



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Εκτενής Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

**Μελέτη της απόσβεσης σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με
νανοσωματίδια. Πειραματική διερεύνηση και αριθμητική
μοντελοποίηση: Εφαρμογή σε εκπτυσσόμενη κατασκευή**

**Καϊτσώτη Βασιλική
1054440**

Κωστόπουλος Βασίλειος, Καθηγητής

Πάτρα, 10/2021

Πίνακας Συμβόλων

ψ	Συγκεκριμένη χωρητικότητα απόσβεσης
δ	Λογαριθμική μείωση
ξ	Αναλογία Απόσβεσης
η	Παράγοντας απώλειας
GFRP	Πολυμερή σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού
CNTs	Νανοσωλήνες άνθρακα
nSiC	Νανοκαρβίδιο του πυριτίου
L (mm)	Μήκος
w (mm)	Πλάτος
d (mm)	Πάχος
m (gr)	Μάζα
ω_L (rad/sec)	Κατώτερη συχνότητα που βρίσκεται 3 DB κάτω από τη μέγιστη συχνότητα
ω_H (rad/sec)	Ανώτερη συχνότητα που βρίσκεται 3 DB κάτω από τη μέγιστη συχνότητα
ω_o (rad/sec)	Μέγιστη Συχνότητα
ρ (g/cm ³)	Πυκνότητα
V (m ³)	Όγκος
E_1, E_2, E_3	Μέτρο ελαστικότητας στις διευθύνσεις 1,2 και 3 αντίστοιχα
$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$	Λόγος Poisson στις διευθύνσεις 12,13 και 23 αντίστοιχα
G_{12}, G_{13}, G_{23}	Μέτρο διάτμησης στις διευθύνσεις 12,13 και 23 αντίστοιχα
α_R, β_R	Συντελεστές Rayleigh
ω_i (rad/sec)	Ιδιοσυχνότητα

Εκτενής Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

Η ικανότητα απόσβεσης ενός υλικού είναι μία από τις βασικότερες ιδιότητες για το σχεδιασμό και την κατασκευή δομικών στοιχείων σε διατάξεις που δέχονται δυναμικά φορτία. Υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλές αποσβεστικές ιδιότητες έχουν την ικανότητα να καταστέλλουν τις μηχανικές ταλαντώσεις και τη μετάδοση κυμάτων με αποτέλεσμα να μειώνεται ο θόρυβος και να διατηρείται η ακεραιότητα της κατασκευής. Ο πειραματικός και αναλυτικός χαρακτηρισμός της απόσβεσης, όμως, αποτελεί μια πρόκληση τόσο στα συνήθη ισότροπα υλικά όσο και στα σύνθετα ανισότροπα.

Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά που κάνουν την απόσβεση ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Αρχικά, παρουσιάζει μια πληθώρα ορισμών μερικοί από τους οποίους είναι: η συγκεκριμένη χωρητικότητα απόσβεσης ψ που εκφράζεται ως η ποσότητα της διάχυσης ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης ως προς την μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, η λογαριθμική μείωση δ η οποία μετράται καθώς το πλάτος μιας ελεύθερης ταλάντωσης μειώνεται, η κορυφή συντονισμού που δημιουργείται στην απόκριση μιας εξαναγκασμένης ταλάντωσης και τέλος, ο παράγοντας απώλειας η που ορίζεται ως ο λόγος του φανταστικού μέρους του μέτρου ελαστικότητας προς το πραγματικό [1]. Η σχέση μεταξύ των παραπάνω μεγεθών παρουσιάζεται στην εξίσωση 1.

$$\psi = 2\delta = 4\pi\xi = 2\pi\eta \quad (1)$$

Το δεύτερο χαρακτηριστικό της απόσβεσης είναι η εξαιρετική ευαισθησία της. Η μέτρηση της επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, ο τρόπος και η συχνότητα διέγερσης, το πλάτος της παραμόρφωσης, η υγρασία, η γεωμετρία του δείγματος που εξετάζεται καθώς και το σύστημα που το συγκρατεί [2].

Συγκεκριμένα, τα ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία είναι τροποποιημένα με νανοσωματίδια βρίσκονται στο επίκεντρο της προσοχής των μηχανικών εξαιτίας της πληθώρας πηγών απόσβεσης που παρουσιάζουν. Συνοπτικά αυτές είναι:

1. Η βισκοελαστική απόσβεση (κυρίως της μήτρας)
2. Οι ενδιάμεση φάσεις
3. Η απόσβεση λόγω τριβής
4. Η θερμοελαστική απόσβεση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μια ολοκληρωμένη έρευνα για τον προσδιορισμό του material damping σε σύνθετα πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και τροποποιημένα με διάφορα είδη νανοσωματιδίων. Η έρευνα αποτελείται από δύο βασικά μέρη, τον πειραματικό προσδιορισμό του material damping και την επιβεβαίωση του πειράματος μέσω μοντελοποίησης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων “Abaqus/CAE”. Τέλος, το υλικό που εμφανίζει το βέλτιστο material damping χρησιμοποιείται σε διάφορα κομμάτια ενός μηχανισμού έκπτυξης στα panel ενός CubeSat. Σκοπός της ανάλυσης αυτής, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος “Solidworks”, είναι να αναδείξει τη χρησιμότητα του επιλεγθέντος υλικού σε μια πρακτική εφαρμογή.

Ο πειραματικός προσδιορισμός του material damping γίνεται στα εξής υλικά:

- GFRP χωρίς ενίσχυση νανοσωματιδίων

- GFRP ενισχυμένο με 0.5% νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs)
- GFRP ενισχυμένο με 1% νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs)
- GFRP ενισχυμένο με 0.5% νανοκαρβίδιο του πυριτίου (nSiC)
- GFRP ενισχυμένο με 1% νανοκαρβίδιο του πυριτίου (nSiC)

Για κάθε υλικό, εξετάστηκε διαφορετικός αριθμός δοκιμών, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 1.

Δοκίμιο	Μήκος L (mm)	Πλάτος w (mm)	Πάχος d (mm)	Μάζα m (gr)
GFRP_neatL1100				
1	473	10.47	2.64	23.9
2	473	10.54	2.67	22.9
GFRP_CNT0.5%				
1	425	10.40	2.48	20.5
2	425	10.30	2.47	20.0
3	425	10.39	2.61	21.1
4	425	10.29	2.57	20.5
GFRP_CNT1%				
1	485	10.94	2.71	24.6
2	485	10.75	2.75	23.8
3	485	10.71	2.73	24.3
4	485	10.07	2.71	23.1
GFRP_nSiC0.5%				
1	456	10.42	2.21	17.1
2	456	10.45	2.18	16.9
3	456	10.47	2.16	17.2
4	456	10.09	2.14	16.3
5	456	10.14	2.14	16.5
GFRP_nSiC1%				
1	432	10.20	2.31	20.3
2	432	9.99	2.39	19.6
3	432	10.26	2.42	19.9

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση δοκιμών

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ονομάζεται «Half Bandwidth Method» και ανήκει στις έμμεσες μεθόδους προσδιορισμού του material damping. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η αναλογία απόσβεσης υπολογίζεται ως ο λόγος της διαφοράς της ανώτερης (ω_L) και της χαμηλότερης συχνότητας (ω_H), που βρίσκονται 3 DB κάτω από τη μέγιστη συχνότητα (ω_o) δια το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας, δηλαδή:

$$\xi = \frac{\omega_L - \omega_H}{2\omega_o} \quad (2)$$

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο ονομάζεται LabView και ανήκει στην National Instruments, υπολογίζει και την τιμή της λογαριθμικής μείωσης σε κάθε συχνότητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta = 2\pi\xi \quad (3)$$

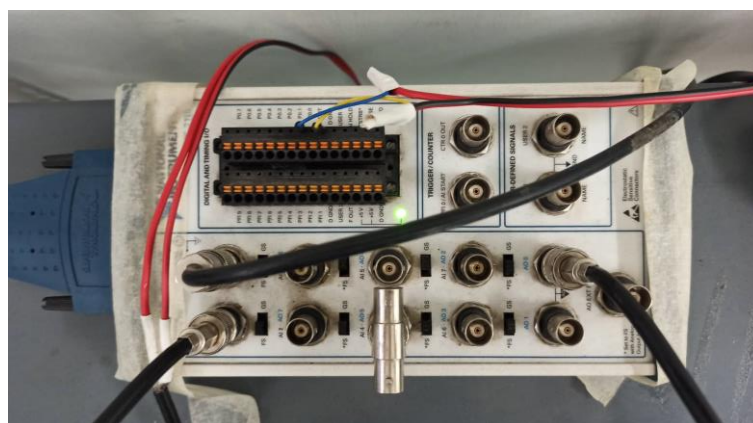
Κατά τη διάρκεια του πειράματος, τα δοκίμια ήταν πιασμένα με 2 πολύ λεπτά σχοινάκια στα 2 τους άκρα τα οποία προσομοιώνουν τα ελεύθερα άκρα. Ο τρόπος αυτός αποτελεί τον βέλτιστο τρόπο μείωσης της επιρροής των συνοριακών συνθηκών στα αποτελέσματα του πειράματος [2]. Τα δοκίμια διεγείρονται με μια δύναμη στο κέντρο τους η οποία προέρχεται από μία αντλία αέρα. Η διέγερση διαρκεί για 1 ms και ύστερα τα δοκίμια αφήνονται να εκτελέσουν ελεύθερη ταλάντωση.

Η εντολή για το άνοιγμα της αντλίας προέρχεται από έναν πίνακα Arduino ο οποίος προγραμματίστηκε γι' αυτό το σκοπό. Στο ένα άκρο του κάθε δοκιμίου βρίσκεται τοποθετημένο ένα επιταχυνσιόμετρο το οποίο μετρά το σήμα της ταλάντωσης και το στέλνει στον ενισχυτή, ο οποίος το ενισχύει με κέρδος 100. Ύστερα, το σήμα μεταφέρεται στον μετατροπέα όπου γίνεται κατάλληλη μετατροπή ώστε να μπορέσει να το διαβάσει το πρόγραμμα του υπολογιστή.

Όλα τα αναφερόμενα μέρη της πειραματικής διάταξης φαίνονται στην Εικόνα 1 ενώ στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται ο μετατροπέας.



Εικόνα 1: Πειραματική Διάταξη



Εικόνα 2: Μετατροπέας Σήματος

Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

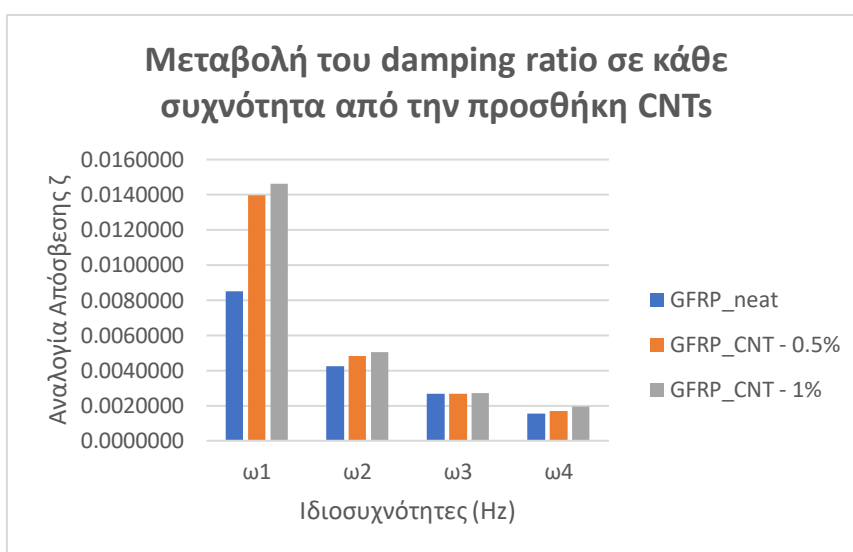
N°	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Αναλογία Απόσβεσης	Λογαριθμική Μείωση δ
GFRP_neatL1100			
1	53.995	0.00848754	0.0533288
2	152.404	0.00423821	0.02662945
3	301.334	0.00268543	0.016873
4	743.632	0.00153921	0.009671105
GFRP_CNT0.5%			
1	64.780	0.01396503	0.08774483
2	180.568	0.00483156	0.03035758
3	358.286	0.00268934	0.01689760
4	592.461	0.00168573	0.01059173
5	870.380	0.00146222	0.00918738
GFRP_CNT1%			
1	52.772	0.01462300	0.09187920
2	144.578	0.00505233	0.03174470
3	283.962	0.00271052	0.01703070
4	468.312	0.00193363	0.01214938
5	690.982	0.00180552	0.01134438
6	960.075	0.00157109	0.00987145
GFRP_nSiC0.5%			
1	61.662	0.02077806	0.13055254
2	171.786	0.00747665	0.04697715
3	339.379	0.00400534	0.02516630
4	563.004	0.00218151	0.01370683
5	837.823	0.00190696	0.01198180
GFRP_nSiC1%			
1	58.201	0.01611393	0.10124693
2	163.658	0.00576428	0.03621807
3	324.345	0.00296737	0.01864450
4	537.333	0.00226231	0.01421447
5	818.251	0.00123495	0.00775943

Πίνακας 2: Αποτελέσματα Πειράματος

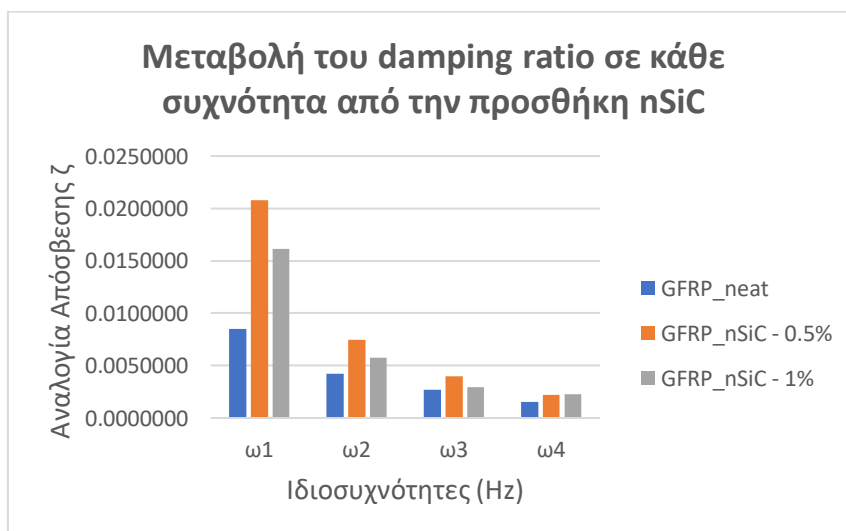
Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, δημιουργούνται τα διαγράμματα 3 και 4 στα οποία παρουσιάζεται η μεταβολή της αναλογίας απόσβεσης σε κάθε ιδιοσυχνότητα με την προσθήκη 0.5% και 1% CNT και με την προσθήκη 0.5% και 1% nSiC αντίστοιχα. Γενικά, και από τα 2 διαγράμματα, παρατηρείται αύξηση της αναλογίας απόσβεσης με την προσθήκη των νανοσωματιδίων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την προσθήκη των νανοσωλήνων άνθρακα, η αύξηση του damping ratio μεγαλώνει όσο αυξάνεται και η προσθήκη των CNTs. Η μεγαλύτερη αύξηση είναι 72.29% και παρουσιάζεται στην πρώτη ιδιοσυχνότητα του GFRP-CNT 1% ενώ η μικρότερη είναι 0.14% και παρουσιάζεται στην τρίτη ιδιοσυχνότητα του GFRP-CNT 0.5%.

Από την άλλη πλευρά, τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με νανοκαρβίδιο του πυριτίου παρουσιάζουν μια διαφορετική συμπεριφορά. Και σ' αυτή την περίπτωση, το damping ratio αυξάνεται με την προσθήκη των nSiC αλλά η αύξηση αυτή μειώνεται καθώς η περιεκτικότητα σε νανοσωματίδια αυξάνεται. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση μ' αυτό που περιμέναμε θεωρητικά καθώς με αύξηση της περιεκτικότητας δημιουργούνται περισσότερες επιφάνειες τριβής μέσα στο υλικό και η ενέργεια διαχέεται πιο γρήγορα. Κύριος λόγος της συμπεριφοράς αυτή των δοκιμίων αποτελεί το γεγονός πως κατά την κατασκευή του υλικού, δεν έγινε σωστή διάχυση των νανοσωματιδίων στη μήτρα του υλικού. Σ' αυτή την περίπτωση, η μεγαλύτερη αύξηση είναι 144.81% και παρουσιάζεται στην πρώτη ιδιοσυχνότητα του GFRP-nSiC 0.5% ενώ η μικρότερη είναι 10.5% και παρουσιάζεται στην τρίτη ιδιοσυχνότητα του GFRP-nSiC 0.5%.



Εικόνα 3: Μεταβολή του damping ratio σε κάθε συχνότητα από την προσθήκη 0.5% και 1% CNTs



Εικόνα 4: Μεταβολή του damping ratio σε κάθε συχνότητα από την προσθήκη 0.5% και 1% nSiC

Στη συνέχεια ακολουθεί η μοντελοποίηση και ανάλυση των δοκιμίων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων «Abaqus/CAE». Στα σύνθετα υλικά, λόγω της ανομοιογένειας και της ανισοτροπίας τους, δεν υπάρχει αναλυτικός τρόπος

υπολογισμού των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών τους. Επομένως, η πρώτη ανάλυση που πραγματοποιείται είναι μια Ανάλυση Ιδιομορφών, σκοπός της οποίας είναι ο προσδιορισμός των θεωρητικών ιδιοσυχνοτήτων των δοκιμίων. Παρατηρώντας τις αποκλίσεις θεωρητικών και πειραματικών τιμών, μπορούμε να ελέγξουμε και την εγκυρότητα και την αξιοπιστία του πειράματος που πραγματοποιήσαμε. Οι μονάδες του κάθε μεγέθους που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΜΑΖΑ	ΜΗΚΟΣ	ΧΡΟΝΟΣ	ΔΥΝΑΜΗ	ΤΑΣΗ
ton	mm	s	N	MPa

Πίνακας 3: Πίνακας Μονάδων

Το κάθε υλικό που μοντελοποιήθηκε αποτελείται από 12 στρώσεις με την κάθε στρώση να έχει πάχος 0.22 mm. Γι' αυτό το λόγο, στην ανάλυση, όλα τα δοκίμια έχουν σταθερό πάχος ίσο με 2.64 mm. Τα υλικά μας είναι μονής κατεύθυνσης επομένως οι ίνες σε κάθε στρώση είναι προσανατολισμένες στις 0°. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτουν από τον μέσο όρο των δειγμάτων του κάθε υλικού και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Υλικό	Μήκος L (mm)	Πλάτος w (mm)	Πάχος d (mm)	Πυκνότητα (T/mm^3)
GFRP_neat	473	10.50	2.64	$1774 \cdot 10^{-12}$
GFRP_CNT0.5%	425	10.34	2.64	$1847 \cdot 10^{-12}$
GFRP_CNT1%	485	10.62	2.64	$1697 \cdot 10^{-12}$
GFRP_nSiC0.5%	456	10.30	2.64	$1650 \cdot 10^{-12}$
GFRP_nSiC1%	432	10.15	2.64	$1910 \cdot 10^{-12}$

Πίνακας 4: Διαστάσεις και Πυκνότητα του κάθε υλικού

Ο υπολογισμός της πυκνότητας έγινε μέσω της εξίσωσης:

$$\rho = m/V \quad (4)$$

Όπου m η μάζα του κάθε δοκιμίου και V ο όγκος του.

Η χρήση της παραπάνω εξίσωση είναι δυνατή διότι κατά την παρασκευή των υλικών δεν έχει εγκλωβιστεί μεγάλη ποσότητα αέρα σ' αυτά. Οι ελαστικές σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν στο κάθε υλικό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Για όλα τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι λόγοι Poisson διότι η προσθήκη νανοσωματιδίων δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές τους.

	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
GFRP_neat	31000	10330	10330	0.3	0.3	0.35	2950	2950	3500
GFRP_CNT0.5%	32000	10670	10670	0.3	0.3	0.35	3047	3047	3950
GFRP_CNT1%	33500	11670	11670	0.3	0.3	0.35	3190	3190	4320
GFRP_nSiC0.5%	37000	12330	12330	0.3	0.3	0.35	3520	3520	4570
GFRP_nSiC1%	38500	12830	12830	0.3	0.3	0.35	3670	3670	4750

Πίνακας 5: Ελαστικές σταθερές υλικών

Το material damping του κάθε υλικού εισάχθηκε στη μοντελοποίηση μέσω του Rayleigh model που αναπαριστά μια απόσβεση ανάλογη στον γραμμικό συνδυασμό

της μάζας και της δυσκαμψίας ενός υλικού. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η αναλογία απόσβεσης σε κάθε ιδιοσυχνότητα του υλικού δίνεται από την εξίσωση:

$$\xi_i = \frac{\alpha_R}{2\omega_i} + \frac{\beta_R \omega_i}{2} \quad (5)$$

Όπου ω_i η i -οστή ιδιοσυχνότητα του υλικού και α_R και β_R οι Rayleigh συντελεστές που πρέπει να υπολογιστούν και να εισαχθούν στο μοντέλο.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5), τις 2 πρώτες ιδιοσυχνότητες με τις αντίστοιχες τιμές της αναλογίας απόσβεσης του κάθε υλικού και επιλύοντας τα συστήματα που προκύπτουν, υπολογίζονται οι Rayleigh συντελεστές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Υλικό	α_R	β_R
GFRP_neat	2.9308298	$1.05544 \cdot 10^{-5}$
GFRP_CNT0.5%	11.55919	$-1.29236 \cdot 10^{-6}$
GFRP_CNT1%	9.9950946	$-2.70882 \cdot 10^{-6}$
GFRP_nSiC0.5%	16.729411	$-4.19151 \cdot 10^{-6}$
GFRP_nSiC0.5%	11.747026	$2.86458 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6: Rayleigh Συντελεστές

Τέλος, οι συνοριακές συνθήκες που εισάχθηκαν στο μοντέλο είναι ο περιορισμός της κίνησης και της περιστροφής της ράβδου στους άξονες x, y και x, z αντίστοιχα.

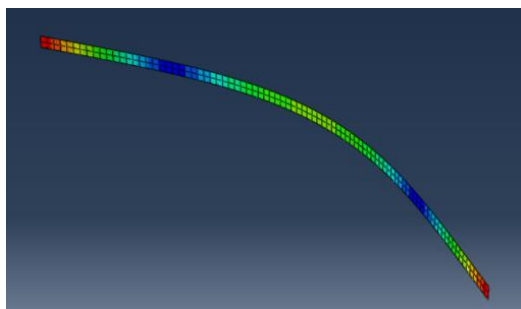
Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης και η ποσοστιαία διαφορά θεωρητικής και πειραματικής τιμής παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

Νº	Πειραματική Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Θεωρητική Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Σφάλμα (%)
GFRP neat			
1	53.995	55.716	3.186376642
2	152.404	153.56	0.75884084
3	301.334	300.96	0.123949046
5	743.632	742.67	0.129365062
GFRP – CNT 0.5%			
1	64.780	66.336	2.401818
2	180.568	182.82	1.247176
3	358.286	358.28	0.001675
4	592.461	592	0.077867
5	870.380	883.88	1.551008
GFRP – CNT 1%			
1	52.772	52.632	0.264678
2	144.578	144.35	0.1577
3	283.962	280.79	1.117051
4	468.312	459.31	1.922118

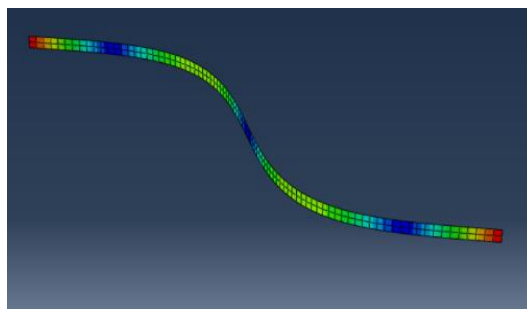
5	690.982	677.28	1.98301
6	960.075	931.61	2.964898
GFRP – nSiC 0.5%			
1	61.662	62.893	1.996897
2	171.786	173.34	0.904761
3	339.379	339.72	0.100596
4	563.004	561.37	0.290229
5	837.823	838.22	0.047358
GFRP – nSiC 1%			
1	58.201	60.366	3.719749
2	163.658	166.39	1.669542
3	324.345	326.15	0.556506
4	537.333	539.06	0.321402
5	818.251	805.13	1.603542

Πίνακας 7: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Ιδιομορφών

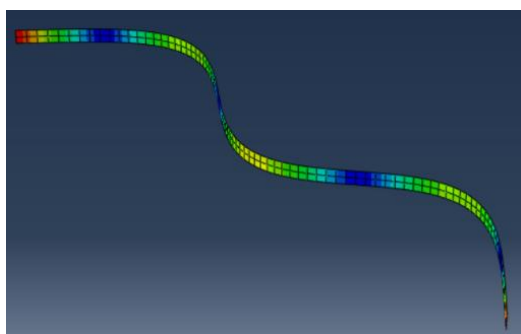
Οι ιδιομορφές των δοκιμών παρουσιάζονται στις Εικόνες 5-10.



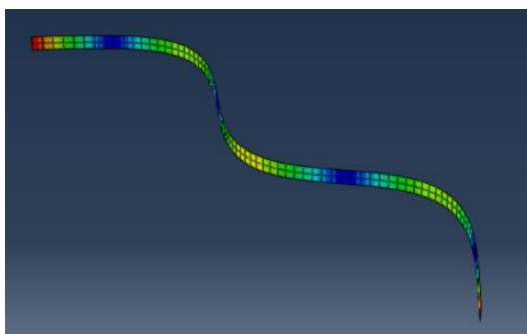
Εικόνα 5: Πρώτη Ιδιομορφή



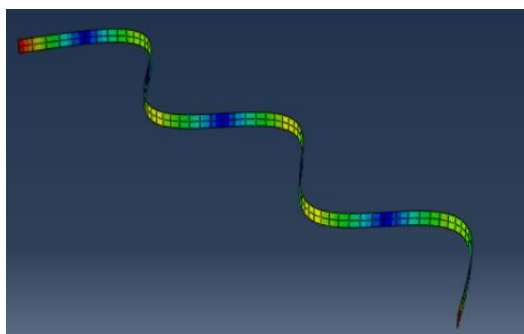
Εικόνα 6: Δεύτερη Ιδιομορφή



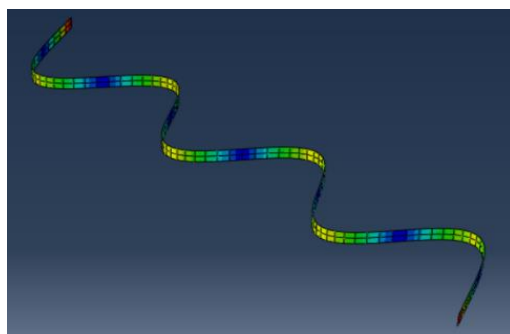
Εικόνα 8: Τρίτη Ιδιομορφή



Εικόνα 7: Τέταρτη Ιδιομορφή



Εικόνα 10: Πέμπτη Ιδιομορφή



Εικόνα 9: Έκτη Ιδιομορφή

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 7, παρατηρούμε πως τα σφάλματα σε κάθε ιδιομορφή όλων των υλικών είναι πολύ μικρά. Πιο συγκεκριμένα, το πιο μικρό σφάλμα είναι 0.001675% και παρατηρείται στην τρίτη ιδιοσυχνότητα του GFRP-CNT 0.5% και το μεγαλύτερο είναι 3.719749% και παρατηρείται στην πρώτη ιδιοσυχνότητα του GFRP-nSiC 1%. Γενικά, οι μικρότερες αποκλίσεις σ' όλες τις ιδιοσυχνότητες εμφανίζονται στο GFRP-nSiC 0.5%. Κρίνοντας μ' αυτά τ' αποτελέσματα μπορούμε να πούμε με ασφάλεια πως το πείραμα που διεξάχθηκε παραπάνω είναι ακριβές και αξιόπιστο.

Στη συνέχεια, εισάγοντας τα ίδια δεδομένα με πριν, πραγματοποιείται μια ανάλυση της ελεύθερης ταλάντωσης. Σ' αυτή την περίπτωση, οι συνοριακές συνθήκες είναι ίδιες με πριν αλλά προστίθενται 2 σημεία αναφοράς τα οποία τοποθετούνται 400 mm πάνω από κάθε δοκίμιο και σε απόσταση 15 mm από κάθε άκρο και των οποίων η κίνηση περιορίζεται σε όλους τους άξονες ενώ η περιστροφή περιορίζεται στους άξονες y και z. Όσον αφορά τον ορισμό της δύναμης, τοποθετείται στο κέντρο του δοκιμίου και ασκείται για 1 ms. Ύστερα, το δοκίμιο αφήνεται να ταλαντωθεί.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Οι θεωρητικές τιμές της λογαριθμικής μείωσης συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές της πρώτης μόνο ιδιοσυχνότητας διότι αυτή είναι που επικρατεί στο υλικό.

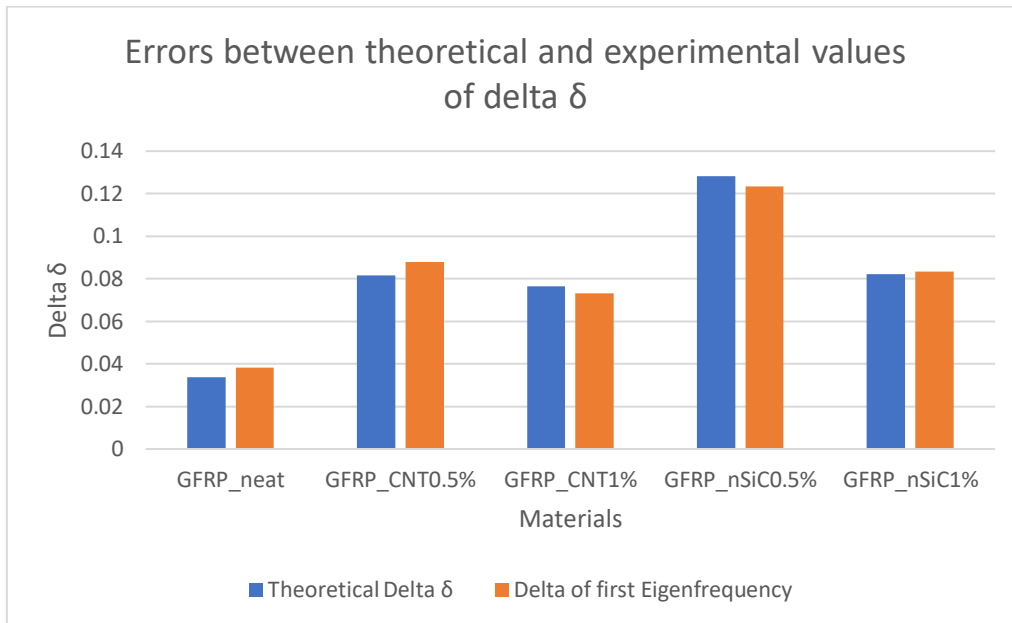
Υλικό	Θεωρητική τιμή δ	Πειραματική τιμή δ της πρώτης ιδιοσυχνότητας
GFRP_neat	0.03384	0.0383889
GFRP_CNT0.5%	0.0816	0.0877728
GFRP_CNT1%	0.07647	0.0731769
GFRP_nSiC0.5%	0.1281	0.123461
GFRP_nSiC1%	0.08218	0.0833335

Πίνακας 8: Αποτελέσματα της Ανάλυσης της Ελεύθερης Ταλάντωσης

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στην Εικόνα 11 στην οποία γίνεται φανερό η μικρή διαφορά μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών του material damping. Γι την αποφυγή των παραπάνω σφαλμάτων, μπορούν να γίνουν οι εξής βελτιώσεις:

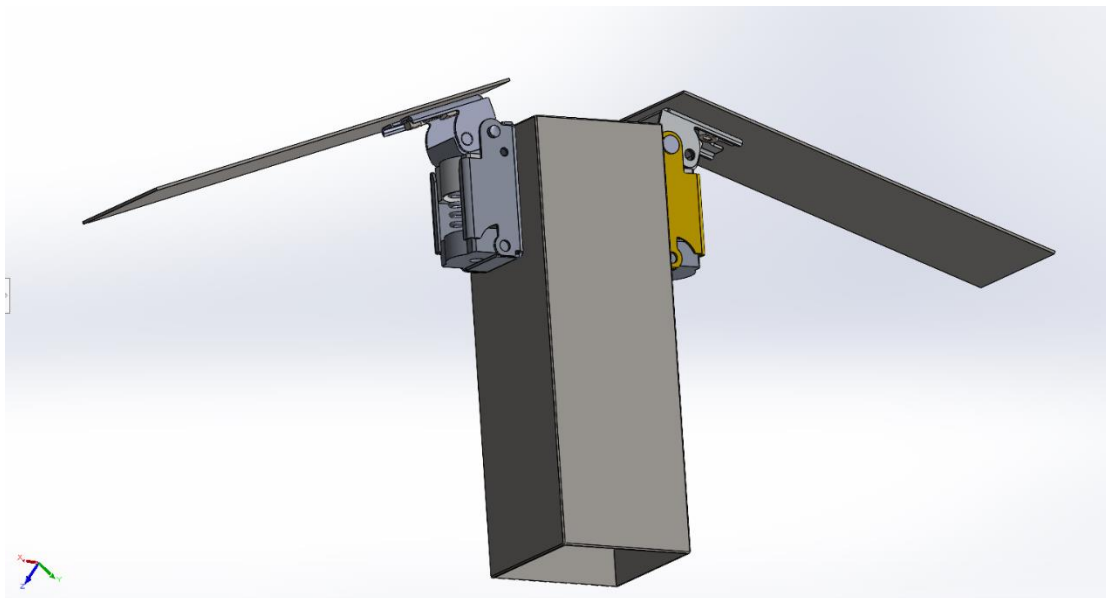
- Χρήση μιας συσκευής για τη καταγραφή του σήματος που δεν έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο.

- Βελτιστοποίηση του τρόπου εφαρμογής της δύναμης στο κέντρο του δοκιμίου
- Ποιοτικός έλεγχος των δοκιμών μετά την παραγωγή τους



Εικόνα 11: Αποτελέσματα της Ανάλυσης της Ελεύθερης Ταλάντωσης

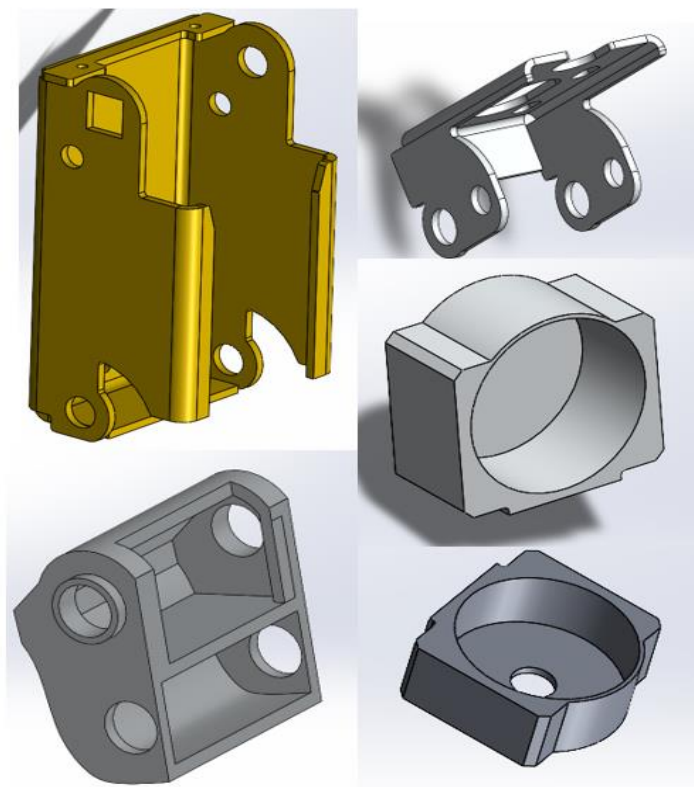
Τελευταίο κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή του GFRP-nSiC 0.5% στον μηχανισμό έκπτυξης των panel σ' ένα CubeSat. Το σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε πάρθηκε από το site «GRABCAD» [3] και παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Σχέδιο CubeSat

Απ' όλο το σχέδιο, το κομμάτι που μας ενδιαφέρει είναι ο μηχανισμός έκπτυξης του panel ο οποίος παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Τα κομμάτια του μηχανισμού που

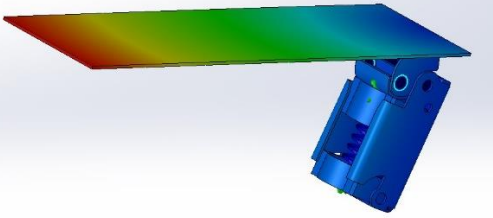
αποτελούνται από GFRP-nSiC 0.5% παρουσιάζονται στην Εικόνα 14. Τα υπόλοιπα στοιχεία του αποτελούνταν από κράμα αλουμινίου 6061 ή κράμα χάλυβα.

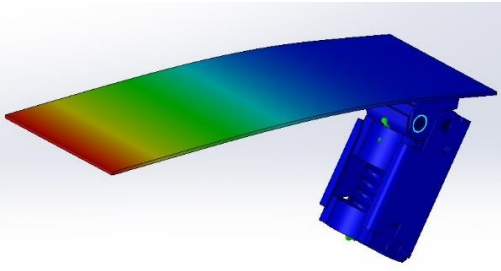
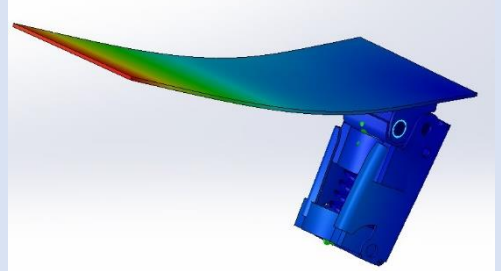
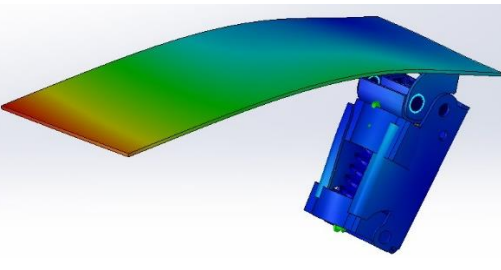
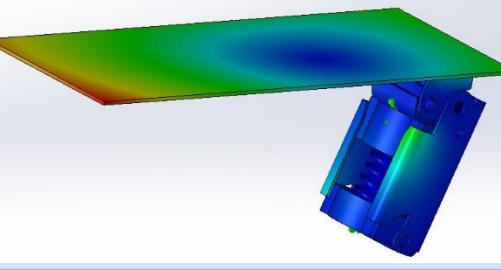


Εικόνα 13: Κομμάτια του μηχανισμού έκπτυξης που αποτελούνται από GFRP-nSiC 0.5%

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο ήταν η πάκτωση της πλάτης του μηχανισμού στα σημεία που ενώνεται με το υπόλοιπο σώμα του CubeSat. Για την βελτιστοποίηση της ανάλυσης, ορισμένοι πείροι και κοχλίες αφαιρέθηκαν από την κατασκευή και αντικαταστάθηκαν με κατάλληλες ενώσεις.

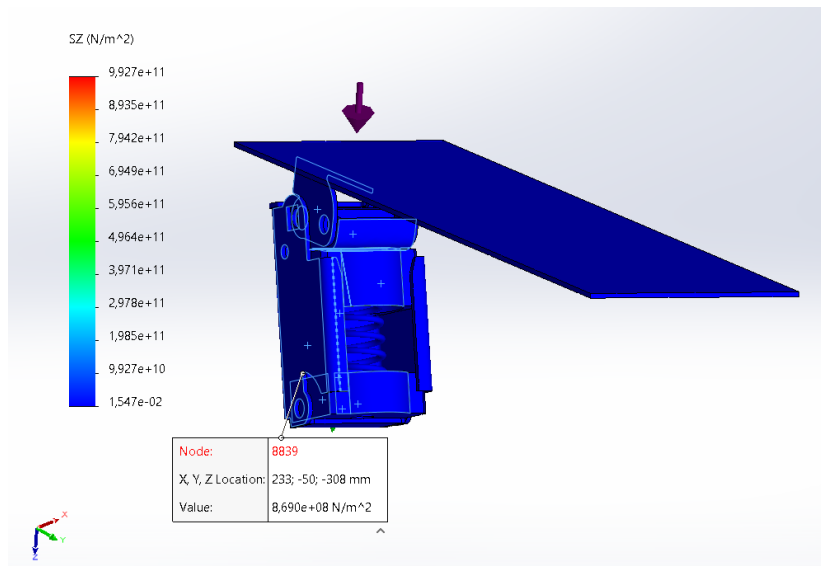
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Παρατηρείται πως οι ιδιοσυχνότητες που εμφανίζει ο μηχανισμός είναι αρκετά μεγάλες και δεν βρίσκονται κοντά στις ιδιοσυχνότητες της ταλάντωσης (1-5 Hz) που ασκείται στο panel τη στιγμή της έκπτυξης του ώστε να δημιουργηθεί συντονισμός.

Eigenfrequency (Hz)	Mode
17.825	

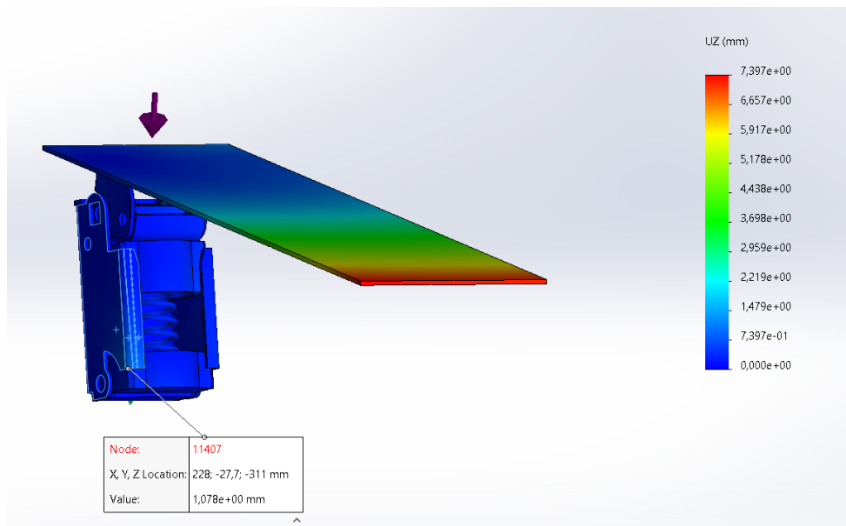
26.772	
36.715	
50.645	
61.023	

Πίνακας 9: Ιδιοσυχνότητες μηχανισμού έκπτυξης

Η δεύτερη και τελευταία ανάλυση που γίνεται στο Solidworks είναι αυτή της τυχαίας ταλάντωσης ώστε να ελέγξουμε τη συμπεριφορά ολόκληρου του μηχανισμού κάτω από ένα τυχαίο φορτίο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρουσιάζονται στις Εικόνες 15 και 16. Σύμφωνα με τις Εικόνες αυτές, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στον μηχανισμό είναι τα 869 MPa ενώ η μέγιστη μετατόπιση είναι τα 1.078 mm. Η μέγιστη μετατόπιση είναι αρκετά μικρή επομένως ο μηχανισμός μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής κάτω από μια τυχαία διέγερση. Περισσότερη έρευνα απαιτείται για τον πλήρη χαρακτηρισμό της ασφάλειας του δορυφόρου.



Εικόνα 14: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση



Εικόνα 15: Μέγιστη αναπτυσσόμενη μετατόπιση

Αναφορές

- [1] D. T. Korontzis, L. Vellios, and V. Kostopoulos, "On the viscoelastic response of composite laminates," *Mech. Time-Dependent Mater.*, vol. 4, no. 4, pp. 381–405, 2000, doi: 10.1023/A:1026523700457.
- [2] J. Vanwalleghem, I. De Baere, M. Loccufier, and W. Van Paepegem, "Practical Aspects in Measuring Vibration Damping of Materials," *15° Int. Conf. Exp. Mech.*, no. iii, pp. 1–10, 2012.
- [3] "nano-satellite-solar-panel-deployment-mechanism-1 @ grabcad.com." [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/nano-satellite-solar-panel-deployment-mechanism-1>.