.0%

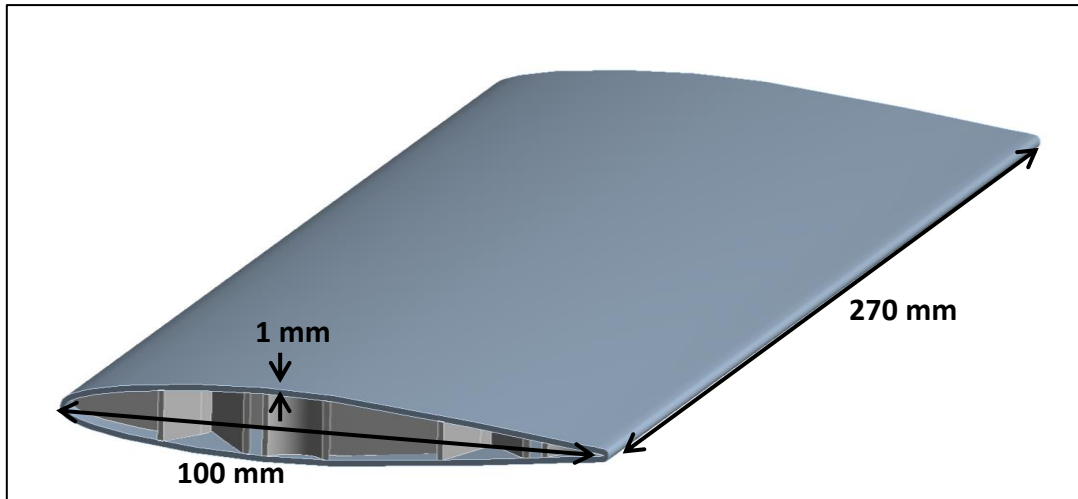
Η αεροτομή αυτή χρησιμοποιείται σε πολεμικά αεροσκάφη F-22 RAPTOR



Εικόνα 35-F-22 RAPTOR

Οι διαστάσεις της πτέρυγας που διαμορφώνονται είναι οι εξής διαστάσεις:

- πάχος  $t=1\text{mm}$
- το μήκος είναι  $270\text{ mm}$
- το πλάτος είναι  $100\text{ mm}$

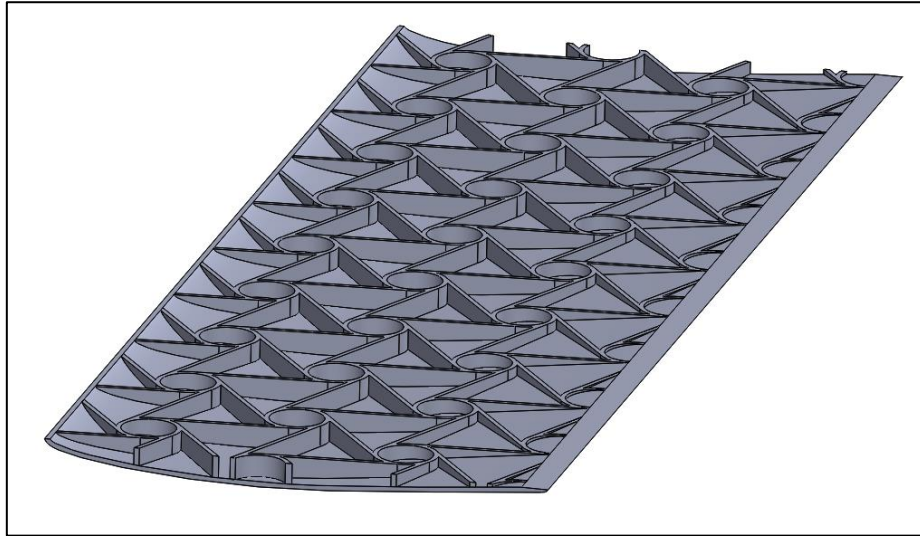


Εικόνα 36-Διαστάσεις πτέρυγας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχέδια σε Solidworks στα οποία φαίνεται ότι ο πυρήνας με τις δύο δομές που επιλέχθηκαν.

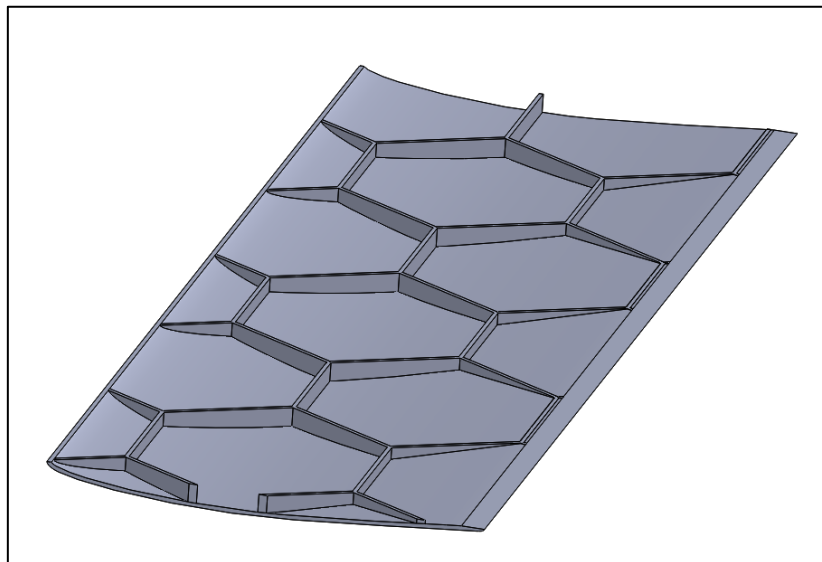


## NACA HEXACHIRAL FILL



Εικόνα 37-NACA HEXACHIRAL FILL (SECTION)

## NACA HONEYCOMB FILL



Εικόνα 38-NACA HONEYCOMB FILL (SECTION)

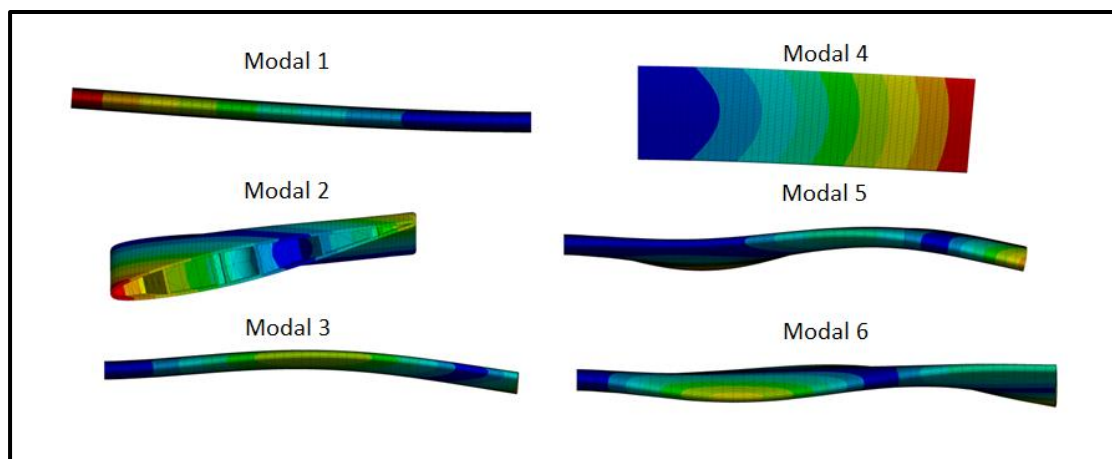
## ΕΥΡΕΣΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Διεξάγεται ανάλυση ώστε να υπολογιστούν τις ιδιοσυχνότητες των αντίστοιχων αεροτομών με τις δομές τους.

	ALUMINIUM ALLOY	
	HEXACHIRAL	HONEYCOMB
Modal 1 (Hz)	139	150
Modal 2 (Hz)	738	731
Modal 3 (Hz)	834	825
Modal 4 (Hz)	926	1010
Modal 5 (Hz)	2073	1675
Modal 6 (Hz)	2288	1864

Πίνακας 46-Συγκριτική παρουσίαση ιδιοσυχνότητας πτέρυγας με ενσωματωμένες δομές Hexachiral-Honeycomb

Παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες από την ανάλυση για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων των δύο δομών.



Εικόνα 39-Modal analysis

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Για να μπορέσει να διεξαχθεί δοκιμή κάμψης τριών σημείων κατασκευάζονται τα ανωτέρω δοκίμια ως ιδιοκατασκευές. Χρησιμοποιείται φύλλο πλαστικού πολυαιθυλενίου (PE) πάχους 1 mm.

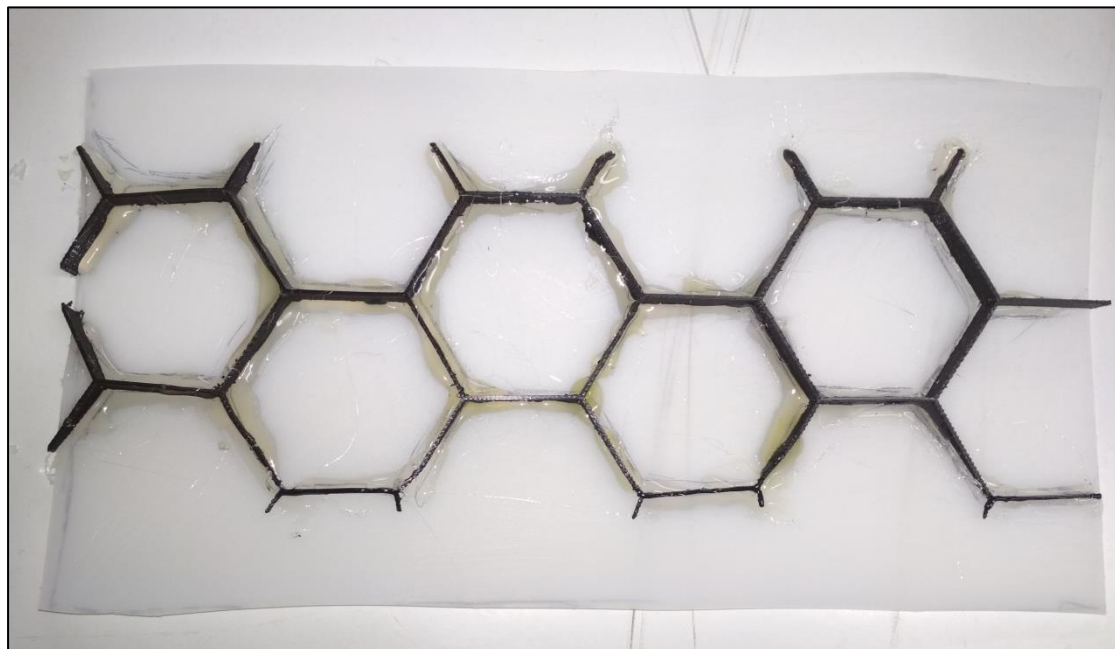
Οι δύο δομές τυπώνονται σε 3d Printer (Creality CR-10S5). Η δομή Honeycomb σε υλικό PET και η δομή Hexachiral σε PLA. Επιλέγεται η δομή Hexachiral να τυπωθεί σε υλικό PLA λόγω της δυσκολίας της συνθετότητας της γεωμετρίας.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκριτικά οι μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών σε κάμψη.

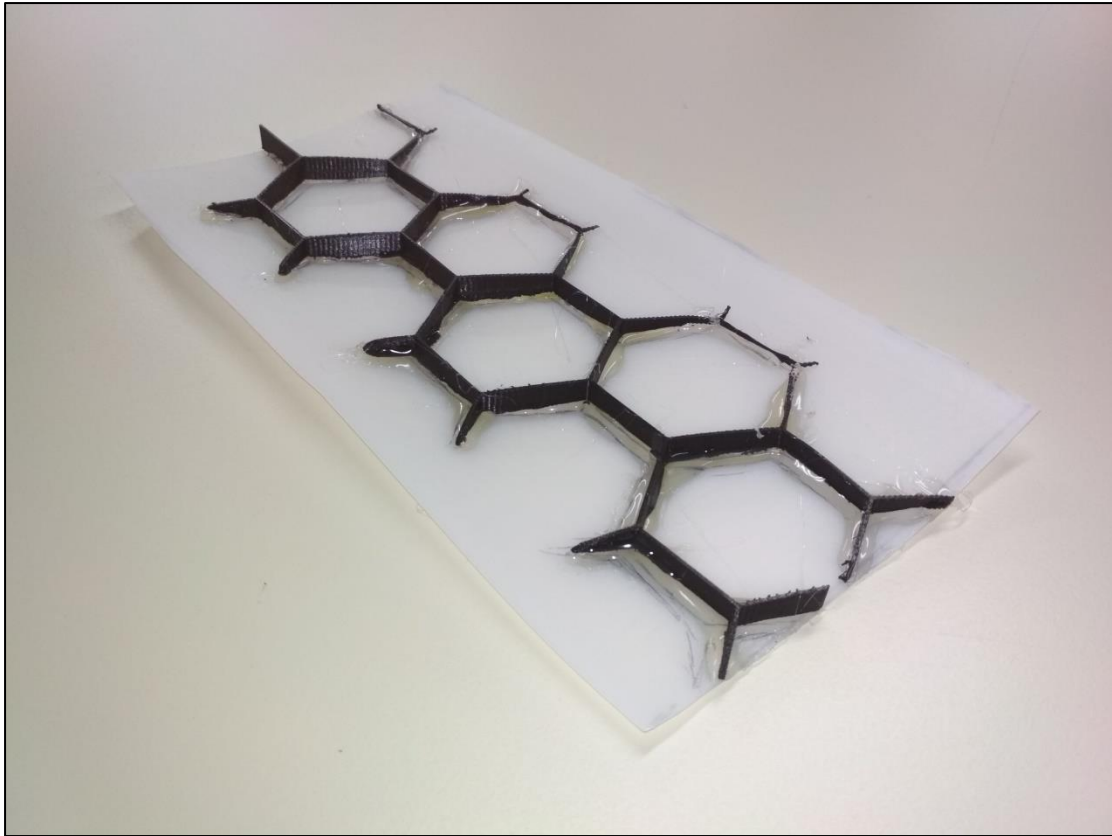
	PLA	PET
Flexural Strength (MPa)	106	125

Πίνακας 47-Συγκριση μηχανικών ιδιοτήτων σε κάμψη υλικών PLA-PET

Το υλικό Honeycomb κολλήθηκε με θερμοκόλλα στο κάτω φύλλο του πλαστικού. Έπειτα κολλήθηκε και το πάνω φύλλο.

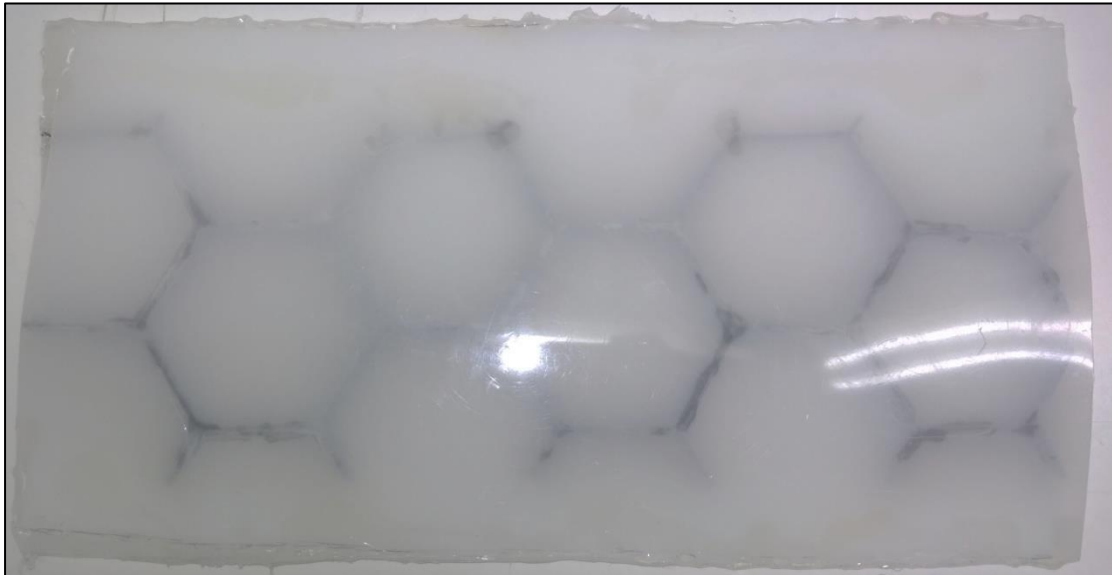


Εικόνα 40-Κάτοψη πτέρυγας δομής Honeycomb κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού

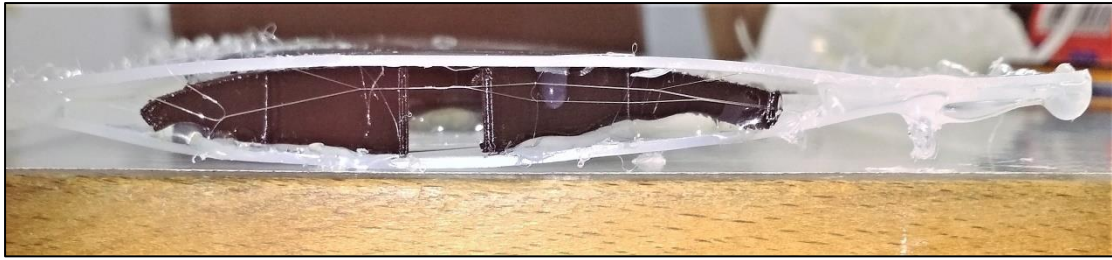


Εικόνα 41- Δομή Honeycomb κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού

Έπειτα κολλήθηκε και το πάνω φύλλο και διαμορφώθηκε η πτέρυγα με βάση το σχέδιο της αεροτομής.



Εικόνα 42-Κάτοψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Honeycomb

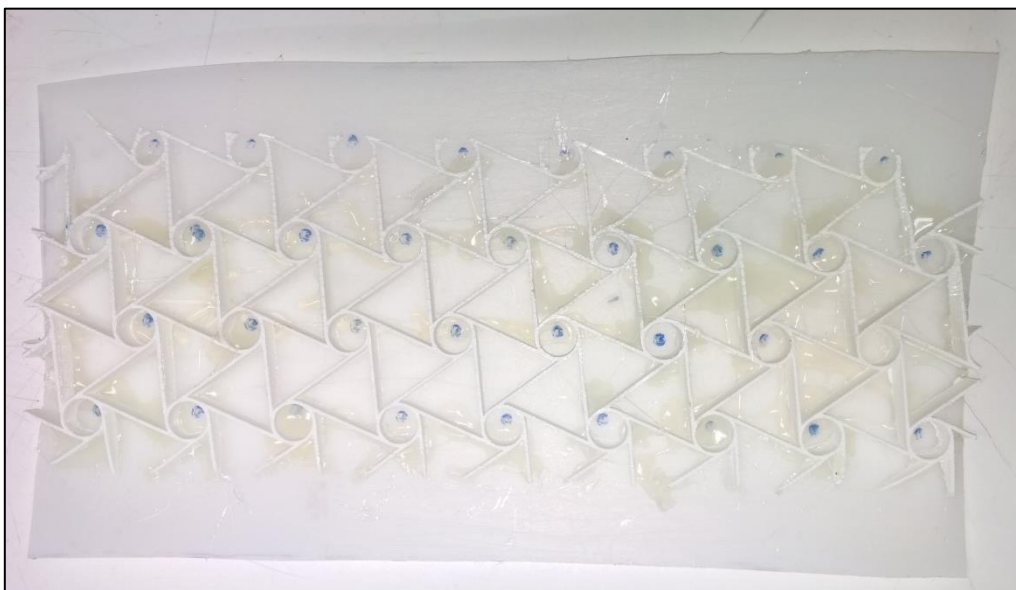


Εικόνα 43-Πλάγια όψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Honeycomb



Εικόνα 44-Πτέρυγα με εσωτερική δομή Honeycomb

Αντίστοιχα διαμορφώνεται και η πτέρυγα που έχει ως πυρήνα την δομή Hexachiral



Εικόνα 45-Κάτοψη πτέρυγας δομής Hexachiral κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού





Εικόνα 46-Η Δομή Hexachiral κολλημένη στο κάτω φύλλο πλαστικού

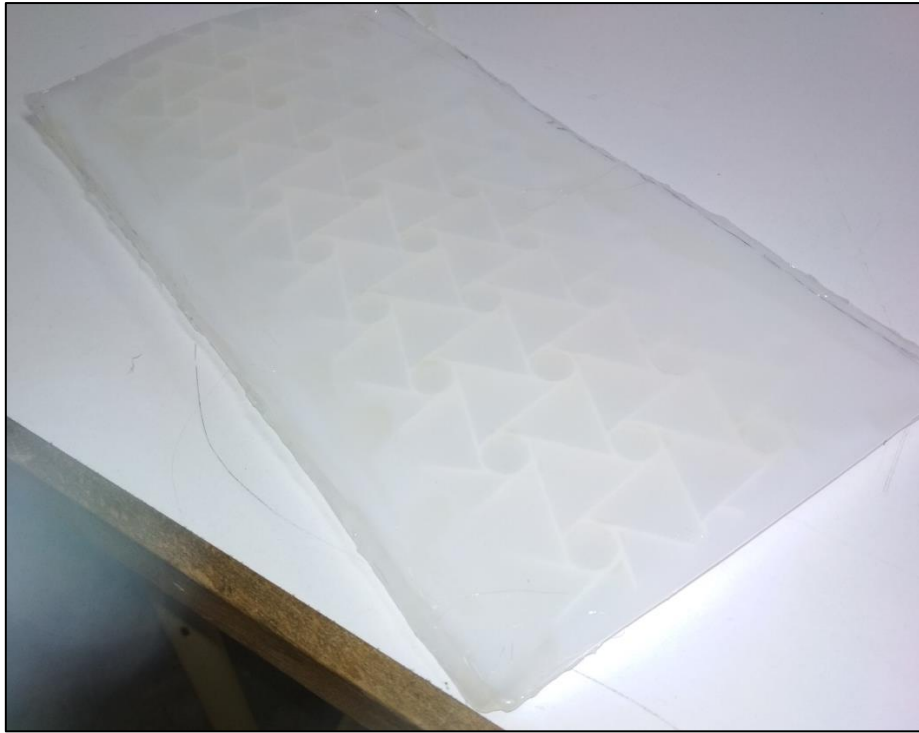
Αντιστοίχως διαμορφώνεται η πτέρυγα



Εικόνα 47-Κάτοψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Hexachiral



Εικόνα 48-Πλάγια όψη πτέρυγας με εσωτερική δομή Hexachiral



Εικόνα 49-Πτέρυγα με εσωτερική δομή Hexachiral

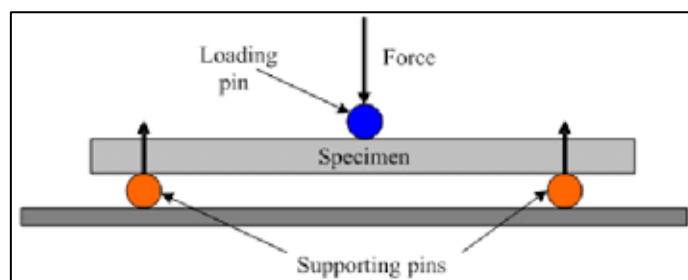
## ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Αφού κατασκευάστηκαν οι δύο πτέρυγες διεξήχθησαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε μηχανή INSTRON 4482 Με μέγιστη δύναμη 100 kN.



Εικόνα 50-INSTRON 4482

Η κάμψη τριών σημείων έχει την εξής διάταξη:

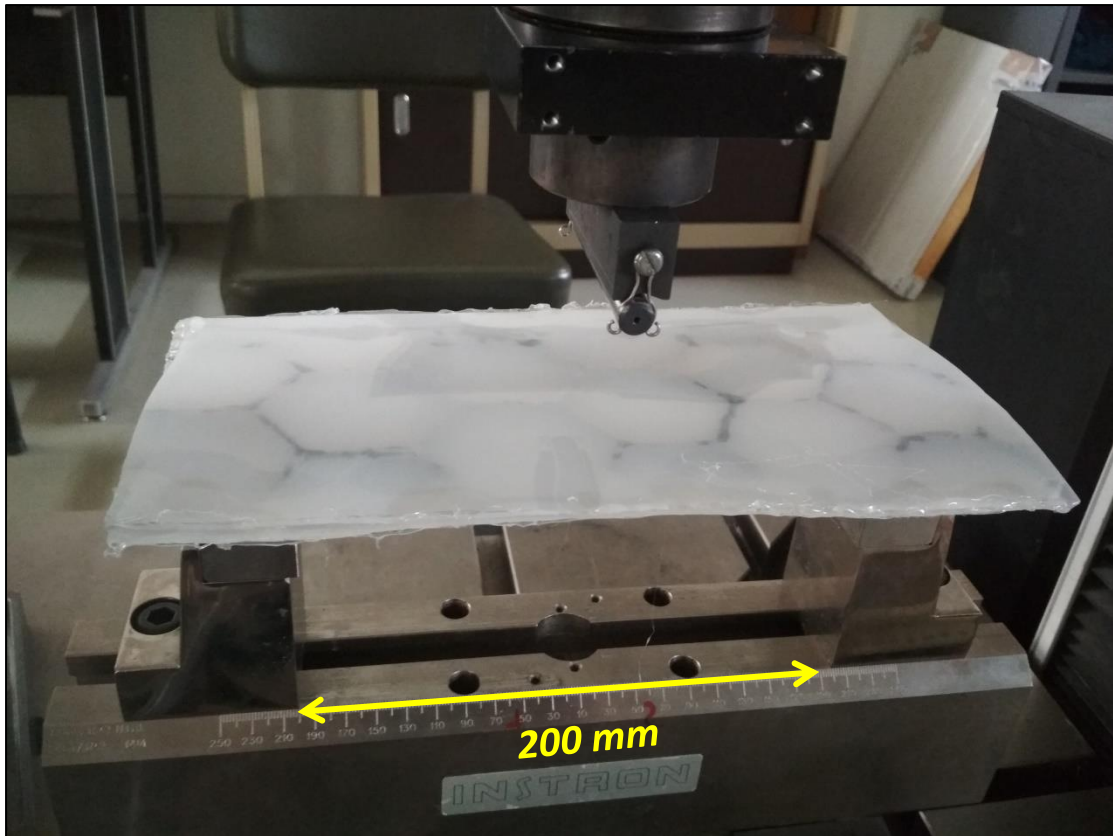


Εικόνα 51-Διάταξη πειράματος κάμψης τριών σημείων<sup>[14]</sup>

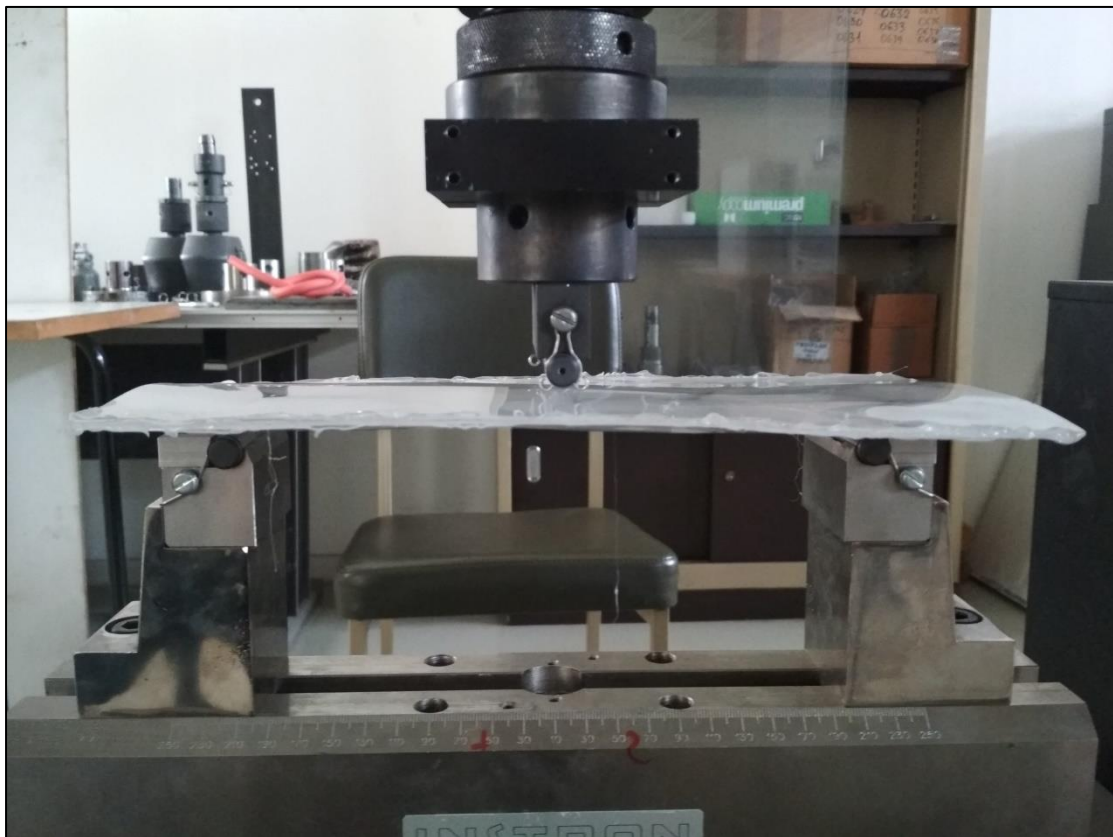
Η απόσταση μεταξύ των supporting pins (span) ορίστηκε στα 200 mm.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η διάταξη όπου στήθηκε το πείραμα και για τις δύο δομές.



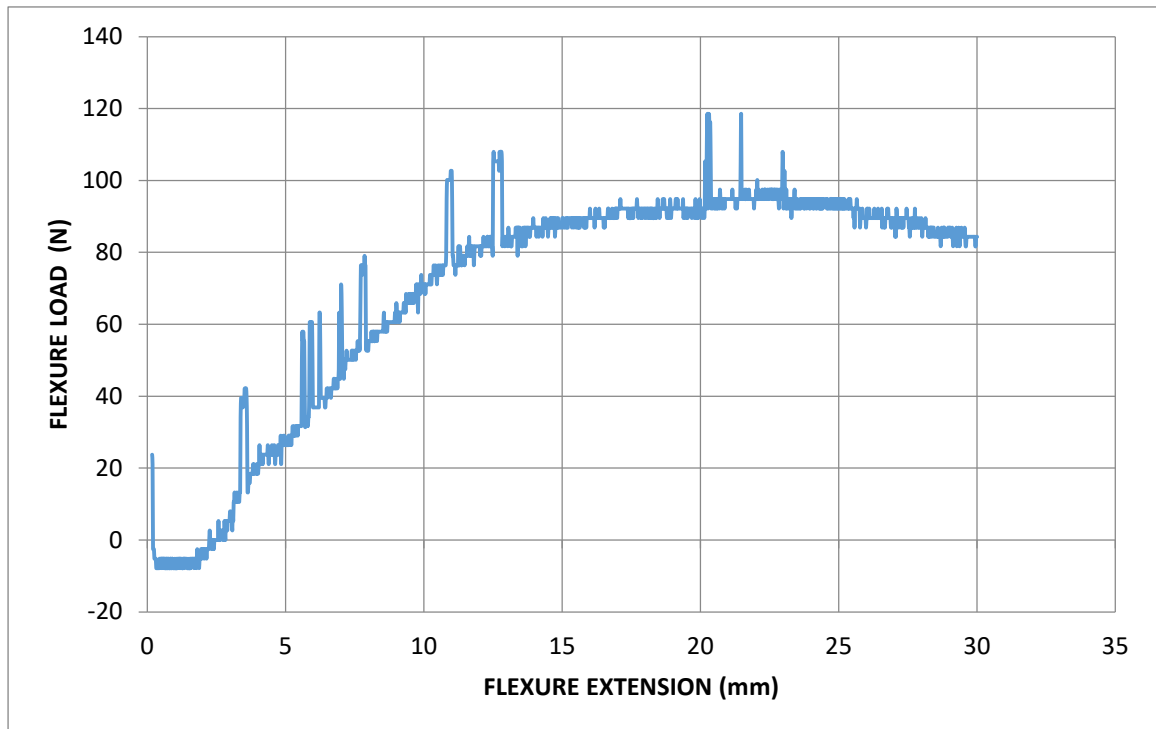


Εικόνα 52-Δομή Honeycomb: Διάταξη πειράματος κάμψης τριών σημείων



Εικόνα 53-Δομή Honeycomb: διάταξη κάμψης τριών σημείων

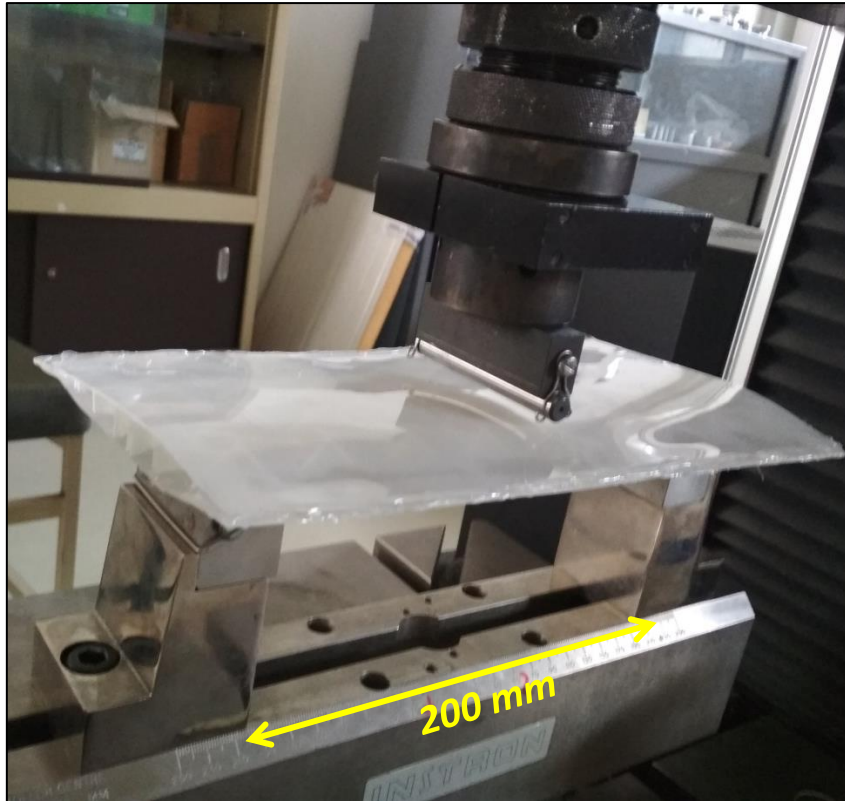
Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης από το πείραμα της πτέρυγας με την δομή honeycomb.



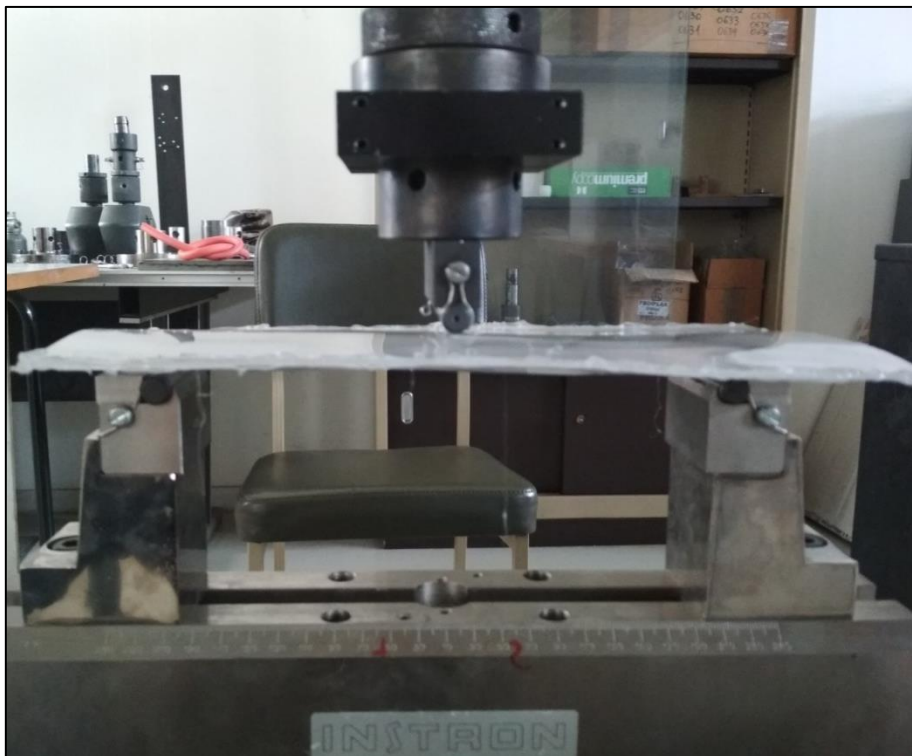
Διάγραμμα 9-Δομή Honeycomb: Πείραμα κάμψης τριών σημείων (Δύναμη- επιμήκυνση)

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη δύναμη που επιτυγχάνεται για την δομή Honeycomb είναι 95 N.

Για την δομή Hexachiral παρουσιάζεται η διάταξη του πειράματος ίδια με την δομή Honeycomb.

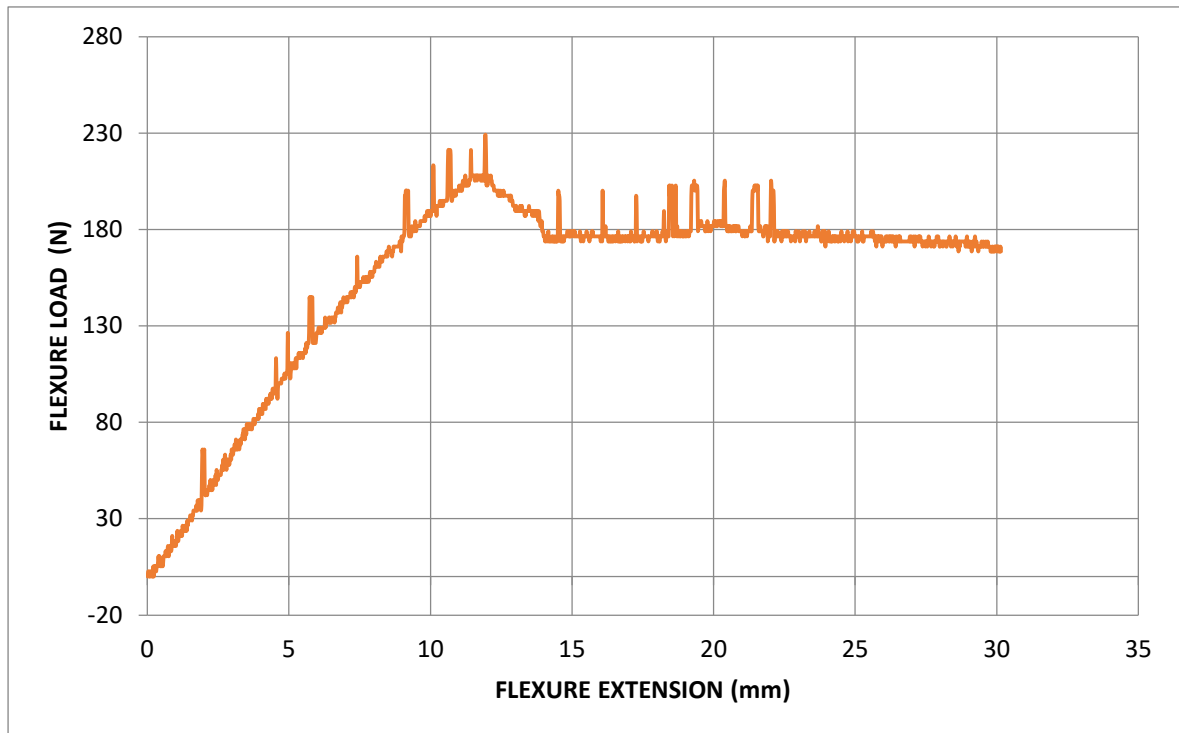


Εικόνα 54-Δομή Hexachiral: Διάταξη πειράματος κάμψης τριών σημείων

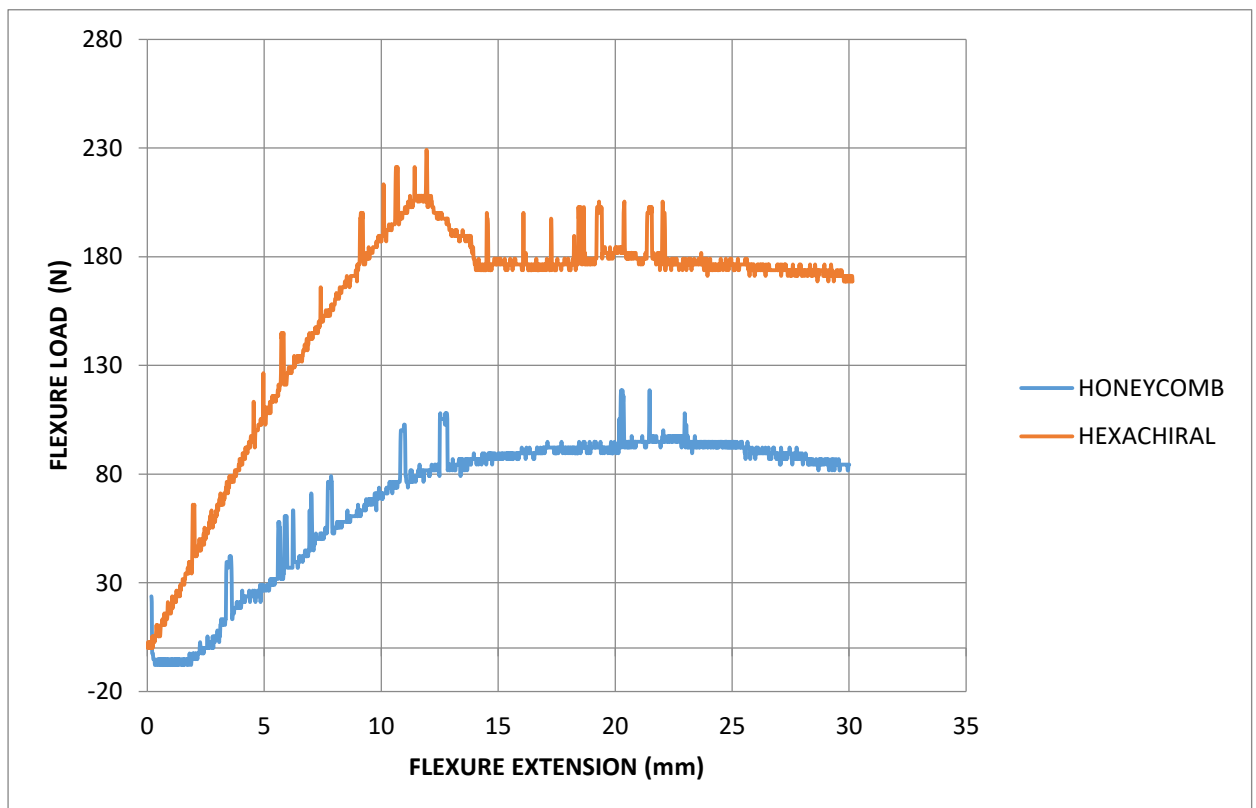


Εικόνα 55-Δομή Hexachiral: Διάταξη κάμψης τριών σημείων

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης επιμήκυνσης. Η μέγιστη δύναμη είναι 180 N.



Διάγραμμα 10-Δομή Hexachiral: Πείραμα κάμψης τριών σημείων (Δύναμη- επιμήκυνση)



Διάγραμμα 11-Σύγκριση διαγραμμάτων κάμψης τριών σημείων Hexachiral-Honeycomb

Η επιμήκυνση είναι ίδια και για τα δύο δοκίμια 30 mm. Η μέγιστη δύναμη της πτέρυγας με την δομή Hexachiral είναι περίπου διπλάσια από την δύναμη που παραλαμβάνει η πτέρυγα με την δομή Honeycomb. Το στοιχείο αυτό είναι ενδεικτικό της μεγαλύτερης αντοχής της δομής Hexachiral συνυπολογίζοντας και τον παράγοντα ότι το υλικό που κατασκευάστηκε έχει 19 MPa μικρότερη μέγιστη αντοχή σε κάμψη.

## ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΜΩΝ

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και έχοντας υπόψη τα στοιχεία και τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που προέκυψαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Τα κριτήρια που τέθηκαν για την συνολική μελέτη των δύο υλικών είναι:

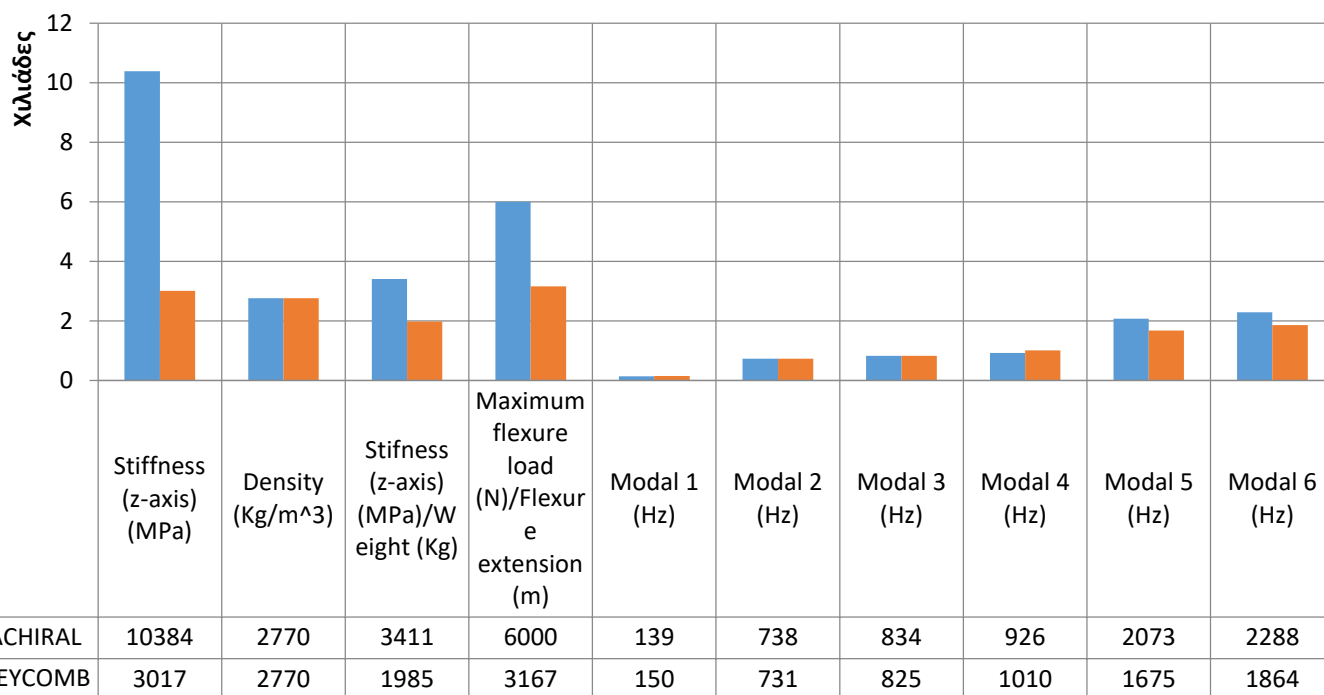
- Το βάρος της κάθε δομής
- Η δυσκαμψία του ως προς τον κάθετο άξονα σε αυτό
- Η πυκνότητα του
- Τις ιδιοσυχνότητες

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκριτικά στοιχεία

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ HEXACHIRAL-HONEYCOMB		
	ALUMINIUM ALLOY	
	HEXACHIRAL	HONEYCOMB
Stiffness (z-axis) (MPa)	10384	3017
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	2770	2770
Stiffness (z-axis) (MPa)/Weight (Kg)	3411	1985
Maximum flexure load (N)/Flexure extension (m)	6000	3167
Modal 1 (Hz)	139	150
Modal 2 (Hz)	738	731
Modal 3 (Hz)	834	825
Modal 4 (Hz)	926	1010
Modal 5 (Hz)	2073	1675
Modal 6 (Hz)	2288	1864

Πίνακας 48-Συγκριτικός πίνακας κριτηρίων των δομών Hexachiral-Honeycomb

## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ HEXACHIRAL-HONEYCOMB



Διάγραμμα 12- ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΓΡΑΦΗΜΑ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ HEXACHIRAL-HONEYCOMB

Συγκρίνοντας την πυκνότητα με την αντοχή στον Z άξονα δια το βάρος υπολογίζονται συντελεστές. Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται συγκριτικά τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα δίνοντας μια πλήρη εικόνα ως προς την αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων δομών.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα εκτιμάται ότι και οι δύο δομές ανταποκρίνονται στο βασικό τους στόχο που είχε τεθεί εξ αρχής δηλαδή στην αντοχή ως προς τον άξονα ZZ. Φαίνεται από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ως τώρα ότι η δομή hexachiral στα κριτήρια που είχαν τεθεί έχει μεγαλύτερη κάλυψη αυτών των κριτηρίων.

Παρολαυτα η ανάλυση πρέπει να είναι σίγουρα πολύ πιο ολοκληρωμένη παίρνοντας υπόψη και άλλου παράγοντες όπως η δυνατότητα παραγωγής της συγκεκριμένης δομής σε μαζική κλίμακα, ο παράγοντας της απόκλισης και των ανοχών από το πραγματικό σχέδιο και κατά πόσο επηρεάζει, αλλά και άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν και στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας λόγω της έκτασης της δεν μπορούν να αναλυθούν.

## **ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ**

Θα μπορούσε να μελετηθεί η ενίσχυση αυτών των δομών με ινώδη υλικά ώστε να μπορέσει να ενισχυθεί η αντοχή τους κατά τον άξονα X και Y. Ταυτόχρονα η αντοχή αυτών των δομών σε απότομες κρούσης ή ταλαντώσεις που μπορεί να επηρεάζουν. Ένα ακόμα στοιχείο μπορεί να μελετηθεί είναι η αξιοποίηση τέτοιων δομών και σε άλλα μέρη του αεροσκάφους όπως στην άτρακτο.

Επιπροσθέτως άλλες ιδιότητες που είναι βασικές σε δομές αεροσκαφών όπως συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των δομών αυτών και πως επηρεάζονται.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] <https://www.smlease.com/entries/mechanical-design-basics/what-is-poisson-ratio/>
- [2] <http://materiability.com/portfolio/auxetics/>
- [3] [https://www.researchgate.net/figure/Deformation-of-a-hexachiral-unit-1-In-rest-2-Completely-deformed-due-to-loading-of\\_fig6\\_312506148](https://www.researchgate.net/figure/Deformation-of-a-hexachiral-unit-1-In-rest-2-Completely-deformed-due-to-loading-of_fig6_312506148)
- [4] [https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-auxetic-behavior-on-reentrant-structures-49\\_fig2\\_259865336](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-auxetic-behavior-on-reentrant-structures-49_fig2_259865336)
- [5] Numerical and experimental analysis of a triangular auxetic core made of CFR-PEEK using the Directionally Reinforced Integrated Single-yarn (DIRIS) architecture, Paul Michelisa, Vasilios Spitas
- [6] Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures, Mariam Mir, Murtaza Najabat Ali, Javaria Sami, and Umar Ansari  
Academic Editor: Luigi Nicolais
- [7] Auxetic Materials – A Review, V. H. CARNEIRO\*, J. MEIRELES, H. PUGA Department of Mechanics Engineering, University of Minho, Campus de Azurem, Guimarães, Portugal
- [8] <https://www.iucr.org/news/newsletter/volume-27/number-2/auxetics>
- [9] <https://www.dsiac.org/resources/articles/defense-applications-of-auxetic-materials/>
- [10] [https://www.pinterest.co.uk/pin/196469602477544996/?nic\\_v2=1a1mEub7N](https://www.pinterest.co.uk/pin/196469602477544996/?nic_v2=1a1mEub7N)
- [11] [http://repfiles.kallipos.gr/html\\_books/175/Ch1.html](http://repfiles.kallipos.gr/html_books/175/Ch1.html)
- [12] DESIGN OF CHIRAL HONEYCOMB MESO-STRUCTURES FOR SHEAR FLEXURE, Avinash Kolla, Graduate Research Assistant, Jaehyung Ju Research Associate, Joshua D. Summers Associate Professor. Clemson Engineering Design Application and Research Group (CEDAR) Department of Mechanical Engineering Clemson University Clemson, SC 29634-0921
- [13] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca64a010-il>
- [14] [https://www.researchgate.net/profile/Lidija\\_Curkovic/publication/264713313/figure/fig1/AS:295937667813388@1447568446962/Three-point-bending-test-8.png](https://www.researchgate.net/profile/Lidija_Curkovic/publication/264713313/figure/fig1/AS:295937667813388@1447568446962/Three-point-bending-test-8.png)