

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥΣ ΕΚΤΥΠΩΤΕΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΤΥΠΟΥ SANDWICH ΜΕ ΠΥΡΗΝΕΣ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΜΕΤΑΪΛΙΚΩΝ (ΙΕΡΑΡΧΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΙΣ ΔΟΜΕΣ)

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΠΟΥ ΥΠΕΒΛΗΘΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΡΙΚΗ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ

ΥΠΟ ΤΟΝ

ΜΙΣΕΛ ΤΕΟΝΤΟΡ ΜΑΝΣΟΥΡ

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2^{ος} Κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥΣ ΕΚΤΥΠΩΤΕΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΤΥΠΟΥ SANDWICH ΜΕ ΠΥΡΗΝΕΣ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ
ΜΕΤΑΪΛΙΚΩΝ (ΙΕΡΑΡΧΙΚΕΣ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΙΣ ΔΟΜΕΣ)**

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για
την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος

ΥΠΟ ΤΟΝ

Μισέλ Τεοντόρ Μανσούρ

Χανιά, Μάρτιος 2022



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT

**3D PRINTED SANDWICH STRUCTURES WITH NANOCOMPOSITE
FLEXIBLE METAMATERIAL CORE (HIERARCHICAL HONEYCOMBS)**

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree
of Doctor of Philosophy

by

Michel Theodor Mansour

Chania, March 2022

Copyright © υπό Μισέλ Τεοντόρ Μανσούρ

Χανιά 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα και μόνο. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτήν τη διατριβή εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2^{ος} Κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Τίτλος (ελληνικά/αγγλικά): Μορφοποίηση σε Τρισδιάστατους Εκτυπωτές, Κατασκευών Τύπου Sandwich με Πυρήνες Νανοσύνθετων Εύκαμπτων Μεταϋλικών (Ιεραρχικές Κυψελοειδείς Δομές). 3D Printed Sandwich Structures with Nanocomposite Flexible Metamaterial Core (Hierarchical Honeycombs).

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

(Ονοματεπώνυμο διδάκτορα)

Μισέλ - Τεοντόρ Μανσούρ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Καθηγητής Αριστομένης Αντωνιάδης (Επιβλέπων)
2. Καθηγητής Νικόλαος Μπιλάλης
3. Καθηγητής Γεώργιος Σταυρουλάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 18 / 3 / 2022

1. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Αριστομένης Αντωνιάδης



Digitally signed by Aristomenis Antoniadis
Date: 2022.03.18 11:47:15 +02'00'
Adobe Acrobat Reader version:
2021.011.20039

Nikolaos Bilalis

Nikolaos Bilalis
18.03.2022 11:49

2. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Νικόλαος Μπιλάλης

Georgios
Stavroulakis

Digitally signed by Georgios Stavroulakis
Date: 2022.03.18 14:40:16
+02'00'

3. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Γεώργιος Σταυρουλάκης

4. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Νεκτάριος Βιδάκης

5. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Κωνσταντίνος Δαυίδ

KONSTANTI
NOS DAVID

Digitally signed by KONSTANTINOS DAVID
Date: 2022.03.18 13:46:02
+02'00'

6. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Παναγιώτης Κυράτσης

PANAGIOTIS KYRATIS

PANAGIOTIS KYRATIS
18.03.2022 16:35

7. (Τίτλος Ονοματεπώνυμο) Καθηγητής Γεώργιος Σκορδάρης

Γεώργιος
Σκορδάρης

Digitally signed by Γεώργιος Σκορδάρης
Date: 2022.03.18 13:59:07
+02'00'

Στην οικογένειά μου

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα	ii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Λίστα μεταβλητών	vi
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο διδακτορικής διατριβής	1
1.2 Στόχοι διδακτορικής διατριβής	1
1.3 Δομή διδακτορικής διατριβής	2
2. Στάθμη γνώσεων	5
2.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing)	5
2.2 Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης	5
2.2.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA)	5
2.2.2 Μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού (Fused Filament Fabrication - FFF)	6
2.2.3 Εκτύπωση ψεκασμού (Inkjet Printing)	7
2.2.4 Επιλεκτική σύντηξη με laser (Selective Laser Sintering - SLS)	8
2.2.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση (Three Dimensional Printing - 3DP)	9
2.2.6 Επιλεκτική τήξη με laser (Selective Laser Melting - SLM)	10
2.3 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών	11
2.3.1 Σύνθετα υλικά	12
2.3.2 Ο ρόλος της μήτρας και του συστατικού ενίσχυσης	12
2.3.3 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών	13
2.4 Υλικά της παρούσας διδακτορικής διατριβής	16
2.5 Εξεταζόμενα συστατικά ενίσχυσης	18
2.6 Κατασκευή και παράμετροι εκτύπωσης δοκιμών	21
2.7 Προγενέστερη έρευνα στη μηχανική συμπεριφορά και τη μορφολογία σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας	24
2.8 Ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές	31
2.9 Δομές sandwich	32
2.10 Προγενέστερη έρευνα στις ιεραρχικές δομές sandwich	33
2.11 Αναλυτικός-πειραματικός προσδιορισμός ταλαντωτικών μεγεθών των κατασκευών	37
2.12 Αναλυτική περιγραφή συνάρτησης μετάδοσης	39
2.13 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών συνάρτησης μετάδοσης	42
2.13.1 Προσδιορισμός ιδιοσυχνοτήτων	42
2.13.2 Προσδιορισμός εκθετών απόσβεσης	43
2.13.3 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας	43
2.14 Συνεισφορές της διδακτορικής διατριβής	44

3.	Μηχανικές ιδιότητες και μορφολογία υλικών	45
3.1	Εισαγωγή	45
3.2	Πείραμα θλίψης	45
3.2.1	Θεωρητική προσέγγιση πειράματος θλίψης	45
3.2.2	Πειραματική διάταξη θλίψης.....	46
3.2.3	Αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης	47
3.3	Πειράματα θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης.....	49
3.3.1	Πειραματική διάταξη θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης.....	54
3.3.2	Αποτελέσματα πειραμάτων θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης.....	54
3.4	Δοκιμή νανοδιείσδυσης.....	56
3.4.1	Νανοδιείσδυση στα πολυμερή	58
3.4.2	Πείραμα νανοδιείσδυσης.....	59
3.4.3	Το μοντέλο W.C. Oliver - G.M. Pharr	61
3.4.4	Αποτελέσματα πειραμάτων νανοδιείσδυσης	62
3.5	Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)	65
3.5.1	Χαρακτηρισμός της μορφολογίας των δοκιμών	65
3.5.2	Αποτελέσματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης των δοκιμών	66
4.	Ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές	69
4.1	Εισαγωγή στις ιεραρχίες	69
4.2	Σχεδιασμός και κατασκευή ιεραρχικών κυψελοειδών δομών	69
4.3	Ανάπτυξη μοντέλου αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών	72
4.4	Μηχανικές ιδιότητες ιεραρχικών κυψελοειδών δομών	73
4.5	Μέτρηση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς και επεξεργασία σημάτων	79
4.6	Αναλυτικός προσδιορισμός παραμέτρων συναρτήσεων μετάδοσης μέσω γενετικών αλγορίθμων	80
4.7	Αποτελέσματα ταλαντωτικής συμπεριφοράς κυψελοειδών δομών	82
5.	Εφαρμογές βέλτιστων υλικών και κυψελοειδών δομών σε κατασκευαστικά στοιχεία	85
5.1	Κατασκευαστική διαδικασία	85
5.2	Δοκιμές σε κάμψη.....	86
5.3	Εφαρμογές	92
6.	Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	96
7.	Βιβλιογραφία	98

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται ένας δεκαετής κύκλος σπουδών. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω ξεχωριστά όλους αυτούς που στήριξαν αυτήν την προσπάθεια.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας διδακτορικής διατριβής κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την αδιάκοπη καθοδήγησή του και τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική, αφού ήταν πάντα παρών για να με βοηθήσει να πετύχω τους στόχους μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τους Καθηγητές του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Νικόλαο Μπιλάλη και κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της διατριβής και τις παρατηρήσεις τους για βελτίωση της ποιότητάς της.

Ιδιαίτερως ευχαριστώ τον φίλο και συνάδελφό μου Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντίνο Τσογγά για την πολύτιμη βοήθεια και την ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Επίσης ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή Δημήτριο Τζέτζη για την πολύπλευρη βοήθειά του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον πρόεδρο και διευθύνων σύμβουλο της εταιρείας B&T Composites, κ. Βασίλη Τιριακίδη καθώς και την οικογένειά του για την πολύτιμη βοήθειά τους στην κατασκευή των δοκιμών τύπου sandwich. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης για τη φιλία και τη στήριξή τους.

Επίσης, χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Μανσούρ Μισέλ Τεοντόρ γεννήθηκε στη Βηρυτό το 1993. Το 2015 έλαβε το πτυχίο Μηχανολόγου Μηχανικού από το Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας. Εν συνεχεία εισήχθη στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης του τομέα Συστημάτων Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, ενώ από τον Σεπτέμβριο του 2017 είναι υποψήφιος διδάκτωρ στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης της ίδιας σχολής.

Συμμετείχε σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα καθώς επίσης απέκτησε εκπαιδευτική εμπειρία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής του. Συγκεκριμένα:

- Ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο “Ανάπτυξη δοκών διαφόρων διατομών και συνδέσμων από σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την εταιρεία B&T Composites.
- Ευρωπαϊκό πρόγραμμα με τίτλο “Addressing underachievement in STEAM education through real product design and marketing practices”, στα πλαίσια του προγράμματος Erasmus+, υπό την χρηματοδότηση της ΕΕ.

Επίσης, πραγματοποίησε εκπαιδευτικά σεμινάρια για τρισδιάστατη σχεδίαση και εκτύπωση, τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από την εταιρεία TITAN A.E.

Δημοσιευμένες εργασίες σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με κριτές:

- Mansour, M.T., Tsongas, K., Tzetzis, D., 2021, “3D Printed Hierarchical Honeycombs with Carbon Fiber and Carbon Nanotube Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene,” J. Compos. Sci., 5(2), 62.
- Mansour, M., Tsongas, K., Tzetzis, D., Antoniadis, A., 2018, “Measurement of the Mechanical and Dynamic Properties of 3D Printed Polylactic Acid Reinforced with Graphene,” Polymer-Plastics Technology and Materials, 58(11), pp. 1234-1244.
- Mansour, M., Tsongas, K., Tzetzis, D., Antoniadis, A., 2018, “Mechanical and Dynamic Behavior of Fused Filament Fabrication 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Reinforced with Carbon Fibers,” Polymer-Plastics Technology and Engineering, 57(16), pp. 1715-1725.
- Mansour, M.T., Tsongas, K., Tzetzis, D., Antoniadis, A., 2017, “Mechanical Behaviour of 3D Printed Composite Materials,” Reliability and Durability, 20(2), pp. 3-8.
- Mansour, G., Tsagaris, A., Mansour, M.T., 2015, “Intelligent Interaction with CMM,” International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 15(3), pp. 53-58.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια με κριτές:

- Mansour, M.T., Tsongas, K., Tzetzis, D., “The mechanical performance of 3D printed hierarchical honeycombs using carbon fiber and carbon nanotube reinforced acrylonitrile butadiene styrene filaments,” 7th International Conference on Manufacturing and Materials Engineering (ICMMEN), 2-3 July, 2020, Thessaloniki, Greece.
- Mansour, M.T., Tsongas, K., Tzetzis, D., Antoniadis, A., “The In-Plane Compression Performance of Hierarchical Honeycomb Additive Manufactured Structures,” Innovative Manufacturing Engineering and Energy International Conference, 22-24 May, 2019, Pitesti, Romania.

- Symeonidou, I., Tsongas, K., Tzimitzimis, E., Mansour, M., Tzetzis, D., Achillas, C., Mansour, G., “Computer Aided Design and 3D Printing for STEAM Education: A Technical Reference Guide for Teachers,” Conference in 3D Printing in Education, Science and Industry, 18-19 June, 2018, Warsaw, Poland.
- Tsagaris, A., Chatzikyrkou, M., Mansour, M.T., Tsongas, K., Mansour, G., “The Impact of Education in 3D Product Design and Printing to Primary and High School Students,” Conference in 3D Printing in Education, Science and Industry, 18-19 June, 2018, Warsaw, Poland.
- Mansour, M., Tsongas, K., Tzetzis, D., Antoniadis, A., “Mechanical and Dynamic Behavior of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Reinforced with Carbon Microfibers,” 13th THE “A” Coatings in Manufacturing Engineering and 6th ICMEN International Conferences, 5-6 October, 2017, Thessaloniki, Greece.

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιείται διερεύνηση των εκτυπωμένων νανοσύνθετων μεταϋλικών για σύνθετες κατασκευές τύπου sandwich, με χρήση των αναπτυγμένων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών ως πυρήνων και εξωτερικά φύλλα ενισχυμένα με ανθρακονήματα με βάση την εποξειδική ρητίνη. Οι σύνθετες αυτές δομές σε συνδυασμό με τη χρήση προηγμένων νανοϋλικών δύναται να βελτιστοποιηθούν όσον αφορά τις μηχανικές και ταλαντωτικές τους ιδιότητες μέσω πειραματικών εφαρμογών και υπολογιστικής προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, η αρχική ενότητα της διατριβής περιλαμβάνει τη μελέτη και τον προσδιορισμό της μηχανικής απόδοσης σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας μέσω διαφόρων πειραματικών εφαρμογών, όπως πειράματα θλίψης, φόρτισης-αποφόρτισης, νανοδιείσδυσης καθώς και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), για τον χαρακτηρισμό της μορφολογίας των επιφανειών των δοκιμών που εξετάζονται.

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται μια γενική αναφορά στο αναπτυγμένο μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών με σταθερή σχετική πυκνότητα και ακολούθως περιγράφεται η εκτύπωση των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων που μελετήθηκαν προηγουμένως. Επίσης, παρουσιάζεται η θλιπτική συμπεριφορά των εκτυπωμένων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών, η οποία εξετάστηκε πειραματικά αλλά και θεωρητικά μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και συγκεκριμένα με χρήση του λογισμικού ANSYS, με σκοπό την εξαγωγή των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης των κυψελοειδών δομών ενώ τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Επίσης, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των ταλαντωτικών χαρακτηριστικών των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών που εξετάστηκαν.

Στην τελευταία και σημαντικότερη ενότητα της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με χρήση των τριών επιπέδων κυψελοειδών δομών ως πυρήνες τους. Οι ιεραρχικές δομές τύπου sandwich αποτελούνται από εξωτερικά φύλλα ανθρακονημάτων σταυρωτής πλέξης με βάση την εποξειδική ρητίνη, οι οποίες κολλήθηκαν μεταξύ τους μέσω ισχυρής εποξειδικής πάστας και έπειτα υποβλήθηκαν σε στατικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων, με σκοπό την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους και παράλληλα εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν μέσω πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό τη θεωρητική-πειραματική σύγκρισή τους. Η πειραματική-θεωρητική αξιολόγηση της μηχανικής απόδοσης των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών τύπου sandwich φανέρωσε ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα και γι' αυτόν τον λόγο κρίνεται κατάλληλη η χρήση των εξεταζόμενων δομών sandwich σε εφαρμογές βέλτιστων υλικών και σύνθετων δομών σε κατασκευαστικά στοιχεία που έχουν ως βάση τις μορφοδοκούς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν εφαρμογές με χρήση της δομής sandwich τύπου I-beam με στόχο τη διερεύνηση της μηχανικής απόδοσης των δομών αυτών. Τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής έδειξαν πως οι μορφοδοκοί αποτελούμενοι από ιεραρχίες τύπου sandwich, αποτελούν μια ιδιαίτερα αισιόδοξη μελλοντική επιλογή για χρήση σε κατασκευές διαφόρων τομέων.

Abstract

In the present thesis, the 3D printed nanocomposite materials for composite sandwich constructions are investigated using the developed hierarchical honeycomb structures as cores and outer sheets (skins) reinforced with carbon fibers based on epoxy resin. These complex structures in combination with the use of advanced nanomaterials can be optimized in terms of mechanical and vibration properties through experimental applications and computational simulation.

Specifically, the initial section of the dissertation involves the study and determination of the mechanical performance of polymeric matrix composite materials through various experimental applications such as compression, loading-unloading, nanoindentation and scanning electron microscopy (SEM) experiments to characterize the morphology of the examined samples' surfaces.

Futhermore, a general reference is made to the developed model of automatic hierarchization of honeycomb structures with constant relative density, and then is described the printing of hierarchical honeycomb structures using the two optimal materials, based on the previously studied mechanical properties. Also, the compressive behavior of the printed hierarchical honeycomb structures is presented, which was examined experimentally and theoretically through finite element analysis (FEA) and specifically using ANSYS software, in order to extract the stress-strain diagrams of the honeycomb structures and finally a comparison was made between experimental and theoretical results. In addition, the experimental results of the vibration characteristics of the examined hierarchical honeycomb structures are presented.

In the last and most important section of the present dissertation, hierarchical sandwich structures were developed and constructed using the three levels of honeycomb structures as their cores. The hierarchical sandwich structures consist of outer sheets of twill fabric carbon fiber based on epoxy resin, which were glued together with a strong epoxy paste and then subjected to static three-point bending tests, in order to evaluate their mechanical behavior and at the same time were examined and assessed through finite element analysis, for the purpose of their theoretical-experimental comparison. The experimental-theoretical evaluation of the mechanical performance of the examined hierarchical sandwich structures showed very good results and for this reason it is considered appropriate to use the examined sandwich structures in applications of optimal materials and composite structures in section beam-based manufacturing components. In this case, applications were performed using I-beam structure. In addition, a simulation is presented in order to investigate their mechanical performance. The conclusions from the simulation results were quite interesting and showed that the section beams consisting of sandwich hierarchies, is a very optimistic future choice for use in constructions of various sectors.

Λίστα μεταβλητών

m	: Μάζα (kg)
c_k	: Συντελεστής απόσβεσης (N s/m)
c	: Εξαγωνικό μήκος της δεύτερης ιεραρχίας (mm)
k	: Συντελεστής στιβαρότητας (N/m)
$F(t)$: Συνισταμένη εξωτερική φόρτιση (N)
ω_o	: Γωνιακή συχνότητα (rad/s)
ζ	: Μέτρο απόσβεσης (-)
$G(\Omega)$: Μιγαδική συνάρτηση μετάδοσης (m/N)
M	: Μητρώο αδράνειας
C	: Μητρώο απόσβεσης
K	: Μητρώο στιβαρότητας
\underline{x}	: Διάνυσμα μετατοπίσεων
\underline{F}	: Διάνυσμα διεγέρσεων
δ_k	: Εκθέτης απόσβεσης (-)
ω_{dk}	: Ιδιοσυχνότητα με απόσβεση (Hz)
\hat{z}_k, \hat{z}_k^*	: Ιδιοδιανύσματα
Φ	: Μιγαδικό μητρώο ιδιομορφών
λ_k	: Μιγαδική ιδιομορφή
$G_{ij}(j\Omega)$: Μητρώο μετάδοσης
U_k	: Χαρακτηριστικό μέγεθος U για τη βελτιστοποίηση μέσω γενετικών αλγορίθμων
V_k	: Χαρακτηριστικό μέγεθος V για τη βελτιστοποίηση μέσω γενετικών αλγορίθμων
l_i	: Μήκος τόξου της συνάρτησης μετάδοσης
n	: Μέτρο απωλειών της ιδιομορφής (-)
α	: Γωνία μέγιστου τόξου τοπικής καμπύλης (°)
$\Delta\omega$: Σταθερό βήμα συχνοτήτων
E	: Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
C_n	: Συντελεστής ιδιομορφής πακτωμένης δοκού με ελεύθερο άκρο
f_n	: Ιδιοσυχνότητα (Hz)
ρ	: Πυκνότητα του υλικού (kg/m ³)
ρ_0	: Αδιάστατη σχετική πυκνότητα (-)
l	: Μήκος της δοκού (mm)
h	: Πάχος της δοκού στη διεύθυνση της ταλάντωσης (mm)
K	: Καμπτική στιβαρότητα (N/mm)
L	: Μήκος της προβόλου (mm)
I	: Μαζική ροπή αδράνειας (kg mm ²)
B	: Πλάτος διατομής (mm)
ε_T	: Πραγματική διαμήκη παραμόρφωση (%)
ν	: Λόγος Poisson (-)
L_i	: Αρχικό μήκος δοκιμίου (mm)
L_t	: Μήκος του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου (mm)
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}$: Εγκάρσιες παραμορφώσεις (%)
D_i	: Αρχική διάμετρος δοκιμίου (mm)
D_t	: Διάμετρος δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου (mm)
σ	: Πραγματική τάση (MPa)
F	: Φόρτιση (N)
A	: Διατομή δοκιμίου (mm ²)

ΔW	: Απώλειες μηχανικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου για έναν κύκλο φόρτισης (J)
W	: Συνολική μηχανική ενέργεια ανά μονάδα όγκου για έναν κύκλο φόρτισης (J)
SDC	: Ειδική ικανότητα απόσβεσης (-)
h_s	: Βύθιση στα ελαστικά μοντέλα (μm)
h_c	: Βάθος κατά μήκος διεισδυτή σκληρομέτρησης - υλικού (μm)
$A(h_c)$: Επιφάνεια επαφής διεισδυτή σκληρομέτρησης - δείγματος (μm^2)
α_1	: Σταθερά υλικού (μοντέλο Oliver-Pharr)
m_1	: Σταθερά γεωμετρίας διεισδυτή (μοντέλο Oliver-Pharr)
H	: Σκληρότητα (MPa)
e	: Συντελεστής διόρθωσης βύθισης
E_{eff}	: Ανηγμένο μέτρο ελαστικότητας (MPa)
$F(h_c)$: Συνάρτηση εμβαδού (m^2)
A	: Επιφάνεια επαφής (μm^2)
S	: Μετρούμενη ελαστικότητα σκληρομέτρησης ($\text{mN}/\mu\text{m}$)
E^*	: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (MPa)
$\sigma^*(t)$: Χρονικά μεταβαλλόμενη τάση στη μιγαδική της μορφή
$\varepsilon^*(t)$: Χρονικά μεταβαλλόμενη παραμόρφωση στη μιγαδική της μορφή
P_{max}	: Μέγιστη φόρτιση (mN)
h_f	: Εναπομένον βάθος κατά την αποφόρτιση (μm)
h_{max}	: Μέγιστο βάθος (μm)
t	: Πάχος κυψελοειδούς τοιχώματος (mm)
γ_1, γ_2	: Συντελεστές αναλογίας
a	: Κανονικό εξαγωνικό μήκος (mm)
b	: Εξαγωνικό μήκος της πρώτης ιεραρχίας (mm)
$f(\gamma_1)$: Συνάρτηση συντελεστή αναλογίας για την πρώτη ιεραρχία
f	: Αντικειμενική συνάρτηση γενετικού αλγορίθμου
$\gamma^2(\omega)$: Συνάρτηση ομοιότητας (-)
S_{FF}	: Φάσματα της δύναμης (N)
S_{AA}	: Φάσματα της επιτάχυνσης (m/s^2)
S_{AF}	: Φάσμα διασυσχέτισης ($\text{m}/\text{s}^2 \text{ N}$)
h_r	: Υπολειπόμενο βάθος αποτύπωσης (μm)

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διδακτορικής διατριβής

Η χρήση της προσθετικής μηχανικής (additive manufacturing) ή τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι στο επίκεντρο των ερευνητικών δραστηριοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς η εμπορική εκμετάλλευση της τεχνολογίας αυτής αναμένεται τα επόμενα χρόνια να εκτοπίσει ως έναν βαθμό παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής προϊόντων. Οι συμβατικές τεχνικές κατασκευών με πολυμερή υλικά, όπως η χύτευση σε καλούπια, προϋποθέτει την κατεργασία του καλουπιού μέσω της διαδικασίας αφαίρεσης υλικού έτσι ώστε να δημιουργηθεί το προϊόν με περιορισμούς όμως στην πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του. Ενώ η διαδικασία κατασκευής πολυμερικών υλικών με τις παραδοσιακές μεθόδους είναι καλά ελεγχόμενη και κατανοητή, η ικανότητα ελέγχου της σύνθετης εσωτερικής δομής του αντικειμένου είναι περιορισμένη. Η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει τη δυνατότητα να κατασκευαστούν πολύπλοκες σύνθετες δομές, όπως είναι οι κυψελοειδείς δομές.

Επιπροσθέτως, λόγω των εγγενώς περιορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων των παρεχόμενων υλικών που διατίθενται στο εμπόριο αποτελεί επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης εκτυπώσιμων υλικών για ειδικές εφαρμογές με υψηλή μηχανική απόδοση. Ακόμη, η υψηλή μηχανική απόδοση που προσφέρεται κατόπιν χρησιμοποίησης νέων προηγμένων υλικών θα πρέπει να ακολουθείται από όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος της τελικής δομής. Γι' αυτό και σύγχρονες ερευνητικές προσπάθειες δημιουργούνται προς την κατεύθυνση της χρησιμοποίησης νέων προηγμένων υλικών χαμηλού βάρους και υψηλών μηχανικών επιδόσεων.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων εκτυπωμένων νανοσύνθετων υλικών για σύνθετες κατασκευές τύπου sandwich με χρήση ιεραρχικών κυψελοειδών δομών (honeycomb structures) ως πυρήνες και εξωτερικά φύλλα ενισχυμένα με ανθρακονήματα με βάση την εποξειδική ρητίνη. Οι σύνθετες αυτές κατασκευές, σε συνδυασμό με τη χρήση νανοϋλικών δύναται να βελτιστοποιηθούν όσον αφορά τη συμπεριφορά τους στις μηχανικές και ταλαντωτικές ιδιότητες μέσω πειραμάτων και υπολογιστικής προσομοίωσης.

1.2 Στόχοι διδακτορικής διατριβής

Συνοπτικά οι πρωτότυπες ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύχθηκαν και προτείνονται μέσω της παρούσας διατριβής είχαν τους εξής στόχους:

- **Διερεύνηση και προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων προηγμένων νανοσύνθετων υλικών**, όπου ερευνήθηκε η μηχανική απόδοση εκτυπωμένων νανοσύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας καθώς και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους μέσω διαφόρων πειραματικών εφαρμογών, όπως πειράματα θλίψης, φόρτισης-αποφόρτισης, νανοδιείσδυσης και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM).
- **Ανάπτυξη μοντέλου αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών**. Αναπτύχθηκε μοντέλο σε κώδικα του iLogic, με σκοπό την αυτόματη ιεραρχικοποίηση των εξεταζόμενων κυψελοειδών δομών. Με τον όρο ιεραρχικοποίηση εννοείται η δημιουργία των τριών επιπέδων κυψελοειδών δομών. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα δημιουργίας αρχείου που περιλαμβάνει και τις τρεις ιεραρχίες, το οποίο εμφανίζει κάθε φορά μόνο την ιεραρχία που ενδιαφέρει ή τη δημιουργία τριών ξεχωριστών αρχείων για κάθε μια ιεραρχία. Ο πρώτος τρόπος αποσκοπεί στην άμεση σύγκριση των διαφορετικών ιεραρχιών για τις ίδιες παραμέτρους (πλάτος, αριθμός κυψελών) και για

τη συγκέντρωση των πληροφοριών σε ένα και μόνο αρχείο. Με τον δεύτερο τρόπο δημιουργούνται τρία διαφορετικά αρχεία και η διαδικασία επαναλαμβάνεται τρεις φορές, μια για κάθε αρχείο.

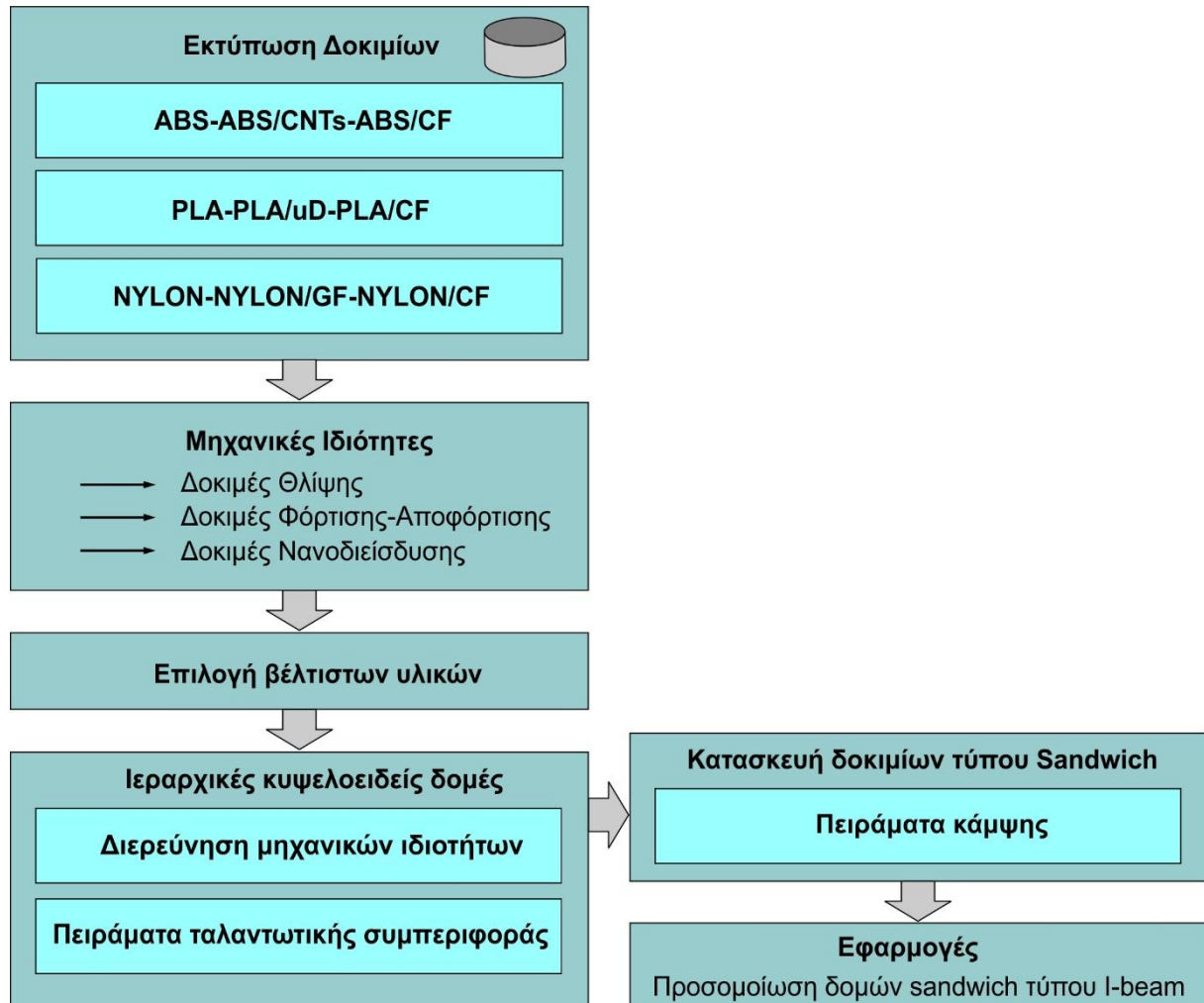
- **Κατασκευή και προσδιορισμός των μηχανικών και ταλαντωτικών χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών** με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων που μελετήθηκαν αρχικώς στην παρούσα διατριβή. Η μηχανική απόδοση των εξεταζόμενων δομών αξιολογήθηκε πειραματικά και θεωρητικά μέσω αναπτυγμένου προσομοιωτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.
- **Ανάπτυξη και κατασκευή ιεραρχικών δομών τύπου sandwich** με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών, οι οποίες έχουν ως πυρήνες τις εξεταζόμενες ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές (honeycomb cores) καθώς και εξωτερικά φύλλα (skins) από ανθρακονήματα με βάση την εποξειδική ρητίνη. Επίσης, αξιολογήθηκε πειραματικά και θεωρητικά η μηχανική απόδοση των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών τύπου sandwich. Τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα φανέρωσαν αρκετά καλά συμπεράσματα, γι' αυτόν τον λόγο κρίθηκε κατάλληλη η χρήση των εξεταζόμενων δομών sandwich σε εφαρμογές βέλτιστων υλικών και σύνθετων δομών σε κατασκευαστικά στοιχεία που έχουν ως βάση τις μορφοδοκούς. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εφαρμογές με χρήση της δομής sandwich τύπου I-beam και παράλληλα προσδιορίστηκε η μηχανική της απόδοση μέσω προσομοιωτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα από το προσομοιωτικό μοντέλο έδειξαν πως οι μορφοδοκοί αποτελούμενοι από ιεραρχίες τύπου sandwich αποτελούν μια ιδιαίτερα καλή επιλογή για χρήση σε κατασκευές διάφορων τομέων.

1.3 Δομή διδακτορικής διατριβής

Η δομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1. Το 2^ο κεφάλαιο είναι αυτό της στάθμης των γνώσεων. Στο κεφάλαιο αυτό βρίσκεται συγκεντρωμένη όλη η πληροφορία και η γνώση που σχετίζεται με το αντικείμενο της διατριβής που προϋπάρχει σε Βιβλία, είτε σε Δημοσιεύσεις επιστημονικών περιοδικών, είτε σε ανακοινώσεις σε Διεθνή Συνέδρια. Αρχικά γίνεται μια γενική αναφορά στην προσθετική μηχανική και τις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έπειτα πραγματοποιείται μια αναφορά στα σύνθετα υλικά και τις κατηγορίες τους. Ακολούθως παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πειράματα της παρούσας διατριβής, τα συστατικά ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η κατασκευαστική διαδικασία με τις παραμέτρους εκτύπωσης των εξεταζόμενων δοκιμίων. Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι κυριότερες Επιστημονικές Δημοσιεύσεις στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και τη μορφολογία σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας. Έπειτα, παρουσιάζονται οι κυριότερες Επιστημονικές Δημοσιεύσεις στις ιεραρχικές δομές sandwich. Τέλος, γίνεται μια γενική αναφορά πάνω στις πειραματικές και αναλυτικές μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται κατά τη μαθηματική περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς μηχανικών διατάξεων.

Το 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διερεύνηση και τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας μέσω διάφορων πειραματικών εφαρμογών. Συγκεκριμένα, η μηχανική συμπεριφορά των εκτυπωμένων κυλινδρικών δοκιμίων με διαστάσεις Φ29mm και πάχος 12.5mm, προσδιορίστηκε μέσω διεξαγωγής πειραμάτων θλίψης (compression), φόρτισης-αποφόρτισης (loading-unloading) και νανοδιείσδυσης (nanoindentation). Τα νανοςύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF), ABS ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα (ABS/CNTs), πολυγαλακτικό οξύ (PLA), PLA

ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (PLA/CF), PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD), πολυαμίδιο (Nylon), Nylon ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Nylon/CF) καθώς και Nylon με συστατικό ενίσχυσης τις ίνες γυαλιού (Nylon/GF). Επιπροσθέτως, οι επιφάνειες των δοκιμών υπό μελέτη εξετάστηκαν μέσω χρήσης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), με σκοπό τον χαρακτηρισμό της μορφολογίας τους.



Σχήμα 1.1: Δομή διδακτορικής διατριβής.

Στο 4^ο κεφάλαιο αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις ιεραρχίες ενώ ακολουθεί η περιγραφή, ο σχεδιασμός και η κατασκευαστική διαδικασία των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται μια γενική αναφορά στο αναπτυγμένο μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών και ακολούθως περιγράφεται η εκτύπωση των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών, βάση των μηχανικών ιδιοτήτων που μελετήθηκαν προηγουμένως. Ακόμη, παρουσιάζεται η θλιπτική συμπεριφορά των εκτυπωμένων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών, η οποία εξετάστηκε πειραματικά αλλά και θεωρητικά μέσω προσομοιωτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την εξαγωγή των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης των κυψελοειδών δομών. Επίσης, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών.

Το 5^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάπτυξη και κατασκευή ιεραρχικών δομών τύπου sandwich. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων δομών sandwich μέσω πειραμάτων κάμψης τριών σημείων.

Παράλληλα η μηχανική απόδοση των δομών sandwich εξετάσθηκε θεωρητικώς μέσω προσομοιωτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Η πειραματική-θεωρητική εξέταση της μηχανικής απόδοσης των δομών sandwich εμφάνισε αρκετά καλά αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο φανερώθηκε η καταλληλότητα χρήσης των εξεταζόμενων δομών sandwich σε ποικίλες εφαρμογές βέλτιστων υλικών και σύνθετων δομών σε κατασκευαστικά στοιχεία με βάση τις μορφοδοκούς. Τέλος, προσδιορίστηκε η μηχανική συμπεριφορά της προτεινόμενης δομής Ι μέσω προσομοίωσης.

Στο 6^ο και το 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής καθώς και η βιβλιογραφία.

2. Στάθμη γνώσεων

2.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια μέθοδος μορφοποίησης μέσω διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε το 1982 από τον Chuck Hull ο οποίος πειραματιζόταν αρχικά πάνω στη στερεολιθογραφία (SLA) και μετέπειτα το 1986 αναγνώρισε και καθιέρωσε τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing).

Βασικός στόχος της μεθόδου είναι η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών οι οποίες, είτε είναι αδύνατο να επιτευχθούν με συμβατικές μεθόδους (μορφοποίηση με αφαίρεση υλικού, με πλαστική παραμόρφωση, χύτευση, κ.λπ.), ή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες και κοστοβόρες καθιστώντας την παραγωγή τους ανούσια καθώς επιφέρουν ελάχιστο ή καθόλου κέρδος ή σε κάποιες περιπτώσεις και κόστος. Εκτός από την επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί τη βάση της ταχείας προτυποποίησης η οποία είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία του Μηχανικού κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, δίνοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών με χαμηλό κόστος κατασκευής και φυσικά σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η δυνατότητα αυτή διευκόλυνε πολύ την έρευνα σε διάφορους κλάδους της μηχανικής, καθώς οι σχεδιαστές ελαχιστοποίησαν τους νεκρούς χρόνους αναμονής για την κατασκευή του τεμαχίου, όπως και το κόστος επισκευής ή και ολικής καταστροφής του. Γενικά η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκει εφαρμογή σε ποικίλους τομείς, όπως για παράδειγμα στο βιομηχανικό σχεδιασμό, στην αρχιτεκτονική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική βιομηχανία, στην οδοντιατρική, στη βιοϊατρική, στις κατασκευές κ.λπ. [1].

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν προοδεύσει με ταχύτατους ρυθμούς και για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους κατασκευαστικούς τομείς. Αυτή η τεράστια επιτυχία μπορεί να αποδοθεί κυρίως στη μεγάλη ικανότητα της απευθείας κατασκευής σύνθετων αντικειμένων χωρίς τη χρήση ιδιαίτερων εργαλείων, καθώς και στη μεγάλη μείωση των αποβλήτων και παράλληλα στην ιδιαίτερη μείωση του χρόνου και του κόστους της κατασκευαστικής διαδικασίας για καινοτόμα προϊόντα και μικρές ποσότητες παραγωγής [2, 3]. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων ποικίλουν και στη συνέχεια περιγράφονται κάποιες από τις πιο δημοφιλείς.

2.2 Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης

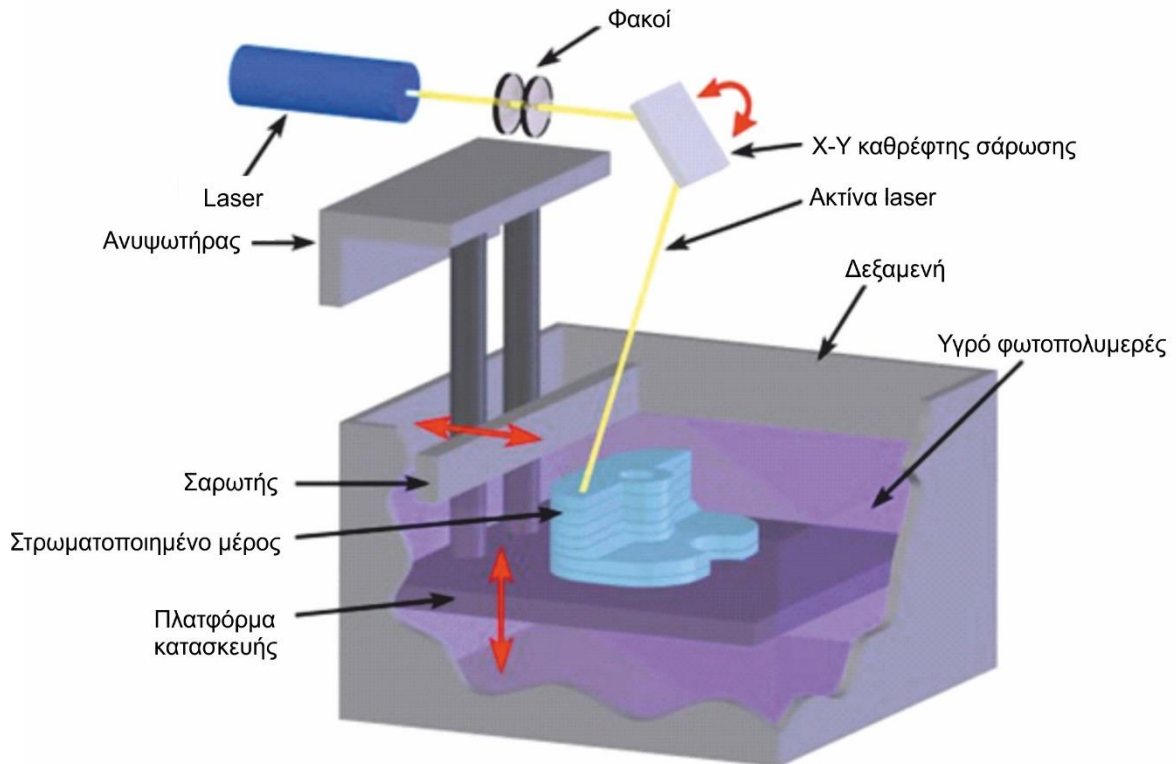
2.2.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA)

Η στερεολιθογραφία αποτελεί την παλαιότερη και μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές προσθετικής μηχανικής. Η τεχνική της στερεολιθογραφίας βασίζεται στη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας προκειμένου να γίνει στερεοποίηση του υγρού φωτοπολυμερές υλικού για την κατασκευή αντικειμένων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.

Η βάση μιας δεξαμενής με φωτοπολυμερές υλικό τοποθετείται στην επιφάνεια του υγρού, έτσι ώστε να καλύπτεται από το υλικό του πρώτου επιπέδου. Το φωτοπολυμερές υλικό στερεοποιείται μέσω μιας δέσμης υπεριώδους ακτινοβολίας. Η δέσμη προσπίπτει στα σημεία που υποδεικνύει ο G-κώδικας και στη συνέχεια η βάση κατεβαίνει στο επόμενο επίπεδο και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να διαμορφωθούν όλα τα επίπεδα του αντικειμένου. Απαραίτητη κρίνεται η χρήση στήριξης κατά την κατασκευή του αντικειμένου, η οποία αφαιρείται μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης κατόπιν βύθισης σε διαλυτική ουσία,

προκειμένου να καθαριστεί από το εναπομείναν υλικό. Το αντικείμενο τοποθετείται σε φούρνο υπεριώδους ακτινοβολίας για πλήρη στερεοποίηση.

Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνικής στερεολιθογραφίας αποτελούν η υψηλή ανάλυση και ακρίβεια, όμως αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία η οποία προτείνεται κυρίως για την κατασκευή μικρών αντικειμένων. Το πάχος στρώσης που επιτυγχάνεται εξαρτάται από το μοντέλο της εκάστοτε μηχανής τρισδιάστατης εκτύπωσης και κυμαίνεται μεταξύ 0.05 - 0.15mm με μέσο ύψος τραχύτητας Ra (roughness average) 35-40μm. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φωτοπολυμερείς ρητίνες [4, 5].



Σχήμα 2.1: Στερεολιθογραφία (SLA) [4].

2.2.2 Μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού (Fused Filament Fabrication - FFF)

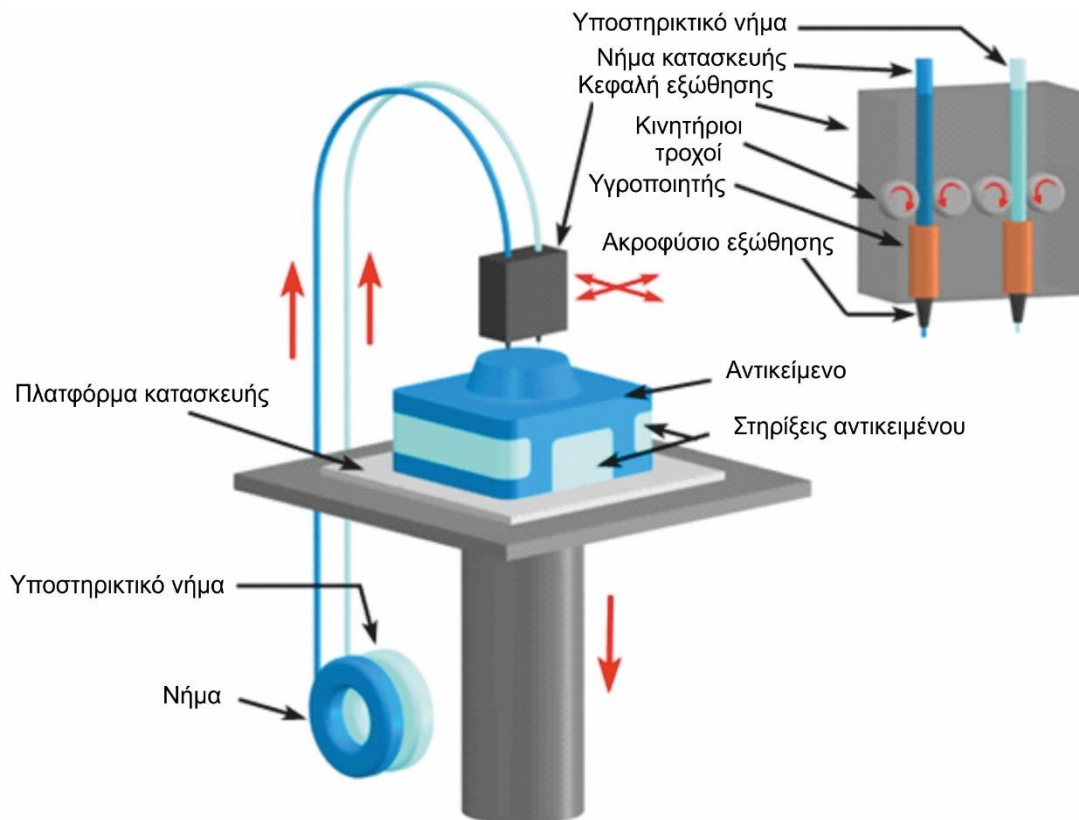
Όπως η στερεολιθογραφία έτσι και η μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές προσθετικής μηχανικής για την κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων με πολυμερές υλικό.

Σε αυτήν τη μέθοδο, το πολυμερές υλικό φυλάσσεται σε στερεή κατάσταση σε ένα πλαστικό σπειροειδές καρούλι μέχρι να φτάσει στον υγροποιητή που βρίσκεται πριν από το ακροφύσιο εξώθησης (extrusion nozzle), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Στη συνέχεια, το νήμα εναποτίθεται μέσω του ακροφυσίου σε υγρή μορφή, δημιουργώντας έτσι τις στρώσεις φθάνοντας ξανά σε στερεή κατάσταση με φυσική ψύξη. Μόλις εκτυπώνεται ένα επίπεδο, η πλατφόρμα κατεβαίνει προς τα κάτω για να συνεχιστεί η εκτύπωση στο επόμενο επίπεδο.

Επίσης, κατά τη διαδικασία εκτύπωσης μπορεί να χρειάζεται στήριξη του αντικείμενου σε κάποιες περιπτώσεις και για τον λόγο αυτόν είτε δημιουργούνται οι στηρίξεις από την κεφαλή που πραγματοποιεί την εκτύπωση, είτε υπάρχει μία δεύτερη κεφαλή (dual extruder) προκειμένου να δημιουργηθούν οι δομές υποστήριξης, όποτε αυτό καθίσταται αναγκαίο. Η μία

κεφαλή εναποθέτει το υλικό κατασκευής και η άλλη το υλικό στήριξης. Με το τέλος της εκτύπωσης, το τελικό αντικείμενο βυθίζεται σε διαλυτικό για να απομακρυνθεί το υλικό στήριξης, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις οι δομές στήριξης μπορούν να αφαιρεθούν αρκετά εύκολα με το χέρι [4, 5].

Δημοφιλή εκτυπώσιμα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF), αποτελούν τα θερμοπλαστικά πολυμερή, όπως το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το πολυανθρακικό (PC), το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυαμίδιο (Nylon) και πολλά άλλα.



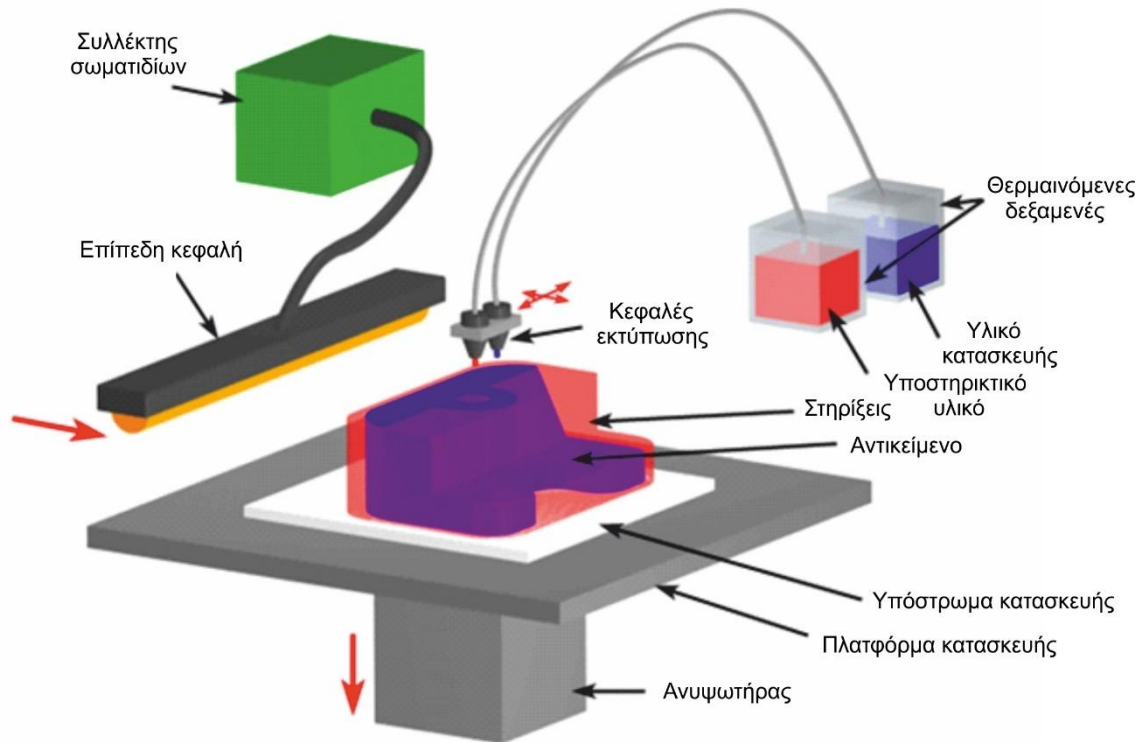
Σχήμα 2.2: Μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού (FFF) [4].

2.2.3 Εκτύπωση ψεκασμού (Inkjet Printing)

Η εκτύπωση ψεκασμού αποτελεί μία ακόμα δημοφιλή μέθοδο προσθετικής μηχανικής, η οποία βασίζεται στη δισδιάστατη τεχνολογία εκτύπωσης όπου χρησιμοποιείται ένας ψεκαστήρας με σκοπό την εναπόθεση μικροσκοπικών σταγονιδίων μελανιού σε χαρτί. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, το μελάνι αντικαθίσταται με θερμοπλαστικά πολυμερή τα οποία αποτελούν το υλικό κατασκευής και επίσης κεραμικά υλικά τα οποία αποτελούν το υλικό στήριξης, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.3](#).

Το υλικό κατασκευής και το υλικό στήριξης διατηρούνται σε κατάσταση τήξης μέσα σε θερμαινόμενες δεξαμενές. Κατά την εκτύπωση, υγρά σταγονίδια αυτών των υλικών ψύχονται αμέσως και στερεοποιούνται με σκοπό τη δημιουργία μιας στρώσης του αντικειμένου. Στη συνέχεια, ο ανελκυστήρας χαμηλώνει την πλατφόρμα κατασκευής και το αντικείμενο, έτσι ώστε να κατασκευαστεί η επόμενη στρώση. Αφού επαναληφθεί αυτή η διαδικασία για κάθε στρώση και το τελικό μοντέλο έχει ολοκληρωθεί, τότε αυτό απομακρύνεται και παράλληλα το υλικό στήριξης λιώνει. Η εκτύπωση ψεκασμού προσφέρει εξαιρετική ακρίβεια και ποιότητα

επιφάνειας αλλά οι αργές ταχύτητες κατασκευής, οι λίγες επιλογές υλικού και τα εύθραυστα τελικά μοντέλα αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς αυτής της μεθόδου [4, 5].



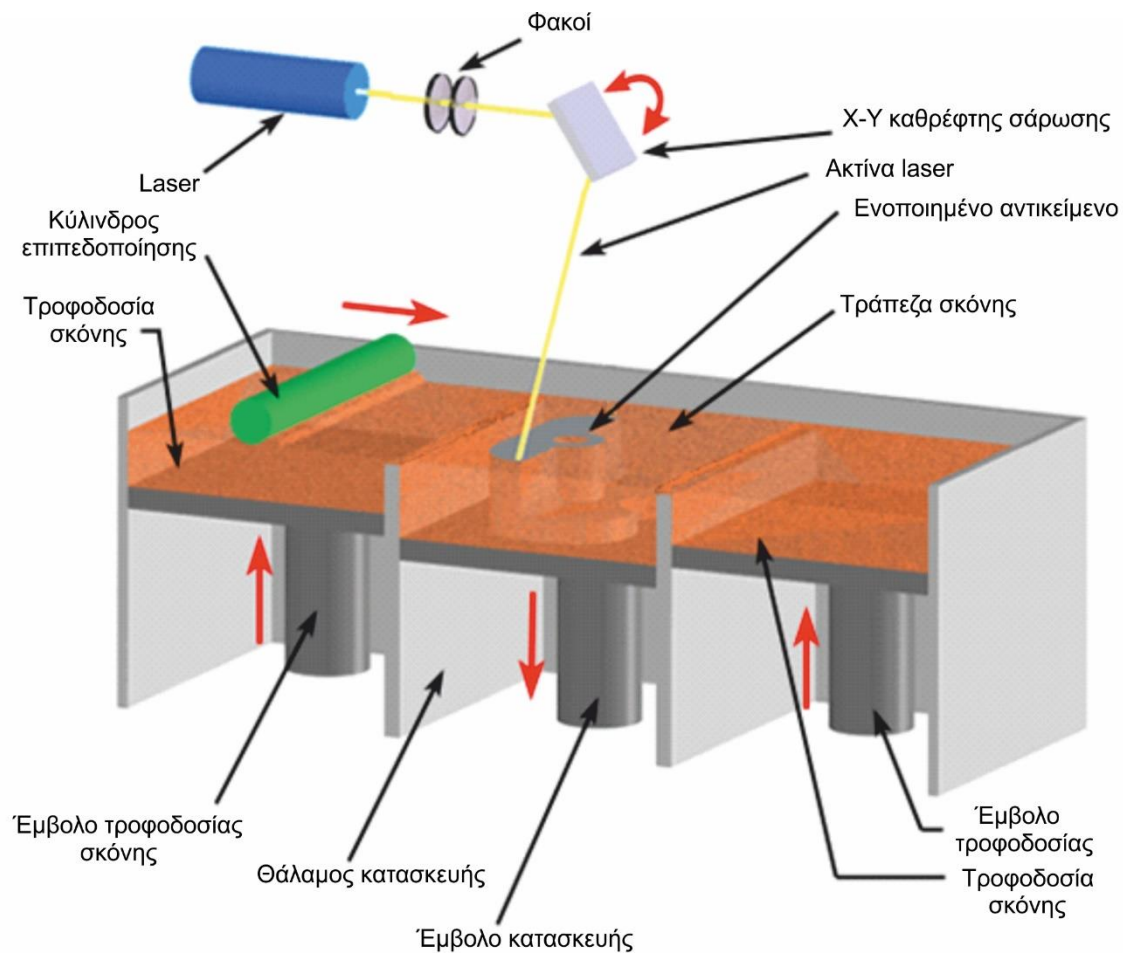
Σχήμα 2.3: Εκτύπωση ψεκασμού (Inkjet Printing) [4].

2.2.4 Επιλεκτική σύντηξη με laser (Selective Laser Sintering - SLS)

Σε αυτήν τη μέθοδο, το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί βρίσκεται σε μορφή σκόνης σε δεξαμενή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Υπάρχει επίσης μία πλατφόρμα κατασκευής σχεδόν στην επιφάνεια μίας δεύτερης δεξαμενής. Ένας κύλινδρος περιστρέφεται και σπρώχνει μέρος της σκόνης προς την πλατφόρμα κατασκευής και το υλικό που απομένει πάνω στην πλατφόρμα, αφού περάσει ο κύλινδρος, αποτελεί την πρώτη στρώση του υπό κατασκευή αντικειμένου. Ένα τυπικό πάχος της στρώσης είναι 100μm.

Στη συνέχεια παράγεται μία δέσμη φωτός η οποία οδηγείται στα σημεία που πρέπει να εκτυπωθούν με τη βοήθεια ενός καθρέφτη. Η δέσμη θερμαίνει το υλικό με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ενιαίο τεμάχιο. Αφού ολοκληρωθεί η μία στρώση, η δεξαμενή με τη σκόνη ανεβαίνει προς τα επάνω για να πάρει επιπλέον σκόνη ο κύλινδρος, ενώ η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει προς τα κάτω για να εναποτεθεί επάνω της το υλικό για την επόμενη στρώση. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, αφαιρείται η περιττή σκόνη από το αντικείμενο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επόμενη εκτύπωση.

Κατά την εκτύπωση, δεν χρειάζονται στηρίγματα αφού η ίδια η σκόνη λειτουργεί ως στήριγμα. Με τη μέθοδο επιλεκτικής σύντηξης με laser είναι δυνατό να ελεγχθεί η πυκνότητα του τελικού αντικειμένου, πράγμα ιδιαίτερα χρήσιμο όταν χρησιμοποιείται μείγμα διαφορετικών υλικών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο επιλεκτικής σύντηξης με laser (SLS) είναι κυρίως μέταλλα και μείγματά τους, καθώς και θερμοπλαστικά ή κεραμικά [4, 5].



Σχήμα 2.4: Επιλεκτική σύντηξη με laser (SLS) [4].

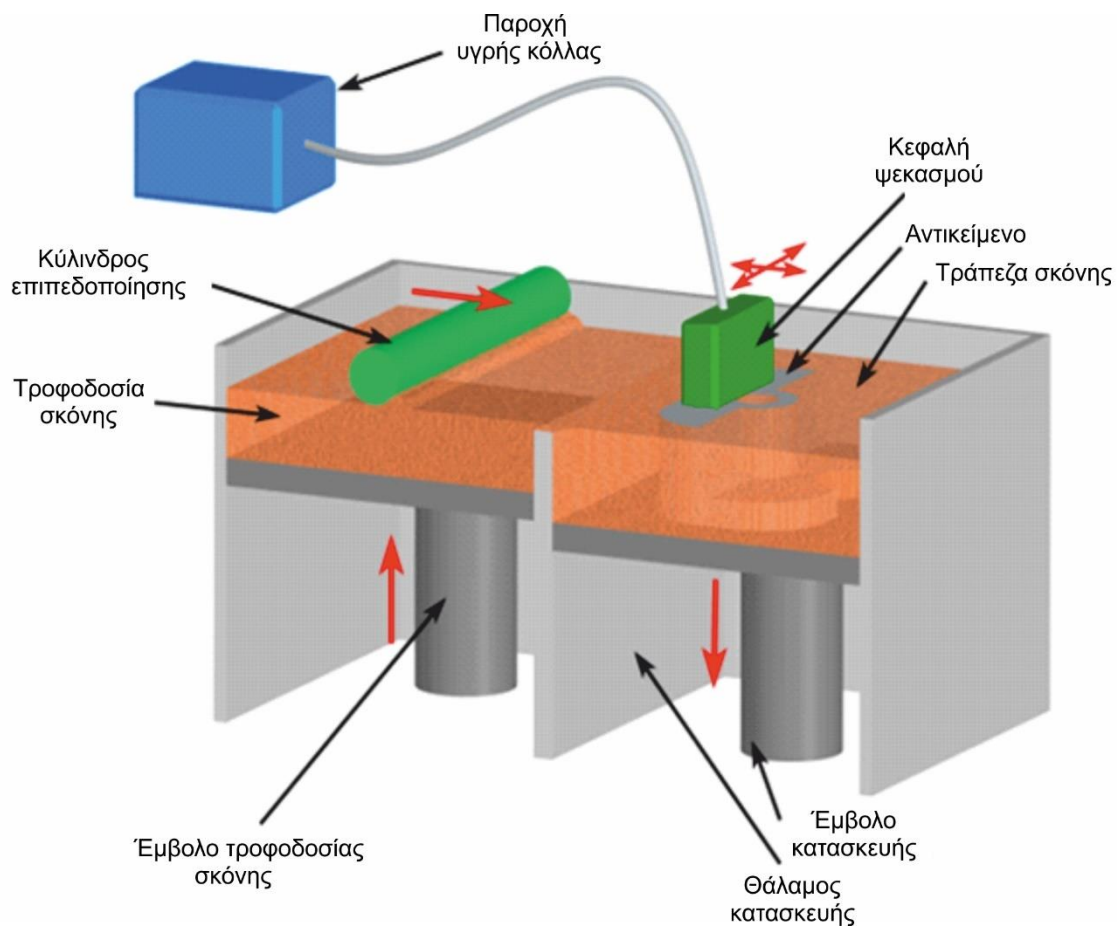
2.2.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση (Three Dimensional Printing - 3DP)

Στη μέθοδο αυτή, η διαδικασία είναι παρόμοια με της επιλεκτικής σύντηξης με laser (SLS), αλλά αντί να χρησιμοποιείται laser για τη σύντηξη του υλικού, μια κεφαλή εκτύπωσης με ψεκασμό εναποθέτει μια υγρή κόλλα που ενοποιεί το υλικό, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.5](#).

Οι επιλογές υλικού, που περιλαμβάνουν μεταλλικές ή κεραμικές πούδρες στη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης 3DP είναι περιορισμένες, αλλά είναι φθηνές σε σχέση με άλλες διεργασίες προσθετικής μηχανικής. Η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει το πλεονέκτημα των γρήγορων ταχυτήτων κατασκευής, συνήθως δύο με τέσσερις στρώσεις ανά λεπτό. Ωστόσο, η ακρίβεια, το φινίρισμα της επιφάνειας και η αντοχή του αντικειμένου δεν είναι τόσο καλές όσο κάποιες άλλες διαδικασίες προσθετικής μηχανικής.

Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης ξεκινά με την τροφοδοσία πούδρας, η οποία υπερυψώνεται από ένα έμβολο και έναν κύλινδρο που διανέμει ένα λεπτό στρώμα πούδρας στην κορυφή του θαλάμου κατασκευής. Στη συνέχεια, μια κεφαλή εκτύπωσης με ψεκασμό εναποθέτει υγρή κόλλα σε στοχευμένες περιοχές της τράπεζας πούδρας. Αυτές οι περιοχές με πούδρα συνδέονται μεταξύ τους με την κόλλα και σχηματίζουν μία στρώση του αντικειμένου.

Η εναπομένουσα πούδρα στηρίζει το τμήμα κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Μετά την κατασκευή μιας στρώσης, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει και προστίθεται μία νέα στρώση πούδρας και εν συνεχεία επαναλαμβάνεται η εκτύπωση. Μετά την ολοκλήρωση του εξαρτήματος η πούδρα στήριξης μπορεί να αφαιρεθεί [4, 5].



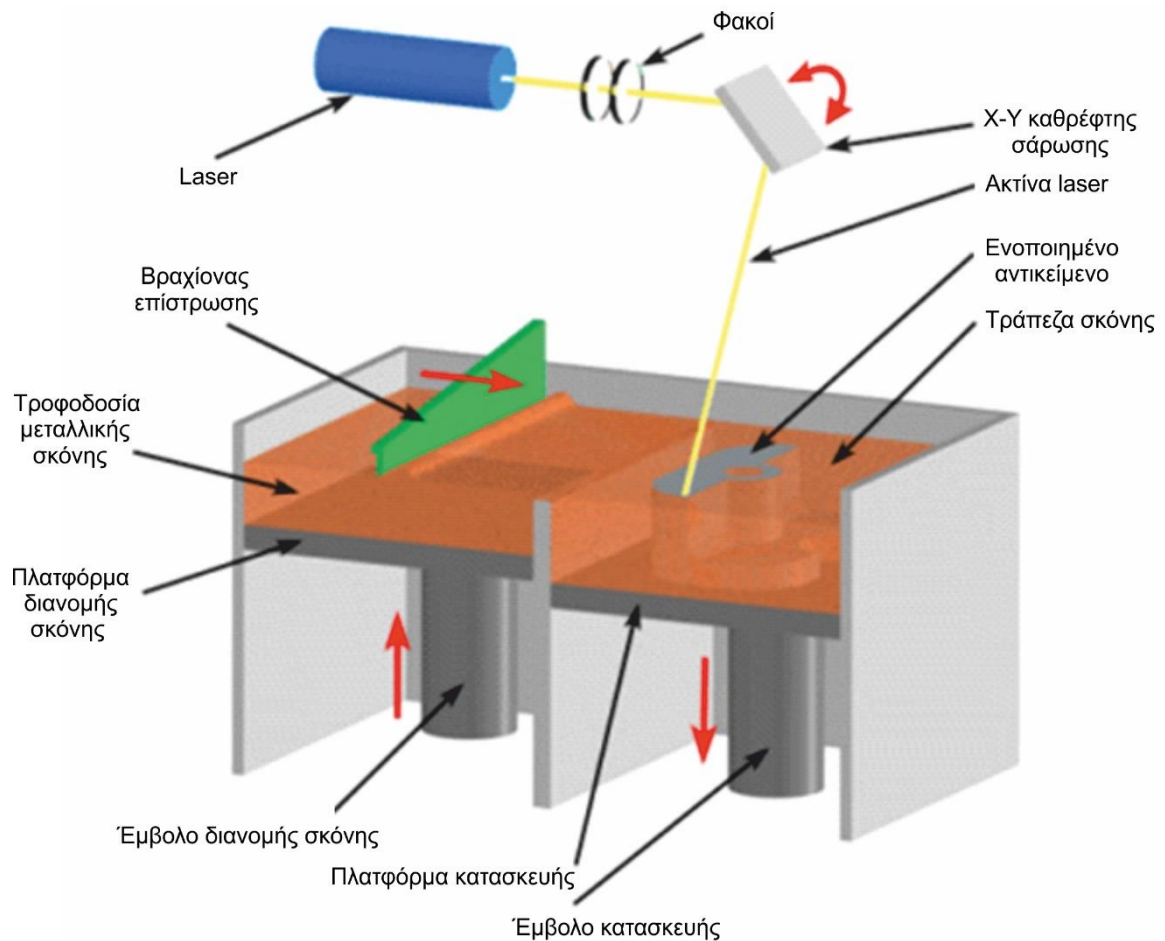
Σχήμα 2.5: Τρισδιάστατη εκτύπωση (3DP) [4].

2.2.6 Επιλεκτική τήξη με laser (Selective Laser Melting - SLM)

Η μέθοδος επιλεκτικής τήξης με laser φαίνεται στο σχήμα 2.6. Η κύρια διαφορά μεταξύ της μεθόδου επιλεκτικής τήξης με laser (SLM) σε σχέση με τη μέθοδο επιλεκτικής σύντηξης με laser (SLS) είναι ότι στην πρώτη τεχνολογία, η δέσμη laser υψηλής ισχύος είναι ικανή να λιώσει σχεδόν οποιοδήποτε υλικό σε σκόνη (μέταλλα, κράματα, κεραμικά και πολυμερή) χωρίς τη χρήση πολυμερούς υλικού σύνδεσης και την απαραίτητη μεταγενέστερη επεξεργασία.

Αυτό εξασφαλίζει υψηλότερη ανάλυση και σχεδόν πλήρη πυκνότητα σε σύγκριση με τη μέθοδο επιλεκτικής σύντηξης με laser όπου η ακρίβεια κυμαίνεται γύρω στο 70%. Εντούτοις, μερικές φορές απαιτούνται δομές υποστήριξης, ειδικά όταν κατασκευάζονται σύνθετες γεωμετρίες που απαιτούν περισσότερο συνολικό υλικό και επεξεργασία.

Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο επιλεκτικής τήξης με laser αποτελούν ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο κραματοποιημένος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, το κοβάλτιο και το τιτάνιο. Η ποικιλία των υλικών καθιστά αυτή τη διαδικασία κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως στην αεροδιαστημική, στην κατασκευή εργαλείων, στη δημιουργία ιατρικών εμφυτευμάτων και γενικά σε εφαρμογές όπου η υψηλή αντοχή στη θερμότητα κρίνεται αναγκαία [4, 5].



Σχήμα 2.6: Επιλεκτική τήξη με laser (SLM) [4].

2.3 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό τα σύνθετα υλικά από την αρχαιότητα. Στη φύση βρίσκονται εύκολα υλικά, όπως για παράδειγμα η πέτρα, το ξύλο, ο πηλός, τα κόκαλα και πολλά άλλα, τα οποία είχαν ευρεία χρήση από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε και κατάφερε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά.

Τη δεκαετία του 1920 εμφανίστηκε το πρώτο σύνθετο υλικό, το οποίο βασιζόταν σε πολυμερική μήτρα και συγκεκριμένα ήταν μίγμα ινών ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Οι ίνες άνθρακα διατέθηκαν στην αγορά το 1964, οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν ευρεία χρήση ως συστατικά ενίσχυσης στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Επίσης, οι ίνες αραμιδίου οι οποίες εμφανίστηκαν στο εμπόριο το 1971, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων καθώς επίσης σε πολλές ναυπηγικές και αεροδιαστημικές κατασκευές. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά τα οποία έχουν καταστήσει τα σύνθετα υλικά την δημοφιλέστερη κατηγορία υλικών μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για ποικίλες εφαρμογές είναι τα εξής [6-9]:

- Υψηλή αντοχή.
- Καλή αντοχή σε διάβρωση.
- Μικρό βάρος.
- Καλή συμπεριφορά σε κόπωση, κρούση και στη διάδοση ρωγμών.
- Εύκολες διαδικασίες παραγωγής.
- Μικρό κόστος συντήρησης.

2.3.1 Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά, αν και έχουν κάνει την εμφάνισή τους από την αρχαιότητα, απέκτησαν μια τεράστια δυναμική από τη δεκαετία του 1960 λόγω της μεγάλης ανάπτυξης και προόδου της τεχνολογίας και της επιστήμης των υλικών. Επιπροσθέτως, κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα οι ολοένα και μεγαλύτερες ανάγκες για ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες κατασκευές οδήγησαν στην περαιτέρω ανάπτυξή τους.

Σύνθετο υλικό ορίζεται το υλικό εκείνο το οποίο προκύπτει από την ανάμειξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών με φυσικό ή μηχανικό τρόπο και παρουσιάζει τελικές ιδιότητες διαφορετικές και εν τέλει ανώτερες από αυτές των υλικών που το αποτελούν. Ο αριθμός σύνθετων υλικών που υπάρχουν ή που μπορούν να κατασκευαστούν είναι άπειρος, για αυτό τον λόγο και κατηγοριοποιούνται ποικιλοτρόπως. Καθ' ότι η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών δεν γίνεται με τρόπο απόλυτο, μπορεί να γίνει διαχωρισμός κυρίως βάσει του τύπου της μήτρας (matrix) και του τύπου της ενίσχυσης (reinforcement).

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερες φάσεις. Η συνεχής φάση σε ένα σύνθετο υλικό χαρακτηρίζεται ως μήτρα και οι άλλες που βρίσκονται υπό μορφή σωματιδίων ή ινών σε διασπορά ονομάζονται ενισχυτικές φάσεις. Οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού εξαρτώνται από το βαθμό διασποράς της ενισχυτικής φάσης και από το γεωμετρικό σχήμα, το μέγεθος και την κατανομή μεγέθους των διασπαρμένων σωματιδίων [6].

Η βιομηχανική σπουδαιότητα ενός σύνθετου υλικού έγκειται στο ότι αυτό συνδυάζει τις ιδιαίτερες ιδιότητες των επί μέρους συστατικών του. Κλασσικό παράδειγμα αποτελεί το πολυμερές ενισχυμένο με ίνες γυαλιού. Η αντοχή των μικρής διαμέτρου ινών γυαλιού συνδυάζεται με την πλαστικότητα του πολυμερούς. Ο συνδυασμός των δύο αυτών υλικών παράγει ένα σύνθετο προϊόν με ανώτερες ιδιότητες από αυτές των δύο μεμονωμένων συστατικών. Γενικότερα, μπορούν να παραχθούν σύνθετα υλικά που χαρακτηρίζονται από ασυνήθεις συνδυασμούς συνεκτικότητας, αντοχής, πλαστικότητας, βάρους, αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχής σε διάβρωση, σκληρότητας και αγωγιμότητας [6].

2.3.2 Ο ρόλος της μήτρας και του συστατικού ενίσχυσης

Ο ρόλος της μήτρας στα σύνθετα υλικά είναι πολλαπλός και καθοριστικός καθώς επιτελεί μια σειρά από πολύ σημαντικές λειτουργίες. Η μήτρα έχει συνδετικό ρόλο ως συγκολλητική ουσία καθώς αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των συστατικών ενίσχυσης. Επίσης, η μήτρα μεταβιβάζει τα μηχανικά φορτία που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό μέσω της διεπιφάνειας στο συστατικό ενίσχυσης και επιπλέον προστατεύει την επιφάνεια του συστατικού ενίσχυσης από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Επιπροσθέτως, η μήτρα προσφέρει ανθεκτικότητα και ηλεκτρική μόνωση στο σύνθετο υλικό καθώς και στην περίπτωση όπου η μήτρα είναι πιο όλκιμη από την ενίσχυση, προστατεύει το σύνθετο υλικό από ενδεχόμενη θραύση διότι αποτρέπει τη διάδοση των ρωγμών και τέλος διατηρεί τη συνοχή του σύνθετου υλικού μιας και συγκρατεί τις ενισχύσεις. Από την επιλογή του τύπου της μήτρας που θα χρησιμοποιηθεί κρίνεται και ο βιομηχανικός εξοπλισμός που καθίσταται απαραίτητος. Ο τύπος της μήτρας επηρεάζει συχνά τις μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών και επομένως η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης των υλικών αυτών.

Η αντοχή στα σύνθετα υλικά οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο συστατικό ενίσχυσης και για λόγους υψηλής απόδοσης είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της περιεκτικότητάς του μέσα στη μήτρα. Επιπλέον, η γεωμετρία του ενισχυτικού παίζει εξίσου καθοριστικό ρόλο. Σε κάθε

περίπτωση τα συστατικά ενίσχυσης είναι αυτά που ουσιαστικά συμβάλουν στις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού (μηχανικές, θερμικές κ.ά.), ενώ παράλληλα καθορίζουν τη θραυστομηχανική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού.

Τέλος, η φυσικοχημική πρόσφυση μεταξύ της μήτρας και του συστατικού ενίσχυσης πρέπει να είναι καλή καθώς και να μην εκτυλίσσονται μεταξύ τους χημικές και άλλες αλληλεπιδράσεις. Η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού είναι καλή, όταν η πρόσφυση του συστατικού ενίσχυσης και της μήτρας είναι καλή. Ακόμη, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του υλικού της μήτρας και του συστατικού ενίσχυσης που σχετίζονται με το ιξώδες, τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης T_g , κ.ά [6-9].

2.3.3 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Βάσει του είδους της μήτρας, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:
 - **Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites, PMCs).** Η συγκεκριμένη κατηγορία αποτελεί την δημοφιλέστερη στον τομέα των σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (PMCs) αποτελούνται από ένα πολυμερές ως μήτρα και ίνες ή σωματίδια ως συστατικό ενίσχυσης. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου, της ευκολίας παραγωγής τους και του χαμηλού τους κόστους. Συχνότερα, η κατηγοριοποίησή τους γίνεται βάσει του είδους του πολυμερούς που χρησιμοποιείται ως μήτρα. Σύμφωνα με αυτό, οι μήτρες διακρίνονται σε θερμοπλαστικές, θερμοσκληρυνόμενες και ελαστομερείς. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας αποτελούν το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/Carbon Fibers), το πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (PLA/Carbon Fibers), το πολυαμίδιο ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (Nylon/Glass Fibers), η εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες αραμιδίου (Epoxy Resin/Aramid Fibers) και πολλά άλλα.
 - **Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMCs).** Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (MMCs) μπορούν να μορφοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι η διασπορά του υλικού του εγκλείσματος στο υλικό της μεταλλικής μήτρας όταν αυτό βρίσκεται σε μορφή τήγματος. Ένας άλλος τρόπος είναι το υλικό του εγκλείσματος να αναμειχθεί με μέταλλο σε μορφή σκόνης και στη συνέχεια να εφαρμοστεί κατάλληλη θερμομηχανική κατεργασία. Το υλικό της μήτρας είναι όλκιμο μέταλλο χαμηλής πυκνότητας, όπως νικέλιο και σίδηρος. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (MMCs) έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, αγωγιμότητας και μηχανικής φόρτισης πέραν των δυνατοτήτων των συστημάτων πολυμερικής μήτρας. Μειονέκτημα των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας αποτελεί το μεγαλύτερο βάρος τους συγκριτικά με τα συστήματα πολυμερικής μήτρας. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας βρίσκουν σημαντικές εφαρμογές σε στοιχεία μηχανών αεροσκαφών και αυτοκινήτων και επιπλέον χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές αεροδιαστημικής και αεροναυπηγικής.
 - **Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites, CMCs).** Ο σπουδαιότερος λόγος για την ανάπτυξή τους αποτελεί η εξαιρετική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (CMCs) χαρακτηρίζονται από μεγάλη στιβαρότητα και υψηλή αντοχή στη διάβρωση, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες και

προσδίδουν στο υλικό δυσκαμψία και σταθερότητα στην ενισχυτική φάση και την προστατεύουν από μηχανική ή οξειδωτική φθορά. Με αυτά τα σύνθετα υλικά, εν αντιθέσει με τα συμβατικά κεραμικά υλικά, μπορούν να επιτευχθούν μοναδικές ιδιότητες για κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως για εφαρμογές μηχανών υψηλής απόδοσης. Ένα ιδιαίτερα προηγμένο σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι τα σύνθετα υλικά άνθρακα-άνθρακα όμως, το υλικό αυτό υψηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής είναι ακριβό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα στα οποία χρησιμοποιούνται τα σύνθετα υλικά άνθρακα-άνθρακα αποτελούν οι μηχανές υψηλής απόδοσης ως υλικά υψηλής αντοχής σε τριβή και επίσης στην αεροδιαστημική για κωνικές μύτες και πτερύγια πλοήγησης διαστημικών οχημάτων, λόγω της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες [6-9].

2. Βάσει του είδους του συστατικού ενίσχυσης (reinforcement), τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:
 - **Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες (Fiber-reinforced Composites).** Στα υλικά αυτά η ενίσχυση είναι υπό μορφή ινών ενσωματωμένων μέσα στη μήτρα. Οι ίνες αποτελούν έναν από τους πιο απλούς τύπους σύνθετων υλικών, οι οποίες παρουσιάζουν εντυπωσιακή ανάπτυξη με ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Αυτή τους η επιτυχία βασίζεται στο γεγονός ότι συνδυάζουν ιδανικά το υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλή ειδική αντοχή που παρουσιάζουν με την ευκολία στο σχεδιασμό τους, εκτοπίζοντας τα παραδοσιακά υλικά σε ποικίλες εφαρμογές. Τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ίνες γυαλιού (glass fibers), οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι ίνες αραμιδίου (aramid fibers), οι κεραμικές ίνες (ceramic fibers) και οι πολυμερικές ίνες (polymeric fibers).
 - **Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια (Particulate Composites).** Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες οι οποίες είναι α) σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια μικρού μεγέθους σε διασπορά και β) σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια μεγάλου μεγέθους. Στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια μικρού μεγέθους σε διασπορά η διάμετρος των σωματιδίων κυμαίνεται μεταξύ 10 και 250nm. Πολλά βιομηχανικά πολυμερή ενισχύονται με σωματίδια μικρού μεγέθους σε διασπορά. Ένα καλό παράδειγμα είναι η προσθήκη σωματιδίων άνθρακα (carbon black) στα ελαστικά κατά τον βουλκανισμό τους. Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια μεγάλου μεγέθους περιλαμβάνουν συστήματα στα οποία τα διασπαρμένα σωματίδια είναι σχετικά μεγάλα, διαμέτρου τουλάχιστον μερικών μm. Η περιεκτικότητα σε σωματίδια είναι σχετικά μεγάλη, συνήθως μεταξύ 60-90% και γενικά μεγαλύτερη από 25%. Αυτά τα σύνθετα υλικά προκύπτουν με διάφορους συνδυασμούς μεταλλικών, κεραμικών και πολυμερών υλικών, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σκυρόδεμα το οποίο είναι ένα σύνθετο υλικό με σωματίδια μεγάλου μεγέθους.
 - **Στρωματικά σύνθετα υλικά (Laminated Composites).** Τα στρωματικά σύνθετα περιλαμβάνουν υλικά με προστατευτικές επιστρώσεις μικρού και μεγάλου πάχους, τα διμεταλλικά, τα πολυστρωματικά και τα sandwich υλικά. Πολλά στρωματικά σύνθετα υλικά σχεδιάζονται για τη βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση με διατήρηση του χαμηλού τους κόστους, για υψηλή αντοχή ή για μικρό βάρος. Άλλες σπουδαίες εφαρμογές αναφέρονται σε περιπτώσεις που απαιτούνται εξαιρετική αντοχή σε φθορά και τριβή, βελτιωμένη εμφάνιση και ασυνήθη χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής [6-9].

3. Βάσει της τάξης μεγέθους του συστατικού ενίσχυσης (reinforcement), τα σύνθετα υλικά διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Νανοσύνθετα.** Η τάξη μεγέθους της διεσπαρμένης φάσης κυμαίνεται από ένα νανόμετρο και μπορεί να φτάσει έως και μερικές εκατοντάδες νανόμετρα. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ενίσχυσης στην κλίμακα του νανόμετρου αποτελούν οι νανο-ίνες άνθρακα (carbon nanofibers) και οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes).
- **Μικροσύνθετα.** Η ασυνεχής φάση ενίσχυσης είναι συνήθως της τάξης του μικρόμετρου. Τέτοια υλικά που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι τα μεταλλικά κράματα και τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά.
- **Μακροσύνθετα.** Η τάξη μεγέθους του εγκλείσματος είναι συνήθως από μερικά χιλιοστά και ενδέχεται να φτάσει και το ένα μέτρο. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν υλικά όπως το ενισχυμένο σκυρόδεμα και ο γαλβανισμένος χάλυβας [6-9].

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αντικείμενο μελέτης αποτελούν τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites, PMCs). Η συγκεκριμένη κατηγορία υλικών αποτελεί τη δημοφιλέστερη στον τομέα των σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας αποτελούνται από ένα πολυμερές ως μήτρα και από ίνες ή σωματίδια ως συστατικό ενίσχυσης. Τα πολυμερή παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον και λόγω των ιδιοτήτων τους χρησιμοποιούνται σήμερα σε ευρεία κλίμακα. Τα είδη των πολυμερών τα οποία χρησιμοποιούνται ως μήτρες χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- **Θερμοπλαστικά (Thermoplastics)**
- **Θερμοσκληρυνόμενα (Thermosets)**
- **Ελαστομερή (Elastomers)**

Θερμοπλαστικά (Thermoplastics):

Τα θερμοπλαστικά είναι πολυμερή τα οποία έχουν τη δυνατότητα να τήκονται με θέρμανση, να στερεοποιούνται με ψύξη καθώς και να επανατήκονται επαναληπτικά. Στα υλικά αυτά, η σύνδεση μεταξύ των μακρομορίων γίνεται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Με τη θέρμανση του υλικού, η ένταση των διαμοριακών δυνάμεων μειώνεται αρκετά, προκειμένου το υλικό να γίνεται μαλακό και εύκαμπτο, ενώ ακολούθως σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες μετατρέπεται σε ρευστό. Σε περίπτωση που αφεθεί να ψυχθεί, τότε μετατρέπεται πάλι σε στερεό. Ένα πλεονέκτημα της διαδικασίας μορφοποίησης αυτών των υλικών, αποτελεί η επανάληψη θεωρητικά άπειρων φορών του κύκλου ρευστοποίησης με θέρμανση και στερεοποίησης με ψύξη. Ωστόσο, η υποβάθμιση των ιδιοτήτων του θερμοπλαστικού με την επανάληψη των κύκλων θέρμανσης-ψύξης αποτελεί μειονέκτημα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα θερμοπλαστικών υλικών αποτελούν το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυαιθυλένιο (PE) και πολλά άλλα.

Θερμοσκληρυνόμενα (Thermosets):

Τα θερμοσκληρυνόμενα είναι πολυμερή τα οποία στη ρευστή τους κατάσταση εμφανίζονται ως μόρια μακράς αλυσίδας, αλλά με δυνατότητα αντίδρασης και σκλήρυνσης συνήθως υπό θέρμανση και πίεση εξαιτίας διασταυρώσεων. Επίσης, δεν έχουν τη δυνατότητα να ξαναγίνουν μαλακά και ρευστά, όπως για παράδειγμα η φαινολική φορμαλδεΰδη, τα εποξειδία και οι πολυουραιθάνες. Η παραγωγή ενός θερμοσκληρυνόμενου πλαστικού πραγματοποιείται μέσω μιας χημικής αντίδρασης δύο σταδίων. Συγκεκριμένα, η παραγωγή μακρομοριακών αλυσίδων γίνεται στο 1^ο στάδιο (όπως στα θερμοπλαστικά), οι οποίες ωστόσο

μπορούν να εμφανίσουν περαιτέρω αντίδραση. Στη συνέχεια, το 2^ο στάδιο περιλαμβάνει την προσθήκη καταλύτη, ο οποίος ενεργοποιεί χημική αντίδραση μεταξύ των μακρομορίων που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία «σταυροδεσμών» (crosslinks). Η δημιουργία των δεσμών αυτών γίνεται μεταξύ των μακρομορίων με αποτέλεσμα το προϊόν μετά την ψύξη του να είναι στερεό και άκαμπτο. Ένα στιβαρό τρισδιάστατο «πλέγμα» μορίων χαρακτηρίζει τη δομή του θερμοσκληρυνόμενου πλαστικού, όπου τα μακρομόρια έχουν ελάχιστους βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων υλικών είναι οι πολυεστερικές και οι εποξικές ρητίνες, οι οποίες έχουν ευρεία χρήση σε ποικίλες εφαρμογές.

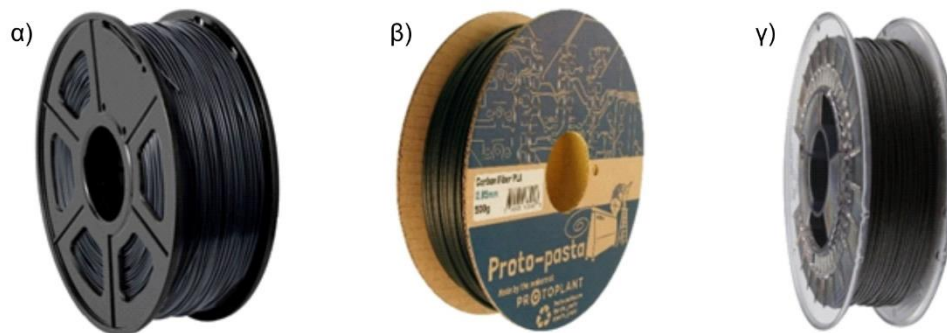
Ελαστομερή (Elastomers):

Τα ελαστομερή είναι πολυμερή τα οποία αποτελούνται από διασταυρούμενες πλεγματικές δομές με μεγάλη δυνατότητα παραμόρφωσης και συγκεκριμένα επανακάμπτωνται πλήρως, εξαιτίας του υψηλού βαθμού ευελιξίας των αλυσίδων, όπως για παράδειγμα το φυσικό καουτσούκ. Επίσης, κάποιες σημαντικές ιδιότητές τους είναι ότι μπορούν να εκτείνονται ακαριαία καθώς και να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση εξίσου ακαριαία, ο βαθμός κρυσταλλικότητας είναι μικρός έως αμεληταίος και έχουν μεγάλο μοριακό βάρος ή μεταξύ των μορίων εισάγονται σταυροδεσμοί για τη δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ελαστομερών αποτελούν το φυσικό και το συνθετικό καουτσούκ και οι σιλικόνες [6, 10].

2.4 Υλικά της παρούσας διδακτορικής διατριβής

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.7](#). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τρεις πολυμερικές μήτρες από ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), πολυγαλακτικό οξύ (PLA) καθώς και πολυαμίδιο (Nylon). Η πολυμερική μήτρα από ABS ενισχύθηκε με νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes/CNTs) και ίνες άνθρακα (carbon fibers/CF). Ακολουθως, η πολυμερική μήτρα από PLA ενισχύθηκε με ίνες άνθρακα και νανοδιαμάντι (nanodiamond/uD) ενώ τέλος η πολυμερική μήτρα από Nylon ενισχύθηκε με ίνες γυαλιού (glass fibers/GF) καθώς και ίνες άνθρακα.

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας που χρησιμοποιήθηκαν και εξετάστηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζονται λεπτομερώς παρακάτω:



Σχήμα 2.7: Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας.

- **Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο (Acrylonitrile butadiene styrene-ABS).**
- ABS ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα (ABS/CNTs). Το ποσοστό βάρους της ενίσχυσης αποτελεί ιδιωτική πληροφορία, δεν αποκαλύπτεται από την εταιρεία.
- ABS ενισχυμένο με 15% κατά βάρος ίνες άνθρακα (ABS/CF), όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.7 \(α\)](#).

- **Πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic acid-PLA).**
- PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uDiamond). Το ποσοστό κατά βάρος του πολυγαλακτικού οξέος (PLA) στο σύνθετο υλικό είναι μεγαλύτερο του 99% και του νανοδιαμαντιού σε μορφή σκόνης μικρότερο της μονάδας.
- PLA ενισχυμένο με 15% κατά βάρος ίνες άνθρακα (PLA/CF), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 (β).
- **Πολυαμίδιο (Polyamide-Nylon).**
- Nylon ενισχυμένο με 20% κατά βάρος ίνες άνθρακα (Nylon/CF).
- Nylon ενισχυμένο με 16% κατά βάρος ίνες γυαλιού (Nylon/GF), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 (γ).

Όλα τα παραπάνω εμπορικά σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας είναι σε μορφή νήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των πολυμερικών μητρών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή:

- **Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (Acrylonitrile butadiene styrene-ABS):**

Το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο αποτελεί ένα από τα δημοφιλέστερα θερμοπλαστικά το οποίο προσφέρει εξαιρετικές ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, υψηλή αντοχή σε κρούση και εξαιρετική απόδοση σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την ευρεία χρήση του σε πολλές εφαρμογές. Το ABS είναι κατασκευασμένο με πολυμερισμό στυρολίου και ακρυλονιτρίλιου με την ύπαρξη πολυβουταδιένιου.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα της χρήσης του ABS στην παγκόσμια βιομηχανία περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την κατασκευή σωλήνων (όπως σωλήνες αποστράγγισης, αποβλήτων ή εξαερισμού), εξαρτήματα αυτοκινήτων, ηλεκτρονικά, κράνη (το ABS έχει αρκετά καλές ιδιότητες απορρόφησης κραδασμών), συσκευές κουζίνας, μουσικά όργανα, προστατευτικά κιβώτια μεταφοράς και παιχνίδια.

Επίσης, το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) είναι γενικά πολύ ανθεκτικό, ελαφρώς εύκαμπτο και αρκετά ανθεκτικό στη θερμότητα. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι σε θέση να επεξεργάζονται το ABS με θερμαινόμενο ακροφύσιο εξώθησης σε θερμοκρασία γύρω στους 220-240°C. Επομένως, ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής που μπορεί να επεξεργαστεί το ABS είναι απαραίτητος εξοπλισμένος με θερμαινόμενη τράπεζα εκτύπωσης, προκειμένου να αποφευχθεί η στρέβλωση ή η ρωγμή των εκτυπωμένων αντικειμένων. Τέλος, το ABS αποτελεί ένα από τα φθηνότερα θερμοπλαστικά στην αγορά και ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Παρ' όλα αυτά το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Αρχικά αποτελεί ένα μη βιοδιασπώμενο πλαστικό πετρελαιοχημικής βάσης, που μπορεί όμως να ανακυκλωθεί. Επίσης, το ABS δημιουργεί αναθυμιάσεις που μπορεί να ερεθίσουν ευαίσθητα άτομα και για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του εκτυπωτή σε έναν καλά αεριζόμενο χώρο ή ακόμα και χρήση κλειστού θαλάμου στον εκτυπωτή ή εξαεριστήρα. Τέλος, το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) μπορεί να αλλοιωθεί λόγω παρατεταμένης έκθεσης στο ηλιακό φως.

- **Πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic acid-PLA):**

Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένας βιοδιασπώμενος και βιοδραστικός θερμοπλαστικός αλειφατικός πολυεστέρας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως άμυλο καλαμποκιού και πατάτας καθώς και ζαχαροκάλαμο. Το PLA αποτελεί μία από τις δημοφιλέστερες επιλογές

υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή τοξικότητα και την καλύτερη περιβαλλοντική ευελιξία σε σύγκριση με άλλα πλαστικά που έχουν πετρελαιοχημική βάση, όπως το ABS.

Το κύριο μειονέκτημα του πολυγαλακτικού οξέος είναι η σχετική μη ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς το υλικό αρχίζει να τήκεται γύρω στους 50°C. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης του PLA αποτελούν οι ιατρικές ραφές και τα χειρουργικά εμφυτεύματα, καθώς διαθέτει την ικανότητα να διαλύεται σε αβλαβές γαλακτικό οξύ στο σώμα. Επίσης, χειρουργικά εμφυτευμένες βίδες, καρφίτσες, ράβδοι ή πλέγματα απλά διασπώνται στο σώμα μέσα σε 6 μήνες έως 2 χρόνια. Ακόμη, το πολυγαλακτικό οξύ έχει ευρεία χρήση σε συσκευασίες τροφίμων, σάκους, αναλώσιμα επιτραπέζια σκεύη, ταπτεσαρίες, ρούχα μιας χρήσης και προϊόντα υγιεινής καθώς θεωρείται ένα αρκετά ασφαλές υλικό.

- **Πολυαμίδιο (Polyamide-Nylon):**

Τα πολυαμίδια (nylons) είναι θερμοπλαστικά υψηλώς κρυσταλλικά λόγω της κανονικής συμμετρικής δομής των κύριων πολυμερικών αλυσίδων. Η υψηλή μηχανική αντοχή των πολυαμιδίων οφείλεται κατά κύριο λόγο στους δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων. Τα πολυαμίδια έχουν επίσης σχετικά υψηλή θερμοκρασία τήξης, ανθεκτικότητα στα χημικά αντιδραστήρια, διαστασιακή σταθερότητα, χαμηλή διαπερατότητα από αέρια και χαρακτηρίζονται από αργή καύση και αυτόσβεση. Η μορφοποίησή τους είναι εύκολη λόγω της ευκαμψιότητας των κύριων πολυμερικών αλυσίδων. Για τον ίδιο λόγο εμφανίζουν αυτολιπαντικότητα, μικρό συντελεστή επιφανειακής τριβής και καλή αντοχή στη φθορά.

Τα πολυαμίδια χρησιμοποιούνται ευρύτατα για παραγωγή οδοντωτών τροχών και εδράνων κύλισης, που λειτουργούν χωρίς λιπαντικό, αντιτριβικών στοιχείων μηχανών, στοιχείων μηχανών που λειτουργούν σε μεγάλες θερμοκρασίες και αντέχουν στους διαλύτες και άλλα χημικά μέσα και ηλεκτρολογικά εξαρτήματα. Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές περιλαμβάνουν συνδέσμους, πρίζες, διακόπτες και μονώσεις καλωδίων. Χρησιμοποιούνται επίσης στη συσκευασία, στην παραγωγή σχοινιών και σε πολλές άλλες εφαρμογές γενικής χρήσης. Τα nylons 6.6 και 6 προσφέρουν τον περισσότερο ευνοϊκό συνδυασμό τιμής, ιδιοτήτων και ευκολίας μορφοποίησης [6].

2.5 Εξεταζόμενα συστατικά ενίσχυσης

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκαν και παράλληλα μελετήθηκαν τέσσερα είδη συστατικών ενίσχυσης. Παρακάτω παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστατικών ενίσχυσης:

- **Ίνες γυαλιού (Glass fibers-GF):**

Οι ίνες γυαλιού αποτελούν μία από τις δημοφιλέστερες κατηγορίες συστατικών ενίσχυσης στις πολυμερικές μήτρες. Τα συγκεκριμένα σύνθετα πολυμερικά υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, καλή σταθερότητα διαστάσεων, καλή αντοχή στη θερμότητα, στο κρύο, στην υγρασία και στη διάβρωση, καλές ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες, ευκολία στην παραγωγή καθώς και σχετικά χαμηλό κόστος.

Ακολούθως παρουσιάζονται ορισμένα είδη γυαλιών που χρησιμοποιούνται ως ίνες ενίσχυσης, όπως για παράδειγμα το E-γυαλί (το E δηλώνει ηλεκτρικού τύπου), το οποίο έχει τη μεγαλύτερη χρήση σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη γυαλιών. Η μικρή περιεκτικότητά του E-γυαλιού σε νάτριο, έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα και ως επακόλουθο την καταλληλότητά του ως μονωτικό. Επίσης, η ελκυστικότητά του E-γυαλιού ως κατασκευαστικού

υλικού σχετίζεται με τη χημική αντοχή της βοριοπυριτικής σύστασης. Ακόμα, ένα άλλο είδος γυαλιού και συγκεκριμένα το S-γυαλί, αποτελεί ένα συστατικό ενίσχυσης με υψηλή αντοχή καθώς και υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Όσον αφορά τις πολυμερικές μήτρες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού, κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα στην κατηγορία των θερμοπλαστικών αποτελούν το νάϋλον 6.6, οι πολυ(ανθρακικοί εστέρες), το πολυστυρόλιο, ενώ στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων ανήκουν οι εποξειδικές ρητίνες, οι πολυεστέρες, οι φαινολικές ρητίνες καθώς και οι ρητίνες σιλικόνης.

Τέλος, τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού βρίσκουν εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή ναυτιλιακών ειδών, σωλήνων, σε περιπτώσεις που απαιτείται αντοχή σε διάβρωση, σε είδη αθλητικού εξοπλισμού και στην παραγωγή στοιχείων αεροσκαφών [6].

Ίνες άνθρακα (Carbon fibers-CF):

Οι ίνες άνθρακα αποτελούν μία ακόμα ευρέως διαδεδομένη κατηγορία συστατικών ενίσχυσης στα πολυμερή. Ο άνθρακας είναι συνδυασμός κρυσταλλικού γραφίτη και μη κρυσταλλικών περιοχών και η διάμετρος των ινών άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10 μm . Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

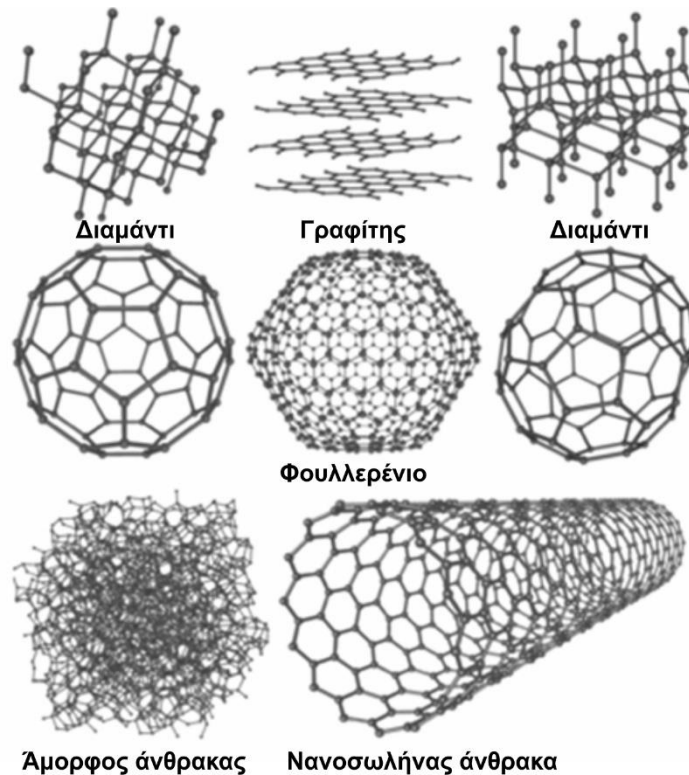
Πολυμερικά υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελούν το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF) καθώς και το νάϋλον (Nylon) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF). Επίσης, υπάρχουν ακόμα πάρα πολλά παραδείγματα πολυμερικών μητρών που ενισχύονται με ίνες άνθρακα, όπως για παράδειγμα εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα, πολυδιαιθερική κετόνη (PEEK) ενισχυμένη με ίνες άνθρακα καθώς και πολυφαινουλενοσουλφίδιο (PPS) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα. Οι πολυμερικές μήτρες PEEK και PPS ενισχυμένες με ίνες άνθρακα εμφανίζουν καλή αντίσταση στη θερμότητα και χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική. Επιπλέον, πλεονέκτημα των υλικών αυτών αποτελεί η αυξημένη συνεκτικότητα και παράλληλα ότι είναι ανακυκλώσιμα [6].

Νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon nanotubes-CNTs):

Οι δύο αλλοτροπικές κρυσταλλικές μορφές που βρίσκεται στη φύση ο άνθρακας είναι ως γραφίτης και ως διαμάντι. Στην πρώτη περίπτωση, ο γραφίτης έχει δισδιάστατη δομή αποτελούμενος από παράλληλα επίπεδα ατόμων άνθρακα τοποθετημένα σε εξαγωνικό πλέγμα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση του διαμαντιού, κάθε άτομο ενοποιείται με τα γειτονικά του μέσω υβριδικών sp^2 δεσμών, ισοδύναμα άκαμπτων και με υψηλή αντοχή, σχηματίζοντας ένα κανονικό τετράεδρο με ίσες μεταξύ τους γωνίες 109° [11].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, ο γραφίτης και το διαμάντι δεν αποτελούν τις μόνες αλλοτροπικές κρυσταλλικές δομές του άνθρακα. Το φουλλερένιο, μια καινούργια αλλοτροπική μορφή του άνθρακα δημιουργήθηκε το 1985, με την εκπομπή μιας ακτίνας laser σε γραφίτη υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Οι νανοσωλήνες άνθρακα ανακαλύφθηκαν το 1991 κατά τη διεξαγωγή μελετών πάνω στο φουλλερένιο.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι δομές σχετικές με το φουλλερένιο και είναι φτιαγμένοι από γραφίτικά επίπεδα που έχουν περιστραφεί για να δημιουργήσουν κυλίνδρους των οποίων τα άκρα ακολούθως κλείνονται από ημισφαιρικά φουλλερένια. Μέσω της διαμέτρου των νανοσωλήνων άνθρακα καθορίζεται ποιο από τα φουλλερένια θα χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να κλείσουν τα άκρα αυτών.



Σχήμα 2.8: Μορφές άνθρακα.

Οι βασικές κατηγορίες νανοσωλήνων άνθρακα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.9:

- Νανοσωλήνες μονού τοιχώματος (SWCNT, Single-Walled Carbon Nanotubes).
- Νανοσωλήνες διπλού τοιχώματος (DWCNT, Double-Walled Carbon Nanotubes).
- Νανοσωλήνες πολλαπλού τοιχώματος (MWCNT, Multi-Walled Carbon Nanotubes).



Σχήμα 2.9: Νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs).

Η περιγραφή ενός νανοσωλήνα άνθρακα μπορεί να γίνει ως ένα γραφικό φύλλο τυλιγμένο σε σχήμα κυλίνδρου με $\Phi 1-3\text{nm}$ και μήκος $3-50\mu\text{m}$, το οποίο αποτελεί μονοδιάστατη νανοδομή. Επίσης, ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο μπορεί να ξεπεράσει το 10000, ενώ ακόμη η πυκνότητα κυμαίνεται από 0.8 έως 5.2g/cm^3 .

Επίσης, οι νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος αποτελούνται συνήθως από τρία έως τριάντα ομόκεντρα γραφικά φύλλα με εξωτερική διάμετρο 3 έως 50nm , ανάλογα με τον αριθμό των γραφικών φύλλων που διαθέτουν. Ακόμη, η απόσταση μεταξύ των γραφικών φύλλων είναι περίπου 0.34nm . Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν ευρεία χρήση σε διάφορες εφαρμογές, λόγω των ιδιαίτερων μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, σε σχέση με τα συμβατικά υλικά.

Οι νανοσωλήνες μονού τοιχώματος θεωρητικά έχουν μέτρο ελαστικότητας 1TPa, ενώ οι νανοσωλήνες πολλαπλού τοιχώματος είναι πιο αδύνατοι εξαιτίας του ότι υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των διαφόρων κυλίνδρων από τους οποίους αποτελούνται. Γενικά οι διάφοροι τύποι νανοσωλήνων άνθρακα, μπορούν να υπομείνουν μεγάλες εφελκυστικές παραμορφώσεις χωρίς να εμφανίσουν σημάδια θραύσης. Ωστόσο, οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι αρκετά ευλύγιστοι σε άλλες κατευθύνσεις.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα υπό τη μορφή συνόλων χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ως φάση ενίσχυσης με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, ένα από τα πιο ανθεκτικά και ελαστικά υλικά που βρίσκονται στη φύση είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα, με εφελκυστική αντοχή περίπου εκατό φορές υψηλότερη από αυτή του χάλυβα και μέτρο ελαστικότητας έως 1.2TPa [12, 13]. Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) αποτελούν ιδανική επιλογή για ποικίλες κατασκευαστικές εφαρμογές, λόγω της υψηλής δυσκαμψίας και αντοχής τους. Η χρήση τους ως συστατικά ενίσχυσης σε υψηλής αντοχής και χαμηλού βάρους σύνθετα υλικά αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα.

Επίσης, ένα ακόμα πλεονέκτημα που διακρίνεται με τη χρήση νανοσωλήνων άνθρακα ως συστατικό ενίσχυσης των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας, αποτελεί η αύξηση της κρουστικής αντοχής, διότι οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν την ικανότητα απορρόφησης μεγάλου ποσοστού ενέργειας εξαιτίας της καλής ελαστικής συμπεριφοράς τους. Η μικρή πυκνότητα, η καλή συμπεριφορά σε θλιπτικές φορτίσεις και η αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα χρήσης των νανοσωλήνων άνθρακα ως συστατικό ενίσχυσης των σύνθετων υλικών.

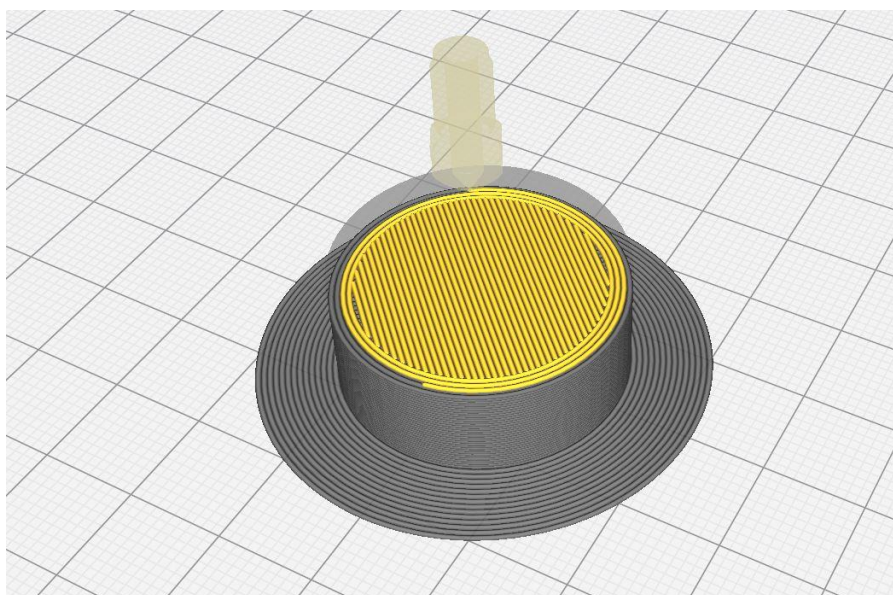
Νανοδιαμάντι (Nanodiamond-uD):

Το νανοδιαμάντι αποτελεί ένα ιδιαίτερο συστατικό ενίσχυσης. Στη συγκεκριμένη έρευνα, το νανοδιαμάντι ως συστατικό ενίσχυσης της πολυμερικής μήτρας από πολυγαλακτικό οξύ, προσδίδει ιδιαιτέρως βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, όπως για παράδειγμα υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας (μέτρο ελαστικότητας: 6300MPa) καθώς και υψηλότερη αντοχή (εφελκυστική αντοχή: 43.5MPa), σε σχέση με το πολυγαλακτικό οξύ χωρίς κάποια προσθήκη καθώς και το πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με 15% κατά βάρος ίνες άνθρακα.

2.6 Κατασκευή και παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων

Με τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη εκτύπωση κυλινδρικών δοκιμίων με διάμετρο 29mm και πάχος 12.5mm, προκειμένου να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά των εξεταζόμενων υλικών μέσω διαφόρων πειραματικών διαδικασιών. Η κατασκευή των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού εκτυπωτή Ultimaker 2⁺ μέσω της μεθόδου μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF).

Επιπροσθέτως, έγινε χρήση του λογισμικού Cura, το οποίο είναι συμβατό με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή Ultimaker 2⁺, για τον ορισμό και την επεξεργασία των παραμέτρων εκτύπωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Τέλος, οι παράμετροι εκτύπωσης που αφορούν τη σχεδίαση, όπως για παράδειγμα το ύψος κάθε στρώσης (layer height), το πάχος τοιχώματος (wall thickness), η πυκνότητα γεμίσματος εκτύπωσης (infill density), η ταχύτητα εκτύπωσης (print speed) κ.λπ. παρέμειναν ίδιες για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, ανεξαρτήτως υλικού, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.10: Προσομοίωση εκτύπωσης κυλινδρικού δοκιμίου στο λογισμικό Cura.

Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων	Τιμές
Διάμετρος κυλινδρικών δοκιμίων	29mm
Πάχος κυλινδρικών δοκιμίων	12.5mm
Διάμετρος κεφαλής εκτύπωσης (print head diameter)	2.85mm
Διάμετρος ακροφύσιου εξώθησης (nozzle diameter)	0.6mm
Ύψος κάθε στρώσης (layer height)	0.3mm
Πλάτος γραμμής (line width)	0.58mm
Πλάτος κάθε γραμμής τοιχώματος (wall line width)	0.58mm
Πάχος τοιχώματος (wall thickness)	2.4mm
Αριθμός τοιχωμάτων (wall line count)	4
Ποσοστό πυκνότητας γεμίσματος (infill density)	100%
Διάταξη γεμίσματος (infill pattern)	lines
Ταχύτητα εκτύπωσης (print speed)	35mm/s

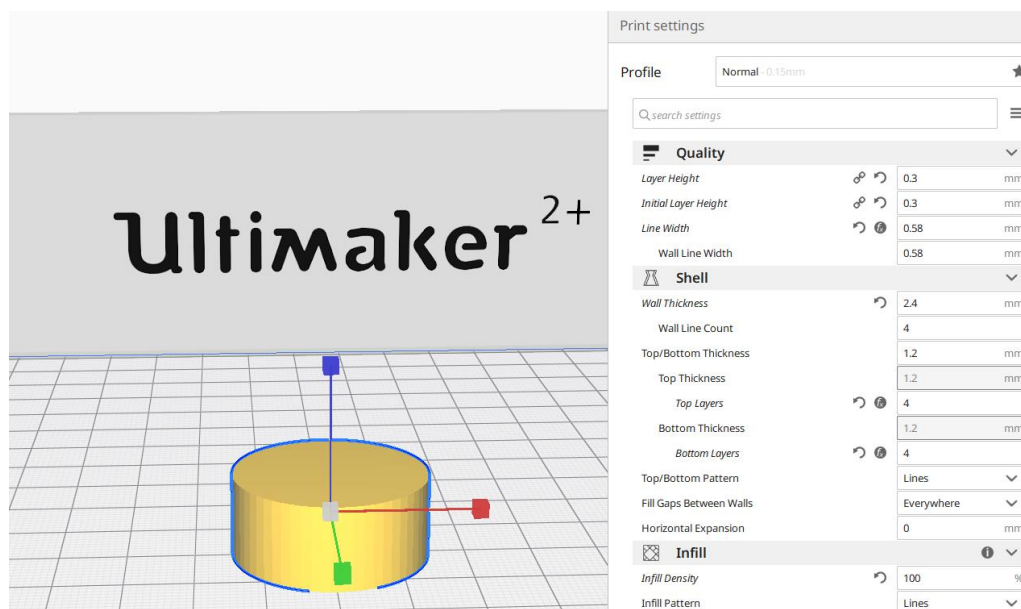
Πίνακας 2.1: Βασικές παράμετροι εκτύπωσης εξεταζόμενων δοκιμίων.

Αρχικά στο λογισμικό Cura ορίστηκε το μοντέλο του εκτυπωτή (Ultimaker 2⁺) που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα καθώς και βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν τις ρυθμίσεις του εκτυπωτή, της κεφαλής εκτύπωσης και του εξωθητή. Έπειτα, δημιουργήθηκαν τα προφίλ των σύνθετων εξεταζόμενων υλικών με προσαρμοσμένα θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά εκτύπωσης (custom materials), διότι στο λογισμικό Cura υπάρχουν μόνο βασικές επιλογές πολυμερών και παράλληλα ορίστηκε η διάμετρος του ακροφύσιου εξώθησης.

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων εκτύπωσης των δοκιμίων στις ρυθμίσεις εκτύπωσης (print settings) του λογισμικού Cura, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.11](#). Στις ρυθμίσεις εκτύπωσης περιλαμβάνονται διάφορες κατηγορίες χαρακτηριστικών εκτύπωσης, όπως παράμετροι που αφορούν την ποιότητα (quality), τα περιβλήματα (shells), τα τοιχώματα (walls), την πυκνότητα γεμίσματος (infill), το υλικό (material), την ταχύτητα (speed), τις ιδιότητες ψύξης (cooling), τις υποστηρικτικές δομές (support) καθώς και τον τύπο κόλλησης του δοκιμίου στην τράπεζα εκτύπωσης (build-plate adhesion).

Οι παράμετροι σχετικά με τις θερμοκρασίες εκτύπωσης και τις θερμοκρασίες της τράπεζας εκτύπωσης καθώς και επιπλέον μέτρα (χρήση κλειστού θαλάμου και ειδικής κόλλας καθ' όλη

τη διάρκεια εκτύπωσης των δοκιμών) που εφαρμόστηκαν για κάθε ένα εξεταζόμενο υλικό, με σκοπό την καλύτερη δυνατή εκτύπωση, παρουσιάζονται αναλυτικώς στη συνέχεια. Επισημαίνεται ότι αρχικά ερευνήθηκαν και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές κατόπιν της τελικής επιλογής των παραμέτρων σχετικά με τις θερμοκρασίες εκτύπωσης και τις θερμοκρασίες της πλάκας εκτύπωσης των δοκιμών, καθώς οι προτεινόμενες θερμοκρασίες από την κάθε εταιρεία διέφεραν σε ορισμένες περιπτώσεις με τις θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν τελικώς, διότι οι θερμοκρασίες και άλλοι σημαντικοί παράγοντες όπως προαναφέρθηκαν παραπάνω διαφέρουν από εκτυπωτή σε εκτυπωτή.



Σχήμα 2.11: Ορισμός παραμέτρων εκτύπωσης στο λογισμικό Cura.

Η θερμοκρασία εκτύπωσης (printing temperature) που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών από ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) χωρίς κάποια προσθήκη καθώς και ABS ενισχυμένο με 15% κατά βάρος ίνες άνθρακα και ABS ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα ήταν 240°C, καθώς και η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης (build-plate temperature) ορίστηκε 105°C.

Η χρήση ανεμιστήρων κατά τη διαδικασία εκτύπωσης αρκετών υλικών κρίνεται απαραίτητη καθώς βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα της εκτύπωσης, εν αντιθέσει με άλλες περιπτώσεις υλικών στις οποίες οι ανεμιστήρες χρειάζεται να είναι ανενεργοί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των εξεταζόμενων δοκιμών της οικογένειας υλικών ABS, οι ανεμιστήρες ήταν ενεργοποιημένοι στο 100%.

Παράλληλα τοποθετήθηκε ειδική κόλλα στην επιφάνεια της τράπεζας εκτύπωσης με σκοπό την καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης και τέλος η χρήση κλειστού θαλάμου (chamber) κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση των εξεταζόμενων δοκιμών ήταν απαραίτητη, έτσι ώστε να διατηρούνται οι κατάλληλες θερμοκρασίες αλλά και για τον περιορισμό των αναθυμιάσεων που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, ιδιαιτέρως στη συγκεκριμένη οικογένεια υλικών από ABS, λόγω της πετρελαιοχημικής τους βάσης.

Η θερμοκρασία εκτύπωσης που ορίστηκε για την εκτύπωση δοκιμών από πολυγαλακτικό οξύ (PLA) χωρίς κάποια προσθήκη ήταν 200°C και η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης ήταν 60°C. Όσον αφορά την τρισδιάστατη εκτύπωση των δοκιμών από PLA ενισχυμένο με 15%

κατά βάρος ίνες άνθρακα (PLA/CF), η θερμοκρασία εκτύπωσης ήταν 230°C και αντίστοιχα η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης ήταν 90°C.

Επίσης, οι ανεμιστήρες ήταν ενεργοποιημένοι στο 100%. Ακόμη, κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκε κλειστός θάλαμος και κόλλα στην επιφάνεια της τράπεζας εκτύπωσης, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Τέλος, η θερμοκρασία εκτύπωσης των δοκιμών από PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) ορίστηκε 240°C και αντίστοιχα η θερμοκρασία της πλάκας εκτύπωσης ήταν 55°C. Οι ανεμιστήρες ήταν ενεργοποιημένοι στο 100% καθώς και απαραίτητη ήταν η χρήση κόλλας και κλειστού θαλάμου κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.

Η θερμοκρασία εκτύπωσης που ορίστηκε στο λογισμικό Cura για την κατασκευή κυλινδρικών δοκιμών από πολυαμίδιο (Nylon) χωρίς κάποια προσθήκη, Nylon ενισχυμένο με 20% κατά βάρος ίνες άνθρακα (Nylon/CF) και τέλος Nylon ενισχυμένο με 16% κατά βάρος ίνες γυαλιού (Nylon/GF) ήταν 260°C και αντίστοιχα η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης ήταν 90°C. Επίσης, οι ανεμιστήρες ήταν ανενεργοί και παράλληλα χρησιμοποιήθηκε κόλλα και κλειστός θάλαμος κατά την εκτύπωση για τους λόγους που αναφέρθηκαν και παραπάνω.

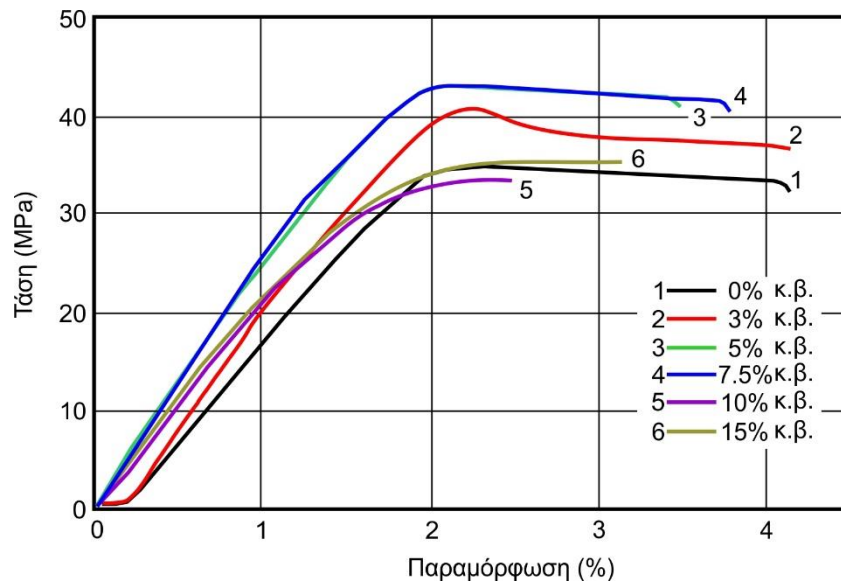
2.7 Προγενέστερη έρευνα στη μηχανική συμπεριφορά και τη μορφολογία σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια στις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, ενώ παράλληλα κατασκευάζονται προηγμένα υλικά ενσωματώνοντας πρόσθετα με μοναδικά χαρακτηριστικά. Η μέθοδος μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF) εκμεταλλεύεται τέτοιου είδους καινοτόμα υλικά, τα οποία έχουν παραχθεί μέσω της ανάμειξης του βασικού υλικού της μήτρας με πρόσθετα σε συγκεκριμένες ποσοστώσεις και δομές.

Για παράδειγμα, θερμοπλαστικά πολυμερή αναμειγνύονται συνήθως με ιδιαίτερα συστατικά ενίσχυσης, όπως ίνες άνθρακα, ίνες γυαλιού, νανοσωλήνες άνθρακα καθώς και πολλά άλλα, προκειμένου να υπάρξει σημαντική βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του πολυμερούς μητρικού υλικού και τελικώς συνολικά των ιδιοτήτων των τρισδιάστατων εκτυπωμένων στοιχείων.

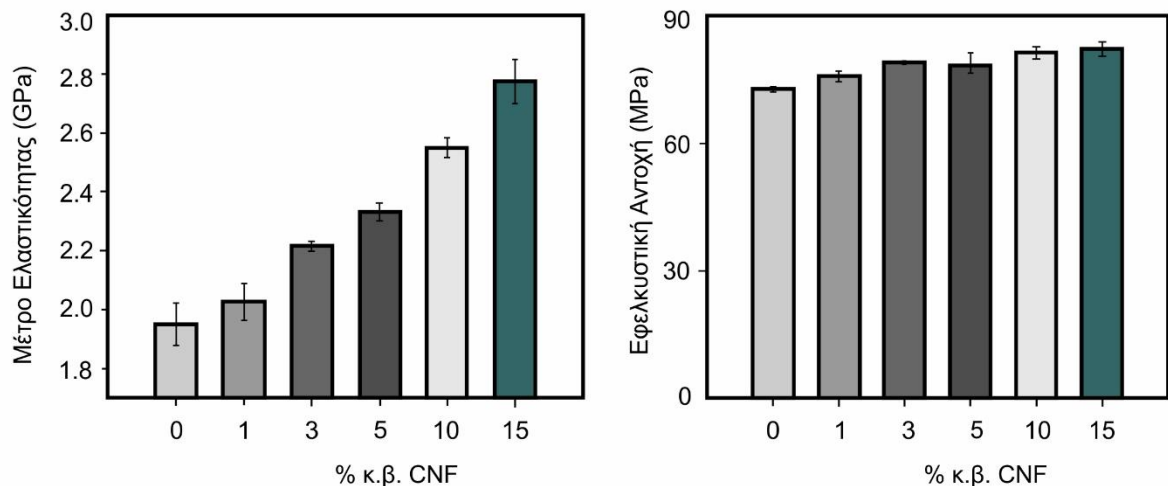
Ο Love και άλλοι [14] μελέτησαν και διαπίστωσαν πως το σύνθετο νήμα πολυμερικής μήτρας ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF), αύξησε την αντοχή και τη στιβαρότητα των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμών μέσω της μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF). Συγκεκριμένα, τα σύνθετα δοκίμια εμφάνισαν εφελκυστική αντοχή ίση με 70.69MPa και στιβαρότητα ίση με 8.91GPa, συγκριτικά με τα δοκίμια εφελκυσμού από ABS χωρίς κάποια προσθήκη, τα οποία είχαν αντίστοιχα εφελκυστική αντοχή ίση με 29.31MPa και στιβαρότητα ίση με 2.05GPa. Επίσης, η ενσωμάτωση ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα ABS μείωσε την παραμόρφωση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμών. Αυτό ήταν αναμενόμενο εν μέρει λόγω της αυξημένης θερμικής αγωγιμότητας συγκριτικά με το απλό ABS.

Εν συνεχεία, ο Ning και άλλοι [15] ερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες εκτυπωμένων δοκιμών με 0-15% κ.β. περιεχόμενο σε ίνες άνθρακα (CF) αναμειγμένο σε πολυμερική μήτρα από ABS. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως η ενίσχυση της πολυμερικής μήτρας ABS με ίνες άνθρακα αύξησε το μέτρο ελαστικότητας καθώς και την εφελκυστική αντοχή των εξεταζόμενων δοκιμών, συγκριτικά με τα δοκίμια από ABS χωρίς κάποια πρόσμειξη, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με διαφορετική περιεκτικότητα ινών άνθρακα.

Ο Anwer και άλλοι [16] μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά σύνθετων δοκιμίων από PLA ενισχυμένο με νανο-ίνες άνθρακα (CNF) σε διαφορετικές ποσοστώςσεις και συγκεκριμένα σε 1, 3, 5, 10 και 15% κατά βάρος περιεχόμενο. Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση του περιεχομένου νανο-ινών άνθρακα (CNF) στην πολυμερική μήτρα από PLA, φτάνοντας σε αύξηση 42% για 15% κ.β. περιεκτικότητα σε CNF σε σύγκριση με το PLA χωρίς κάποια πρόσμιξη, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.13](#).



Σχήμα 2.13: Μέτρο ελαστικότητας και εφελκυστική αντοχή σύνθετων δοκιμίων PLA-CNF.

Ωστόσο, η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων δοκιμίων αυξάνεται ελαφρώς έως 3% κ.β. περιεχόμενο σε νανο-ίνες άνθρακα και έπειτα αποκτά μια σταθερή τιμή, περίπου 80MPa για υψηλότερο περιεχόμενο CNF στην πολυμερική μήτρα PLA. Η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται πολύ περισσότερο από την αντοχή της διεπαφής μήτρας-συστατικού ενίσχυσης, σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας. Η διεπαφή CNF-PLA δεν ήταν ισχυρή και για αυτόν τον λόγο υπήρξε αποσύνδεση ινών. Συνεπώς, η ασθενής διατμητική αντοχή των επιφανειών αποτελεί ίσως τον λόγο για τον οποίο η εφελκυστική αντοχή δεν εμφανίζει σημαντική αύξηση σε υψηλότερα περιεχόμενα CNF.

Ο Yao και άλλοι [17] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες εκτυπωμένων κατασκευών από PLA ενισχυμένων με συνεχείς ίνες άνθρακα. Βάσει των αποτελεσμάτων του μονοαξονικού εφελκυσμού και των δοκιμών κάμψης τριών σημείων, οι συνεχείς ίνες άνθρακα βελτίωσαν σημαντικά τη μηχανική αντοχή των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών και συγκεκριμένα παρατηρήθηκε αύξηση πάνω από 70% για την εφελκυστική αντοχή και 18,7% αντίστοιχα για την καμπτική αντοχή. Επίσης, επιτεύχθηκε μείωση βάρους έως 26% καθώς και μειωμένος χρόνος εκτύπωσης έως 11,41%, χωρίς να μειωθεί η εφελκυστική αντοχή.

Ακόμα, ο Tekinalp και άλλοι [18] πραγματοποίησαν πειράματα εφελκυσμού με σύνθετα νήματα από ABS με πρόσμειξη ινών άνθρακα σε διάφορες ποσοστώσεις. Η ενίσχυση της πολυμερικής μήτρας ABS με ίνες άνθρακα βελτίωσε την εφελκυστική αντοχή κατά 115% καθώς και το μέτρο ελαστικότητας κατά 700%, ενώ παρουσίασαν πως η μέθοδος μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού προκάλεσε υψηλή ευθυγράμμιση των ινών κατά μήκος της κατεύθυνσης της εκτύπωσης. Επίσης, οι μικρογραφίες από το πείραμα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) δείχνουν πως οι ίνες έχουν απομακρυνθεί από τη μήτρα, υποδεικνύοντας αδύναμη επιφανειακή πρόσφυση μεταξύ των ινών άνθρακα και της μήτρας.

Ο Zhong και άλλοι [19] πραγματοποίησαν πειράματα με σκοπό τη μελέτη της αποτελεσματικότητας της ενσωμάτωσης κοντών ινών γυαλιού σε πολυμερική μήτρα ABS, για χρήση ως εκτυπώσιμο υλικό. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν δοκίμια πολυμερικής μήτρας ABS με διαφορετικά ποσοστά ινών γυαλιού ως συστατικά ενίσχυσης μέσω της μεθόδου μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FDM).

Κατόπιν αξιολόγησης των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι οι κοντές ίνες γυαλιού βελτίωσαν σημαντικά την αντοχή των σύνθετων εξεταζόμενων δοκιμών συγκριτικά με το ABS χωρίς κάποια προσθήκη, ωστόσο μειώθηκε η ευκαμψία. Επίσης, παρατηρήθηκε πως η αντοχή της κόλλησης μεταξύ των στρώσεων των εκτυπωμένων δοκιμών από ABS ενισχυμένο με κοντές ίνες γυαλιού (GF) αυξάνεται με την αύξηση του περιεχομένου σε ίνες γυαλιού. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι ένα υψηλότερο περιεχόμενο κοντών ινών γυαλιού παρέχει καλύτερη δυνατότητα στις ίνες γυαλιού να γεφυρώσουν μεταξύ τους γειτονικές στρώσεις πριν από τη στερεοποίηση της μήτρας ABS.

Σύμφωνα με τη μελέτη του Ferreira και άλλων [20] η ενσωμάτωση κοντών ινών άνθρακα (CF) στην πολυμερική μήτρα PLA είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των εξεταζόμενων δοκιμών σε σύγκριση με τα δοκίμια από απλό θερμοπλαστικό πολυμερές PLA και στις δύο κατευθύνσεις εκτύπωσης, 0° και 90° αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για το PLA χωρίς κάποια προσθήκη ήταν ίση με 3376MPa και κατόπιν ενίσχυσης με ίνες άνθρακα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας έφτασε τα 7541MPa για τη διεύθυνση εκτύπωσης 0°. Εν συνεχεία, όπως και στη διεύθυνση εκτύπωσης 0°, έτσι και στη διεύθυνση εκτύπωσης 90° παρατηρήθηκε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με την πρόσμειξη ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα PLA και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας του απλού PLA, το οποίο ήταν ίσο με 3125MPa αυξήθηκε στα 3920MPa.

Σχετικά με την εφελκυστική αντοχή, τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως τόσο για την κατεύθυνση εκτύπωσης 0° όσο και για την κατεύθυνση εκτύπωσης 90°, η πρόσμειξη ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα PLA δεν οδήγησε σε αύξηση της αντοχής σε σύγκριση με το PLA χωρίς κάποια προσθήκη. Εν αντιθέσει, η εφελκυστική αντοχή για το απλό PLA και για τις δύο κατευθύνσεις εκτύπωσης παρουσίασε ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες του PLA/CF, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.2.

Ιδιότητα	Διεύθυνση εκτύπωσης	PLA			PLA/CF		
		Max.	Avg.	Dev.	Max.	Avg.	Dev.
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	0°	3596	3376	212	7665	7541	96
	90°	3340	3125	148	4145	3920	167

Ιδιότητα	Διεύθυνση εκτύπωσης	PLA			PLA/CF		
		Max.	Avg.	Dev.	Max.	Avg.	Dev.
Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	0°	56.1	54.7	1.9	53.7	53.4	0.2
	90°	42.9	37.1	3.5	37	35.4	1.5

Πίνακας 2.2: Μέτρο ελαστικότητας και εφελκυστική αντοχή υλικών.

Ο Shofner και άλλοι [21] κατασκεύασαν σύνθετα δοκίμια από ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) ενισχυμένο με νανο-ίνες άνθρακα μέσω της μεθόδου μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF). Τα αποτελέσματα φανέρωσαν πως υπήρξε μέση αύξηση της τάξεως του 39% και 60% στην εφελκυστική αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα, σε ποσοστό 10% κατά βάρος νανο-ινών άνθρακα, σε σχέση με τα δοκίμια από ABS χωρίς κάποια πρόσμειξη. Επίσης, τα σύνθετα δοκίμια παρουσίασαν δραστική μείωση της επιμήκυνσης σε αστοχία, καθώς ο τρόπος θραύσης άλλαξε από όλκιμο σε ψαθυρό. Η ψαθυρή συμπεριφορά προέκυψε από τη μικρή αντίσταση στην αποκόλληση ινών καθώς και στη μειωμένη σύντηξη μεταξύ των στρώσεων.

Ο Yang και άλλοι [22] κατασκεύασαν σύνθετα δοκίμια χρησιμοποιώντας ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) ενισχυμένο με 10% κατά βάρος συνεχείς ίνες άνθρακα μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η καμπτική και εφελκυστική αντοχή των σύνθετων εξεταζόμενων δοκιμίων βελτιώθηκε και παρουσίασε αύξηση ίση με 127MPa και 147MPa αντίστοιχα, σε σχέση με τα δοκίμια από ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) χωρίς κάποια προσθήκη. Επίσης, ο Tian και άλλοι [23] κατασκεύασαν δοκίμια από PLA ενισχυμένο με συνεχείς ίνες άνθρακα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στα σύνθετα δοκίμια με 27% συνεχείς ίνες άνθρακα στην πολυμερική μήτρα από PLA, επιτεύχθηκε η μέγιστη καμπτική αντοχή και καμπτική στιβαρότητα, οι οποίες ήταν ίσες με 335MPa και 30GPa, αντίστοιχα. Ο Van der Klift και άλλοι [24] εκτύπωσαν δοκίμια εφελκυσμού από πολυαμίδιο (Nylon) ενισχυμένα με συνεχείς ίνες άνθρακα σε διαφορετικές ποσοστώσεις. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ελπιδοφόρα για τα σύνθετα δοκίμια με τις μεγαλύτερες ποσοστώσεις ινών άνθρακα, τόσο για τη στιβαρότητα όσο και για την αντοχή αντίστοιχα.

Ακόμα ο Karakos και άλλοι [25] πραγματοποίησαν πειράματα εφελκυσμού για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων δοκιμίων από πολυγαλακτικό οξύ (PLA) χωρίς κάποια προσθήκη, πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με νανοδιαμάντια (uDiam-PLA), πολυαμίδιο χωρίς κάποια πρόσμειξη (PA6/66) καθώς και πολυαμίδιο ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GF-PA6).

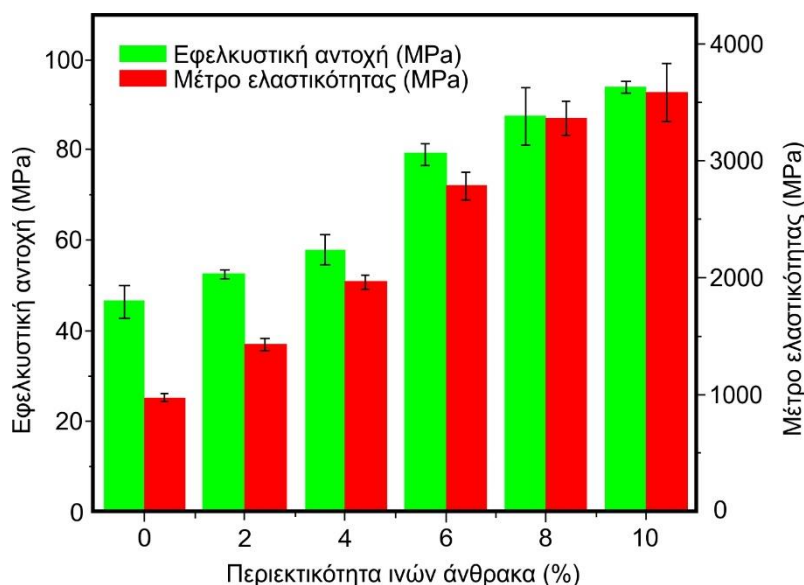
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, με την ενσωμάτωση νανοδιαμαντιών στην πολυμερική μήτρα από πολυγαλακτικό οξύ (PLA), παρουσιάστηκε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των σύνθετων δοκιμίων, ενώ τέλος παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής για το PLA χωρίς κάποια προσθήκη συγκριτικά με το uDiam-PLA. Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε ιδιαίτερη αύξηση της στιβαρότητας για το σύνθετο υλικό GF-PA6 σε σύγκριση με το απλό πολυαμίδιο (PA6/66). Συγκεκριμένα, η προσθήκη ινών γυαλιού στην πολυμερική μήτρα από

πολυαμίδιο οδήγησε σε ποσοστιαία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας ίση περίπου με 95% σε σχέση με το απλό πολυαμίδιο. Επίσης, παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής για το σύνθετο υλικό GF-PA6 σε σύγκριση με το απλό πολυαμίδιο, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3.

Υλικό	E (MPa)	UTS (MPa)	ϵ_{UTS} (mm/mm)	ϵ_{Break} (mm/mm)
PLA				
(Tests) Mean	1790.13	56.77	0.041	0.050
(Tests) StDev.	16.38	3.65	0.003	0.011
[26]	2852	38.1	0.021	0.028
uDiam-PLA				
(Tests) Mean	1995.47	35.59	0.026	0.027
(Tests) StDev.	179.80	2.14	0.002	0.002
[27]	6300	43.5	-	0.032
PA6/66				
(Tests) Mean	1299.77	58.29	0.061	-
(Tests) StDev.	9.44	0.20	0.001	-
[26]	579	27.8	0.020	2.10
GF-PA6				
(Tests) Mean	2533.22	91.16	0.051	0.051
(Tests) StDev.	19.88	0.78	0.002	0.002
[28]	7400	102	0.021	0.021

Πίνακας 2.3: Μηχανικές ιδιότητες υλικών υπό εφελκυστική φόρτιση.

Ο Liao και άλλοι [29] κατασκεύασαν σύνθετα δοκίμια πολυμερικής μήτρας πολυαμίδιου 12 (PA12) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF) σε διάφορες ποσοστώσεις (0, 2, 4, 6, 8, 10% κ.β. περιεχόμενο σε ίνες άνθρακα) και ύστερα διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων δοκιμίων μέσω πειραμάτων εφελκυσμού και κάμψης. Στα πειράματα αυτά παρατηρήθηκε πως η ενσωμάτωση ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα PA12 οδήγησε σε ιδιαίτερη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής καθώς και του μέτρου ελαστικότητας των σύνθετων δοκιμίων σε σύγκριση με το PA12 χωρίς κάποια προσθήκη, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.

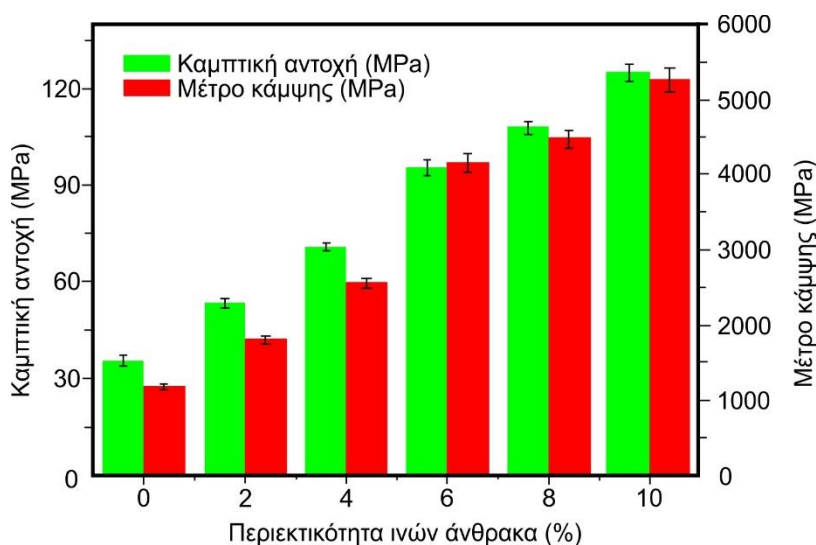


Σχήμα 2.14: Εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σύνθετων δοκιμίων PA12/CF.

Συγκεκριμένα, η μίξη της πολυμερικής μήτρας PA12 με 10% κ.β. ίνες άνθρακα οδήγησε σε αύξηση της εφελκυστικής αντοχής των σύνθετων δοκιμίων από 46.4MPa σε 93.8MPa, το οποίο αποτυπώνει βελτίωση κατά 102.2%. Όπως και στην εφελκυστική αντοχή έτσι και στο μέτρο ελαστικότητας παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση με την πρόσμιξη ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα, συγκεκριμένα από 978.8MPa σε 3581.1MPa. Αντιθέτως, η επιμήκυνση κατά τη θραύση παρουσίασε απότομη πτώση και συγκεκριμένα από 192.1% σε 8.1% κατόπιν προσθήκης ινών άνθρακα.

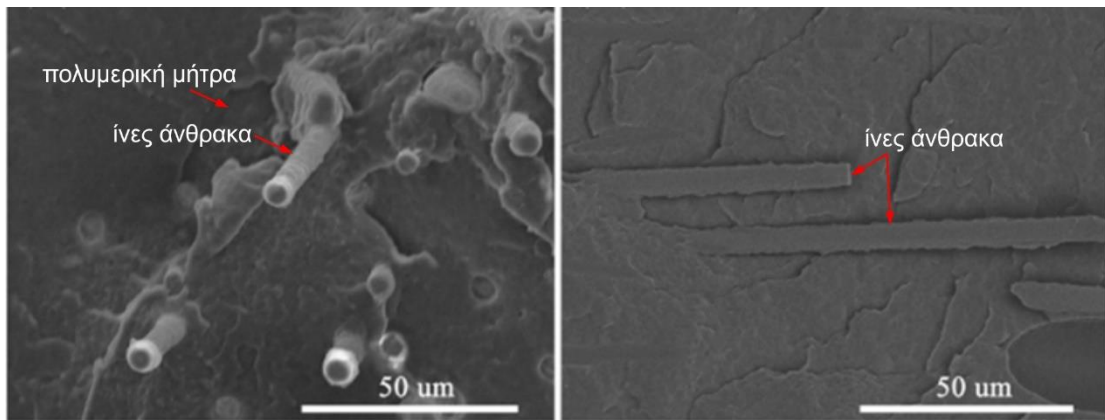
Στην ίδια εργασία παρουσιάζονται οι καμπτικές ιδιότητες των σύνθετων εξεταζόμενων δοκιμίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η προσθήκη ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα βελτίωσε σημαντικά την καμπτική αντοχή καθώς και το μέτρο κάμψης των σύνθετων δοκιμίων. Με την προσθήκη 10% κ.β. ίνες άνθρακα στην πολυμερική μήτρα παρατηρήθηκε αύξηση της καμπτικής αντοχής και του μέτρου κάμψεως από 35.6MPa σε 124.9MPa και 1178.75MPa σε 5257.6MPa, αντίστοιχα.

Ύστερα από προσθήκη 2, 4, 6, 8, 10% κ.β. ίνες άνθρακα στην πολυμερική μήτρα, παρατηρήθηκε αύξηση της καμπτικής αντοχής των δοκιμίων ίση με 50.0%, 98.7%, 168.4%, 203.1% και 251.1% σε σύγκριση με τα δοκίμια από απλό PA12, αντίστοιχα. Επίσης, το μέτρο κάμψης αυξήθηκε κατά 53.0%, 116.7%, 252.7%, 278.9% και 346.0%, αντίστοιχα. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν πως οι ίνες άνθρακα ενισχύουν αποτελεσματικά την πολυμερική μήτρα PA12, λόγω της ομοιογενούς διασποράς και της καλής ένωσης μεταξύ μήτρας και συστατικού ενίσχυσης.



Σχήμα 2.15: Μέτρο κάμψης και καμπτική αντοχή σύνθετων δοκιμίων PA12/CF.

Τέλος, η επιφάνεια θραύσης των σύνθετων δοκιμίων εξετάστηκε μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), προκειμένου να γίνει κατανοητή η επίδραση του συστατικού ενίσχυσης στα σύνθετα δοκίμια πολυμερικής μήτρας PA12 ενισχυμένης με ίνες άνθρακα. Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η δομή και η μορφολογία των σύνθετων δοκιμίων. Οι μικρογραφίες SEM έδειξαν πως οι ίνες άνθρακα είναι ενσωματωμένες στο πολυμερές και καλύπτονται από τη μήτρα, διευκολύνοντας τον επαρκή μετασχηματισμό της φόρτισης στις ίνες άνθρακα καθώς και την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 2.16: Μικρογραφίες SEM της ένωσης μεταξύ της πολυμερικής μήτρας PA12 και ινών άνθρακα.

Ο G. Mansour και άλλοι [30] μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες και συγκεκριμένα τη σκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας υβριδικών νανοσωληνών άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος και νανοςύνθετων εποξειδικού πυριτίου με διαφορετικές ποσοστώσεις μέσω της τεχνικής νανοδιείσδυσης. Τα αποτελέσματα της νανοδιείσδυσης φανέρωσαν πως η σκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας των νανοςύνθετων αυξάνεται σταθερά στην περίπτωση χρήσης μόνο των νανοσωληνών άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος (MWCNTs) ως ενίσχυση, ωστόσο υπάρχει μείωση όταν χρησιμοποιούνται σωματίδια καπνοπυριτίας (fumed silica) μόνα τους ή ως υβρίδια και από τα δύο υλικά. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ικανότητα της τεχνικής νανοδιείσδυσης για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς νανοςύνθετων πολυμερών με χρήση μικρών ποσοτήτων δείγματος.

Επίσης, ο G. Mansour και άλλοι [31] ερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες και συγκεκριμένα τη σκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας των νανοςύνθετων υλικών MWCNT/epoxy μέσω χρήσης της τεχνικής νανοδιείσδυσης. Τα αποτελέσματα νανοδιείσδυσης έδειξαν πως η σκληρότητα καθώς και το μέτρο ελαστικότητας των νανοςύνθετων εμφάνισαν αύξηση με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις MWCNT. Ακόμη, τα αποτελέσματα επαλήθευσαν την ικανότητα της τεχνικής νανοδιείσδυσης για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς νανοςύνθετων πολυμερών με χρήση μικρών ποσοτήτων δείγματος.

Εν συνεχεία ο Tzetzis και άλλοι [32] διερεύνησαν τη μηχανική συμπεριφορά δοκιμών με διάφορες ποσοστώσεις καπνοπυριτίας (fumed silica) χρησιμοποιώντας μία χαμηλού ιξώδους υγρή εποξειδική ρητίνη ως μήτρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η σκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας των νανοςύνθετων μειώνεται σταθερά με την αύξηση του περιεχομένου καπνοπυριτίας, το οποίο αποδίδεται στην έντονη τάση για σχηματισμό συσσωματωμάτων, όπως μελετήθηκε από οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Οι αποκλίσεις στο μέτρο ελαστικότητας, όπως μετρήθηκε μέσω χρήσης της τεχνικής νανοδιείσδυσης, φανέρωσαν μικρές διαφορές από τα δεδομένα της δοκιμής εφελκυσμού. Τέλος, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η τεχνική νανοδιείσδυσης αποτελεί μια αποτελεσματική μηχανική μέθοδος για τα εποξειδικά νανοςύνθετα.

Ακόμη, ο Briscoe και άλλοι [33] πραγματοποίησαν πειράματα νανοδιείσδυσης σε μια σειρά από πολυμερικές επιφάνειες (PMMA, PS, PC και UHMWPE) σε μικρο και νάνο βάθη διείσδυσης, με σκοπό τον υπολογισμό της σκληρότητας και του μέτρου ελαστικότητας των υλικών αυτών. Στη μελέτη αυτή γίνεται εκτενής αναφορά στην εξάρτηση του επιβαλλόμενου βάθους διείσδυσης, του μέγιστου φορτίου και του ποσοστού παραμόρφωσης στις τιμές της σκληρότητας και του μέτρου ελαστικότητας για τις εξεταζόμενες πολυμερικές επιφάνειες. Τα

τυπικά βάθη διείσδυσης κυμαίνονται περίπου από 10nm έως 10μm καθώς επίσης οι επιβαλλόμενες φορτίσεις είναι μικρότερες από 300mN. Ακολουθως, η εργασία περιλαμβάνει θεωρήσεις πρακτικής φύσεως που σχεδιάζονται για να ξεπεραστούν ορισμένοι εγγενείς περιορισμοί αυτής της τεχνικής όταν χρησιμοποιείται για πολυμερικές επιφάνειες, ειδικά για το φαινόμενο ερπυσμού το οποίο μπορεί να παρατηρηθεί στα αρχικά πειραματικά τμήματα εκφόρτισης. Επιπλέον, στο τέλος της εργασίας εξετάζεται η καταλληλότητα της χρήσης ακίδας βαθμονόμησης κατασκευασμένης από σκληρά υποστρώματα κατά τη διείσδυση πολυμερών.

Ο Tzetzis και άλλοι [34] ανέπτυξαν μια σειρά από νανοσύνθετα με εποξειδική ρητίνη βασιζόμενα από νανοπυρίτιο και SP115 εποξειδική ρητίνη. Οι μικρογραφίες SEM φανέρωσαν σύνθετα με καλή διασπορά του νανοπυριτίου, χωρίς τη δημιουργία συσσωματώματων. Η μηχανική απόδοση των νανοσύνθετων αξιολογήθηκε μέσω στατικών μονοαξονικών εφελκυστικών δοκιμών. Τα νανοσύνθετα πυριτίου προσέφεραν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και στιβαρότητα σε σχέση με την απλή εποξειδική ρητίνη.

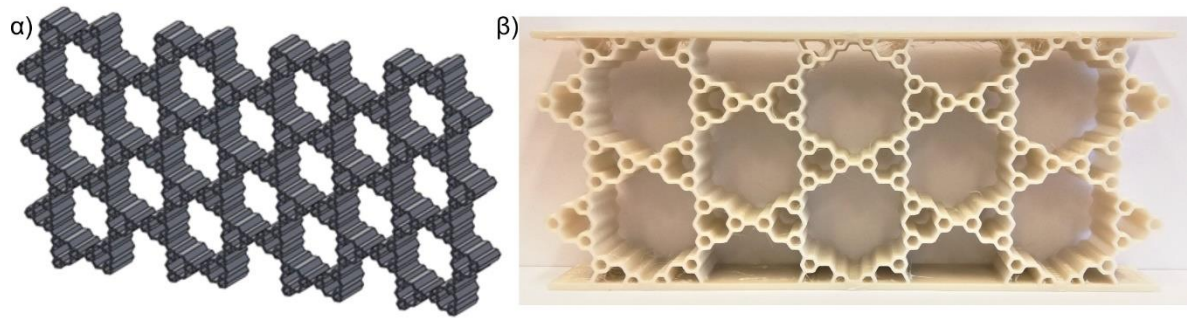
Επίσης, παρουσιάζεται μια διαδικασία εξαγωγής των βασικών νόμων των νανοσύνθετων υλικών με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διείσδυσης με σφαιρική ακίδα, μέσω μιας αναπτυγμένης προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) της εισχώρησης του διεισδυτή σε ένα δείγμα. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί τα αποτελέσματα της σφαιρικής διείσδυσης ως δεδομένα εισόδου στο περιγραφόμενο μοντέλο και εξάγει τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των νανοσύνθετων πυριτίου. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιολόγησης αποτελεσμάτων δοκιμής νανοδιείσδυσης αποτελεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική διαδικασία για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης των νανοσύνθετων υλικών πυριτίου. Το προβλεπόμενο μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιώντας την προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τα ημι-εμπειρικά μοντέλα των Halpin-Tsai και Lewis-Nielsen έδειξε να συμφωνεί με τις πειραματικές τιμές.

2.8 Ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές

Η προσθετική μηχανική βρίσκεται στο προσκήνιο πολλών ερευνητικών δραστηριοτήτων παγκοσμίως και αυτό διότι η εμπορική αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας πρόκειται να αντικαταστήσει αρκετές παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, είναι ευρέως αποδεκτό ότι τα πλέον διαθέσιμα υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση έχουν περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία εκτυπώσιμων υλικών για σύνθετες εφαρμογές με υψηλή απόδοση [3, 35-40]. Για το λόγο αυτόν τα σύνθετα υλικά έχουν θεωρηθεί ως πολλά υποσχόμενα υλικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση, λόγω μηχανικών ιδιοτήτων, μικρού βάρους και ευελιξίας [3, 40-46].

Ο συνδυασμός τέτοιων προηγμένων υλικών με τις κυψελοειδείς δομές, είναι δυνατό να δημιουργήσει ελαφρύτερες και ταυτόχρονα μεγαλύτερες σε αντοχή κατασκευές, πιθανώς με ικανότητα απορρόφησης υψηλών επιπέδων ενέργειας καθώς και υψηλή αξιοπιστία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17.

Επιπροσθέτως, ο συνδυασμός των σύνθετων υλικών με τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει την κατασκευή καινοτόμων δομών με προηγμένα χαρακτηριστικά σχεδίασης βασιζόμενα στις ιεραρχικές δομές. Είναι αρκετά σύνθητες να απαντώνται στη φύση δομικά στοιχεία με εντυπωσιακά σχέδια, συνήθως οργανωμένα ιεραρχικά στην κλίμακα του νανόμετρου έως και τη μακροκλίμακα. Αυτές οι κατασκευές παρουσιάζουν συνήθως πολύπλοκη ιεραρχική τάξη και κάθε επίπεδο ιεραρχίας συμβάλλει στη μηχανική σταθερότητα και ανθεκτικότητα του τελικού σχεδίου [46-52].



Σχήμα 2.17: Κυψελοειδής δομή 2^{ης} τάξης α) σε σύστημα CAD και β) εκτυπωμένη.

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που επιβεβαιώνουν τη μεγάλη σημασία και ανάγκη της ιεραρχίας, όπως για παράδειγμα από τα πολυμερή με μικρό και νάνο επίπεδα ιεραρχικών δομών σε πλάκες sandwich με αφρούς ή σύνθετες δομές πλέγματος ως πυρήνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μια ιεραρχική δομή μπορεί να παρέχει εξαιρετικές προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, τα διάφορα μήκη κυψελοειδών μονάδων και τα επίπεδα ιεραρχίας ελέγχουν τη μηχανική απόδοση αυτών των κυψελοειδών δομών. Η αύξηση των επιπέδων της ιεραρχίας οδηγεί σε δομές με βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά ενώ παραμένουν ελαφρές [46-57].

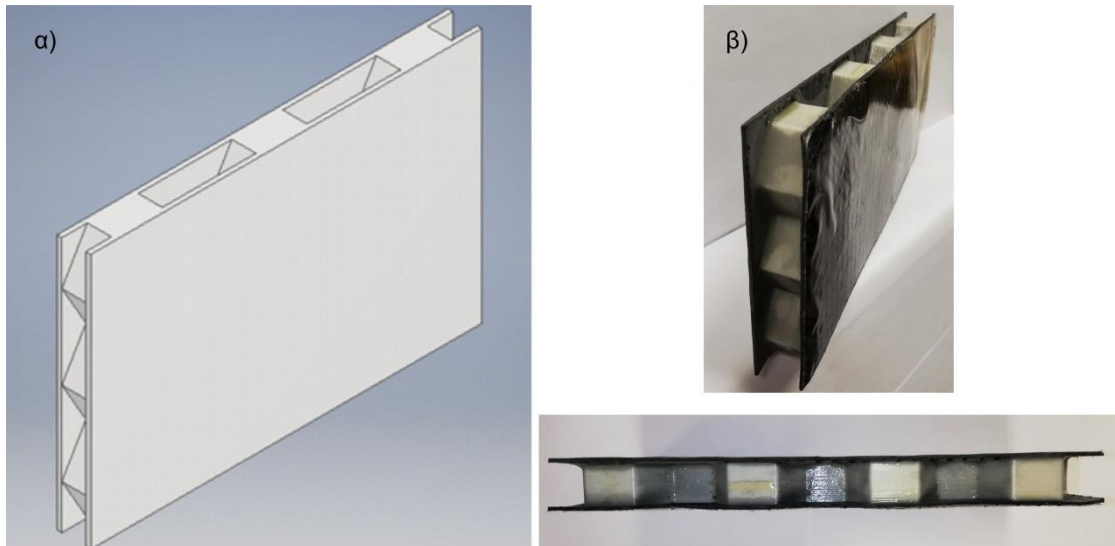
Η καμπτική παραμόρφωση των κυψελοειδών τοιχωμάτων και η σχετική πυκνότητα των κυψελών επηρεάζουν σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή αυτών των κυψελοειδών δομών. Για τέτοιες δομές και υπό ομοιόμορφη εγκάρσια φόρτιση, η μέγιστη ροπή κάμψης σε κάθε κυψελοειδές τοίχωμα εμφανίζεται στις κορυφές της κυψέλης (δηλαδή στις γωνίες του κυψελοειδούς τοιχώματος). Επομένως, η μετατόπιση υλικού από το μεσαίο τμήμα κάθε κυψελοειδούς τοιχώματος πιο κοντά στις κορυφές μπορεί δυνητικά να ενισχύσει την εγκάρσια ανθεκτικότητα και αντοχή [46-63].

Τέλος, οι ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική βιομηχανία, η αρχιτεκτονική, η βιοϊατρική και συγκεκριμένα σε αρκετές εφαρμογές όπως δομική προστασία, απορρόφηση ενέργειας από κρούση, θερμομόνωση, καθώς και ως πυρήνες ελαφρών πάνελ sandwich.

2.9 Δομές sandwich

Οι δομές sandwich χρησιμοποιούνται ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται συνδυασμός υψηλής στιβαρότητας και μικρού βάρους κατασκευής. Αποτελούνται από δύο εξωτερικές λεπτές στρώσεις μεγάλης αντοχής που περιέχουν ενδιάμεσα ένα ελαφρύ υλικό (πυρήνας) και συνδέονται με αυτόν μέσω συγκολλητικού υλικού, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18.

Οι εξωτερικές στρώσεις παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται είναι συνήθως κράματα αλουμινίου και τιτανίου και πολυμερή ενισχυμένα με ίνες. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα υλικών από τα οποία αποτελούνται οι πυρήνες είναι τα αφρώδη πολυμερή (κυρίως πολυουρεθάνες) και κυψελοειδείς κατασκευές (λεπτό φύλλο διαμορφωμένο σε διαδοχικά εξαγωνικά πρίσματα) από μέταλλα ή ενισχυμένα πολυμερή, που ανθίστανται σε διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται στη δομή sandwich. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένας κυψελοειδής πυρήνας ο οποίος μπορεί να είναι γεμάτος με αφρώδες υλικό ή με πολυμερές ενισχυμένο με ίνες γυαλιού για εξαιρετική απορρόφηση κραδασμών και ήχου [63-68].



Σχήμα 2.18: Sandwich κατασκευή με κυψελοειδή πυρήνα μηδενικής ιεραρχίας α) σε σύστημα CAD και β) εκτυπωμένη.

Οι δομές sandwich εκτός του ότι αποτελούν ελαφριές κατασκευαστικές δομές με υψηλή τιμή του λόγου αντοχή/βάρος, εξασφαλίζουν επίσης θερμική και ηχητική μόνωση. Όπως γίνεται κατανοητό, οι δομές sandwich έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής αλλά αποτελούν μια ιδιαίτερη κατασκευαστική λύση η οποία προσφέρει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες καθώς και χαμηλό βάρος για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέλος, ως πυρήνες χρησιμοποιούνται συνήθως πολυμερή ενισχυμένα με ίνες ή σωματίδια, σκληρά αφρώδη πολυμερή, μέταλλα, υαλοβάμβακας ή πετροβάμβακας διαποτισμένος με πολυμερική ρητίνη κ.α. [6, 63-68].

2.10 Προγενέστερη έρευνα στις ιεραρχικές δομές sandwich

Ο Ajdari και άλλοι [57] μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών και συγκεκριμένα της κανονικής εξαγωνικής δομής (μηδενική ιεραρχία), της πρώτης ιεραρχίας καθώς και της δεύτερης ιεραρχίας, με την ίδια σχετική πυκνότητα. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους έδειξαν πως οι κυψελοειδείς δομές πρώτης ιεραρχίας και δεύτερης ιεραρχίας παρουσίασαν έως 2 και 3.5 φορές μεγαλύτερη στιβαρότητα αντίστοιχα, σε σχέση με την κανονική εξαγωνική δομή με την ίδια μάζα (ίδια συνολική μέση πυκνότητα).

Το 1965 ο Allen [69] παρείχε μια περιεκτική ανασκόπηση στις κατασκευές sandwich και πρότεινε μια κλασσική μέθοδο θεωρητικής ανάλυσης, η οποία προώθησε σε μεγάλο βαθμό τις εφαρμογές των δομών sandwich. Ο Mozafari και άλλοι [70, 71] μελέτησαν τη θλιπτική συμπεριφορά κυψελοειδών δομών από αλουμίνιο με αφρό ως πυρήνα και κατόπιν αξιολόγησης των αποτελεσμάτων παρατήρησαν αρκετά μεγαλύτερη στιβαρότητα συγκριτικά με τις απλές κυψελοειδείς δομές. Επιπροσθέτως, ο Paik και άλλοι [72] ερεύνησαν τη μέγιστη αντοχή των κυψελοειδών δομών τύπου sandwich από αλουμίνιο με διαφορετικά πάχη κυλεψών καθώς και διαφορετικά ύψη πυρήνα μέσω πειραμάτων κάμψης τριών σημείων και θλίψης.

Ο Song και άλλοι [73] πρότειναν έναν νέο τύπο δομής sandwich. Συγκεκριμένα, η sandwich κυψελοειδή δομή Kagome παρουσιάζει ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή, στιβαρότητα, εύκολη επεξεργασία και χαμηλό κόστος παράλληλα όμως εμφανίζει ένα σημαντικό ελάττωμα το οποίο είναι η ευκολία αποκόλλησης μεταξύ των εξωτερικών φύλλων και του πυρήνα καθώς και οι αδύναμες άκρες οι οποίες μειώνουν σημαντικά την αντοχή και τη στιβαρότητα της δομής. Η καινοτόμος πρόταση της συγκεκριμένης έρευνας είναι το γέμισμα των υψηλής αντοχής-

στιβαρότητας PMI αφρών μέσα στη σύνθετη κυψελοειδή δομή Kagome με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου τύπου δομής sandwich. Η προτεινόμενη δομή (PKCSS) συγκρίθηκε με την PMI sandwich δομή και τη δομή sandwich Kagome μέσω πειραμάτων θλίψης και κάμψης τριών σημείων. Επιπροσθέτως, η θλιπτική και καμπτική συμπεριφορά της προτεινόμενης δομής εξετάστηκε πειραματικά αλλά και θεωρητικά μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

Τα αποτελέσματα φανέρωσαν πως η προτεινόμενη δομή sandwich βελτίωσε ιδιαιτέρως τη συνολική αντοχή και τη στιβαρότητα συγκριτικά με τις δύο άλλες δομές sandwich, με μια μικρή αύξηση του βάρους. Συγκεκριμένα, η θλιπτική αντοχή για την προτεινόμενη δομή sandwich ήταν 420MPa εν αντιθέσει με 197MPa της δομής sandwich Kagome και 203MPa της δομής PMI sandwich. Επίσης, η διατμητική αντοχή του πυρήνα για την προτεινόμενη δομή sandwich υπολογίστηκε 5.9MPa ενώ αντίστοιχα της δομής sandwich Kagome 2.6MPa και 2.9MPa της δομής PMI sandwich. Ακόμη, οι περιορισμοί των αδύναμων άκρων της κυψελοειδούς δομής Kagome ξεπεράστηκαν αποτελεσματικά. Η προτεινόμενη δομή έδειξε επίσης σημαντικά ενισχυμένη ικανότητα κατά της αποκόλλησης.

Ο Tao και άλλοι [74] κατασκεύασαν τετραγωνικές ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές (Square Hierarchical Honeycombs) χρησιμοποιώντας έναν εμπορικό τρισδιάστατο εκτυπωτή και στη συνέχεια μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων δομών. Οι τετραγωνικές ιεραρχικές δομές κατασκευάστηκαν αντικαθιστώντας κάθε κυψελοειδές τοίχωμα μιας κανονικής τετραγωνικής κυψελοειδούς δομής (Regular Square Honeycomb) με διαφορετικούς αριθμούς μικρότερων τετραγωνικών δομών. Τα αποτελέσματα φανέρωσαν αυξημένη θλιπτική αντοχή για τις τετραγωνικές ιεραρχικές δομές συγκριτικά με τις κανονικές τετραγωνικές δομές της ίδιας μάζας.

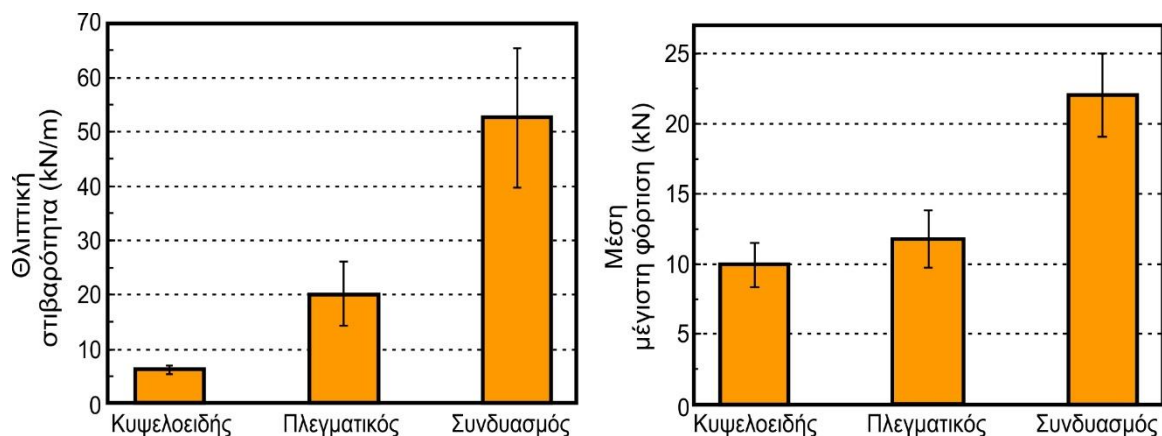
Ο Chen και άλλοι [75] μελέτησαν μια ομάδα ιεραρχικών μεταλλικών δομών η οποία κατασκευάστηκε με την αντικατάσταση των κυψελοειδών τοιχωμάτων των κανονικών κυψελοειδών δομών με εξαγωνικά, Kagome και τριγωνικά πλέγματα αντίστοιχα. Οι δομές Kagome και οι τριγωνικές ιεραρχικές δομές έδειξαν ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες και συγκεκριμένα αυξημένη στιβαρότητα και αντοχή συγκριτικά με τις κανονικές κυψελοειδείς δομές. Η ανάλυση που πραγματοποιήσαν αποκάλυψε πως οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών αποδίδεται στην εισαγωγή της δομικής ιεραρχίας.

Ο Harizi και άλλοι [76] διερεύνησαν την καμπτική συμπεριφορά διαφόρων σύνθετων θερμοπλαστικών δομών sandwich ενισχυμένων με ίνες άνθρακα μέσω δοκιμών κάμψης τριών σημείων. Τα εξωτερικά φύλλα (skins) κατασκευάστηκαν από θερμοπλαστική Polyphenylsulfone (PPSU) ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Επίσης, διαφορετικά υλικά πυρήνα (Nomex, Αλουμίνιο και Polyetherimide PEI) με διαφορετικά τοπολογικά χαρακτηριστικά (honeycomb, straight tubular και inclined tubular at 15°) και δύο διαφορετικές πυκνότητες (48 και 64kg/m³) χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εξεταζόμενων δομών sandwich. Τα αποτελέσματα φανέρωσαν πως η δομή sandwich με πυρήνα από αλουμίνιο παρουσίασε την υψηλότερη στιβαρότητα συγκριτικά με τις άλλες εξεταζόμενες δομές sandwich. Ωστόσο, οι θερμοπλαστικές δομές sandwich με πυρήνα από PEI παρουσίασαν τη μεγαλύτερη πλαστικότητα.

Ο Sun και άλλοι [77] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες δομών sandwich με κυψελοειδή πυρήνα από αλουμίνιο μέσω πειραμάτων θλίψης και κάμψης τριών σημείων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως η θραύση και η αξιοπιστία των δομών sandwich επηρεάστηκε σημαντικά από τις δομικές παραμέτρους υπό τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Επίσης διαπίστωσαν ότι η θλιπτική συμπεριφορά μπορεί να επηρεαστεί από τις δομικές παραμέτρους καθώς και τις παραμέτρους κόλλησης στη δοκιμή θλίψης. Με βάση τα πειραματικά

αποτελέσματα, έγινε καθορισμός θεωρητικών λύσεων για το πείραμα κάμψης τριών σημείων με σκοπό την πρόβλεψη της μέγιστης φόρτισης, της απορρόφησης ενέργειας και του τρόπου θραύσης.

Ο Sun και άλλοι [78] μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά τριών δομών sandwich με εξωτερικά φύλλα ενισχυμένα με ανθρακονήματα. Συγκεκριμένα, οι τρεις δομές sandwich που εξετάστηκαν ήταν αρχικά η δομή sandwich με κυψελοειδή πυρήνα, ακολούθως η δομή sandwich με πλεγματοειδή πυρήνα και τέλος η δομή sandwich με συνδυασμό κυψελοειδούς και πλεγματοειδούς πυρήνα. Ο κυψελοειδής και ο πλεγματοειδής πυρήνας των εξεταζόμενων δομών sandwich ήταν από αλουμίνιο. Τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως τα δοκίμια sandwich με συνδυασμό κυψελοειδούς και πλεγματοειδούς πυρήνα παρουσίασαν υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, τα οποία αποτελούν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά για ποικίλες εφαρμογές στον τομέα της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και σε άλλους τομείς που κρίνεται απαραίτητη η χρήση ελαφρών κατασκευών με ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες, όπως παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.19](#).



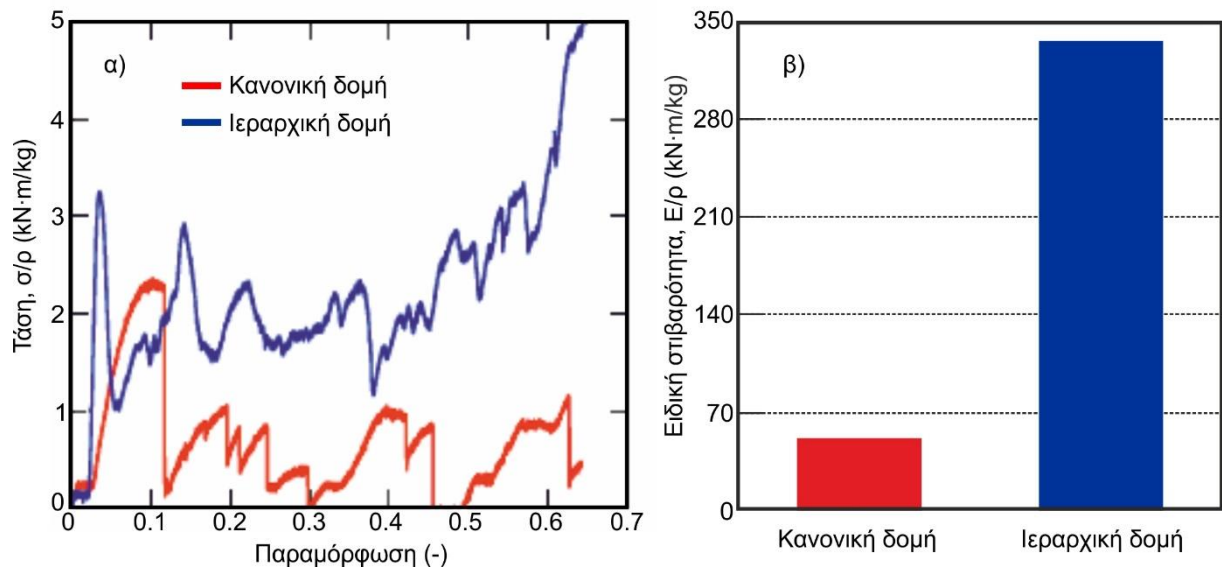
Σχήμα 2.19: Μέση τιμή μηχανικών ιδιοτήτων εξεταζόμενων δομών sandwich.

Επίσης, τα αποτελέσματα της έρευνας του Zhi Sun και άλλων φανέρωσαν πως η αλληλεπίδραση μεταξύ κυψελοειδούς και πλεγματοειδούς πυρήνα παρείχε υψηλή αντοχή σε φθορές σε σχέση με τον μονό πυρήνα. Ο συνδυασμός κυψελοειδούς και πλεγματοειδούς πυρήνα απέτρεψε τόσο τη διεπιφανειακή αποκόλληση όσο και την τοπική κάμψη του πυρήνα. Στη συνέχεια προτάθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου κάμψης των δομών sandwich με συνδυασμό κυψελοειδούς και πλεγματοειδούς πυρήνα. Τέλος, τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας, έδειξαν πως η δομή sandwich με συνδυασμό κυψελοειδούς και πλεγματοειδούς πυρήνα μπορεί να προσφέρει βελτιωμένες δομικές ιδιότητες για διάφορες μηχανολογικές κατασκευές.

Ο Chen και άλλοι [79] σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια νέα τάξη ιεραρχικών κυψελοειδών δομών μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η θλιπτική συμπεριφορά της νέας τάξης ιεραρχικών κυψελοειδών δομών, η οποία δημιουργήθηκε κατόπιν αντικατάστασης των κυψελοειδών τοιχωμάτων της κανονικής κυψελοειδούς δομής με τριγωνικά πλέγματα.

Οι προτεινόμενες ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές παρουσίασαν ιδιαίτερα αυξημένη στιβαρότητα καθώς και βελτιωμένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας υπό μονοαξονική θλίψη, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.20](#). Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως η στιβαρότητα των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών είναι 6.6 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της κανονικής κυψελοειδούς δομής, για την ίδια σχετική πυκνότητα ($\rho/\rho_s=0.16$) και στις δύο περιπτώσεις. Η

ιδιαίτερα βελτιωμένη στιβαρότητα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών σχετίζεται με την εισαγωγή της εσωτερικής τριγωνικής πλεγματοειδούς δομής στην κανονική κυψελοειδή δομή. Επιπροσθέτως, στις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές παρατηρήθηκε υψηλή ενεργειακή διασπορά και ακεραιότητα σχήματος σε μεγάλες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις (έως και 60%) υπό κυκλική φόρτιση.



Σχήμα 2.20: α) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για την κανονική και ιεραρχική δομή και β) σύγκριση ειδικής στιβαρότητας για την κανονική και ιεραρχική δομή.

Επίσης, ο Qiao και άλλοι [80] διερεύνησαν τη μονοαξονική θλιπτική συμπεριφορά μιας ιεραρχικής κυψελοειδούς δομής δεύτερης τάξης (δηλαδή μιας κανονικής εξαγωνικής κυψελοειδούς δομής με τα κυψελοειδή τοιχώματά της να αποτελούνται από μια ισόπλευρη τριγωνική κυψελοειδή δομή). Οι τρόποι αστοχίας για στατική θλίψη και δυναμική κρούση σε δύο κατευθύνσεις μελετήθηκαν συστηματικά με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Προτάθηκε μια μέθοδος διπλής κλίμακας και λήφθηκαν αναλυτικές εκφράσεις για τις στατικές θλιπτικές τάσεις της ιεραρχικής κυψελοειδούς δομής στις δύο κατευθύνσεις. Οι θεωρητικές τάσεις θλίψης που ελήφθησαν, αξιολογήθηκαν με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων για ένα ευρύ φάσμα κρουστικών ταχυτήτων και σχετικής πυκνότητας. Τόσο τα αριθμητικά όσο και τα αναλυτικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η ιεραρχική κυψελοειδή δομή έχει βελτιωμένη τάση σε σχέση με τις παραδοσιακές εξαγωνικές και τριγωνικές κυψελοειδείς δομές. Η βελτίωση βρέθηκε ότι είναι πιο έντονη για κρούση χαμηλής ταχύτητας, παρά για κρούση υψηλής ταχύτητας.

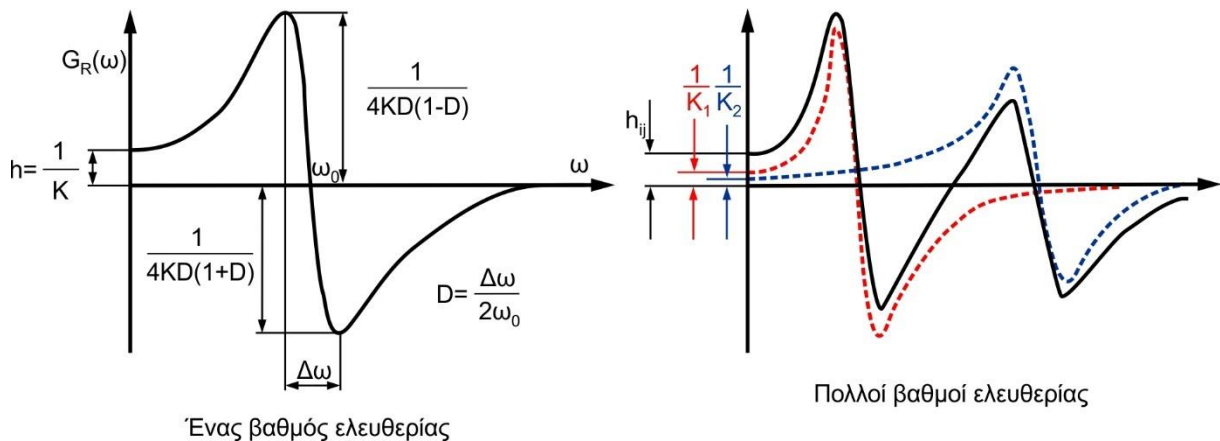
Ο Giglio και άλλοι [81] παρουσίασαν μια πειραματική-αριθμητική μεθοδολογία για τη διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς (δοκιμή κάμψης τριών σημείων) των sandwich πάνελ με εξωτερικά φύλλα από αλουμίνιο καθώς και Nomex™ κυψελοειδή πυρήνα. Ακολουθώντας, κατασκεύασαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας δεδομένα τα οποία αποκτήθηκαν από τα πειράματα θλίψης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην επαλήθευση του ακριβούς μοντέλου της κρουστικής συμπεριφοράς του πυρήνα κατά τη διάρκεια του τελευταίου τμήματος από τη δοκιμή κάμψης. Τέλος, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα. Αυτή η σύγκριση δεν βασίστηκε μόνο σε μια καμπύλη φόρτισης-μετατόπισης, αλλά σε περαιτέρω σύγκριση μέσω εικόνων καθ' όλη τη διαδικασία φόρτισης.

2.11 Αναλυτικός-πειραματικός προσδιορισμός ταλαντωτικών μεγεθών των κατασκευών

Οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές είναι βασικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής για τον προσδιορισμό συχνοτήτων διέγερσης όπου παρατηρείται συντονισμός καθώς επίσης και η παραμόρφωση της κατασκευής σε αυτές τις συχνότητες. Για την επιβεβαίωση της ακρίβειας και την διόρθωση τυχόν αποκλίσεων έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα τα οποία ταυτίζονται με τις πειραματικές μετρήσεις και οδηγούν στην ανάπτυξη ενός θεωρητικού μοντέλου που περιγράφει τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος [82, 83].

Για να επιτευχθεί αυτή η ανάλυση των ιδιομορφών για πολλούς βαθμούς ελευθερίας χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες για την αποσύμπλεξη των εξισώσεων του συστήματος. Μία απ' αυτές τις μεθοδολογίες είναι η μεθοδολογία κατά Duncan. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται επίσης και κατά την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών με τη βοήθεια μετρήσεων, καθ' όσον μέσω της αποσύμπλεξης των εξισώσεων της δυναμικής ισορροπίας, παρέχεται η δυνατότητα του πειραματικού προσδιορισμού ορισμένων αγνώστων μεγεθών, όπως π.χ. των αποσβέσεων του υλικού που υπεισέρχονται στις εξισώσεις αυτές. Ο προσδιορισμός τέτοιων σχέσεων προσδίδει σημαντικές πληροφορίες για τις ταλαντωτικές ιδιότητες ενός εξεταζόμενου συστήματος-κατασκευής με προκαθορισμένες απαιτήσεις [84].

Για πολυβάθμια συστήματα αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες από τον Plusty [85] που βασίζονται αφενός στον προσδιορισμό μέσω μετρήσεων των δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών, όπως το μητρώο μετάδοσης και αφ' ετέρου στον προσδιορισμό των μητρώων που τις περιγράφουν, όπως τα μητρώα αδράνειας, στιβαρότητας και απόσβεσης. Στο σχήμα 2.21 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μετάδοσης για έναν και πολλούς βαθμούς ελευθερίας αντίστοιχα. Από τις αρχικές τιμές της συνάρτησης μετάδοσης υπολογίζεται η στιβαρότητα και η απόσβεση του συστήματος μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

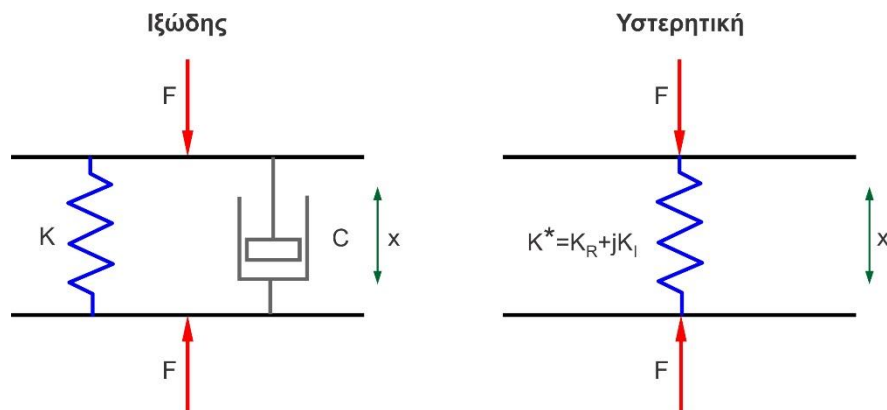


Σχήμα 2.21: Πραγματικό μέρος της συνάρτησης μετάδοσης $G_R(\omega)$, όπου K στιβαρότητα, ω ιδιοσυχνότητα και D απόσβεση.

Η πειραματική ιδιομορφική ανάλυση (Modal Analysis) αποτελεί αναπόσπαστο μέρος για τον ενδελεχή προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής. Η υπολογιστική "Modal Analysis" προσφέρει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνονται υπόψη ποσοτικά αποτελέσματα κατασκευαστικών αλλαγών στη μηχανική δομή κατά τη διάρκεια της φάσης κατασκευής. Η πειραματική "Modal Analysis", απεναντίας ξεχωρίζει μέσω της δυνατότητας που προσφέρει, να καθορίζεται γρήγορα και αξιόπιστα η πραγματική δυναμική κατάσταση ενός συστήματος και προπαντός όταν στις μετρήσεις παρεμβάλλονται ψηφιακοί αναλυτές Fourier.

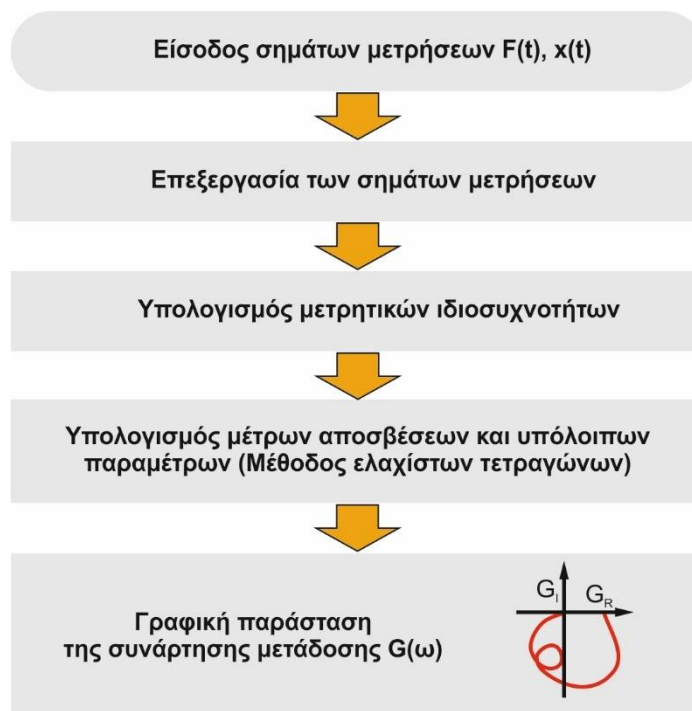
Για τον αναλυτικό υπολογισμό της ταλαντωτικής συμπεριφοράς συστημάτων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι [86] που σχετίζονται με τις συναρτήσεις μετάδοσης. Με αυτές είναι δυνατόν να καθορισθεί η απόκριση ενός συστήματος σε αρμονικές δυνάμεις διέγερσης και να περιγραφεί συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης. Αυτές οι μεθοδολογίες προσδιορίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις ταλαντωτικές παραμέτρους αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι είναι αρκετά χρονοβόρες.

Σύγχρονες μελέτες περιγράφουν την αποσβεστική ικανότητα των υλικών χρησιμοποιώντας σύγχρονα όργανα μέτρησης. Ειδικά τα βισκοελαστικά υλικά τα οποία μελετώνται στην παρούσα διατριβή περιγράφονται από μοντέλα ιξώδους απόσβεσης και υστερητικής απόσβεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22: Κινηματικά μοντέλα ιξώδους και υστερητικής απόσβεσης.

Σύμφωνα με τον Kuster η απόσβεση των υλικών αναλύεται σε βίσκο και υστερική απόσβεση [87]. Τα δυο είδη απόσβεσης απομονώνονται και μετριοούνται εύκολα. Αυτή η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε γραμμικά μοντέλα. Η διαδικασία βελτίωσης-προσέγγισης των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου μιας κατασκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 2.23. Η παραπάνω διαδικασία έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό των μητρώων μετάδοσης μιας κατασκευής [88].



Σχήμα 2.23: Προσδιορισμός συνάρτησης μετάδοσης.

2.12 Αναλυτική περιγραφή συνάρτησης μετάδοσης

Η γραμμική δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση που περιγράφει έναν βαθμό ελευθερίας ενός συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω [82]:

$$m\ddot{x} + c_k\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.1)$$

όπου: m η μάζα της κατασκευής,
 c_k ο συντελεστής απόσβεσης,
 k ο συντελεστής στιβαρότητας,
 $F(t)$ η εξωτερική φόρτιση

Η ομογενής εξίσωση (2.1) μετασχηματίζεται διαιρώντας τα μέλη της με τη μάζα m προκειμένου να πάρει την παρακάτω μορφή:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2.2)$$

όπου: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ιδιοσυχνότητα,
 $\zeta = \frac{c_k}{2\sqrt{k \cdot m}}$ μέτρο απόσβεσης

Η μερική λύση επαληθεύει την εξίσωση κίνησης (2.1) και αντιστοιχεί στην απόκριση της μόνιμης κατάστασης. Η διαφορά φάσης φ που προκύπτει από τη μερική λύση της εξίσωσης (2.2) οφείλεται στην απόσβεση του συστήματος [83].

Οι μετασχηματισμένες μιγαδικές σχέσεις της δύναμης και της μετατόπισης κατά Euler προκύπτουν:

$$e^{\pm i\Omega t} = \cos(\Omega t) \pm i \sin(\Omega t) \quad (2.3)$$

$$F(t) = \hat{F}e^{i\Omega t} \quad (2.4)$$

$$x_{\mu\epsilon\rho}(t) = \hat{x}e^{i(\Omega t - \varphi)} = \hat{x}e^{i\Omega t} \quad (2.5)$$

Διαιρώντας τη σχέση (2.5) προς (2.4) προκύπτει η συνάρτηση μετάδοσης $G(\Omega)$:

$$\frac{\hat{x}}{\hat{F}} = \frac{1}{k - \Omega^2 m + i\Omega c_k} = G(\Omega)$$

Η ταλαντωτική συμπεριφορά συστήματος πολλών βαθμών ελευθερίας, εκφράζεται μέσω της παρακάτω διαφορικής εξίσωσης [82]:

$$M\ddot{\underline{x}} + C\dot{\underline{x}} + K\underline{x} = \underline{F} \quad (2.6)$$

όπου: M το μητρώο μάζας,
 C το μητρώο απόσβεσης,
 K το μητρώο στιβαρότητας,
 \underline{x} διάνυσμα των μετατοπίσεων,
 \underline{F} διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων

Η παρακάτω μητρωϊκή λύση κατά Duncan εισάγεται στο σύστημα εξισώσεων (2.6):

$$M\dot{\underline{x}} - M\dot{\underline{x}} = \underline{0} \quad (2.7)$$

προκύπτει:

$$A\dot{\underline{z}} + B\underline{z} = \underline{F} \quad (2.8)$$

Όπου οι πίνακες A και B είναι της μορφής:

$$A = \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

και τα διανύσματα \underline{z} και \underline{F} έχουν τη μορφή:

$$\underline{z} = \begin{pmatrix} X \\ \dot{X} \end{pmatrix} \quad \text{και} \quad \underline{F} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$(B + \lambda A)\underline{\hat{z}} = 0 \quad (2.11)$$

Το σύστημα (2.11) θα έχει μη μηδενική λύση όταν ισχύει ότι η ορίζουσα $|B + \lambda A| = 0$.

Από την επίλυση της ορίζουσας στη γενική περίπτωση προκύπτουν $2n$ μιγαδικές ιδιοτιμές, οι οποίες είναι ανά δύο συζυγείς μεταξύ τους [88] και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις, όταν έχουμε ασθενή απόσβεση ($\zeta < 1$):

$$\lambda_k = -\delta_k + j\omega_{dk} \quad \text{και} \quad \lambda_k^* = -\delta_k - j\omega_{dk} \quad (2.12)$$

όπου: $k=1, \dots, n$ ο αντίστοιχος βαθμός ελευθερίας,

δ_k και ω_{dk} είναι ο εκθέτης απόσβεσης και η ιδιοσυχνότητα με απόσβεση και εκφράζονται από τη σχέση:

$$\delta_k = \zeta_k \cdot \omega_k \quad \text{και} \quad \omega_{dk} = \omega_k \cdot \sqrt{1 - \zeta_k^2} \quad (2.13)$$

Τα ιδιοδιανύσματα προκύπτουν από τις ιδιομορφές της σχέσης (2.11):

$$\underline{\hat{z}}_k = \begin{bmatrix} z_{k1} \\ \vdots \\ z_{kn} \\ \lambda_k \cdot z_{k1} \\ \vdots \\ \lambda_k \cdot z_{kn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_k \\ \lambda_k \cdot \underline{z}_k \end{bmatrix} \quad (2.14\alpha)$$

$$\underline{\hat{z}}_k^* = \begin{bmatrix} z_{k1}^* \\ \vdots \\ z_{kn}^* \\ \lambda_k^* \cdot z_{k1}^* \\ \vdots \\ \lambda_k^* \cdot z_{kn}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_k^* \\ \lambda_k^* \cdot \underline{z}_k^* \end{bmatrix} \quad (2.14\beta)$$

Εντάσσοντας τα ιδιοδιανύσματα σε κοινό μητρώο, προκύπτει το μιγαδικό μητρώο ιδιομορφών:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \underline{\hat{z}}_1 & \dots & \underline{\hat{z}}_n & \underline{\hat{z}}_1^* & \dots & \underline{\hat{z}}_n^* \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Για τα ιδιοδιανύσματα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\underline{\hat{z}}_i^T \cdot A \cdot \underline{\hat{z}}_j = 0 \quad \text{και} \quad \underline{\hat{z}}_i^T \cdot B \cdot \underline{\hat{z}}_j = 0 \quad (2.16)$$

$$\underline{\hat{z}}_i^T \cdot A \cdot \underline{\hat{z}}_i = a_i \quad \text{και} \quad \underline{\hat{z}}_i^T \cdot B \cdot \underline{\hat{z}}_i = b_i \quad (2.17)$$

$$\Phi^T \cdot A \cdot \Phi = \text{diag}(a_i) = a \quad (2.18\alpha)$$

$$\Phi^T \cdot B \cdot \Phi = \text{diag}(b_i) = b \quad (2.18\beta)$$

Τα διανύσματα \underline{z} μπορούν να εκφραστούν ως γραμμικός συνδυασμός των $2n$ διανυσμάτων:

$$\underline{z} = \sum_{k=1}^{2n} \underline{\hat{z}}_k \cdot q_k(t) = \Phi \cdot \underline{q}(t) \quad (2.19)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (2.19) στην εξίσωση (2.8) προκύπτει:

$$\Phi^T A \Phi \cdot \dot{\underline{q}} + \Phi^T B \Phi \cdot \underline{q} = \underline{0} \Rightarrow \underline{a} \cdot \dot{\underline{q}} + \underline{b} \cdot \underline{q} = \underline{0} \quad (2.20)$$

Όπου το μητρώο \underline{a} είναι διαγώνιος, συνεπώς ισχύει:

$$\underline{a}^{-1} = (\text{diag}(a_i))^{-1} = \text{diag}\left(\frac{1}{a_i}\right) \quad (2.21)$$

$$(\underline{B} + \lambda_i \underline{A}) \cdot \underline{\hat{z}}_i = \underline{0} \Rightarrow \underline{\hat{z}}_i^T \underline{B} \underline{\hat{z}}_i + \lambda_i \underline{\hat{z}}_i^T \underline{A} \underline{\hat{z}}_i = 0 \Rightarrow b_i + \lambda_i \cdot a_i = 0 \quad (2.22)$$

Επομένως:

$$\frac{b_i}{a_i} = -\lambda_i \Rightarrow \underline{a}^{-1} \underline{b} = \text{diag}(-\lambda_i) = \underline{\gamma} \quad (2.23)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση (2.23) στη σχέση (2.8) προκύπτει η παρακάτω απλοποιημένη μορφή:

$$\dot{\underline{q}} + \underline{\gamma} \cdot \underline{q} = \underline{0} \quad (2.24)$$

Αν στο σύστημα (2.8) εφαρμοστεί μια αρμονική διέγερση της μορφής $F(t) = \hat{F} e^{i\Omega t}$, τότε το σύστημα αυτό έχει μερική λύση της μορφής:

$$\underline{z}_{\text{μερ}}(t) = \hat{\underline{z}} e^{i\Omega t} \quad (2.25)$$

Εισάγοντας στο σύστημα (2.8) τη διέγερση (2.4) και τη μερική λύση (2.25) προκύπτει η μητρωϊκή εξίσωση:

$$i\Omega \cdot \underline{A} \cdot \hat{\underline{z}} + \underline{B} \cdot \hat{\underline{z}} = \hat{\underline{F}} \quad (2.26)$$

Θέτοντας τον μετασχηματισμό συντεταγμένων της μορφής:

$$\underline{z} = \sum_{k=1}^{2n} \underline{\hat{z}}_k \cdot q_k(t) = \Phi \cdot \underline{q}(t) \quad (2.27)$$

και πολλαπλασιάζοντας με τον αντίστροφο πίνακα των ιδιομορφών, τότε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.18α) και (2.18β) το σύστημα (2.27) παίρνει την μορφή:

$$(i\Omega \cdot \underline{a} + \underline{b}) \cdot \underline{q} = \Phi^T \cdot \hat{\underline{F}} \quad (2.28)$$

και συνεπώς για το διάνυσμα \underline{q} θα ισχύει:

$$\underline{q} = (i\Omega \cdot \underline{a} + \underline{b})^{-1} \cdot \Phi^T \cdot \hat{\underline{F}} \quad (2.29)$$

Εισάγοντας τη σχέση (2.29) και (2.23) στη σχέση (2.8) προκύπτει η λύση της μορφής:

$$\underline{z} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{\underline{\hat{z}}_k^T \cdot \hat{\underline{F}} \cdot \underline{\hat{z}}_k}{a_k \cdot (j\Omega - \lambda_k)} \quad (2.30)$$

Η συνάρτηση μετάδοσης μέσω της σχέσης (2.30) εκφράζεται με τη μορφή:

$$G_{ij}(j\Omega) = \frac{x_j}{F_i}(j\Omega) = \sum_{k=1}^{2n} \frac{Z_{ik} \cdot Z_{jk}}{a_k \cdot (j\Omega - \lambda_k)} \quad (2.31)$$

Οι αντίστοιχες μιγαδικές ιδιομορφές λ_k σύμφωνα με τη σχέση (2.12) είναι:

$$\frac{Z_{ik} \cdot Z_{jk}}{a_k} = U_{ijk} + j \cdot V_{ijk} \quad (2.32\alpha)$$

$$\frac{Z_{ik}^* \cdot Z_{jk}^*}{a_k^*} = U_{ijk} - j \cdot V_{ijk} \quad (2.32\beta)$$

Η τελική μορφή της συνάρτησης μετάδοσης θα είναι:

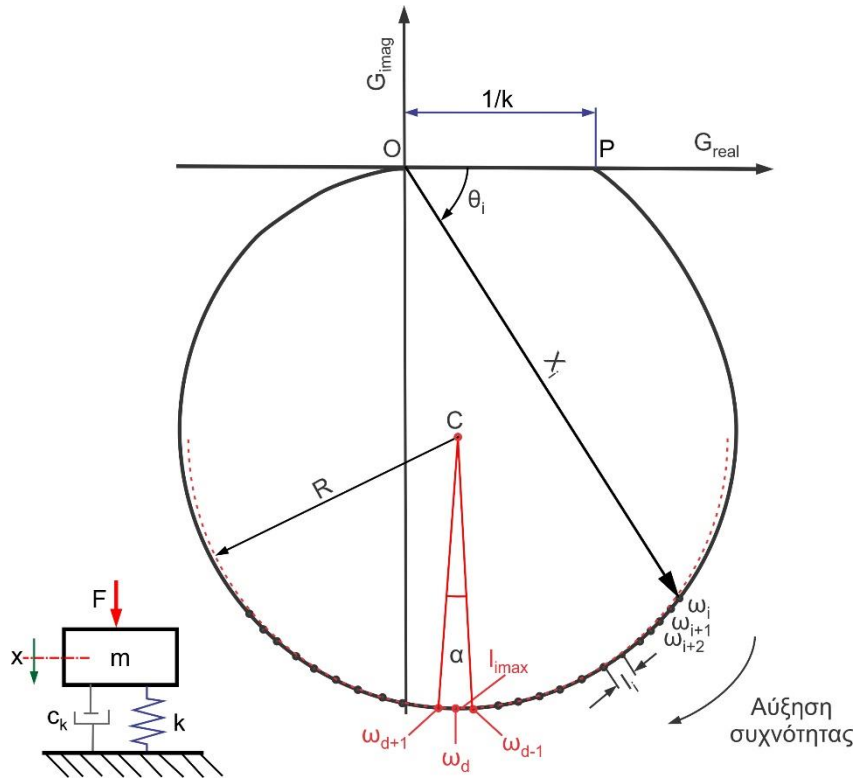
$$G_{ij}(j\Omega) = \sum_{k=1}^n \left[\frac{U_{ijk} + j \cdot V_{ijk}}{\delta_k + j \cdot (\Omega - \omega_{dk})} + \frac{U_{ijk} - j \cdot V_{ijk}}{\delta_k + j \cdot (\Omega + \omega_{dk})} \right] \quad (2.33)$$

2.13 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών συνάρτησης μετάδοσης

Η ταλαντωτική συμπεριφορά των κατασκευών εκφράζεται από τις παραμέτρους δ_k , ω_{dk} , U_k και V_k της συνάρτησης μετάδοσης της σχέσης (2.33), η οποία προσδιορίζεται πειραματικά.

2.13.1 Προσδιορισμός ιδιοσυχνοτήτων

Η πειραματική συνάρτηση μετάδοσης ενός βαθμού ελευθερίας σε μιγαδική μορφή ανά συχνότητα, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24: Γραφική παράσταση συνάρτησης μετάδοσης ενός βαθμού ελευθερίας.

Το εύρος της ταλάντωσης εκφράζεται από την ακτίνα X_i και η διαφορά φάσης ανάμεσα στη διέγερση και την απόκριση εκφράζεται μέσω της γωνίας θ_i . Τα σημεία ω_{n-1} και ω_{n+1} αντιστοιχούν

στο μέγιστο μήκος τόξου l_{\max} επί της καμπύλης για σταθερό βήμα συχνότητας. Η συχνότητα συντονισμού ω_n υπολογίζεται από τη σχέση [88]:

$$\omega_{d,i} = \frac{\omega_{d,i-1} + \omega_{d,i+1}}{2} \quad (2.34)$$

2.13.2 Προσδιορισμός εκθετών απόσβεσης

Ο συντελεστής απωλειών (η) υπολογίζεται προσαρμόζοντας ένα βέλτιστο κύκλο που να διέρχεται από τα σημεία της περιοχής του συντονισμού, χρησιμοποιώντας την ακτίνα και το κέντρο του. Ο βέλτιστος κύκλος προσδιορίζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις [88]:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (2.35)$$

Αν οι παράμετροι a , b και c θεωρηθούν ως οι άγνωστοι μιας εξίσωσης της μορφής:

$$\sum_{k=1}^{2n} E^2 - \sum_{k=1}^{2n} (x_k^2 + y_k^2 + a \cdot x_k + b \cdot y_k + c)^2 = 0 \quad (2.36)$$

Οι συνεταγμένες του κέντρου και της ακτίνας ενός θεωρητικού κύκλου προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων E :

$$x_{\text{center}} = -a/2 \quad y_{\text{center}} = -b/2 \quad (2.37)$$

$$R = \sqrt{\left(\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + c\right)} \quad (2.38)$$

Συνεπώς προσδιορίζεται η γωνία α , η οποία ορίζεται από τις ακτίνες του κύκλου που αντιστοιχούν στις συχνότητες με το μεγαλύτερο μήκος τόξου και δίνεται από την εξίσωση:

$$\alpha = \frac{l_{\max}}{R} \quad (2.39)$$

ο εκθέτης απόσβεσης της συγκεκριμένης ιδιομορφής δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{\omega_{d,i+1} - \omega_{d,i-1}}{\tan(\alpha/2)} \quad \text{για} \quad \frac{\alpha}{2} < 45^\circ \quad (2.40)$$

το μέτρο απωλειών προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{2\Delta\omega}{\omega_d \cdot \tan(\alpha/2)} = \frac{2(\omega_{d,i+1} - \omega_{d,i-1})}{\omega_d \cdot \tan(\alpha/2)} \quad (2.41)$$

2.13.3 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας

Η ευκαμψία $1/K$ που είναι η ανάστροφη τιμή της στιβαρότητας του ελατηρίου K του συστήματος ισούται με την πραγματική τιμή της συνάρτησης μετάδοσης για συχνότητα ίση με μηδέν. Το μέτρο ελαστικότητας (E), σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E756 [89] δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{H^2 C_n^2} \quad (2.42)$$

όπου: C_n συντελεστής ιδιομορφής πακτωμένης δοκού με ελεύθερο άκρο,

f_n η ιδιοσυχνότητα,
 ρ η πυκνότητα του υλικού της δοκού,
 l το μήκος της δοκού και
 H το πάχος της δοκού στη διεύθυνση της ταλάντωσης

2.14 Συνεισφορές της διδακτορικής διατριβής

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη και κατασκευή σύνθετων ιεραρχικών δομών τύπου sandwich με τη χρήση προηγμένων νανοσύνθετων υλικών τα οποία δύναται να βελτιστοποιηθούν όσον αφορά τις μηχανικές και ταλαντωτικές ιδιότητες μέσω ποικίλων εξειδικευμένων πειραματικών εφαρμογών και υπολογιστικής προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, το πρώτο μέρος της διατριβής περιλαμβάνει τη μελέτη και τον προσδιορισμό της μηχανικής απόδοσης νανοσύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας, μέσω διαφόρων εξειδικευμένων πειραματικών εφαρμογών και συγκεκριμένα δοκιμές θλίψης, κυκλικής φόρτισης-αποφόρτισης, νανοδιείσδυσης καθώς και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), για τον χαρακτηρισμό της μορφολογίας των επιφανειών των δοκιμίων υπό έρευνα.

Ακολούθως, επιλέχθηκαν δύο βέλτιστα υλικά από το σύνολο των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων από τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Επίσης, πραγματοποιείται μια γενική αναφορά στο αναπτυγμένο μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης των κυψελοειδών δομών με σταθερή σχετική πυκνότητα, μια καινοτόμα κατασκευαστική διαδικασία η οποία δεν παρατηρήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία. Ακόμη, περιγράφεται η εκτύπωση των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών. Επιπλέον, παρουσιάζεται η θλιπτική συμπεριφορά των εκτυπωμένων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών, η οποία εξετάστηκε πειραματικά αλλά και θεωρητικά μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και συγκεκριμένα με χρήση του λογισμικού ANSYS, με σκοπό την εξαγωγή των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης των κυψελοειδών δομών και τέλος τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών-θεωρητικών δεδομένων, κάτι που δεν παρατηρήθηκε αρκετά στη διεθνή βιβλιογραφία. Επίσης, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των ιεραρχικών κυψελοειδών.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με χρήση των τριών επιπέδων κυψελοειδών δομών ως πυρήνων τους. Οι ιεραρχικές δομές τύπου sandwich αποτελούνται από εξωτερικά φύλλα (skins) ανθρακονημάτων σταυρωτής πλέξης (twill fabric) με βάση την εποξειδική ρητίνη, οι οποίες κολλήθηκαν μεταξύ τους μέσω ισχυρής εποξειδικής πάστας και έπειτα υποβλήθηκαν σε στατικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων, με σκοπό την αξιολόγηση της μηχανικής απόδοσής τους. Παράλληλα, οι δομές sandwich εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν μέσω πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό τη θεωρητική-πειραματική σύγκρισή τους. Τέλος, παρουσιάζεται μια προσομοίωση της δομής I με χρήση των δομών sandwich που ερευνήθηκαν προηγουμένως, με στόχο τη διερεύνηση της μηχανικής απόδοσής τους. Τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φανέρωσαν πως οι προτεινόμενες ιεραρχικές δομές I αποτελούν μια ιδιαίτερα αξιόλογη μελλοντική επιλογή για χρήση σε κατασκευές διαφόρων τομέων.

3. Μηχανικές ιδιότητες και μορφολογία υλικών

3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διεξήχθησαν πειράματα, προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων νανοσύνθετων δοκιμίων. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκαν τα δοκίμια ήταν σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις πολυμερικές μήτρες από ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και πολυαμίδιο (Nylon), οι οποίες ενισχύθηκαν με ίνες άνθρακα (carbon fibers/CF), ίνες γυαλιού (glass fibers/GF), νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes/CNTs) καθώς και νανοδιαμάντι (nanodiamond/uD). Εν συνεχεία, με τα προαναφερθείσα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη εκτύπωση κυλινδρικών δοκιμίων με διάμετρο 29mm και ύψος 12.5mm, με σκοπό τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Τέλος, η σειρά των πειραματικών διαδικασιών που εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων, αποτελείται από πειράματα θλίψης (compression tests), πειράματα φόρτισης-αποφόρτισης (loading-unloading tests), πειράματα νανοδιείσδυσης (nanoindentation tests) καθώς και πειράματα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (scanning electron microscopy-SEM).

3.2 Πείραμα θλίψης

3.2.1 Θεωρητική προσέγγιση πειράματος θλίψης

Τα δεδομένα που εξήχθησαν μέσω του λογισμικού της μηχανής θλίψης κατά τη διάρκεια των δοκιμών ήταν η δύναμη σε Newton (N), η παραμόρφωση σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) και το μήκος της συμπίεσης του δοκιμίου ανά μισό δευτερόλεπτο σε μικρόμετρα (μm). Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση του εξής τύπου:

$$\varepsilon_T = \ln\left(\frac{L_i}{L_t}\right) \quad 3.1$$

όπου:

- L_i : το αρχικό μήκος του δοκιμίου = 12.5mm [σύμφωνα με το ASTM D395] και
 L_t : το μήκος του δοκιμίου κάθε στιγμή.

Επειδή η συνεχής παρακολούθηση της πλευρικής επέκτασης τόσο μικρών δοκιμίων δεν ήταν εφικτή, η στιγμιαία διάμετρος των δοκιμίων αποκτήθηκε χρησιμοποιώντας την πραγματική διαμήκη παραμόρφωση $\varepsilon_T = \varepsilon_{yy}$ και τον λόγο Poisson (ν). Ο λόγος Poisson σε μονοαξονική θλίψη μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}} = \frac{-\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{yy}} \quad 3.2$$

Όπου ε_{xx} , ε_{zz} : οι εγκάρσιες παραμορφώσεις για τις οποίες μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = \ln\left(\frac{D_i}{D_t}\right) \quad 3.3$$

όπου:

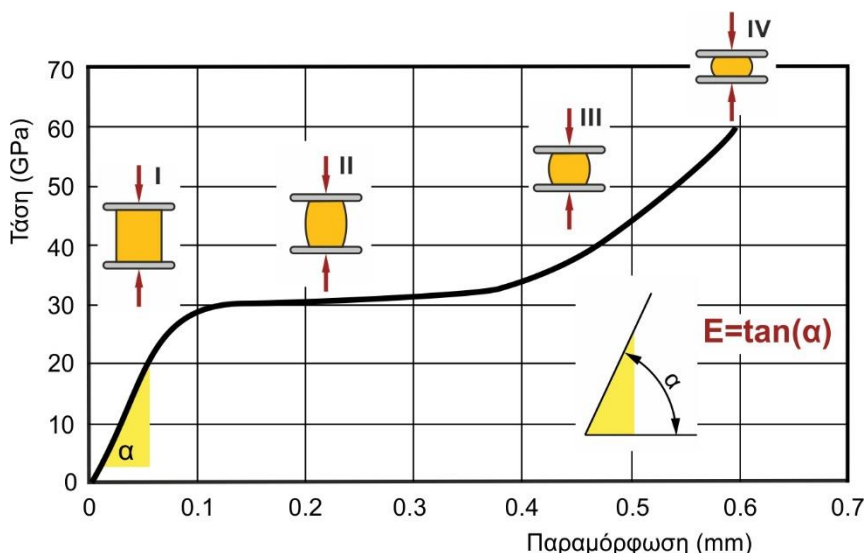
- D_i : η αρχική διάμετρος = 29mm [σύμφωνα με το ASTM D395]
 D_t : η στιγμιαία διάμετρος του δοκιμίου, υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_t = \frac{D_i}{e^{-\nu \cdot \varepsilon_{yy}}} \quad 3.4$$

Η πραγματική τάση σ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ όπου } A = \pi D_t^2 \quad 3.5$$

Στο σχήμα 3.1, το οποίο αποτελεί ένα τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, παρουσιάζεται η συμπεριφορά του νανოსύνθετου υλικού κατά τη διάρκεια του πειράματος θλίψης.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης νανοςύνθετου υλικού κατά τη δοκιμή θλίψης.

Κατά το πείραμα θλίψης, παρατηρείται ότι το δοκίμιο παραμένει απαραμόρφωτο στην ελαστική περιοχή (I), ακολούθως στην πλαστική περιοχή (II) παραμορφώνεται ελαστοπλαστικά και η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή. Μετέπειτα, η τάση αυξάνεται (III) και το δοκίμιο παρουσιάζει μόνιμη παραμόρφωση στη μέγιστη τάση (IV).

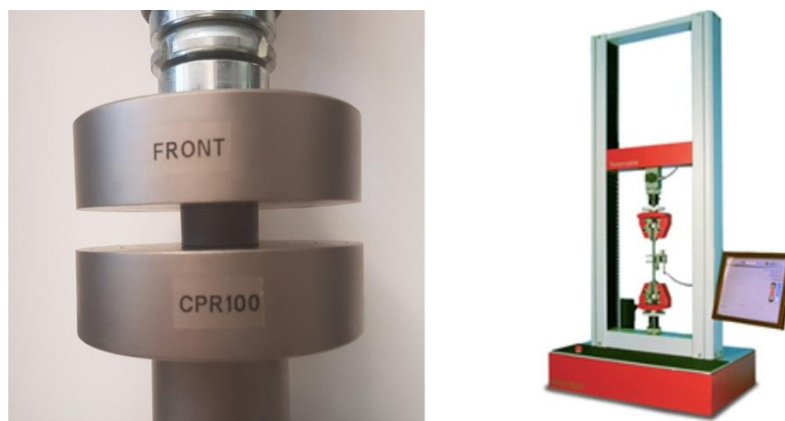
Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης-μετατόπισης στην ελαστική περιοχή, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$E = \tan(\alpha) \quad 3.6$$

3.2.2 Πειραματική διάταξη θλίψης

Κατά τη δοκιμή θλίψης, μία φόρτιση με σταθερό ρυθμό, εφαρμόζεται στο δοκίμιο. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο καθώς επίσης και οι προκαλούμενες επιμηκύνσεις μετριοούνται. Κατά τη δοκιμή θλίψης, το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και τελικώς σπάει, επομένως η δοκιμασία αποτελεί μία καταστρεπτική μέθοδο.

Τα πειράματα θλίψης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή Testometric M500-50 AT, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων εκπονήθηκε με χρήση των λογισμικών test-Xpert και Microsoft Office Excel. Η μηχανή Testometric M500-50 AT είναι σχεδιασμένη για στατική φόρτιση με αυξανόμενες παλμικές επαναλήψεις μέσω ενός ηλεκτρομηχανικού συστήματος οδήγησης. Επίσης, είναι κατασκευασμένη για εφαρμογές πειραμάτων εφελκυσμού, θλίψης και κάμψης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής εφελκυσμού-θλίψης Testometric M500-50 AT παρατίθενται στον πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.2: Πειραματική διάταξη θλίψης.

Για κάθε υλικό, έγιναν πέντε σειρές δοκιμών θλίψης για να υπάρχει μια ικανοποιητική προσέγγιση. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με ρυθμό παραμόρφωσης 5mm/min και η διατομή κάθε δοκιμίου μετρήθηκε με ψηφιακό παχύμετρο ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Μέσω των λογισμικών, υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας, η μέγιστη τάση και η μέγιστη παραμόρφωση από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, τα οποία εξήχθησαν από τα πειράματα. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν διαγράμματα σύγκρισης της συμπεριφοράς των δοκιμών κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες θλίψης.

Τεχνικές προδιαγραφές	Τιμές
Μέγιστη φόρτιση	50kN
Ταχύτητα οδήγησης κεφαλής	0.001-1000mm/min
Βήμα μεταβολής ταχύτητας	0.001mm/min
Μέγιστο μήκος διαδρομής (εκτός λαβών)	980mm

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά μηχανής εφελκυσμού-θλίψης Testometric M500-50 AT.

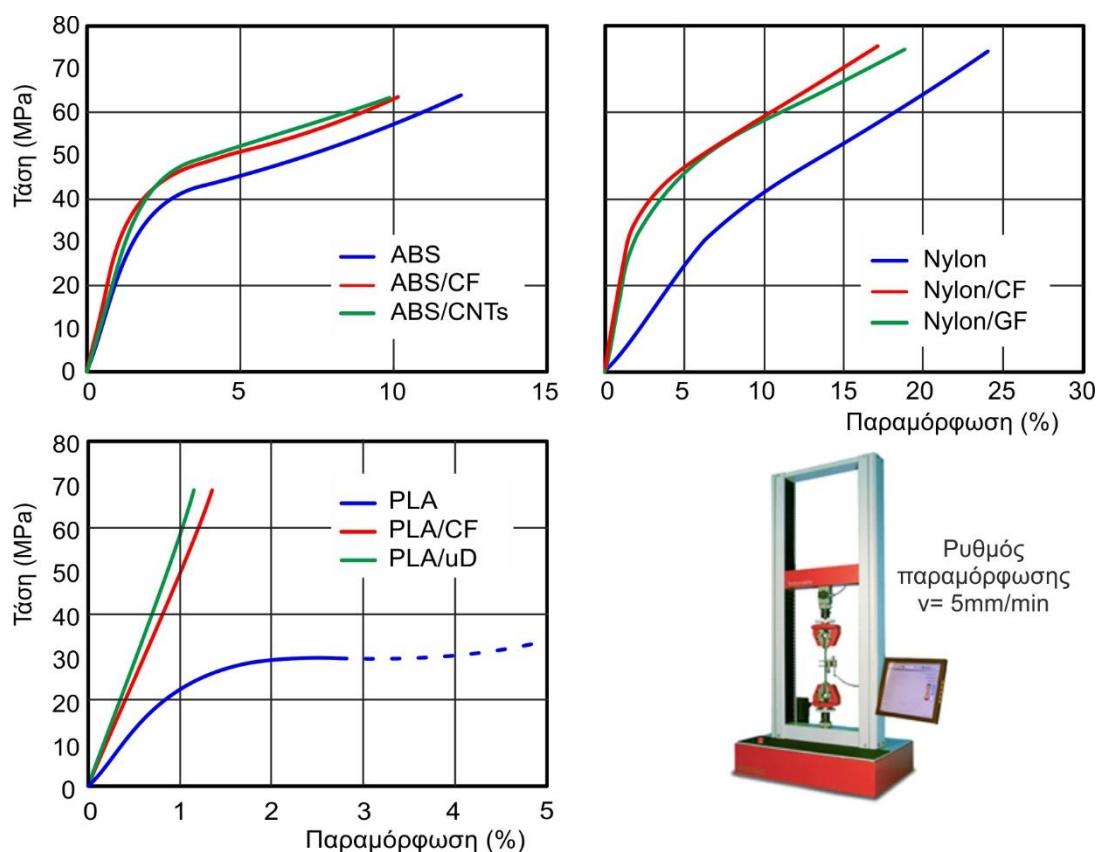
3.2.3 Αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των εξεταζόμενων δοκιμών και συγκεκριμένα του ακρυλονιτρίλιου βουταδιένιου στυρένιου (ABS) χωρίς κάποια προσθήκη, του ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF) καθώς και νανοσωλήνες άνθρακα (ABS/CNTs) κατόπιν μονοαξονικής θλίψης, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.3.

Παρατηρήθηκε πως για σχεδόν ίδια παραμόρφωση, η αντίστοιχη τάση των νανოსύνθετων υλικών είναι μεγαλύτερη από αυτή του ABS χωρίς κάποια πρόσμιξη. Συγκεκριμένα, το μέτρο ελαστικότητας (E-modulus) του σκέτου ABS μετρήθηκε 2100MPa και κατόπιν ενσωμάτωσης νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) καθώς και ινών άνθρακα (CF) στην πολυμερική μήτρα, διαπιστώθηκε βελτίωση ίση με 2400MPa και 3273MPa αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2. Συνεπώς, η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα στην πολυμερική μήτρα από ABS οδήγησε σε αύξηση της τάξης του 14%, ενώ η ενσωμάτωση ινών άνθρακα οδήγησε σε αύξηση της τάξης του 56% σε σύγκριση με τα δοκίμια του ABS χωρίς κάποια προσθήκη.

Επίσης, η θλιπτική αντοχή (yield strength) των δοκιμών από σκέτο ABS υπολογίστηκε 30MPa. Ακολουθώς, το ABS ενισχυμένο με CNTs φανέρωσε τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή μεταξύ των κυλινδρικών δοκιμών υπό μονοαξονική θλίψη και συγκεκριμένα με τιμή ίση με 35MPa. Τα σύνθετα κυλινδρικά δοκίμια από ABS/CF παρουσίασαν μία αρκετά παρόμοια θλιπτική αντοχή με το ABS/CNTs και συγκεκριμένα με τιμή ίση με 33MPa. Οι ποσοστιαίες διαφορές της αντοχής

από τα δοκίμια με σκέτο ABS συγκριτικά με τα δοκίμια από ABS/CNTs καθώς και ABS/CF ήταν 16.6% και 10%, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης.

Υλικά	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
ABS	2100 ± 102
ABS/CF	3273 ± 247
ABS/CNTs	2400 ± 234
PLA	2684 ± 425
PLA/CF	5452 ± 631
PLA/uD	6250 ± 487
Nylon	485 ± 75
Nylon/CF	2105 ± 298
Nylon/GF	1912 ± 243

Πίνακας 3.2: Μέτρο ελαστικότητας εξεταζόμενων υλικών.

Εν συνεχεία οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών από πολυαμίδιο χωρίς κάποια πρόσμειξη (Nylon), του Nylon ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (Nylon/GF) καθώς και ίνες άνθρακα (Nylon/CF) του πειράματος μονοαξονικής θλίψης, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.3. Το μέτρο ελαστικότητας (E-modulus) του σκέτου Nylon μετρήθηκε 485MPa και κατόπιν πρόσμειξης ινών γυαλιού (GF) καθώς και ινών άνθρακα (CF) στην πολυμερική μήτρα, διαπιστώθηκε βελτίωση ίση με 1912MPa και 2105MPa αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2. Συνεπώς, η προσθήκη ινών γυαλιού στην πολυμερική μήτρα από Nylon οδήγησε σε αύξηση της τάξης του 294%, ενώ η ενσωμάτωση ινών άνθρακα οδήγησε σε αύξηση της τάξης του 334% σε σύγκριση με τα δοκίμια του Nylon χωρίς κάποια προσθήκη.

Επίσης, η θλιπτική αντοχή των δοκιμών από σκέτο Nylon υπολογίστηκε 28MPa. Ακολούθως, το Nylon ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Nylon/CF) φανέρωσε τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή μεταξύ των κυλινδρικών δοκιμών υπό μονοαξονική θλίψη και συγκεκριμένα με τιμή ίση με 32MPa. Τα σύνθετα κυλινδρικά δοκίμια από Nylon/GF παρουσίασαν θλιπτική αντοχή ίση με 29MPa. Οι ποσοστιαίες διαφορές της αντοχής από τα δοκίμια με σκέτο Nylon συγκριτικά με τα δοκίμια από Nylon/CF καθώς και Nylon/GF ήταν 14.3% και 3.6%, αντίστοιχα.

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών από πολυγαλακτικό οξύ χωρίς κάποια πρόσμιξη (PLA), του PLA ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (PLA/CF) καθώς και νανοδιαμάντι (PLA/uD) του πειράματος μονοαξονικής θλίψης, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.3.

Το μέτρο ελαστικότητας του σκέτου PLA μετρήθηκε 2684MPa και κατόπιν προσθήκης ινών άνθρακα (CF) καθώς και νανοδιαμαντιών (uD) στην πολυμερική μήτρα, παρατηρήθηκε ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση ίση με 5452MPa και 6250MPa αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2. Συνεπώς, η προσθήκη ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα από PLA οδήγησε σε ποσοστιαία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας ίση με 103%, ενώ η ενσωμάτωση νανοδιαμαντιών οδήγησε σε ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 132% σε σύγκριση με τα δοκίμια του PLA χωρίς κάποια προσθήκη. Επίσης, η θλιπτική αντοχή των δοκιμών από σκέτο PLA υπολογίστηκε 20MPa.

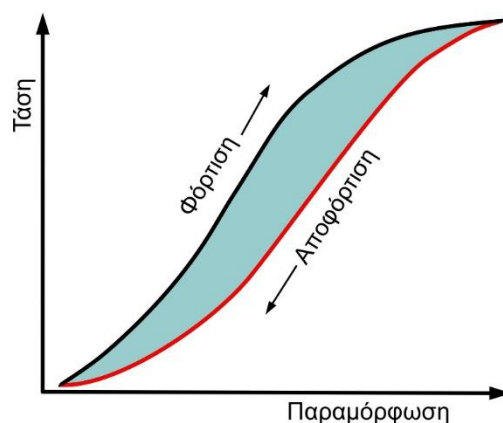
Τα αποτελέσματα από τα πειράματα θλίψης των εξεταζόμενων νανοσύνθετων δοκιμών φανέρωσαν πως η ενσωμάτωση συστατικών ενίσχυσης στις τρεις πολυμερικές μήτρες είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας καθώς και της θλιπτικής αντοχής των εξεταζόμενων υλικών. Συγκεκριμένα, στην οικογένεια υλικών από ABS, το σύνθετο υλικό ABS/CF παρουσίασε το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με το σκέτο ABS και το ABS/CNTs.

Ακολούθως, στην οικογένεια υλικών από Nylon, το σύνθετο υλικό Nylon/CF φανέρωσε τη μεγαλύτερη στιβαρότητα έναντι του σκέτου Nylon και του Nylon/GF, ενώ τέλος στην οικογένεια υλικών από PLA, το νανοσύνθετο υλικό PLA/uD φανέρωσε τη μεγαλύτερη στιβαρότητα συγκριτικά με το PLA χωρίς κάποια προσθήκη και το σύνθετο υλικό PLA/CF. Αναφορικά με τη θλιπτική αντοχή, το ABS/CNTs παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των εξεταζόμενων κυλινδρικών δοκιμών.

3.3 Πειράματα θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης

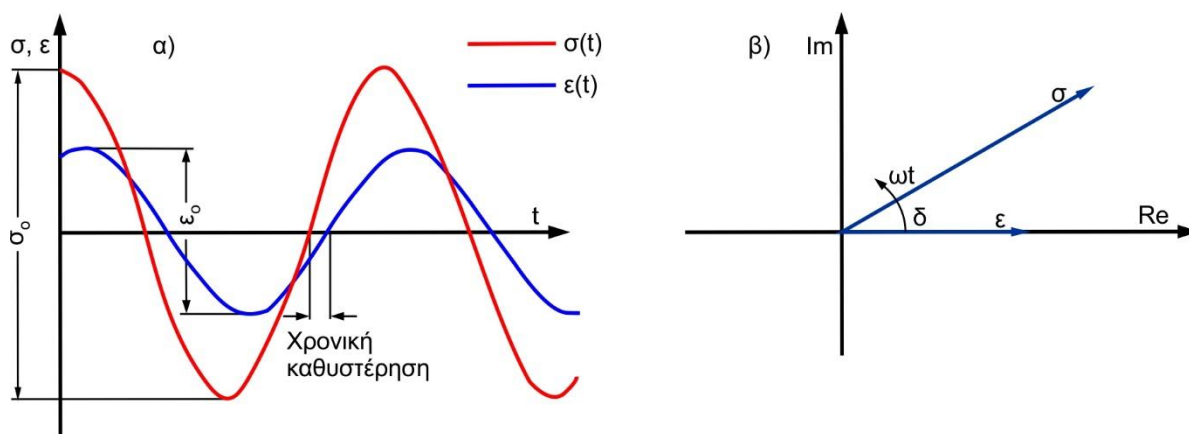
Ανεξαρτήτως του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται, η μηχανική συμπεριφορά των βισκοελαστικών υλικών παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά που είναι κοινά για όλα τα υλικά αυτής της κατηγορίας. Το σημαντικότερο από αυτά είναι η απόσβεση, δηλαδή η ιδιότητα που καθορίζει ποιο μέρος της μηχανικής ενέργειας που προσφέρεται στο υλικό θα μετατραπεί σε θερμότητα. Κατά τη μηχανική φόρτιση ενός βισκοελαστικού υλικού πάντα υπάρχει ένα ποσοστό ενέργειας που χάνεται και δεν μπορεί να ανακτηθεί.

Εν αντιθέσει όμως με τα ιξώδη υλικά που σκεδάζουν όλη τη μηχανική ενέργεια που τους προσφέρεται, τα βισκοελαστικά υλικά αποθηκεύουν ένα μέρος αυτής της ενέργειας το οποίο ανακτάται κατά την αποφόρτιση. Συνεπώς, δεν υπάρχει ταύτιση των καμπυλών φόρτισης-αποφόρτισης σε ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης και δημιουργείται έτσι ένας βρόγχος υστέρησης, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.4 [10], το εμβαδό του οποίου αντιπροσωπεύει τις απώλειες μηχανικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου [90]. Όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδό αυτό, τόσο μεγαλύτερη αποσβεστική ικανότητα έχει ένα υλικό, δηλαδή τόση περισσότερη μηχανική ενέργεια μπορεί να απορροφήσει με τη μορφή θερμότητας [91].



Σχήμα 3.4: Βρόγχος υστέρησης.

Επίσης, κατά τη δυναμική διέγερση ενός βισκοελαστικού υλικού παρατηρείται ότι οι τάσεις με τις παραμορφώσεις παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης μεταξύ τους. Αυτή η διαφορά φάσης οφείλεται στην απόσβεση η οποία προκαλεί μια χρονική καθυστέρηση στην απόκριση του υλικού, όπως φαίνεται και στο [σχήμα 3.5\(α\)](#). Η διαφορά φάσης συνδέεται άμεσα με την ικανότητα απόσβεσης ενός υλικού, καθώς όσο μεγαλώνει η απόσβεση τόσο μεγαλώνει και η χρονική καθυστέρηση της απόκρισης [92].



Σχήμα 3.5: α) Δυναμική διέγερση και απόκριση ενός βισκοελαστικού υλικού και β) περιστρεφόμενα διανύσματα στο μιγαδικό επίπεδο.

Αν θεωρηθεί ότι ασκείται μια περιοδική τάση που προκαλεί μια περιοδική παραμόρφωση του υλικού, τότε τα μέτρα τους πρέπει να δίνονται από σχέσεις της μορφής:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad 3.7$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega t \quad 3.8$$

όπου: $\sigma(t)$ είναι η περιοδική τάση
 $\varepsilon(t)$ είναι η περιοδική παραμόρφωση
 ω είναι η συχνότητα ταλάντωσης
 δ είναι η διαφορά φάσης

Σε αυτήν την περίπτωση θεωρήθηκε πως υπάρχει διαφορά φάσης δ ($0^\circ < \delta < 90^\circ$) ανάμεσα στην τάση και την παραμόρφωση, με την τάση να προπορεύεται χρονικά της παραμόρφωσης. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να εκφραστούν με περιστρεφόμενα διανύσματα στο μιγαδικό επίπεδο, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.5\(β\)](#).

Χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα $\sin(a+b) = \sin a \cdot \cos b + \sin b \cdot \cos a$, η περιοδική τάση μπορεί να εκφραστεί με την μορφή:

$$\sigma(t) = (\sigma_0 \cdot \cos \delta) \cdot \sin \omega t + (\sigma_0 \cdot \sin \delta) \cdot \cos \omega t \quad 3.9$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται αντιληπτό πως η περιοδική διέγερση αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα ($\sigma' = \sigma_0 \cdot \cos \delta$) βρίσκεται σε φάση με την απόκριση, καθώς περιλαμβάνουν τον ίδιο τριγωνομετρικό όρο. Αντίθετα, η δεύτερη συνιστώσα ($\sigma'' = \sigma_0 \cdot \sin \delta$) παρουσιάζει διαφορά φάσης 90° με την απόκριση, διότι οι τριγωνομετρικοί τους όροι συνδέονται μέσω της σχέσης $\cos \omega t = \sin(\omega t + \pi/2)$. Η κάθε συνιστώσα της διέγερσης μπορεί να συνδεθεί με την απόκριση μέσω κάποιων σταθερών, έτσι ώστε να προκύψουν δύο σχέσεις που είναι ανάλογες με τον νόμο του Hooke:

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \delta \quad 3.10$$

$$E'' = \frac{\sigma''}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \delta \quad 3.11$$

Είναι εμφανές ότι από τις δύο συνιστώσες της διέγερσης μόνο αυτή που είναι σε φάση με την απόκριση προσφέρει στο υλικό μηχανική ενέργεια που αποθηκεύεται και μπορεί αργότερα να ανακτηθεί. Η συνιστώσα που είναι εκτός φάσης ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τη μηχανική ενέργεια που απορροφά το υλικό με τη μορφή θερμότητας και δεν μπορεί να ανακτηθεί κατά την αποφόρτιση. Αυτή η φυσική τους σημασία εξηγεί τη δυναμική συμπεριφορά των βισκοελαστικών υλικών και οδηγεί στον ορισμό του μέτρου αποθήκευσης E' (storage modulus), το οποίο εκφράζει το μέρος της μηχανικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο υλικό με τη μορφή δυναμικής ενέργειας και του μέτρου απωλειών E'' (loss modulus), το οποίο εκφράζει το ποσό της μηχανικής ενέργειας που χάνεται λόγω της μετατροπής της σε θερμότητα [93].

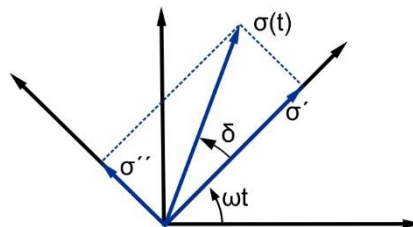
Για διευκόλυνση των υπολογισμών οι μεταβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις επιλέγεται να αναπαρασταθούν σε μιγαδική μορφή με τη βοήθεια της ταυτότητας του Euler:

$$\cos \theta + i \sin \theta = e^{i\theta} \quad 3.12$$

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot [\cos(\omega t + \delta) + i \cdot \sin(\omega t + \delta)] = \sigma_0 \cdot e^{i(\omega t + \delta)} \quad 3.13$$

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot [\cos(\omega t) + i \cdot \sin(\omega t)] = \varepsilon_0 \cdot e^{i\omega t} \quad 3.14$$

Τα περιστρεφόμενα διανύσματα της τάσης και της παραμόρφωσης, μαζί με τις αντίστοιχες συνιστώσες τους, φαίνονται στο σχήμα 3.6 για κάποια τυχαία στιγμή t .



Σχήμα 3.6: Χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις.

Αν συνδυαστούν μεταξύ τους η διέγερση και η απόκριση στη μιγαδική τους μορφή, τότε προκύπτει:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot (\cos \delta + i \cdot \sin \delta) = E' + i \cdot E'' \quad 3.15$$

Η μιγαδική ποσότητα E^* ονομάζεται δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (dynamic modulus) και περιγράφει την συνολική συμπεριφορά ενός βισκοελαστικού υλικού. Σε πλήρη αναλογία με τον νόμο του Hooke που εφαρμόζεται στα ελαστικά σώματα, το δυναμικό μέτρο συνδέει τις χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις στη μιγαδική τους μορφή μέσω της σχέσης:

$$\sigma^*(t) = E^* \cdot \varepsilon^*(t) \quad 3.16$$

Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βισκοελαστικού υλικού πρέπει να είναι γνωστά και τα τρία δυναμικά μέτρα, τα οποία εξαρτώνται από την συχνότητα της διέγερσης και συνδέονται μεταξύ τους μέσω των σχέσεων:

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + i \cdot E''(\omega) \quad 3.17$$

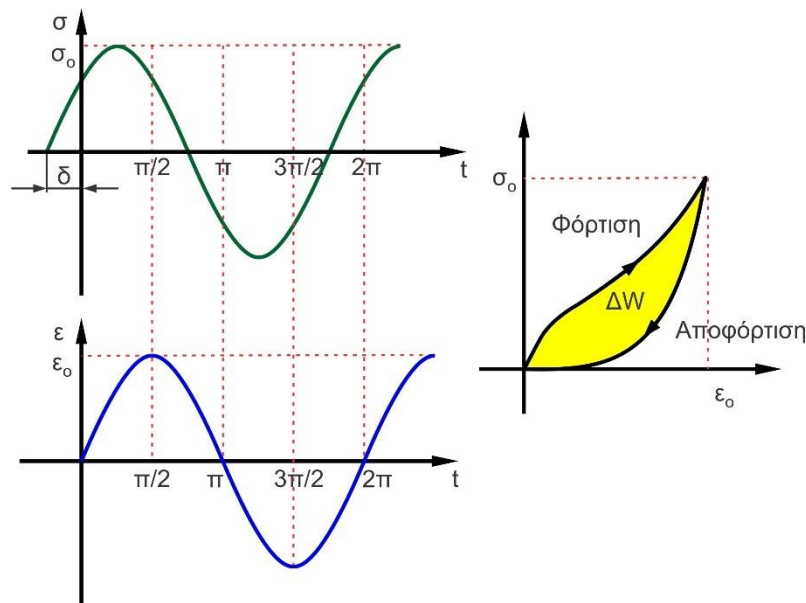
$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad 3.18$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad 3.19$$

Η τελευταία σχέση η οποία συνδέει το μέτρο απωλειών με το μέτρο αποθήκευσης, ορίζει ένα νέο μέγεθος το οποίο ονομάζεται συντελεστής απωλειών (loss factor) και εκφράζει τον λόγο της ενέργειας που χάνεται προς την ενέργεια που αποθηκεύεται. Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή απωλειών μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η ικανότητα απόσβεσης ενός υλικού, η οποία είναι επίσης συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης και επομένως συνδέεται με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μέσω της σχέσης:

$$\eta(\omega) = \tan \delta = \frac{E''}{E'} \Rightarrow E^*(\omega) = E'(\omega) \cdot (1 + i \cdot \eta(\omega)) \quad 3.20$$

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον βρόγχο υστέρησης του σχήματος 3.7 μπορούν να προσδιοριστούν διάφορα μεγέθη τα οποία σχετίζονται με την απόσβεση ενός υλικού.



Σχήμα 3.7: Βρόγχος υστέρησης για περιοδικές τάσεις και παραμορφώσεις.

Ο συντελεστής απωλειών που προηγουμένως εκφράστηκε συναρτήσει των μέτρων αποθήκευσης και απωλειών, ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ενέργειας που χάνεται ανά μονάδα όγκου για έναν κύκλο φόρτισης προς τη συνολική μηχανική ενέργεια ανά μονάδα όγκου που προσφέρεται στο υλικό σε έναν κύκλο φόρτισης. Επομένως, δεδομένου ότι η ενέργεια που προσφέρεται και η ενέργεια που χάνεται ανά μονάδα όγκου δίνονται από τις σχέσεις:

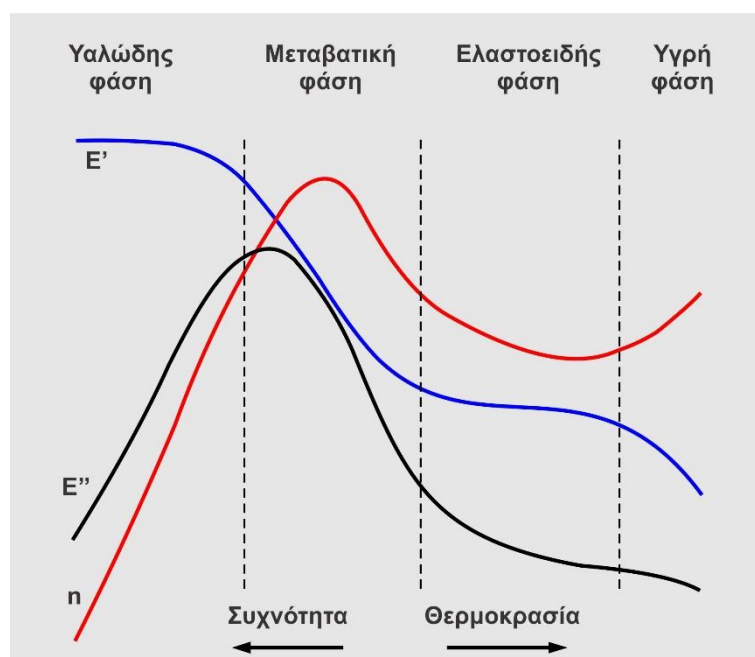
$$\Delta w = \oint \sigma \cdot d\varepsilon = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin \delta = \pi \cdot E'' \cdot (\varepsilon_0)^2 \quad 3.21$$

$$w = \int_0^{\pi/2} \sigma \cdot d\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos \delta = \frac{1}{2} \cdot E' \cdot (\varepsilon_0)^2 \quad 3.22$$

προκύπτει ότι ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τις παρακάτω ισοδύναμες σχέσεις:

$$\eta = \tan \delta = \frac{E''}{E'} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta w}{w} \quad 3.23$$

Η εξάρτηση των δυναμικών μηχανικών ιδιοτήτων από τη θερμοκρασία ή τη συχνότητα διέγερσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Για σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ένα πολυμερές βρίσκεται σε μια υαλώδη κατάσταση όπου το μέτρο αποθήκευσης είναι αρκετά υψηλό και τα επίπεδα της απόσβεσης σχετικά χαμηλά. Το υλικό είναι δύσκαμπτο και ψαθυρό γιατί οι διαμοριακοί δεσμοί μεταξύ των αλυσίδων δεν επιτρέπουν μεγάλες σχετικές κινήσεις των μορίων, ενώ η μηχανική του συμπεριφορά προσεγγίζει αυτήν ενός απόλυτα ελαστικού στερεού. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται τόσο οι διαμοριακοί δεσμοί αρχίζουν να χαλαρώνουν και περιστασιακά σπάνε. Οι αποστάσεις μεταξύ των μοριακών αλυσίδων αρχίζουν επίσης να αυξάνονται και η κινητικότητα των ατόμων ενισχύεται.



Σχήμα 3.8: Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων βισκοελαστικού υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η θερμοκρασία κατά την οποία τα φαινόμενα αυτά γίνονται εμφανή ονομάζεται θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης και σηματοδοτεί τη μετάβαση του υλικού σε μια κατάσταση όπου το μέτρο αποθήκευσης μειώνεται συνεχώς, ενώ παράλληλα το μέτρο των απωλειών μεγιστοποιείται. Σε αυτήν τη μεταβατική φάση το υλικό αρχίζει να εκδηλώνει βισκοελαστική συμπεριφορά και συνεπώς αρχίζει να εμφανίζεται μια χρονική εξάρτηση των παραμορφώσεων. Στη συνέχεια, όσο η θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται, το πολυμερές λαμβάνει μια ελαστοειδή μορφή και στη συνέχεια ρευστοποιείται τελείως. Σε αυτές τις φάσεις η κινητικότητα των μορίων είναι πολύ μεγάλη και οι μοριακές αλυσίδες κινούνται πλέον ανεξάρτητα μεταξύ τους γιατί οι διαμοριακές δυνάμεις έχουν σχεδόν εξαφανιστεί. Το μέτρο

αποθήκευσης μειώνεται συνεχώς και το πολυμερές καταλήγει να συμπεριφέρεται ως ιξώδες ρευστό όπου οι παραμορφώσεις είναι μη-ανακτήσιμες.

Από το σχήμα 3.8, φαίνεται πως τα πολυμερή στην υαλώδη φάση τους έχουν χαμηλή απόσβεση, κάτι που φανερώνεται και από τον χαμηλό συντελεστή απωλειών τους. Σε αυτήν τη φάση τα πολυμερή είναι δύσκαμπτα και μεταδίδουν όλες τις μηχανικές ταλαντώσεις χωρίς να τις αποσβένουν. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται και οι διαμοριακές δυνάμεις ελαττώνονται, οι αποσβεστικές ικανότητες των πολυμερών αυξάνονται. Ο συντελεστής απωλειών λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στη μεταβατική φάση του υλικού και στη συνέχεια μειώνεται καθώς το υλικό ρευστοποιείται.

Ένας επιπρόσθετος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την απόσβεση των πολυμερών είναι η συχνότητα της διέγερσης. Έχει παρατηρηθεί πως τα περισσότερα πολυμερή εμφανίζουν ισχυρή απόσβεση για μια ορισμένη κρίσιμη συχνότητα όταν βρίσκονται στη μεταβατική φάση τους. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τις κινήσεις των αλυσίδων τους. Για πολύ υψηλές συχνότητες διέγερσης οι μακρομοριακές αλυσίδες δεν προλαβαίνουν να ανταποκριθούν στις υφιστάμενες δυνάμεις και το υλικό παραμένει δύσκαμπτο με χαμηλή απόσβεση. Για χαμηλότερες συχνότητες τα μακρομόρια έχουν πολύ χρόνο για να μετατοπιστούν, γεγονός που καθιστά το υλικό όλκιμο και επίσης με χαμηλή απόσβεση.

3.3.1 Πειραματική διάταξη θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης

Οι θλιπτικές δοκιμές εναλλασσόμενης φόρτισης διεξάχθηκαν με ελεγχόμενο σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις έγιναν στην ίδια μηχανή (Testometric, UK) που πραγματοποιήθηκαν και τα πειράματα θλίψης, η οποία είναι εξοπλισμένη με δυναμοκυψέλη 50kN, με συχνότητα 0.1Hz και ανώτερο φορτίο 5kN, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Η απώλεια της μηχανικής ενέργειας σε κάθε κύκλο φόρτισης υπολογίστηκε από τους υστερητικούς βρόγχους που προέκυψαν. Οι ταχύτητες φόρτισης και αποφόρτισης ήταν σταθερά ορισμένες στα 5mm/min. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα φόρτισης-αποφόρτισης είχαν τις ίδιες διαστάσεις με αυτά της θλίψης.

3.3.2 Αποτελέσματα πειραμάτων θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης

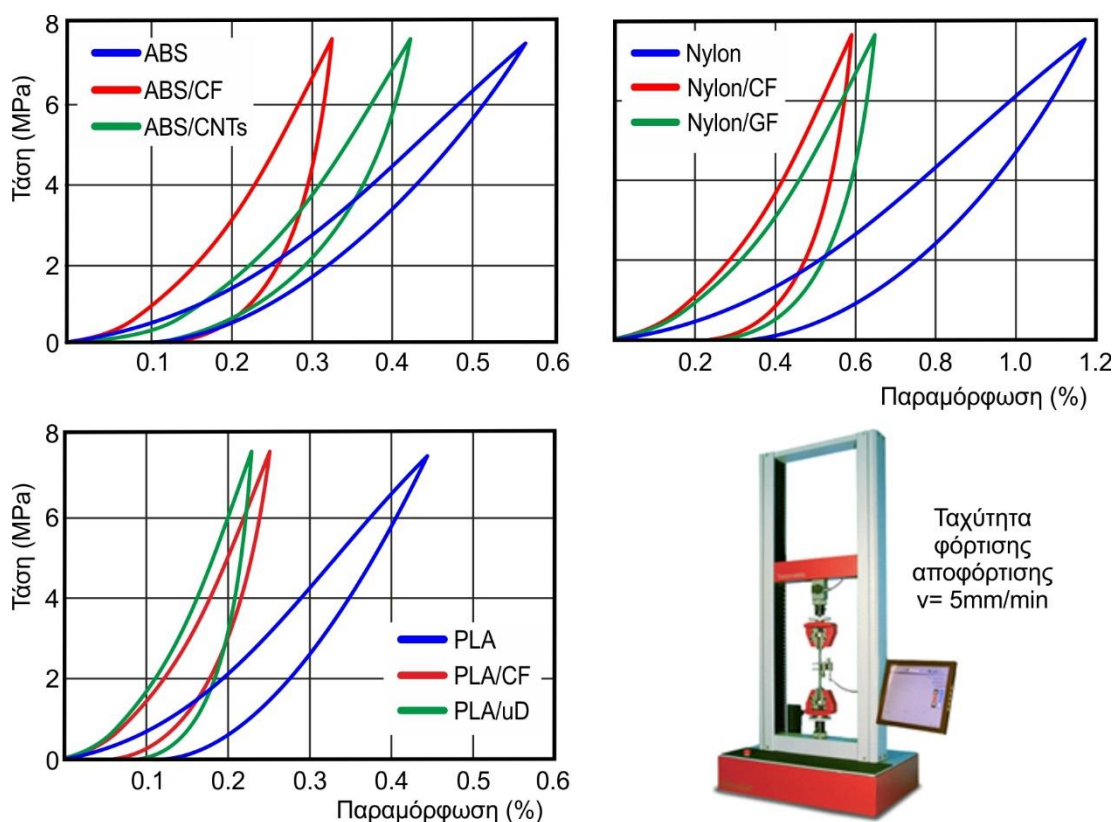
Η περιοχή μέσα στον βρόγχο υστέρησης σχετίζεται με την απώλεια ενέργειας. Για την απόσβεση πολυμερικών υλικών, μεγαλύτερος βρόγχος υστέρησης αντιπροσωπεύει μεγαλύτερη απόσβεση, πράγμα το οποίο σημαίνει πως μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά το επίπεδο ταλάντωσης [94]. Οι παράμετροι απόσβεσης μπορούν να εξαχθούν από την περιοχή που περικλείεται από τους βρόγχους υστέρησης. Βασισμένο στο μοντέλο ελεύθερης δόνησης (free vibration model), η ικανότητα απομόνωσης της δόνησης των υλικών μπορεί να προσδιοριστεί από τα χαρακτηριστικά της υστερητικής απόσβεσης. Η συγκεκριμένη ικανότητα απόσβεσης (specific damping capacity – SDC) δίνεται από τον εξής τύπο:

$$SDC = \frac{\Delta W}{W} \times 100\% = \left(\oint \sigma d\varepsilon / \int_{\omega t=0}^{\pi/2} \sigma d\varepsilon \right) \times 100\% \quad (3.24)$$

όπου σ είναι η τάση, το ΔW αντιπροσωπεύει την ενεργειακή διασπορά σε οποιονδήποτε κύκλο και το W αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια η οποία σχετίζεται με τον συγκεκριμένο κύκλο [95]. Η συγκεκριμένη ικανότητα απόσβεσης μπορεί να συνδεθεί με τον συντελεστή απωλειών [96-99] από την ακόλουθη εξίσωση:

$$n = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (3.25)$$

Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται οι καμπύλες των τυπικών βρόγχων υστέρησης των εκτυπωμένων νανοσύνθετων δοκιμών υπό θλιπτική συχνότητα 0.01Hz με μέγιστη φόρτιση 5kN. Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (3.24) και (3.25), οι ενεργειακές απώλειες (energy loss) σε έναν κύκλο (ΔW), η μέγιστη ενέργεια αυτού του κύκλου (W) καθώς και ο συντελεστής απωλειών (η) υπολογίστηκαν με σκοπό τη μέτρηση της απόσβεσης των νανοσύνθετων υλικών των πειραμάτων θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3. Επιπροσθέτως, το ΔW δηλώνει ότι η ιδιότητα κατά των κραδασμών του ABS/CF αυξάνεται σε σύγκριση με το σκέτο ABS. Ωστόσο, το ΔW μειώνεται με την προσθήκη CNTs στο ABS, η ιδιότητα W μειώθηκε, οδηγώντας σε μεγαλύτερο συντελεστή απωλειών (η). Αυτή η μείωση στην ενέργεια W μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα δοκίμια από ABS/CNTs έχουν μεγαλύτερη στιβαρότητα σε σύγκριση με τα δοκίμια ABS. Συνεπώς, το σύνθετο υλικό ABS/CF αναμένεται να βελτιώσει την ικανότητα μετατροπής της κινητικής του ενέργειας σε θερμική διασπορά με την εφαρμογή εξωτερικής δύναμης.



Σχήμα 3.9: Βρόγχοι υστέρησης των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών.

Η μεγαλύτερη σταθερά απόσβεσης (η), η οποία είναι ο λόγος του ΔW προς το W , υπολογίστηκε για τα δοκίμια ABS/CF. Αυτή η παρατήρηση δείχνει γρηγορότερη διασπορά ενέργειας σε συγκεκριμένο εύρος δόνησης και το σύστημα γίνεται σταθερό με λιγότερους κύκλους δόνησης (vibration cycles). Ο συντελεστής απωλειών για τα δοκίμια ABS χωρίς κάποια προσθήκη υπολογίστηκε 2.5%, 3.7% για τα δοκίμια ABS/CNTs και ο μεγαλύτερος συντελεστής απωλειών υπολογίστηκε για τα δοκίμια ABS/CF, ο οποίος ήταν 10%. Η ενσωμάτωση των CNTs στην πολυμερική μήτρα ABS επέφερε αύξηση 48% στον συντελεστή απωλειών έναντι του σκέτου ABS. Το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης στην απόσβεση επιτεύχθηκε από τα δοκίμια ABS/CF, με τιμή 300%.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης του πολυαμίδιου χωρίς κάποια προσθήκη (Nylon) με το πολυαμίδιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Nylon/CF) καθώς και ίνες γυαλιού (Nylon/GF). Κατόπιν σύγκρισης των

αποτελεσμάτων, διαπιστώθηκε ότι με την ενίσχυση ινών άνθρακα καθώς και ινών γυαλιού στην πολυμερική μήτρα Nylon, ο συντελεστής απωλειών μειώθηκε σε σχέση με το σκέτο Nylon, συνεπώς η αποσβεστική ικανότητα των νανοσύνθετων υλικών μειώθηκε συγκριτικά με το σκέτο πολυαμίδιο. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής απωλειών για το πολυαμίδιο χωρίς κάποια ενίσχυση είναι 12.6%, για το πολυαμίδιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Nylon/CF) είναι 8% και τέλος για το πολυαμίδιο ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (Nylon/GF) είναι 8.5%. Η ενσωμάτωση των ινών γυαλιού (GF) στην πολυμερική μήτρα Nylon επέφερε μείωση 32% στον συντελεστή απωλειών έναντι του σκέτου Nylon. Το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης στην απόσβεση παρατηρήθηκε από τα δοκίμια Nylon/CF, με τιμή 36%.

Υλικά	Συντελεστής απωλειών (loss factor)	ΔW	W
ABS	2.5%	0.017466	0.224442
ABS/CF	10.0%	0.032212	0.102366
ABS/CNTs	3.7%	0.016403	0.142183
PLA	3.0%	0.017	0.178
PLA/CF	3.9%	0.009462	0.077981
PLA/uD	6.2%	0.016948	0.086423
Nylon	12.6%	0.076468	0.192749
Nylon/CF	8.0%	0.030178	0.120362
Nylon/GF	8.5%	0.034276	0.127751

Πίνακας 3.3: Συντελεστής απωλειών των νανοσύνθετων υλικών.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης του πολυγαλακτικού οξέος (PLA) χωρίς κάποια πρόσμειξη με το πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (PLA/CF) καθώς και νανοδιαμάντι (PLA/uD). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο συντελεστής απωλειών για το PLA χωρίς κάποια πρόσμειξη είναι 3%, για το PLA/CF είναι 3.9% και για το PLA/uD είναι 6.2%. Συνεπώς, για το PLA χωρίς κάποια πρόσμειξη παρατηρείται η μικρότερη αποσβεστική ικανότητα συγκριτικά με τα νανοσύνθετα υλικά. Η πρόσμειξη των ινών άνθρακα (CF) στην πολυμερική μήτρα PLA επέφερε αύξηση 30% στον συντελεστή απωλειών έναντι του σκέτου PLA, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης στην απόσβεση επιτεύχθηκε από τα δοκίμια PLA/uD, το οποίο είναι 106%.

Συμπερασματικά, για την οικογένεια υλικών ABS, η ενσωμάτωση των ινών άνθρακα στην πολυμερική μήτρα ABS οδήγησε σε μεγαλύτερο συντελεστή απωλειών, δηλαδή σε μεγαλύτερη ικανότητα απόσβεσης συγκριτικά με το ABS χωρίς κάποια πρόσμειξη και το ABS ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα (ABS/CNTs).

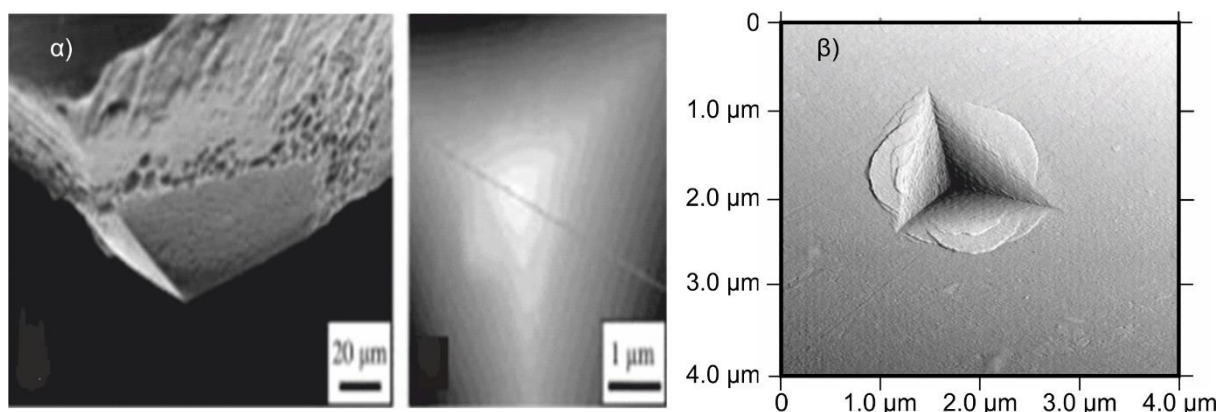
Η προσθήκη ινών άνθρακα (Nylon/CF) και ινών γυαλιού (Nylon/GF) στην πολυμερική μήτρα Nylon δεν επέφερε κάποια βελτίωση στην ικανότητα απόσβεσης ενώ τέλος για την οικογένεια υλικών PLA, η συνεισφορά του νανοδιαμαντιού (PLA/uD) στην πολυμερική μήτρα PLA φανέρωσε καλύτερη συμπεριφορά σε όρους απόσβεσης σε σχέση με το σκέτο PLA και το PLA ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (PLA/CF).

3.4 Δοκιμή νανοδιείσδυσης

Η νανοδιείσδυση (nanoindentation) είναι μια τεχνική μέτρησης σκληρότητας με διείσδυση που εφαρμόζεται σε μικρούς όγκους δειγμάτων. Η νανοδιείσδυση αναπτύχθηκε από την ανάγκη να μετρηθούν οι μηχανικές ιδιότητες σκληρών λεπτών υμενίων και άλλων επιφανειακών εφαρμογών στις αρχές του 1980. Τα εργαλεία μέτρησης μικροσκληρότητας που ήταν

διαθέσιμα εκείνη την εποχή δεν μπορούσαν να εφαρμόσουν τις μικρές δυνάμεις που χρειαζόνταν για να επιτευχθεί το απαιτούμενο βάθος διείδυσης, δηλαδή περίπου το 10% του πάχους των υμενίων, για να αποφευχθεί η επίδραση του υποστρώματος στη μέτρηση σκληρότητας. Ακόμη και να γινόταν, το προκύπτον μέγεθος αποτυπώματος δεν μπορούσε να μετρηθεί με αρκετή ακρίβεια για να είναι χρήσιμο.

Για παράδειγμα, η αβεβαιότητα μπορεί να φτάσει στο 20% σε μετρήσεις με διειδυτή τύπου Vickers και ειδικά σε περιπτώσεις που η διαγώνιος του αποτυπώματος είναι 5 μm . Αυτό οφείλεται στο ότι η μέτρηση γίνεται με οπτική μέθοδο ενώ η αβεβαιότητα μπορεί να φτάσει στο 100% για ένα αποτύπωμα του 1 μm και γενικότερα όταν μειώνεται το βάθος διείδυσης [100]. Η ακίδα νανοδιείδυσης έχει σχήμα μιας πυραμίδας τριών πλευρών τύπου Berkovich και το υλικό της είναι συνήθως από διαμάντι. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται μία ακίδα νανοδιείδυσης και το αποτύπωμά της [101].

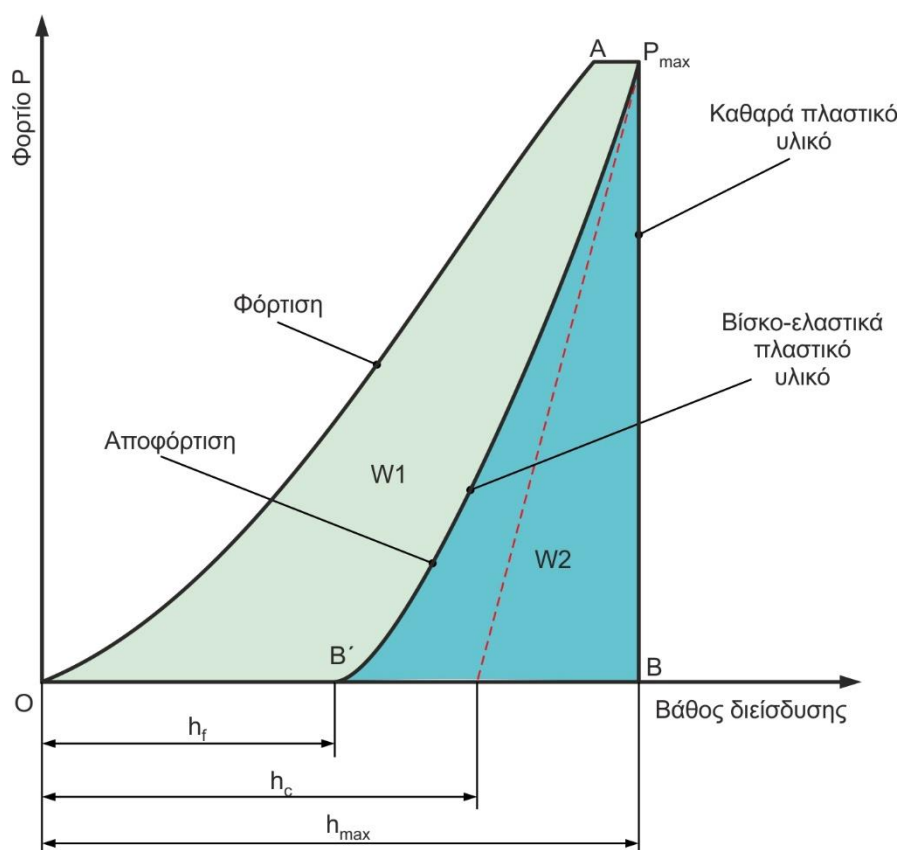


Σχήμα 3.10: α) ακίδα νανοδιείδυσης από μικροσκόπιο και β) αποτύπωμα ακίδας νανοδιείδυσης.

Σε ένα πείραμα νανοδιείδυσης καθώς η ακίδα εισέρχεται πιέζοντας την επιφάνεια του δοκιμίου με προκαθορισμένο προφίλ φόρτισης και αποφόρτισης, καταγράφεται η φόρτιση και το βάθος διείδυσης. Από το πείραμα νανοδιείδυσης λαμβάνεται το μέτρο ελαστικότητας και η σκληρότητα του υλικού. Στο σχήμα 3.11, παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης-βάθος διείδυσης σ' έναν κύκλο νανοδιείδυσης. Η υστέρηση δείχνει ότι η παραμόρφωση δεν είναι πλήρως ελαστική αλλά μερικώς πλαστική [102].

Η νανοδιείδυση είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών. Η σχέση φορτίου-παραμόρφωσης της διείδυσης σε μικρό και νάνο κλίμακα δίνει πληροφορίες για την ελαστικότητα, τη σκληρότητα, τη θραύση, τη μεταβολή φάσης, τον ερπυσμό και την απορρόφηση ενέργειας. Επίσης, μέσω νανοδιείδυσης δύναται να καθορισθούν οι ιδιότητες αντοχής σε χάραξη σε συνδυασμό με τη μέτρηση της πλευρικής δύναμης.

Η μέθοδος νανοδιείδυσης είναι μη καταστροφική και τα δοκίμια έχουν μικρές διαστάσεις. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε δοκίμια με λεπτές επιφανειακές επιστρώσεις, σε επιφανειακά διαμορφωμένα στρώματα, στην μικρο-ηλεκτρονική (αξιοπιστία μεταλλικών δεσμών), την τεχνολογία λεπτών υμενίων (αποτυχία κόλλησης) και τα πολυμερή [100, 102, 103].



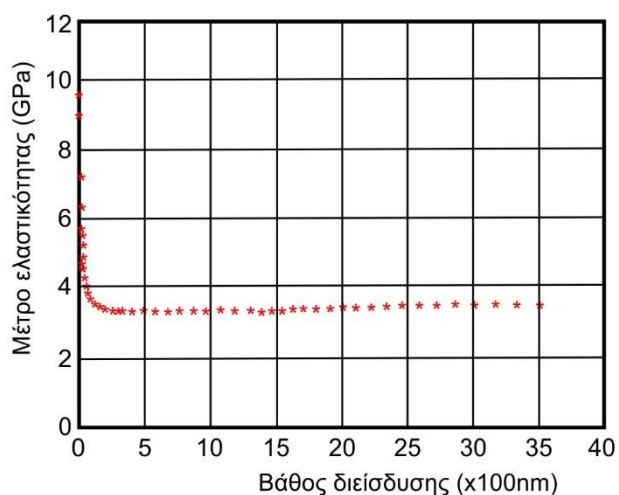
Σχήμα 3.11: Καμπύλη φόρτισης-αποφόρτισης από δοκιμή νανοδιείσδυσης.

3.4.1 Νανοδιείσδυση στα πολυμερή

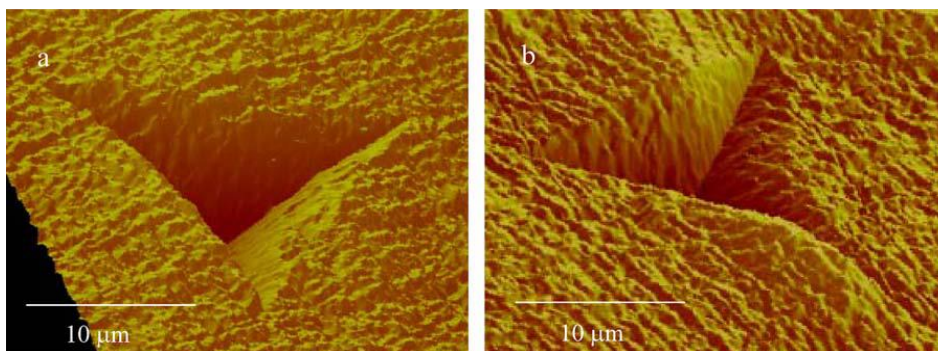
Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών μπορούν να οδηγήσουν σε αβεβαιότητες σε πολλές μεθόδους μηχανικών δοκιμών. Γι' αυτόν τον λόγο, το μέτρο ελαστικότητας που μετράται μέσω της νανοδιείσδυσης μπορεί να είναι διαφορετικό από αυτό του συμβατικού μονοαξονικού εφελκυσμού αλλά και άλλων μεθόδων δυναμικής μηχανικής ανάλυσης [103]. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε πως στη νανοδιείσδυση η τιμή του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζει εξάρτηση από το βάθος διείσδυσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Έτσι η τιμή του σε μικρά βάθη διείσδυσης είναι πολύ μεγάλη και μειώνεται δραματικά μέχρι μια τιμή του βάθους όπου και αρχίζει να σταθεροποιείται. Συνεπώς, για την επίτευξη σωστών μετρήσεων, πρέπει να επιδιώκεται βάθος διείσδυσης μεγαλύτερο της κρίσιμης αυτής τιμής.

Επίσης, κατά τη δοκιμή νανοδιείσδυσης ενδέχεται να συσσωρεύεται υλικό (pile-up) στις ακμές του αποτυπώματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13. Σε αυτήν την περίπτωση η ακίδα χρειάζεται βαθμονόμηση. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με δοκιμή νανοδιείσδυσης υλικού αναφοράς με γνωστό το μέτρο ελαστικότητας.

Οι τρέχουσες διαδικασίες βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται στη νανοδιείσδυση βασίζονται στη διείσδυση ενός υλικού αναφοράς του οποίου το μέτρο ελαστικότητας είναι γνωστό. Έτσι λαμβάνονται απαραίτητα μέτρα κατά την εφαρμογή της τεχνικής της νανοδιείσδυσης στα πολυμερή υλικά. Ένα τέτοιο πολύ γνωστό μοντέλο βαθμονόμησης της διαδικασίας νανοδιείσδυσης στα πολυμερή είναι το μοντέλο των W.C. Oliver και G.M. Pharr.



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης σε πολυμερή υλικά.



Σχήμα 3.13: Αποτυπώματα νανοδιείσδυσης σε πολυμερή.

3.4.2 Πείραμα νανοδιείσδυσης

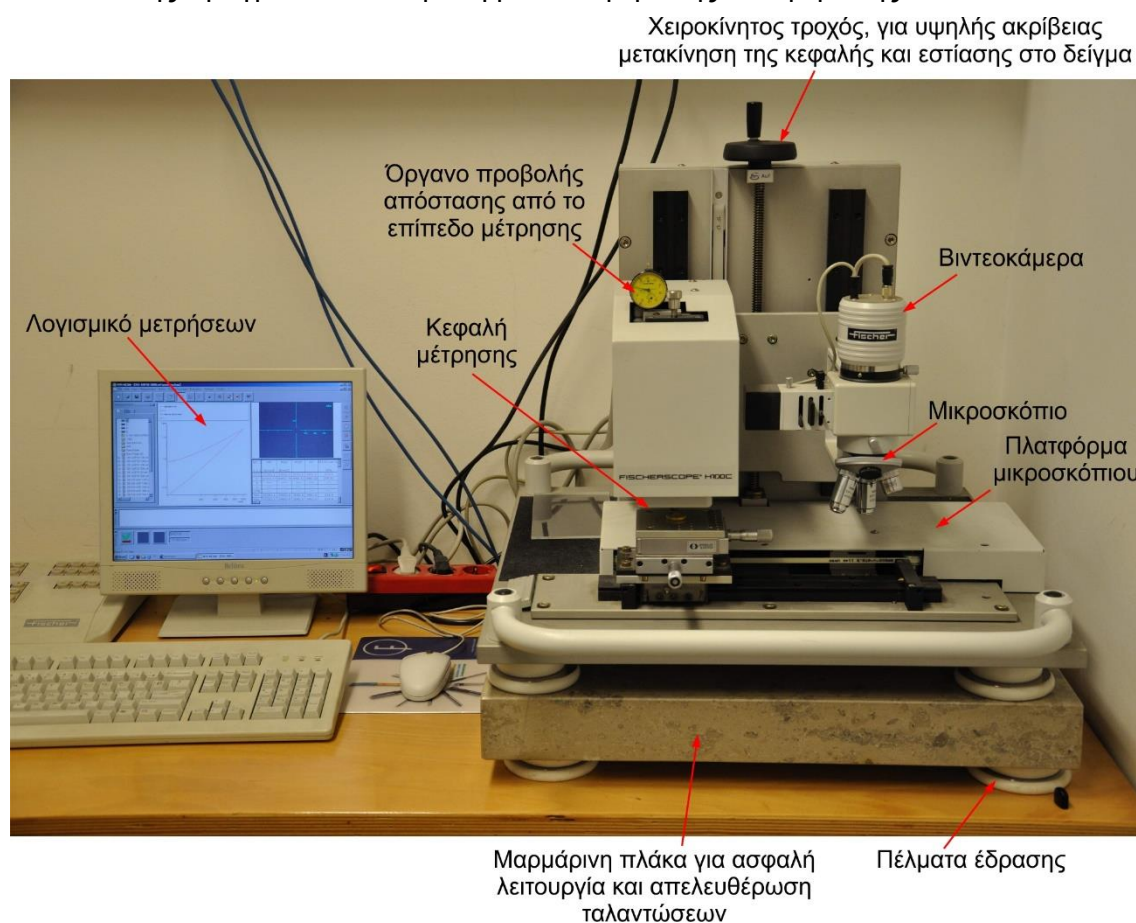
Το πείραμα νανοδιείσδυσης πραγματοποιήθηκε στη μηχανή FISCHERSCOPE® H100C με συσκευή τοποθέτησης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.14](#), σε συνδυασμό με το λογισμικό WIN-HCU® καθώς και το Microsoft Office Excel για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Τα χαρακτηριστικά της μηχανής είναι τα εξής:

- Υλικό εισβολέα: διαμάντι.
- Τύπος εισβολέα: Berkovich, Vickers, Knoop, μεταλλική σφαίρα διαμέτρου 0.5-2mm.
- Λογισμικό: WIN-HCU, πλήρως αυτοματοποιημένη.
- Περιοχή κίνησης της τράπεζας: 50x50mm.
- Καθοδήγηση της τράπεζας: μέσω υπολογιστή ή με ειδικό χειριστήριο.
- Ακρίβεια στην κατεύθυνση XY: 10μm.
- Εφαρμοζόμενο φορτίο: 1 μέχρι 1000mN με διακριτοποίηση 0.1mN.

Η παραπάνω μηχανή νανοδιείσδυσης έχει δυνατότητα μέτρησης της Γενικευμένης Σκληρότητας (Universal Hardness, HU), η οποία μπορεί να μετατραπεί σε σκληρότητα Vickers σύμφωνα με το DIN 50359 ή να μετρηθεί απευθείας η σκληρότητα Vickers σύμφωνα με το DIN 50153.

Για τη δοκιμή νανοδιείσδυσης έγινε χρήση κυλινδρικών δοκιμίων από κάθε υλικό και πραγματοποιήθηκαν σαράντα μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο με φορτίο 20mN. Από τις σαράντα

μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή τους για την τελική αξιολόγηση. Η δοκιμή νανοδιείσδυσης πραγματοποιείται με τη μέθοδο φόρτισης-αποφόρτισης.



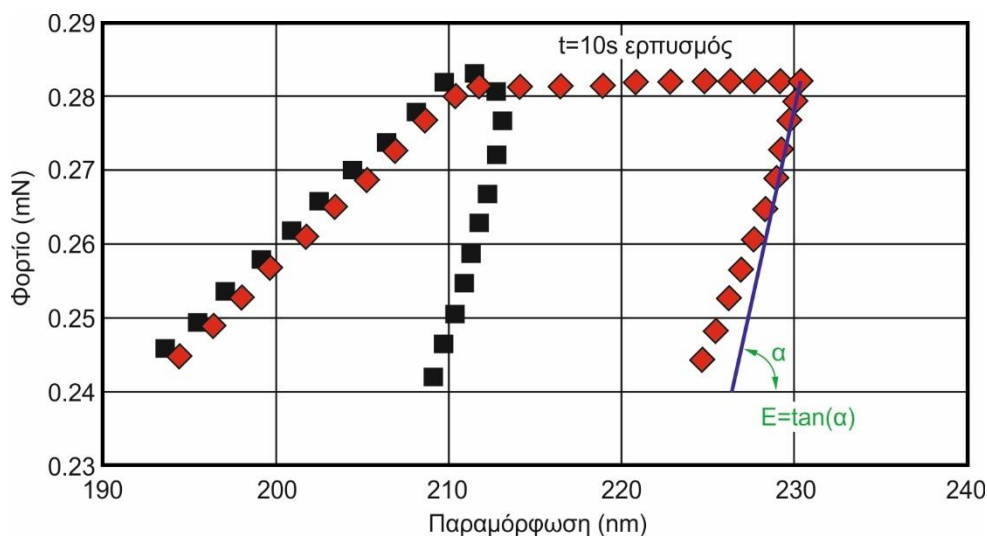
Σχήμα 3.14: FISCHERSCOPE® H100C.

Κατά την εκκίνηση της αποφόρτισης στη δοκιμή νανοδιείσδυσης, δημιουργείται μία καμπύλη στην ακμή του διαγράμματος, πράγμα που δυσκολεύει την χάραξη της επαπτόμενης ευθείας στην καμπύλη αποφόρτισης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.15](#). Σύμφωνα με το μοντέλο Oliver-Pharr που χρησιμοποιήθηκε και αναφέρεται παρακάτω [33], εφαρμόστηκε η μέθοδος του ερπυσμού του υλικού, βάσει της οποίας διατηρείται το μέγιστο φορτίο για 10 δευτερόλεπτα, προκειμένου το υλικό να έρθει σε μηχανική ισορροπία. Έτσι δημιουργείται ένα ευθύγραμμο τμήμα που βοηθά την χάραξη της επαπτόμενης ευθείας στην καμπύλη αποφόρτισης για τον ακριβή υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15.

Κατά την αποφόρτιση, παραμένει ένα εναπομένον βάθος h_f λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου και τη γεωμετρία του διεσδυτή. Κατά τις νανοδιεισδύσεις χρησιμοποιούνται μικρά φορτία, προκειμένου η περιοχή διείσδυσης που χρησιμοποιείται να είναι μόνον λίγα τετραγωνικά μικρόμετρα ή ακόμη καλύτερα νανόμετρα.

Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Oliver-Pharr για τη βαθμονόμηση της διαδικασίας πειραμάτων νανοδιείσδυσης. Το μοντέλο Oliver-Pharr θεωρείται καταλληλότερο για πολυμερή υλικά, γιατί η βαθμονόμηση με το συνηθισμένο υλικό Si(100), με τις γνωστές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας 185GPa, όριο διαρροής 55MPa, λόγος Poisson 0.2, σκληρότητα Martens 7.07GPa), είναι κατάλληλο για σκληρά υλικά και προκαλεί το φαινόμενο άμβλυνσης του εισβολέα και σε μαλακά υλικά μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα.

Το μοντέλο Oliver-Pharr που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του πειράματος νανοδιείδωσης, αναλύεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.



Σχήμα 3.15: Δοκιμή νανοδιείδωσης με και χωρίς ερπυσμό.

3.4.3 Το μοντέλο W.C. Oliver - G.M. Pharr

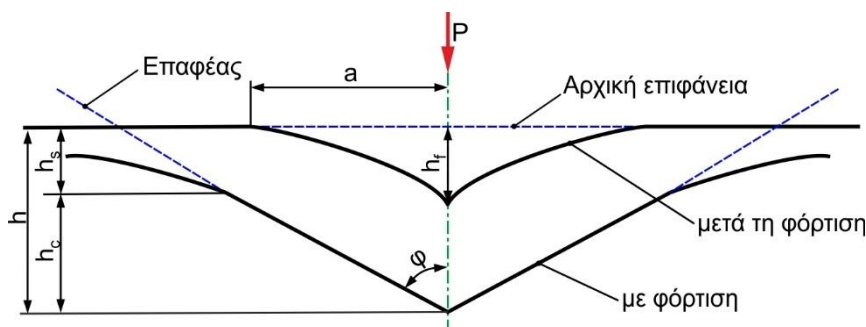
Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Oliver-Pharr για τη βαθμονόμηση της διαδικασίας πειραμάτων νανοδιείδωσης γιατί θεωρείται το καταλληλότερο για πολυμερή υλικά. Το μοντέλο Oliver-Pharr βασίζεται στη μελέτη της καμπύλης αποφόρτισης με την παραδοχή ότι είναι πλήρως ελαστική. Τα βασικά στοιχεία της βαθμονόμησης είναι η μετατόπιση h_s , το βάθος επαφής h_c και η επιφάνεια επαφής-δείγματος $A(h_c)$.

Διάφοροι μελετητές χρησιμοποιούν μόνο το αρχικό τμήμα της καμπύλης αποφόρτισης, το οποίο θεωρείται γραμμικό, για την αναλυτική προσέγγιση των δεδομένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως η αναλυτική προσέγγιση γίνεται με την παραδοχή ότι ο κλάδος της αποφόρτισης ακολουθεί τον εκθετικό νόμο:

$$P = \alpha_1 (h - h_f)^{m_1} \quad 3.26$$

όπου το α_1 και το m_1 είναι σταθερές της μεθόδου Oliver-Pharr οι οποίες σχετίζονται με το υλικό και τη γεωμετρία του διεισδυτή.

Στο σχήμα 3.16, παρουσιάζεται η αποφόρτιση, η οποία είναι η βάση για τον προσδιορισμό της σκληρότητας (H) και το μέτρο ελαστικότητας (E). Η μέθοδος προϋποθέτει ότι ο διεισδυτής Berkovich μπορεί να προσομοιωθεί με έναν κωνικό διεισδυτή με μισή γωνία ϕ , που δίνει την ίδια σχέση βάθους-επιφάνειας, $\phi = 70.3^\circ$ [104].



Σχήμα 3.16: Παράμετροι της διαδικασίας αποφόρτισης.

Βασική υπόθεση σ' αυτήν την μέθοδο είναι να θεωρηθεί ότι η συσσώρευση υλικού είναι αμελητέα. Η βύθιση h_s δίνεται από την εξίσωση:

$$h_s = \epsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad 3.27$$

όπου το ϵ είναι ένας συντελεστής διόρθωσης ($\epsilon \approx 0.75$) που εξαρτάται από τη γεωμετρία του διεισδυτή και την ελαστικότητα του πλαισίου της συσκευής S .

Συνεπώς, από την σχέση 3.27 προκύπτει το βάθος κατά μήκος του οποίου γίνεται επαφή μεταξύ του επαφέα και του υλικού:

$$h_c = h_{\max} - \epsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad 3.28$$

Θεωρώντας $F(h_c)$, η συνάρτηση του εμβαδού που περιγράφει την προβαλλόμενη περιοχή του διεισδυτή σε απόσταση d από την κορυφή του, τότε η επιφάνεια επαφής είναι:

$$A = F(h_c) \quad 3.29$$

Και η σκληρότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad 3.30$$

Το μέτρο ελαστικότητας E προκύπτει από την εξίσωση:

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{\text{eff}} \sqrt{A} \quad 3.31$$

όπου E_{eff} είναι το ανηγμένο μέτρο ελαστικότητας και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad 3.32$$

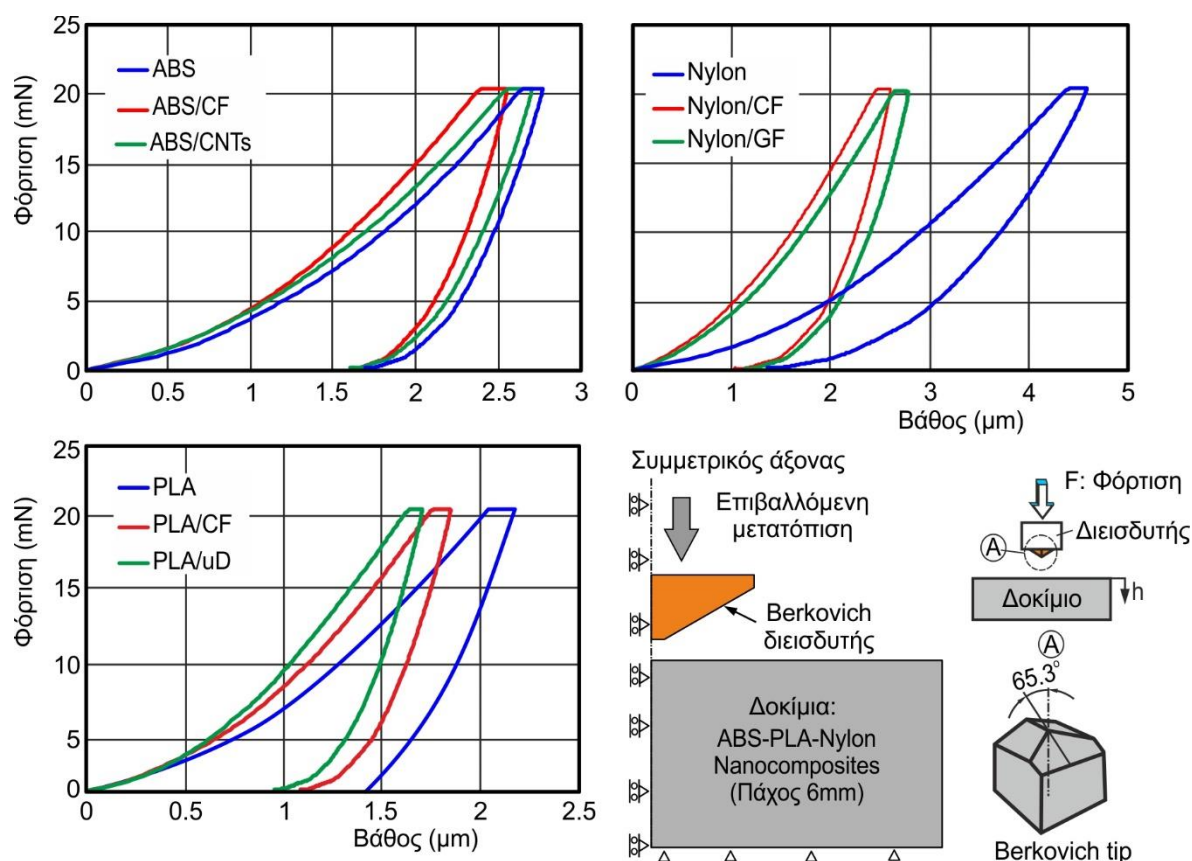
όπου: E , ν είναι αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας και αναλογία Poisson του υλικού
 E_i , ν_i είναι αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας και αναλογία Poisson του διεισδυτή.

Από το διάγραμμα φόρτισης-αποφόρτισης κάθε δοκιμίου υπολογίζεται η ελαστικότητα S . Τέλος προσδιορίζεται το μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της επιφάνειας A .

3.4.4 Αποτελέσματα πειραμάτων νανοδιείσδυσης

Η σκληρότητα καθώς και το μέτρο ελαστικότητας των εξεταζόμενων νανοςύνθετων υλικών υπολογίστηκαν μέσω του πειράματος νανοδιείσδυσης. Οι τυπικές καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης των εκτυπωμένων δοκιμίων από ABS, ABS/CF και ABS/CNTs του πειράματος νανοδιείσδυσης, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17. Οι καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης του διεισδυτή ενάντια στην επιφάνεια των δοκιμίων. Τα πειραματικά δεδομένα από τη δοκιμή νανοδιείσδυσης φαίνονται στον πίνακα 3.4.

Οι καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης από το πείραμα νανοδιείσδυσης των εξεταζόμενων δοκιμίων παρουσίασαν το φαινόμενο του ερπυσμού (creep phenomenon) σε μέγιστο φορτίο 20mN. Δεν υπήρξαν αποκλίσεις στη συμπεριφορά ερπυσμού μεταξύ των εκτυπωμένων δοκιμίων καθώς δεν εντοπίστηκαν ασυνέχειες ή βήματα φόρτισης στις καμπύλες, αποκαλύπτοντας πως δεν αναπτύχθηκαν ρωγμές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας νανοδιείσδυσης. Επιπροσθέτως, τα μέγιστα βάθη διείσδυσης στη μέγιστη φόρτιση των 20mN διαφοροποιήθηκαν μεταξύ 2.5 και 2.7μm. Το υψηλότερο βάθος διείσδυσης παρατηρήθηκε για τα δοκίμια από σκέτο ABS, όπου ο διεισδυτής έφτασε μια μέση τιμή βάθους των 2.7μm.



Σχήμα 3.17: Διαγράμματα φόρτισης-βάθους διείσδυσης από το πείραμα νανοδιείσδυσης.

Στα δοκίμια από ABS/CNTs διαπιστώθηκε μια μέγιστη μέση τιμή βάθους των 2.6μm. Η στιβαρότερη συμπεριφορά εντοπίστηκε στην περίπτωση των δοκιμίων από ABS/CF, όπου η μέγιστη μέση τιμή βάθους μετρήθηκε στα 2.5μm. Το μέτρο ελαστικότητας (E-modulus) από το πείραμα νανοδιείσδυσης των δοκιμίων από σκέτο ABS είναι 2579MPa. Κατόπιν ενσωμάτωσης CNTs και CF στην πολυμερική μήτρα ABS, υπήρξε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μέχρι 2657 και 3652MPa αντίστοιχα, το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση της τάξεως του 3% και 41% αντίστοιχα. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές οι οποίες υπολογίστηκαν από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης. Επίσης, η σκληρότητα του ABS χωρίς κάποια προσθήκη είναι 137.4MPa και οι τιμές των ABS/CNTs και ABS/CF είναι 152.4MPa (11% αύξηση) και 155.5MPa (13% αύξηση) αντίστοιχα.

Οι τυπικές καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης των εκτυπωμένων δοκιμίων από Nylon, Nylon/CF και Nylon/GF από τη δοκιμή νανοδιείσδυσης, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17. Οι καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αποφόρτισης του διεισδυτή ενάντια στην επιφάνεια των δοκιμίων. Τα μέγιστα βάθη διείσδυσης στη μέγιστη φόρτιση των 20mN διαφοροποιήθηκαν μεταξύ 2.6 και 4.5μm. Το υψηλότερο βάθος διείσδυσης παρατηρήθηκε για τα δοκίμια από Nylon χωρίς κάποια προσθήκη, όπου ο διεισδυτής έφτασε μια μέση τιμή βάθους των 4.5μm.

Τα δοκίμια από Nylon/GF παρουσίασαν μια μέση τιμή βάθους των 2.7μm. Η στιβαρότερη συμπεριφορά εντοπίστηκε στην περίπτωση των δοκιμίων από Nylon/CF, όπου η μέση τιμή βάθους μετρήθηκε στα 2.6μm. Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας (E-modulus) από το πείραμα νανοδιείσδυσης των δοκιμίων από Nylon χωρίς κάποια πρόσμιξη είναι 592MPa. Κατόπιν ενσωμάτωσης CF και GF στην πολυμερική μήτρα Nylon, υπήρξε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας το οποίο είναι ίσο με 2617 και 2168MPa αντίστοιχα, το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση της τάξεως του 342% και 266% αντίστοιχα. Τέλος, η σκληρότητα του σκέτου Nylon

είναι 55MPa και οι τιμές των Nylon/CF, Nylon/GF είναι 153MPa (178% αύξηση) και 130MPa (136% αύξηση) αντίστοιχα.

Υλικά	Σκληρότητα (N/mm ²)	Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)
ABS	137.4 ± 18.4	2579 ± 247
ABS/CF	155.5 ± 19	3652 ± 436
ABS/CNTs	152.4 ± 12.3	2657 ± 157
PLA	142.7 ± 33	3535 ± 500
PLA/CF	280.2 ± 47	5994 ± 743
PLA/uD	393.1 ± 61.4	6934 ± 588.4
Nylon	55.0 ± 10.2	592 ± 54
Nylon/CF	153.0 ± 32.3	2617 ± 249
Nylon/GF	130.0 ± 21.4	2168 ± 291

Πίνακας 3.4: Σκληρότητα και μέτρο ελαστικότητας των νανοσύνθετων υλικών.

Ακολούθως, οι τυπικές καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης των εκτυπωμένων δοκιμίων από PLA, PLA/CF και PLA/uD από τη δοκιμή νανοδιείσδυσης, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17. Οι καμπύλες φόρτισης-βάθους διείσδυσης αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αποφόρτισης του διεισδυτή ενάντια στην επιφάνεια των δοκιμίων. Τα μέγιστα βάθη διείσδυσης στη μέγιστη φόρτιση των 20mN διαφοροποιήθηκαν μεταξύ 1.6 και 2.2μm. Το υψηλότερο βάθος διείσδυσης παρατηρήθηκε για τα δοκίμια από PLA χωρίς κάποια προσθήκη, όπου ο διεισδυτής έφτασε μια μέση τιμή βάθους των 2.2μm.

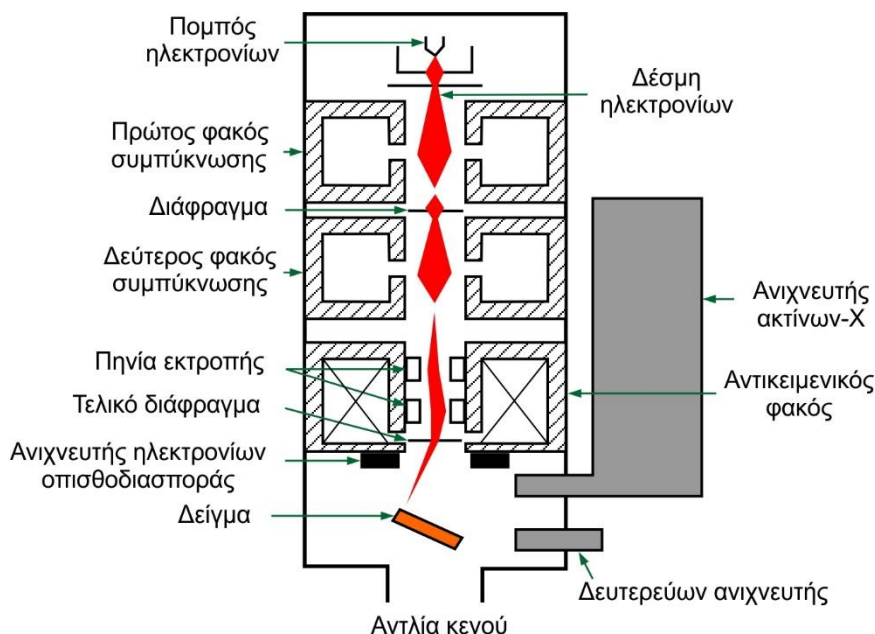
Τα δοκίμια από PLA/CF παρουσίασαν μια μέση τιμή βάθους των 1.85μm. Η στιβαρότερη συμπεριφορά εντοπίστηκε στην περίπτωση των δοκιμίων από PLA/uD, όπου η μέση τιμή βάθους μετρήθηκε στα 1.69 μm. Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας (E-modulus) από το πείραμα νανοδιείσδυσης των δοκιμίων από PLA χωρίς κάποια πρόσμειξη είναι 3535MPa. Κατόπιν ενσωμάτωσης ινών άνθρακα (CF) και νανοδιαμαντιού (uD) στην πολυμερική μήτρα PLA, υπήρξε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας το οποίο είναι ίσο με 5994 και 6934MPa αντίστοιχα, το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση της τάξεως του 69% και 96% αντίστοιχα. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές οι οποίες υπολογίστηκαν από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης. Τέλος, η σκληρότητα του σκέτου PLA είναι 142.7MPa και οι τιμές των PLA/CF, PLA/uD είναι 280.2MPa (96% αύξηση) και 393.1MPa (175% αύξηση) αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και συνεπώς τη στιβαρότερη συμπεριφορά στην οικογένεια υλικών ABS εμφάνισαν τα δοκίμια από ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF) συγκριτικά με τα δοκίμια από ABS χωρίς κάποια πρόσμειξη καθώς και ABS/CNTs. Το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας στην οικογένεια υλικών Nylon παρατηρήθηκε στα δοκίμια από Nylon/CF σε σχέση με τα δοκίμια από σκέτο Nylon και Nylon/GF ενώ τέλος στην οικογένεια υλικών PLA η στιβαρότερη συμπεριφορά παρατηρήθηκε στα νανοσύνθετα δοκίμια PLA/uD συγκριτικά με το PLA χωρίς κάποια προσθήκη και το PLA/CF.

Στη συνέχεια τα πειραματικά αποτελέσματα της νανοδιείσδυσης αποκάλυψαν πως τα δοκίμια από ABS/CF είχαν τη μεγαλύτερη σκληρότητα συγκριτικά με το σκέτο ABS και το ABS/CNTs. Επίσης, στην οικογένεια υλικών Nylon τη μεγαλύτερη τιμή στη σκληρότητα εμφάνισαν τα δοκίμια από Nylon ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (Nylon/CF) ενώ τέλος τα δοκίμια από PLA/uD φανέρωσαν τη μεγαλύτερη σκληρότητα έναντι του σκέτου PLA και του PLA/CF.

3.5 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Η μικροσκοπία σάρωσης (SEM) είναι μια τοπογραφική μελέτη στερεών επιφανειών. Η βασική λειτουργία της μικροσκοπίας σάρωσης αποτελεί η αλληλεπίδραση μιας δέσμης ηλεκτρονίων που επιτυγχάνεται με δυναμικά από 5 έως και δεκάδες keV, με άτομα στην επιφάνεια του εξεταζόμενου στερεού μέσω συστημάτων ηλεκτρονικής εκτροπής. Πληροφορίες του δοκιμίου λαμβάνονται με την ανίχνευση ηλεκτρονίων που εκπέμπονται δευτερογενώς. Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).



Σχήμα 3.18: Στοιχεία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

Η επιφανειακή ανάλυση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μπορεί να φτάσει στα 250Å (25nm). Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο σάρωσης επιφανειών και δίνει σαφείς πληροφορίες και συμπεράσματα για την καταλληλότητα των συνθηκών κατεργασιών που ενδεχομένως να εφαρμόζονται [105].

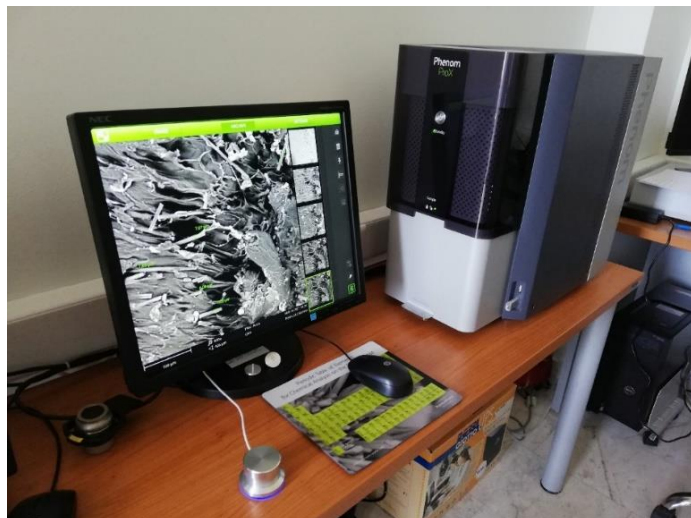
Τα στάδια λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Μία δέσμη ηλεκτρονίων επιταχύνεται προς το δοκίμιο μέσω ενός θετικού ηλεκτρικού δυναμικού.
2. Μία λεπτή εστιασμένη μονοχρωματική δέσμη επιτυγχάνεται μέσω μεταλλικών ανοιγμάτων, ηλεκτρομαγνητικών φακών και πηγών σάρωσης. Η λεπτή μονοχρωματική δέσμη σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου.
3. Ανιχνευτές καταγράφουν τις αλληλεπιδράσεις της δέσμης δοκιμίου, οι οποίες μετατρέπονται σε εικόνα.

3.5.1 Χαρακτηρισμός της μορφολογίας των δοκιμίων

Στο μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης Phenom ProX (ThermoFisher Scientific, MA, USA), μελετήθηκαν οι επιφανειακές παραμορφώσεις χαρακτηριστικών δειγμάτων της κάθε ομάδας δοκιμίων από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19.

Κατά την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης των πολυμερών κρίνεται αναγκαία η προσκόλληση των δοκιμίων σε ειδική βάση και η επικάλυψη αυτών με άνθρακα προκειμένου να γίνουν αγωγιμα, λόγω της κατάστασης υψηλού κενού κατά τη σάρωση.



- Ύψος δοκιμίου 35mm (προαιρετικά 100mm).
- Διάμετρος δοκιμίου 25mm (προαιρετικά 32mm).
- Ανάλυση μικρότερη ίση με 6nm SED και μικρότερη ίση με 8nm BSD.
- Έγχρωμη κάμερα οπτικής πλοήγησης.
- Ψηφιακό zoom max. 12x.
- Εύρος οπτικής μεγέθυνσης ηλεκτρονίων 160-350.000x.
- Μεγέθυνση οπτικού φωτός 27-160x.

Σχήμα 3.19: Χαρακτηριστικά της Phenom ProX Desktop SEM.

Οι δοκιμές ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να εξεταστούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων νανοσύνθετων δοκιμίων καθώς και για τον έλεγχο της επιρροής των συστατικών ενίσχυσης στις πολυμερικές μήτρες μετά το πείραμα μονοαξονικής θλίψης (ανομοιόμορφη διασπορά νανোসωματιδίων, συσσωματώματα, φυσαλίδες).

Κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης Phenom ProX αποτελούν η διάμετρος του δοκιμίου η οποία ισούται με 25mm (προαιρετικά 32mm) και το ύψος του δοκιμίου το οποίο ισούται με 35mm (προαιρετικά 100mm) καθώς και ανάλυση μικρότερη ίση με 6nm SED και μικρότερη ίση με 8nm BSD.

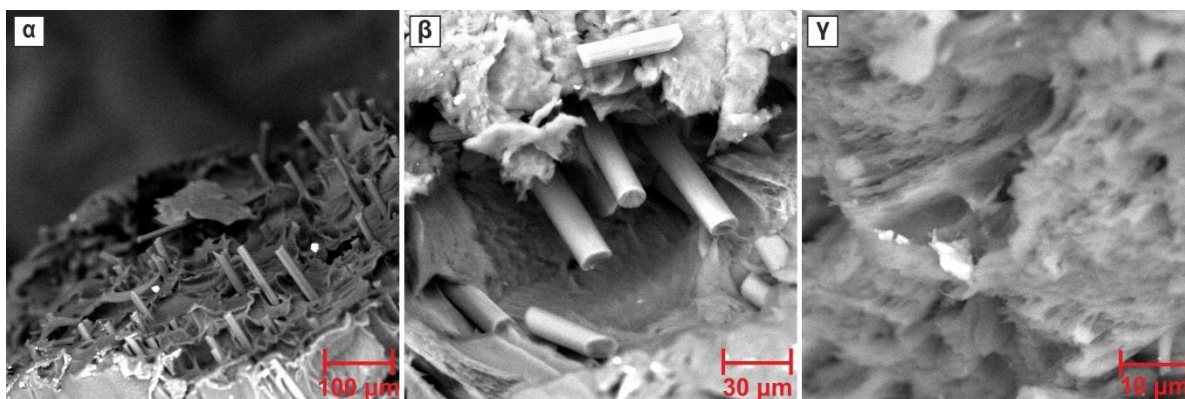
3.5.2 Αποτελέσματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης των δοκιμίων

Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζονται οι μικρογραφίες των δοκιμίων του ακρυλονιτρίλιου βουταδιένιου στυρένιου ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF) καθώς και του ABS ενισχυμένο με νανოსωλήνες άνθρακα (ABS/CNTs) από τα πειράματα θλίψης, κατόπιν χρήσης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης Phenom ProX (ThermoFisher Scientific, MA, USA). Συγκεκριμένα, το σχήμα 3.20(α) φανερώνει πως το υλικό ABS/CF το οποίο έδειξε βελτιωμένη θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, παρήγαγε σημαντική ευθυγράμμιση ινών κατά την κατεύθυνση της διαδρομής εκτύπωσης σύμφωνα με ό,τι έχει παρατηρηθεί σε άλλες μελέτες [20, 25].

Επομένως, μπορεί να υποθεθεί με ασφάλεια ότι οι ίνες άνθρακα ήταν ευθυγραμμισμένες εντός του νήματος τροφοδοσίας και παρέμειναν ευθυγραμμισμένες στα δοκιμασμένα δείγματα που παράγονται από τη διαδικασία της εκτύπωσης. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το ABS λιώνει από το ακροφύσιο εξώθησης και οι ίνες μέσα στο αποτιθέμενο υλικό έχουν μια τάση να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση εξώθησης του τηγμένου θερμοπλαστικού.

Επίσης, στο σχήμα 3.20(β) φαίνεται πως οι μικροΐνες άνθρακα έχουν αποκολληθεί από τη μήτρα ABS, ενώ οι μικροΐνες παρουσιάζουν τυπική ψαθυρή εγκάρσια θραύση. Στο σχήμα

3.20(γ) παρουσιάζεται μια τυπική επιφάνεια ABS/CNTs σε ιδιαίτερα υψηλή ανάλυση. Αν και δεν είναι δυνατό να απεικονισθούν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μεμονωμένα οι νανοσωλήνες άνθρακα, αμυδρά φαίνονται ως συσσωματώματα νανοϊνιδίων με καλό διασκορπισμό σε όλη την επιφάνεια απεικόνισης.



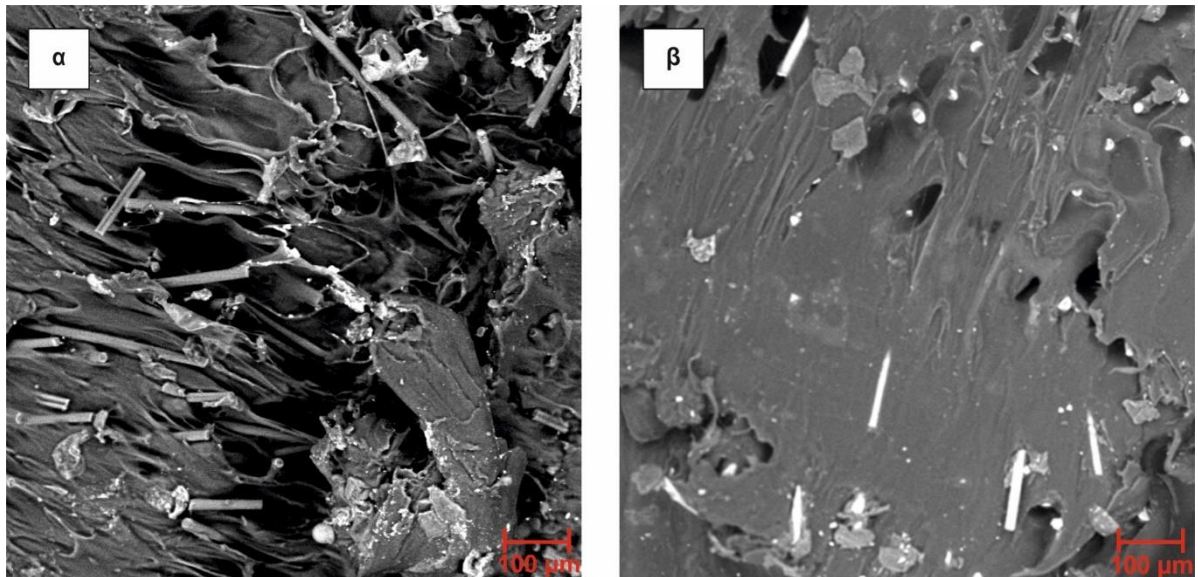
Σχήμα 3.20: Απεικόνιση μικρογραφιών ηλεκτρονικής σάρωσης (α) και (β) ABS/CF και (γ) ABS/CNTs.

Οι μικρογραφίες των δοκιμίων πολυμερικής μήτρας πολυαμίδιου (Nylon) με πρόσμειξη ινών άνθρακα (Nylon/CF) καθώς και γυαλιού (Nylon/GF) ως συστατικά ενίσχυσης, φαίνονται στο σχήμα 3.21. Η διεπιφάνεια της πολυμερικής μήτρας από πολυαμίδιο (Nylon) με τις ίνες άνθρακα (CF) δεν είναι ικανοποιητική όπως φαίνεται από την εύκολη και εκτεταμένη αποκόλληση των ινών. Στην περίπτωση της πολυμερικής μήτρας από πολυαμίδιο (Nylon) με πρόσμειξη ινών γυαλιού (GF) παρουσιάζονται επίσης κάποιες αποκολλήσεις, ενώ εμφανίζονται και ίνες που έχουν αστοχήσει εγκάρσια ίσως λόγω του ιδιαίτερου σημείου της μικρογραφίας όπου ενδεχομένως να υπάρχει αλλαγή στη φορά της εκτύπωσης.

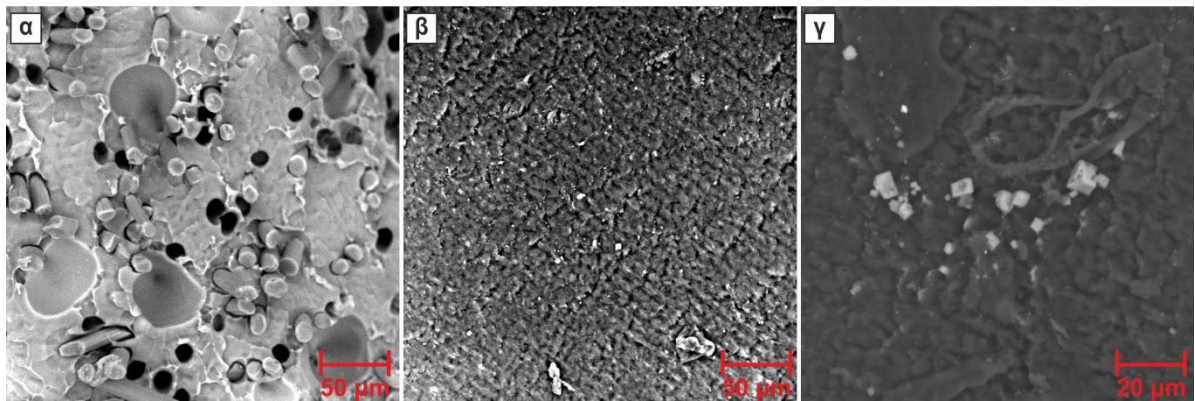
Στο σχήμα 3.22 απεικονίζονται οι μικρογραφίες της πολυμερικής μήτρας από πολυγαλακτικό οξύ (PLA) με ενσωμάτωση ινών άνθρακα (PLA/CF) καθώς και νανοδιαμαντιού (PLA/uD) ως συστατικά ενίσχυσης. Λίγες μόνο μικροϊνες είναι εμφανείς και προεξέχουν, γεγονός που δείχνει την καλή ανάμιξη των μικροϊνών με τη μήτρα. Η διεπιφάνεια της πολυμερικής μήτρας από πολυγαλακτικό οξύ (PLA) με τον ενισχυτικό παράγοντα από ίνες άνθρακα (CF) είναι αρκετά καλή με λίγες αποκολλήσεις περιμετρικά των ινών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22(α).

Το πορώδες που εμφανίζεται στις μικρογραφίες ουσιαστικά είναι μαύρες οπές από περιοχές όπου υπήρχαν ίνες και αποκολλήθηκαν (διαδικασία εξόλκευσης) κατά την προετοιμασία του δοκιμίου. Κάποιες μεγαλύτερες μη πλήρως συμμετρικές αυλακώσεις (ελλειψοειδές σχήμα με τη μεγάλη διάμετρο) προέρχονται από εγκλωβισμένη υγρασία που κατά την υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης εξατμίστηκε.

Το νανοςύνθετο υλικό από πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) παρουσιάζεται στο σχήμα 3.22(β, γ). Εμφανής είναι η τραχύτητα της επιφάνειας η οποία οφείλεται στην ενίσχυση με νανοσωματίδια από διαμάντι. Παρατηρείται καλή διασπορά μεταξύ της πολυμερικής μήτρας PLA και του συστατικού ενίσχυσης από νανοδιαμάντι, όπου τα πρόσθετα εμφανίζονται ως νιφάδες οι οποίες βιβλιογραφικά έχουν πάχος λίγων νανόμετρων [25]. Ωστόσο, υπάρχουν και περιοχές με εμφανείς μικροκρυστάλλους οι οποίες είναι συσσωματώματα κρυσταλλικών νιφάδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22(γ).



Σχήμα 3.21: Απεικόνιση μικρογραφιών ηλεκτρονικής σάρωσης (α) Nylon/CF και (β) Nylon/GF.



Σχήμα 3.22: Απεικόνιση μικρογραφιών ηλεκτρονικής σάρωσης (α) PLA/CF και (β, γ) PLA/υD.

4. Ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές

4.1 Εισαγωγή στις ιεραρχίες

Ο συνδυασμός των σύνθετων υλικών με τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει την κατασκευή καινοτόμων δομών με προηγμένα χαρακτηριστικά σχεδιασμού που βασίζονται σε ιεραρχικές τάξεις. Στη φύση, οι δομές της τάξεως του νανόμετρου έως τις ορατές τάξεις μεγέθους είναι συχνά ιεραρχικά οργανωμένες, προσφέροντας εντυπωσιακά σχέδια [47, 63, 106, 107]. Αυτές οι δομές συνήθως παρουσιάζουν πολυσύνθετη ιεραρχική τάξη και κάθε επίπεδο ιεραρχίας συμβάλλει στη μηχανική σταθερότητα και στιβαρότητα του προκύπτοντος σχεδίου [47, 51].

Υπάρχουν πολυάριθμες περιπτώσεις που επιβεβαιώνουν τη μεγάλη σημασία και ανάγκη της ιεραρχίας, οι οποίες ποικίλλουν από πολυμερή με ιεραρχικές δομές σε μικρο και νάνο επίπεδο [52] έως πλάκες sandwich με αφρούς ή σύνθετες πλεγματικές δομές ως πυρήνες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια ιεραρχική δομή μπορεί να παρέχει εξαιρετικές προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, τα διάφορα μήκη των κυψελών και τα επίπεδα ιεραρχίας διέπουν τη μηχανική απόδοση αυτών των κυψελοειδών δομών. Η αύξηση των επιπέδων ιεραρχίας οδηγεί σε δομές με βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά ενώ παράλληλα είναι ελαφρείς.

Επιπροσθέτως, η καμπτική παραμόρφωση των κυψελοειδών τοιχωμάτων καθώς και η σχετική πυκνότητα των κυψελοειδών κατασκευών, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη στιβαρότητα και την αντοχή αυτών των δομών [55, 63, 106, 107]. Για τέτοιες κατασκευές και υπό ομοιόμορφη εγκάρσια φόρτιση, η μέγιστη ροπή κάμψης σε κάθε κυψελοειδές τοίχωμα πραγματοποιείται στις κορυφές της κυψέλης (δηλαδή στις γωνίες του κυψελοειδούς τοιχώματος). Συνεπώς, μετατοπίζοντας υλικό από το μεσαίο τμήμα κάθε τοιχώματος πιο κοντά στις κορυφές μπορεί δυνητικά να βελτιωθεί η εγκάρσια στιβαρότητα και αντοχή [57, 63, 106, 107].

Τέλος, οι κυψελοειδείς δομές έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλους τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική βιομηχανία, η αρχιτεκτονική, η βιοϊατρική και συγκεκριμένα σε διάφορες εφαρμογές που περιέχουν δομική προστασία, ενεργειακή απορρόφηση κρούσης, θερμομόνωση, καθώς και ως πυρήνες ελαφριών πάνελ sandwich [54].

4.2 Σχεδιασμός και κατασκευή ιεραρχικών κυψελοειδών δομών

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, οι κορυφές μιας κανονικής εξαγωνικής δομής αντικαταστάθηκαν με μικρότερα εξάγωνα, με σκοπό την επίτευξη της πρώτης ιεραρχίας στο τελικό σχήμα της δομής. Παράλληλα, το πάχος των κυψελοειδών τοιχωμάτων μειώθηκε προκειμένου να διατηρηθεί η συνολική πυκνότητα. Οι μεγαλύτερες ιεραρχίες παρουσίασαν αυξημένη αντοχή και στιβαρότητα σε σύγκριση με την αντίστοιχη κανονική εξαγωνική δομή με την ίδια σχετική πυκνότητα. Με βάση αυτήν την προσέγγιση, οι ιεραρχικές εξαγωνικές δομές μπορούν να επιτευχθούν με μεγαλύτερα επίπεδα δομικής ιεραρχίας, εάν επαναληφθεί η διαδικασία αντικατάστασης για τις κορυφές τριών άκρων. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η κυψέλη της κανονικής εξαγωνικής δομής καθώς αντίστοιχα και των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών.

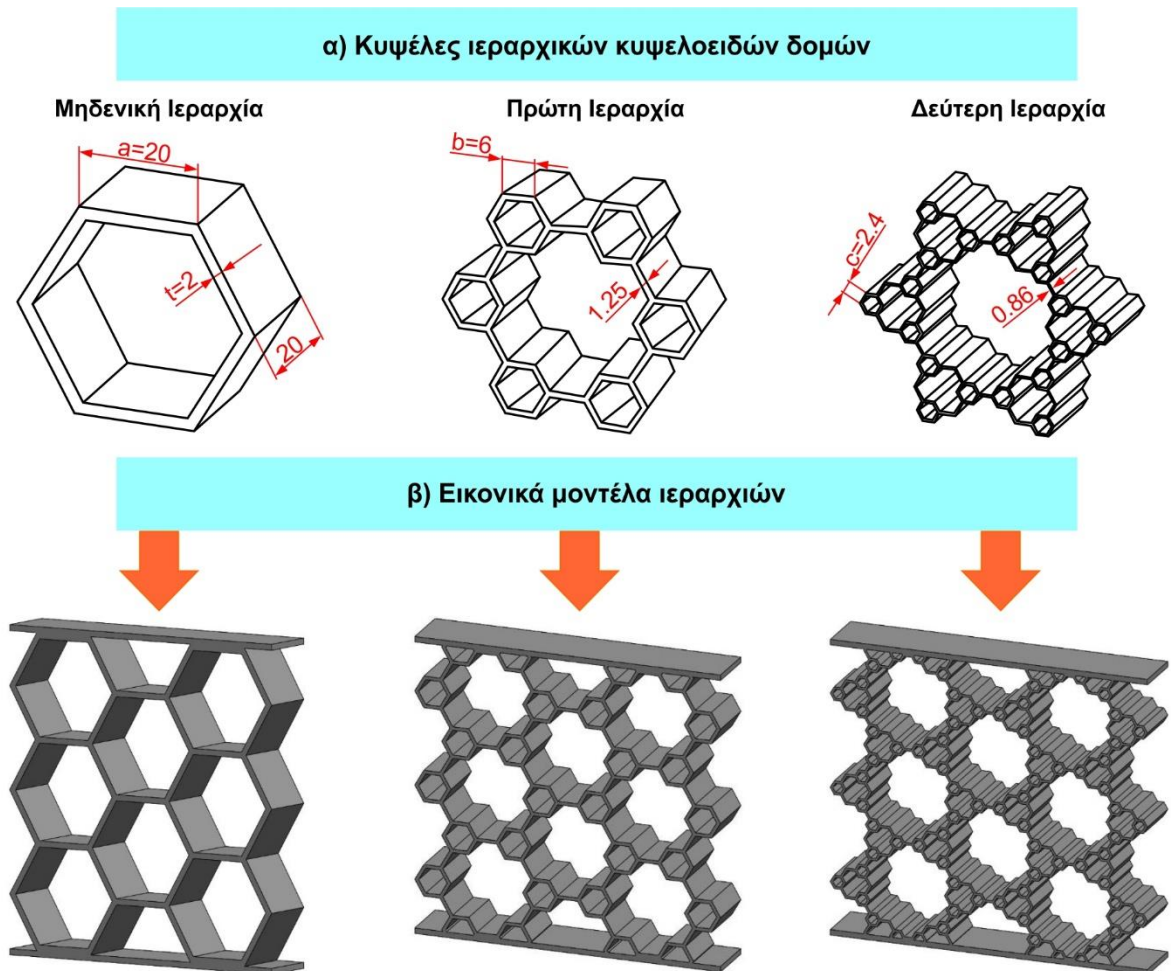
Η δομική οργάνωση της κυψέλης για κάθε επίπεδο ιεραρχίας μπορεί να προσδιοριστεί ως ο λόγος του προτεινόμενου εξαγωνικού μήκους (b για το πρώτο επίπεδο ιεραρχίας και c για το δεύτερο επίπεδο ιεραρχίας) προς το κανονικό εξαγωνικό μήκος a , όπως περιγράφεται στο σχήμα 4.1(α), δηλαδή $\gamma_1 = b/a$ και $\gamma_2 = c/a$ [57]. Για την πρώτη ιεραρχική κυψελοειδή δομή ισχύει $0 \leq b \leq a/2$ και συνεπώς, $0 \leq \gamma_1 \leq 0.5$. Επιπλέον, όπου $\gamma_1 = 0$ υποδηλώνεται μία κανονική

εξαγωνική δομή. Για τη δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή εισάγονται δύο γεωμετρικοί περιορισμοί: $0 \leq c \leq b$ και $c \leq a/2 - b$. Σε ότι αφορά τους συντελεστές αναλογίας, οι περιορισμοί είναι $0 \leq \gamma_2 \leq \gamma_1$ εάν $\gamma_1 \geq 0.25$ και $0 \leq \gamma_2 \leq (0.5 - \gamma_1)$ εάν $0.25 \leq \gamma_1 \leq 0.5$. Η αδιάστατη σχετική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί σε σχέση με το t/a :

$$\rho_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1 + 2\gamma_1 + 6\gamma_2) \cdot \frac{t}{a} \quad (4.1)$$

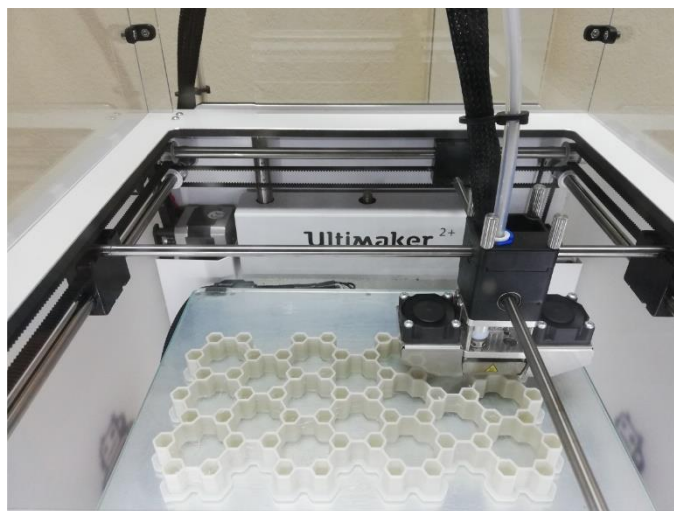
όπου t είναι το πάχος του κυψελοειδούς τοιχώματος.

Για διαφορετικές τιμές των γ_1, γ_2 , η σχετική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί, ειδικότερα στην περίπτωση όπου $\gamma_1, \gamma_2 = 0$, αυτό μπορεί κατευθείαν να σχετιστεί με το πάχος και το αρχικό εξαγωνικό μήκος. Συνεπώς, για την κανονική εξαγωνική δομή, η σχετική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί από τον εξής τύπο $\rho_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{t}{a}$. Επιπροσθέτως, για την πρώτη ιεραρχική κυψελοειδή δομή, η σχετική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί από $\rho_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1 + 2\gamma_1) \cdot \frac{t}{a}$ και τέλος για τη δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή, η σχετική πυκνότητα υπολογίζεται από $\rho_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (1 + 2\gamma_1 + 6\gamma_2) \cdot \frac{t}{a}$. Αυτή η σχέση παρουσιάζει ξεκάθαρα πως το t/a πρέπει να μειωθεί, έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερή η σχετική πυκνότητα, καθώς αυξάνονται τα γ_1, γ_2 [57].



Σχήμα 4.1: Ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές: α) κυψέλη της κανονικής εξαγωνικής δομής και των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών και β) εικονικά μοντέλα των ιεραρχιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε μελέτη και αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας και βάσει αυτών στο τέταρτο κεφάλαιο επιλέχθηκαν τελικώς δύο βέλτιστα υλικά. Συγκεκριμένα, τα επιλεγμένα βέλτιστα υλικά ήταν το ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF) και το νανοσύνθετο υλικό PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD). Στη συνέχεια τα δύο βέλτιστα υλικά χρησιμοποιήθηκαν στην εκτύπωση των εξεταζόμενων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών με σκοπό τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους πειραματικώς υπό μονοαξονική θλίψη καθώς και θεωρητικώς μέσω αναπτυγμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Τρισδιάστατη εκτύπωση κυψελοειδής δομής πρώτης ιεραρχίας με χρήση του βέλτιστου υλικού PLA/uD.

Η κατασκευή των τρισδιάστατων εκτυπωμένων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού εκτυπωτή Ultimaker 2+ μέσω της μεθόδου μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF), όπως και στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων. Επίσης, έγινε χρήση του λογισμικού Cura, το οποίο είναι συμβατό με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή Ultimaker 2+, για τον ορισμό και την επεξεργασία των παραμέτρων εκτύπωσης. Οι παράμετροι εκτύπωσης που αφορούν τη σχεδίαση παρέμειναν ίδιες για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, ανεξαρτήτως υλικού.

Αρχικά στο λογισμικό Cura ορίστηκε το μοντέλο του εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα καθώς και βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν τις ρυθμίσεις του εκτυπωτή, της κεφαλής εκτύπωσης και του ακροφύσιου εξώθησης. Έπειτα, δημιουργήθηκαν τα προφίλ των νανοσύνθετων εξεταζόμενων υλικών με προσαρμοσμένα θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά εκτύπωσης (custom materials), διότι στο λογισμικό Cura υπάρχουν μόνο βασικές επιλογές πολυμερών και παράλληλα ορίστηκε η διάμετρος του ακροφύσιου εξώθησης. Στη συνέχεια ορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων εκτύπωσης των εξεταζόμενων δοκιμίων στις ρυθμίσεις εκτύπωσης του λογισμικού Cura, από τις οποίες οι βασικότερες φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Οι παράμετροι σχετικά με τις θερμοκρασίες εκτύπωσης και τις θερμοκρασίες της τράπεζας εκτύπωσης καθώς και επιπλέον μέτρα (χρήση κλειστού θαλάμου και ειδικής κόλλας) που εφαρμόστηκαν για τα δύο βέλτιστα υλικά (ABS/CF και PLA/uD), με σκοπό την καλύτερη δυνατή εκτύπωση, παρουσιάζονται αναλυτικώς στη συνέχεια. Επισημαίνεται ότι αρχικά ερευνήθηκαν και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές κατόπιν της τελικής επιλογής των παραμέτρων σχετικά με τις θερμοκρασίες εκτύπωσης και τις θερμοκρασίες της τράπεζας εκτύπωσης των δοκιμίων, καθώς οι προτεινόμενες θερμοκρασίες από την κάθε εταιρεία

διέφεραν σε ορισμένες περιπτώσεις με τις θερμοκρασίες που εφαρμόστηκαν τελικώς, διότι οι θερμοκρασίες και άλλοι σημαντικοί παράγοντες κατά τη διαδικασία εκτύπωσης διαφέρουν από εκτυπωτή σε εκτυπωτή.

Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμών	Τιμές
Μήκος ιεραρχικών κυψελοειδών δομών	100mm
Πλάτος ιεραρχικών κυψελοειδών δομών	100mm
Πάχος ιεραρχικών κυψελοειδών δομών	20mm
Διάμετρος κεφαλής εκτύπωσης (print head diameter)	2.85mm
Διάμετρος ακροφύσιου εξώθησης (nozzle diameter)	0.6mm
Ύψος κάθε στρώσης (layer height)	0.3mm
Πλάτος γραμμής (line width)	0.58mm
Πλάτος κάθε γραμμής τοιχώματος (wall line width)	0.58mm
Ποσοστό πυκνότητας γεμίσματος (infill density)	100%
Διάταξη γεμίσματος (infill pattern)	lines
Ταχύτητα εκτύπωσης (print speed)	35mm/s

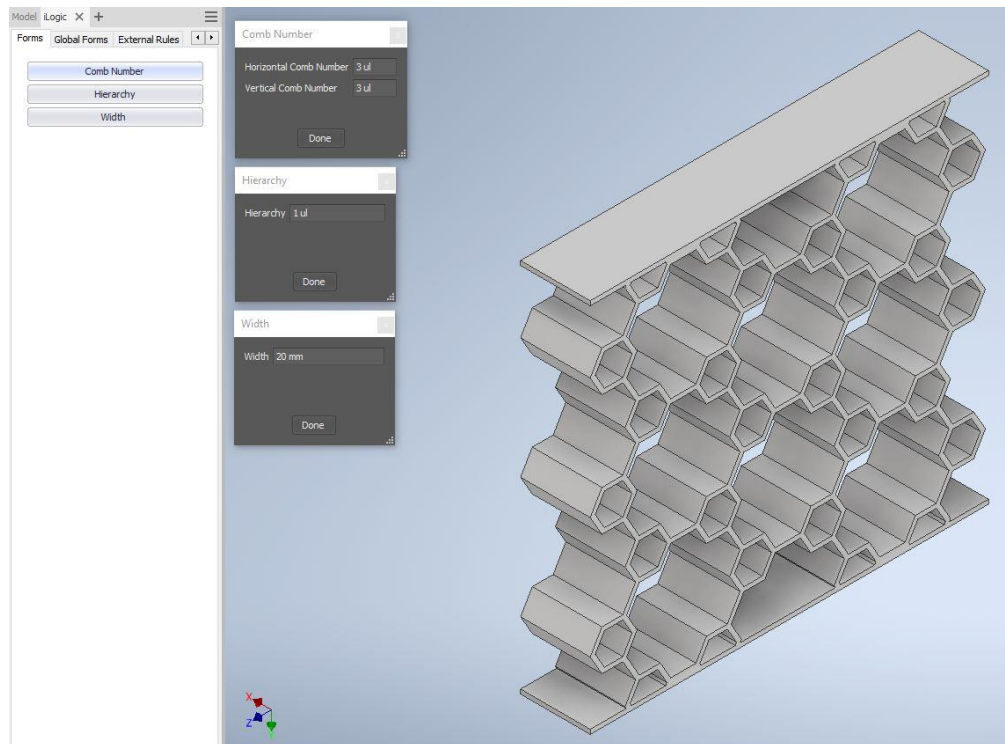
Πίνακας 4.1: Παράμετροι εκτύπωσης ιεραρχικών κυψελοειδών δομών.

Η θερμοκρασία εκτύπωσης που ορίστηκε για την κατασκευή των εξεταζόμενων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών από ABS ενισχυμένο με 15% κατά βάρος ίνες άνθρακα ήταν 240°C, καθώς και η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης ήταν 105°C. Επίσης, η χρήση των ανεμιστήρων του τρισδιάστατου εκτυπωτή αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα για μια ομαλή εκτύπωση χωρίς προβλήματα αποκόλλησης του αντικειμένου από την τράπεζα εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, καθ' όλη τη διάρκεια εκτύπωσης των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών με χρήση του υλικού ABS/CF, οι ανεμιστήρες ήταν ενεργοποιημένοι στο 100%. Παράλληλα τοποθετήθηκε κόλλα στην επιφάνεια της τράπεζας εκτύπωσης με σκοπό την καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης και τέλος η χρήση κλειστού θαλάμου κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση των εξεταζόμενων δομών ήταν απαραίτητη, έτσι ώστε να διατηρούνται οι κατάλληλες θερμοκρασίες αλλά και για τον περιορισμό των αναθυμιάσεων που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, ιδιαιτέρως στη συγκεκριμένη οικογένεια υλικών από ABS, λόγω της πετρελαιοχημικής τους βάσης.

Η θερμοκρασία εκτύπωσης των δοκιμών από PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) ορίστηκε 240°C και αντίστοιχα η θερμοκρασία της πλάκας εκτύπωσης ήταν 55°C. Οι ανεμιστήρες ήταν ενεργοποιημένοι στο 100% καθώς και απαραίτητη ήταν η χρήση κόλλας και κλειστού θαλάμου κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.

4.3 Ανάπτυξη μοντέλου αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μοντέλο σε κώδικα του iLogic, με σκοπό την αυτόματη ιεραρχικοποίηση των εξεταζόμενων κυψελοειδών δομών, όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.3](#) [108]. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός αρχείου που να περιλαμβάνει και τις τρεις ιεραρχίες, το οποίο θα εμφανίζει κάθε φορά μόνο την ιεραρχία που ενδιαφέρει ή τη δημιουργία τριών ξεχωριστών αρχείων για κάθε μια ιεραρχία. Ο πρώτος τρόπος αποσκοπεί στην άμεση σύγκριση των διαφορετικών ιεραρχιών για τις ίδιες παραμέτρους (πλάτος, αριθμός κυψελών) και για τη συγκέντρωση των πληροφοριών σε ένα και μόνο αρχείο. Με τον δεύτερο τρόπο δημιουργούνται τρία διαφορετικά αρχεία και η διαδικασία επαναλαμβάνεται τρεις φορές, μία για κάθε αρχείο.



Σχήμα 4.3: Μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών [108].

4.4 Μηχανικές ιδιότητες ιεραρχικών κυψελοειδών δομών

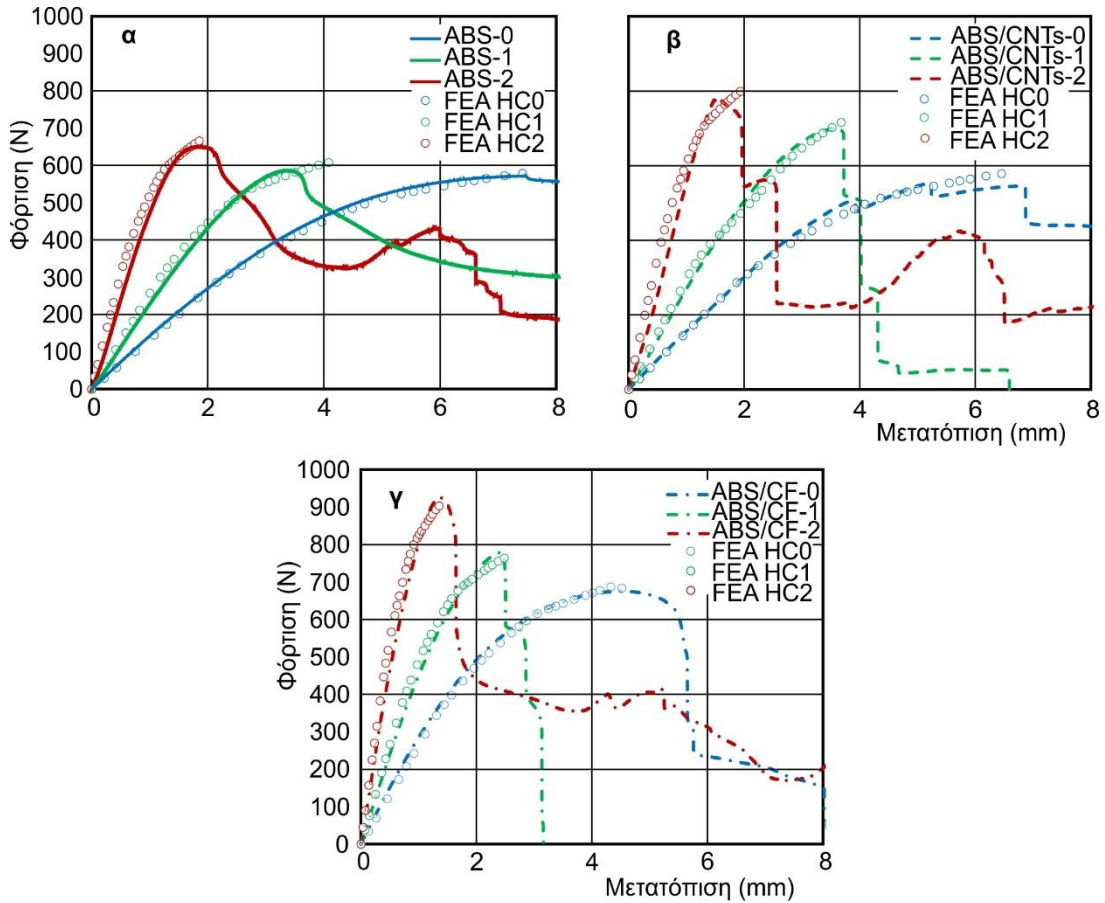
Τρεις διαφορετικές ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα μέσω της μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FFF), με σκοπό τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, η HC0 αποτελεί την κανονική εξαγωνική δομή – μηδενική ιεραρχία, η HC1 αποτελεί την πρώτη ιεραρχική δομή και η HC2 είναι η δεύτερη ιεραρχική δομή.

Η τυπική απόκριση της φόρτισης-μετατόπισης κάθε εξεταζόμενης ιεραρχικής κυψελοειδούς δομής υπό θλιπτική μονοαξονική φόρτιση, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4 [63, 106, 107]. Η μέγιστη θλιπτική φόρτιση για το ABS χωρίς κάποια πρόσμειξη υπολογίστηκε 571N, 586N και 650N για την κανονική εξαγωνική δομή, την πρώτη ιεραρχική δομή και τη δεύτερη ιεραρχική δομή, αντίστοιχα. Ομοίως, για τις τρισδιάστατες εκτυπωμένες δομές από ABS/CNTs παρατηρήθηκαν μέγιστες φορτίσεις 554N, 699N και 784N. Επίσης, οι μέγιστες θλιπτικές φορτίσεις για τις εκτυπωμένες ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές από ABS/CF έφτασαν μέχρι 675N, 779N και 925N για την κανονική εξαγωνική δομή, την πρώτη ιεραρχική δομή και τη δεύτερη ιεραρχική δομή αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη παραμόρφωση διαπιστώθηκε στα 8mm. Τα αποτελέσματα απεικονίζουν καθαρά πως οι κυψελοειδείς δομές δεύτερης ιεραρχίας από ABS/CF παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σχετικά με τη στιβαρότητα συγκριτικά με τις άλλες ιεραρχίες και υλικά. Ήταν μια αναμενόμενη περίπτωση αφού το μέτρο ελαστικότητας εκφράζεται από την εξίσωση [57]:

$$\frac{E}{E_s} = \left(\frac{t}{a}\right)^3 f(\gamma_1) \quad (4.2)$$

όπου:

- E: μέτρο ελαστικότητας
- E_s: μέτρο ελαστικότητας υλικού
- t: πάχος δοκιμίου
- a: κανονικό εξαγωνικό μήκος
- f(γ₁): συνάρτηση συντελεστή αναλογίας για την πρώτη ιεραρχία



Σχήμα 4.4: Τυπικές πειραματικές καμπύλες φόρτισης μετατόπισης και προσαρμογή καμπυλών χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων των HC0, HC1 και HC2 για τα υλικά ABS, ABS/CNTs και ABS/CF.

όπου:

$$f(\gamma_1) = \sqrt{3} / (0.75 - 3.525\gamma_1 + 3.6\gamma_1^2 + 2.9\gamma_1^3) \quad (4.3)$$

Ο Ajdari και άλλοι [57], μελέτησαν το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας για την πρώτη ιεραρχία με σταθερή σχετική πυκνότητα και παρατήρησαν πως το t/a πρέπει να παραληφθεί από την εξίσωση (4.2), χρησιμοποιώντας μέσω της εξίσωσης (4.1) την παράσταση της σχετικής πυκνότητας. Η παράσταση της E/E_s είναι συνάρτηση ρ_0^3 φορές του γ_1 , ενώ τοποθετώντας $(\partial(\frac{E}{E_s})/\partial\gamma_1)_{\rho_0} = 0$ αυτό οδηγεί στο $E_1/E_s = 2.97\rho_0^3$ το οποίο είναι δύο φορές η στιβαρότητα της κανονικής εξαγωνικής δομής, αφού $E_0/E_s = 1.5\rho_0^3$ (τοποθετώντας $\gamma_1 = 0$ στην εξίσωση (4.2) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.1) για την απαλοιφή του t/a , μπορεί να υπολογιστεί το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της κανονικής εξαγωνικής δομής). Επιπροσθέτως, για τη δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή παρατηρήθηκε στιβαρότητα σχεδόν 3.5 φορές από αυτήν της κανονικής εξαγωνικής δομής. Για τις εκτυπωμένες ιεραρχικές δομές από ABS χωρίς κάποια προσθήκη, τα πειραματικά δεδομένα της φόρτισης-μετατόπισης είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές και συγκεκριμένα στιβαρότητα 1.9 φορές μεγαλύτερη για την πρώτη ιεραρχία και 3.3 φορές για τη δεύτερη ιεραρχία, σε σύγκριση με τη στιβαρότητα της κανονικής εξαγωνικής δομής. Για τις ιεραρχίες κατασκευασμένες από ABS/CNTs, η αύξηση της στιβαρότητας ήταν 1.9 και 3.3 για την πρώτη και τη δεύτερη ιεραρχία αντίστοιχα. Παρόμοιες τιμές και συγκεκριμένα 2 και 3.5 ήταν στην περίπτωση των κυψελοειδών δομών κατασκευασμένων από PLA ενισχυμένο με κοντές ίνες άνθρακα [20].

Το αποτέλεσμα της μεταφοράς της ιεραρχίας από την κανονική εξαγωνική δομή στη δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή ερευνήθηκε έτσι ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης των εκτυπωμένων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών. Αυτό επετεύχθη μέσω εναρμόνισης της καμπύλης των πειραματικών αποτελεσμάτων υπό θλίψη με τα δεδομένα που παρήχθησαν μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Ένα υπολογιστικό μοντέλο δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τον εμπορικό κώδικα ANSYS™, εκπονώντας στατική δομική ανάλυση. Έγιναν υποθέσεις για τις τιμές των υλικών των κυψελοειδών δομών που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν η τάση και παραμόρφωση διαρροής, καθώς και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας των πολυγραμμικών καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια επιβαλλόμενη μετατόπιση και η δύναμη της αντίδρασης υπολογίστηκε στο κάτω μέρος κάθε ιεραρχικής κυψελοειδούς δομής, σε μια σταθερή οριακή κατάσταση. Η τιμή εισόδου αυτής της μετατόπισης αποκτήθηκε από τις μετρήσεις του πειράματος θλίψης. Δεδομένων αυτών των τιμών παραμόρφωσης, τα δεδομένα φόρτισης υπολογίστηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και αντιπαρατέθηκαν με τις υπολογισμένες φορτίσεις. Εάν οι υπολογισμένες τιμές των φορτίσεων δεν συμπίπτουν με τις πειραματικές, τότε οι αρχικές τιμές της τάσης, της παραμόρφωσης και του μέτρου ελαστικότητας είναι κατά προσέγγιση και το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων λύνεται ξανά.

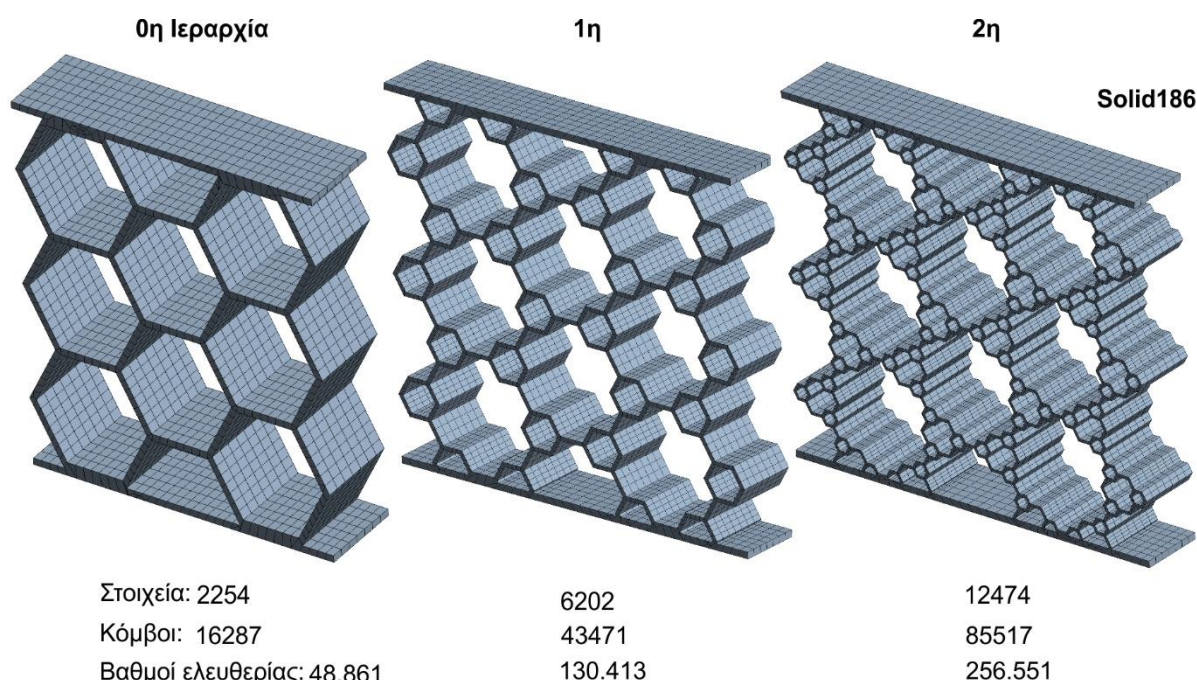
Το πλέγμα αποτελείται από εξάεδρα και πρισματικά στοιχεία (hexahedrals και wedge στοιχεία) για την κανονική εξαγωνική δομή και τις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές, καθώς και για τις άνω και κάτω πλάκες. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ανεξάρτητη από το πλέγμα (mesh) απόκριση, πραγματοποιήθηκε μελέτη σύγκλισης (convergence). Ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων που προέκυψε από τη σύγκλιση για την κάθε ιεραρχία φαίνεται στον πίνακα 4.2. Με βάση τα αποτελέσματα σύγκλισης που πραγματοποιήθηκαν για μια ελαστική απόκριση των κυψελοειδών δομών, ένα ελάχιστο μέγεθος στοιχείου των 0.86mm θεωρήθηκε επαρκές για να επιτευχθεί αποδεκτή ακρίβεια στις υπολογισμένες αποκρίσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.

Γεωμετρία	Κόμβοι	Στοιχεία	Γεωμετρία Στοιχείου	Τύπος Στοιχείου
HCO	16287	2254	Εξάεδρα και πρισματικά στοιχεία	Solid186 (ANSYS)
HC1	43471	6202		
HC2	85517	12474		

Πίνακας 4.2: Παράμετροι πλέγματος (meshing parameters).

Χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο SOLID186 του λογισμικού ANSYS το οποίο έχει 3 βαθμούς ελευθερίας (DOFs). Ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τη γεωμετρία HC0 ήταν 48.861 (=16287 κόμβοι * 3 DOFs). Για τη γεωμετρία HC1 ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας ήταν 130.413 (=43471 κόμβοι * 3 DOFs), ενώ ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τη γεωμετρία HC2 ήταν 256.551 (=85517 κόμβοι * 3 DOFs).

Τα δεδομένα φόρτισης-μετατόπισης που έχουν ληφθεί από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4, όπου φαίνονται σαφώς ότι αυτές οι τιμές συμφωνούν με τις υπολογισμένες καμπύλες [63, 106, 107]. Επομένως, οι αρχικές τιμές του πολυγραμμικού μοντέλου τάσης-παραμόρφωσης των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών αποτελούν σωστές υποθέσεις.

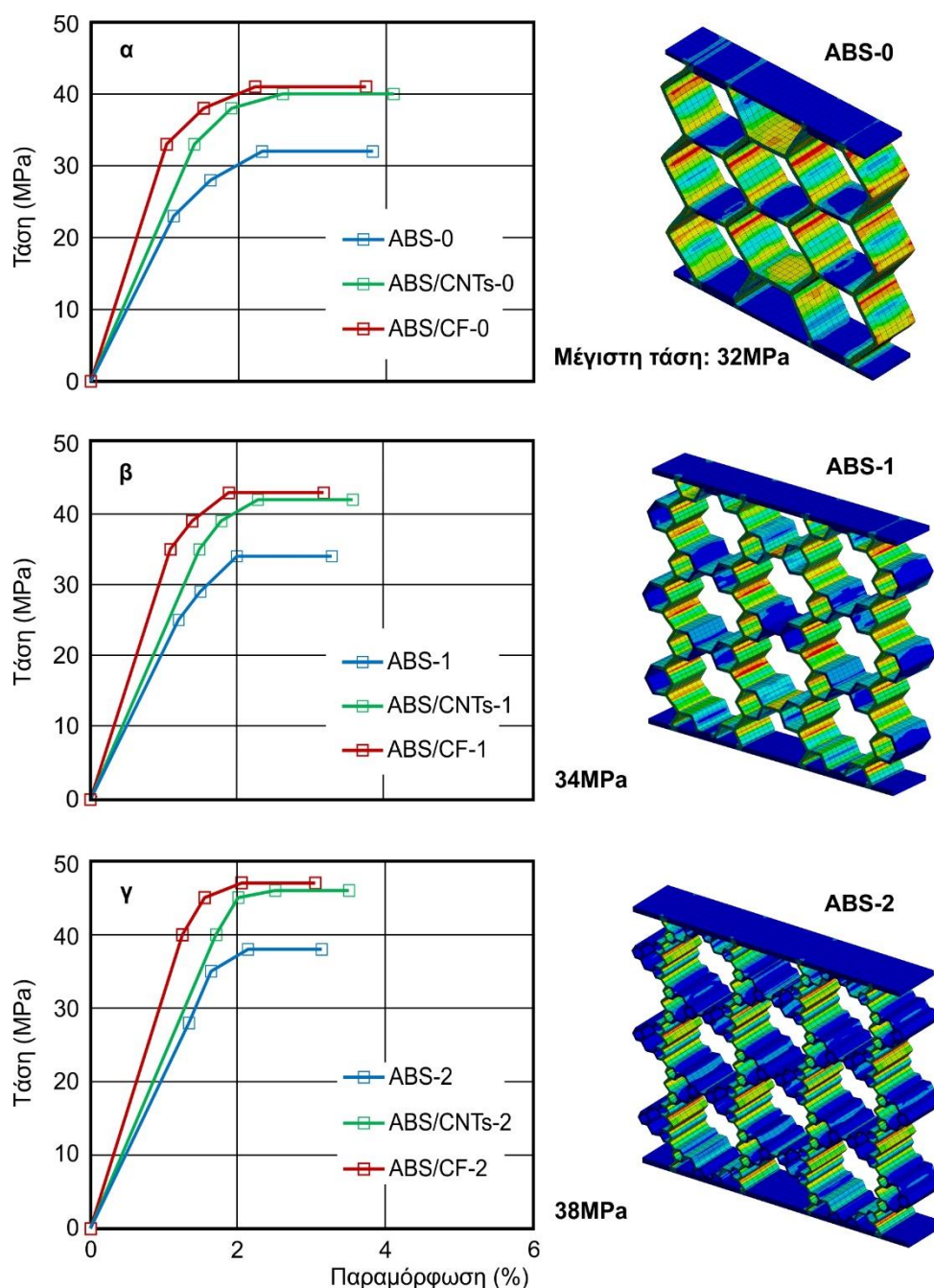


Σχήμα 4.5: Πλέγμα ιεραρχικών κυψελοειδών δομών (mesh).

Οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκαν για τρεις διαφορετικές ιεραρχίες κυψελοειδών δομών, όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.6](#) [63, 106, 107]. Στο σχήμα 4.6(α), η αλλαγή στα πλαίσια του μέτρου ελαστικότητας καθώς και της αντοχής μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί για την κανονική εξαγωνική δομή υπό διαφορετικές ενισχύσεις. Η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης σχετικά με την πρώτη και δεύτερη ιεραρχία αντίστοιχα, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6(β, γ).

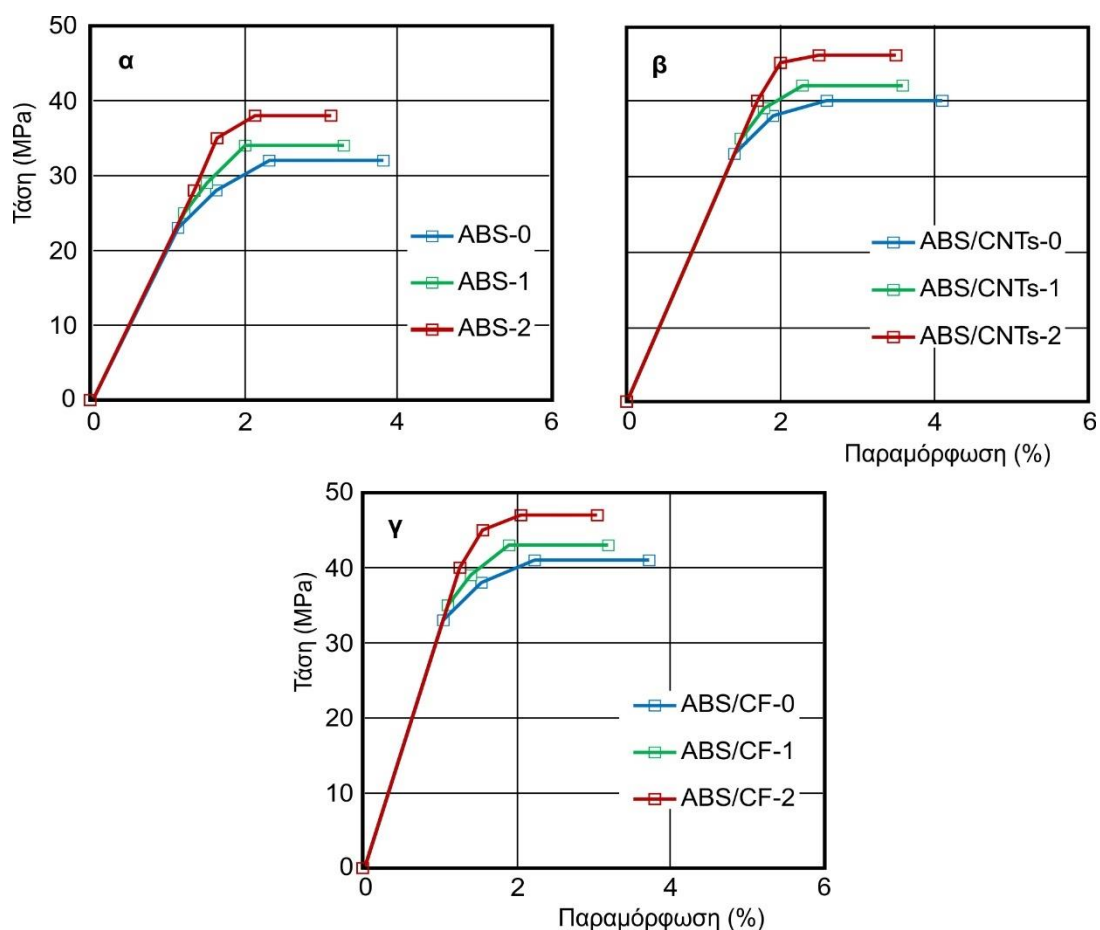
Με αυτόν τον τρόπο, η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του ABS χωρίς κάποια προσθήκη συγκρίθηκε με αυτήν του ABS/CNTs και ABS/CF για διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας. Σχετικά με την κανονική εξαγωνική δομή, το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε από την αρχική κλίση στην ελαστική περιοχή [63, 106, 107]. Για το ABS χωρίς κάποια ενίσχυση καθώς και για το ABS με ενσωμάτωση νανοσωλήνων άνθρακα και ινών άνθρακα, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας είναι 2050MPa, 2350MPa και 3200MPa, αντίστοιχα. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για την περίπτωση της πρώτης ιεραρχικής κυψελοειδούς δομής είναι 2080MPa, 2370MPa και 3205MPa, αντίστοιχα, δείχνοντας μία όχι και τόσο σημαντική αύξηση. Επίσης, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για τη δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή είναι 2100MPa, 2390MPa και 3210MPa, αντίστοιχα, παρουσιάζοντας ξανά μία μικρή αύξηση.

Παρατηρήθηκε πως το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την αύξηση του επιπέδου της ιεραρχίας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.7](#). Η πρώτη και δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή παρουσίασαν μεγαλύτερη τάση απ' ό,τι η κανονική εξαγωνική δομή, ενώ παράλληλα διατηρήθηκε η μέγιστη παραμόρφωση. Επίσης, η μέγιστη αντοχή μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί για το ίδιο υλικό με διαφορετικά επίπεδα ιεραρχίας. Για το ABS χωρίς κάποια πρόσμιξη, οι τιμές για τη μέγιστη αντοχή είναι 32MPa, 34MPa και 38MPa αναφορικά με τη μηδενική, την πρώτη και δεύτερη ιεραρχία. Ακολούθως, οι τιμές για τη μέγιστη αντοχή του ABS /CNTs, είναι 40MPa, 42MPa και 46MPa σχετικά με τη μηδενική, την πρώτη και δεύτερη ιεραρχία. Για το ABS/CF, οι τιμές της μέγιστης αντοχής είναι 41MPa, 43MPa και 47MPa για την κανονική εξαγωνική δομή, την πρώτη και δεύτερη ιεραρχία. Η μεγαλύτερη τάση διαπιστώθηκε για το ABS/CF με τιμή ίση με 47MPa.

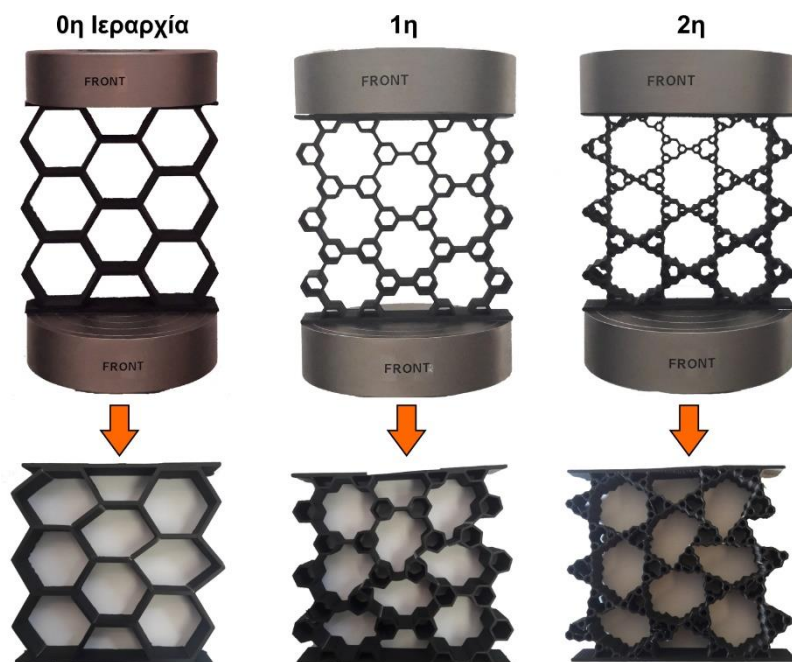


Σχήμα 4.6: Σύγκριση των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για α) την κανονική εξαγωνική δομή, β) την πρώτη ιεραρχία και γ) τη δεύτερη ιεραρχία για διαφορετικά υλικά: ABS, ABS/CNTs και ABS/CF.

Η τυπική συμπεριφορά παραμόρφωσης για την κάθε ιεραρχική κυψελοειδή δομή πριν και μετά την εφαρμογή των θλιπτικών φορτίσεων, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8. Επίσης, παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά το πείραμα μονοαξονικής θλίψης με χαρακτηριστικές περιοχές διάτμησης και περιοχές με συγκέντρωση τάσεων. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι πιο εμφανή για την πρώτη και δεύτερη ιεραρχική δομή, οι οποίες παρουσίασαν τοπική κάμψη των κυψελοειδών δομών.



Σχήμα 4.7: Παραγόμενες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) διαφορετικών επιπέδων ιεραρχίας για (α) ABS, (β) ABS/CNTs και (γ) ABS/CF.



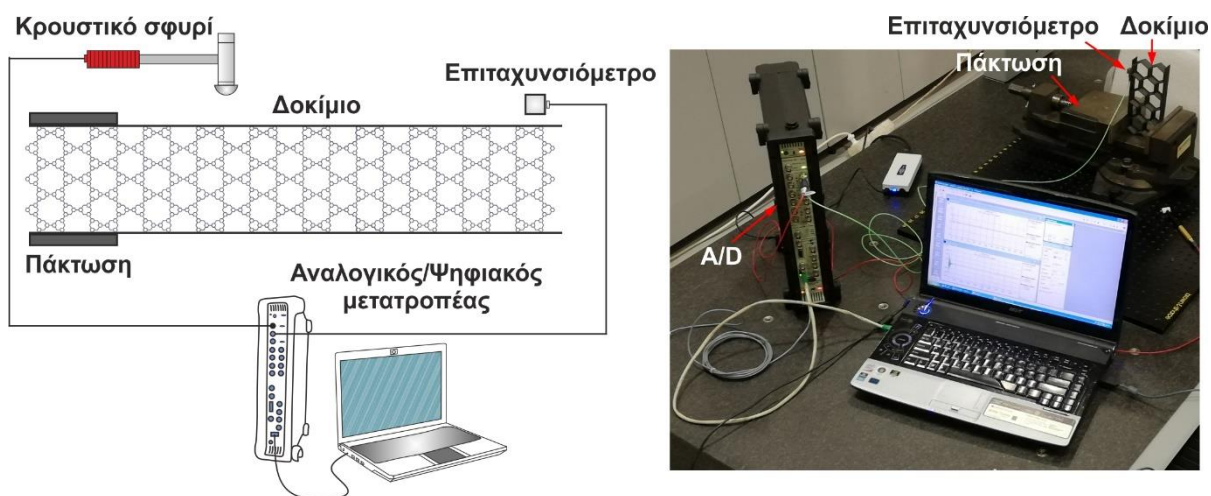
Σχήμα 4.8: Σύγκριση της παραμόρφωσης πριν και μετά το πείραμα θλίψης για τη μηδενική, την πρώτη και τη δεύτερη ιεραρχία.

Συνοπτικά, στην αρχή του 4^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διατριβής έγινε μια εισαγωγή στις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών και έπειτα πραγματοποιείται η κατασκευή των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών κατόπιν έρευνας των μηχανικών ιδιοτήτων τους η οποία πραγματοποιήθηκε στο 3^ο κεφάλαιο της διατριβής. Επίσης, αναπτύχθηκε μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης των κυψελοειδών δομών. Τέλος, διερευνήθηκε η μηχανική απόδοση των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών μέσω πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης αλλά και θεωρητικώς μέσω αναπτυγμένου προσομοιωτικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

4.5 Μέτρηση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς και επεξεργασία σημάτων

Μετά τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών κρίνεται απαραίτητο σε τέτοιου είδους σύνθετες κατασκευές να ελεγχθεί και η ταλαντωτική συμπεριφορά τους, έτσι ώστε να είναι κατάλληλη η χρήση τους σε διάφορες σύνθετες μηχανολογικές κατασκευές.

Ο προσδιορισμός της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών πραγματοποιείται μέσω της πειραματικής συνάρτησης μετάδοσης. Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μετάδοσης, όπου η δύναμη εφαρμόζεται μέσω κρουστικού σφυριού (Endevco 2302-10) και η μετατόπιση μετριέται μέσω επιταχυνσιόμετρου (Brüel & Kjaer 4507-B).

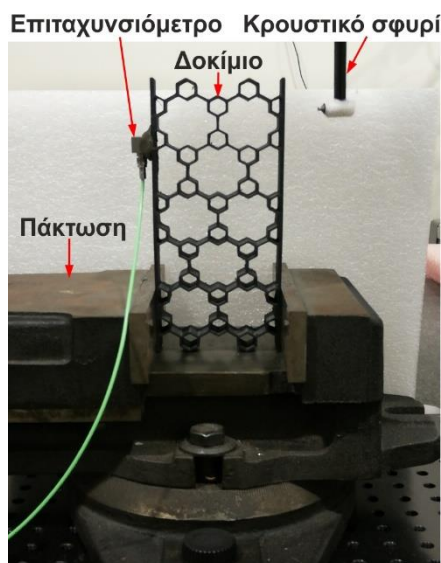


Σχήμα 4.9: Πειραματική διάταξη ταλαντωτικής συμπεριφοράς κυψελοειδών δομών.

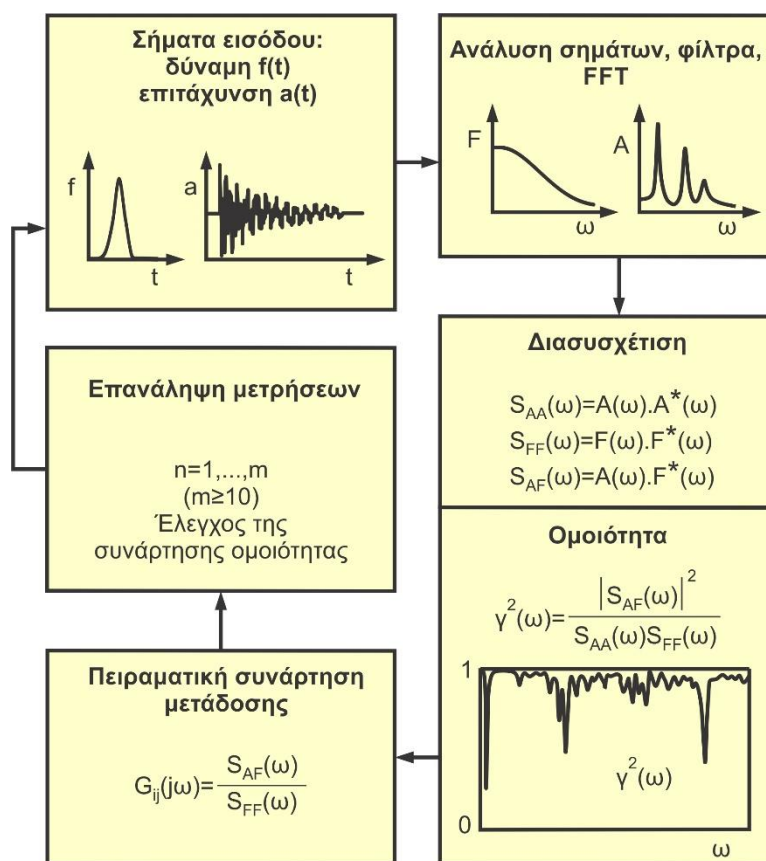
Τα βασικά χαρακτηριστικά των πειραμάτων ταλαντωτικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών ήταν το εύρος της συχνότητας των σημάτων επιτάχυνσης 3200Hz, η συχνότητα δειγματοληψίας 8192 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (Hz) και ο συνολικός χρόνος δειγματοληψίας 1s. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν πάνω από 10 πειράματα για κάθε δοκίμιο μέχρι να ομαλοποιηθεί η συνάρτηση ομοιότητας $\gamma^2(\omega)$ και στη συνέχεια λήφθηκε η μέση τιμή της συνάρτησης μετάδοσης [88].

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η διαδικασία του πειραματικού προσδιορισμού της συνάρτησης μετάδοσης. Τα δύο σήματα (δύναμης-μετατόπισης) εισάγονται στον υπολογιστή μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα όπου πραγματοποιείται η επεξεργασία τους. Συγκεκριμένα, γίνεται μετασχηματισμός Fourier (FFT) σε μιγαδική μορφή. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συνάρτηση ομοιότητας $\gamma^2(\omega)$ για τον έλεγχο της καθαρότητας των σημάτων μέτρησης. Ακολούθως υπολογίζεται η συνάρτηση μετάδοσης. Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται πολλές

φορές προκειμένου να ομαλοποιηθεί η συνάρτηση ομοιότητας $\gamma^2(\omega)$, το οποίο σημαίνει περιορισμός των εξωτερικών θορύβων.



Σχήμα 4.10: Διάταξη μέτρησης της ταλαντωτικής συμπεριφοράς.



Σχήμα 4.11: Πειραματικός προσδιορισμός της συνάρτησης μετάδοσης.

4.6 Αναλυτικός προσδιορισμός παραμέτρων συναρτήσεων μετάδοσης μέσω γενετικών αλγορίθμων

Η αναλυτική περιγραφή της συνάρτησης μετάδοσης περιγράφεται στην εξίσωση (2.28), όπου οι ιδιοσυχνότητες με απόσβεση καθώς και οι εκθέτες απόσβεσης και οι στιβαρότητες

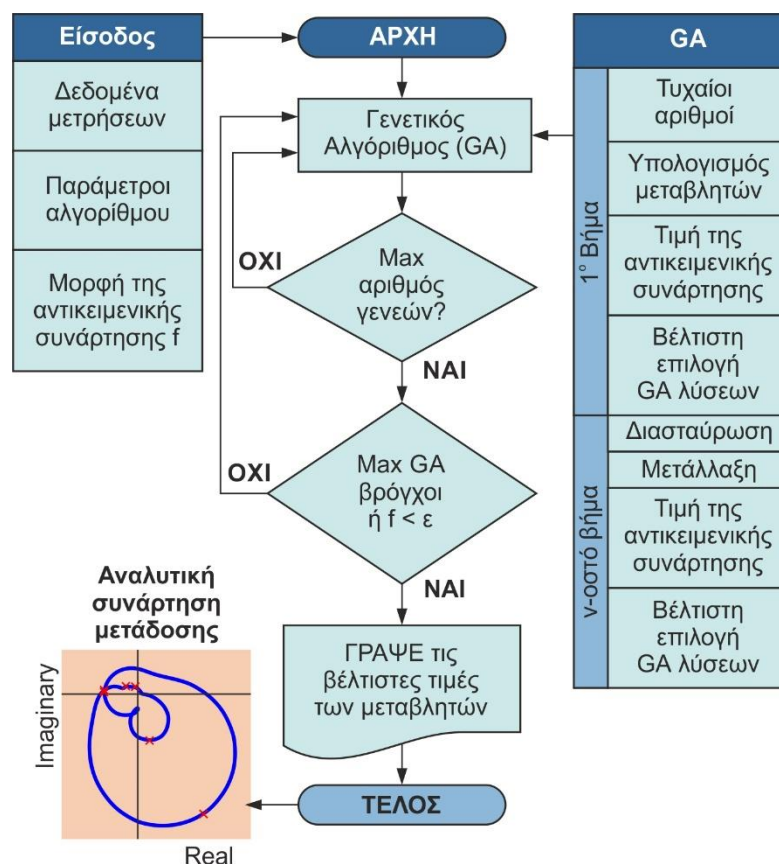
προσδιορίζονται από την πειραματική συνάρτηση μετάδοσης, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.13.1. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων U και V της αναλυτικής σχέσης (2.33), εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος ώστε να ελαχιστοποιείται η απόκλιση ανάμεσα στις αναλυτικές συναρτήσεις μετάδοσης και τις αντίστοιχες πειραματικές.

Συγκεκριμένα, δίνοντας διαδοχικές τιμές στις παραμέτρους U και V , ο γενετικός αλγόριθμος τείνει να ελαχιστοποιεί μία αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση της προκειμένης περίπτωσης δίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\text{Αντικειμενική συνάρτηση } f = \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{G_{ij}(j\omega)_{\text{πειραματική}}}{G_{ij}(j\omega)_{\text{αναλυτική}}} \right)^2 \quad (4.4)$$

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα διαδοχικά βήματα ενός γενετικού αλγόριθμου. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι μία στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης, η οποία ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία και ο τερματισμός της ρυθμίζεται από διάφορες παραμέτρους και διάφορα κριτήρια.

Αρχικά, δημιουργείται ένας πρώτος πληθυσμός τιμών των παραμέτρων U και V , ο οποίος αποτελεί μία πρώτη γενεά. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος μετασχηματίζει τις τιμές των μεταβλητών της πρώτης γενεάς και δημιουργεί νέες γενεές πιθανών λύσεων. Οι τιμές κάθε γενεάς εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση και με την χρήση διαφόρων κριτηρίων καθορίζεται ο τερματισμός του αλγορίθμου και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων U και V [109].



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου.

Συγκεκριμένα, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων U και V επιτυγχάνονται όταν:

1. Ο αλγόριθμος έχει δημιουργήσει τον μέγιστο προκαθορισμένο αριθμό γενεών. Κάθε βήμα του γενετικού αλγόριθμου, δημιουργεί μία γενεά λύσεων, με σκοπό να βελτιώσει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν καταλήξει σε μία δεδομένη λύση η οποία δεν μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την αντικειμενική συνάρτηση.
2. Ο αλγόριθμος έχει πραγματοποιήσει τον μέγιστο προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Κάθε επανάληψη του αλγορίθμου έχει διαφορετικές αρχικές τιμές των παραμέτρων U και V , άρα μπορεί να καταλήξει σε διαφορετικές βέλτιστες τιμές. Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί ένα δεδομένο αριθμό επαναλήψεων και επιλέγονται οι τιμές που ελαχιστοποιούν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.
3. Ο αλγόριθμος έχει εντοπίσει μια λύση όπου η αντικειμενική συνάρτηση γίνεται μικρότερη από κάποιο προκαθορισμένο σφάλμα ϵ .

Κάθε επανάληψη του γενετικού αλγόριθμου ξεκινάει από ένα τυχαίο πληθυσμό αρχικών τιμών και ο αλγόριθμος αναζητεί τη βέλτιστη λύση από διαφορετικά σημεία. Πρέπει να πραγματοποιούνται αρκετές επαναλήψεις σε ένα γενετικό αλγόριθμο προκειμένου να εγγυάται ότι θα βρεθεί η βέλτιστη δυνατή λύση [110].

4.7 Αποτελέσματα ταλαντωτικής συμπεριφοράς κυψελοειδών δομών

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των συναρτήσεων μετάδοσης για τις σημαντικές καμπτικές ιδιομορφές. Όλη η απαραίτητη πληροφορία για τον συντονισμό περιλαμβάνεται σε αυτές τις μαθηματικά αναπτυγμένες συναρτήσεις μετάδοσης.

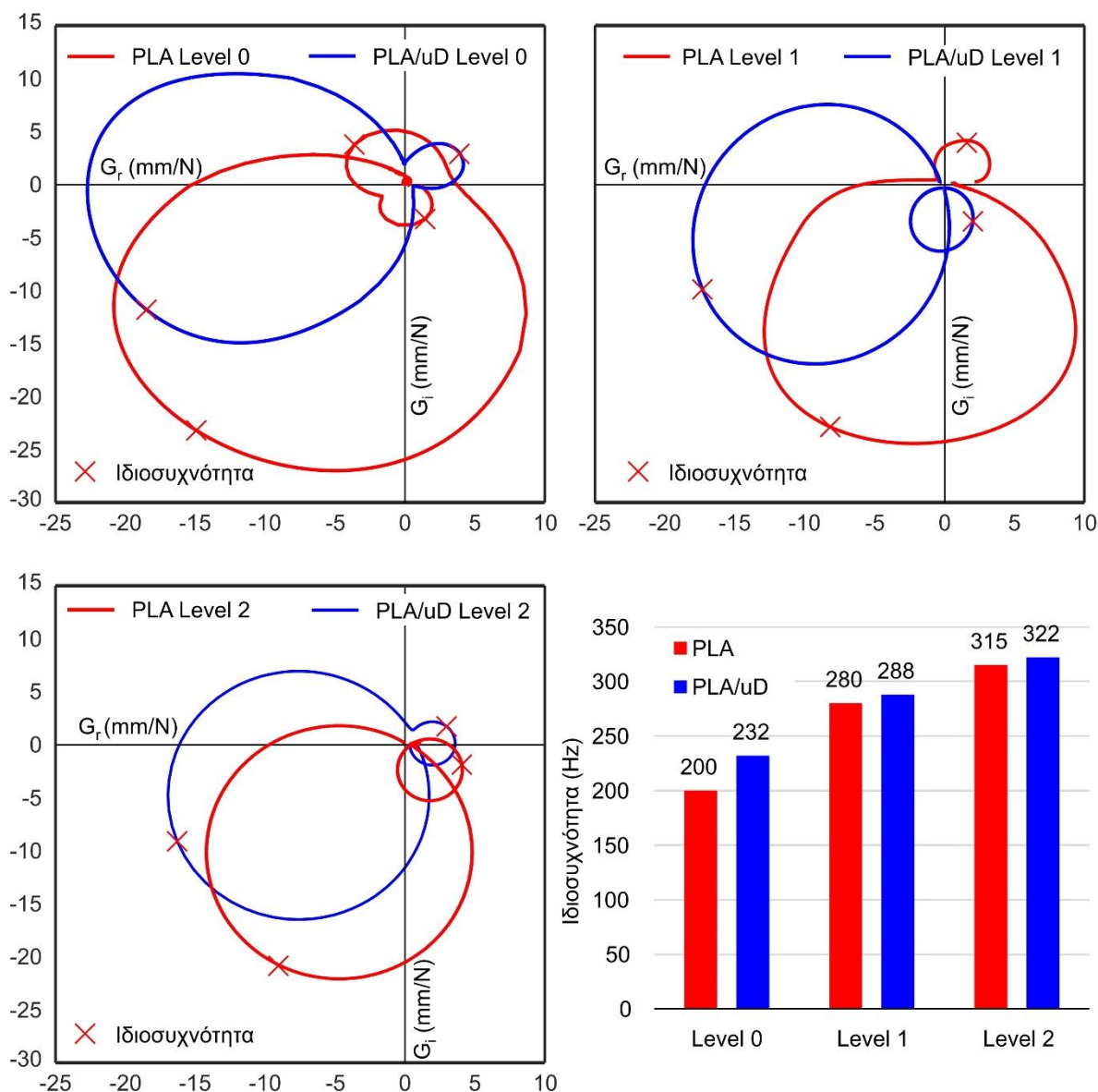
Η σύγκριση μεταξύ των μιγαδικών συναρτήσεων μετάδοσης, για τα δοκίμια από PLA χωρίς κάποια προσθήκη και PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) για τα τρία επίπεδα ιεραρχίας, φαίνεται στο σχήμα 4.13. Οι προσδιορισμένες συχνότητες συντονισμού όλων των δοκιμών με διαφορετική ιεραρχία παρουσιάζονται στο ιστόγραμμα του σχήματος 4.13. Για τα δοκίμια από PLA χωρίς κάποια προσθήκη και από PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) παρατηρείται ότι η ιεραρχία οδηγεί σε αύξηση της ιδιοσυχνότητας.

Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα μεταξύ των εξεταζόμενων δοκιμών από σκέτο PLA εμφανίζεται στη δεύτερη ιεραρχική δομή με τιμή ίση με 315Hz. Ακολούθως, η μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα μεταξύ των εξεταζόμενων δοκιμών από PLA/uD παρουσιάζεται στη δεύτερη ιεραρχική δομή με τιμή ίση με 322Hz. Συγκεντρωτικά, για την οικογένεια υλικών με βάση το PLA, το δοκίμιο από PLA με συστατικό ενίσχυσης το νανοδιαμάντι (PLA/uD) δεύτερης ιεραρχίας παρουσίασε τη βέλτιστη ταλαντωτική συμπεριφορά.

Στη συνέχεια, η σύγκριση μεταξύ των μιγαδικών συναρτήσεων μετάδοσης, για τα δοκίμια από ABS χωρίς κάποια πρόσμειξη και ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF) για τα τρία επίπεδα ιεραρχίας, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14. Οι προσδιορισμένες συχνότητες συντονισμού όλων των δοκιμών με διαφορετική ιεραρχία φαίνονται στο ιστόγραμμα του σχήματος 4.14.

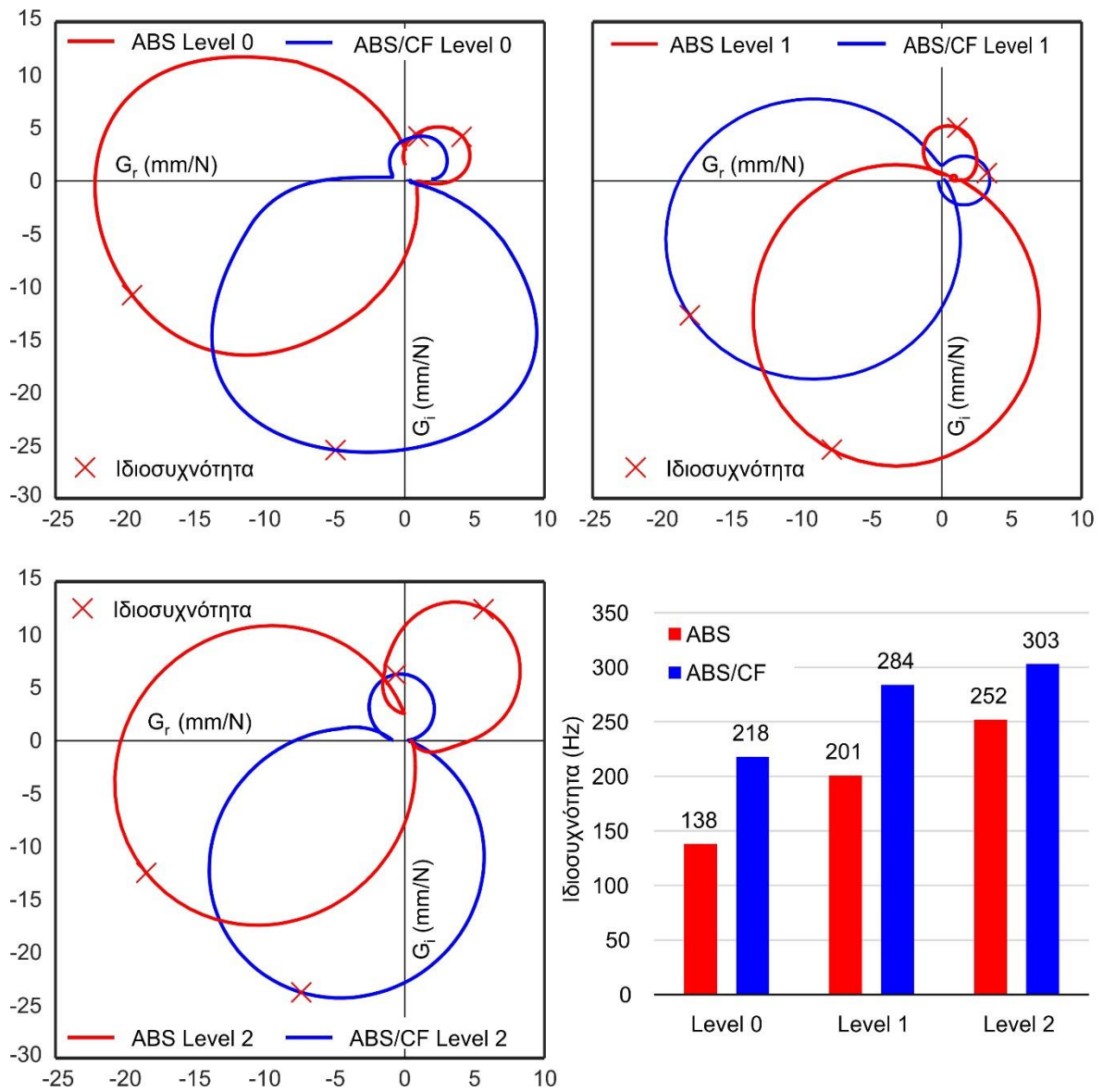
Για τα δοκίμια από σκέτο ABS και από ABS με συστατικό ενίσχυσης τις ίνες άνθρακα (ABS/CF) παρατηρείται ότι η ιεραρχία οδηγεί σε αύξηση της συχνότητας συντονισμού. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα μεταξύ των εξεταζόμενων δοκιμών από σκέτο ABS εμφανίζεται στη δεύτερη ιεραρχία με τιμή ίση με 252Hz. Ακόμη, η μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα μεταξύ των εξεταζόμενων δοκιμών από ABS/CF παρουσιάζεται στη δεύτερη ιεραρχία με τιμή 303Hz.

Συνολικά, για την οικογένεια υλικών με βάση το ABS, το δοκίμιο από ABS/CF δεύτερης ιεραρχίας φανέρωσε τη βέλτιστη ταλαντωτική συμπεριφορά.



Σχήμα 4.13: Συναρτήσεις μετάδοσης για την οικογένεια υλικών με βάση το PLA.

Συγκριτικά, μεταξύ των δύο βέλτιστων κατασκευών από PLA/uD δεύτερης ιεραρχίας και ABS/CF δεύτερης ιεραρχίας, παρατηρείται ότι το PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) είναι πιο στιβαρό, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τις μηχανικές δοκιμές.



Σχήμα 4.14: Συναρτήσεις μετάδοσης για την οικογένεια υλικών με βάση το ABS.

5. Εφαρμογές βέλτιστων υλικών και κυψελοειδών δομών σε κατασκευαστικά στοιχεία

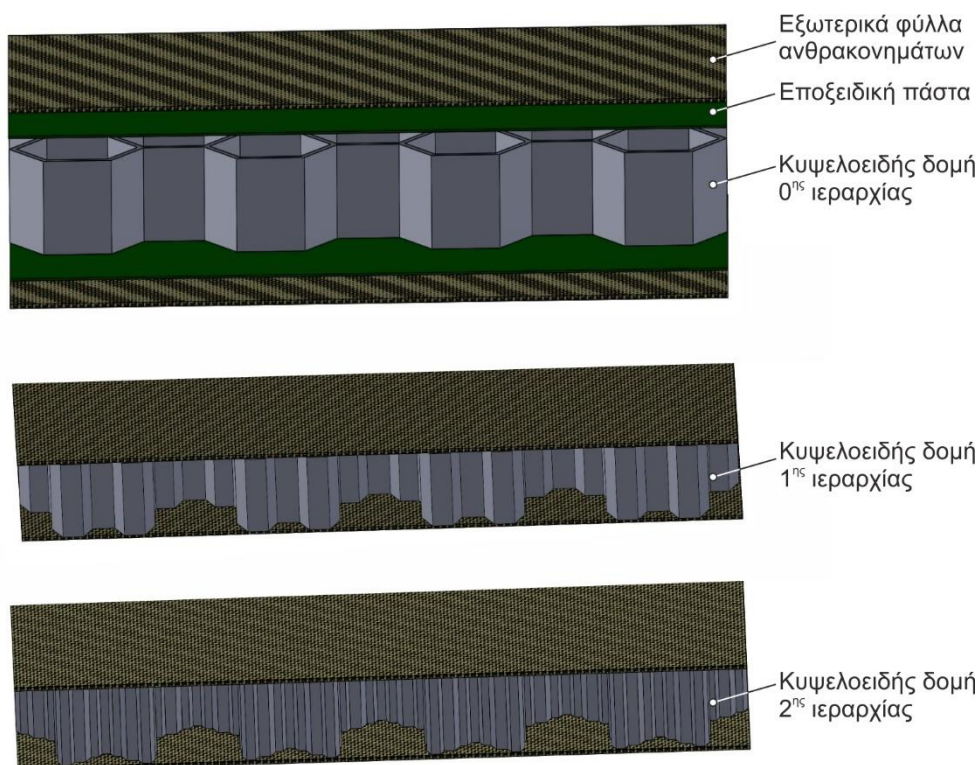
5.1 Κατασκευαστική διαδικασία

Στο 3^ο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών. Στο 4^ο κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στις ιεραρχίες και ακολούθως σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν οι εξεταζόμενες ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων που ερευνήθηκαν προηγουμένως. Επίσης, αναπτύχθηκε μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε πειραματική και θεωρητική διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων ιεραρχικών κυψελοειδών δομών. Κατόπιν ολοκλήρωσης της έρευνας της μηχανικής απόδοσης των ιεραρχικών δομών κρίθηκε απαραίτητο σε τέτοιου είδους σύνθετες κατασκευές να ελεγχθεί και η ταλαντωτική συμπεριφορά τους, προκειμένου να θεωρείται κατάλληλη η χρησιμοποίησή τους σε ποικίλες σύνθετες μηχανολογικές κατασκευές. Τα αποτελέσματα της μελέτης των μηχανικών και ταλαντωτικών χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών ήταν αρκετά ενθαρρυντικά.

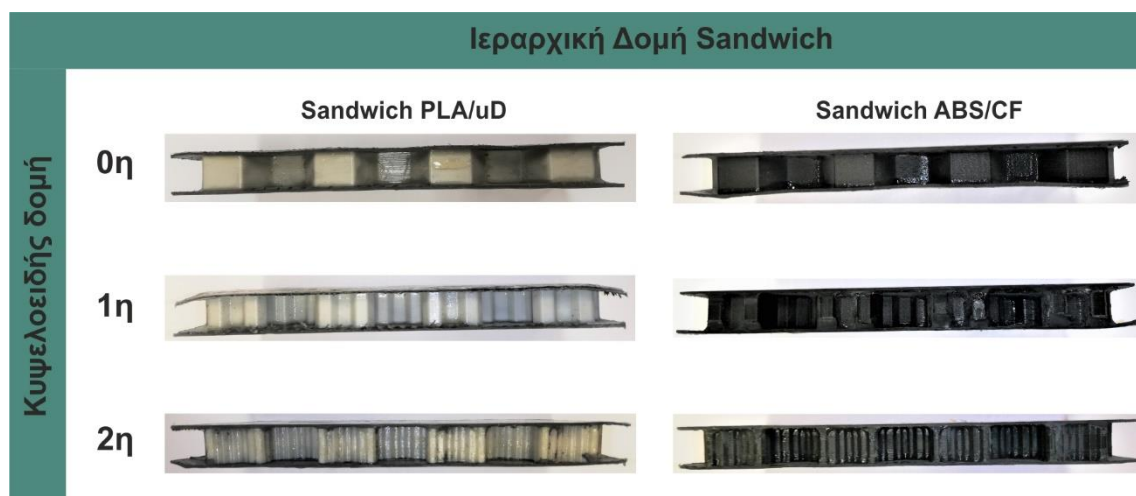
Στο 5^ο κεφάλαιο τρεις διαφορετικές ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές εκτυπώθηκαν με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών και συγκεκριμένα το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF) καθώς και το πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD), προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως πυρήνες για τις ιεραρχικές δομές sandwich με σκοπό τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς τους, όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.1](#). Η ιεραρχία HC0 αντιπροσωπεύει το μηδενικό επίπεδο ιεραρχίας (κανονική εξαγωνική δομή), η ιεραρχία HC1 αντιπροσωπεύει το πρώτο επίπεδο ιεραρχίας καθώς και η ιεραρχία HC2 αντιπροσωπεύει το δεύτερο επίπεδο ιεραρχίας. Η αναλυτική μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών και του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των γεωμετριών των διαφόρων επιπέδων ιεραρχίας έχει αναφερθεί διεξοδικά στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Οι ιεραρχικές δομές sandwich αποτελούνται από εξωτερικά φύλλα (skins) ανθρακονημάτων με βάση την εποξειδική ρητίνη, ενώ εσωτερικά των εξωτερικών φύλλων υπάρχουν οι ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές (τρία επίπεδα) οι οποίες χρησιμοποιούνται ως πυρήνες (honeycomb core), όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.2](#). Οι διαστάσεις των ιεραρχικών δομών sandwich είναι 200×100×20mm. Επίσης, η κόλληση μεταξύ των εξωτερικών φύλλων από ανθρακονήματα και των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών πραγματοποιήθηκε μέσω ισχυρής εποξειδικής πάστας.

Τα εξωτερικά φύλλα από ανθρακονήματα με βάση την εποξειδική ρητίνη αποτελούνται από τρεις στρώσεις των 0.3mm, έτσι ώστε το εξωτερικό φύλλο να μην ξεπερνά το 1mm σε πάχος συνολικά. Επιπροσθέτως, έγινε χρήση συμμετρικών πολυστρωματικών σύνθετων υλικών (laminate) με γωνίες $\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$, $\pm 45^\circ$ με σταυρωτή πλέξη (twill fabric) για κάθε μία από τις τρεις στρώσεις των εξωτερικών φύλλων. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας των εξωτερικών φύλλων από ανθρακονήματα δόθηκε από τον κατασκευαστή και είναι ίση με 60.000MPa.



Σχήμα 5.1: Ιεραρχικές δομές sandwich.



Σχήμα 5.2: Εξεταζόμενες ιεραρχικές δομές sandwich.

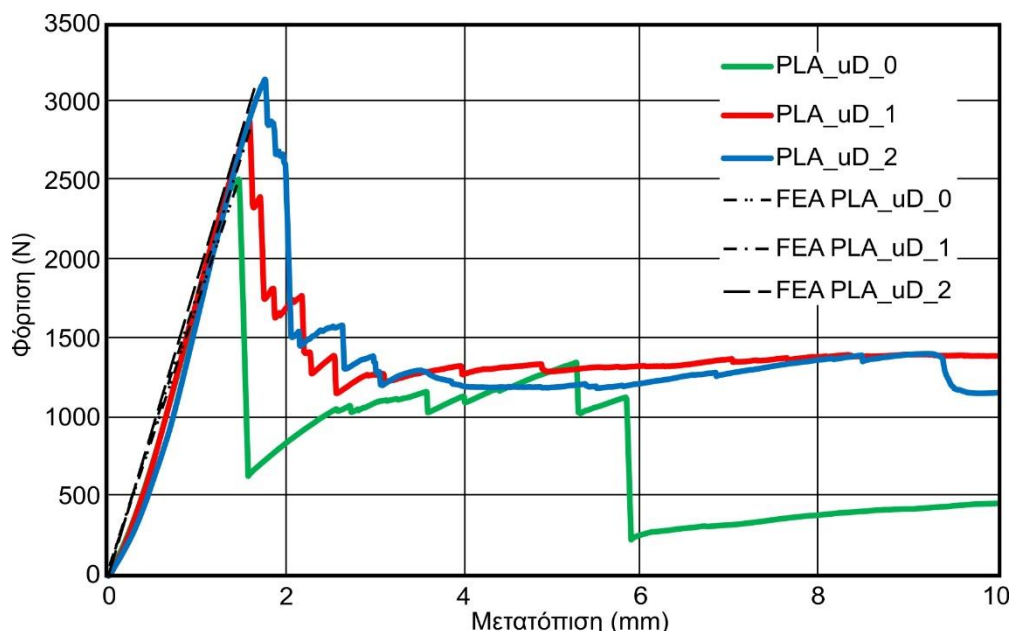
5.2 Δοκιμές σε κάμψη

Στις ιεραρχικές δομές sandwich πραγματοποιήθηκαν στατικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιώντας μια μηχανή δοκιμών Testometric M500-50AT με κατάλληλη δυναμοκυψέλη 50kN σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D590, όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.3](#). Επίσης, το πείραμα κάμψης τριών σημείων των ιεραρχικών δομών sandwich έγινε με σταθερό ρυθμό καταπόνησης 5mm/min. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης της ιεραρχίας στις ιεραρχικές δομές sandwich που αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν.



Σχήμα 5.3: Δοκιμή κάμψης τριών σημείων των ιεραρχικών δομών sandwich.

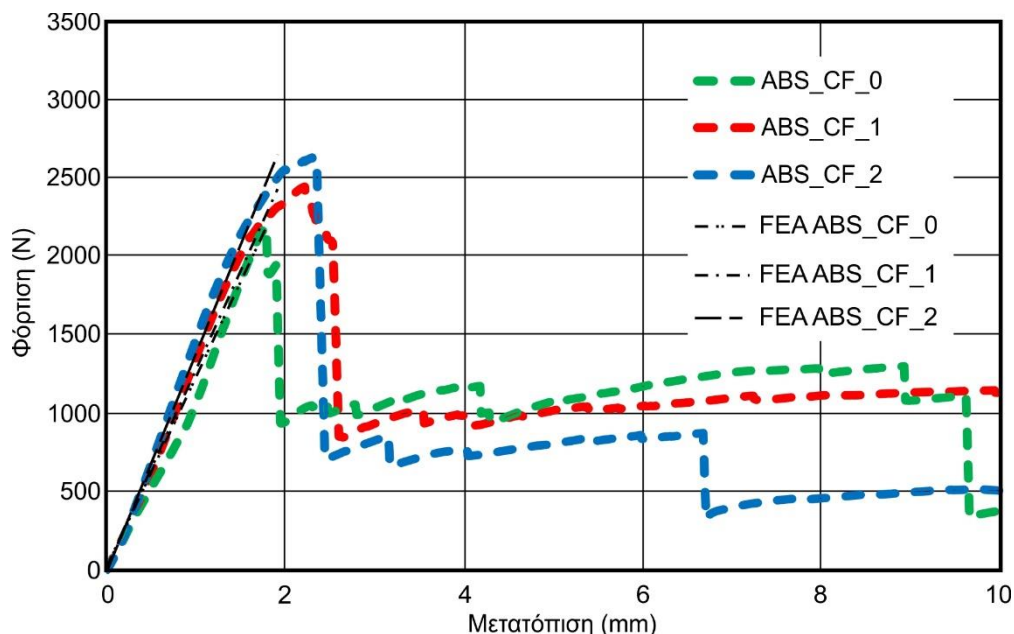
Οι μέγιστες δυνάμεις που παρατηρήθηκαν από τα πειράματα κάμψης τριών σημείων για το νανοσύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) ήταν 2525N, 2895N και 3158N για την κανονική εξαγωνική δομή (μηδενική ιεραρχία), την πρώτη ιεραρχία και τη δεύτερη ιεραρχία αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Στη συνέχεια η καμπτική στιβαρότητα για τις ιεραρχικές δομές sandwich πολυμερικής μήτρας PLA ενισχυμένης με νανοδιαμάντι (PLA/uD) ήταν παρόμοια και προσδιορίστηκε στα 1712N/mm, 1815N/mm και 1783N/mm για την κανονική εξαγωνική δομή (μηδενική ιεραρχία), την πρώτη ιεραρχία και τη δεύτερη ιεραρχία αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα φόρτισης-μετατόπισης για τις τρεις κυψελοειδείς δομές sandwich PLA/uD.

Οι μέγιστες φορτίσεις που παρατηρήθηκαν από τα πειράματα κάμψης τριών σημείων για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (ABS/CF), ήταν 2140N, 2447N και 2633N για την κανονική εξαγωνική δομή (μηδενική ιεραρχία), την πρώτη ιεραρχία

και τη δεύτερη ιεραρχία αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Η καμπτική στιβαρότητα για τις ιεραρχικές δομές sandwich πολυμερικής μήτρας ABS ενισχυμένης με ίνες άνθρακα (ABS/CF) ήταν επίσης παρόμοια για τις διάφορες ιεραρχίες και συγκεκριμένα προσδιορίστηκε στα 1091N/mm, 1103N/mm και 1236N/mm για την κανονική εξαγωνική δομή (μηδενική ιεραρχία), την πρώτη ιεραρχία και τη δεύτερη ιεραρχία αντίστοιχα.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα φόρτισης-μετατόπισης για τις τρεις κυψελοειδείς δομές sandwich ABS/CF.

Για τον ακριβή υπολογισμό των τάσεων στη γεωμετρία των δομών έγινε χρήση του λογισμικού ANSYS. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο προσομοιώνει την καμπτική συμπεριφορά των ιεραρχικών δομών sandwich. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων για τις ιεραρχικές δομές sandwich επικεντρώνεται στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης.

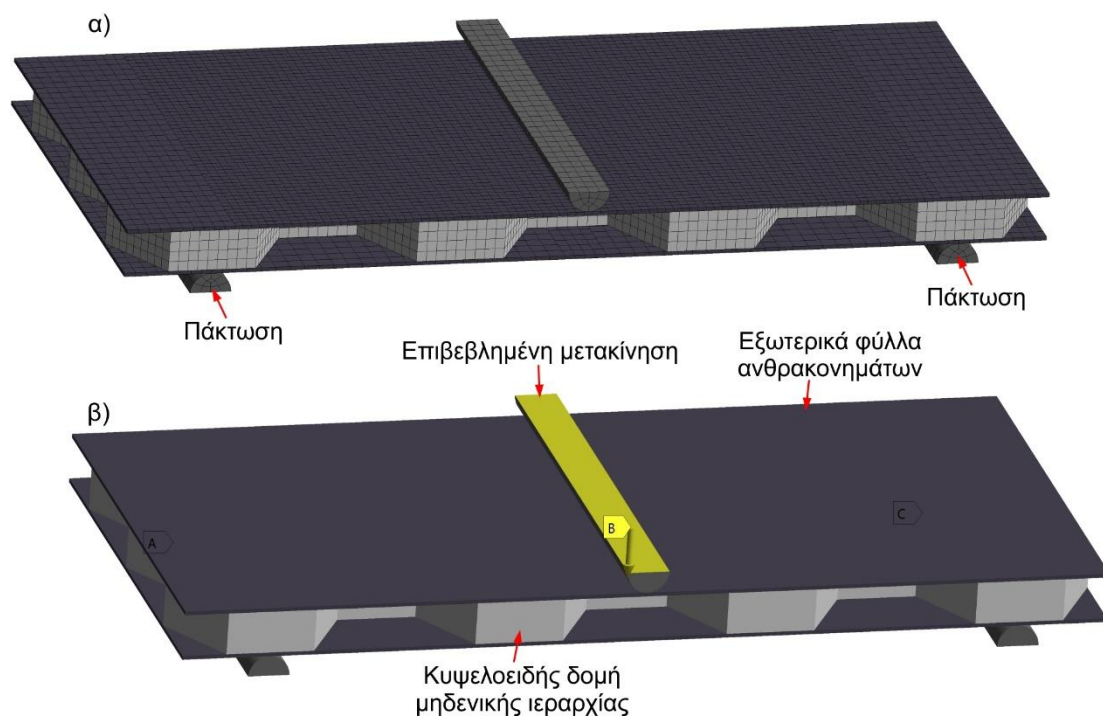
Το πλέγμα αποτελείται από εξάεδρα και πρισματικά στοιχεία (hexahedrals και wedge στοιχεία) για την κανονική εξαγωνική δομή και τις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές, καθώς και για τις άνω και κάτω πλάκες. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ανεξάρτητη από το πλέγμα (mesh) απόκριση, πραγματοποιήθηκε μελέτη σύγκλισης (convergence). Ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων που προέκυψε από τη σύγκλιση για την κάθε ιεραρχία φαίνεται στον πίνακα 5.1.

Γεωμετρία	Κόμβοι	Στοιχεία	Γεωμετρία Στοιχείου	Τύπος Στοιχείου
HCO	90698	12727	Εξάεδρα και πρισματικά στοιχεία	Solid186 (ANSYS)
HC1	109034	14857		
HC2	123583	17687		

Πίνακας 5.1: Παράμετροι πλέγματος (meshing parameters).

Με βάση τα αποτελέσματα σύγκλισης που πραγματοποιήθηκαν για μια ελαστική απόκριση των κυψελοειδών δομών, ένα ελάχιστο μέγεθος στοιχείου των 0.86mm θεωρήθηκε επαρκές για να επιτευχθεί αποδεκτή ακρίβεια στις υπολογισμένες αποκρίσεις, όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.6](#). Χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο SOLID186 του λογισμικού ANSYS το οποίο έχει 3 βαθμούς ελευθερίας (DOFs). Ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τη γεωμετρία HC0 ήταν 265.710 DOFs. Για τη γεωμετρία HC1 ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας ήταν 322.404 DOFs, ενώ ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τη γεωμετρία HC2 ήταν 364.704 DOFs.

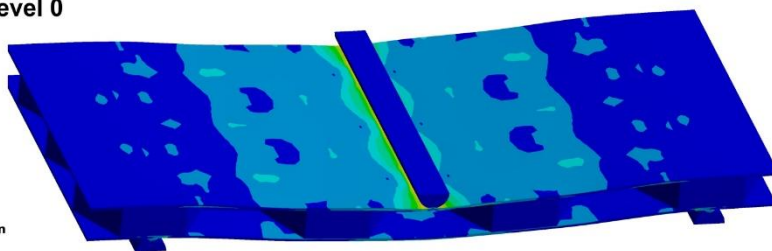
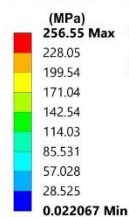
Οι συνοριακές συνθήκες είναι έδραση σε δύο στηρίξεις (ίδιος διαμέτρου με την πειραματική διάταξη) και η κατάλληλη επιβεβλημένη μετακίνηση ασκήθηκε στην επιφάνεια του πάνω εξωτερικού φύλλου, όπως φαίνονται στο σχήμα 5.6. Για την επαφή μεταξύ των δοκιμίων κάμψης και των κυλίνδρων στήριξης θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει σχέση τριβής (frictionless). Η διαδικασία της ανάλυσης είναι επαναλαμβανόμενη μέχρι να συγκλίνουν όλες οι τιμές της προσομοίωσης με το αντίστοιχο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης και κλείσει ο βρόγχος επανάληψης. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση απαιτήθηκαν 20 βήματα τα οποία είναι επαρκή για να προσεγγίσουν τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης των δοκιμών κάμψης.



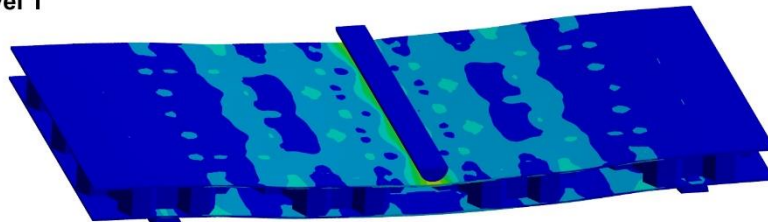
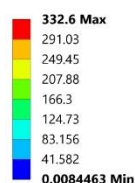
Σχήμα 5.6: α) Πλέγμα και β) συνοριακές συνθήκες μηδενικής δομής sandwich.

Οι ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές PLA/uD τύπου sandwich ενισχυμένες με νανοδιαμάντι, επέφεραν αύξηση της αντοχής σε κάμψη, δίνοντας μέγιστες τιμές τάσεων 256.55MPa, 332.6MPa και 399.12MPa για τη μηδενική, την 1^η και τη 2^η ιεραρχία αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.7](#). Επίσης, οι μέγιστες βυθίσεις για τις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές τύπου sandwich με βάση το νανοσύνθετο υλικό PLA/uD παρουσιάζονται στο [σχήμα 5.8](#). Οι ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές ABS/CF τύπου sandwich ενισχυμένες με ανθρακονήματα, επέφεραν αύξηση της αντοχής σε κάμψη, δίνοντας μέγιστες τιμές τάσεων 246.73MPa, 315.99MPa και 354.78MPa για τη μηδενική, την 1^η και τη 2^η ιεραρχία αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.9](#). Επίσης, τα μέγιστα βέλη κάμψης των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών τύπου sandwich με βάση το σύνθετο υλικό ABS/CF παρουσιάζονται στο [σχήμα 5.10](#).

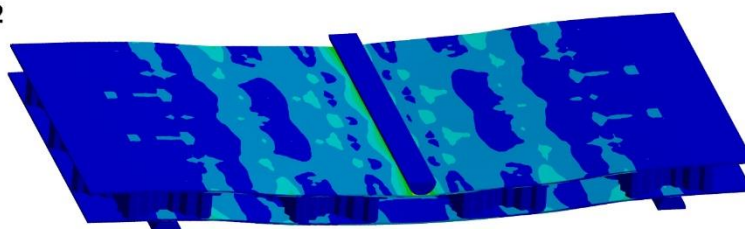
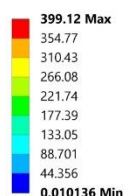
PLA/uD Level 0



PLA/uD Level 1

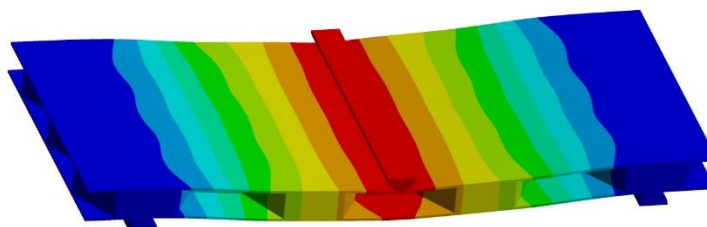
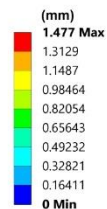


PLA/uD Level 2

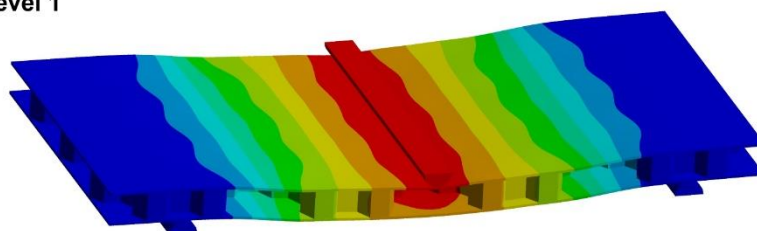
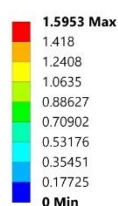


Σχήμα 5.7: Ορθές τάσεις Von Mises για τις ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με βάση το PLA/uD.

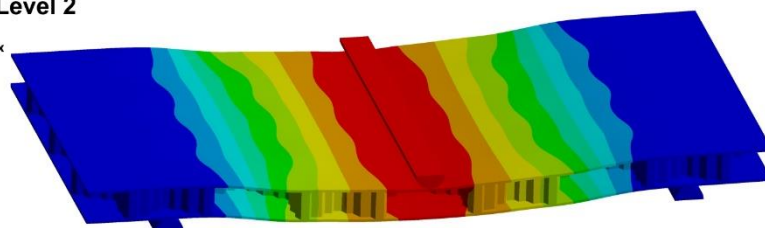
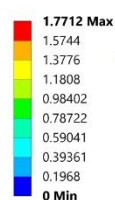
PLA/uD Level 0



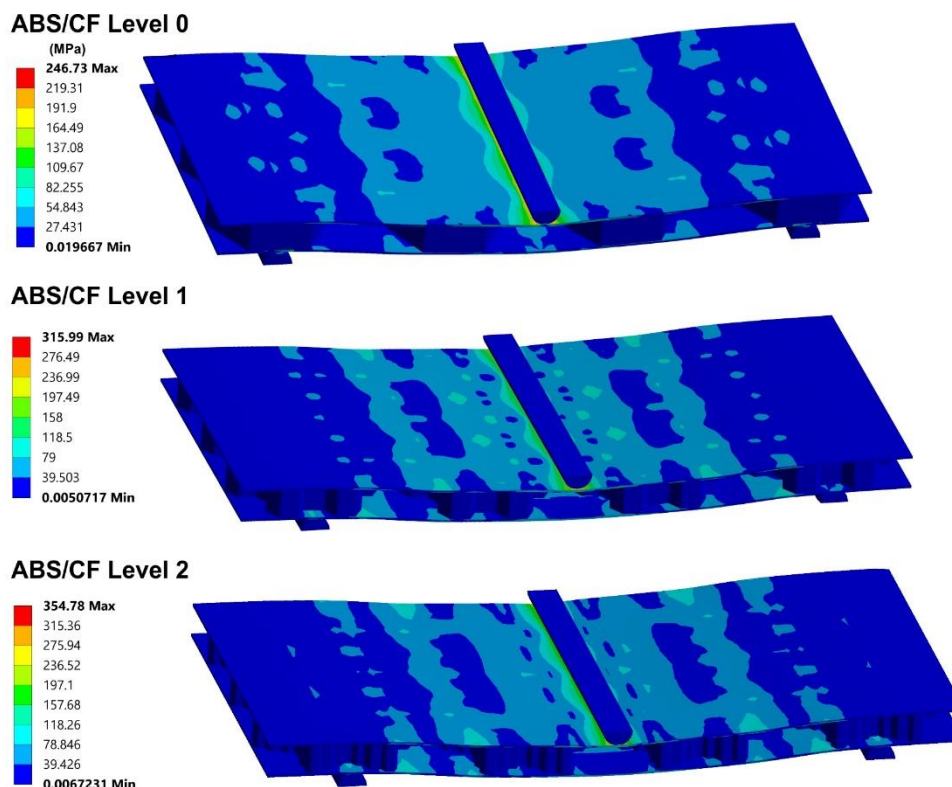
PLA/uD Level 1



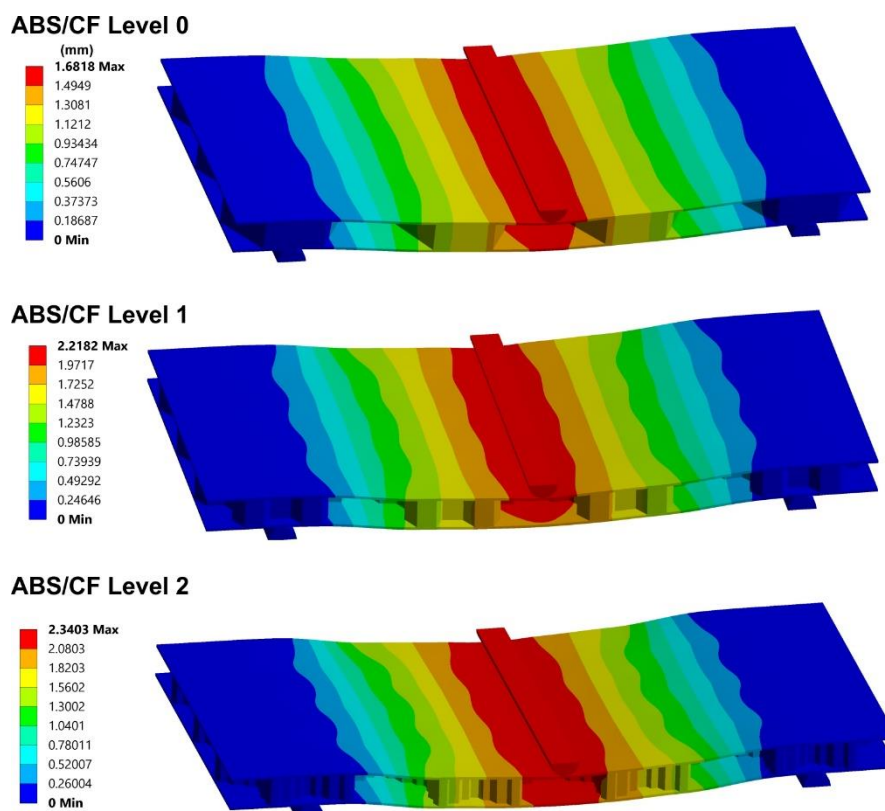
PLA/uD Level 2



Σχήμα 5.8: Μέγιστη κατακόρυφη βύθιση για τις ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με βάση το PLA/uD.



Σχήμα 5.9: Ορθές τάσεις Von Mises για τις ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με βάση το ABS/CF.



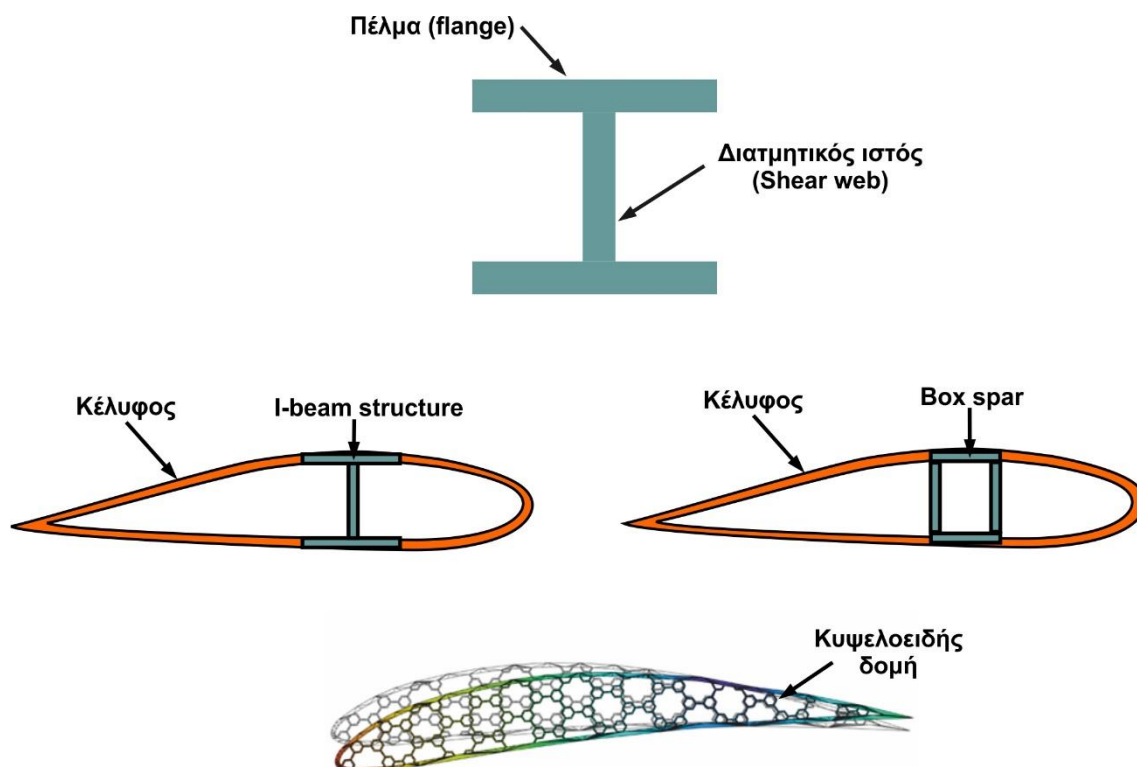
Σχήμα 5.10: Μέγιστη κατακόρυφη βύθιση για τις ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με βάση το ABS/CF.

5.3 Εφαρμογές

Όπως προαναφέρθηκε λεπτομερώς σε προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η κυψελοειδής δομή βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως για παράδειγμα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου βασικό ζητούμενο αποτελεί η κατασκευή εξοπλισμού με υψηλή αντοχή (τόσο μηχανική όσο και θερμική, σε κρούσεις κ.ά.) αλλά παράλληλα με όσο το δυνατόν χαμηλότερο βάρος. Έτσι, ενώ μια δομή είναι πιο ελαφριά όταν δεν είναι συμπαγής, μοναδικό πρόβλημα αποτελεί η αντοχή της.

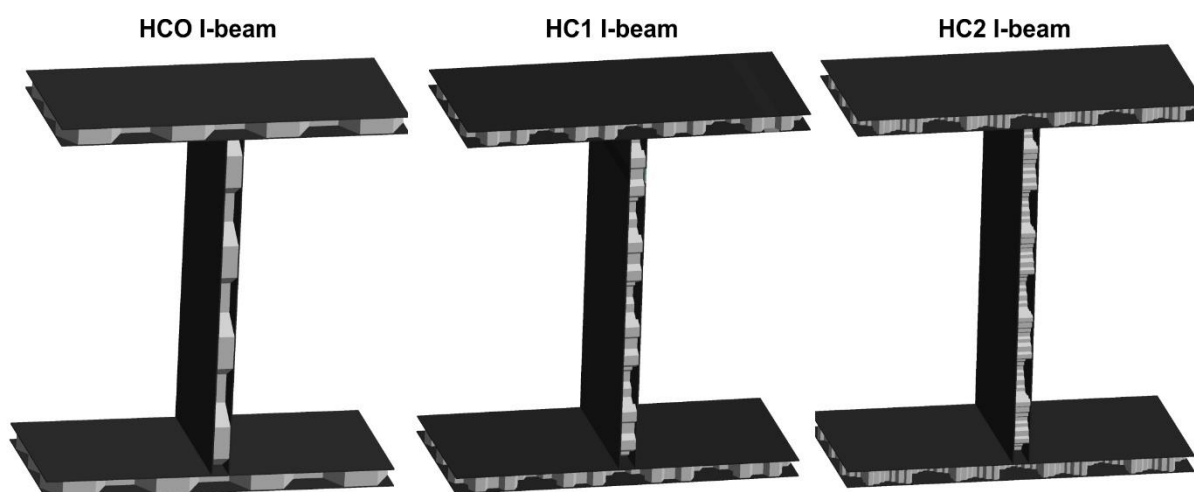
Το σχήμα της αεροτομής μιας πτέρυγας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μελέτης στον τομέα της αεροναυπηγικής. Οι περισσότερες αεροτομές που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τυποποιημένες και έχουν ευρεία χρήση ακόμα και σε προπέλες πλοίων, ανεμογεννήτριες κ.ά. Επιπροσθέτως δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή τέτοιων αεροτομών, ώστε να μην έχουν μεγάλο βάρος το οποίο θα ξεπερνά ορισμένες επιτρεπόμενες τιμές. Έτσι και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις για τις κυψελοειδείς δομές, προκύπτει ότι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά στην κατασκευή πτερύγων.

Μία ιδιαίτερος ενδιαφέρουσα περίπτωση χρήσης των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών sandwich οι οποίες αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν στην παρούσα διατριβή, αποτελεί η δομή τύπου I-beam. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή υπάρχουν δύο εξωτερικές κυψελοειδείς δομές sandwich (flanges) οι οποίες παραλαμβάνουν καμπτικές φορτίσεις, ενώ η εσωτερική κυψελοειδής δομή sandwich (web) που βρίσκεται στη μέση παραλαμβάνει θλιπτικά και εφελκυστικά φορτία. Ακόμη, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός, είτε με τη μορφή αεροτομής για παράδειγμα είτε με τη μορφή δομών που τοποθετούνται κατά μήκος της πτέρυγας για στήριξη, μπορεί να είναι τύπου box, κυψελοειδής δομή, T, Λ, κ.ά., όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Διάφοροι τύποι δομών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελετήθηκαν θεωρητικώς οι αναπτυγμένες και κατασκευασμένες δομές sandwich τύπου I-beam με χρήση του βέλτιστου υλικού πολυμερικής μήτρας PLA ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12. Για τον ακριβή υπολογισμό των τάσεων στη γεωμετρία των δομών έγινε χρήση του λογισμικού ANSYS. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο προσομοιώνει τη θλιπτική συμπεριφορά των ιεραρχικών δομών sandwich τύπου I-beam. Επισημαίνεται ότι η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων για τις ιεραρχικές δομές sandwich επικεντρώνεται στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης.



Σχήμα 5.12: Ιεραρχικές δομές sandwich τύπου I-beam.

Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από εξάεδρα και πρισματικά στοιχεία (hexahedrals και wedge στοιχεία) για την κανονική εξαγωνική δομή και τις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές, καθώς και για τις άνω και κάτω πλάκες. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ανεξάρτητη από το πλέγμα (mesh) απόκριση, πραγματοποιήθηκε μελέτη σύγκλισης (convergence). Ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων που προέκυψε από τη σύγκλιση για την κάθε ιεραρχία φαίνεται στον πίνακα 5.2.

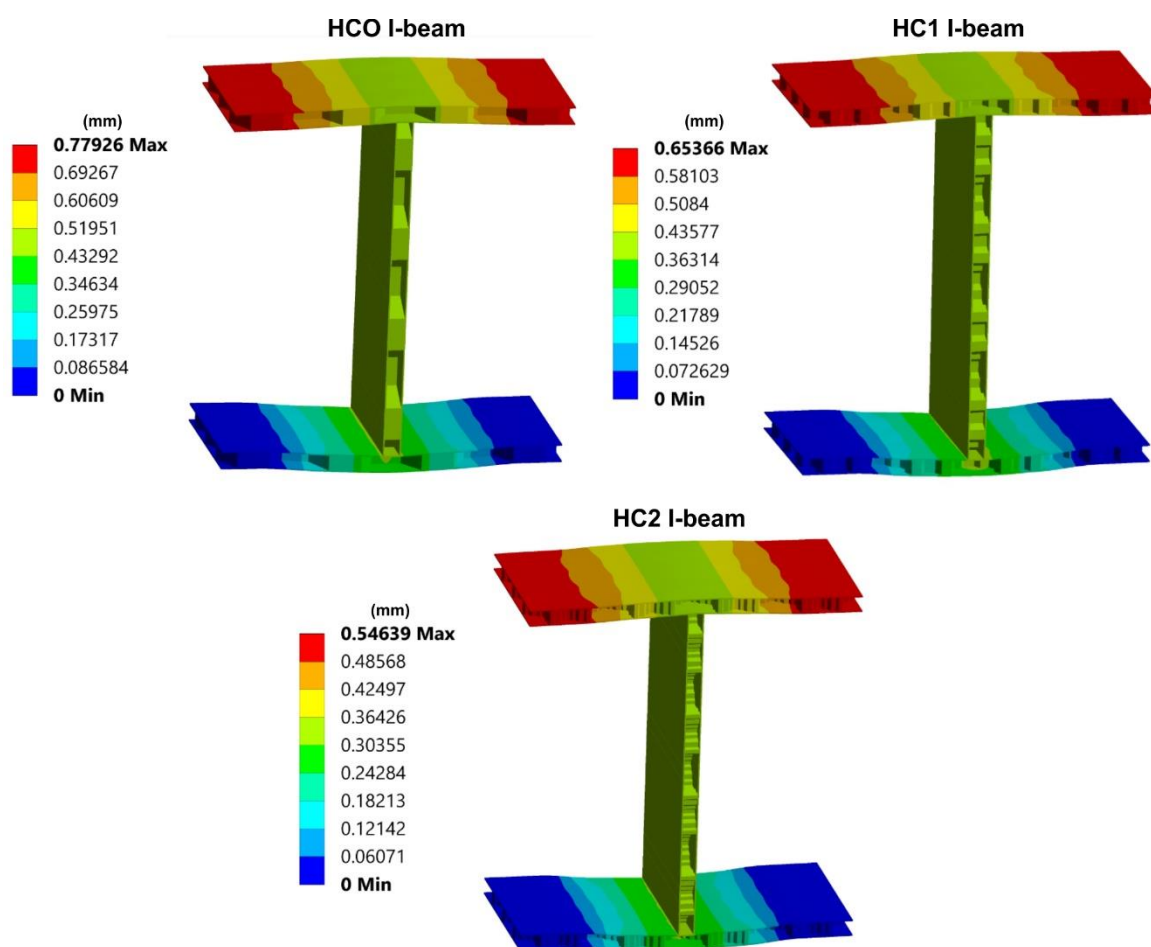
Γεωμετρία	Κόμβοι	Στοιχεία	Γεωμετρία Στοιχείου	Τύπος Στοιχείου
HCO	99111	12504	Εξάεδρα και πρισματικά στοιχεία	Solid186 (ANSYS)
HC1	102825	19758		
HC2	124131	16288		

Πίνακας 5.2: Παράμετροι πλέγματος (meshing parameters).

Με βάση τα αποτελέσματα σύγκλισης που πραγματοποιήθηκαν για μια ελαστική απόκριση των ιεραρχικών δομών sandwich τύπου I-beam, ένα ελάχιστο μέγεθος στοιχείου των 0.86mm θεωρήθηκε επαρκές για να επιτευχθεί αποδεκτή ακρίβεια στις υπολογισμένες αποκρίσεις. Χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο SOLID186 του λογισμικού ANSYS το οποίο έχει 3 βαθμούς ελευθερίας (DOFs). Ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τη γεωμετρία HCO I-beam ήταν 294.591 DOFs. Για τη γεωμετρία HC1 I-beam ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας ήταν 307.225 DOFs, ενώ ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τη γεωμετρία HC2 I-beam ήταν 371.227 DOFs.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε όλες τις ιεραρχικές δομές sandwich τύπου I-beam με χρήση του νανοσύνθετου υλικού PLA/uD υπό στατικό φορτίο 2000N, το οποίο ασκήθηκε ομοιόμορφα σε όλη την πάνω επιφάνεια των δοκιμίων.

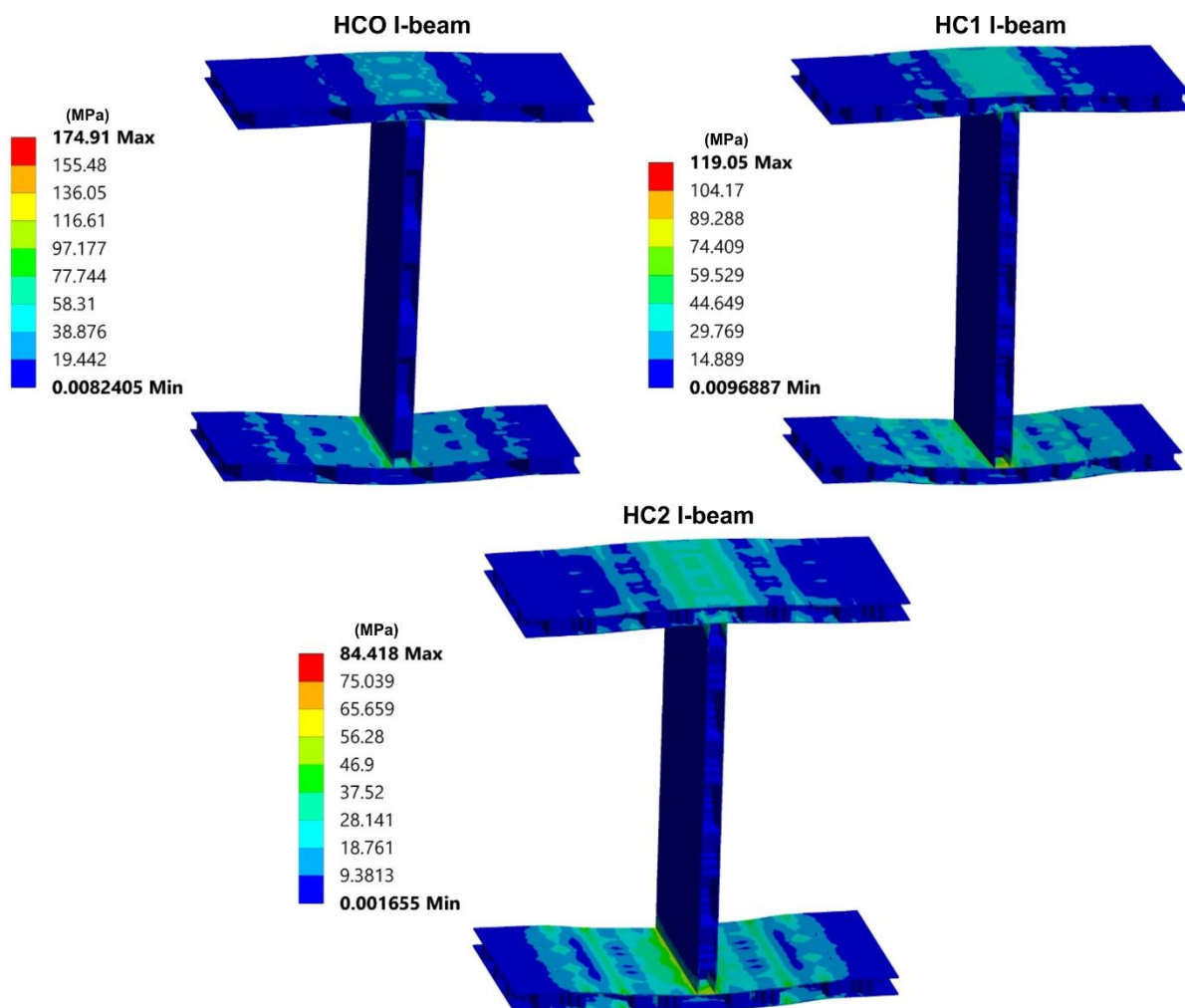
Η δομή sandwich HC0 τύπου I-beam εμφάνισε εντονότερη παραμόρφωση σε όλη την έκτασή της, με μέγιστη μετατόπιση ίση με 0.78mm, η HC1 I-beam εμφάνισε μέγιστη μετατόπιση ίση με 0.65mm, ενώ τέλος η HC2 I-beam είχε μέγιστη παραμόρφωση ίση με 0.55mm, όπως φαίνεται στο [σχήμα 5.13](#). Η μέγιστη τάση για τη μηδενική δομή sandwich τύπου I-beam υπολογίστηκε 174.91MPa, ενώ για την πρώτη και δεύτερη δομή sandwich τύπου I-beam η μέγιστη τάση ήταν 119.05MPa και 84.42MPa αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον [πίνακα 5.3](#) και το [σχήμα 5.14](#).



Σχήμα 5.13: Μετατόπιση προσομοιωτικών δομών sandwich τύπου I-beam για το υλικό PLA/uD.

Ιδιότητα	HC0 I-beam	HC1 I-beam	HC2 I-beam
Μετατόπιση (mm)	0.78	0.65	0.55
Τάση Von Mises (MPa)	174.91	119.05	84.42

Πίνακας 5.3: Μέγιστες τιμές μετατοπίσεων και τάσεων προσομοίωσης δομών I-beam.



Σχήμα 5.14: Τάσεις προσομοιωτικών δομών sandwich τύπου I-beam για το υλικό PLA/uD.

Σε όλες τις περιπτώσεις έχει εφαρμοστεί στατικό φορτίο ίσο με 2000N. Αυτό που παρατηρείται κατόπιν αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του αναπτυγμένου προσομοιωτικού μοντέλου είναι ότι το μοντέλο HC2 I-beam παρουσιάζει τη μικρότερη παραμόρφωση και τάση συγκριτικά με το μοντέλο HC0 I-beam και το HC1 I-beam.

6. Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αρχικά πραγματοποιήθηκε μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των προτεινόμενων νανοσύνθετων υλικών για σύνθετες κατασκευές τύπου sandwich με χρήση ιεραρχικών κυψελοειδών δομών (honeycomb structures) ως πυρήνες καθώς και εξωτερικά φύλλα ενισχυμένα με ανθρακονήματα με βάση την εποξειδική ρητίνη. Οι σύνθετες αυτές κατασκευές σε συνδυασμό με τη χρήση νανοϋλικών βελτιστοποιήθηκαν όσον αφορά τις μηχανικές και ταλαντωτικές ιδιότητές τους μέσω διαφόρων πειραματικών εφαρμογών και υπολογιστικής προσομοίωσης. Πριν ξεκινήσουν οι πειραματικές εφαρμογές των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής βιβλιογραφική αναζήτηση σχετικά με τη μηχανική απόδοση και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών διαφόρων προηγμένων υλικών. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι κυριότερες ερευνητικές εργασίες σε διεθνές επίπεδο που αφορούν τις ιεραρχικές δομές sandwich.

Με την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ακολούθησαν οι πειραματικές εφαρμογές των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών. Διεξήχθησαν πειράματα θλίψης, φόρτισης-αποφόρτισης, νανοδιείσδυσης καθώς και πειράματα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης έδειξαν πως μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας μεταξύ όλων των εξεταζόμενων υλικών παρουσίασε το νανοσύνθετο υλικό πολυγαλακτικό οξύ ενισχυμένο με νανοδιαμάντι (PLA/uD) και συγκεκριμένα με τιμή 6250MPa. Επίσης, η μεγαλύτερη αποσβεστική ικανότητα παρατηρήθηκε στην οικογένεια υλικών Nylon και συγκεκριμένα για τα δοκίμια από Nylon χωρίς κάποια πρόσμειξη, με συντελεστή απωλειών 12.6%, συγκριτικά με τα σύνθετα υλικά Nylon/CF και Nylon/GF. Αξίζει να σημειωθεί πως από τα εξεταζόμενα νανοσύνθετα υλικά, το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης στην απόσβεση επιτεύχθηκε από τα δοκίμια ABS/CF, με τιμή 300%, σε σύγκριση με το απλό ABS και το ABS ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα (ABS/CNTs). Ακόμη, η στιβαρότερη συμπεριφορά εντοπίστηκε στην περίπτωση των δοκιμίων από PLA/uD, όπου η μέση τιμή βάθους μετρήθηκε στα 1.69μm. Η μεγαλύτερη σκληρότητα και το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών νανοδιείσδυσης μεταξύ των εξεταζόμενων νανοσύνθετων υλικών, παρουσιάστηκε στο PLA με συστατικό ενίσχυσης το νανοδιαμάντι (PLA/uD) με τιμή 393.1MPa και 6934MPa αντίστοιχα. Κατόπιν ολοκλήρωσης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των πειραματικών εφαρμογών, επιλέχθηκαν δύο βέλτιστα υλικά με βάση τις μηχανικές ιδιότητές τους και συγκεκριμένα το PLA/uD και το ABS/CF.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στις ιεραρχίες και έπειτα παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευαστική διαδικασία των ιεραρχικών κυψελοειδών δομών. Επίσης, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μοντέλο αυτόματης ιεραρχικοποίησης κυψελοειδών δομών. Επιπλέον, διεξήχθησαν πειράματα μονοαξονικής θλίψης πάνω στις αναπτυγμένες και κατασκευασμένες ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές, με σκοπό τον προσδιορισμό της μηχανικής απόδοσής τους. Παράλληλα, υπήρξε σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές από το προσομοιωτικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε και συγκεκριμένα μέσω του λογισμικού ANSYS. Παρατηρήθηκε πως το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την αύξηση του επιπέδου της ιεραρχίας καθώς επίσης και η πρώτη και δεύτερη ιεραρχική κυψελοειδή δομή παρουσίασαν μεγαλύτερη τάση απ' ό,τι η κανονική εξαγωνική δομή, ενώ παράλληλα διατηρήθηκε η μέγιστη παραμόρφωση. Αφού ολοκληρώθηκε η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων ιεραρχικών δομών, κρίθηκε απαραίτητο σε τέτοιου είδους σύνθετες κατασκευές να ελεγχθεί και η ταλαντωτική τους συμπεριφορά, έτσι ώστε να είναι κατάλληλη η χρήση τους σε διάφορες σύνθετες μηχανολογικές κατασκευές.

Συγκριτικά μεταξύ των δύο βέλτιστων κατασκευών, PLA/uD Level 2 και ABS/CF Level 2, παρατηρήθηκε ότι το PLA/uD είναι πιο στιβαρό, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τις μηχανικές δοκιμές.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν ιεραρχικές δομές τύπου sandwich με χρήση των δύο βέλτιστων υλικών, οι οποίες έχουν ως πυρήνες τις ιεραρχικές κυψελοειδείς δομές που αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν στην παρούσα διατριβή. Οι ιεραρχικές δομές τύπου sandwich αποτελούνται από εξωτερικά φύλλα ανθρακονημάτων σταυρωτής πλέξης (twill fabric) με βάση την εποξειδική ρητίνη, οι οποίες κολλήθηκαν μεταξύ τους μέσω ισχυρής εποξειδικής πάστας και έπειτα υποβλήθηκαν σε στατικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων, με σκοπό την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους. Παράλληλα για τον ακριβή υπολογισμό των τάσεων στη γεωμετρία των δομών, έγινε χρήση του λογισμικού ANSYS και συγκεκριμένα αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο προσομοιώνει την καμπτική συμπεριφορά των ιεραρχικών δομών sandwich.

Τέλος, παρουσιάστηκαν διάφοροι σύνθετοι τύποι δομών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς. Μία τέτοια δομή αποτελεί η δομή sandwich τύπου I-beam με χρήση των αναπτυγμένων και κατασκευασμένων ιεραρχικών δομών sandwich που ερευνήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε προσομοίωση μέσω πεπερασμένων στοιχείων, με στόχο τη διερεύνηση της μηχανικής απόδοσής της. Τα προσομοιωτικά αποτελέσματα από τις δομές sandwich τύπου I-beam, φανέρωσαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψης μηχανικής συμπεριφοράς. Γι' αυτόν τον λόγο, η προτεινόμενη δομή sandwich τύπου I-beam θα μπορούσε να αποτελέσει μία αρκετά καλή επιλογή για χρήση σε εφαρμογές βέλτιστων υλικών και κυψελοειδών δομών σε κατασκευαστικά στοιχεία.

7. Βιβλιογραφία

1. Kumar, L.J., and Krishnadas Nair, C.G., 2017, "Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry: Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies," Springer.
2. Zadpoor, A.A., and Malda, J., 2017, "Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs," *Ann. Biomed. Eng.*, 45(1), pp. 1–11.
3. Mansour, M., Tsongas, K., Tzetzis, D., and Antoniadis, A., 2018, "Mechanical and Dynamic Behavior of Fused Filament Fabrication 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Reinforced with Carbon Fibers," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 57, pp. 1715–1725.
4. Custompartnet.com
5. "Addressing underachievement in STEAM education through real product design and making practices," makeitreal project.
6. Αργύρης Βατάλης, Επιστήμη και τεχνολογία υλικών, Εκδόσεις Ζήτη.
7. Ζουρίδη Ελένη, Προσδιορισμός Μηχανικών Ιδιοτήτων Νανოსύνθετων Υλικών, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012.
8. Δρακόπουλος Ευάγγελος, Κατασκευή-Μοντελοποίηση και Μελέτη της Φυσικής και Μηχανικής Συμπεριφοράς Σύνθετων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένης με Νανοσωλήνες Άνθρακα, Μεταπτυχιακή εργασία ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
9. Μαυρομμάτη Αλεξάνδρα, Προσδιορισμός των Ιδιοτήτων Εποξικής Ρητίνης Ενισχυμένης με Νανοσωλήνες Άνθρακα και Μίκρο/Νανοσωματίδια Διοξειδίου του Πυριτίου, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012.
10. Τσογγάς Κωνσταντίνος, Βελτιστοποίηση Συνθηκών Έδρασης Μηχανικών Διατάξεων με τη Χρήση Προηγμένων Υλικών, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2017.
11. Τρακάκης Γ., Μορφοποίηση και Χαρακτηρισμός Νανοςύνθετων Υλικών Πολυμερικής Μήτρας, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας, 2014.
12. Σοφός Γ., Ηλεκτρική Απόκριση Ελαστομερικών (HNBR) και Σύνθετων Ελαστομερικών Μειγμάτων (HNBR/FKM) που Ενσωματώνουν Νανοσωλήνες Άνθρακα (MWCNT), Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
13. Βαβουλιώτης Α., Νέα Προσέγγιση στην Παρακολούθηση της Αναπτυσσομένης Βλάβης υπό Μηχανική Φόρτιση σε Ινώδη Σύνθετα Υλικά με Μήτρα Ενισχυμένη με Νανοσωληνίσκους Άνθρακα, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
14. Love, L.J., Kunc, V., Rios, O., Duty, C.E., Elliott, A.M., Post, B.K., Smith, R.J., and Blue, C.A., 2014, "The Importance of Carbon Fiber to Polymer Additive Manufacturing," *J. Mater. Res.*, 29(17), pp. 1893–1898.
15. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., and Wang, S., 2015, "Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites using Fused Deposition Modeling," *Comp. Part B: Eng.*, 80, pp. 369–378.
16. Anwer, M.A.S., and Naguib, H.E., 2016, "Study on the morphological, dynamic mechanical and thermal properties of PLA carbon nanofibre composites," *Comp. Part B: Eng.*, 91, pp. 631–639.
17. Yao, X., Luan, C., Zhang, D., Lan, L., and Fu, J., 2017, "Evaluation of carbon fiber-embedded 3D printed structures for strengthening and structural-health monitoring," *Materials and Design*, 114, pp. 424–432.
18. Tekinalp, H.L., Kunc, V., Velez-Garcia, G.M., Duty, C.E., Love, L.J., and Naskar, A.K., 2014, "Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing," *Compos Sci Technol*, 105, pp. 144–150.

19. Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., and Li, Z., 2001, "Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling," *Materials Science and Engineering: A*, 301(2), pp. 125-130.
20. Ferreira, R.T.L., Amatte, I.C., Dutra, T.A., and Bürger, D., 2017, "Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers," *Comp. Part B: Eng.*, 124, pp. 88-100.
21. Shofner, M.L., Lozano, K., Rodriguez-Macias, F.J., and Barrera, E.V., 2003, "Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling," *J Appl Polym Sci*, 89(11), pp. 3081-3090.
22. Yang, C., Tian, X., Liu, T., Cao, Y., and Li, D., 2017, "3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance," *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), pp. 209-215.
23. Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., and Li, D., 2016, "Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites," *Comp. Part A*, 88, pp. 198-205.
24. Van der Klift, F., Koga, Y., Todoroki, A., Ueda, M., Hirano, Y., and Matsuzaki, R., 2016, "3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens," *Open Journal of Composite Materials*, 6, pp. 18-27.
25. Karakoç, A., Rastogi, V.K., Isoaho, T., Tardy, B., Paltakari, J., and Rojas, O.J., 2020, "Comparative Screening of the Structural and Thermomechanical Properties of FDM Filaments Comprising Thermoplastics Loaded with Cellulose, Carbon and Glass Fibers," *Materials*, 13(2), pp. 422.
26. Ultimaker, <https://ultimaker.com/>
27. Carbodeon, <https://carbodeon.com/>
28. Owens-Corning, <https://owenscorning.com/>
29. Liao, G., Li, Z., Cheng, Y., Xu, D., Zhu, D., Jiang, S., Guo, J., Chen, X., Xu, G. and Zhu Y., 2018, "Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling," *Materials and Design*, 139, pp. 283-292.
30. Mansour, G., and Tzetzis, D., 2013, "Nanomechanical characterization of hybrid multi-wall carbon nanotube and fumed silica epoxy nanocomposites," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(10), pp. 1054-1062.
31. Mansour, G., Tzetzis, D., and Bouzakis, K.D., 2013, "A nanomechanical approach on the measurement of the elastic properties of epoxy reinforced carbon nanotube nanocomposites," *Tribology in Industry*, 35(3), pp. 190-199.
32. Tzetzis, D., Mansour, G., Tsiafis, I., and Pavlidou, E., 2012, "Nanoindentation measurements of fumed silica epoxy reinforced nanocomposites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(3), pp. 160-173.
33. Briscoe, B.J., Fiori, L. and Pelillo, E., 1998, "Nano-indentation of polymeric surfaces," *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(19), pp. 2395-2405.
34. Tzetzis, D., Tsongas, K. and Mansour, G., 2017, "Determination of the Mechanical Properties of Epoxy Silica Nanocomposites through FEA-Supported Evaluation of Ball Indentation Test Results," *Mat. Res.*, 20(6).
35. Achillas, C., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymianidis, M., and Tzetzis, D., 2015, "A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory," *J. Manuf. Sys.*, 37, pp. 328-339.
36. Kyratsis, P., and Tzetzis, D., 2018, "Investigation of the Mechanical Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)-Nanosilica Reinforced Nanocomposites for Fused Filament Fabrication 3D Printing," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 416.
37. Gioumouxouzis, C.I., Baklavaridis, A., Katsamenis, O.L., Markopoulou, C.K., Bouropoulos, N., Tzetzis, D., and Fatouros, D.G., 2018, "A 3D printed bilayer oral solid

- dosage form combining metformin for prolonged and glimepiride for immediate drug delivery," *Eur. Journal Pharm. Sci.*, 120, pp. 40-52.
38. Gioumouxouzis, C.I., Chatzitaki, K., Karavasili, C., Katsamenis, O.L., Tzetzis, D., Bouropoulos, N., and Fatouros, D.G., 2018, "Controlled Release of 5-Fluorouracil from Alginate Beads Encapsulated in 3D Printed pH-Responsive Solid Dosage Forms," *AAPS PharmSciTech*, 19(8), pp. 3362-3375.
 39. Giannakis, E., Koidis, C., Tzetzis, D., and Kyratsis, P., 2019, "Static and Fatigue Properties of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Nylon Composites," *Int. J. Modern Manuf. Technol.*, 11, pp. 69-76.
 40. Blok, L.G., Longana, M.L., Yu, H., and Woods, B.K.S., 2018, "An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites," *Addit. Manuf.*, 22, pp. 176-186.
 41. Melenka, G.W., Cheung, B.K.O., Schofield, J.S., Dawson, M.R., and Carey, J.P., 2016, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures," *Compos. Struct.*, 153, pp. 866-875.
 42. Li, N., Li, Y., and Liu, S., 2016, "Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing," *J. Mater. Process. Technol.*, 238, pp. 218-225.
 43. Kim, H., Park, E., Kim, S., Park, B., Kim, N., and Lee, S., 2017, "Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-Material 3D Printed Products," *Procedia Manuf.*, 10, pp. 887-897.
 44. Zhang, J., Zhou, Z., Zhang, F., Tan, Y., Tu, Y., and Yang, B., 2020, "Performance of 3D-Printed Continuous-Carbon-Fiber-Reinforced Plastics with Pressure," *Materials*, 13, 471.
 45. Dickson, A.N., Barry, J.N., McDonnell, K.A., and Dowling, D.P., 2017, "Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, 16, pp. 146-152.
 46. Mansour, M.T., Tsongas, K., Tzetzis, D., and Antoniadis, A., 2017, "Mechanical Behaviour of 3D Printed Composite Materials," *Fiability and Durability*, 20(2), pp. 3-8.
 47. Aizenberg, J., Weaver, J.C., Thanawala, M.S., Sundar, V.C., Morse, D.E. and Fratzl, P., 2005, "Skeleton of *Euplectella* sp.: Structural Hierarchy from the Nanoscale to the Macroscale," *Science*, 309(5732), pp. 275-278.
 48. Zhang, Q., Yang, X., Li, P., Huang, G., Feng, S., Shen, C., Han, B., Zhang, X., Jin, F., and Xu, F., 2015, "Bioinspired engineering of honeycomb structure-Using nature to inspire human innovation," *Prog. Mater. Sci.*, 74, pp. 332-400.
 49. Buehler, M.J., 2006, "Nature designs tough collagen: Explaining the nanostructure of collagen fibrils," *PNAS*, 103(33), pp. 12285-290.
 50. Espinosa, H.D., Juster, A.L., Latourte, F.J., Loh, O.Y., Gregoire, D., and Zavattieri, P. D., 2011, "Tablet-level origin of toughening in abalone shells and translation to synthetic composite materials," *Nature Communications*, 2(1).
 51. Gibson, L.J., Ashby, M.F., and Harley, B.A., 2010, "Cellular materials in nature and medicine," Cambridge University Press.
 52. Lakes, R., 1993, "Materials with structural hierarchy," *Nature*, 361, pp. 511-515.
 53. Lu, T.J., and Chen, C., 1999, "Thermal transport and fire retardance properties of cellular aluminium alloys," *Acta Materialia*, 47(5), pp. 1469-85.
 54. Ajdari, A., Nayeab-Hashemi, H., and Vaziri, A., 2011, "Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures," *Int. J. Solids Struct.*, 48, pp. 506-516.
 55. Gibson, L.J., and Ashby, M.F., 1997, "Cellular solids: structures and properties," Cambridge University Press second edition.
 56. Simone, A.E., and Gibson, L.J., 1998, "Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams," *Acta Materialia*, 46(6), pp. 2139-50.

57. Ajdari, A., Jahromi, B.H., Papadopoulos, J., Nayeb-Hashemi, H., and Vaziri, A., 2012, "Hierarchical honeycombs with tailorable properties," *Int. J. Solids Struct.*, 49, pp. 1413-19.
58. Petrone, G., Rao, S., de Rosa, S., Mace, B.R., Franco, F., and Bhattacharyya, D., 2013, "Behaviour of fibre-reinforced honeycomb core under low velocity impact loading," *Compos. Struct.*, 100, pp. 356-362.
59. Lam, Q., Patil, D., Le, T., Eppley, T., Salti, Z., Goss, D., Grishin, A., and Bhate, D., 2019, "An Examination of the Low Strain Rate Sensitivity of Additively Manufactured Polymer, Composite and Metallic Honeycomb Structures," *Materials*, 12, 3455.
60. Wang, Z., Liu, J., Lu, Z., and Hui, D., 2017, "Mechanical behavior of composited structure filled with tandem honeycombs," *Compos. Part B*, 114, pp. 128-138.
61. Mansour, M., Tsongas, K., and Tzetzis, D., 2018, "Measurement of the mechanical and dynamic properties of 3D printed polylactic acid reinforced with graphene," *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(11), pp. 1234-1244.
62. Mansour, M., Tsongas, K., Tzetzis, D., and Antoniadis, A., 2017, "Mechanical and Dynamic Behavior of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Reinforced with Carbon Microfibers," 6th ICMEN International Conferences, Thessaloniki, Greece.
63. Mansour, M.T., Tsongas, K., and Tzetzis, D., 2021, "3D Printed Hierarchical Honeycombs with Carbon Fiber and Carbon Nanotube Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene," *J. Compos. Sci.*, 5(2), 62.
64. Vinson, J.R., 1986, "Optimum design of composite honeycomb sandwich panels subjected to uniaxial compression," *AIAA Journal*, 24(10).
65. Du, Y., Yan, N., and Kortschot, M.T., 2012, "Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: Fabrication and evaluation," *Composites Part B: Engineering*, 43(7), pp. 2875-2882.
66. Zhou, G., Hill, M., Loughlan, J., and Hookham, N., 2006, "Damage characteristics of composite honeycomb sandwich panels in bending under quasi-static loading," *J Sandwich Struct Mater*, 8(1), 55.
67. Fukuda, H., Itohiya, G., Kataoka, A., and Tashiro, S., 2004, "Evaluation of bending rigidity of CFRP skin-foamed core sandwich beams," *J Sandwich Struct Mater*, 6(1), 75.
68. Staal, R., Mallinson, G., Jayaraman, K., and Horrigan, D., 2009, "Predicting failure loads of undamaged sandwich honeycomb panels subject to bending," *J Sandwich Struct Mater*, 11(2-3), 73.
69. Allen, H.G., 1969, "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels," *The Commonwealth and International Library: Structures and Solid Body Mechanics Division*.
70. Mozafari, H., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., and Guglielmino, E., 2015, "In plane compressive response and crushing of foam filled aluminum honeycombs," *J. Compos. Mater.*, 49, pp. 3215-3228.
71. Mozafari, H., Khatami, S., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., and Guglielmino, E., 2016, "Finite element analysis of foam-filled honeycomb structures under impact loading and crashworthiness design," *International Journal of Crashworthiness*, 21, pp. 148-160.
72. Paik, J.K., Thayamballi, A.K., and Kim, G.S., 1999, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels," *Thin-Walled Structures*, 35, pp. 205-231.
73. Song, S., Xiong, C., Zheng, J., Yin, J., Zou, Y., and Zhu, X., 2021, "Compression, bending, energy absorption properties, and failure modes of composite Kagome honeycomb sandwich structure reinforced by PMI foams," *Composite Structures*, 277.

74. Tao, Y., Li, W., Wei, K., Duan, S., Wen, W., Chen, L., Pei, Y., and Fang, D., 2019, "Mechanical properties and energy absorption of 3D printed square hierarchical honeycombs under in-plane axial compression," *Composites Part B: Engineering*, 176.
75. Chen, Y., Jia, Z., and Wang, L., 2016, "Hierarchical honeycomb lattice metamaterials with improved thermal resistance and mechanical properties," *Composite Structures*, 152, pp. 395-402.
76. Harizi, W., Anjoul, J., Acosta Santamaría, V. A., Aboura, Z., and Briand, V., 2021, "Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests," *Composite Structures*, 262.
77. Sun, G., Huo, X., Chen, D., and Li, Q., 2017, "Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression," *Materials and Design*, 133, pp. 154-168.
78. Sun, Z., Shi, S., Guo, X., Hu, X., and Chen, H., 2016, "On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core," *Compos. Part B: Eng.*, 94, pp. 245-252.
79. Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C.W., and Wang, L., 2018, "3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations," *Materials and Design*, 137, pp. 226-234.
80. Qiao, J., and Chen, C., 2016, "In-plane crushing of a hierarchical honeycomb," *International Journal of Solids and Structures*, 85-86, pp. 57-66.
81. Giglio, M., Gilioli, A., and Manes, A., 2012, "Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core," *Computational Materials Science*, 56, pp. 69-78.
82. Μπουζάκης Κ.Δ., Ταλαντώσεις και Δυναμική Μηχανών, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2010.
83. Νατσιάβας Σ., Εφαρμοσμένη Δυναμική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1996.
84. Week, M., Miegen, W., Muller, W., and Prowler K., "Visual Representation of the Dynamic Behaviour of Machine Tool Structures," WZL, RWTH Aachen, BRD, *Annals of the CIRP* vol. 25/1/1976.
85. Tlustý, J., and Moriwaki, T., "Experimental and Computational Identification of Dynamic Structural Models," Me Master University Hamilton Ontario, Canada, *Annals of the CIRP* vol. 25/2/1976.
86. Brown, D.L., Allemang, R.J., Zimmerman, R., and Mergeay, M., 1979, "Parameter estimation techniques for modal analysis," *SAE Technical Paper 790221*.
87. Kuster, F., "Linear Models to Characterize the Damping and Stiffness Behaviour of Vibration Isolators," *Annals of the CIRP* vol 34/1/1965.
88. Μανσούρ Γκαμπριέλ, Πειραματικός-Αναλυτικός Προσδιορισμός Μητρώου Μετάδοσης και Μέσω Αυτού Βελτιστοποίηση Έδρασης Εργαλειομηχανών, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1989.
89. ASTM E756-05. Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials, American Society for Testing and Materials, 2010.
90. Gould, P.L., 2013, "Introduction to Linear Elasticity," 3rd Edition, Springer, New York.
91. Black, J.T., Kohser, R.A., 2013, "DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing," 11th edition, John Wiley and Sons Inc., Singapore.
92. Macioce, P.J., 2002, *Viscoelastic Damping* 101, Roush Industries Inc., Michigan.
93. Gu, W., 1997, "Interfacial Adhesion Evaluation of Uniaxial Fiber-Reinforced-Polymer Composites by Vibration Damping of Cantilever Beam," PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
94. Piersol, A.G., and Paez, T.L., 2009, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill: New York, NY, USA.

95. Wevers, M., 1997, "Listening to the Sound of Materials: Acoustic Emission for the Analysis of Material Behaviour," *NDT E Inter.*, 30, pp. 99-106.
96. Ge, T.S., 2000, "Theoretical Basis of Solid Internal Friction," Science Press: Beijing, China, pp. 24-28.
97. Mansour, G., Tsongas, K., Tzetzis, D., and Tzikas, K., 2017, "Dynamic mechanical characterization of polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite thermoplastic elastomers," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(14), pp. 1505-1515.
98. Tsongas, K., Tzetzis, D., and Mansour, G., 2017, "Mechanical and Vibration Isolation Behavior of Acrylonitrile-Butadiene Rubber/Multi-Walled Carbon Nanotube Composite Machine Mounts," *J. Plast. Rubber Compos.*, 46(10), 458-468.
99. Tsongas, K., and Mansour, G., 2021, "Characterization of the vibration isolation performance of a punching press machine using TPU/Multi-Walled Carbon Nanotube composite machine mounts," *Recent Advances in Manufacturing*.
100. Fischer-Cripps, A.C., *Nanoindentation*.
101. Schuh, C.A., *Nanoindentation Studies of Materials*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
102. www.nanowerk.com
103. Hyukjae, L., Shankar, M., Peng, H., Donglu, S., Suhasini, N., Yun, Y.-H., Vesselin, S., and Mark, J.S., 2007, "Characterization of Carbon Nanotube/Nanofiber-Reinforced Polymer Composites Using an Instrumented Indentation Technique," *Compos. Part B: Eng.*, 38(1), pp. 58-65.
104. Oliver, W.C., and Pharr, G.M., 2004, "Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology," *Journal of Materials Research*, 19.
105. Κουή, Μ., Λυμπεροπούλου, Θ., "Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (SEM-EDAX)".
106. Mansour, M.T., Tsongas, K., Tzetzis, D., and Antoniadis, A., 2019, "The in-plane compression performance of hierarchical honeycomb additive manufactured structures," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 564.
107. Mansour, M.T., Tsongas, K., and Tzetzis, D., 2020, "The mechanical performance of 3D printed hierarchical honeycombs using carbon fiber and carbon nanotube reinforced acrylonitrile butadiene styrene filaments," *MATEC Web Conf.*, 318.
108. Παπαδοπούλου Βασιλική, Μηχανικές ιδιότητες κυψελοειδούς δομής από σύνθετα πολυμερή κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2019.
109. Σαγρής Δημήτριος, Βελτιστοποίηση Τοποθέτησης και Κινήσεων Βιομηχανικών Ρομπότ μέσω Υβριδικής Μεθόδου, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008.
110. Coley, D., 1999, "An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers," World Scientific Press.