



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Μοντελοποίηση και σχεδιασμός εργαστηριακής διάταξης
ελέγχου φυλλωτών υλικών σε στατική και δυναμική
διάτμηση*

Διπλωματική Εργασία

ΜΩΥΣΗΣ-ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ ΝΤΑΡΟΥΙΣ

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και ο σχεδιασμός εργαστηριακής διάταξης για τον έλεγχο φυλλωτών υλικών (sheet material) σε στατική και δυναμική διάτμηση. Αρχικά αναλύεται η χρησιμότητα των φυλλωτών υλικών και κατασκευών στο σχεδιασμό (π.χ. κυψελωτές κατασκευές - honeycombs), στην αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία και στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς και οι αδυναμίες των πειραματικών δοκιμών που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση και αξιολόγηση διάταξης που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Μηχανικής Υλικών και Γεωδομών ΑΕ για το σκοπό αυτό, ενώ προτείνεται ένα διαφορετικό είδος δοκιμής και γίνεται παραμετρική ανάλυση του δοκιμίου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία και η επαναληψιμότητα των μετρούμενων μεγεθών. Ακολουθεί ο σχεδιασμός της νέας διάταξης και των επιμέρους συστημάτων του (γραμμική οδήγηση, μετρητικά συστήματα κ.α.), ενώ αναλύεται η δυναμική και στατική της απόδοση, παρουσιάζοντας τις βελτιώσεις που επιφέρει σε μια σειρά από βασικούς τομείς του πειράματος.

ABSTRACT

In this thesis, the modelling and design of a testing machine for the determination of the static and dynamic mechanical properties of sheet materials is presented. The use of sheet material and structures (e.g. honeycombs) as well as the weaknesses of current testing procedures employed in the Aerospace and Automotive Industry are examined. Moreover, the efficiency of a testing device developed by the Institute of Mechanics of Materials and Geostrutures SA (IMMG SA) for sheets is analysed and evaluated. A new dynamic test is introduced and a sensitivity analysis for the sheet specimen is performed using FEA simulations in order to improve both the measurements' reliability and repeatability. The new design and its components are studied and presented. The improvements in various fields are estimated following the static and dynamic analysis of the new design.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Β. Σπιτά. Η διδασκαλία του και η καθοδήγηση του συνέβαλε καθοριστικά στην ωρίμανση της σκέψης μου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Π. Μιχελή, διευθυντή του Ινστιτούτου Μηχανικής Υλικών και Γεωδομών Α.Ε. για την πρόσβαση που μου δόθηκε στη πειραματική διάταξη ελέγχου φυλλωτών υλικών.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών για την στήριξη τους και την συνεργασία μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Δομή και μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών	13
1.2 Δυναμική ανάλυση ιξωδοελαστικών υλικών	14
1.3 Φυλλωτές κατασκευές	16
1.4 Πειραματική δυναμική ανάλυση και διεθνή πρότυπα	18
2. ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΣΤΙΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	20
2.1 Αδυναμίες στις δοκιμές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.....	20
2.2 Περιγραφή της εργαστηριακής διάταξης που αναπτύχθηκε στην ΙΜΥΓ ΑΕ.....	23
2.3 Αξιολόγηση του σχεδιασμού	29
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΑΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	32
3.1 Ανάπτυξη της νέας δοκιμής.....	32
3.2 Μοντελοποίηση μηχανικής συμπεριφοράς φυλλωτού υλικού	33
3.3 Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του υλικού	35
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	41
4.1 Μηχανισμός εξωτερικής συγκράτησης	41
4.2 Διέγερση δοκιμίου	44
4.3 Μετρητικά συστήματα.....	46
4.4 Γραμμική οδήγηση.....	51
4.5 Άξονας μετάδοσης κίνησης	54
4.6 Μηχανισμός μικρορύθμισης	55
4.7 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς	56
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	59
5.1 Παρουσίαση συνολικού σχεδιασμού	59
5.2 Πειραματική διαδικασία.....	62
5.3 Μελλοντική ανάπτυξη	65
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διάταξη πολυμερικών αλυσίδων	13
Εικόνα 2: Διαμόρφωση πολυμερών	14
Εικόνα 3: Μοντέλο Maxwell	16
Εικόνα 4: Δομή μιας τυπικής κυψελωτής κατασκευής	16
Εικόνα 5: Καταπόνηση κυψελωτών κατασκευών	17
Εικόνα 6: Voyager	17
Εικόνα 7: Compression test	19
Εικόνα 8: Plate shear test	19
Εικόνα 9: Edgewise compression.....	19
Εικόνα 10: Three & Four-Point Bending test	19
Εικόνα 11: Flatwise tension test	19
Εικόνα 12: Oberst beam method.....	19
Εικόνα 13: Διαμορφώσεις πυρήνα.....	20
Εικόνα 14: Rail test για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης με υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα.....	21
Εικόνα 15: Iosipescu test	22
Εικόνα 16: Tensile test (Dogbone).....	22
Εικόνα 17: Ιξωδόμετρο παλινδρομούντος εμβόλου	23
Εικόνα 18: Αρχή λειτουργίας της διάταξης	24
Εικόνα 19: Ελεύθερη ταλάντωση με υποκρίσιμη απόσβεση.....	25
Εικόνα 20: Μεγέθη μετρούμενου σήματος.....	25
Εικόνα 21: Τρόποι διάδοσης ρωγμών και αστοχίας.....	26
Εικόνα 22: Βασικά μεγέθη της δοκιμής.....	26
Εικόνα 23: Καθαρή διάτμηση (pure shear)	27
Εικόνα 24: Απλή διάτμηση (simple shear).....	27
Εικόνα 25: Συσκευή διάτμησης (IMYG AE).....	28
Εικόνα 26: Βασικός μηχανισμός	28
Εικόνα 27: 3D Μοντελοποίηση και ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων	30
Εικόνα 28: Μετατροπή του μετρούμενου σήματος στο πεδίο της συχνότητας (FFT).....	30
Εικόνα 29: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο στο ANSYS	34
Εικόνα 30: Στοιχείο ελατηρίου COMBIN14	34
Εικόνα 31: Μελέτη της ολίσθησης	35
Εικόνα 32: Μελέτη της απομόνωσης της ζώνης συμπίεσης.....	36
Εικόνα 33: Διατμητική παραμόρφωση δοκιμίου $g_l = 80\mu\text{m}$	36
Εικόνα 34: Μελέτη της κάμψης στην ζώνη διάτμησης	37
Εικόνα 35: Ορθή ακτινική παραμόρφωση	37
Εικόνα 36: Ανάλυση των τάσεων.....	38
Εικόνα 37: Διατμητική τάση για δοκίμιο $g_l = 80\mu\text{m}$	40

Εικόνα 38: Διατμητική τάση για δοκίμιο $g_l=20\mu\text{m}$	40
Εικόνα 39: Πίεση επιφάνειας στη ζώνη συμπίεσης.....	42
Εικόνα 40: Σχεδίαση του μηχανισμού συμπίεσης.....	42
Εικόνα 41: Συνήθης διάταξη δοκιμής με δονητική τράπεζα.....	44
Εικόνα 42: Χαρακτηριστικά δονητικών επενεργητών.....	44
Εικόνα 43: Δονητική τράπεζα DERRITRON (Εργαστήριου Στοιχείων Μηχανών ΕΜΠ).....	45
Εικόνα 44: Καμπύλες λειτουργίας ηλεκτρομαγνητικού επενεργητή.....	46
Εικόνα 45: Load cell LCF300 και ADC της FUTEK.....	46
Εικόνα 46: Απόδοση επιταχυνσιόμετρου και LVD αντίστοιχα.....	49
Εικόνα 47: LDV.....	49
Εικόνα 48: Όρια λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου και LDV.....	50
Εικόνα 49: Συντελεστής τριβής γραμμικής οδήγησης και tilt stiffness.....	51
Εικόνα 50: Κατανομή πίεσης αεροεδράνου.....	52
Εικόνα 51: Εξάρτηση δυσκαμψίας από το μέγεθος του διακένου.....	52
Εικόνα 52: Συγκράτηση αεροεδράνου.....	54
Εικόνα 53: Μηχανισμός μικρορύθμισης.....	55
Εικόνα 54: Άξονας οδήγησης.....	55
Εικόνα 55: Κέλυφος.....	56
Εικόνα 56: Ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων άξονα.....	57
Εικόνα 57: Ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων συναρμολογήματος κελύφους, αεροεδράνου και δακτυλίων συγκράτησης.....	58
Εικόνα 58: Παρουσίαση εργαστηριακής διάταξης.....	59
Εικόνα 59: Τομή διάταξης.....	59
Εικόνα 60: Όψη των Φλαντζών συγκράτησης.....	60
Εικόνα 61: Αρίθμηση τεμαχίων συναρμολογημένου.....	61
Εικόνα 62: Φάση πρώτη.....	63
Εικόνα 63: Φάση δεύτερη.....	64
Εικόνα 64: Φάση τρίτη.....	65

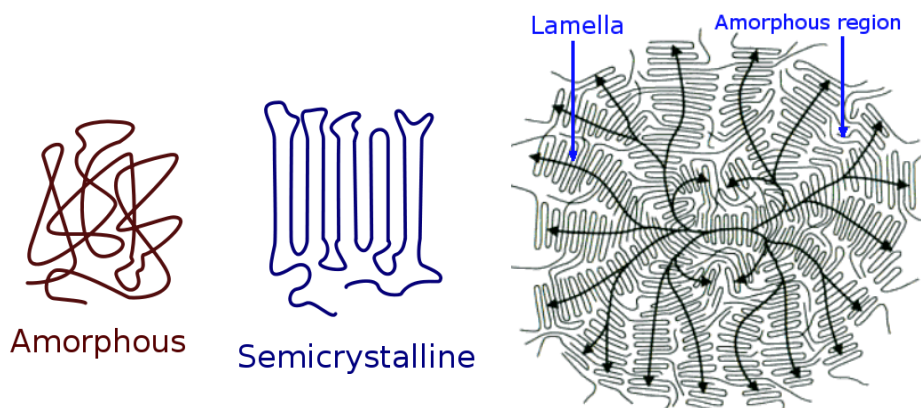
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Δομή και μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών

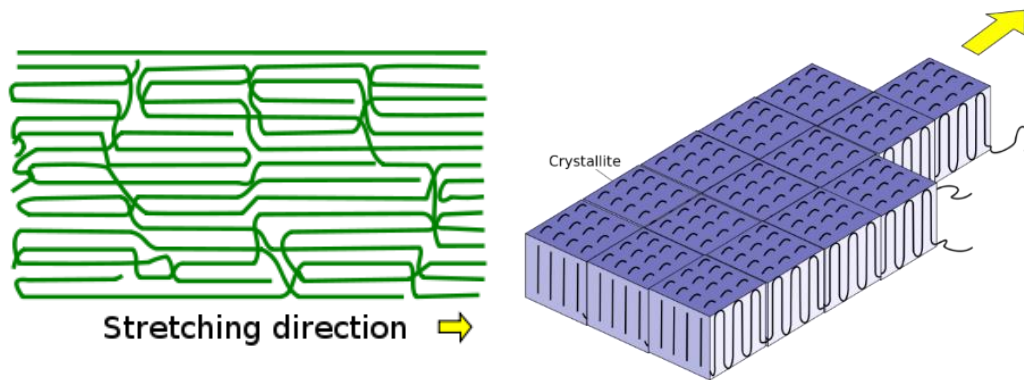
Τα πολυμερή είναι μόρια μεγάλου μεγέθους (μακρομόρια) που αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες (μονομερή). Μπορεί να έχουν φυσική προέλευση (λ.χ. κυτταρίνη, καουτσούκ), είτε να μην λαμβάνονται απευθείας από τη φύση και να είναι συνθετικά (λ.χ. PVC, σιλικόνες).

Επιπλέον, ανάλογα με τις θερμομηχανικές τους ιδιότητες, διακρίνονται σε θερμοπλαστικά (λ.χ. PE, PP, PMMA), τα οποία διαθέτουν δομή ευαίσθητη στις θερμοκρασιακές μεταβολές, σε θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (λ.χ. πολυεστέρες, εποξειδικές ρητίνες), τα οποία είναι συνήθως άμορφα και πιο άτηκτα και σε ελαστομερή (λ.χ. σιλικόνες, καουτσούκ) τα οποία εμφανίζουν υπερελαστική συμπεριφορά σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών και συνθηκών περιβάλλοντος. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στη παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στις δύο πρώτες κατηγορίες πολυμερών, τα οποία χαρακτηρίζονται μηχανικά από ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή αποτελούνται από μακριές μοριακές (πολυμερικές) αλυσίδες οι οποίες στην υγρή τους φάση εμφανίζουν ακανόνιστη και πεπλεγμένη μορφή. Κάποια πολυμερή διατηρούν αυτή την άτακτη δομή κατά τη διαδικασία της απόψυξης και έτσι σχηματίζουν στερεά με άμορφη κρυσταλλική δομή. Σε άλλα πολυμερή, οι αλυσίδες αναδιπλώνονται σχηματίζοντας υψηλότερου βαθμού τάξης περιοχές, οι οποίες ονομάζονται λαμέλες (lamellae). Ωστόσο ακόμα και σε αυτή τη περίπτωση συνυπάρχουν κρυσταλλικές και άμορφες περιοχές. Συνήθως ο βαθμός κρυσταλλικότητας ενός πολυμερούς κυμαίνεται μεταξύ 10-80% και συναρτάται άμεσα με τη διαδικασία απόψυξης και των συνθηκών διαμόρφωσης του πολυμερούς.



Εικόνα 1: Διάταξη πολυμερικών αλυσίδων



Εικόνα 2: Διαμόρφωση πολυμερών

Αυτός είναι και ο λόγος που τα πολυμερή θεωρούνται ημι-κρυσταλλικά (semi-crystalline) υλικά. Η ανάπτυξη των κρυσταλλικών περιοχών εκτυλίσσεται κατά προτίμηση προς την κατεύθυνση της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς κατά τη διαδικασία της απόψυξης. Στην περίπτωση ενός υψηλού θερμοκρασιακού δυναμικού σε μια κατεύθυνση, όπως για παράδειγμα κατά τη παραγωγή κάποιου φιλμ ή ίνας πολυμερούς, η ανάπτυξη λαμελών γίνεται με συγκεκριμένο προσανατολισμό και με τη μορφή δενδριτών. Διαφορετικά, στην περίπτωση για παράδειγμα ενός πολυμερούς, με ίδιας τάξης μεγέθους διαστάσεις, η κατανομή της θερμοκρασίας είναι περισσότερο ιστροπική, με αποτέλεσμα την ακτινική ανάπτυξη λαμελών που θα οδηγήσει στον σχηματισμό μεγαλύτερων σφαιρικών κρυσταλλικών περιοχών που ονομάζονται σφαιρουλίτες (spherulites).

Συγκριτικά, η κρυσταλλική δομή εξασφαλίζει πιο ανθεκτικό πολυμερές (υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, αλλά συγχρόνως το καθιστά πιο ψαθυρό, με αποτέλεσμα τα πολύ κρυσταλλικά πολυμερή να μην επιδεικνύουν την κλασσική συμπεριφορά των πλαστικών μετά το όριο διαρροής τους.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό από τη σκοπιά του μηχανισμού ενός κρυσταλλικού πολυμερούς είναι ο προσανατολισμός ή κατευθυντικότητα (cliticity) του κρυστάλλου, καθώς περιγράφει την προτιμώμενη διεύθυνση που ακολουθούν τα μόρια ή συγκροτήματα μορίων σε στερεά κατάσταση σε ειδικές συνθήκες διαμόρφωσης του πολυμερούς. Αναφέρεται κυρίως στην περίπτωση πολυμερικών ινών, φύλλων και φιλμ, τα οποία υπό την επίδραση μηχανικής καταπόνησης (κατ'εξοχήν σε τάνυση) παρουσιάζουν τμήματα (αλυσίδες και περιοχές) που προσανατολίζονται κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης. Ένας ακόμη τρόπος ελέγχου του προσανατολισμού είναι ο έλεγχος της απόψυξης στο χώρο (temperature grad control). Η κατευθυντικότητα σε κρυσταλλικό επίπεδο αντανακλάται στο μακρο-επίπεδο με την ανισοτροπία της μηχανικής συμπεριφοράς ενός πολυμερούς.

1.2 Δυναμική ανάλυση ιξωδοελαστικών υλικών

Το βασικό χαρακτηριστικό που διέπει τη μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ιξωδοελαστικών υλικών είναι η εξάρτηση του εγγενούς μηχανισμού απόσβεσης που διαθέτουν από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα

επιβολής παραμόρφωσης. Η μηχανική συμπεριφορά των περισσότερων πολυμερών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ιξωδοελαστική.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά ενός ιξωδοελαστικού υλικού είναι η δυναμική δυσκαμψία (dynamic stiffness), η σχέση δηλαδή μεταξύ της τάσης και παραμόρφωσης η οποία είναι πιο συνθέτη σε σχέση με τη γνωστή σχέση που διέπει την συσχέτιση τάσης και παραμόρφωσης για στερεά της κλασσικής Θεωρίας της Ελαστικότητας.

Πολλές φορές η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των πολυμερών γίνεται στο πεδίο της συχνότητας. Σε αυτή τη περίπτωση η τάση και η παραμόρφωση είναι συναρτήσεις του χρόνου και μάλιστα αρμονικές, παρουσιάζουν ωστόσο διαφορά φάσης, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\begin{aligned}\tau(t) &= \tau_0 \sin(\omega t) \\ \varphi(t) &= \varphi_0 \sin(\omega t - \psi)\end{aligned}\quad (1.1)$$

Για ένα ιξωδοελαστικό στερεό, η διαφορά φάσης σημαίνει ότι υπάρχει ένας όρος που εξαρτάται από την ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης στην σχέση τάσης-παραμόρφωσης:

$$\tau = G\varphi + \frac{G\eta}{|\omega|} \frac{d\varphi}{dt}\quad (1.2)$$

όπου θεωρούμε $G = \frac{\tau_0}{\varphi_0}$ και $\eta = \tan\psi$, το μέτρο της απόσβεσης.

Ο δεύτερος όρος στην παραπάνω εξίσωση σχετίζεται με το ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης και αντιπροσωπεύει την απόσβεση (damping) ή απορρόφηση ενέργειας (energy dissipation) η οποία συμβαίνει σε ένα ιξωδοελαστικό στερεό όταν δεχτεί μια αρμονική διέγερση.

Εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας την αλγεβρική ταυτότητα:

$$\exp(i\omega t) = e^{i\omega t} = \cos\omega t + i\sin\omega t\quad (1.3)$$

η εξίσωση (1.2) μπορεί να γραφεί:

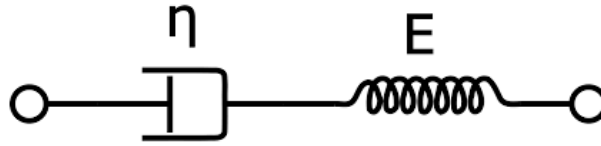
$$\tau = G\varphi + \frac{G\eta}{|\omega|} i\omega\varphi = G\left(1 + i\eta\frac{\omega}{|\omega|}\right)\varphi\quad (1.4)$$

$$\tau = G(1 + i\eta)\varphi\quad (1.5)$$

Τα κλασσικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των υλικών με τη χρήση στοιχείων μάζας, απόσβεσης και ελατηρίου αποτελούν τα μοντέλα Maxwell και Voigt αλλά και αρκετά ακόμη που προέκυψαν μεταγενέστερα και αξιοποιούνται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια που απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή. Το απλούστερο μοντέλο είναι το μοντέλο Maxwell για το πιο ενδεικτικά αναφέρεται ότι μοντελοποιεί την

εξωδοελαστική συμπεριφορά ενός υλικού με τη χρήση ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα σε σειρά. Η σύνθετη δυσκαμψία του συστήματος είναι κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω:

$$k^* = k(1 + i\eta) = \frac{i\omega kc}{k + i\omega c} \quad (1.6)$$

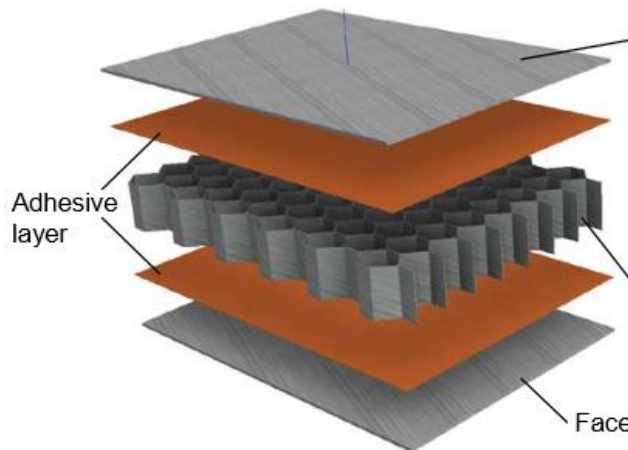


Εικόνα 3: Μοντέλο Maxwell

1.3 Φυλλωτές κατασκευές

Η πιο κλασική περίπτωση αξιοποίησης της κατευθυντικότητας των λεπτών φυλλωτών υλικών (sheet material) είναι οι κυψελωτές κατασκευές (honeycombs), οι οποίες αναπτύχθηκαν καταγεγραμμένα για πρώτη φορά με τη χρήση ξύλου το 1845, ενώ για πρώτη φορά αξιοποιήθηκε σε αεροπορική κατασκευή το 1919 για την κατασκευή μερών ενός υδροπλάνου.

Στη συνηθέστερη περίπτωση αποτελούνται από δύο μετωπικά φύλλα (face sheets) και τον πυρήνα (core) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



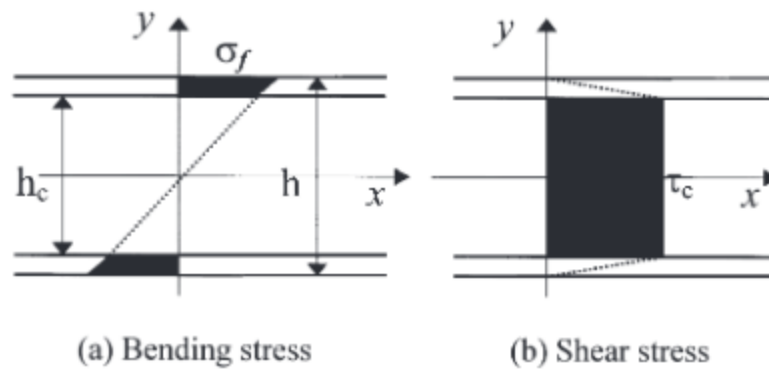
Εικόνα 4: Δομή μιας τυπικής κυψελωτής κατασκευής

Τα βασικότερα πλεονεκτήματά τους είναι:

- Αντοχή στη κόπωση
- Υψηλός λόγος δυσκαμψίας προς βάρος
- Μεγάλη απορρόφηση κραδασμών

- Θερμική απομόνωση (thermal insulation)

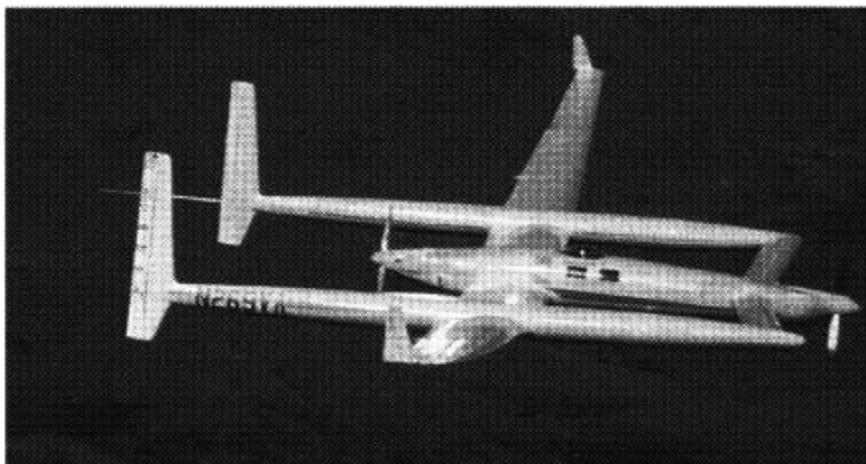
Ο σχεδιασμός τους στοχεύει στην εκμετάλλευση της μεγάλης διαμήκουσ ακαμψίας που παρουσιάζουν τα μετωπικά φύλλα για τη παραλαβή ορθών τάσεων ενώ ο πυρήνας δέχεται καταπόνηση από διατμητικές τάσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Καταπόνηση κυψελωτών κατασκευών

Η αεροπορική και αεροδιαστημική τεχνολογία αξιοποιεί σε πολύ σημαντικό βαθμό την συγκεκριμένη τεχνολογία αξιοποιώντας την μεγάλη ειδική δυσκαμψία η οποία εξασφαλίζει μεγάλη μείωση βάρους.

Ενδεικτικά, αναφέρονται κάποια στοιχεία που καταδεικνύουν την ευρεία διάδοση στη χρήση τέτοιων υλικών. Για την κατασκευή του Boeing 747 χρησιμοποιούνται συνολικά 4000m² από κυψελωτά πάνελ, στο σκελετό του αεροπλάνου (trailing & leading edge, flaps, spoilers) αλλά και στο εσωτερικό του (διάδρομος, ταβάνι). Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη ιδιαίτερα στα επιβατηγά αεροσκάφη καθώς εξασφαλίζει μεγάλη μείωση βάρους και εξοικονόμηση καυσίμου. Χαρακτηριστικά είναι η περίπτωση του Voyager που έκανε τον περίπλου της γης μέσα σε εννέα μέρες χωρίς ανεφοδιασμό αποτελούμενο εξ' ολοκλήρου από κυψελωτά πάνελ.



Εικόνα 6: Voyager

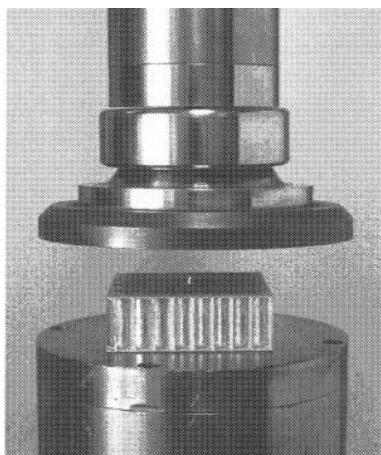
1.4 Πειραματική δυναμική ανάλυση και διεθνή πρότυπα

Τα δύο βασικότερα πειράματα σε κυψελωτές κατασκευές είναι το πείραμα θλίψης και διάτμησης τα οποία φαίνονται στις Εικόνες 7, 8 και 9. Το πρώτο εφαρμόζεται σε honeycomb και χωρίς τα μετωπικά φύλλα. Το δεύτερο είναι ίσως το σημαντικότερο τεστ που εφαρμόζεται καθώς εξάγεται το μέτρο διάτμησης και η μέγιστη αντοχή σε διατμητική τάση. Η μέτρηση της μετατόπισης μεταξύ των δύο πλακών συγκράτησης γίνεται με τη βοήθεια ενός επενεργητή LDTV ο οποίος στερεώνεται πάνω στο δοκίμιο. Έτσι παράγεται η καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης με βάση την οποία υπολογίζονται τα προαναφερθέντα μεγέθη. Ένα λιγότερο δημοφιλές πείραμα είναι αυτό της κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων που χρησιμοποιείται κυρίως για πιο πυκνούς πυρήνες αν και δε παράγει σε όλες τις περιπτώσεις αξιόπιστα συμπεράσματα.

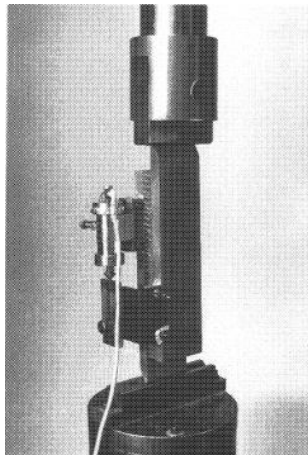
Σε φυλλωτά υλικά η πιο διαδεδομένη δοκιμή είναι εκείνη της καμπτόμενης προβόλου (Oberst beam method), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 12. Μια ορθογωνική πρόβολος από μεταλλικό υλικό δέχεται μια διέγερση με κάποιο μηχανισμό. Η πρόβολος έχει επίστροψη από το πολυμερές-δοκίμιο, το οποίου η απορρόφηση ενέργειας μετράται.

Σε πρακτικό επίπεδο, ωστόσο, παρουσιάζονται μια σειρά από δυσκολίες που είναι πιθανό να εισάγουν αρκετά σφάλματα ή/και αβεβαιότητα στη μέτρηση της απόσβεσης ενός υλικού, με τα κυριότερα από αυτά να είναι:

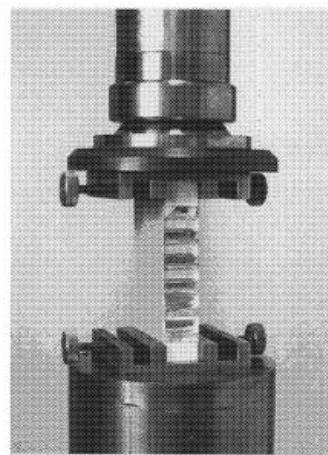
- Τα μετρητικά όργανα, όπως ένα επιταχυνσιόμετρο ή ένας αισθητήρας δύναμης, έχουν μάζα και η εν σειρά σύνδεση τους με το δοκίμιο μεταβάλλει την συνολική αδράνεια του συστήματος δοκιμίου-loading train ειδικότερα σε υψηλότερες συχνότητες
- Η συσκευή συγκράτησης και τα μετρητικά στοιχεία ανάλογα με το σχετικό μέγεθος ενδέχεται να προκαλέσουν ερπυσμό στο δοκίμιο ειδικά όταν πρόκειται για υλικό με σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας
- Πολλές φορές συναντάται δυσκολία στην επίτευξη καθαρών και ομοιόμορφων συνθηκών καταπόνησης στη περιοχή ενδιαφέροντος (μηδενικός τανυστής υδροστατικής πίεσης ή μηδενικός αποκλίνων τανυστής). Έτσι ενδεχομένως να υπάρχει απαίτηση για το σχετικό μέγεθος του δοκιμίου (aspect ratio) ή κάποιος συντελεστής διόρθωσης των μετρούμενων μεγεθών.
- Η απαίτηση για ομοιόμορφη καταπόνηση του δοκιμίου μακριά από την περιοχή εφαρμογής των φορτίων (αρχή Saint-Venant) και άρα η εισάγει μια επιπλέον αβεβαιότητα που σχετίζεται με το ποσοστό της μάζας του υλικού (ενεργός μάζα) που συμμετέχει στην απορρόφηση ενέργειας
- Η σχετική κίνηση / ολίσθηση (τριβή Coulomb) στην περιοχή συγκράτησης μπορεί να αυξήσει την απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου ειδικότερα σε ένα πολυ-κυκλικό πείραμα.



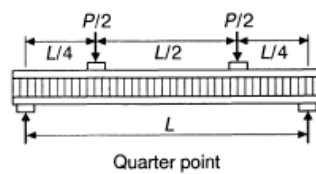
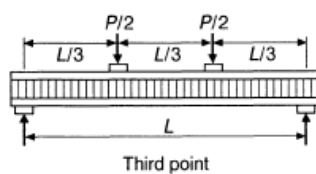
Εικόνα 7: Compression test



Εικόνα 8: Plate shear test



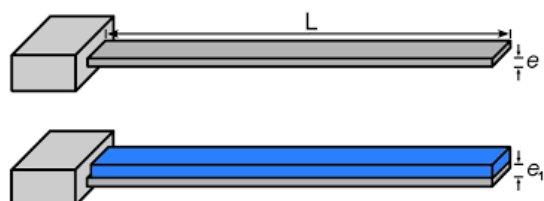
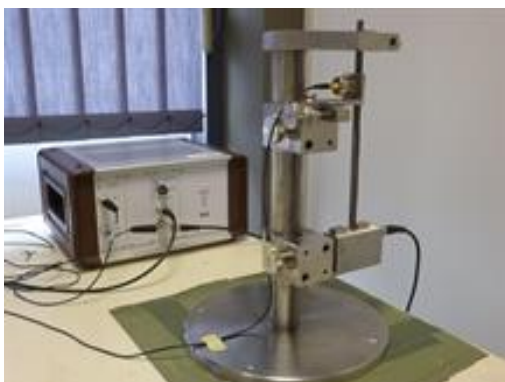
Εικόνα 9: Edgewise compression



Εικόνα 10: Three & Four-Point Bending test



Εικόνα 11: Flatwise tension test

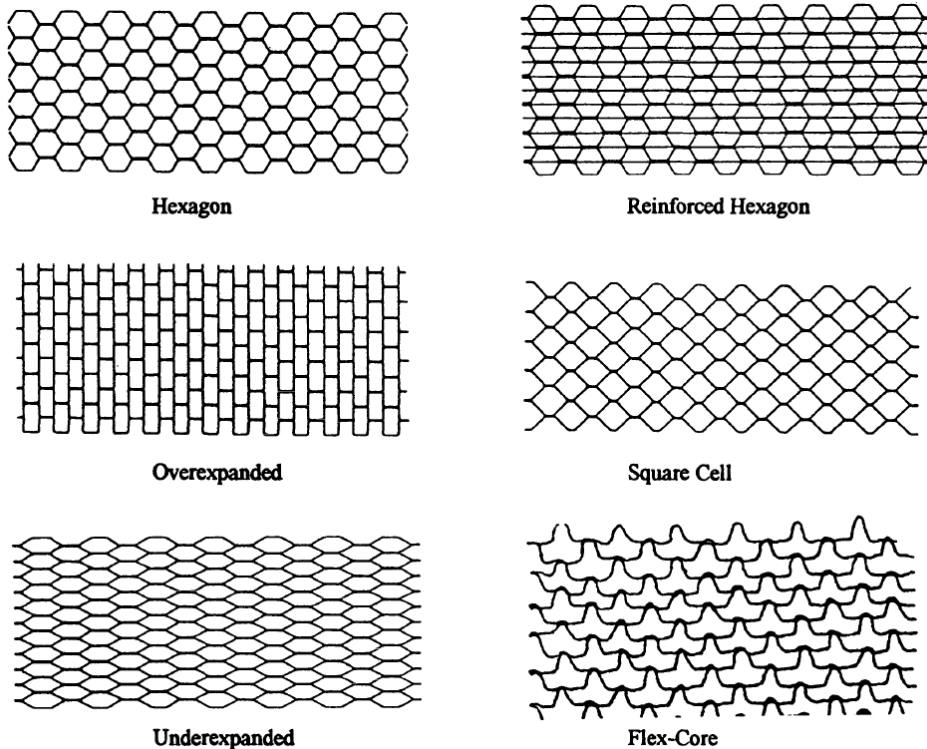


Εικόνα 12: Oberst beam method

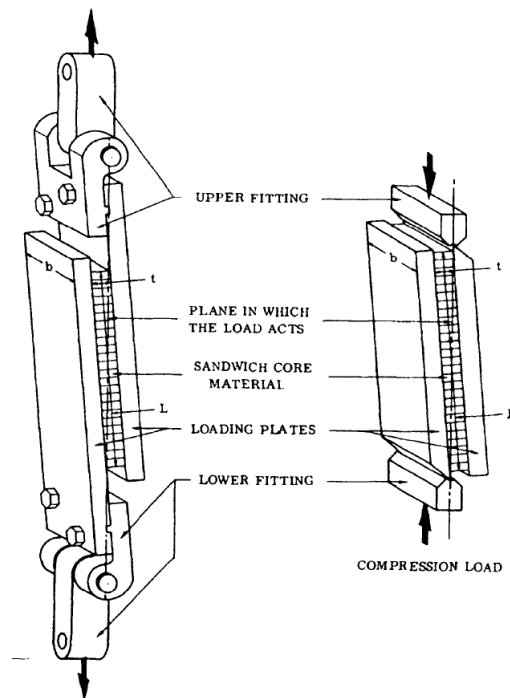
2. ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΣΤΙΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

2.1 Αδυναμίες στις δοκιμές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία

Το πλήθος των εφαρμογών των φυλλωτών κατασκευών αλλά και του πλήθους των διαφορετικών μορφών με τις οποίες μπορεί κανείς να αξιοποιήσει τα χαρακτηριστικά των φυλλωτών υλικών (ειδική στιβαρότητα, αντοχή, απορρόφηση ενέργειας, βλ. 1^ο Κεφάλαιο) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι πολύ δύσκολη η πειραματική μελέτη κάθε πιθανής μορφής κυψελωτού πάνελ (Εικόνα 13) ξεχωριστά και εναλλακτικά είναι δύσκολο να διατίθεται σε κάθε περίπτωση ένας υψηλού κόστους εργαστηριακός εξοπλισμός που θα επιτρέπει τη διεξαγωγή μακρο-δοκιμών κατά βούληση. Παράλληλα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός μακρο-δοκιμίου οδηγούν σε συγκεντρώσεις τάσεων που πλήττουν την αξιοπιστία της μέτρησης και το κυριότερο σε αποτελέσματα εξαρτώμενα από τα μεγέθη του πειράματος. Αυτό επιτρέπει την σχετικά ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων συγκριτικά για μια σειρά παρόμοιων δοκιμών, όχι όμως και τη δυνατότητα εξαγωγής μεγεθών που περιγράφουν καταστατικά την μηχανική συμπεριφορά αυτών των κατασκευών.



Εικόνα 13: Διαμορφώσεις πυρήνα



Εικόνα 14: Rail test για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης με υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα

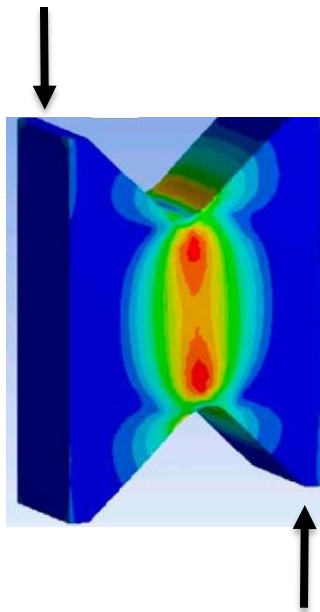
Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη των κλασικών δοκιμών (εφελκυσμού, στρέψης, διάτμησης) οι οποίες είχαν στη βάση της φιλοσοφίας τους την απαίτηση για εξαγωγή μετρήσεων, αποτελεσμάτων και μεγεθών που αφορούν και θα χαρακτηρίζουν το σύνολο του υλικού του δοκιμίου. Μεγέθη τα οποία περιγράφουν καταστατικά την μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού και επιτρέπουν την αναλυτική περιγραφή της εντατικής κατάστασης κάθε γεωμετρίας που μπορεί να προκύψει από αυτό το υλικό με βάση την θεωρία της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος. Έτσι προκύπτουν δυο βασικές απαιτήσεις για μια τέτοια δοκιμή:

- Καταπόνηση του υλικού με μία καθαρή εντατική κατάσταση ώστε να μπορεί να συνδεθεί το αποτέλεσμα με ένα από τα γνωστά μεγέθη της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος. Για παράδειγμα στο τεστ κλασικό τεστ εφελκυσμού με δοκίμιο τύπου dogbone (Εικόνα 16) παρατηρούμε ότι το υλικό καταπονείται στην περιοχή ενδιαφέροντος (gauge length) από μια ορθή τάση κατά το μήκος του ενώ σε όλες τις άλλες διευθύνσεις είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί, ώστε να μη δέχεται καμία εξωτερική καταπόνηση (ορθή και διατμητική) σε κάποια άλλη διεύθυνση. Έτσι μπορεί κανείς να προσδιορίσει το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση του μεγαλύτερου άξονα ή Young's Modulus ως:

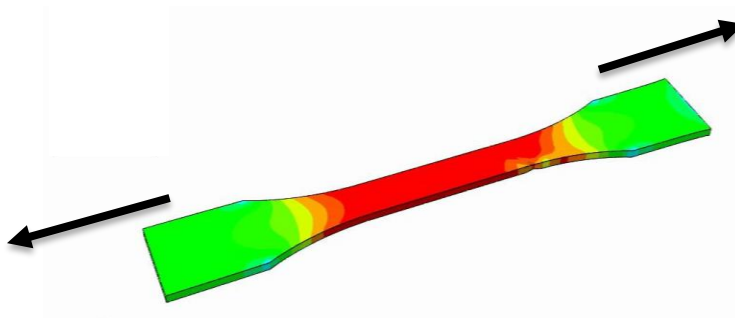
$$\sigma_x = E\varepsilon_x \rightarrow \frac{f_{\text{applied}}}{A} = E \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow E \quad (2.1)$$

- Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το σύνολο του υλικού είναι αναγκαίο η καταπόνηση να επηρεάζει στον ίδιο βαθμό το σύνολο ή ένα πολύ μεγάλο μέρος του υλικού όπως φαίνεται στο τεστ εφελκυσμού ή στο κλασικό τεστ διάτμησης κατά Ιοσιπέσκου (Iosipescu test).

Ιδιαίτερη σημασία έχει σε αυτή την κατεύθυνση η καταπόνηση του εξεταζόμενου υλικού να είναι απαλλαγμένη από τις συγκεντρώσεις τάσεων που αναπτύσσονται σε μια μακρο-δοκμή και σε γενικότερο πλαίσιο η καταπόνηση του δοκιμίου σε μία ορισμένη εντατική κατάσταση επιτρέποντας έτσι τη σύνδεση των μετρήσεων με κάποιο από τα μεγέθη της Μηχανικής των Υλικών.



Εικόνα 15: Iosipescu test



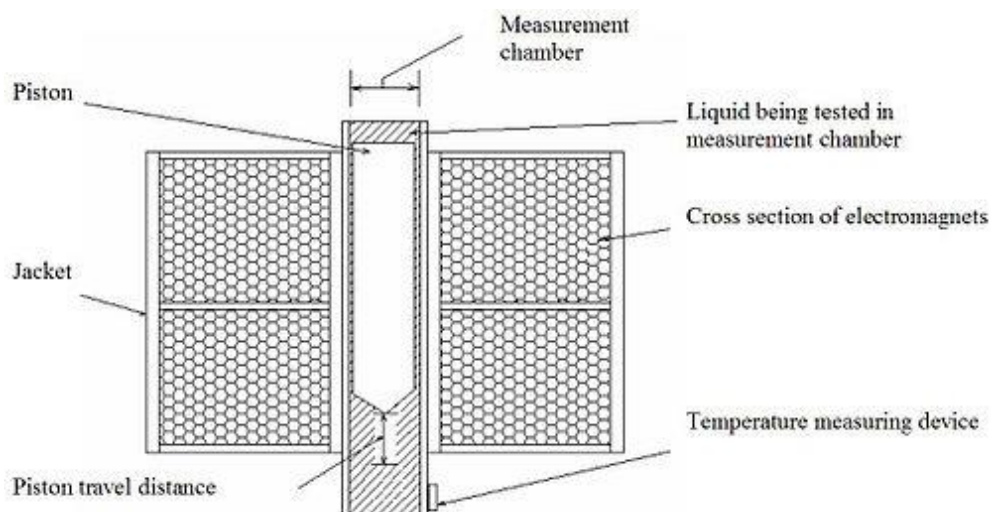
Εικόνα 16: Tensile test (Dogbone)

2.2 Περιγραφή της εργαστηριακής διάταξης που αναπτύχθηκε στην ΙΜΥΓ ΑΕ

Στα πλαίσια του έργου M-RECT που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο FP7 και που είχε ως στόχο την παραγωγή σύνθετων νανοϋλικών σε μήτρα από PEEK με ενίσχυση από νανοσωλήνες άνθρακα (CNT), η ελληνική εταιρεία Ινστιτούτο Μηχανικής Υλικών και Γεωδομών ΑΕ (ΙΜΥΓ ΑΕ) ανέπτυξε τη μηχανή δοκιμών σε φυλλωτά πολυμερή η οποία αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο.

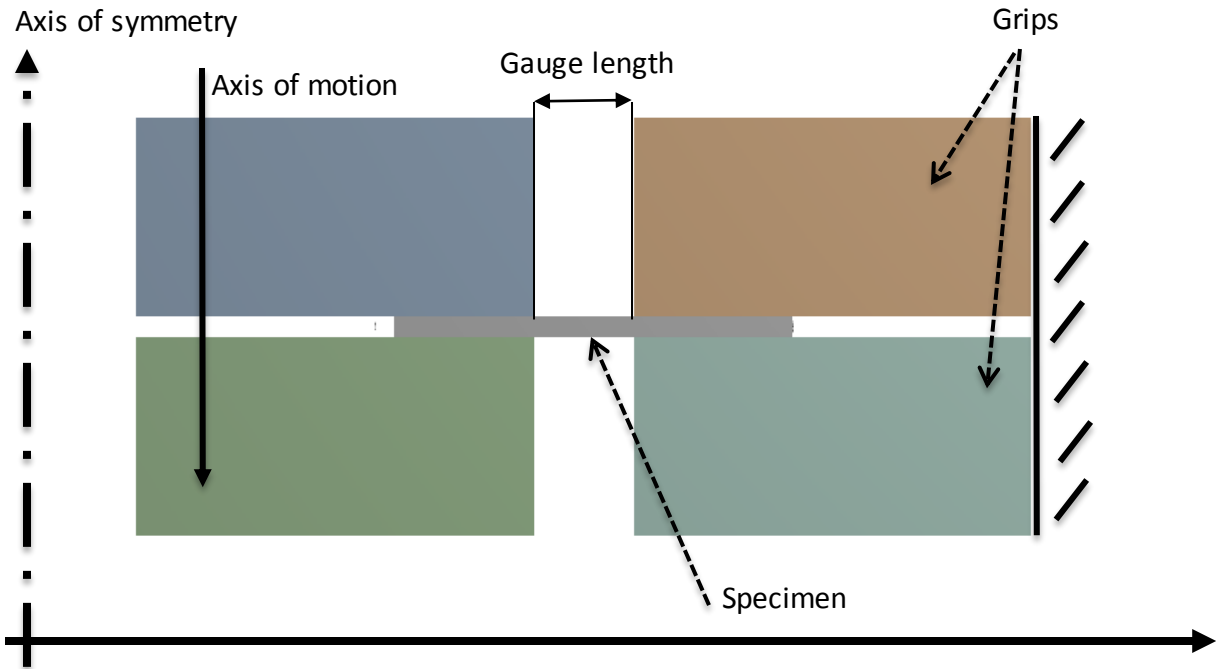
2.2.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχική ιδέα για την ανάπτυξη της συσκευής που θα ακολουθήσει προήλθε από ένα από τα βασικότερα τεστ της Πειραματικής Μηχανικής των Ρευστών, την μέτρηση του ιξώδους ενός ρευστού με ιξωδόμετρο παλινδρομούντος εμβόλου (oscillating piston viscometer). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16, πρόκειται για ένα έμβολο το οποίο αφήνεται συνήθως να ολισθήσει εντός ενός ομοαξονικού κοίλου κυλινδρικού, το διάκενο των οποίων είναι πληρωμένο με το υπό εξέταση ρευστό. Το έμβολο και ο κύλινδρος είναι δύο εξαρτήματα με μεγάλη ακρίβεια στις γεωμετρικές τους διαστάσεις και το βάρος και έτσι μπορεί να προσδιοριστεί με πολύ καλή ακρίβεια η διατμητική τάση που αναπτύχθηκε από το ρευστό στο έμβολο κατά την ολίσθησή του και έτσι να υπολογιστεί με ακρίβεια το ιξώδες.



Εικόνα 17: Ιξωδόμετρο παλινδρομούντος εμβόλου

Φυσικά αυτή η βασική αρχή μπορεί να αξιοποιηθεί και στην περίπτωση ενός στερεού με ιξωδοελαστική συμπεριφορά όπως περιγράφεται στο 1^ο κεφάλαιο. Με βάση την αρχή αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας δίσκος από φυλλωτό πολυμερές (polymer sheet) όπως φαίνεται στην Εικόνα 17 ο οποίος παγιδεύτηκε ανάμεσα σε δύο ομοαξονικές αρπάγες. Η εσωτερική κατά τον ίδιο τρόπο, όπως και στο ιξωδόμετρο, μπορεί να κινείται κατακόρυφα κατά τον άξονα του κυλίνδρου και να εκτελεί τεστ ελεύθερης ταλάντωσης.



Εικόνα 18: Αρχή λειτουργίας της διάταξης

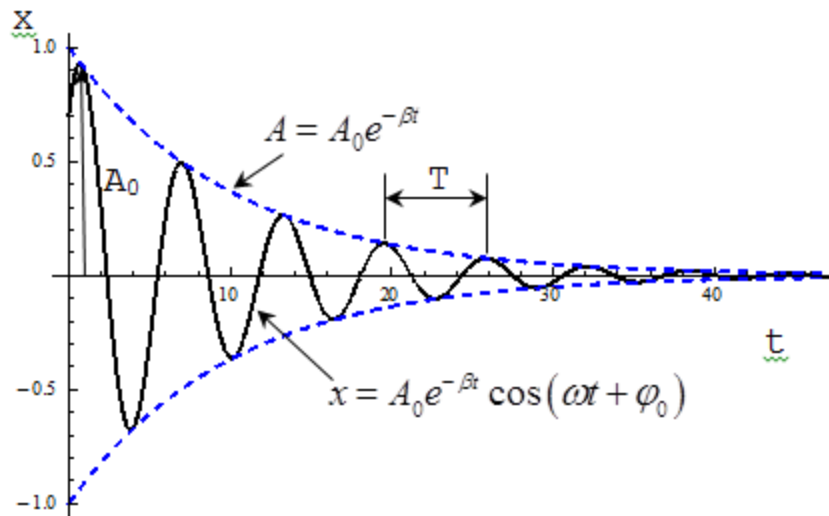
Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του δοκιμίου, είναι η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου, το πάχος του φυλλωτού υλικού και το πλάτος της περιοχής εφαρμογής της διάτμησης (περιοχή ενδιαφέροντος) όπως φαίνεται στο πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετροι δοκιμίου	
Εσωτερική διάμετρος	R_{in}
Εξωτερική διάμετρος	R_{out}
Πάχος	w
Πλάτος	t
Δύναμη συγκράτησης	F_{grip}

Ο στόχος της συγκεκριμένης διάταξης ήταν η διεξαγωγή δύο βασικών τεστ μέτρησης της απόσβεσης. Αρχικά, μετά από αφαίρεση του θορύβου, γίνεται προσαρμογή μιας περιβάλλουσας καμπύλης προκειμένου να προσδιοριστεί ο συντελεστής απόσβεσης (ζ) της ταλάντωσης μέσω της γνωστής εξίσωσης που περιγράφει την ελεύθερη αρμονική ταλαντωτική κίνηση ενός βαθμού ελευθερίας με υποκρίσιμη απόσβεση ($0 < \zeta < 1$) μέσω της εξίσωσης:

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_d t - \theta) \quad (2.2)$$

όπου οι συντελεστές A και θ εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες.



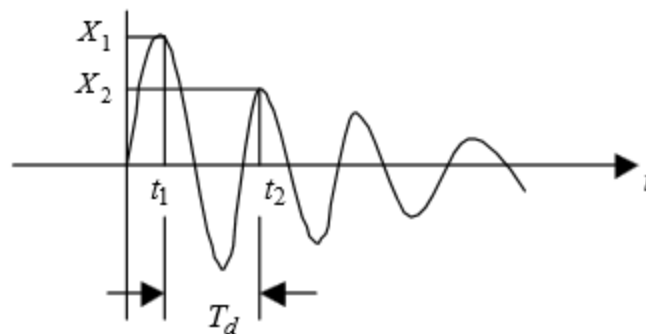
Εικόνα 19: Ελεύθερη ταλάντωση με υποκρίσιμη απόσβεση

Εναλλακτικά, ο συντελεστής απόσβεσης μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο λογαριθμικής μείωσης (logarithmic decrement method) που ορίζεται από τη σχέση:

$$\Lambda = \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = \delta T_d = \zeta \omega_0 \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}} \rightarrow \Lambda = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.3)$$

όπου δ είναι ο εκθετικός συντελεστής μείωσης του πλάτους:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x(t_1)}{x(t_2)} = e^{\delta T} \quad (2.4)$$



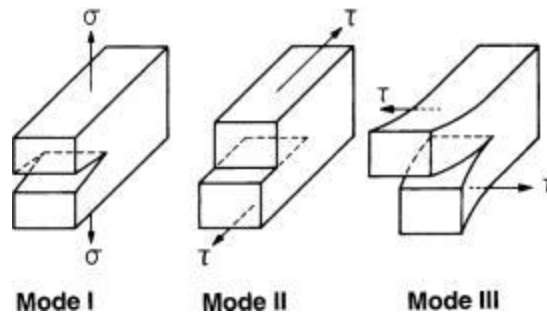
Εικόνα 20: Μεγέθη μετρούμενου σήματος

Από την οποία τελικά προκύπτει ότι η απόσβεση είναι:

$$\zeta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \quad (2.5)$$

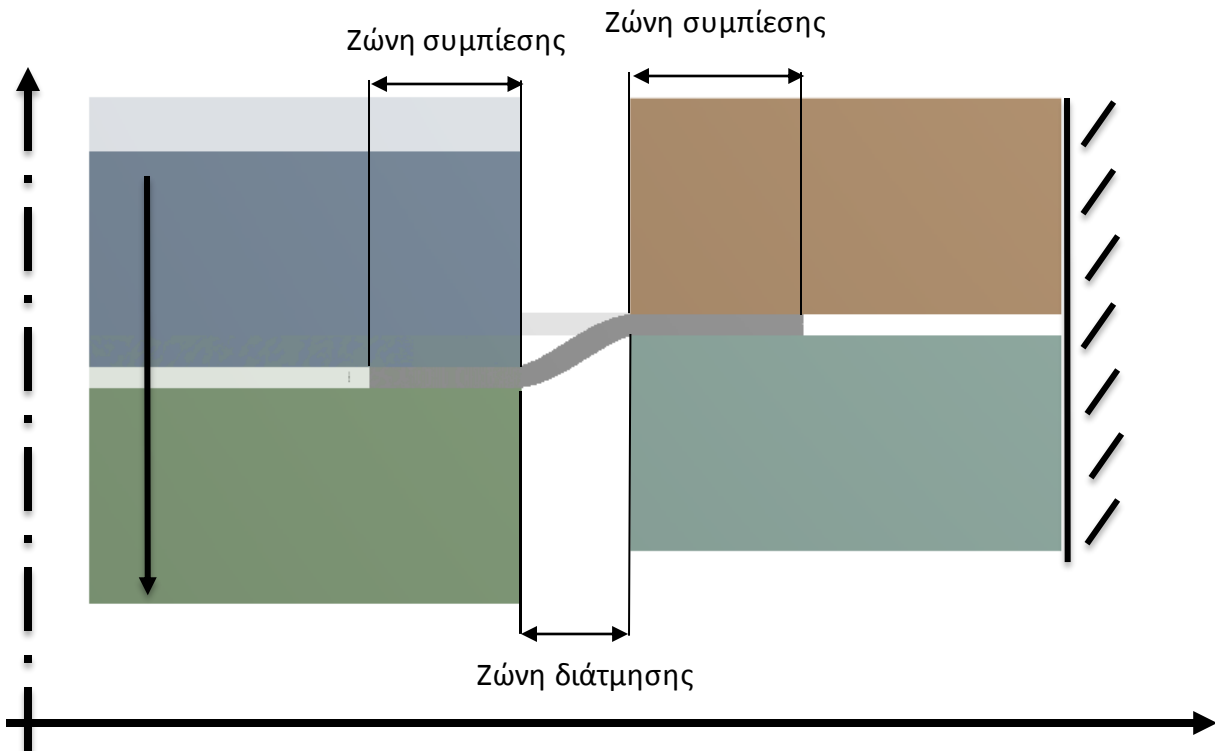
2.2.2 Είδος καταπόνησης

Το επόμενο βασικό χαρακτηριστικό είναι ο τρόπος εφαρμογής εκτός επιπέδου διάτμησης σε ένα φυλλωτό υλικό. Από τη Μηχανική των Υλικών ορίζονται τρεις βασικοί τρόποι διάδοσης ρωγμών και κατ' επέκταση αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 21: Τρόποι διάδοσης ρωγμών και αστοχίας

Ο τρίτος τρόπος (Mode III) αποτελεί την κλασσική περίπτωση της εκτός επιπέδου ή αποσχιστικής διάτμησης, η οποία σε ένα δακτύλιο δημιουργείται όπως στην εικόνα:

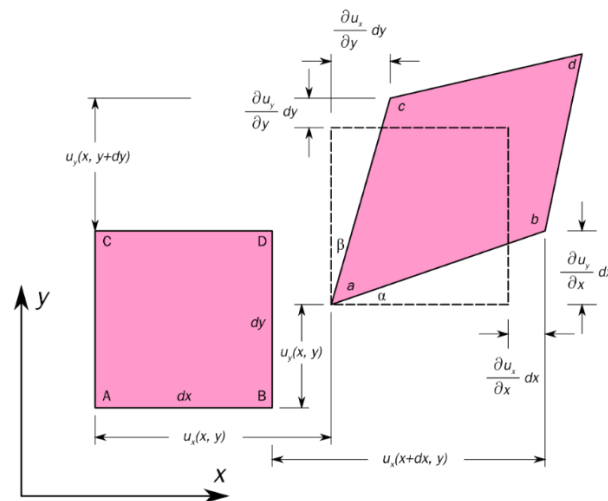


Εικόνα 22: Βασικά μεγέθη της δοκιμής

Παρατηρείται ότι η περιοχή επιβολής της διάτμησης βρίσκεται στο μη-συμπιεζόμενο κομμάτι του υλικού. Με βάση αυτή τη περιοχή μπορεί να οριστεί η διάτμηση που ασκείται ως εξής:

$$\Gamma_{\text{pure}} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma/2 & 0 \\ \gamma/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

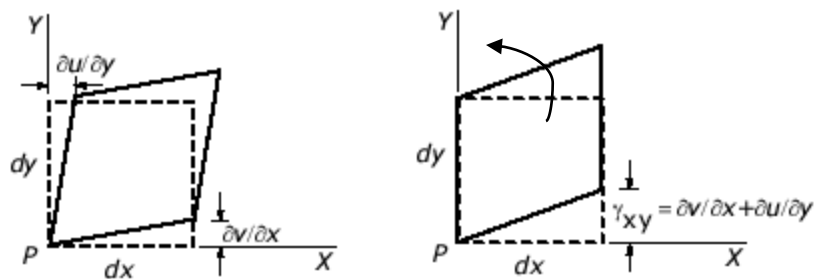
όπου $\gamma = \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$.



Εικόνα 23: Καθαρή διάτμηση (pure shear)

Εάν στον τανυστή της καθαρής διάτμησης προστεθεί μια στροφή ορίζεται η κατάσταση της καθαρής διάτμησης:

$$\Gamma_{\text{simple}} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma/2 & 0 \\ \gamma/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \gamma/2 & 0 \\ -\gamma/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$



Εικόνα 24: Απλή διάτμηση (simple shear)

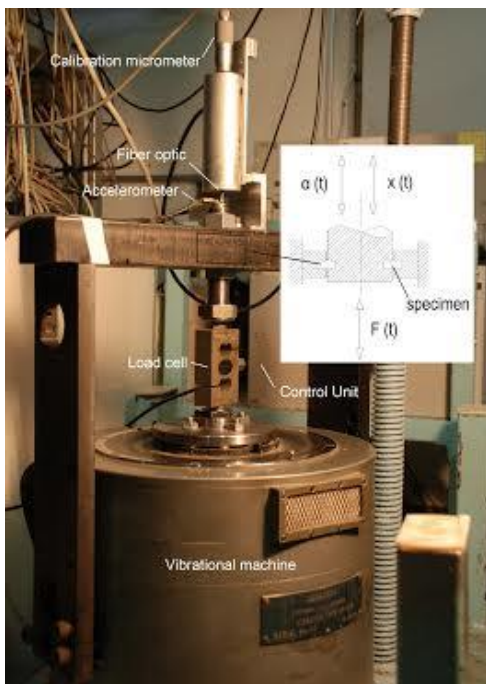
Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνει κανείς ότι η ανάπτυξη ορθών τάσεων στο δοκίμιο εξαιτίας της καταπόνησης του σε διάτμησης εκτός επιπέδου υποδηλώνουν

την ύπαρξη κάμψης σε αυτό και άρα αλλοιώνουν την καθαρή φύση του πειράματος. Το συγκεκριμένο ζήτημα θα αναλυθεί στο κεφάλαιο που ακολουθεί (3^ο κεφάλαιο).

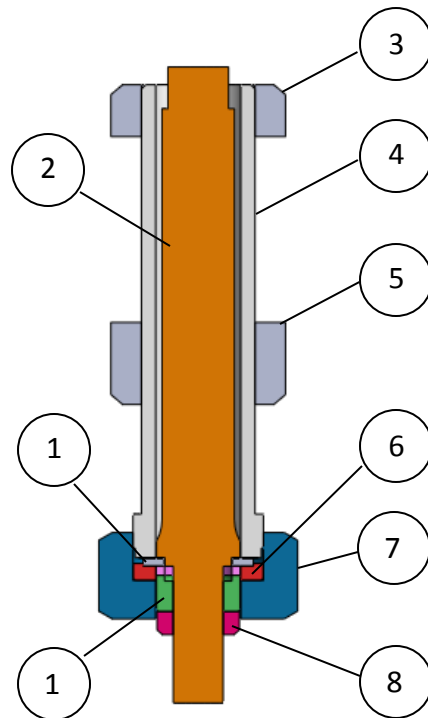
Για την καθαρή καταπόνηση του δοκιμίου σε εκτός επιπέδου διάτμηση (out-of-plane shear) είναι αναγκαίο να μελετηθούν η κάμψη που αναπτύσσεται κατά την εκτροπή του αντικειμένου από τη θέση ισορροπίας του αλλά και τι βαθμός ομοιομορφίας τη επιθυμητής εντατικής κατάστασης επιτυγχάνεται στη ζώνη διάτμησης (gauge length). Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν οι τάσεις (ορθές και διατμητικές) που αναπτύσσονται στη περιοχή ενδιαφέροντος με στόχο να γίνουν κατάλληλες αδιαστατοποιήσεις ώστε να προκύψουν οικογένειες δοκιμών που να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά μηχανικής ομοιότητας.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο που χαρακτηρίζει ένα υλικό υπό δοκιμή είναι η καταπόνηση του εντός της ελαστικής περιοχής. Προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη επαναληψιμότητα στη μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου κρίνεται αναγκαία η άσκηση διατμητικής τάσης που βρίσκεται στο $20\% \cdot \sigma_y$.

2.2.3 Υλοποίηση αρχικού σχεδιασμού



Εικόνα 25: Συσκευή διάτμησης (IMYG ΑΕ)



Εικόνα 26: Βασικός μηχανισμός

Όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα η υλοποίηση της αρχικής σχεδίασης που έγινε στην IMYG ΑΕ περιελάμβανε την προσαρμογή πλαισίου τύπου Gantry πακτωμένου στη περιφέρεια ενός ηλεκτρομαγνητικού δονητικού επενεργητή. Το κύριο μέρος του μηχανισμού, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αποτελείται από έναν βασικό

άξονα πάνω στον οποίο προσαρμόζεται το δοκίμιο για τη μεταφορά της γραμμικής κίνησης, ένα θάλαμο στον οποίο βρίσκεται ο άξονας, στο κάτω μέρος του οποίου προσαρμόζεται περικόχλιο, με τρόπο τέτοιο ώστε να παγιδευτεί το δοκίμιο ανάμεσα στις δύο περιοχές. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος θαλαμίσκος πακτώνεται με δύο περικόχλια στο πλαίσιο της διάταξης και στο επάνω μέρος του προσαρμόζεται δίσκος ανάκλασης της δέσμης laser που παράγεται από τη μετρητική συσκευή Laser Doppler Vibrometer, η οποία βρίσκεται στερεωμένη στη κορυφή του πλαισίου στήριξης. Μεταξύ του άξονα και του επενεργητή παρεμβάλλεται δυναμοκυψέλη (load cell) η οποία επιτρέπει τη μέτρηση της δύναμης αντίστασης που αναπτύσσεται από το υλικό κατά τη κατακόρυφη εκτροπή του από τη θέση ισορροπίας του.

2.3 Αξιολόγηση του σχεδιασμού

2.3.1 Στιβαρότητα

Σε πρώτη φάση μετρήθηκε και αποτυπώθηκε σε 3D μοντέλο με τη χρήση του προγράμματος SolidWorks η υπάρχουσα διάταξη. Με βάση το μοντέλο αυτό έγινε μια αρχική δυναμική ανάλυση της διάταξης με το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, προκειμένου να διαπιστωθεί αν η δυναμική συμπεριφορά της είναι ικανή να υποστηρίξει μια τέτοια δοκιμή.

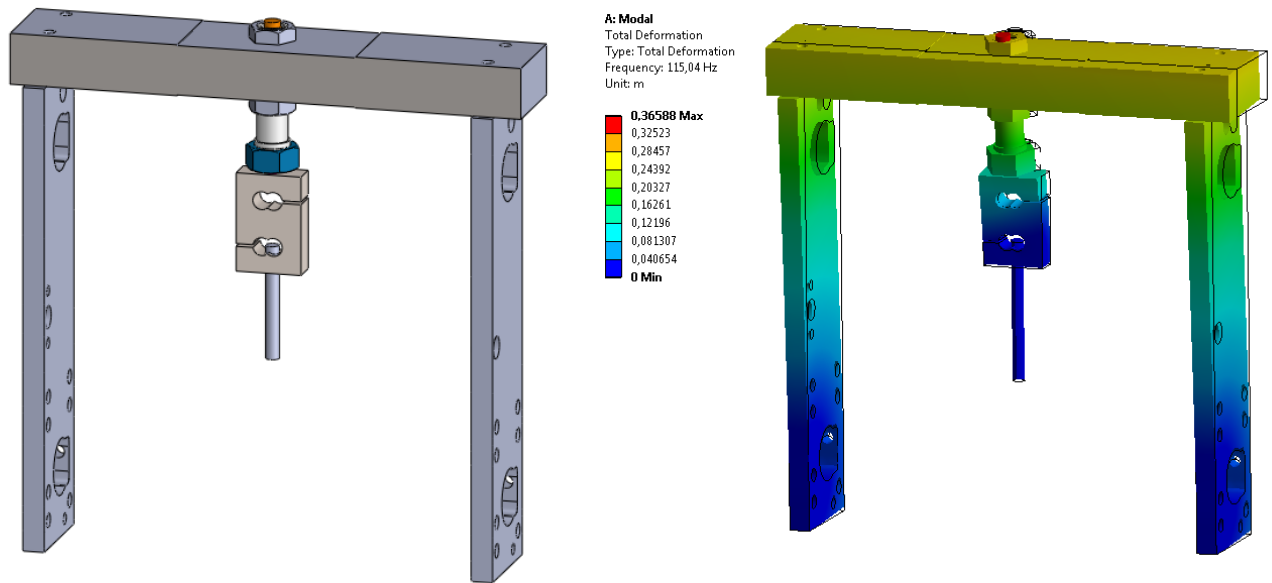
Για την ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων της διάταξης θεωρήθηκε πακτωμένο το μέρος του πλαισίου το οποίο στερεώνεται στη περιφέρεια της δονητικής τράπεζας. Έτσι μπορούμε να δούμε τις περιοχές συχνότητας που θα διεγερθούν σε μια ελεύθερη ταλάντωση με βάση τις οριακές συνθήκες που ορίστηκαν.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρατηρήθηκε ότι οι ιδιοσυχνότητες της υπάρχουσας διάταξης μειώνουν την δυνατότητα αξιόπιστης μέτρησης σε ένα επίπεδο μικρότερο των 100Hz.

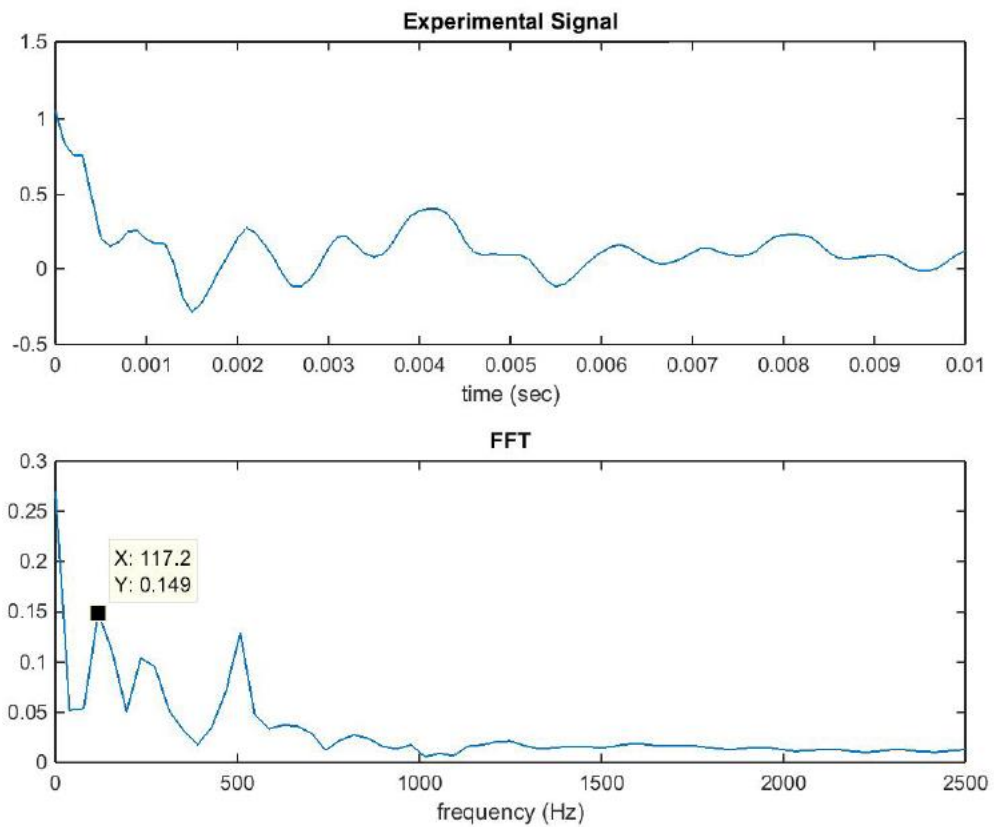
2.3.2 Είδος δοκιμής

Από τα πειράματα που εκτελέστηκαν και τα δεδομένα μετατόπισης χρόνου που προέκυψαν για το πλαστικό PEEK (Poly-Ether-Ether-Ketone), μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για την απορρόφηση ενέργειας από τη συσκευή. Με μετασχηματισμό Fourier (FFT) που έγινε με το λογισμικό MATLAB.

Παρατηρήθηκε ότι το σήμα που μετρήθηκε εμφανίζει σημαντική υπογραφή σε συχνότητα διεγερση 117Hz. Αυτή η συχνότητα βρίσκεται σε απόσταση 1.7% από τη πρώτη ιδιοσυχνότητα της συσκευής (115Hz), όπως φαίνεται στην εικόνα και έτσι μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η δυναμική συμπεριφορά του δοκιμίου σε συχνότητες κάτω των 200Hz είναι αδύνατο να προσδιοριστεί.



Εικόνα 27: 3D Μοντελοποίηση και ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων



Εικόνα 28: Μετατροπή του μετρούμενου σήματος στο πεδίο της συχνότητας (FFT)

2.3.3 Συγκράτηση

Ο μηχανισμός συγκράτησης αποτελείται από δύο ομοαξονικά περικόχλια (7 και 1 στην Εικόνα 19) τα οποία συσφίγγονται προκειμένου να προεντείνουν το παγιδευμένο δοκίμιο. Ωστόσο, κανείς μπορεί να διαπιστώσει ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός επάγει στρεπτικές τάσεις στην επιφάνεια του δοκίμιου με αποτέλεσμα αφενός να μπορεί να το οδηγήσει σε διαρροή, αφετέρου να προεντείνει το δοκίμιο με αποτέλεσμα την αλλοίωση της ομοιόμορφης εντατικής κατάστασης που είναι επιθυμητή.

2.3.4 Μηδενισμός / Μικρορύθμιση (zero set)

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι ήταν εξαιρετικά δύσκολο να ευθυγραμμιστεί το τεμάχιο μέσα από την ομοιόμορφη σύσφιξη των περικοχλίων. Επιπλέον, η αβεβαιότητα του συντελεστή τριβής πλήττει σε μεγάλο βαθμό την επαναληψιμότητα της δοκιμής. Από τις παραπάνω παρατηρήσεις προέκυψε η ανάγκη για έναν μηχανισμό μικρορύθμισης που θα ευθυγραμμίζει τις εσωτερικές και εξωτερικές αρπάγες.

2.3.5 Αναρτημένα βάρη και οδήγηση

Μια ακόμη βασική αδυναμία του πρωτοτύπου αποτελεί η μη ακριβής κεντρική τοποθέτηση του δοκίμιου στη θέση ισορροπίας. Σε ένα μακρο-επιπέδο θα μπορούσε να γίνει μια τοποθέτηση του δοκίμιου με μικρή εκκεντρότητα, ωστόσο αναδείχθηκε η ανάγκη για επίτευξη της ελάχιστης εκκεντρότητας στη τοποθέτηση του δοκίμιου.

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΑΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

3.1 Ανάπτυξη της νέας δοκιμής

Οι αντικειμενικές δυσκολίες για την κατασκευή και προσέγγιση μέσω τεχνικών αριθμητικής ανάλυσης των χαρακτηριστικών απορρόφησης ενέργειας ενός υλικού με πολύ μικρή αδράνεια, οδηγεί στην αξιοποίηση άλλων μεγεθών και τεχνικών. Σε αυτή την κατεύθυνση κρίνεται αναγκαίο να αναλυθεί η θεωρητική προσέγγιση της δοκιμής σε δυναμική διάτμηση.

Σε θεωρητικό επίπεδο η δοκιμή, η οποία υιοθετήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί πιο ακριβής μέτρηση της δυναμικής συμπεριφοράς του υλικού είναι απλή. Βασίζεται στην εκτροπή ενός δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας του σε μια καθαρή εντατική κατάσταση όπως είναι ο μονοαξονικός εφελκυσμός ή η απλή διάτμηση (simple shear) και ταυτόχρονα τη μέτρηση της δύναμης και της μετατόπισης του συστήματος συναρτήσει του χρόνου.

Η συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας είναι δυνατό να υλοποιηθεί με μια σειρά από δοκιμές με χαρακτηριστικότερη την ελεύθερη ταλάντωση (free decay test). Σε μια τέτοια περίπτωση θα ήταν σχετικά δύσκολο να εξαχθεί αξιόπιστο αποτέλεσμα, εξαιτίας όπως αποδείχθηκε νωρίτερα των αντικειμενικών δυσκολιών στο σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού μηχανισμού απομόνωσης ενός δοκιμίου με τόσο μικρή μάζα, αλλά και της δύσκολης μοντελοποίησης ενός υλικού με ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

Αντιθέτως μια δύναμη διέγερσης αρμονικά μεταβαλλόμενη με το χρόνο, θα έδινε ως αποτέλεσμα μια ίδιας συχνότητας αρμονική απόκριση αλλά με φάση που διαφέρει κατά ψ :

$$x(t) = X \exp(i\omega t - \psi) \quad (3.1)$$

Αν θεωρούσαμε το υλικό ένα απλό σύστημα μάζας-ελατηρίου, η σύνθετη σταθερά ελατηρίου (k^*) μπορεί να μετρηθεί ως:

$$F = k^* X \exp(-i\psi) \quad (3.2)$$

Το τεστ αυτό αν και απλό σε θεωρητικό επίπεδο παρουσιάζει στη πράξη σημαντικές δυσκολίες, τις οποίες θα προσπαθήσει να αντιμετωπίσει ο σχεδιασμός που αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, όπως εκτενώς περιγράφεται από τη σχετική βιβλιογραφία [], οι συμβατικοί, χαμηλού κόστους, μέθοδοι για τη μέτρηση της μετατόπισης με στόχο τον προσδιορισμό της διαφοράς φάσης ψ , δεν επαρκούν τόσο αναφορικά με τη συχνότητα δειγματοληψίας, όσο και με την ακρίβεια μέτρησης. Επιπλέον, για τη μέτρηση της μετατόπισης και της δύναμης απαιτούνται συστήματα μέτρησης με πεπερασμένη μάζα, η οποία αλλάζει την αδράνεια του

μετρούμενου δοκιμίου και για το λόγο αυτό πρέπει να αντισταθμιστεί, όπως φαίνεται στην εξίσωση του δυναμικού συστήματος:

$$(M+m_{\text{eff}})\frac{d^2x(t)}{dt^2} + k^* x(t) = f(t) \quad (3.3)$$

όπου m_{eff} η ενεργός μάζα του δοκιμίου και M η συνολική μάζα του άξονα.

Συνεπώς αν υποθέσουμε ότι:

$$\frac{X}{F} = \frac{1}{k(1+i\eta) - (M+m_{\text{eff}})\omega^2} = \alpha \exp(i(\omega t - \psi)) \quad (3.4)$$

Με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων προκύπτει:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\cos(\psi)}{\alpha} + (M+m_{\text{eff}})\omega^2 \\ \eta &= \frac{\sin(\psi)}{k\alpha} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Για τον επιτυχή προσδιορισμό της απορρόφησης ενέργειας η , αρκεί να προσδιοριστούν με ακρίβεια η γωνία φάσης ψ , και ο λόγος α .

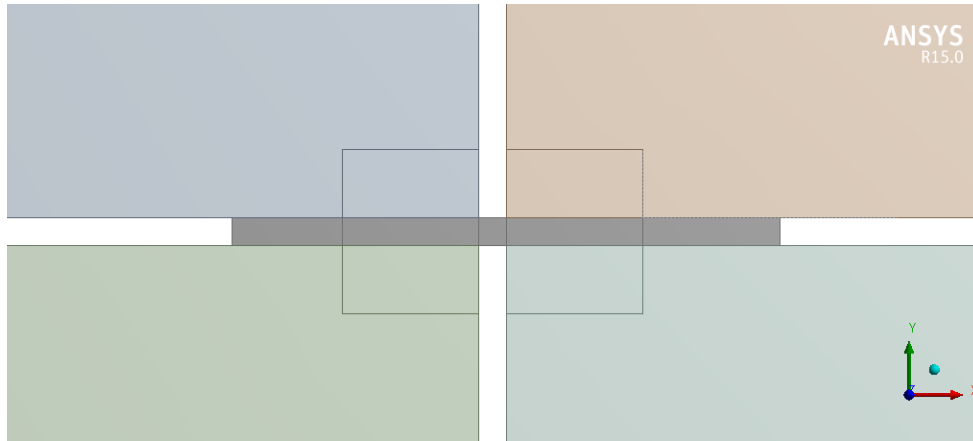
3.2 Μοντελοποίηση μηχανικής συμπεριφοράς φυλλωτού υλικού

Για την προσομοίωση των τάσεων που αναπτύσσονται στο υλικό αναπτύχθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE) στο πακέτο ANSYS. Για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιήθηκε η αξονοσυμμετρική επιλογή που προσφέρει το στοιχείο PLANE183. Πρόκειται για ένα 8-κομβικό δισδιάστατο στοιχείο δύο βαθμών ελευθερίας, το οποίο προσφέρει καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με ένα 4-κομβικό και ταυτόχρονα δεν αυξάνει πολύ το υπολογιστικό κόστος σε σχέση με στοιχεία περισσότερων κόμβων.

Το μοντέλο αυτό σε σύγκριση με ένα αναλυτικό μοντέλο θα επιτρέψει την ακριβέστερη προσέγγιση των φορτίων που αναπτύσσονται στο υλικό από το μηχανισμό συγκράτησης και της εξαναγκασμένης αρμονικής κίνησης στην οποία υποβάλλεται κατά τη φάση της δοκιμής.

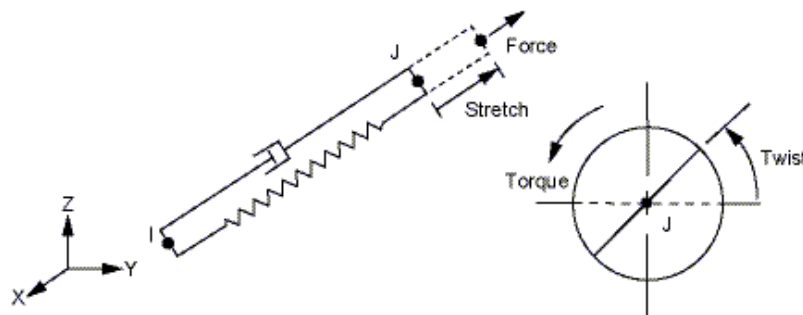
Ένας ακόμη βασικός στόχος του μοντέλου Π.Π. είναι η καλύτερη προσέγγιση της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται στη διεπαφή του μηχανισμού συγκράτησης με το υλικό καθώς και της ολίσθησης του υλικού. Η ολίσθηση σε κάθε περίπτωση είναι ανεπιθύμητη διότι αλλοιώνει την εντατική κατάσταση της απλής διάτμησης (simple shear) με την οποία καταπονείται το υλικό.

Όπως παρουσιάστηκε και νωρίτερα η γεωμετρία του μοντέλου Π.Π. είναι όπως φαίνεται στην εικόνα:



Εικόνα 29: Αξονοσυμμετρικό μοντέλο στο ANSYS

Η μοντελοποίηση της δύναμης συγκράτησης που ασκείται από το μηχανισμό υλοποιείται με τη χρήση του Π.Π. ελατηρίου COMBINE14, με την επιλογή της γραμμικής ελαστικότητας. Τα στοιχεία αυτό ορίζεται μεταξύ δύο κόμβων κι έτσι χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση των γραμμών μεταξύ των δύο στοιχείων συγκράτησης. Η προένταση του Π.Π. είναι ένας ακόμη βασικός παράγοντας για μια ακριβέστερη δοκιμή καθώς πρέπει να αποτρέπει την τριβή αλλά και να μην επάγει στο υλικό που τίθεται υπό δοκιμή τάσεις μεγέθους που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του.



Εικόνα 30: Στοιχείο ελατηρίου COMBIN14

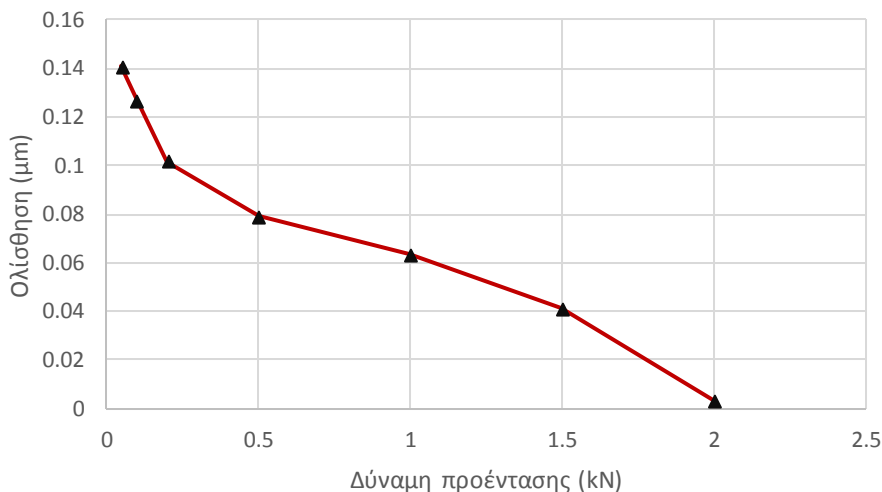
Σύμφωνα με την αρχή του Saint-Venant οι αναπτυσσόμενες τάσεις μακριά από τη θέση επιβολής του φορτίου δεν εξαρτώνται από. Αυτό επιτρέπει αρχικά να αποφευχθεί η μοντελοποίηση του πλήρους μηχανισμού συγκράτησης και σε επόμενο βήμα τη χρησιμοποίηση πιο πυκνού πλέγματος μόνο στη περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και σε μια περιοχή γύρω από αυτό με μέγεθος πενταπλάσιο του μεγέθους της ζώνης συμπίεσης εκατέρωθεν.

Η επίλυση στο λογισμικό γίνεται σε δύο βήματα. Στο μεν πρώτο εφαρμόζεται η προένταση στα ΠΠ των ελατηρίων και έπειτα στο επόμενο βήμα η στατική καταπόνηση του δοκιμίου με την εκτροπή του από τη θέση ισορροπίας.

3.3 Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του υλικού

3.3.1 Μελέτη της ολίσθησης

Η δύναμη προέντασης θα πρέπει να είναι ικανή να αποτρέψει την ολίσθηση του δοκιμίου από το μηχανισμό συγκράτησης, γεγονός το οποίο θα είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ξηράς τριβής (τριβή Coulomb), η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας ολίσθησης ($F_{\text{Coulomb}} \propto u_{\text{sliding}}^2$), φαινόμενο που συνεπάγεται την απορρόφηση σημαντικής ενέργειας μέσω ενός δευτερεύοντος μηχανισμού, και άρα την αλλοίωση των χαρακτηριστικών της εγγενούς απόσβεσης του υλικού. Από την παραμετρική ανάλυση που έγινε με τη βοήθεια του πακέτου ANSYS παρατίθεται ένας πίνακας συσχέτισης της δύναμης συγκράτησης F_{grip} με την μέγιστη ολίσθηση του δοκιμίου $\Delta x_{\text{sliding}}$ για μια τυπική γεωμετρία δοκιμίου:



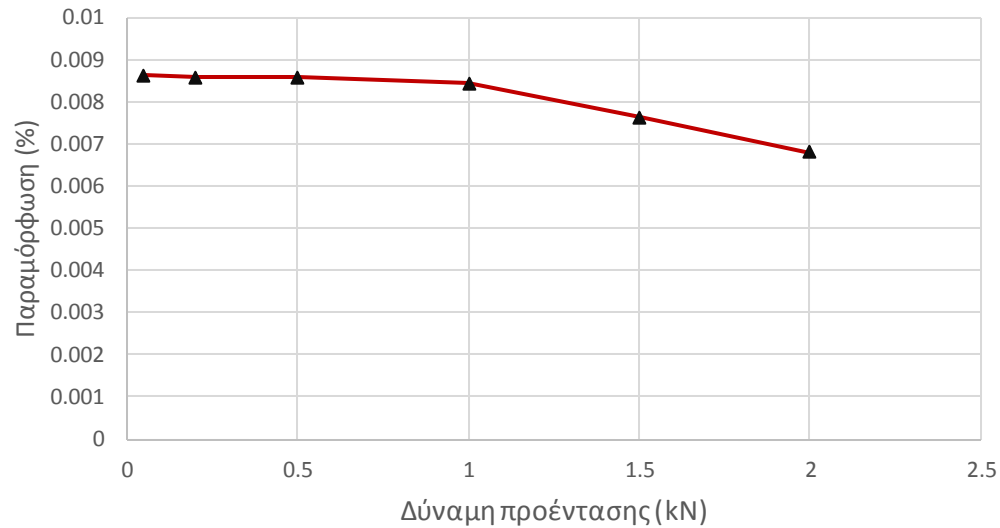
Εικόνα 31: Μελέτη της ολίσθησης

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το εργαλείο Contact Tool. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ της συγκράτησης και του δοκιμίου τέθηκε 0.35 και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Augmented Lagrange για την υλοποίηση της ολίσθησης λόγω τριβής στη διεπιφάνεια των δύο υλικών στη ζώνη συμπίεσης. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της δύναμης προέντασης στα 2 kN μπορεί να ελαχιστοποιήσει την ολίσθηση μεταξύ της συγκράτησης και του δοκιμίου.

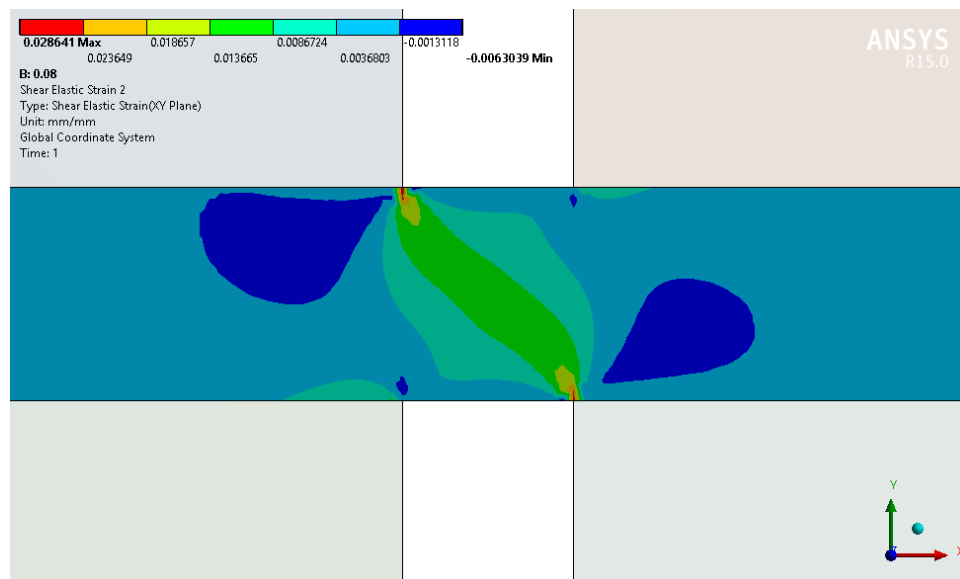
3.3.2 Μελέτη της απομόνωσης της ζώνης διάτμησης (gauge length)

Μελετήθηκε, ακόμη, η διατμητική παραμόρφωση (shear elastic strain) που προκαλείται στην ζώνη συμπίεσης για ένα δοκίμιο τυπικών διαστάσεων. Όπως

φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί η περιοχή του υλικού που συμμετέχει στην απορρόφηση ενέργειας περιορίζεται μόνο στη ζώνη διάτμησης με πολύ καλή ακρίβεια όταν η δύναμη προέντασης προσεγγίζει τα 2 kN.



Εικόνα 32: Μελέτη της απομόνωσης της ζώνης συμπίεσης



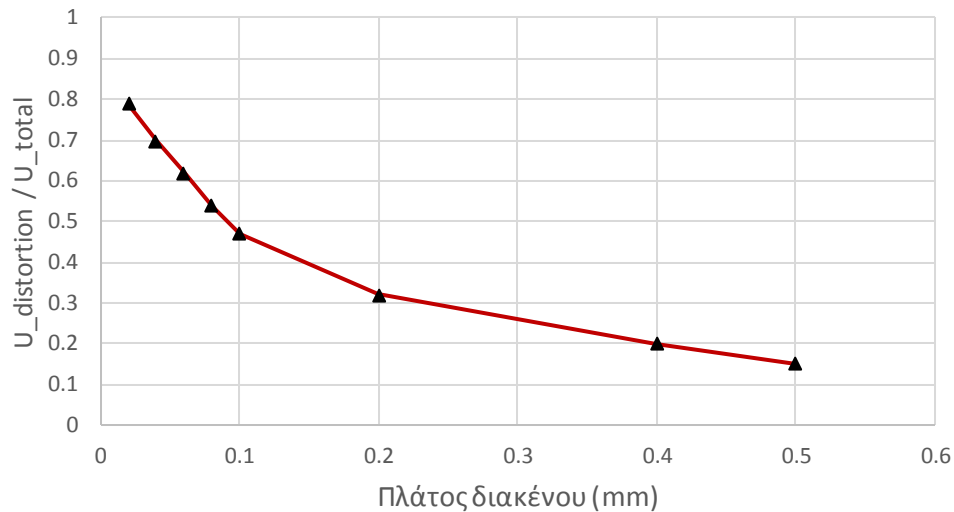
Εικόνα 33: Διατμητική παραμóρφωση δοκιμίου $g_l = 80\mu\text{m}$

3.3.3 Μελέτη της αναπτυσσόμενης κάμψης στη ζώνη διάτμησης

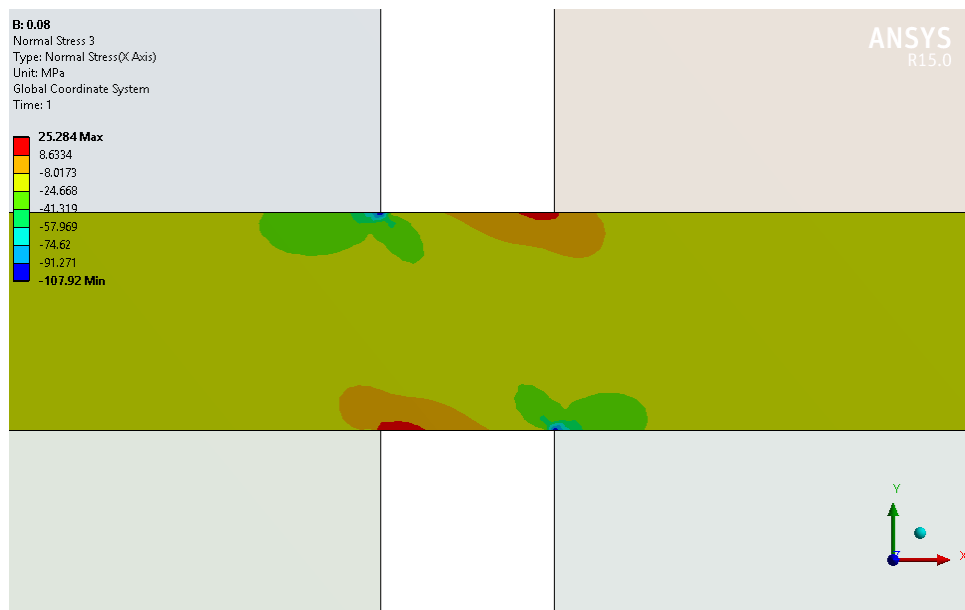
Μελετήθηκε παράλληλα η κάμψη που αναπτύσσεται στο δοκίμιο. Η ανάπτυξη ορθών τάσεων στη ζώνη διάτμησης αλλοιώνει τη φύση του πειράματος. Παρατηρήθηκε ότι

όταν το διάκενο (gauge length) φτάσει στα 20 μm οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις στο δοκίμιο είναι αρκετά μικρές.

Για τη μελέτη της κάμψης λόγω της ύπαρξης μιας κατανομής τάσεων υπολογίστηκε η σχέση διατμητικών τάσεων προς τη συνολική καταπόνηση του δοκιμίου στη ζώνη διάτμησης.



Εικόνα 34: Μελέτη της κάμψης στην ζώνη διάτμησης

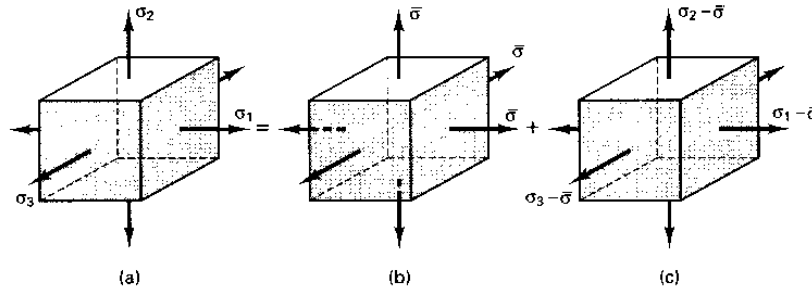


Εικόνα 35: Ορθή ακτινική παραμόρφωση

Για την υλοποίηση του παραπάνω μέτρου χρησιμοποιήθηκε η τροπική ενέργεια (strain energy) που προκύπτει από τη καταπόνηση του δοκιμίου, η οποία στη γενική περίπτωση ορίζεται ως:

$$U = \int \frac{\sigma}{2E} dV \quad (3.6)$$

Η επιλογή αυτή επιτρέπει την εξαγωγή ενός μεγέθους που αφορά το σύνολο του όγκου της ζώνης διάτμησης χωρίς να αλλοιώνεται από τις συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στα άκρα. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην ζώνη διάτμησης οφείλονται σε δυνάμεις που τείνουν να αλλάξουν το σχήμα της (dilatational strain energy) και σε δυνάμεις που τείνουν να αλλάξουν τον όγκο της (distortional strain energy).



Εικόνα 36: Ανάλυση των τάσεων

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_h$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\sigma_{11} - p) & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & (\sigma_{22} - p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & p \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Έτσι εξάγοντας την ισοδύναμη τάση Von Mises που αναπτύσσεται στη ζώνη διάτμησης και ολοκληρώνοντας με την αριθμητική μέθοδο (Simpson 1/3) στο πλέγμα των σημείων του αξονοσυμμετρικού επιπέδου προκύπτει η τροπική ενέργεια στρέβλωσης (distortion), δηλαδή αλλαγής του σχήματος των σημείων:

$$U_d = \int \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{VM}^2 dV \quad (3.8)$$

Η τροπική ενέργεια που οφείλεται στις τάσεις που τείνουν να αυξήσουν τον όγκο του δοκιμίου είναι:

$$U_h = \int \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_x + \sigma_y)^2 dV \quad (3.9)$$

Ενώ η τροπική ενέργεια που οφείλεται στο σύνολο των τάσεων που καταπονούν την ζώνη διάτμησης είναι:

$$U_{total} = U_d + U_h \quad (3.10)$$

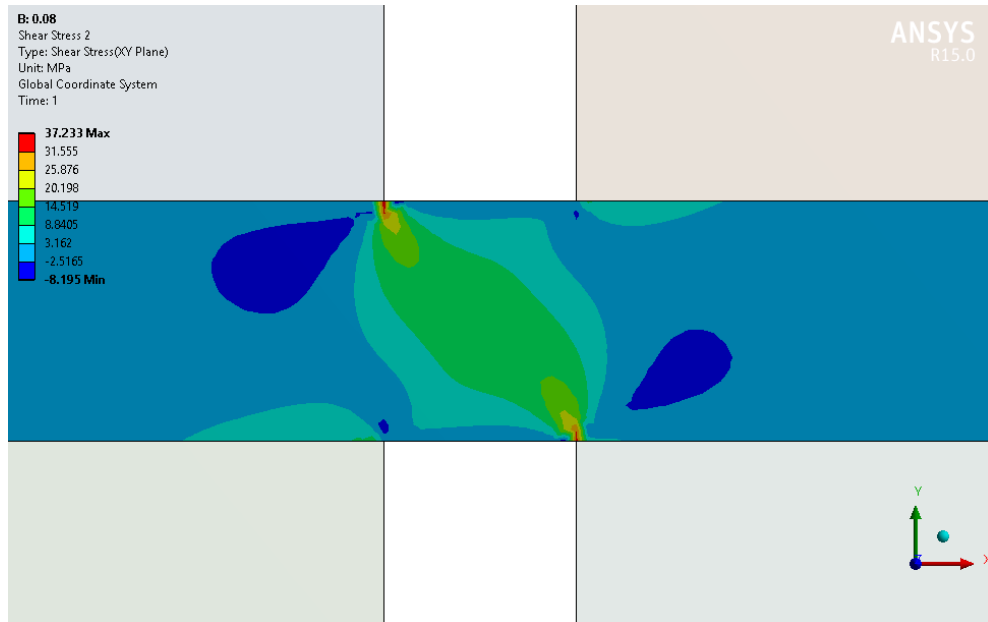
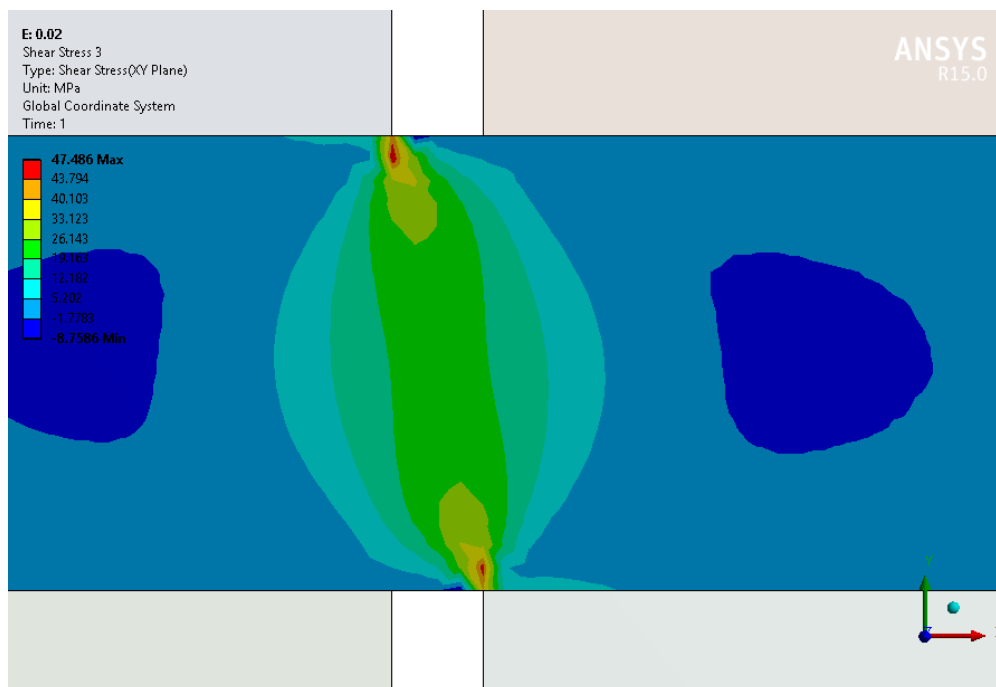
Παρατηρήθηκε ότι καθώς μειώνεται το διάκενο, το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στο gauge length είναι περισσότερο κοντά στην καθαρή διάτμηση σε ποσοστό 79%.

3.3.4 Σχολιασμός της ομοιομορφίας καταπόνησης

Παρατηρήθηκε ότι η διατμητική τάση καταπονεί το υλικό ομοιόμορφα σε μια ζώνη του δοκιμίου μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής συγκράτησης. Η ζώνη του υλικού που καταπονείται σε διάτμηση παρατηρήθηκε ότι είναι μεγαλύτερη όσο μειώνεται το πάχος της ζώνης διάτμησης. Ωστόσο παρατηρείται η συγκέντρωση τάσης στα όρια της διεπιφάνειας συγκράτησης και δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό δεν κρίθηκε σκόπιμο να αναλυθεί περαιτέρω μιας και οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι μικρές και δεν μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία το υλικό. Σε επόμενη φάση όμως κρίνεται σκόπιμη η μοντελοποίηση της ακμής (chamfer ή ράδιο) στα άκρα της συγκράτησης και με τη βάση τις αρχές της Μηχανικής των Θραύσεων, να προσδιοριστούν τα τασικά πεδία στα συγκεκριμένα σημεία.

3.3.5 Συμπεράσματα

Το δοκίμιο που επιλέχθηκε για την παραπάνω ανάλυση έχει πάχος 100 μm . Επιλέχθηκε αποτελώντας ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των φυλλωτών υλικών που έχει ανάγκη η βιομηχανία. Σε κάθε περίπτωση το πάχος του υλικού που εξετάζεται επιβάλλεται από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Το δοκίμιο του οποίου τα χαρακτηριστικά πληρούν τα ποσοτικά κριτήρια με βάση τα οποία θεωρήθηκε αξιόπιστη μια τέτοια δοκιμή έχει ζώνη διάτμησης των 100 μm . Επιπλέον υπολογίστηκε η απαιτούμενη δύναμη συγκράτησης στα 2 kN ενώ για την αποφυγή του λυγισμού (buckling) του φυλλωτού δοκιμίου η επιφανειακή τάση δεν πρέπει να ξεπεράσει τα 30 MPa. Έτσι ένα δοκίμιο που θα προσφέρει την δυνατότητα συμπίεσης σε μια περιοχή των 0.625 mm^2 μπορεί να προσφέρει αρκετά αξιόπιστες μετρήσεις.

Εικόνα 37: Διατμητική τάση για δοκίμιο $g_l=80\mu\text{m}$ Εικόνα 38: Διατμητική τάση για δοκίμιο $g_l=20\mu\text{m}$

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1 Μηχανισμός εξωτερικής συγκράτησης

Οι βασικές απαιτήσεις λειτουργίας για τη συγκράτηση του δοκιμίου είναι:

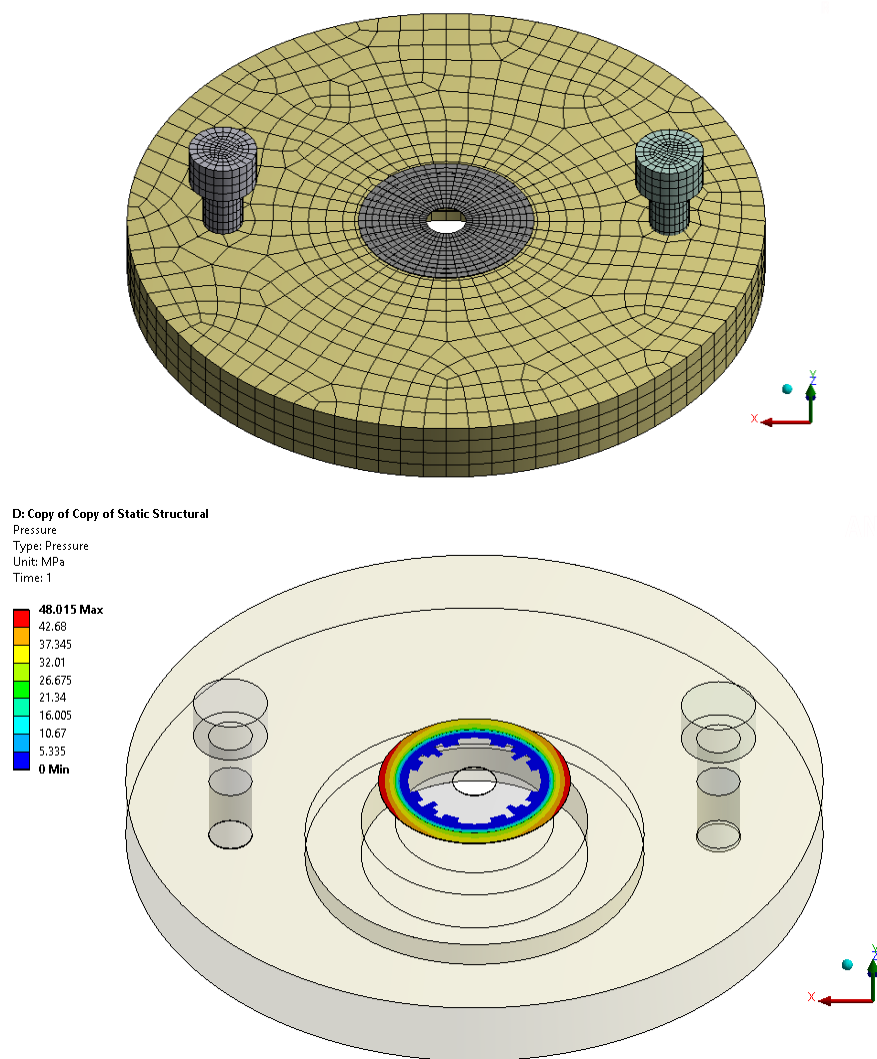
- Ρυθμιζόμενη δύναμη συγκράτησης
- Ομοιόμορφη επιβολή προέντασης
- Αποτελεσματική προένταση του δοκιμίου στην αξονική διεύθυνση
- Επιφάνεια ικανή για άσκηση δυνάμεων τριβής
- Απλότητα στη χρήση

Με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές αναλύθηκαν οι περιπτώσεις μιας σειράς από μηχανισμούς συγκράτησης με καμπτόμενους μηχανισμούς (flexure mechanisms) και μικρές υδραυλικές αρπάγες. Η τελευταία λύση περιλαμβάνει μικρό όγκο λαδιού παγιδευμένο σε κοιλότητα με μία έξοδο η οποία καλύπτεται με κοχλία με στεγάνωση, η σύσφιξη του οποίου αυξάνει την εσωτερική πίεση του θαλάμου του ρευστού. Μια τέτοια λύση ωστόσο παρουσιάζει σημαντικές κατασκευαστικές δυσκολίες, ενώ οι προδιαγραφές απλότητας και προέντασης στη κατακόρυφη διεύθυνση υστερούσαν δεδομένου ότι η παραμόρφωση σε μια τέτοια περίπτωση δεν είναι εύκολο να περιοριστεί στις άλλες διευθύνσεις.

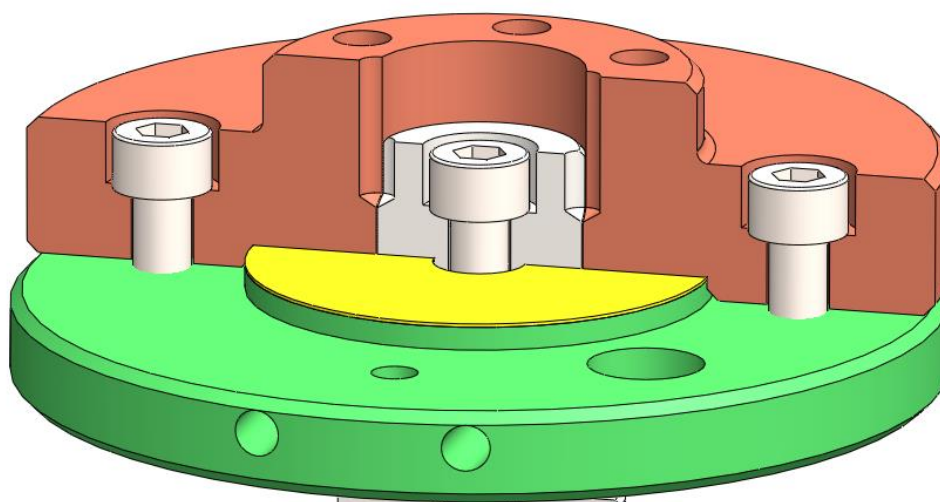
Η τελική λύση της συγκράτησης του αξονοσυμμετρικού δοκιμίου υλοποιήθηκε με έναν απλό μηχανισμό κοχλιών. Με βάση την ανάλυση του 3^{ου} κεφαλαίου στα όρια της ζώνη διάτμησης του δοκιμίου πρέπει να ασκούνται τουλάχιστον 30 MPa επιφανειακής πίεσης. Έτσι ο μηχανισμός συγκράτησης πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Να διαθέτει τους λιγότερους κοχλίες που μπορούν ωστόσο να έχουν τη σωστή κατανομή φορτίου (τουλάχιστον 30 MPa)
- Να δημιουργεί ένα ομοιόμορφο τασικό πεδίο στη ζώνη συμπίεσης του δοκιμίου
- Να είναι αρκετά στιβαρή ώστε να μη αλλοιώνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της και αλλάζει τον προσανατολισμό του δοκιμίου από τη δύναμη προέντασης

Υπολογίζοντας για διάφορες αποστάσεις από τη ζώνη συμπίεσης του δοκιμίου, ο βέλτιστος σχεδιασμός αποτελείται από δύο αντιδιαμετρικά τοποθετημένους κοχλίες, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Ακόμη, υπολογίστηκε η αναγκαία προένταση που είναι απαραίτητο να δεχθούν προκειμένου να δημιουργήσουν το απαιτούμενο τασικό πεδίο.



Εικόνα 39: Πίεση επιφάνειας στη ζώνη συμπίεσης



Εικόνα 40: Σχεδίαση του μηχανισμού συμπίεσης

Έχοντας ως οριακές συνθήκες την στήριξη της κάτω φλάντζας στην έδραση της πάνω στο πλαίσιο της δονητικής τράπεζας, προεντείνουμε τους δύο κοχλίες με διάφορες τιμές χρησιμοποιώντας την εντολή bolt pretension του λογισμικού ANSYS. Η συγκεκριμένη ρουτίνα επιτρέπει την μοντελοποίηση των κοχλιών ως στερεών κυλίνδρων χωρίς να υπάρχει ανάγκη μοντελοποίησης της πλήρους γεωμετρίας του σπειρώματος. Στην αντίθετη περίπτωση το υπολογιστικό κόστος θα αυξανόταν σημαντικά δεδομένου ότι θα χρειάζονταν τουλάχιστον δύο στοιχεία (elements) καθ' ύψος της κάθε σπείρας για την επαρκή μοντελοποίηση του φαινομένου της αξονικής προέντασης. Έπειτα, με τη χρήση του εργαλείου Contact Tool εξάγεται η πίεση επιφανείας που ασκείται στη περιοχή συμπίεσης του δοκιμίου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 39 απαιτείται προένταση ενός κοχλία M5-6.8 στα 4 kN προκειμένου να συγκρατηθεί βάσει προδιαγραφών το δοκίμιο. Η διάμετρος του κοχλία επιλέχθηκε με βάση την εφελκυστική τάση που δέχεται ο κορμός του:

$$\sigma = \frac{F_{\text{preload}}}{A_s} = \frac{F_{\text{preload}}}{\pi d_m^2 / 4} = \frac{4 \text{ kN}}{14.18 \text{ mm}^2} = 288 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

όπου η μέση διάμετρος υπολογίζεται $d_m = \frac{d_2 + d_3}{2}$.

Ένας κοχλίας M5 6.8 έχει όριο διαρροής στα $600 \times 80\% = 480 \text{ MPa}$ και άρα είναι ικανός να παραλάβει με ασφάλεια το απαιτούμενο φορτίο.

Η απαιτούμενη ροπή σύσφιξης, αν λάβει κανείς υπόψη την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του περικοχλίου και της φλάντζας, υπολογίζεται:

$$M_{\text{tight}} = F[\tan(\rho' + \alpha) + \mu_{\pi} \frac{d_m}{2}] \quad (4.2)$$

όπου F είναι η προένταση, μ ο συντελεστής τριβής περικοχλίου και φλάντζας, και

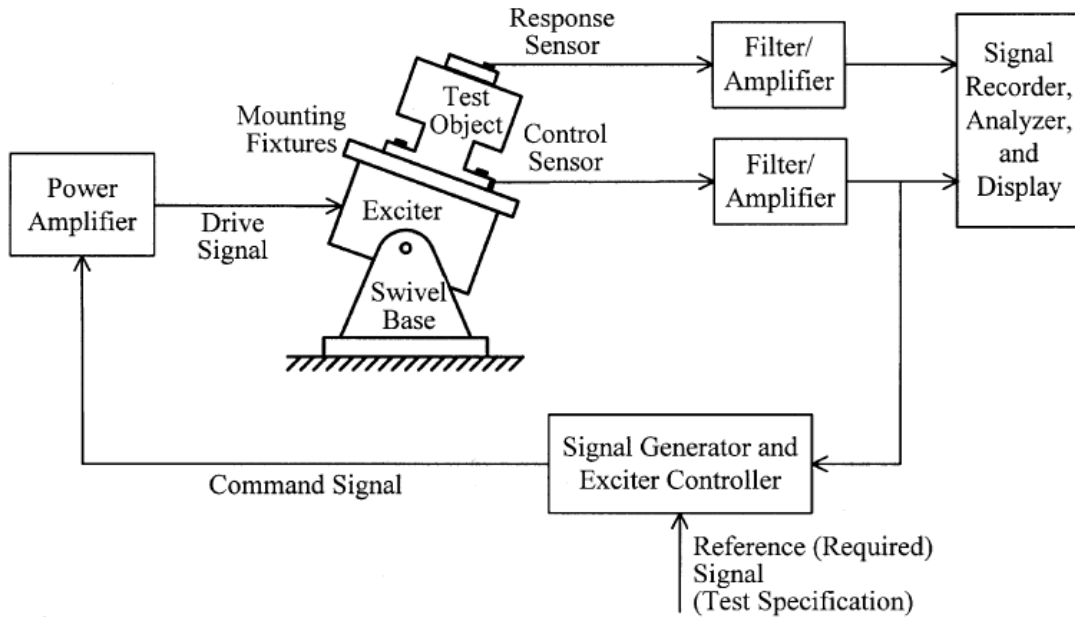
$$\rho' = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \rho}{\cos(\beta/2)}\right) \quad (4.3)$$

όπου η γωνία ελίκωσης $\beta = 60^\circ$ για μετρικά σπειρώματα και ρ η επιπρόσθετη κλίση του επιπέδου για τον υπολογισμό της τριβής μεταξύ των σπειρών περικοχλίου και κοχλία έτσι ώστε $\tan \rho = \mu_{sp}$.

Για την εσωτερική συγκράτηση, μια παρόμοια ανάλυση θα ήταν περιττή δεδομένου ότι η προένταση του κοχλία γίνεται ακριβώς στη ζώνη συμπίεσης του υλικού και άρα υπολογίστηκε μόνον η απαιτούμενη ροπή σύσφιξης.

Τελικά, η απαιτούμενες ροπές σύσφιξης υπολογίστηκαν 4.78 και 2.39 Nm για την εξωτερική και εσωτερική συγκράτηση αντίστοιχα.

4.2 Διέγερση δοκιμίου



Εικόνα 41: Συνήθης διάταξη δοκιμής με δονητική τράπεζα

Η πειραματική δυναμική ανάλυση είναι συνυφασμένη με την δημιουργία διέγερσης από κατάλληλο δονητικό μηχανισμό ή δονητική τράπεζα (shake table), ο οποίος παράγει και μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ορισμένο επίπεδο ταλάντωσης. Μια μεγάλη ποικιλία επενεργητών είναι διαθέσιμοι στην αγορά πλέον με διαφορετικές δυνατότητες και αρχές λειτουργίας, με τους βασικότερους τύπους να είναι οι υδραυλικοί, οι αδρανειακοί και οι ηλεκτρομαγνητικοί. Οι δυνατότητες που προσφέρει ο κάθε τύπος συνοψίζονται στο πίνακα που ακολουθεί:

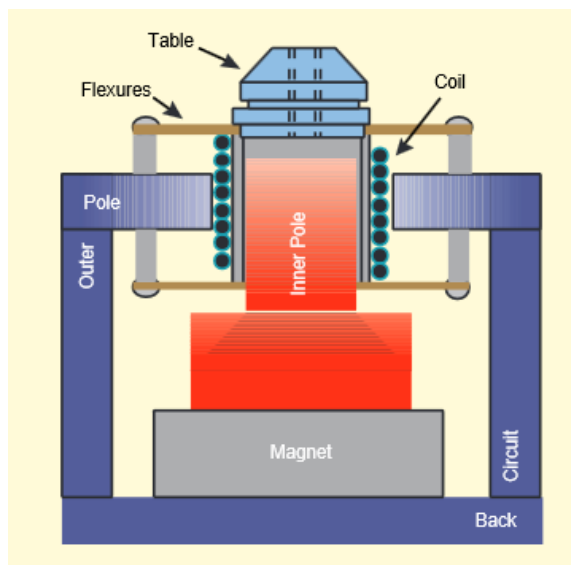
Typical Operation-Capability Ranges for Various Shaker Types

Shaker Type	Typical Operational Capabilities					
	Frequency	Maximum Displacement (Stroke)	Maximum Velocity	Maximum Acceleration	Maximum Force	Excitation Waveform
Hydraulic (electrohydraulic)	Intermediate 0.1–500 Hz	High	Intermediate	Intermediate	High	Average flexibility (simple to complex and random)
		20 in. 50 cm	50 in·s ⁻¹ 125 cm·s ⁻¹	20 g	100,000 lbf 450,000 N	
Inertial (counter-rotating mass)	Low 2–50 Hz	Low	Intermediate	Intermediate	Intermediate	Sinusoidal only
		1 in. 2.5 cm	50 in·s ⁻¹ 125 cm·s ⁻¹	20 g	1000 lbf 4500 N	
Electromagnetic (electrodynamic)	High 2–10,000 Hz	Low	Intermediate	High	Low to intermediate	High flexibility and accuracy (simple to complex and random)
		1 in. 2.5 cm	50 in·s ⁻¹ 125 cm·s ⁻¹	100 g	450 lbf 2000 N	

Εικόνα 42: Χαρακτηριστικά δονητικών επενεργητών

Τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την επιλογή ενός επενεργητή είναι το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης που μπορεί να λειτουργήσει υπό σταθερή επιτάχυνση, το εύρος συχνοτήτων στο οποίο μπορεί να επιταχύνει κάποιο δοκίμιο και το ονομαστικό φορτίο που μπορεί να δεχτεί.

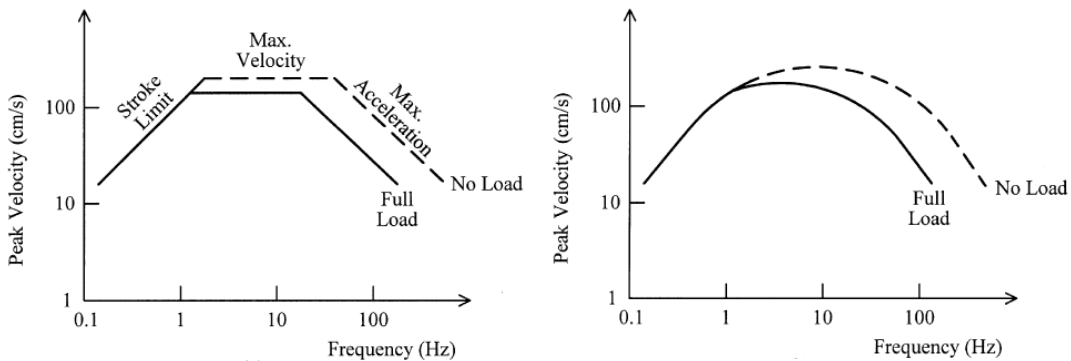
Για τη συγκεκριμένη δοκιμή επιλέχθηκε η χρήση του ηλεκτρομαγνητικού επενεργητή (DERRITRON) που διαθέτει το Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών ΕΜΠ. Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος επενεργητή, χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών και δοκιμών χάρη στην απλή λειτουργία του, στην πολύ καλή ακρίβεια της παραγόμενης διέγερσης και στη δυνατότητα που διαθέτει να μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ανοιχτού βρόχου κύκλωμα ελέγχου. Η αρχή λειτουργίας του είναι όμοια με αυτή του ηχείου, ενώ η μηχανική του διάταξη είναι απλή (Εικόνα 43). Η δύναμη διέγερσης παράγεται όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ένα κινούμενο πηνίο τοποθετημένο μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο. Έτσι δίνεται η δυνατότητα για σχετικά απλή δημιουργία και έλεγχο αρμονικής διέγερσης στο σύστημα. Το σταθερό μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα σταθερό ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος αποτελείται από τυλίγματα πεδίου γύρω από σιδηρομαγνητική βάση σταθερά πακτωμένη στο κέλυφος της μηχανής. Η κεφαλή του επενεργητή διαθέτει ένα ακόμη πηνίο τυλιγμένο γύρω του, το οποίο όταν διαρρέεται από ρεύμα αναπτύσσει απωστικές δυνάμεις και θα τεθεί σε γραμμική κατακόρυφη κίνηση χάρη στη σταθερή έδραση στην οποία είναι στηριγμένο.



Εικόνα 43: Δονητική τράπεζα DERRITRON (Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών ΕΜΠ)

Η καμπύλη λειτουργίας ενός ηλεκτρομαγνητικού σεισμικού επενεργητή αποτελείται από τρεις περιοχές: μια σταθερής μετατόπισης για χαμηλές συχνότητες, μια σταθερής ταχύτητας για μεσαίες συχνότητες και τέλος μια σταθερής επιτάχυνσης για υψηλές συχνότητες όπως φαίνεται και στην Εικόνα 44. Στη πραγματικότητα η κλίση

των διαγραμμάτων είναι πιο ομαλή και παρουσιάζουν μια περισσότερο μη-γραμμική συμπεριφορά ειδικότερα όταν το φορτίο που καλούνται να επιταχύνουν μεγαλώνει.



Εικόνα 44: Καμπύλες λειτουργίας ηλεκτρομαγνητικού επενεργητή

Κρίνεται σκόπιμο να σχολιαστούν οι απαιτήσεις λειτουργίας του σεισμικού επενεργητή που θα χρησιμοποιηθούν.

Η μέγιστη δύναμη στα 200Hz υπολογίζεται:

$$F_{\max} = m|a_r(\omega)|_{\max} = 1[\text{kg}] \times 1.257 \cdot 10^{-3} [\text{m/s}^2] = 0.00126\text{N} \quad (4.4)$$

Η μέγιστη ταχύτητα είναι:

$$v_s = Af = 4x_0f = 0.08\text{mm/s} \quad (4.5)$$

Υποθέτοντας ότι το δοκίμιο που πρόκειται να δοκιμάσουμε έχει μάζα 1kg, επιταχύνεται με συχνότητα 200Hz και πλάτος ταλάντωσης 1μm. Τότε η μέγιστη επιτάχυνση είναι $|a(\omega)|_{\max} = \omega^2 x_0 = 2\pi f_{\max} x_0 = 1.257 \text{mm/s}^2$.

4.3 Μετρητικά συστήματα

4.3.1 Μέτρηση δύναμης



Εικόνα 45: Load cell LCF300 και ADC της FUTEK

Για τη μέτρηση του δυναμικού φορτίου επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλού προφίλ και μικρής μάζας δυναμοκυψέλη. Η μέτρηση της δύναμης βασίζεται στη παραμόρφωση πλήρους γέφυρας Wheatstone επιμηκυσιόμετρων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το load cell θα είναι συνδεδεμένο με τον άξονα μετάδοσης της κίνησης. Συνεπώς η δυναμική συμπεριφορά του σώματος του οργάνου είναι ένας πολύ βασικός παράγοντας εκλογής. Πρακτικά, ένα load cell χαμηλού προφίλ και μικρού βάρους είναι πιο κοντά στο συγκεκριμένο κριτήριο. Ακόμη, το υλικό κατασκευής του load cell παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του καθώς τα συνήθη υλικά αλουμίνιο και ανοξείδωτος χάλυβας παρουσιάζουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά σε μεταβολή της θερμοκρασίας, με το μιν αλουμίνιο να έχει συνήθως συντελεστή θερμικής διαστολής $22 \times 10^{-6} \text{ m/mK}$, ενώ ο ανοξείδωτος χάλυβας συνήθως περίπου $9.9 - 16 \times 10^{-6} \text{ m/mK}$. Συνεπώς, θα ήταν σε κάθε περίπτωση προτιμότερο να αποφευχθεί η επιλογή ενός load cell από κάποιο κράμα αλουμινίου.

Το μοντέλο που επιλέχθηκε είναι το LCF300 της FUTEK, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο πίνακα που ακολουθεί:

Χαρακτηριστικά λειτουργίας	
Rated Output (RO)	2mV/V
Excitation	20Vdc MAX
Weight	142g
Material	17-4PH SS

Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο για την συμβατότητα των μετρήσεων δύναμης και μετατόπισης παίζει η συχνότητα δειγματοληψίας (sampling rate). Μια σχετικά απλή μονάδα ADC της FUTEK (USB220) με δυνατότητα απευθείας σύνδεσης σε Η/Υ έχει συχνότητα δειγματοληψίας, η οποία όσο αυξάνεται μειώνεται ο όγκος της πληροφορίας που μπορεί να μεταφέρει.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας	
Sampling Rate	Resolution (Noise Free Bits)
300	22
1,200	17
2,400	15.5

Η μέγιστη συχνότητα της δοκιμής είναι 200Hz, και με βάση το βασικό θεώρημα της δειγματοληψίας η συχνότητα μέτρησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 400 samples/sec . Η επόμενη διαθέσιμη συχνότητα για τη συσκευή καταγραφής είναι τα 1200 samples/sec , όπου η καταγραφή γίνεται με 17 bits.

Άρα η ανάλυση του είναι:

$$R = \frac{V_{ADC}}{2^{Bits} V_{exct}} RO = 0.00021N \quad (4.6)$$

Η ανάλυση που προέκυψε πρέπει να είναι επαρκής για την μέτρηση του ελάχιστου δυναμικού φορτίου της δοκιμής. Άρα για πλάτος ταλάντωσης 1 μm στα 10Hz μια μάζα 1kg δημιουργεί δυναμικό φορτίο που υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{dyn} = \frac{\omega^2 A}{m} = (2\pi f)^2 \frac{4x_0}{m} = 0.0079N \quad (4.7)$$

Συνεπώς η σχετική ακρίβεια μέτρησης του φορτίου θα είναι 2.5%.

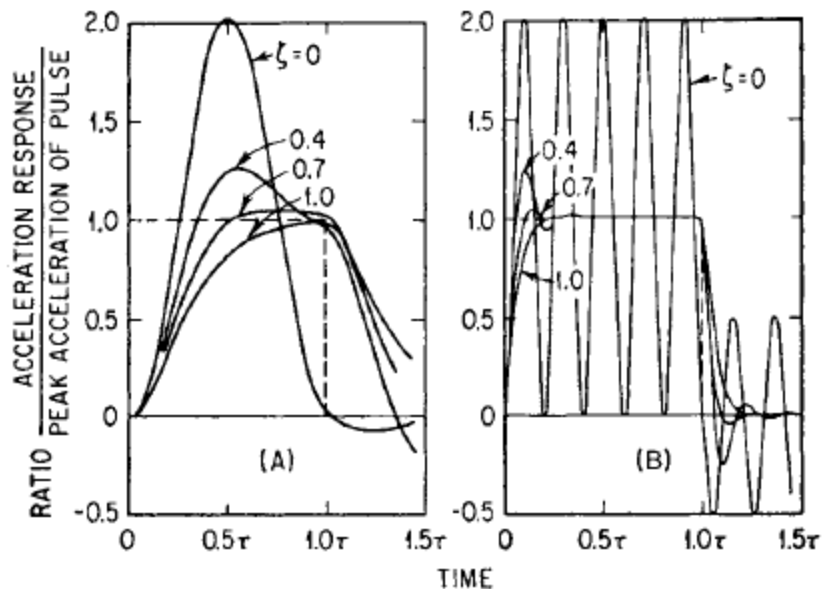
4.3.2 Μέτρηση μετατόπισης

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως επιλέχθηκε η μέτρηση απευθείας της κατακόρυφη μετατόπιση προκειμένου να υπολογίσουμε τη διάτμηση με την οποία καταπονείται το υλικό. Η λύση της απευθείας μέτρησης υπερτερεί σε μια σειρά κομβικών παραμέτρων για τη διεξαγωγή ακριβής μέτρησης έναντι της πιο συνηθισμένης περίπτωσης μέτρησης δυναμικών φαινομένων, με επιταχυνσιόμετρα (accelerometers). Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα:

Επιταχυνσιόμετρο	Laser Doppler Vibrometer (LDV)
Μηχανική σύνδεση με το δοκίμιο, άρα προσθέτει μάζα και επηρεάζει την αδράνεια του	Κάνει μέτρηση χωρίς άμεση επαφή με το δοκίμιο
Χρήση διπλού ολοκληρωτή για υπολογισμό μετατόπισης (ζητούμενο), άρα εκτελούνται μια σειρά πράξεων με τετραγωνικές ρίζες που μειώνουν την ακρίβεια μέτρησης	Απευθείας μέτρηση του μεγέθους που μας ενδιαφέρει με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει τα 0.01μm και σχετική ακρίβεια 1%
Συσχέτιση strain με μετακίνηση, άρα είναι ευάλωτο σε αλλαγές περιβάλλοντος (πίεση, θερμοκρασία, υγρασία) και σε μηχανική καταπόνηση	Μετράει με ακτίνα laser αξιοποιώντας το φαινόμενο Doppler. Η ακτίνα laser επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, εντούτοις η μέτρηση που εκτελείται προέρχεται από τη σχετική κίνηση του στόχου
Στην περίπτωση κατακόρυφης μέτρησης χρειάζεται αντιστάθμιση για την επιτάχυνση της βαρύτητας (1g)	Δεν απαιτεί καμία αντιστάθμιση καθώς η μέτρηση του είναι ανάλογη μόνο της σχετικής θέσης του αντικειμένου

Παρουσία στη μέτρηση αρκετά μεγάλης υστέρησης (drift) με αποτέλεσμα η περίοδος δειγματοληψίας να μην είναι ικανοποιητική για την πλήρη αποτύπωση του φαινομένου

Η περίοδος δειγματοληψίας που μπορεί να επιτευχθεί καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις της δοκιμής

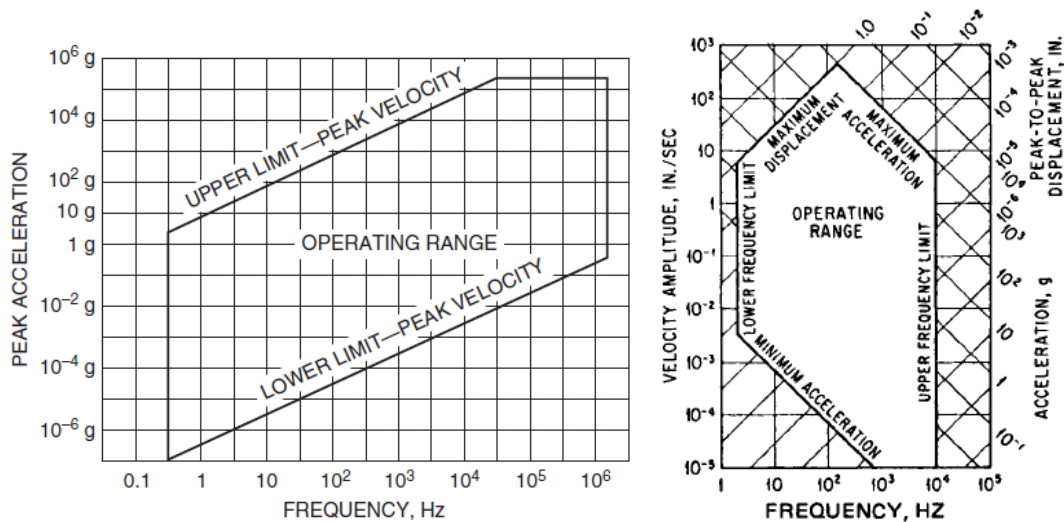


Εικόνα 46: Απόδοση επιταχυνσιόμετρου και LVD αντίστοιχα

Το Laser Doppler Vibrometer (LDV) χρησιμοποιεί το φαινόμενο Doppler, εκπέμποντας ακτίνα laser συγκεκριμένου μήκους κύματος λ και ανιχνεύοντας την αντανάκλαση που προκύπτει από την πρόσκρουση της σε αντικείμενο που ταλαντώνεται, παράγοντας σε πραγματικό χρόνο σήμα εξόδου ανάλογο της στιγμιαίας ταχύτητας του αντικειμένου. Παρακάτω φαίνεται ένα τυπικό εύρος επιταχύνσεων στο οποίο λειτουργεί με αξιοπιστία ένα LDV.



Εικόνα 47: LDV



Εικόνα 48: Όρια λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου και LDV

Η εγκατάσταση και η βαθμονόμηση ενός LDV απαιτεί προσοχή και καλό σχεδιασμό της διάταξης τοποθέτησης, καθώς σε πολλές περιπτώσεις η ευθυγράμμιση και ανακλαστικότητα παρουσιάζει δυσκολίες και απαιτητικές ανοχές κατεύθυνσης. Από τη χρήση του συγκεκριμένου οργάνου προκύπτουν δύο απαιτήσεις σχεδιασμού:

- *Τραχύτητα επιφάνειας στόχου*

Εφόσον η αρχή λειτουργίας του προϋποθέτει την αντανάκλαση της ακτίνας θα πρέπει η επιφάνεια του στόχου να έχει τραχύτητα μικρότερη από το μήκος κύματος της ακτίνας που χρησιμοποιείται. Το όργανο OMS LaserPoint 101 που χρησιμοποιήθηκε έχει ακτίνα μήκους κύματος $\lambda = 780\text{nm}$. Η ζητούμενη τραχύτητα επιφάνειας είναι $Ra \leq 780\text{nm} = 0.78\mu\text{m}$. Κατά ISO 1302:1992 τραχύτητα $Ra = 0.4\mu\text{m}$ επιτυγχάνεται με ποιότητα επιφανείας N5.

- *Παραλληλία επιφάνειας στόχου και οργάνου*

Επιπλέον για να αποφευχθεί ενδεχόμενο σφάλμα Abbe κατά την αντανάκλαση της ακτίνας θα πρέπει να υπάρχει καλή ανοχή παραλληλίας μεταξύ των επιφανειών του κινούμενου στόχου και της επιφάνειας στερέωσης του οργάνου. Αυτό είναι και ο λόγος για τον οποίο σχεδιάστηκε η βάση του οργάνου σε πολύ κοντινή απόσταση από το δοκίμιο.

Πιο συγκεκριμένα στο πίνακα δίνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του:

Ταχύτητα στόχου	$5\mu\text{m} - 800\text{mm/s}$
Συχνότητα μέτρησης	$0.01\text{Hz} - 20\text{kHz}$
Ελάχιστη απόσταση	10mm

4.4 Γραμμική οδήγηση

Για την ακριβή γραμμική μετατόπιση του άξονα μετάδοσης της κίνησης είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης. Το φορτίο που θα δέχεται η οδήγηση είναι μικρό (τάξης μερικών δεκάδων N), ωστόσο η στήριξη του άξονα κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να παραλαμβάνονται ατέλειες στην ευθυγράμμιση, στη κατασκευή, εκκεντρότητα ή κλίση στα σημεία σύνδεσης και προέντασης με σπειρώματα.

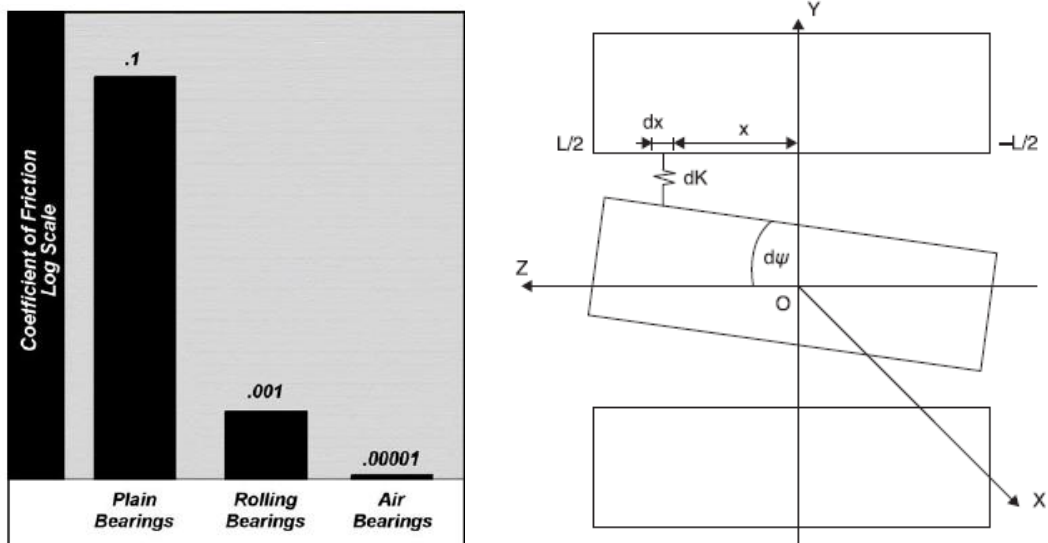
Η οδήγηση ωστόσο με στοιχεία κύλισης παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή:

- *Τριβή*

Η τριβή χωρίζεται συνήθως σε δύο κατηγορίες, την στατική και την δυναμική (ή τριβή Coulomb) η οποία προκαλείται μεταξύ δύο επιφανειών που κινούνται σχετικά. Τα στοιχεία κύλισης στη συγκεκριμένη εφαρμογή, εξαιτίας της αρμονικής κίνησης που εκτελείται θα εμφανίσουν το φαινόμενο του stick-slip κατά τη φάση της αλλαγής κατεύθυνσης και το φαινόμενο της ολίσθησης κατά την υπόλοιπη λειτουργία. Η αβεβαιότητα του συντελεστή τριβής, αλλά και το γεγονός ότι η φθορά και οι συνθήκες περιβάλλοντος μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά της αντίστασης λόγω τριβής, μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι εισάγεται ένα πρακτικά αδύνατο να υπολογιστεί σφάλμα σε μια μέτρηση μεγέθους ίδιας τάξης με τη δύναμη τριβής.

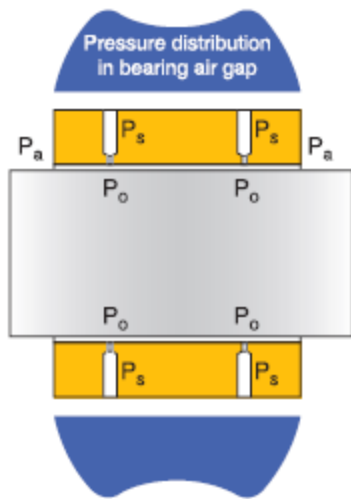
- *Χάρη (backlash)*

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που έχει κομβική σημασία είναι η χάρη που εμφανίζουν τα αξονικά ρουλεμάν στη διεύθυνση του άξονα. Συγκεκριμένα, μια κλίση από την προένταση του σπειρώματος θα μπορούσε να προκαλέσει κλίση της τάξης των 0.5° το οποίο συνήθως είναι εκτός των ορίων ευθυγράμμισης από ένα αξονικό ρουλεμάν.

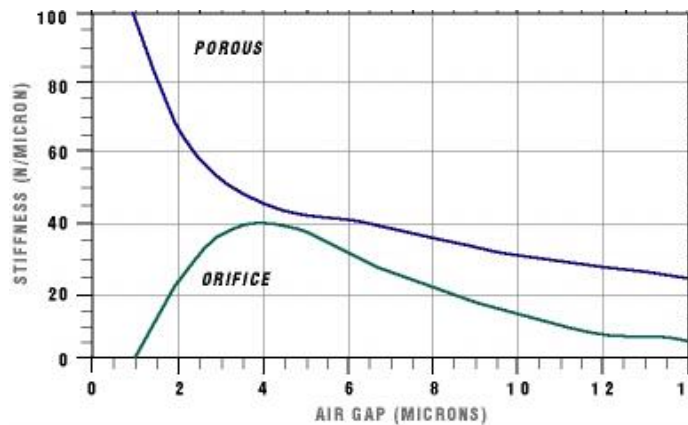


Εικόνα 49: Συντελεστής τριβής γραμμικής οδήγησης και tilt stiffness

Τα μειονεκτήματα αυτά ξεπεράστηκαν με τη χρήση αεροστατικού εδράνου, το οποίο πολύ συχνά πλέον αποτελεί μια αξιόπιστη λύση για το σχεδιασμό μηχανισμών υψηλής ακρίβειας. Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου οδήγησης βασίζεται στην ανάπτυξη ενός λεπτού φιλμ αέρα υπό πίεση. Το ακτινικό διάκενο του άξονα είναι συνήθως μικρό, της τάξης 1 έως 20μm καθώς η συνεκτικότητα του αέρα είναι πολύ μικρή (1e-6 Pa.s). Μάλιστα η ενδοτικότητα της οδήγησης που μπορεί να προσφέρει είναι συνάρτηση του διακένου όπως φαίνεται στην Εικόνα 51. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι αεροστατικών εδράνων, αν και η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια, η ανάπτυξη στρώματος αέρα με πίεση συνήθως 690kPa ο οποίος στη συνέχεια εκτονώνεται στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας μέσω από τον στραγγαλισμό του μια δύναμη αντίδρασης ικανή να υποστηρίξει πολύ υψηλά ακτινικά φορτία ακόμη και σε απαιτητικές εφαρμογές.



Εικόνα 50: Κατανομή πίεσης αεροεδράνου



Εικόνα 51: Εξάρτηση δυσκαμψίας από το μέγεθος του διακένου

Για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης λύσης υπολογίστηκε η αντίσταση του αεροεδράνου. Η ροή στο διάκενο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ροή Couette:

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4.8)$$

$$u(y) = u_0 \frac{y}{h}$$

Ωστόσο το πρόβλημα εδώ είναι αξονοσυμμετρικό και άρα η ροή αναπτύσσεται σε έναν άξονα όπου η ταχύτητα στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι η ταχύτητα κίνησης του άξονα ενώ η αξονική ταχύτητα του αέρα στην επιφάνεια του αεροεδράνου θεωρείται προσεγγιστικά μηδέν. Έτσι η διάτμηση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του άξονα κατά τη κίνηση του είναι:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \rightarrow C = \tau A \quad (4.9)$$

$$C = \mu_{\text{air}} \frac{A}{h_0} \approx 1e-7 \quad (4.10)$$

Ακόμη, υπολογίστηκε η διάμετρος του αεροεδράνου που θα μπορέσει να προσφέρει την επιθυμητή στήριξη και ευθυγράμμιση του άξονα. Για μηδενική εκκεντρότητα ($\epsilon=0$) του άξονα οδήγησης η ακτινική στιβαρότητα του αεροεδράνου υπολογίζεται:

$$k = \frac{\xi \cdot P_s D^2}{h_0} \quad (4.11)$$

όπου P_s η πίεση με την οποία τροφοδοτείται το αεροέδρανο από το συμπιεστή, D η ονομαστική διάμετρο άξονα και αεροεδράνου, h το ακτινικό διάκενο στο οποίο έχει σχεδιαστεί η λειτουργία του αεροεδράνου και ξ ένας συντελεστής απωλειών ο οποίος σχετίζεται με την διαμόρφωση του αεροεδράνου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η διαμόρφωση ενός αεροεδράνου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής για την οποία προορίζεται. Έτσι για παράδειγμα μπορεί να έχει είσοδο με πορώδες (sintered) υλικό προκειμένου να έχει περιορισμένο υδραυλικό πλήγμα και άρα καλή απόσβεση κραδασμών ή μια είσοδο μεγάλης αναλογικά με την έξοδο προκειμένου να έχει πιο γρήγορη απόκριση στις αλλαγές του φορτίου.

Ακόμη ο λόγος μήκος προς διάμετρο καθορίζει την γωνιακή ενδοτικότητα, την αντίσταση δηλαδή που εμφανίζει το έδρανο σε μια γωνιακή εκτροπή του άξονα από τη θέση ισορροπίας του. Εδώ επιλέχθηκε λόγος $L/D=2$ καθώς υπολογίστηκε ότι εξασφαλίζει την επιθυμητή στιβαρότητα στη δέσμευση του γωνικού βαθμοού ελευθερίας. Ο προσδιορισμός της γωνιακής (tilt) στιβαρότητας γίνεται με βάση τον τύπο:

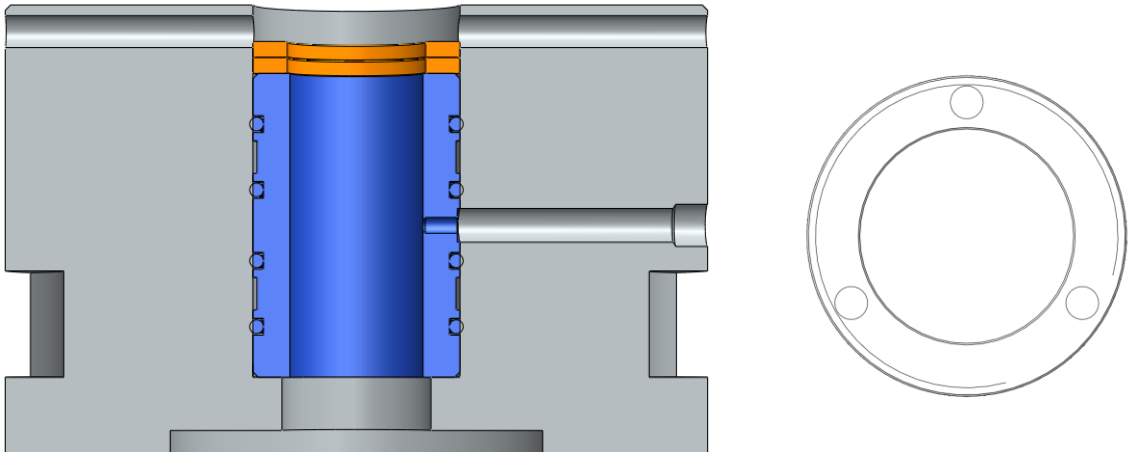
$$k_{\text{tilt}} = \frac{\xi \cdot (L/D)^2 L^3 P_s D}{h_0} \quad (4.12)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά της καμπτικής ενδοτικότητας του αεροεδράνου δίνονται στο πίνακα που ακολουθεί:

Radial stiffness	34 N/μm
Tilt stiffness	5.3 Nm/milirad
Max Load	187 N
Max Moment	1.9 Nm
Low friction/damping	1e-7N
Mass flow	0.8 – 1.01 LPM

Για την αποφυγή διαρροής μεταξύ αεροεδράνου και του κελύφους στο οποίο εδράζεται χρησιμοποιήθηκαν τσιμούχες όπως φαίνονται στην Εικόνα 52. Επιπλέον, η στήριξη του στη σωστή θέση έγινε με δύο retaining rings τα οποία φέρουν τρεις οπές

ώστε να μπορεί να είναι δυνατή η σύσφιξη τους από πάνω αφού ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος. Τα δύο αυτά περικόχλια θα εξασφαλίσουν την αξονική συγκράτηση κατά τη δυναμική φόρτιση καθώς η τάση αποσύσφιξης του κάτω δακτυλίου θα προεντείνει περισσότερο το επάνω.



Εικόνα 52: Συγκράτηση αεροεδράνου

Για τη λειτουργία τους απαιτείται επιπροσθέτως αεροσυμπιεστής, μανόμετρο για τον έλεγχο της πίεσης καθώς και συσκευή ξήρανσης του αέρα. Το κόστος των παραπάνω αν και μικρό εκτιμάται ότι δεν είναι σημαντικό για ένα εργαστηριακό ή βιομηχανικό περιβάλλον ενώ η πιθανότητα να υπάρχει τέτοιου είδους εξοπλισμός είναι μεγάλη. Σε κάθε περίπτωση, ο αεροσυμπιεστής θα πρέπει να έχει ισχύ:

$$N = \zeta \times pV = 1.5 \cdot 6 \times 10^5 [\text{Pa}] \cdot 0.91 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = 8.1 \times 10^2 \text{ W} = 0.81 \text{ kW} \quad (4.13)$$

4.5 Άξονας μετάδοσης κίνησης

Για τη σωστή συνεργασία με το αεροέδρανο και την ανάπτυξη του επιθυμητού στρώματος αέρα και άρα διακένου ο άξονας πρέπει να έχει διάσταση 25mm και συναρμογή στο σύστημα βασικού άξονα g6. Ακόμη για την μέγιστη διάρκεια ζωής πρέπει να έχει επιφανειακή σκληρότητα 50-55 Rockwell C, ενώ η μέγιστη ανοχή ευθύτητας 0.025 mm/m. Για τη μέγιστη ευστάθεια και ομοιόμορφη δυναμική συμπεριφορά του στρώματος αέρα η τραχύτητα στην επιφάνεια του πρέπει να είναι $Ra=1.6\mu\text{m}$.

Παράλληλα προκειμένου να είναι δυνατή η συναρμολόγηση του με το αεροέδρανο, δεδομένου ότι υπάρχει ένα διάκενο με μέση τιμή 10μm ακτινικά το ράδιο στην ακμή του άξονα πρέπει να είναι μεταξύ 0.25 και 0.5 mm.

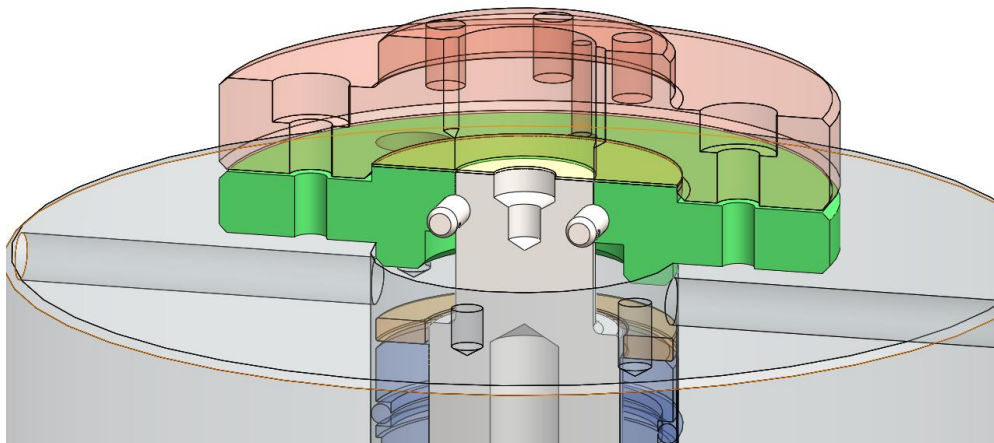
Όπως φαίνεται στην εικόνα ο άξονας έχει μια τυφλή οπή στο κάτω μέρος του προκειμένου να μειωθεί η μάζα του. Ταυτόχρονα εκεί προσδένεται και το load cell με

τη βοήθεια κατάλληλου screw adaptor. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση της μάζας στα 186g ανοξείδωτου χάλυβα 440C.

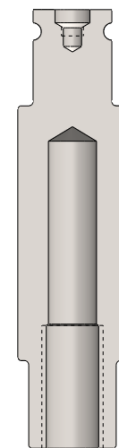
Επιπλέον έχει στη κορυφή οπή ευθυγράμμισης με τον εσωτερικό δίσκο συγκράτησης και εσωτερικά σπείρωμα προκειμένου να συσφίγγεται ο κοχλίας προέντασης του μηχανισμού. Τέλος οι κοίλες διαμορφώσεις στη περιφέρεια επιτρέπουν την ευθυγράμμιση με πείρους όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

4.6 Μηχανισμός μικρορύθμισης

Για το μηδενισμό του επιπέδου τοποθέτησης του δοκιμίου απαιτείται ένας μηχανισμός μικρορύθμισης (zero set), που να συνδυάζει απλότητα και ακρίβεια. Δύο πείροι (dowell pins) μεταξύ των αρπάγων εξασφαλίζουν την απαιτούμενη μικρορύθμιση.



Εικόνα 53: Μηχανισμός μικρορύθμισης



Εικόνα 54: Άξονας οδήγησης

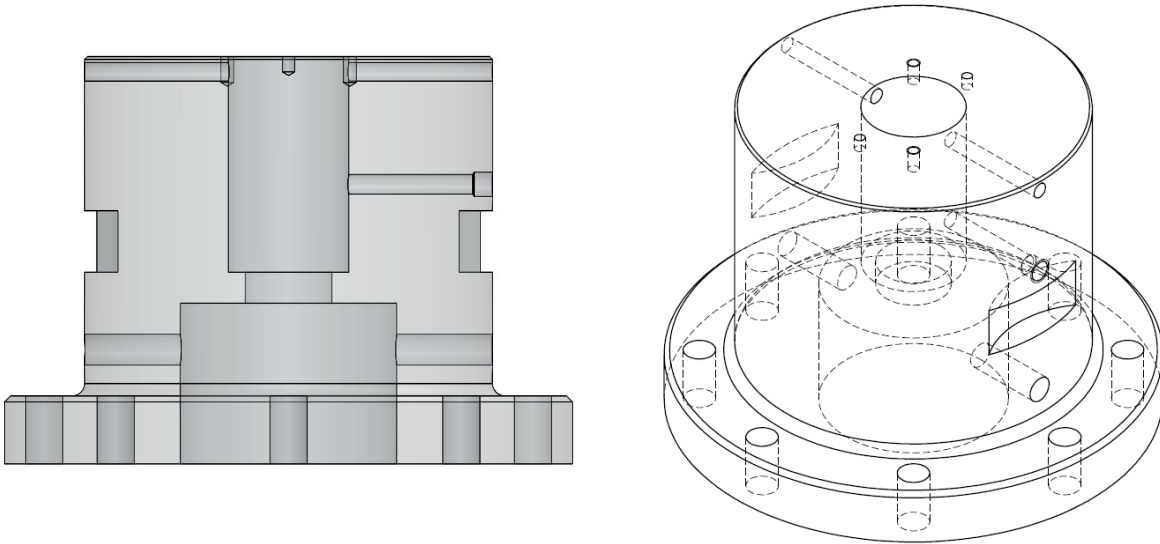
4.7 Σχεδιασμός κελύφους

Για το σχεδιασμό του κελύφους απαιτούνται:

- Μικρό βάρος για εύκολη συναρμολόγηση
- Εσωτερική διαμόρφωση υποστήριξης του load cell
- Διαμόρφωση για τον αερισμό του αεροεδράνου
Αυτό θα εξασφαλίσει την εκτόνωση της πίεσης του αέρα του εδράνου. Σε αντίθετη περίπτωση η πίεση θα επηρέαζε την εντατική κατάσταση του δοκιμίου.
- Λαβές για εύκολη συναρμολόγηση στη περιφέρεια
- Διαμόρφωση για σύσφιξη της παροχής του αεροεδράνου

- Διαμόρφωση για την καλωδίωση του load cell
- Διαμόρφωση για ευθυγράμμιση και πρόσδεση της κάτω φλάντζας
- Οπές για την πρόσδεση πάνω στη επιφάνεια της δονητικής τράπεζας

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η σχεδίαση του κελύφους.



Εικόνα 55: Κέλυφος

4.8 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το πείραμα διεξάγεται σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0 έως 200Hz. Αυτό οδηγεί στην απαίτηση η πρώτη ιδιοσυχνότητα του μηχανισμού να είναι άνω των 300Hz.

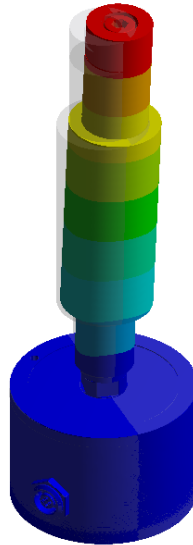
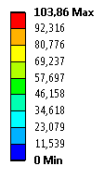
Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε ότι η πρώτη ιδιοσυχνότητα του άξονα είναι στα 435Hz, ενώ αντίστοιχα για το κέλυφος στα 3632Hz. Παρατηρούμε ότι και οι υπόλοιπες ιδιοσυχνότητες τους δεν είναι κοντά, συνεπώς η ενιαία δυναμική τους συμπεριφορά μπορεί να θεωρηθεί αποσυσζευγμένη. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα που θα δημιουργηθεί από την ταλάντωση και των δύο μερών θα είναι ένα διαμορφωμένο κατά συχνότητα και θα περιέχει καθαρά την πληροφορία και των δύο μερών χωρίς την εμφάνιση σημείων συμβολής. Έτσι, δεν κρίνεται σκόπιμη η χρήση της μεθόδου Σύνθεσης Κατασκευαστικών Συνιστωσών (Component Mode Synthesis) που θα ήταν απαραίτητη αν οι ιδιοσυχνότητες των δύο μερών βρίσκονταν κοντά για την μοντελοποίηση του συστήματος άξονα-αεροεδράνου-κελύφους.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 56 θεωρήθηκε πάκτωση στο σημείο σύνδεσης του Load Cell με τον επενεργητή. Η ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων έγινε σε δύο βήματα (prestressed

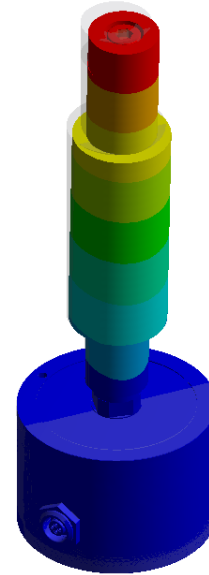
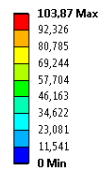
modal analysis) προκειμένου να συνοπλογοιστεί το φαινόμενο της αύξησης της δυσκαμψίας λόγω προέντασης των κοχλιών:

$$\begin{aligned} [K]\{x_0\} &= \{F\} \\ [\sigma_0] &\rightarrow [S] \end{aligned} \rightarrow ([K+S] - \omega_i^2[M])\{\varphi_i\} = 0 \quad (4.14)$$

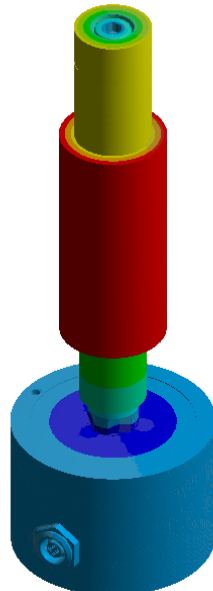
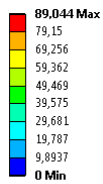
C: Modal
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 434,81 Hz
Unit: mm



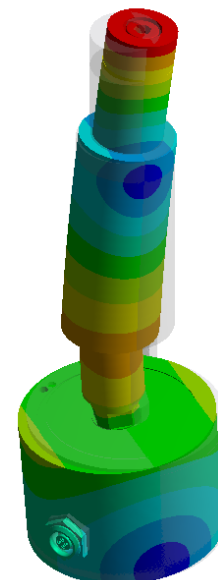
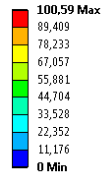
C: Modal
Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Frequency: 435,13 Hz
Unit: mm



C: Modal
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Frequency: 2815,9 Hz
Unit: mm

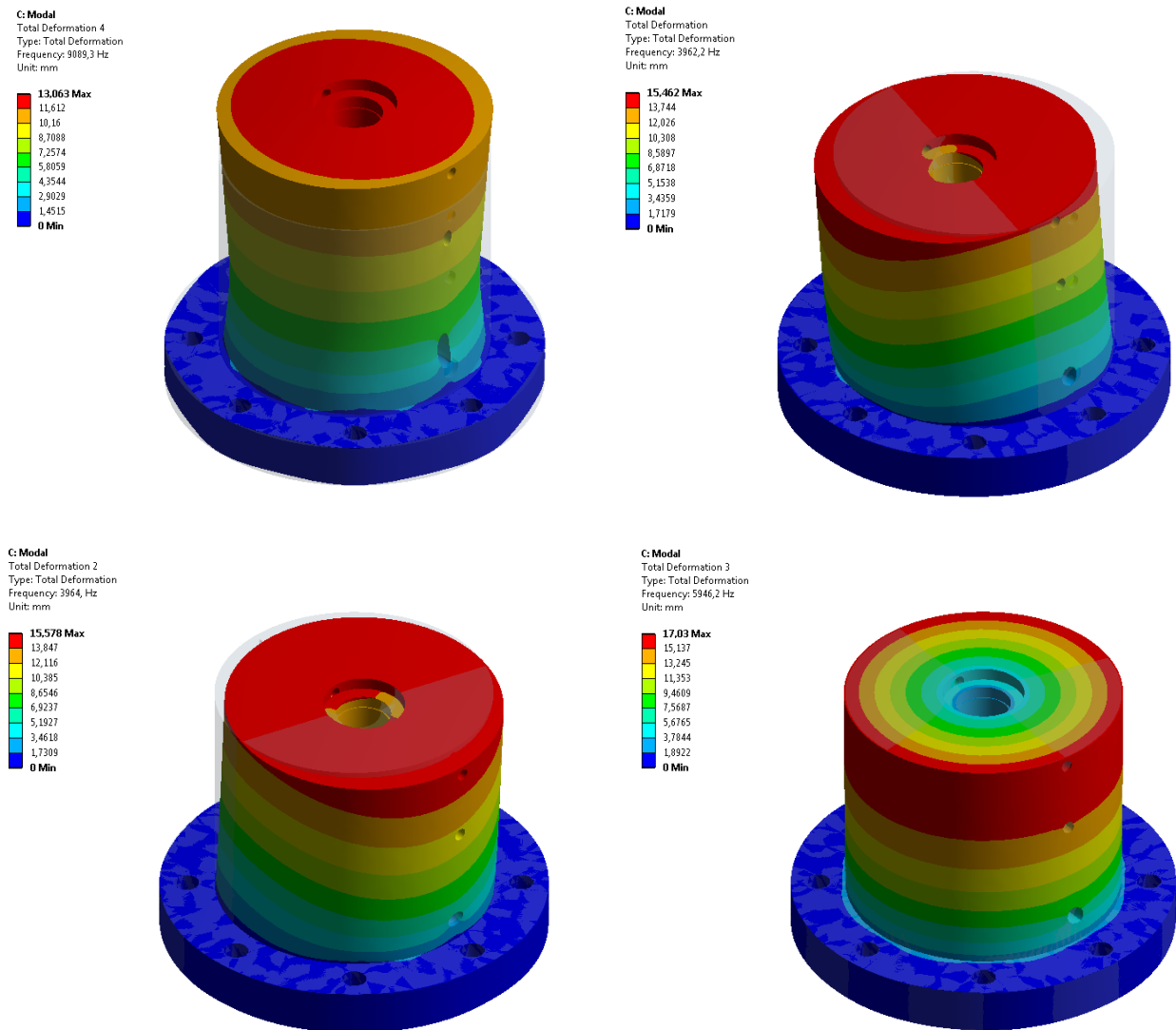


C: Modal
Total Deformation 5
Type: Total Deformation
Frequency: 3600,3 Hz
Unit: mm



Εικόνα 56: Ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων άξονα

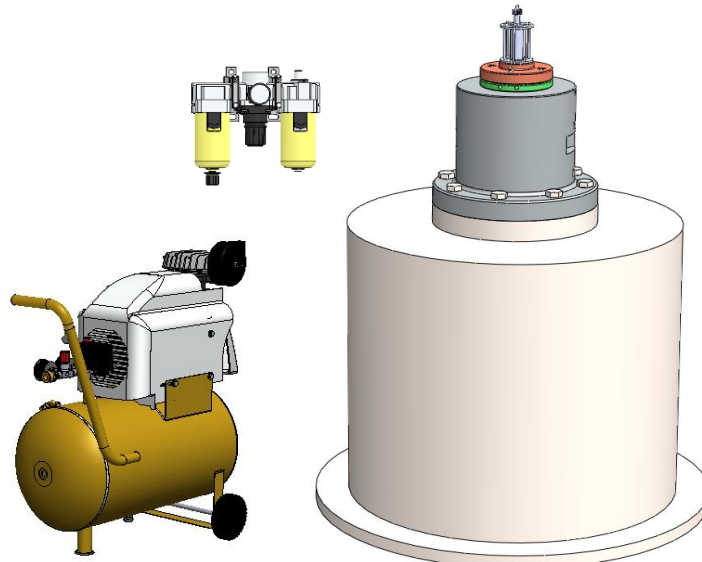
Για το κέλυφος έγινε ομοίως ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων σε δύο βήματα προκειμένου να συνυπολογιστεί το φαινόμενο προέντασης των κοχλιών της βάσης και των δακτυλίων συγκράτησης. Η στήριξη του κελύφους έγινε στο σημείο επαφής της φλάντζας με τις κεφαλές των κοχλιών.



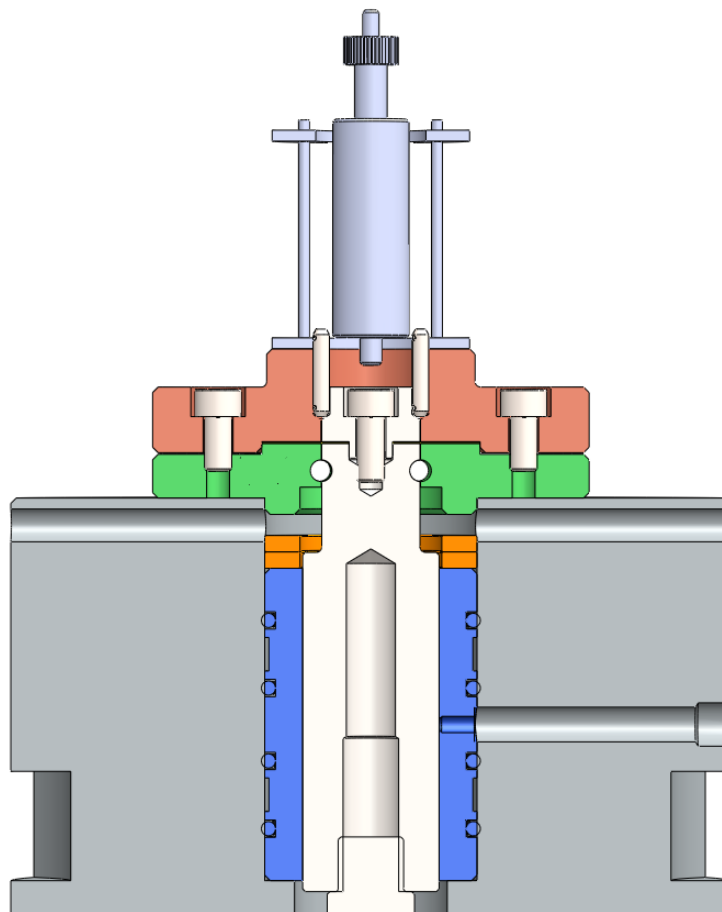
Εικόνα 57: Ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων συναρμολογήματος κελύφους, αεροεδράνου και δακτυλίων συγκράτησης

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

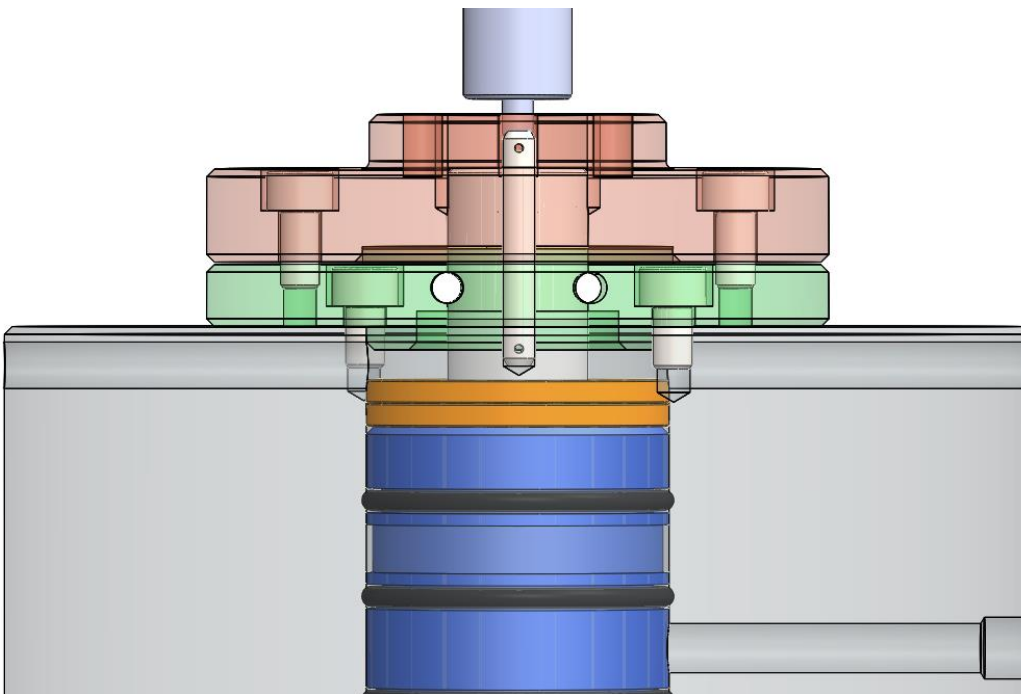
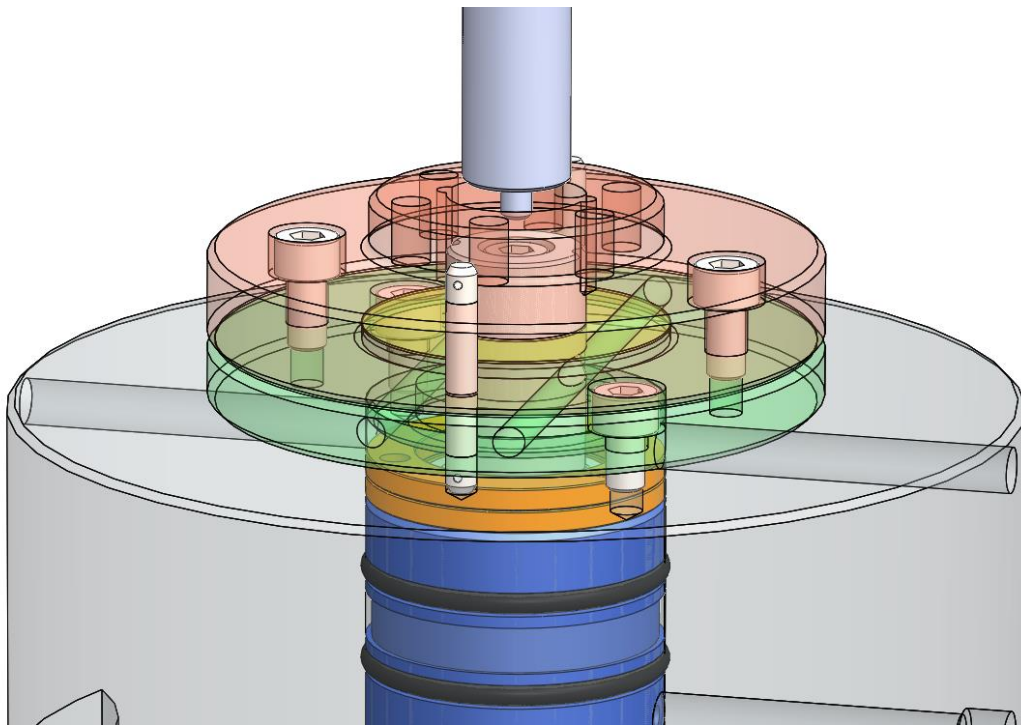
5.1 Παρουσίαση συνολικού σχεδιασμού



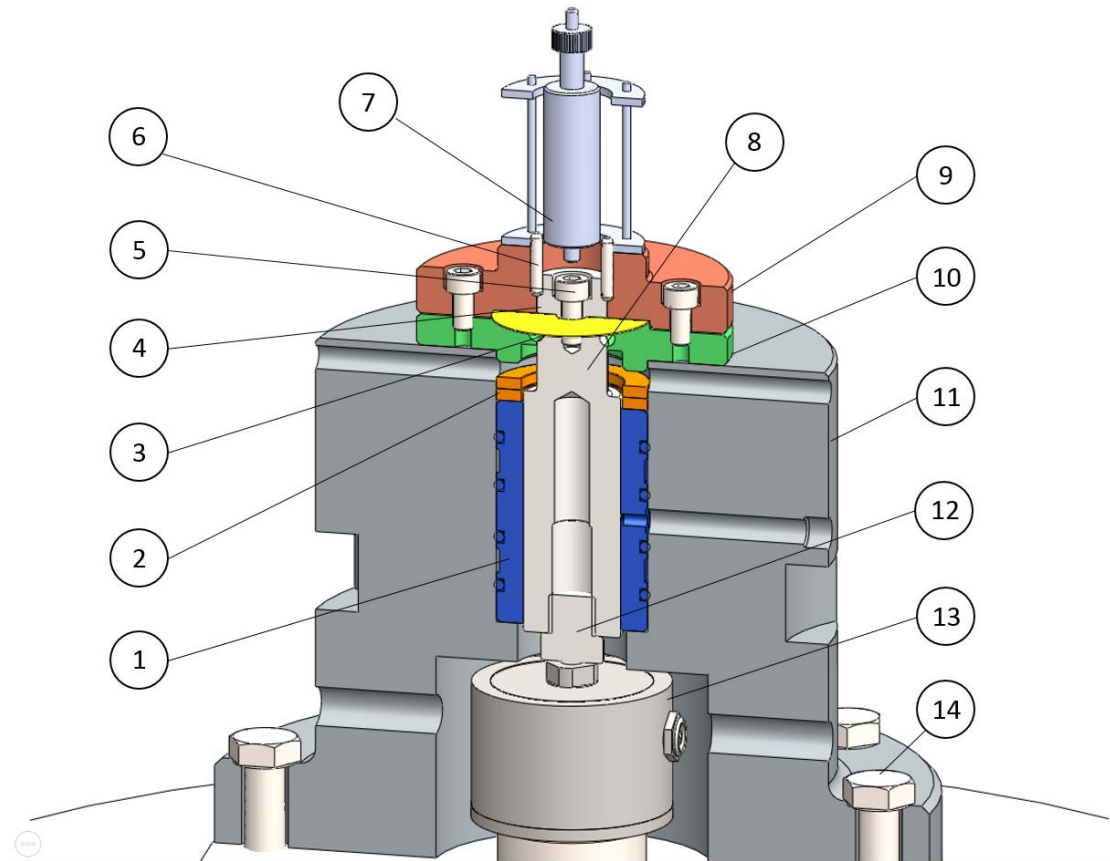
Εικόνα 58: Παρουσίαση εργαστηριακής διάταξης



Εικόνα 59: Τομή διάταξης



Εικόνα 60: Όψη των Φλαντζών συγκράτησης



Εικόνα 61: Αρίθμηση τεμαχίων συναρμολογημένου

A/A	Περιγραφή	ΤΜΧ	Λεπτομέρειες
1	Αεροέδρανο	1	L=58, D=25, Pocketed Orifice air bearing
2	Περικόχλιο	2	Retaining rings, M39x1.5 external thread
3	Δοκίμιο	1	$R_{in} = 9 / R_{out} = 11 / w = 0.5 / t = 0.1$
4	Εσωτερική συγκράτηση	1	(βλ. 4 ^ο κεφ.)
5	M5 - 6.8 Sockethead	5	ISO 4762 L=10
6	Πείρος συγκράτησης	4	Clevis pin headless ISO 2340 B – 4x30
7	LDV	1	(βλ. 4 ^ο κεφ.)
8	Άξονας	1	(βλ. 4 ^ο κεφ.)
9	Πάνω φλάντζα συγκράτησης	1	(βλ. 4 ^ο κεφ.)
10	Κάτω φλάντζα συγκράτησης	1	(βλ. 4 ^ο κεφ.)
11	Κέλυφος	1	(βλ. 4 ^ο κεφ.)
12	Thread adaptor	1	M12 to M6
13	Δυναμοκυψέλη	1	LCF300 / FUTEK / CAPACITY 112N
14	M10 – 6.8	6	ISO 4017 L=30

5.2 Πλεονεκτήματα του νέου σχεδιασμού

Ο νέος σχεδιασμός επέφερε μια σειρά από βελτιώσεις σε βασικούς τομείς της πειραματικής διαδικασίας. Στον πίνακα που ακολουθεί, συνοψίζονται οι βελτιώσεις που προσφέρονται στην κατεύθυνση μιας πιο αξιόπιστης δοκιμής με καλύτερη επαναληψιμότητα και ακρίβεια στην εξαγωγή αποτελεσμάτων.

- A. Σχεδιασμός δοκιμής
- B. Στιβαρότητα (αξονική και ακτινική)
- Γ. Ελαχιστοποίηση της αναρτημένης μάζας
- Δ. Ακρίβεια μέτρησης
- E. Απομόνωση του gauge length
- ΣΤ. Βελτίωση του μηχανισμού συγκράτησης
- Z. Δυνατότητα zero set
- H. Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του δοκιμίου

5.2 Πειραματική διαδικασία

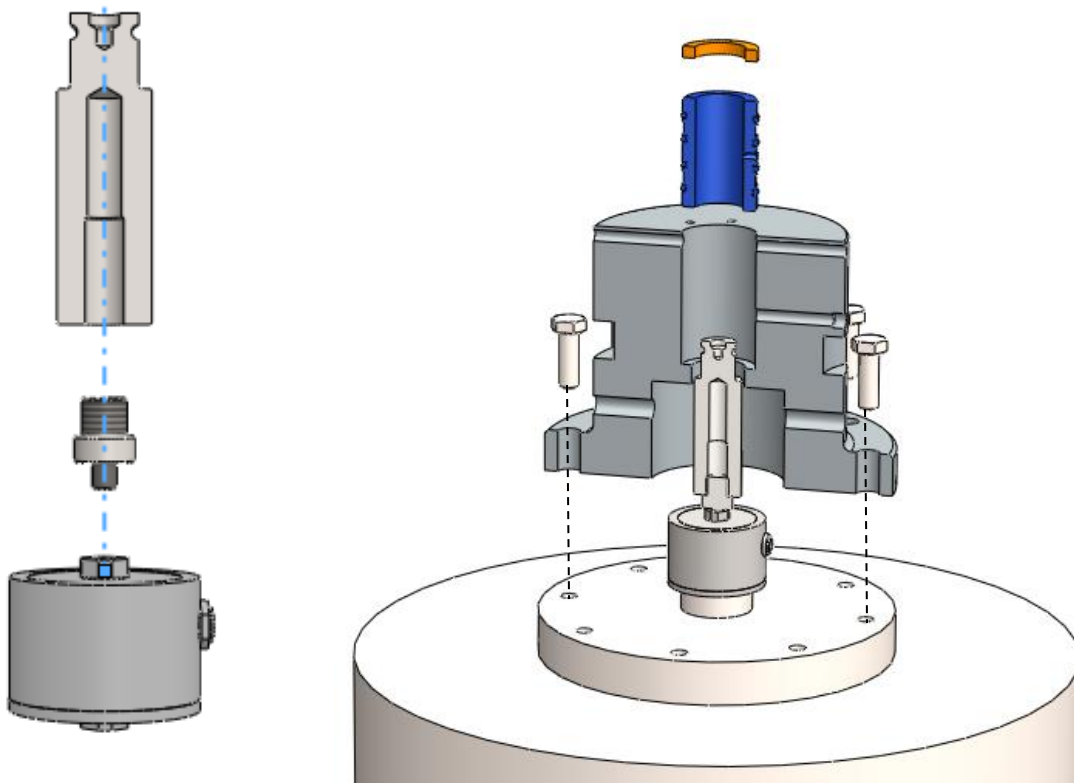
Η πειραματική δοκιμή με βάση το νέο σχεδιασμό αποτελείται από 3 φάσεις:

Φάση 1^η - Συναρμολόγηση άξονα και κελύφους

Στην πρώτη φάση προετοιμασίας της δοκιμής, το συναρμολογημένο σύνολο άξονα και άξονα, προσαρμοστικού δακτυλίου (retaining ring) και δυναμοκυψέλης (load cell) προσδένεται και συσφίγγεται με ροπή 5 Nm στη δονητική τράπεζα.

Παράλληλα, το αεροέδρανο τοποθετείται εντός του κελύφους, ενώ ο δακτύλιος συγκράτησης βιδώνεται και προεντίνεται από τις θέσεις που φαίνονται στην Εικόνα 61 με ροπή σύσφιξης 4 Nm.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις λαβές που φαίνονται στην εικόνα τοποθετείται πάνω από τον άξονα. Εδώ απαιτείται προσοχή προκειμένου να μην υπάρχει πρόσκρουση της εσωτερικής επιφάνειας του αεροεδράνου πάνω στον άξονα. Επιπλέον, συσφίγγονται οι κοχλίες του κελύφους πάνω στη δονητική τράπεζα. Η παροχή αέρα για το αεροέδρανο προσδένεται πάνω στην υποδοχή του κελύφους και ενεργοποιείται ο συμπιεστής, προκειμένου να προενταθεί ο άξονας.



Εικόνα 62: Φάση πρώτη

Φάση 2^η - Συναρμολόγηση συγκράτησης και zero set

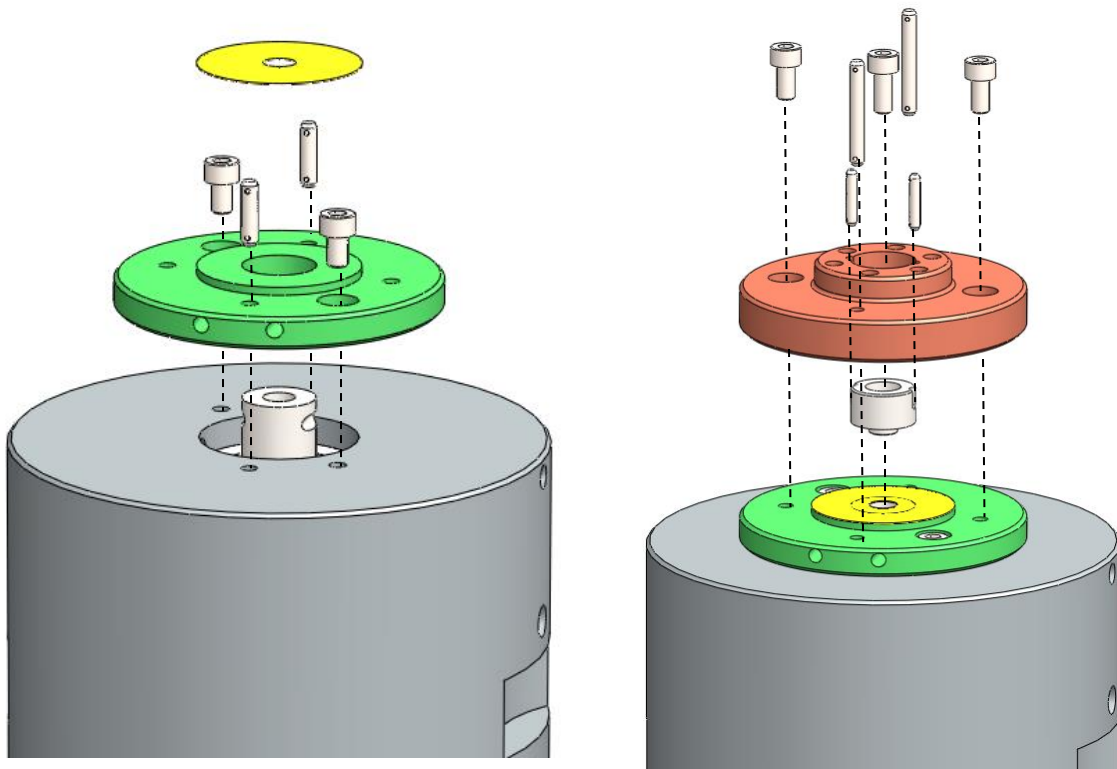
Τοποθετείται η κάτω φλάντζα του μηχανισμού συγκράτησης στο κέλυφος. Με τη βοήθεια των πείρων ευθυγραμμίζεται στη σωστή θέση και έπειτα προσδένεται στη σωστή θέση με δύο κοχλίες M5 sockethead με ροπή σύσφιξης 5 Nm. Οι πείροι τελικά αφαιρούνται.

Οι δυο οριζόντιοι πείροι ευθυγράμμισης εισέρχονται στη θέση μεταξύ του άξονα και της κάτω φλάντζας και έτσι εξασφαλίζεται ότι η εξωτερική και η εσωτερική συγκράτηση παραμένουν στο ίδιο επίπεδο.

Τοποθετείται το δοκίμιο στη σωστή θέση και στη συνέχεια παγιδεύεται με την άνω φλάντζα του μηχανισμού συγκράτησης ο οποίος ευθυγραμμίζεται με τη βοήθεια πείρων. Εφόσον βρίσκεται στη σωστή θέση προεντίνεται με τη σύσφιξη των κοχλιών με ροπή 4.78 Nm. Οι στρεπτικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη σύσφιξη καταπονούν σε διάτμηση τους πείρους σύσφιξης και τελικά δεν μεταφέρονται στο δοκίμιο.

Έπειτα τοποθετείται η εσωτερική συγκράτηση στη σωστή θέση με τη βοήθεια δύο πείρων. Στη συνέχεια μία βίδα συσφίγγεται με ροπή 5 Nm και προεντίνει το δοκίμιο. Οι πείροι αφαιρούνται.

Στην θέση της πάνω φλάντζας εισέρχεται η συσκευή συγκράτησης του Laser Doppler Vibrometer και συσφίγγονται οι δύο κοχλίες με ροπή 4 Nm.



Εικόνα 63: Φάση δεύτερη

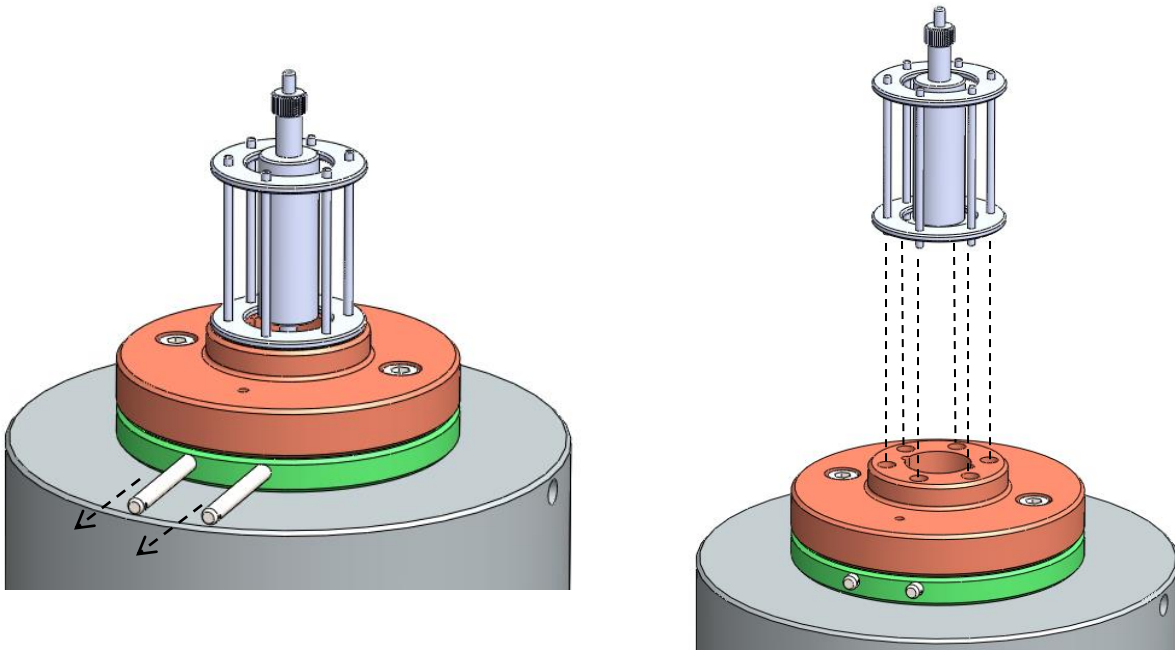
Φάση 3^η - Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων

Τα εξαρτήματα της συσκευής είναι πλήρως τοποθετημένα και πλέον μπορεί να γίνει η βαθμονόμηση των οργάνων.

Η δυναμοκυψέλη συνδέεται στη συσκευή του μετατροπέα σήματος (Analog-to-Digital Converter), και μηδενίζεται. Οι πείροι που φαίνονται στην εικόνα μπορούν να αφαιρεθούν.

Έπειτα ρυθμίζεται με τη βοήθεια του μικρομέτρου η εστιακή απόσταση της δέσμης laser πάνω από την άνω πλάκα συγκράτησης και συνδέεται με το λογισμικό λήψης σημάτων.

Τέλος, η μηχανή είναι έτοιμη για εκτέλεση δοκιμής.



Εικόνα 64: Φάση τρίτη

5.3 Μελλοντική ανάπτυξη

Για την ανάπτυξης μιας ολοκληρωμένης λύσης εργαστηριακού ελέγχου φυλλωτών υλικών τόσο σε δυναμική όσο και σε στατική διάτμηση προτείνονται τα ακόλουθα:

Η κατασκευή ενός πρωτοτύπου για την επιβεβαίωση της αρχής λειτουργίας του προτεινόμενου σχεδιασμού είναι σε πρώτη φάση μια ενέργεια που σαφώς θα αναδείξει τις αδυναμίες του, ώστε να καταστεί δυνατό να περάσει η συσκευή στο επόμενο στάδιο εξέλιξης. Εκτιμάται ότι η προσέγγιση που ακολουθήθηκε δίνει τη δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης του παρόντος σχεδιασμού. Παράλληλα, μελετήθηκαν οι παράμετροι κατασκευασιμότητας (Design for Construction), και προτιμήθηκαν λύσεις που επιτρέπουν την οικονομική και γρήγορη κατασκευή (Design for Cost). Πιο συγκεκριμένα:

- Προσαρμογή άλλης δονητικής τράπεζας
- Χρήση διαφορετικής δυναμοκυψέλης (load cell) η οποία θα πληροί τις προδιαγραφές που αναπτύχθηκαν (βλ. Κεφάλαιο 4)
- Οικονομική προσαρμογή των φλαντζών συγκράτησης για μεγαλύτερο δοκίμιο καθώς και εύκολη μεταβολή της προέντασης ου δοκίμιου.

Για την υλοποίηση της κατασκευής απαιτείται η μελέτη της επίδρασης των σφαλμάτων συναρμολόγησης (GD&T) στο δοκίμιο αλλά και τις προδιαγραφές της δοκιμής.

Επιπλέον, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη του κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας των μετρήσεων και κατάλληλης διεπαφής χρήστη (User Interface). Αυτό μπορεί να

υλοποιηθεί με το λογισμικό MATLAB. Στόχος του συγκεκριμένου προγράμματος είναι η αντιστάθμιση του φορτίου δυναμικού και στατικού που οφείλεται στον άξονα, το μηχανισμό σύσφιξης και το load cell. Το συγκεκριμένο φορτίο μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά μετρώντας με ακρίβεια τη μάζα των παραπάνω και υπολογίζοντας την επιτάχυνση που δέχεται το σύστημα άξονα-συγκράτησης-δυναμοκυψέλης στην συχνότητα διέγερσης, αλλά και πειραματικά εκτελώντας μέτρηση χωρίς δοκίμιο. Αυτό θα δώσει τη δυνατότητα στον χρήστη να εκτελέσει μια σειρά από πειράματα σε πολύ συντομότερο χρόνο.

Η απορρόφηση ενέργειας ενός δοκιμίου δεν είναι ανεξάρτητη από την θερμοκρασία. Η ανάγκη χρήσης του δοκιμίου σε διαφορετικό υψόμετρο (αεροπορική βιομηχανία) ή σε διαφορετικές περιοχές στις οποίες ενδεχομένως να επικρατούν διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες μεταβάλλουν σημαντικά τη μηχανική συμπεριφοράς υλικών όπως τα πολυμερή. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη για πειράματα σε ελεγχόμενη θερμοκρασία και μπορεί να υλοποιηθεί με τη σχεδίαση ενός κατάλληλου θαλάμου στο εσωτερικό του οποίου θα τοποθετείται το δοκίμιο μαζί με το μηχανισμό συγκράτησης. Κατάλληλα θερμοζεύγη θα τοποθετηθούν σε διαμόρφωση του μηχανισμού της συγκράτησης ώστε να εφάπτονται στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος (gauge length) προκειμένου να λαμβάνονται μετρήσεις για τη διακύμανση της θερμοκρασίας.

Τέλος, κατά την απορρόφηση ενέργειας από το υλικό του δοκιμίου (internal or material energy dissipation) παρατηρείται έκλυση θερμότητας. Ο μηχανισμός συγκράτησης αποτελείται από υλικό που επιτρέπει την αγωγή της εκλυόμενης θερμότητας καθώς διαθέτει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή μετάδοσης (Heat Transfer Coefficient – HTC). Ωστόσο, κατά τη κανονική του λειτουργία ένα φυλλωτό εξάρτημα, όπως είναι οι κυψελωτές κατασκευές, συνηθέστερα περιβάλλεται από αέρα, ο οποίος παρουσιάζει πολύ μικρότερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (εξαρτώμενο από τον αριθμό Nusselt). Ως εκ τούτου, μια σημαντική βελτίωση για τη προσομοίωση της δυναμικής ή στατικής συμπεριφοράς του δοκιμίου σε καταπόνηση με μεγάλη χρονική διάρκεια (ερπυσμός, χαλάρωση) θα ήταν ο σχεδιασμός συστήματος θερμικής απομόνωσης του δοκιμίου.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σημειώσεις του μαθήματος Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, Δ. Μανωλάκος
- [2] Χρ. Προβατίδης, “ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ Ι&ΙΙ: Πρόχειρες σημειώσεις”, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [3] Χ.Α. Παπαδόπουλος, “Στοιχεία Μηχανών, Εισαγωγή στο σχεδιασμό μηχανών”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2009
- [4] Tom Bitzer, “HONEYCOMB TECHNOLOGY, Material, Design, Manufacturing, Applications and Testing”, Springer, 1997
- [5] D. I. G. Jones, “HANDBOOK OF VISCOELASTIC VIBRATION DAMPING”, WILEY & SONS, LTD
- [6] Α. Κανάραχος, Ι. Αντωνιάδης, “ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΩΝ”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [7] Alexander H. Slocum, “PRECISION MACHINE DESIGN”, Society of Manufacturing Engineers, 1992
- [8] F. Beer, Jr. E R. Johnston, “ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”, 6^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα,
- [9] ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, Σημειώσεις μαθήματος
- [10] ANSYS Mechanical APDL Modelling Guide
- [11] Clarence W. de Silva, “VIBRATION: FUNDAMENTALS AND PRACTICE”, Taylor & Francis

