



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΟΝΑΡΝΤΟ ΝΤΕΛΑΚΡΟΥΖ - ΚΑΡΝΑΒΑΣ

Μελέτη και ανάπτυξη κατασκευών μέσω της διαδικασίας της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Λεωνίδας Τσέτσερης

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Λεωνίδας Τσέτσερης
2. Ευάγγελος Χριστοφόρου
3. Ζεργιώτη Ιωάννα

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2021

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Λεωνίδα Τσέτσερη, καθηγητή στη ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, για την ανιδιοτελή βοήθεια του στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας

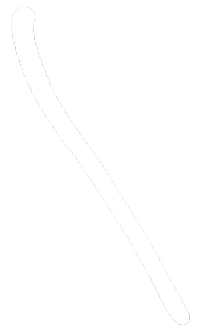
Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, καθηγητή στη ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, που μου έδωσε την ευκαιρία να αναπτύξω ένα θέμα στο οποίο θα μπορούσα να δώσω και δικό μου προσανατολισμό.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ιωάννα Ζεργιώτη, καθηγήτρια στη ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, για τη συμμετοχή της στη διαδικασία της παρουσίασης και κρίσης της διπλωματικής εργασίας.

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά και τον κ. Αθανάσιο Μπαταγιάννη για τη συνεργασία που είχαμε στο διάστημα συγγραφής της εργασίας. Ο πήχης που έθετε για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και φυσικών μεγεθών ήταν μάθημα ερευνητικής εργασίας κι εκτιμώ αρκετά τον χρόνο που αφιέρωσε.

Θα ήθελα, τελειώνοντας, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου (τους γονείς μου και τα αδέρφια μου), όχι μόνο για την ανοχή που έδειξαν αυτούς τους δύσκολους μήνες μέσα στην πανδημία, αλλά γιατί με τον έναν ή τον άλλον τρόπο μου έδειχναν πως να μην σταματάω για να καταφέρω αυτό που θέλω, παρά τα εμπόδια που εμφανίζονται. Σε μεγάλο βαθμό είναι υπεύθυνοι για την περάτωση αυτής της εργασίας.

Κατά αντίστοιχο τρόπο δεν μπορώ παρά να μην ευχαριστήσω και το σύνολο των ανθρώπων, οι σχέσεις με τους οποίους συνδιαμόρφωσαν τον χαρακτήρα μου και μου δίνανε κουράγιο.



Περίληψη

Όσο προχωράνε οι κοινωνίες, τόσο πιο αναγκαία γίνεται η ανάγκη πιο επαναστατικών μέσων στην παραγωγή όπως η ατμομηχανή, το ίντερνετ κτλ. Τα τελευταία χρόνια έχει διευρυνθεί η χρήση “τριδιάστατων” εκτυπωτών τόσο στην παραγωγή εξαρτημάτων και μερών όσο και στην παραγωγή μέσων παραγωγής.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία παρουσίαση αρχικά, στο κεφάλαιο 2, εφαρμογών των προσθετικών κατασκευών στη βιομηχανία, ενώ στο κεφάλαιο 3 γίνεται ανάλυση των πιο σύνηθων μεθόδων με ιδιαίτερη έμφαση στην FDM (Fused Deposition Modelling). Επίσης για μια πιο ζωντανή κατανόηση γίνεται η παρουσίαση ενός ιδιαίτερου είδους εκτυπωτή, του MarkTwo, ο οποίος μπορεί και εκτυπώνει πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Το συγκεκριμένο παράδειγμα εκτυπωτή επιλέχθηκε γιατί δείχνει την πρωτοπόρα κατεύθυνση αυτού του κλάδου.

Καθώς όμως η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα σε ένα μεταβατικό στάδιο, ανάμεσα της έρευνας και της ευρείας χρήσης, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και συγκέντρωση του ερευνητικού όγκου για την ασφαλή αξιοποίηση της μεθόδου προσθετικών κατασκευών στους διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Για αυτόν τον λόγο γίνεται ανάλυση FEA (Finite Element Analysis) ενός πιθανού δοκιμίου που μπορεί να εκτυπωθεί από τον εκτυπωτή που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα, στο κεφάλαιο 5, χρησιμοποιώντας το σύστημα προσομοιώσεων Abaqus CAE, το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 4.

Abstract

As societies evolve the need for radicalised means of production become more necessary. Just like what happened with the invention of the steam engine, the internet etc. Lately the use of 3D printers has been broadened equally to the production of tools or parts as much as the production of means of production

In this thesis, firstly, is given a brief presentation in chapter 2 of applications of additive manufacturing in selective industries, whilst in chapter 3 is given an overview of the most common additive manufacturing processes with better emphasis on FDM (Fused Deposition Modelling). For a much more vibrant understanding it is given a presentation of a remarkable kind of printer, the MarkTwo, which can print directly CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers). The specific printer was selected to show the pioneering direction of this particular industry.

As this field find itself in an intermediate stage, between research and wide use, there is much caution and gathering of the collective research for a safe and reliable use of additive manufacturing in the various industries. For such a reason it's attempted a FEA (Finite Element Analysis) of a possible part that could of been built in the MarkTwo, in chapter 5, using the software Abaqus CAE, which is discussed in chapter 4.

Ευρετήριο εικόνων

1.1 Αριστερά: Παρασκευή πλήνθων από λάσπη και άχυρο, Δεξιά: οι πλήνθοι έτοιμοι σε χρήση.....	3
1.2 Πάνω αριστερά: το μηχάνημα παραγωγής Βακελίτη, πάνω δεξιά: χρωματικός πίνακας για κοσμήματα από Βακελίτη, κάτω αριστερά: μπρίζα φτιαγμένη από Βακελίτη, κάτω δεξιά: τηλέφωνο της εταιρίας Ericsson του 1931.....	4
1.3 Αριστερά: Ίνα άνθρακα όπως φαίνεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, Κέντρο: διάφορα μοτίβα πλεξίματος των ινών, Αριστερά: υλικά φτιαγμένα από ίνες άνθρακα.....	5
1.4 Οι διάφορες χρήσεις CFRP υλικών σε ένα αεροπλάνο.....	5
1.5 Honeycombs με διαφορετικούς τύπους κυψελίδων. (A-a) συνήθης εξαγωνική κυψέλη, (A-b) τετραγωνική κυψέλη, (A-c) τριγωνική κυψέλη, (A-d) κυλινδρική κυψέλη, (B-a) ανομοιογενής εξαγωνική κυψέλη, (B-b) ορθογωνική κυψέλη, (B-c) κυψέλη με εισέχουσα γωνία (reentrant), (B-d) ασύμμετρη κυψέλη, (C-a) τετραγωνική κυψέλη, δομημένη από συνδιασμό τετραγώνων και τριγώνων, (C-b) κυψέλη τύπου Kagome, (D-a) κυψέλη τύπου flex-core, (D-b) κυψέλη τύπου double-flex, (D-c) ενισχυμένη εξαγωνική κυψέλη, (E-a) κυψέλη συντετμημένων τετραγώνων, (E-b) τριεραρχική κυψέλη, (E-c) τετραίεραρχική κυψέλη, (E-d) εξαίεραρχική κυψέλη. (Οι συμβολισμοί K και M εκφράζουν δύο, ανεξάρτητους μεταξύ τους άξονες στο χώρο).....	6
1.6 Η κυψελίδα «κύτταρο» που δημιουργεί την honeycomb διάταξη.....	7
1.7 Η διάταξη Honeycomb με τα συστατικά της μέρη.....	7
2.1 Αριστερά: κινητήρας όπως φαίνεται από το πλάι και ως κάτοψη, Κέντρο: εμφύτευμα για την περιοχή της λεκάνης, Δεξιά: εξάρτημα, (όλα τα προϊόντα είναι παραγμένα μέσω της AM διαδικασίας).....	11
2.2 Εξαρτήματα αυτοκινήτων της Ford (Αριστερά) και Bugatti (Δεξιά), εκτυπωμένα μέσω της μεθόδου της προσθετικής κατασκευής.....	12
2.3 Τμήμα σπιτιού το οποίο εκτυπώνεται με υλικό με τη λάσπη, μέσω του προγράμματος TECLA.....	13
2.4 Εκτυπωμένες οδοντιατρικές μασέλες.....	13
3.1 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SLS.....	17
3.2 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου LOM.....	18
3.3 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου 3DP.....	19
3.4 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SL.....	19
3.5 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου FDM.....	20
3.6 Αναπαράσταση τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω της μοντελοποίησης με εναπόθεση συγχωνεύματος (FDM).....	22
3.7 Αριστερά: ο εκτυπωτής MarkTwo, Δεξιά: Καρούλια με υλικό που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον εκτυπωτή (από αριστερά προς τα δεξιά: υαλώδης ίνας, ίνα άνθρακα, ίνα από υλικό Aramid).....	24
3.8 Το σύστημα εξώθησης των ινών από τα καρούλια στην κεφαλή εκτύπωσης (Με το πράσινο παριστάνεται το nylon υλικό και με σομόν η ίνα). Επίσης φαίνεται ο μηχανισμός κοπής στο σύστημα της ίνας.....	25

3.9 Κάτοψη μηχανισμού εκτύπωσης.....	25
3.10 Κάτοψη του εκτυπωτή όπου φαίνονται τα μοτέρ κίνησης των αξόνων.....	26
4.1 Αριστερά: Η γεωμετρία της κυψελίδας, δεξιά: ολόκληρη η διάταξη honeycomb.....	30
4.2 Αριστερά: Η διάταξη πλήρως συναρμολογημένη όπως φαίνεται από την κατηγορία Assembly του Abaqus CAE, δεξιά: Η ενσωμάτωση των ινών άνθρακα από πιο κοντινή άποψη.....	31
4.3 Ο προσανατολισμός που δόθηκε σε όλα τα μέρη του ορθού τοπικού υλικού.....	32
4.4 Δεξιά: Το honeycomb sandwich με εξαεδρικό πλέγμα ανάλυσης, Αριστερά: Οι παραμορφώσεις του δοκιμίου λόγω καταπόνησης (χρησιμοποιώντας εξαγωνικό πλέγμα ανάλυσης για την αωτύπωση των αποτελεσμάτων).....	33
4.5 Το πλέγμα ανάλυσης, τετραεδρικών στοιχείων, του τελικού δοκιμίου.....	33
4.6 Οι περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας στη μία από τις δύο πλευρές του δοκιμίου όπως φαίνεται στο πρόγραμμα.....	34
4.7 Η καταπόνηση όπως παρουσιάζεται στο Abaqus CAE.....	35
5.1 Η επίδραση του mesh size (για honeycomb και CFRP αντίστοιχα) στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και κατανομής της απόκρισης. Αριστερά: 3mm και 0,7mm, Κέντρο: 2,5mm και 0,3mm, Δεξιά: 2mm και 0,2mm.....	39
5.2 Οι μέγιστες τάσεις Mises που αναπτύσσονται στο δοκίμιο.....	41
5.3 Η κατανομή των μέγιστων τάσεων Mises όπως συγκεντρώνονται στις ίνες.....	41
5.4 Η κατανομή μετατοπίσεων στο δοκίμιο.....	42
5.5 Οι παραμορφώσεις-μετατοπίσεις όπως φαίνονται στη πλάγια όψη του δοκιμίου. Αριστερά: χωρίς καταπόνηση, Δεξιά: με καταπόνηση.....	42

Ευρετήριο πινάκων

3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης της μεθόδου FDM.....	23
3.2 Επιλεγμένα στοιχεία των μηχανικών ιδιοτήτων, για το υλικό που χρησιμοποιείται ως μήτρα, όπως δίνονται από την εταιρεία “MarkForged 3D Printers”	24
3.3 Επιλεγμένα στοιχεία μηχανικών ιδιοτήτων, για το υλικό που χρησιμοποιείται για την εναπόθεση των ινών άνθρακα, όπως δίνονται από την εταιρεία “MarkForged 3D Printers”	24
4.1 Το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται στις επεξεργασίες μέσω του Abaqus CAE. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται σε αυτήν τη μελέτη.....	29
5.1 Οι μέγιστες τιμές μετατόπισης και τάσης von Mises για τα τεστ με διαφορετικό mesh size και άλλα δεδομένα.....	39

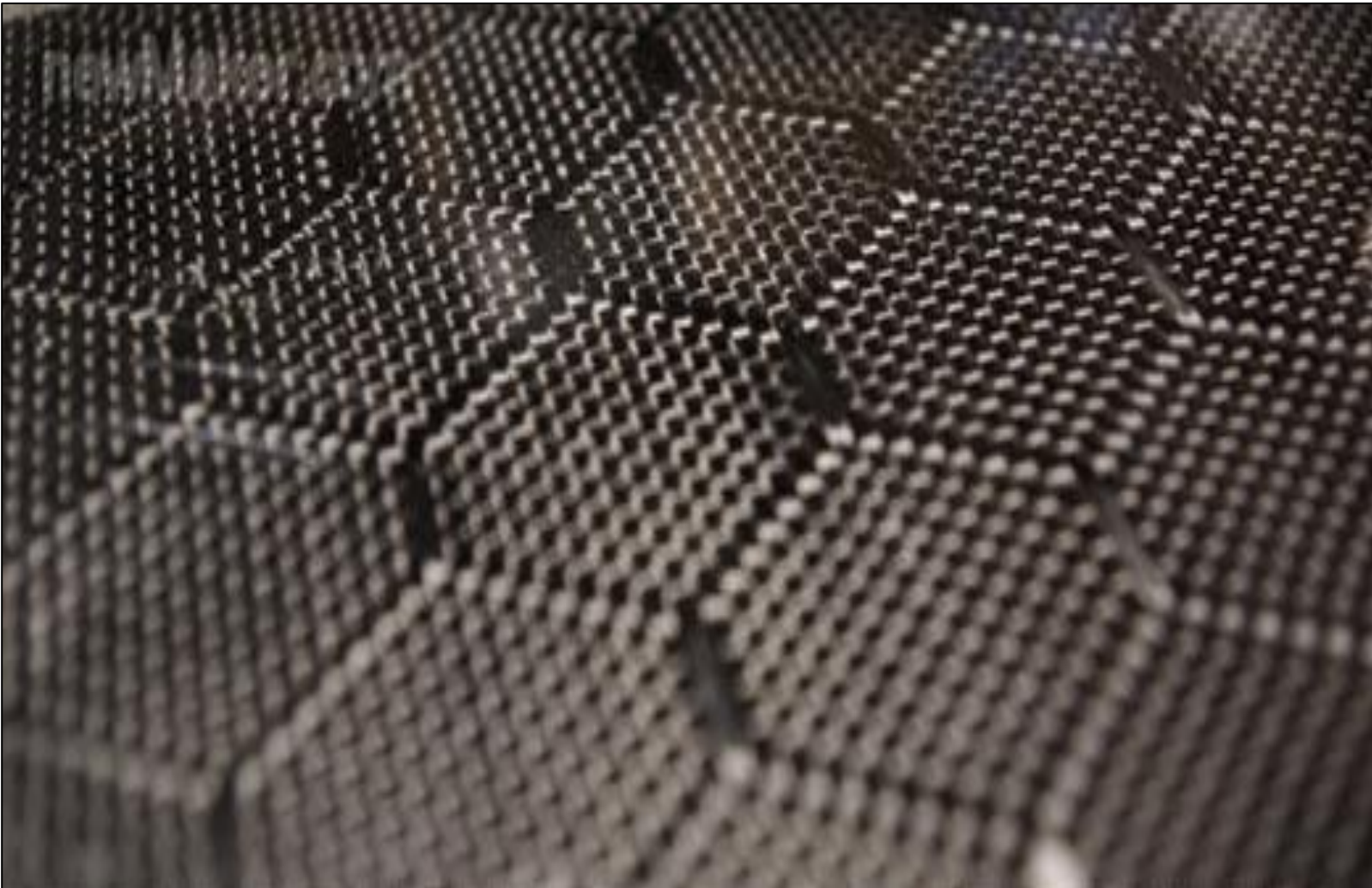
Περιεχομενα

Ευχαριστίες.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract.....	vii
Ευρετήριο εικόνων.....	viii
Ευρετήριο πινάκων.....	x
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικά	
1.1 Περί πολυμερών ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP).....	3
1.1.1 Εισαγωγικά - Ιστορική αναδρομή σύνθετων υλικών.....	3
1.1.2 Τα CFRP υλικά και οι ιδιότητές τους.....	4
1.2 Περί Honeycomb Sandwich.....	6
Κεφάλαιο 2 Εφαρμογές της μεθόδου προσθετικής κατασκευής σε επιλεγμένους τομείς βιομηχανίας	
2.1 Το Additive Manufacturing στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική.....	11
2.2 Το Additive Manufacturing στη βιομηχανία αυτοκινήτων.....	12
2.3 Το Additive Manufacturing στην οικοδομική-κατασκευαστική βιομηχανία.....	12
2.4 Το Additive Manufacturing στην ιατρική βιομηχανία.....	13
Κεφάλαιο 3 Προσθετικές κατασκευές και η διαδικασία εκτύπωσης	
3.1 Προσθετικές κατασκευές και μέθοδοι (Additive manufacturing processes).....	17
3.1.1 Μέθοδοι προσθετικών κατασκευών.....	17
3.1.2 Εκτύπωση πολυμερών ενισχυμένα με συνεχείς ίνες (Fiber Reinforced Polymers – FRP).....	21
3.2 Η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	22
3.2.1 Η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω της διαδικασίας FDM.....	22

3.2.2 Ο εκτυπωτής Mark Two.....	23
3.2.2.1 Συγκρίνοντας τους εκτυπωτές Mark One και Mark Two.....	23
3.2.2.2 Τα προς εκτύπωση υλικά από το καρούλι έως την κεφαλή εκτύπωσης.....	25
Κεφάλαιο 4 Το περιβάλλον προσομοίωσης Abaqus CAE και η σχεδίαση του δοκιμίου	
4.1 Η δημιουργία των μερών και η συναρμολόγησή τους.....	29
4.2 Ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών και του συστήματος αξόνων προσανατολισμού.....	31
4.3 Η δημιουργία του πλέγματος ανάλυσης.....	32
4.4 Ο ορισμός των αλληλεπιδράσεων.....	33
4.5 Ο ορισμός βήματος, περιοριστικών συνθηκών, καταπόνησης και της παραγγελίας της προσομοίωσης.....	3
4	
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα προσομοίωσης	
5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα.....	39
5.1.1 Το mesh size.....	39
5.1.2 Οι απλουστεύσεις στις ιδιότητες των υλικών.....	40
5.2 Οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά Mises.....	40
5.3 Οι μετατοπίσεις-παραμορφώσεις.....	42
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και επίλογος.	
6.1 Συμπεράσματα και επίλογος.....	45
Παράρτημα 1	46
Βιβλιογραφία	49

Κεφάλαιο1

Εισαγωγή



1.1 Περί πολυμερών ενισχυμένα με ίνες άνθρακα

1.2 Περί Honeycomb Sandwich

1.1 Περί πολυμερών ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP)

1.1.1 Γενικά – Ιστορική αναδρομή σύνθετων υλικών

Ως σύνθετα υλικά ορίζουμε τα υλικά τα οποία δημιουργούνται από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών. Τα υλικά όπου το αποτελούν είναι διακριτά το ένα από το άλλο και δεν αναφερόμαστε σε μείγμα. Σύμφωνα με τον Agarwal: *“Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.”*. Με τη σύνθεση αυτών καταλήγουμε σε ένα υλικό με ενισχυμένες ιδιότητες που κληρονομεί από τα πρώτα.

Η εφεύρεση και χρήση σύνθετων υλικών είναι φυσικό επόμενο της εργασίας του ανθρώπου, αφού όταν εξερευνήσει και κατανοήσει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες ενός υλικού που χρησιμοποιεί για την κάλυψη των αναγκών του, απομονώνει αφαιρετικά ξεχωριστές, χρήσιμες, ιδιότητες και τις προσθέτει για να λύσει όλο και καλύτερα τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του.

Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από την αρχή κίόλας της συγκρότησης των δουλοκτητικών κοινωνιών, στην Μεσοποταμία του 3.500 π.Χ. όπου για να χτίσουν οι αρχαίοι Σουμέριοι πιο γερά σπίτια, στη μόνιμη, πλέον, κατοικία τους, ενισχύσαν τους λασπώδεις πλήνθους με πλέγματα από άχυρο. Από την αρχαιότητα μέχρι πιο πρώιμους χρόνους βλέπουμε συνεχή εφεύρεση και χρήση σύνθετων υλικών σε διάφορες χρήσεις (στρατιωτικές, καλύτερης ζωής κα). Άλλο παράδειγμα έρχεται πάλι από τους Σουμέριους, όπου επικάλυπταν τα τούβλινα τοιχώματα των σπιτιών τους με πέτρες ή κώνους από πηλό. Το 1000 π.Χ. οι αρχαίοι Ασύριοι χρησιμοποίησαν σανίδες εμβαπτισμένες σε αδιάβροχη άσφαλτο για να φτιάξουν βάρκες, ενώ χρόνια αργότερα οι Ρωμαίοι στηρίχθηκαν στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών για την ανάπτυξη της οδοποιΐας. Τον 13ο αιώνα έχουμε την κατασκευή του πρώτου τόξου κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό, από τους Μογγόλους. Το τόξο αυτό αποτελούνταν από ένα συνδυασμό ξύλου, μπαμπού και μεταξιού κολλημένα με ρητίνη πεύκου, κόκκαλο, τένοντες βοοειδών κα. Αποτελούσε τον μεγαλύτερο τρόπο στα πολεμικά θέρετρα μέχρι την εφεύρεση των πρώτων όπλων με μπαρούτι.



Εικόνα 1.1 Αριστερά: Παρασκευή πλήθων από λάσπη και άχυρο, Δεξιά: οι πλήνθοι έτοιμοι σε χρήση.

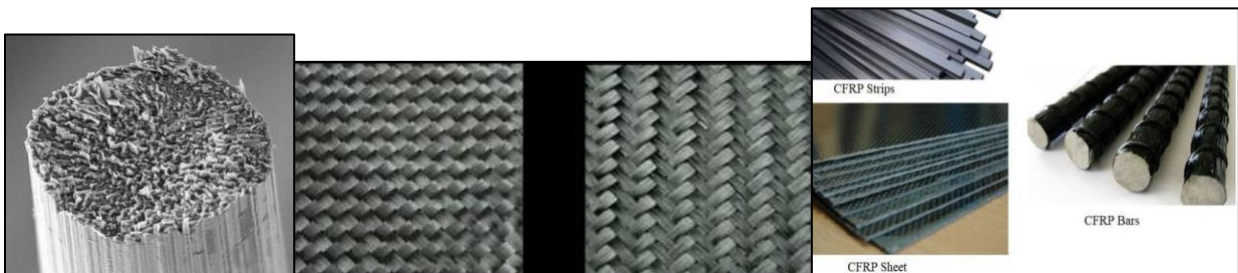
Τον 19^ο αιώνα έρχεται σημαντική αλλαγή στη βιομηχανία των υλικών με τη δημιουργία στερεών ρητίνων. Η πραγματική επανάσταση, όμως, έρχεται τον 20ο αιώνα. Το 1909 ο Leo Baekeland παρουσίασε στην Αμερικανική Ακαδημία Χημικών τον Βακελίτη, το πρώτο συνθετικό υλικό στον κόσμο. Το 1932 έχουμε τη δημιουργία της πρώιμης οπτικής ίνας όπου λίγα χρόνια αργότερα πήρε τη μορφή που έχει σήμερα. Επίσης τη δεκαετία του '30 παρουσιάζονται τα πολυμερή με ενίσχυση ινών. Τη δεκαετία του '60 βλέπουμε την εισαγωγή ινών άνθρακα όπου αποκτούν ευρεία χρήση, ειδικά στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία κα, ενώ τη δεκαετία του '70 εισάγεται το Αραμίδιο (Aramid) στην παραγωγή.



Εικόνα 1.2 Πάνω αριστερά: το μηχάνημα παραγωγής Βακελίτη, πάνω δεξιά: χρωματικός πίνακας για κοσμήματα από Βακελίτη, κάτω αριστερά: μπρίζα φτιαγμένη από Βακελίτη, κάτω δεξιά: τηλέφωνο της εταιρίας Ericsson του 1931.

1.1.2 Τα CFRP υλικά και οι ιδιότητές τους

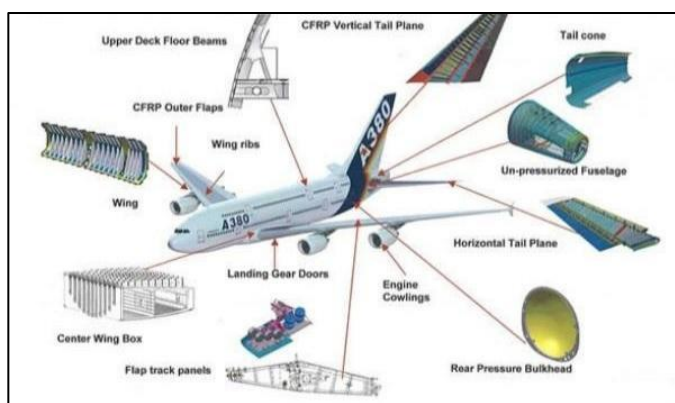
Σήμερα η μεγάλη πλειοψηφία των πολυμερών ενισχυμένα με ίνες (Fiber Reinforced Polymers – FRP) είναι με υαλώδεις ίνες (glass fibers) αλλά στην αεροναυπηγική, διαστημική τεχνολογία και αγωνιστική αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται οι ίνες άνθρακα και αραμιδίου. Οι ίνες άνθρακα (Carbon Fibers – CF) είναι ένα υλικό το οποίο αποτελείται από αρκετά λεπτές ίνες αποτελούμενες από άτομα άνθρακα, διαμέτρου 0,005-0,010mm. Τα άτομα του άνθρακα ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας μικροσκοπικούς κρυστάλλους όπου τοποθετούνται παράλληλα στον μεγάλο άξονα της ίνας. Ο προσανατολισμός, αυτός, κάνει την ίνα εξαιρετικά δυνατή για το μέγεθός της. Σε κάποιες περιπτώσεις οι ίνες περιπλέκονται δημιουργώντας “κλωστές” μπορώντας έτσι να χρησιμοποιηθούν ως υλικό. Υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί πλεξίματος των “κλωστών” αλλά ο πιο δημοφιλής είναι αυτός όπου χρησιμοποιεί αυτήν την ιδιότητα για την ενίσχυση πολυμερών υλικών με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymers – CFRP). Η πυκνότητά τους παραμένει αρκετά χαμηλή, μικρότερη ακόμα και του ατσαλιού, ενώ έχει και μεγάλη αντοχή και μικρό συντελεστή θερμότητας. Για αυτούς τους λόγους δημιουργούνται υλικά με τρομερά υψηλό λόγο αντοχής προς βάρους (strength to weight ratio) και μεγάλη ακαμψία (stiffness). Στην αεροναυπηγική, όπου χρειάζονται μεγάλες αντοχές, με το ελάχιστο δυνατό βάρος, τα CFRP χρησιμοποιήθηκαν από την πρώτη στιγμή μέχρι και σήμερα.



Εικόνα 1.3 Αριστερά: Ίνα άνθρακα όπως φαίνεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, Κέντρο: διάφορα μοτίβα πλεξίματος των ινών, Δεξιά: υλικά φτιαγμένα από ίνες άνθρακα.

Τις τελικές μηχανικές ιδιότητες καθορίζει το υλικό που χρησιμοποιούμε ως ενίσχυση, εδώ οι ίνες του άνθρακα, και συνήθως χρησιμοποιούνται στοιχεία όπως η επιμήκυνση (strain), η ελαστικότητα κ.α. Σε σημαντικό βαθμό οι ιδιότητες καθορίζονται από τον όγκο του υλικού που χρησιμοποιείται ως μήτρα, τον όγκο των ινών, αλλά και τη μορφή με την οποία εναποτίθενται οι ίνες.

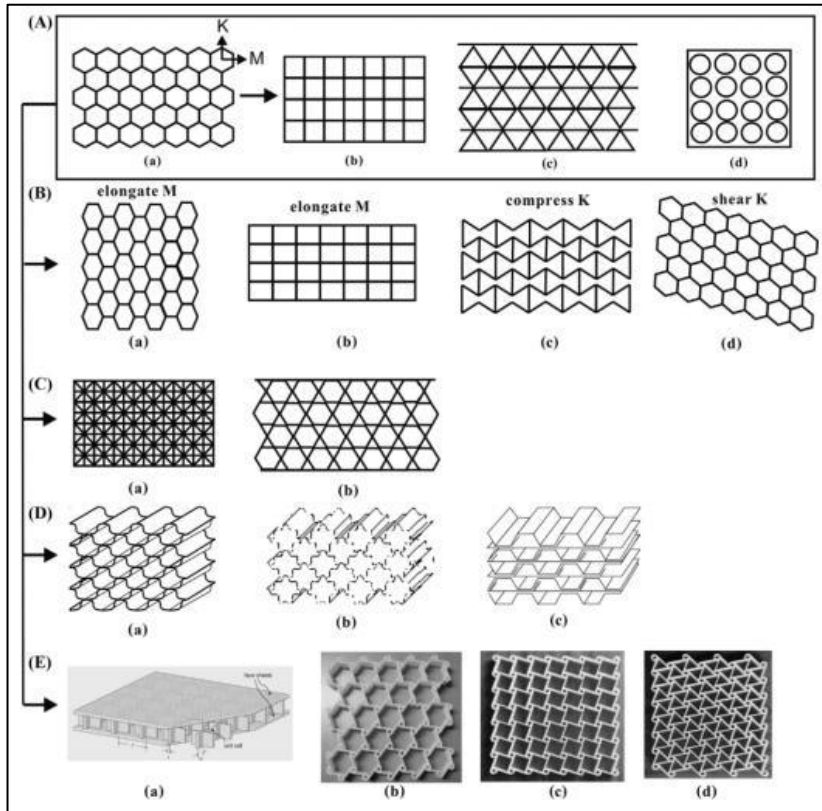
Σε αντίθεση με τα ιστροπικά υλικά θα παίξει ρόλο η σχετική κατεύθυνση της καταπόνησης σε σχέση με την κατεύθυνση των ινών. Στην περίπτωση όπου οι ίνες κοιτάνε στην κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται, τότε η ελαστικότητα του σύνθετου υλικού βρίσκεται ως εξής: $E = V_mE_m + V_fE_f$, ενώ αν η καταπόνηση ασκείται κάθετα στην κατεύθυνση των ινών, τότε ισχύει αυτή η σχέση: $E = \frac{1}{\left(\frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}\right)}$. Η ελαστικότητα του σύνθετου δίνεται από το E, ενώ E_m και E_f είναι οι ελαστικότητες της μήτρας και των ινών αντίστοιχα. V_m και V_f είναι οι όγκοι της μήτρας και των ινών αντίστοιχα. Οι μηχανικές ιδιότητες των CFRP είναι καλύτερες από άλλα σύνθετα πολυμερή όπως αυτά με ενίσχυση glass fibers (Glass Fiber Reinforced Polymers – GFRP).^[1]



Εικόνα 1.4 Οι διάφορες χρήσεις CFRP υλικών σε ένα αεροπλάνο.

1.2 Περί Honeycomb sandwich

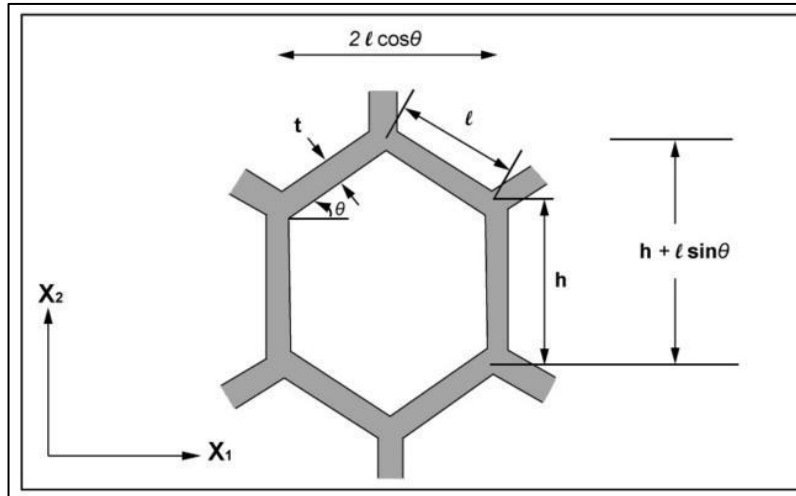
Η κυψελοειδής (Honeycomb) διάταξη με εξαγωνικές κυψελίδες είναι μία από τις πιο συνηθισμένες και αρκετά εύκολα μπορεί να παραχθεί μέσα από πληθώρα υλικών και τεχνολογιών. Η χρήση αυτών των μορφών διάταξης είναι τόσο μεγάλη στους διάφορους τομείς της βιομηχανίας όπου ακόμα και η μορφή της, σε κάποιες περιπτώσεις, έχει ξεφύγει από τα παραδοσιακά σχηματικά πλαίσια και έχει επεκταθεί επίσης και σε μικρο- ή νάνο- διατάξεις.^[2] Παρόλες τις σχηματικές εναλλαγές η κενή κοιλότητα θα παραμείνει σχεδόν σε όλες τις παραλλαγές.



Εικόνα 1.5 Honeycombs με διαφορετικούς τύπους κυψελίδων. (A-a) συνήθης εξαγωνική κυψέλη, (A-b) τετραγωνική κυψέλη, (A-c) τριγωνική κυψέλη, (A-d) κυλινδρική κυψέλη, (B-a) ανομοιογενής εξαγωνική κυψέλη, (B-b) ορθογωνική κυψέλη, (B-c) κυψέλη με εισέχουσα γωνία (reentrant), (B-d) ασύμμετρη κυψέλη, (C-a) τετραγωνική κυψέλη, δομημένη από συνδιασμό τετραγώνων και τριγώνων, (C-b) κυψέλη τύπου Kagome, (D-a) κυψέλη τύπου flex-core, (D-b) κυψέλη τύπου double-flex, (D-c) ενισχυμένη εξαγωνική κυψέλη, (E-a) κυψέλη συντετμημένων τετραγώνων, (E-b) τριεραρχική κυψέλη, (E-c) τετραϊεραρχική κυψέλη, (E-d) εξαϊεραρχική κυψέλη. (Οι συμβολισμοί K και M εκφράζουν δύο, ανεξάρτητους μεταξύ τους άξονες στο χώρο)

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα της honeycomb διάταξης είναι πως εξαιτίας της ελαχιστοποιούμε την ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιούμε κατά την παραγωγή κι έτσι μειώνουμε σημαντικά το βάρος του παραγόμενου προϊόντος και το κόστος του. Επίσης αυτές οι διατάξεις έχουν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες.^[3]

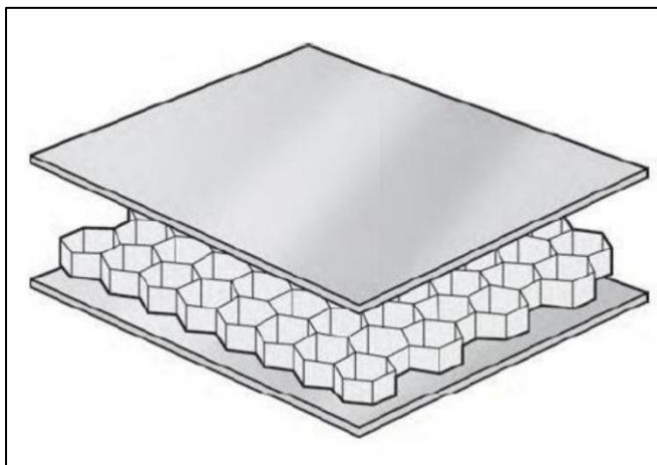
Η πιο συνηθισμένη μορφή honeycomb διάταξης και αυτή που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, είναι αυτή που φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, όπου συνήθως τα μήκη των πλευρών διαφέρουν μεταξύ τους, ενώ το πάχος αλλάζει ανάλογα τις ανάγκες χρήσης.



Εικόνα 1.6 Η κυψελίδα «κύτταρο» που δημιουργεί τη honeycomb διάταξη.

Συνήθως οι διατάξεις δημιουργούν “μακροσκοπικά” επίπεδες επιφάνειες όπως πλάκες ή φύλλα και οι διάμετροι της κυψελίδας μπορεί να έχει μέγεθος από μερικά μικρά (μm) έως χιλιοστά (mm). Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η σχετική πυκνότητα της κυψελίδας¹ η οποία επηρεάζει πολλές από τις ιδιότητες της honeycomb διάταξης.^[2]

Τοποθετώντας το honeycomb ανάμεσα σε δύο λεπτές πλάκες δημιουργούμε τη διάταξη όπου ονομάζεται Honeycomb Sandwich. Οι πλάκες θέλουμε να παρέχουν μεγάλη μηχανική αντοχή. Έτσι η διάταξη χρησιμοποιείται εκεί όπου απαιτούνται αυτές οι μεγάλες μηχανικές ιδιότητες, μειώνοντας το βάρος.

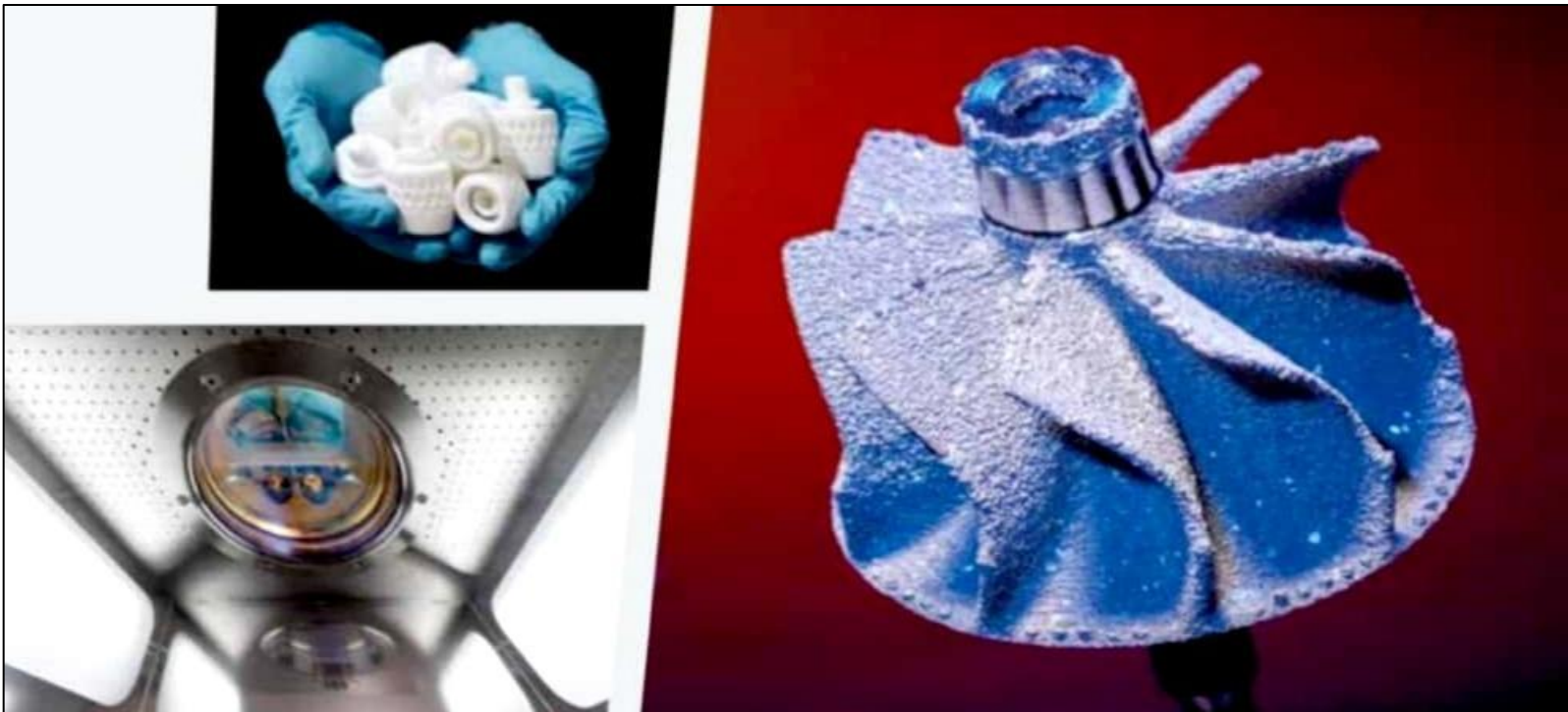


Εικόνα 1.7 Η διάταξη Honeycomb με τα συστατικά της μέρη.

¹ Ο λόγος της πυκνότητας της κυψελοειδούς δομής προς την πυκνότητα που υλικού.

Κεφάλαιο 2

Εφαρμογές της μεθόδου προσθετικής κατασκευής σε επιλεγμένους τομείς βιομηχανίας



- 2.1 To Additive Manufacturing στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική
- 2.2 To Additive Manufacturing στη βιομηχανία αυτοκινήτων
- 2.3 To Additive Manufacturing στην οικοδομική-κατασκευαστική βιομηχανία
- 2.4 To Additive Manufacturing στην ιατρική βιομηχανία

Η διαδικασία της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing, AM) δίνει τη δυνατότητα να παράγεται ένα προϊόν κατευθείαν από ένα τρισδιάστατο σχέδιο CAD. Η προσθετική κατασκευή έχει χαρακτηριστεί από την Αμερικανική Κοινότητα για Δοκιμές και Υλικά (ASTM) ως: “η διαδικασία ένωσης υλικών για τη δημιουργία αντικειμένων από τρισδιάστατα μοντέλα πληροφοριών, συνήθως στρώση τη στρώση”.^[4] Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των προσθετικών κατασκευών, έναντι πιο συμβατικών μεθόδων παραγωγής, είναι ότι δεν χρειάζεται εργαλεία, ψυκτικά κ.α. Έτσι η διαδικασία αυτή έχει βρει αμέτρητες εφαρμογές, από την ιατρική με την παραγωγή προσθετικών μελών για ανθρώπους με αναπηρία, την αρχιτεκτονική, μέχρι και την καθημερινή ζωή ^{[5] [6] [7] [8] [9] [10]}, δηλαδή από τη μία, αλλά παίρνει και τη θέση της στην κατασκευή μέσω παραγωγής, αυξάνοντας τρομερά τα μέσα παραγωγής.



Εικόνα 2.1 Αριστερά: κινητήρας όπως φαίνεται από το πλάι και ως κάτοψη, Κέντρο: εμφύτευμα για την περιοχή της λεκάνης, Δεξιά: εξάρτημα, (όλα τα προϊόντα είναι παραγμένα μέσω της AM διαδικασίας).

Έχει διαδοθεί τόσο, που όπως με τους η/υ πλέον έχει και εμπορική χρήση, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει επιταχύνει την παραγωγή σύνθετων υλικών με αυξημένες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές.

2.1 Το Additive Manufacturing στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική²

Η διαδικασία της προσθετικής κατασκευής έχει καθιερωθεί στον χώρο της αεροδιαστημικής μηχανικής αφού συνδυάζει μικρό κόστος, προσαρμοστικότητα στις απαιτήσεις του προς εκτύπωση εξαρτήματος, ταχύτητα παράδοσης, μείωση του βάρους του εξαρτήματος κ.α.^[11] Σε τέτοιο βαθμό όπου γίνεται όλο και μεγαλύτερη η συζήτηση για θεσμοθέτηση προδιαγραφών στο χώρο, σε παγκόσμιο επίπεδο.^[12]

Για παράδειγμα η NASA σε πείραμα που διεξήγαγε υπέβαλε αντλία καυσίμων (που έκαιγε αέριο Υδρογόνο και υγρό Οξυγόνο) για 46'' σε 3300°C με μεγάλες πιέσεις χωρίς να επέλθει διαρροή. Με την έως πρότινος παρασκευαστική μέθοδο, η αντλία έκανε 6 μήνες για να είναι έτοιμη με κόστος 10.000\$, ενώ η συγκεκριμένη αντλία, μέσω της διαδικασίας AM, ήταν έτοιμη σε 3 εβδομάδες με το μισό κόστος.^[13]

Σε άλλο πείραμα το Γερμανικό αεροδιαστημικό κέντρο παρήγαγε επαναχρησιμοποιούμενο κινητήρα πυραύλων μέσω της μεθόδου AM, μειώνοντας το βάρος κατά 10%, ενώ πλέον παράχθηκε 1 εξάρτημα (ολόκληρος ο κινητήρας) τη στιγμή που πριν χρειαζόντουσαν 30 διαφορετικά.^[13] Φαίνεται ότι μπορούμε να κατασκευάζουμε πιο εύκολα πολύπλοκα γεωμετρικά εξαρτήματα, όπου προηγούμενα ήταν δύσκολο και απαιτητικό, πόσο μάλλον τη στιγμή που χρησιμοποιούμε 1 μέσο παραγωγής και όχι δεκάδες άλλα. Επίσης γεννιέται η δυνατότητα για παραγωγή κατά παραγγελία ακόμα και 1 εξαρτήματος και όχι αναγκαστικά χιλιάδων όπως παλιότερα.

² Στο παράρτημα 1 γίνεται μία παρουσίαση των διαχρονικών προβλημάτων που προσπαθεί να λύσει το Additive Manufacturing στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

Η ικανότητα όμως, όπως αναφέραμε, της μείωσης του βάρους, κάνοντας ημικούφιο το εσωτερικό σε συνδυασμό με τη χρήση σύνθετων υλικών (πχ CFRP) κάνει αυτή τη διαδικασία την πλέον ιδανική για αξιοποίηση της στη διαστημική τεχνολογία.

Όλη αυτή η μελέτη αποτελεί ένα μικρό κομμάτι μιας έρευνας που πρέπει να διευρυνθεί και μέσω κάποιων αρκετά συγκεκριμένων αποτελεσμάτων θέλει να δώσει μια κατεύθυνση όσον αφορά την βιομηχανία της αεροδιαστημικής.

2.2 To Additive Manufacturing στη βιομηχανία αυτοκινήτων

Αντίστοιχα με την αεροναυπηγική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο η μάζα των μερών που απαρτίζουν το όχημα καθώς επηρεάζουν την ποσότητα καυσίμου που καίγεται. Επίσης το γεγονός, όπως προαναφέραμε, ότι δίνεται πλέον η δυνατότητα εκτύπωσης λιγότερων επιμέρους μερών μειώνει τον κατασκευαστικό χρόνο, τα έξοδα συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής.^[14] Τέλος, δίνεται η δυνατότητα γρήγορης ανανέωσης ανταλλακτικών και εργαλείων. Για παράδειγμα η εταιρεία Bugatti χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FDM³ δημιούργησε τη μεγαλύτερη δαγκάνα φρένων 8 πιστονίων από τιτάνιο σε όχημα παραγωγής του. Η Ford πρόσφατα εκτύπωσε βοηθητικά βύσματα για το όχημά της F-15 Raptor.



Εικόνα 2.2 Εξαρτήματα αυτοκινήτων της Ford (Αριστερά) και Bugatti (Δεξιά), εκτυπωμένα μέσω της μεθόδου της προσθετικής κατασκευής.

2.3 To Additive Manufacturing στην οικοδομική-κατασκευαστική βιομηχανία

Το βασικό, άλυτο μέχρι στιγμής, πρόβλημα στις κατασκευές της κοινωνίας μας είναι η αποκλειστική χρήση του μοναδικού υλικού που μπορεί να έχει μακροχρόνια αποτελέσματα, που όμως είναι εχθρικό προς το φυσικό περιβάλλον, το τσιμέντο. Φαίνεται το Additive Manufacturing να δημιουργείται μία δυναμική που θα φέρνει αλλαγή και σε αυτόν τον κλάδο.^[15]

Τα τελευταία χρόνια έχει πληθύνει ο αριθμός των ινστιτούτων ή επιχειρήσεων που είτε προσπαθούν να οικειοποιηθούν της τεχνικής αυτής, είτε ερευνούν τον τρόπο με τον οποίο μπορούν επιτυχημένα να “παντρευτούν” οι δύο κλάδοι. Για παράδειγμα το πρόγραμμα TECLA στη Μπολόνια της Ιταλίας χρησιμοποιεί ένα μείγμα λάσπης ως υλικό για εκτύπωση και εκτυπώθηκε, έτσι, το πρώτο εκτυπωμένο σπίτι^[16]. (Σχήμα 2.3)

³ Η μέθοδος FDM θα παρουσιαστεί και θα συζητηθεί αναλυτικότερα στην υποενότητα “3.1.1 Μέθοδοι προσθετικών κατασκευών”.



Εικόνα 2.3 Τμήμα σπιτιού το οποίο εκτυπώνεται με υλικό με βάση τη λάσπη, μέσω του προγράμματος TECLA.

2.4 Το Additive Manufacturing στην ιατρική βιομηχανία

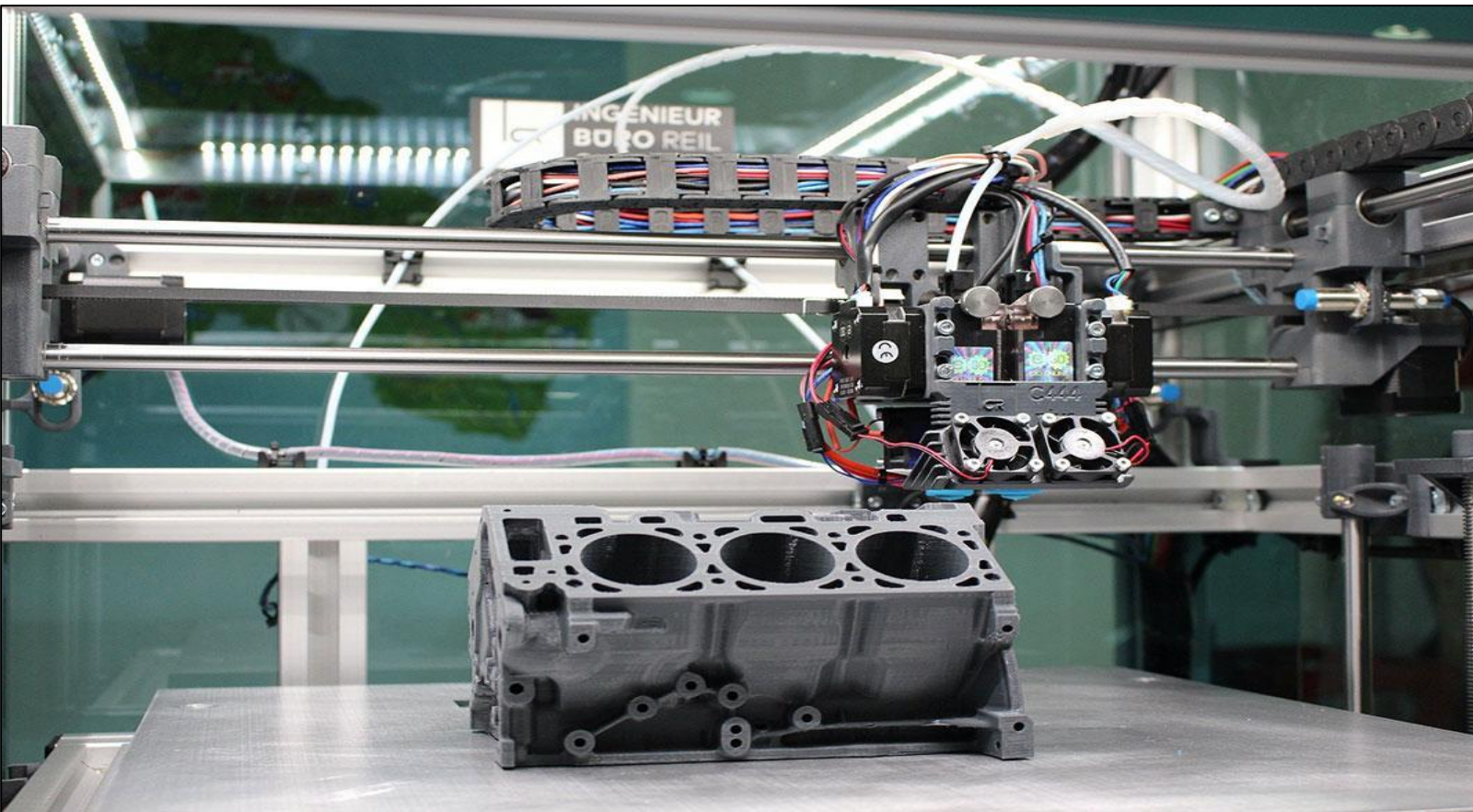
Η πρώτη μεγάλη συνεισφορά της μεθόδου της προσθετικής κατασκευής στην ιατρική βιομηχανία ήταν στον τομέα της ακουστικής και της οδοντιατρικής. Επίσης αρκετά μεγάλη είναι η χρήση στην παραγωγή εξαρτημάτων στους μαγνητικούς τομογράφους κα. Τα τελευταία χρόνια είναι όλο και πιο μεγάλη η έρευνα για την αξιοποίηση της μεθόδου στην εκτύπωση προσθετικών μερών όπως τμήματα γνάθου, κρανίου, μοιρού, άκρων κα. Μάλιστα η έρευνα και πρόοδος είναι τόσο μπροστά όπου πλέον μπορούν να εκτυπωθούν ανθρώπινα όργανα.^[17]



Εικόνα 2.4 Εκτυπωμένες οδοντιατρικές μασέλες.

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι προσθετικών κατασκευών και η διαδικασία εκτύπωσης



3.1 Μέθοδοι προσθετικών κατασκευών

3.2 Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

3.1 Προσθετικές κατασκευές και μέθοδοι (Additive manufacturing processes)

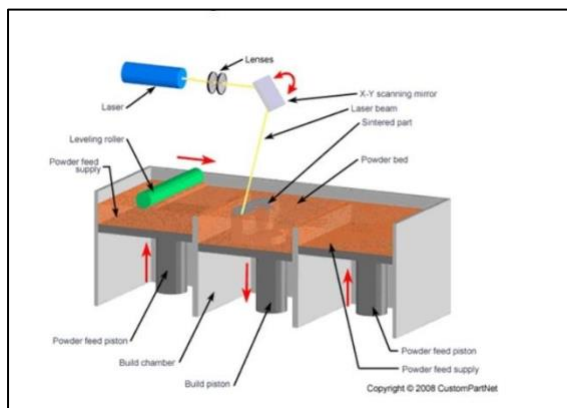
3.1.1 Μέθοδοι Προσθετικών Κατασκευών

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι προσθετικών κατασκευών, όλες όμως ακολουθούν τον ίδιο βασικό κανόνα. Αρχικά χρειάζεται η δημιουργία του ψηφιακού σχεδίου του επιθυμητού προϊόντος. Για το υποβοηθούμενο από Η/Υ σχέδιο (CAD) υπάρχει πληθώρα προγραμμάτων που είναι διαθέσιμα όπως το Abaqus CAE, SolidWorks κα. Το CAD αρχείο αποθηκεύεται σε αρχείο της μορφή .stl⁴. Στη συνέχεια η τρισδιάστατη εικόνα CAD τεμαχίζεται σε στρώσεις/επίπεδα και τέλος, στέλνεται στο μηχάνημα προσθετικής κατασκευής για την κατασκευή του.

Όπως αναφέρθηκε οι μέθοδοι προσθετικών κατασκευών ποικίλλουν και η κάθε μία λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο και υλικά. Ακολουθούν, συνοπτικά, οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι.

Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση μέσω laser (Selective Laser Sintering, SLS)

Η μέθοδος SLS είναι η διαδικασία ενοποίησης υλικών σε μορφή πούδρας (powder) με τη χρήση laser. Η πούδρα θερμαίνεται μέχρι μία θερμοκρασία λίγο πιο κάτω από αυτήν της τήξης του υλικού. Στη συνέχεια το laser τη θερμαίνει περισσότερο ώστε να ξεπεράσει ελάχιστα τη θερμοκρασία τήξης και να ενοποιηθεί σε ένα στερεό σώμα. Η πούδρα δεν τήκεται από το laser για να ενοποιηθεί, αλλά τα σωματίδια της θερμαίνονται αρκετά ώστε να σχηματίσουν όλα μαζί ένα στερεό σώμα χωρίς την ανάγκη τήξης, γιαυτό μιλάμε για διαδικασία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και όχι επιλεκτικής τήξης. Αφού δημιουργηθεί μία στρώση, το επίπεδο στο οποίο δημιουργείται η στρώση μετατοπίζεται ελαφρώς κατακόρυφα προς τα κάτω ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί από πάνω του άλλη στρώση. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται το προς παραγγελία προϊόν.



Εικόνα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SLS.

Κάθε υλικό το οποίο βρίσκεται στη μορφή πούδρας και έχει την ιδιότητα να δημιουργεί πυροσυσσωμάτωμα υπό την επίρεια laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τα πιο συνήθη υλικά για τη διαδικασία αυτή είναι πολυμερή, υαλώδη, κεραμικά αλλά και μέταλλα⁵. Μέχρι πρότινος επικρατούσε αποκλειστικά η παραγωγή μερών, μέσω αυτής της μεθόδου, με πούδρα ενός υλικού, σήμερα όμως υπάρχει στη βιομηχανία πούδρα που αποτελείται από την ανάμειξη υλικών.^[18] Όταν χρησιμοποιούνται πούδρες δύο υλικών θα υπάρξει μία διαφορά στα σημεία σημεία τήξης. Το laser σε αυτήν την περίπτωση θα επιχειρήσει να θερμάνει, κατάλληλα για πυροσυσσωμάτωση, την ουσία με το υψηλότερο σημείο τήξης,

⁴ Ο τύπος αρχείου .stl εισήχθη το 1987 από την 3D Systems Inc. για τη βοήθεια της Στερεολιθογραφίας. Το ακρονύμιο stl σημαίνει Standard Tessellation Language. Πλέον αποτελεί την αναμενόμενη μορφή αρχείου για τα μηχανήματα τα οποία λειτουργούν με τη διαδικασία της προσθετικής κατασκευής.

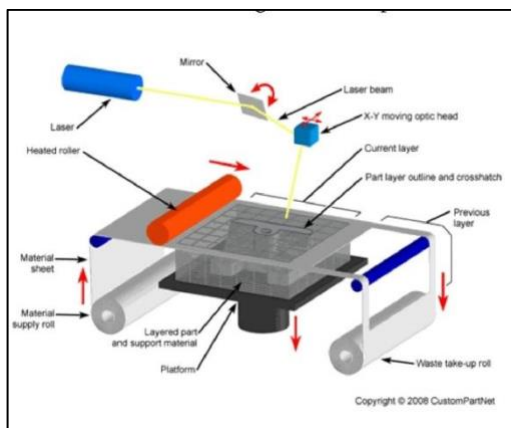
⁵ Όταν χρησιμοποιούνται ως βάση μεταλλικά στοιχεία η μέθοδος, πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ως "Απευθείας πυροσυσσωμάτωση μετάλλου μέσω laser" (Direct Metal Laser Sintering, DMLS).

έτσι αυτό ενώνεται, με το δεύτερο υλικό να έχει ήδη λιώσει και να συμπληρώνει τα κενά που θα υπάρχουν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται “Πυροσυσσωμάτωση υγρής φάσης” (Liquid Phase Sintering, LPS).

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι άλλων που στηρίζονται σε υλικά τύπου πούδρας είναι ότι αυτή δεν χρειάζεται την παρουσία συγκολλητικής ουσίας. Παρόλαυτα έχει διάφορους περιορισμούς, όπως ότι τα προϊόντα που παράγονται έχουν περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες ή ότι αδυνατεί η μέθοδος αυτή να δημιουργήσει υλικά με ενίσχυση ινών.

Μοντελοποίηση Επιστρωμένων Αντικειμένων (Laminated Object Modelling, LOM)

Η μέθοδος LOM στηρίζεται στη χρήση υλικού στη μορφή αρκετά λεπτών φύλλων για να παράξει το επιθυμητό τρισδιάστατο εξάρτημα. Το φύλλο είναι τυλιγμένο ανάμεσα σε δύο κυλίνδρους που βρίσκονται στη μία και την άλλη μεριά του μηχανήματος, ενώ υπάρχουν και δύο βοηθητικοί κύλινδροι που βοηθούν τη διάταξη. Ένα laser⁶ κόβει από το φύλλο την επιθυμητή διατομή η οποία τοποθετείται στον χώρο εκτύπωσης και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται ξανά και ξανά μέχρι να εκτυπωθεί κάθε στρώση του τρισδιάστατου μοντέλου όπου θα μπουν η μία πάνω στην άλλη και θα κολληθούν μέσω της διαδικασίας της ζεστής κύλισης (hot rolling). Για αυτόν το λόγο το υλικό έχει επικαυφθεί με την κολλώδη ουσία ώστε να είναι δυνατή αυτή η διαδικασία. Τέλος το laser είναι προγραμματισμένο ώστε να κόβει μία στρώση τη φορά και να μην παραμορφώνει το προϊόν προς εκτύπωση που βρίσκεται από κάτω του.



Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου LOM

Από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ο πολύ μικρός χρόνος παραγωγής, αφού απαιτείται μόνο το κόψιμο διατομών για τη δημιουργία του εξαρτήματος, καθώς επίσης και το μεγάλο εύρος υλικών που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πρώτη ύλη, όπως μέταλλα, κεραμικά, ακόμα και κάποια σύνθετα υλικά⁷.

Μερικοί περιορισμοί που έχει αυτή η μέθοδος είναι πως τα υλικά που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν κάποιο ελάχιστο όριο εφελκυστικής τάσης, για να μπορούν να είναι τεντωμένα ανάμεσα στους κυλίνδρους και να είναι ικανοποιητική η ακρίβεια κοπής. Επίσης, ενώ, η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα να παράξει υλικά με ενίσχυση ινών αλλά αυτό θα σήμαινε πως το υλικό προς χρήση, στη μορφή φύλλου, έχει ήδη ενισχυθεί το ίδιο με ίνες, το οποίο σημαίνει πως η πρώτη ύλη για την κατασκευή γίνεται αρκετά κοστοβόρα.

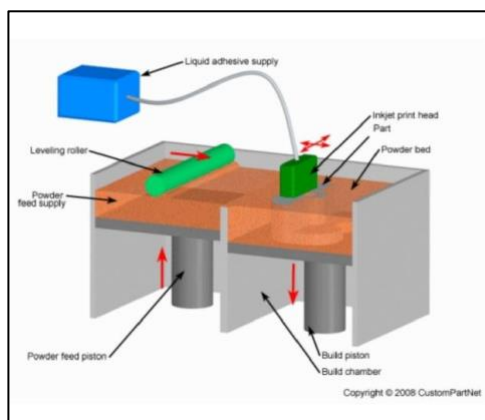
⁶ Συνήθως χρησιμοποιείται laser CO₂ των 25-50 W.

⁷ Αν για τη διαδικασία της κοπής χρησιμοποιηθεί άλλο εργαλείο αντί του laser (πχ μαχαίρι, κοπή μέσω θερμαινόμενου καλωδίου) τότε το εύρος υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι ακόμα πιο μεγάλο καθώς μπορούν να παραχθούν αντικείμενα από χαρτί, πολυμερή και πολυμερικά αφρώδη φύλλα.

Εκτύπωση τριών διαστάσεων (Three Dimensional Printing, 3DP)

Η διαδικασία ενοποιεί υλικό στη μορφή πούδρας χρησιμοποιώντας μία υγρή συγκολλητική ουσία. Η κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει την συγκολλητική ουσία πάνω στην πούδρα, η οποία στερεοποιείται ακαριαία. Η συσκευή που εκτυπώνει με αυτήν τη μέθοδο διαθέτει δύο πλατφόρμες, μία για την εκτύπωση του προϊόντος και μία για την παροχή του πουδρωιδούς υλικού.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία ανυψώνεται η πλατφόρμα με το υλικό προς χρήση και ένας κύλινδρος που βρίσκεται από πάνω, κυλίνεται κατά μήκος ρίχνοντας πούδρα στην διπλανή πλατφόρμα. Η κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει την συγκολλητική ουσία, δημιουργώντας μια στερεά διατομή και μετά απομακρύνεται. Στη συνέχεια η πλατφόρμα που στηρίζει το προϊόν που εκτυπώνεται κατεβαίνει ελαφρώς κατακόρυφα προς τα κάτω για να μπορέσει να επαναληφθεί η διαδικασία, μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση.

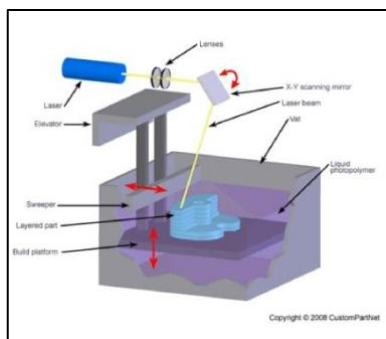


Εικόνα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου 3DP

Βασικό προτέρημα αυτής της μεθόδου είναι η αρκετά γρήγορη εκτύπωση και το μικρό κόστος της ύλης που χρησιμοποιούμε. Παρόλαυτα ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η ανάλυσή του στον z-άξονα, καθώς είναι αρκετά υψηλή, στα 500μm. Επίσης, αφού στηρίζεται σε υλικά στη μορφή πούδρας είναι αδύνατη η δημιουργία σύνθετων υλικών ενισχυμένα με ίνες.

Στερεολιθογραφία (Stereolithography, SL)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ως υλικό για την εκτύπωση πολυμερές σε υγρή μορφή το οποίο στερεοποιείται στην παρουσία υπεριώδους ακτινοβολίας. Με τη βοήθεια ενός laser το οποίο εκπέμπει στην υπεριώδη ακτινοβολία σκιαγραφούνται πάνω στο πολυμερές μία-μία οι διατομές του τρισδιάστατου υλικού οι οποίες δημιουργούνται-στερεοποιούνται μέσα στο ρευστό.

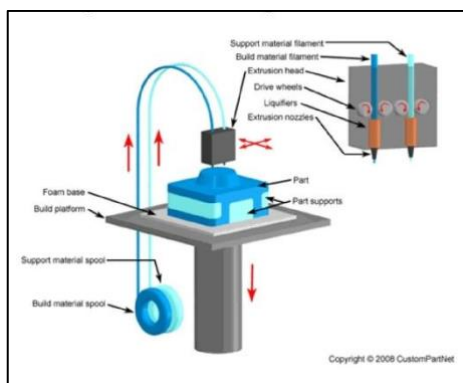


Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SL

Η μέθοδος αυτή περιορίζεται αρκετά στα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιήσει, αφού απαιτείται τα υλικά αυτά να είναι σε υγρή κατάσταση στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και να στερεοποιούνται μόνο υπό την τοπική επίρρηση υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης η μέθοδος αυτή δεν είναι ικανή να εκτυπώσει σύνθετα, ιδιαίτερα με ενίσχυση ινών.

Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Συγχωνεύματος (Fused Deposition Modelling, FDM)

Αντίθετα από την SLS το υλικό προς εκτύπωση θερμαίνεται ελαφρώς πιο πολύ από τη θερμοκρασία τήξης. Υγροποιημένο, το υλικό, εναποτίθεται στην πλατφόρμα εκτύπωσης όπου και στερεοποιείται σε χρόνο μόλις 0,1s έτοιμο για συνένωση με τα επακόλουθα στρώματα.



Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου FDM

Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση με αυτή τη μέθοδο είναι το νάιλον, ελαστομερή, κεριά, ABS, PLA, κεραμικά, αλουμινίου αλλά και σύνθετα υλικά τύπου νάιλον-σιδήρου.

Μία πρωτοτυπία, πλεονέκτημα, αυτής της μεθόδου είναι πως διαθέτει δύο κεφαλές εκτύπωσης, όπου η μία εναποθέτει το βασικό υλικό και η άλλη το βοηθητικό υλικό. Μία ειδική εφαρμογή της κεφαλής με το βοηθητικό υλικό είναι πως καθιστά δυνατή την εναπόθεση συνεχών ινών⁸.

Διάφοροι περιορισμοί που τίθενται με τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι η χαμηλή ακρίβεια, η ανομοιομορφία της συγκόλλησης ανάμεσα στα επίπεδα αλλά και η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στο προς εκτύπωση υλικό.

⁸ Η διαδικασία αυτή θα συζητηθεί αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3.2.1 <<Η εκτύπωση σε 3D Printer μέσω της μοντελοποίησης με εναπόθεση συγχωνεύματος>>

Κεφάλαιο 3.1.2 Εκτύπωση πολυμερών ενισχυμένα με συνεχείς ίνες (Fiber Reinforced Polymers, FRP)

Καταρχάς να τονίσω σε αυτό το σημείο πως η χρήση του όρου “τρισιδιάστατος εκτυπωτής” (3D Printer), από εδώ και στο εξής δεν πρέπει να συγχέεται με τη μέθοδο τρισιδιάστατης εκτύπωσης 3DP που είδαμε παραπάνω αλλά αναφέρομαι στο οποιοδήποτε μηχάνημα είναι ικανό να εκτυπώσει ένα τρισιδιάστατο εξάρτημα μέσω προσθετικής κατασκευής. Από εδώ και στο εξής αντί του όρου “προσθετική κατασκευή” (additive manufacturing) θα χρησιμοποιώ τον όρο “3D Printing”.

Με βάση όσα συζητήθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα μέθοδοι ικανές για την παρασκευή σύνθετων FRP υλικών είναι οι LOM, SL, FDM. Η μέθοδος LOM μπορεί να τα παράξει μόνο αν ως πρώτη ύλη δώσουμε ήδη σύνθετο FRP υλικό, ενώ στις άλλες δύο το σύνθετο υλικό δημιουργείται κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης. Μόνο, όμως, η FDM μέθοδος εναποθέτει συνεχείς ίνες.

Οι περισσότερες μελέτες για CFRP εκτυπωμένα από 3D Printers μελετάνε τη συμπεριφορά μικρών, σε μήκος, ινών κατασκευασμένες με διάφορες μεθόδους (εναπόθεση (impregnation), ανάμειξη, εξώθησης (extruding) και σε λιγότερο βαθμό FDM). Παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά κάποια γενικά συμπεράσματα.

Από μελέτες φαίνεται πως για τα υλικά CFRP με ίνες τυχαίου προσανατολισμού^[19], το μέτρο ελαστικότητας και ο τανυστής των τάσεων συμπεριφέρονται είτε ανεξάρτητα, στην περίπτωση των συνεχών ινών με τυχαίο προσανατολισμό, είτε με γραμμική σχέση, στην περίπτωση προσανατολισμένων ινών, σε σχέση με την παραμόρφωση. Επίσης, από μία έρευνα^[20] φάνηκε πως σε υλικά με τυχαίο προσανατολισμό ινών, η αντοχή του υλικού έπεφτε καθώς αυξανόταν το μέγεθος του υλικού, λόγω δημιουργίας συμπλέγματος ινών (cluster formation). Επίσης σε άλλη έρευνα^[21] παρατηρήθηκε κόπωση στις αποπροσανατολισμένες ίνες λόγω αποσυγκόλλησης ινών και μήτρας, ρίχνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

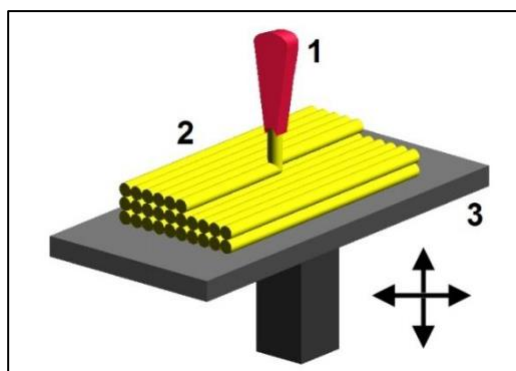
Πολλές από τις ιδιότητες των CFRP υλικών επηρεάζονται από την τεχνική παρασκευής. Για παράδειγμα σε μία έρευνα φαίνεται πως η απόκλιση του τανυστή των τάσεων σε CFRP υλικά μπορεί να φτάσει το 10,7%, λόγω μη ικανοποιητικού αποπροσανατολισμού των ινών.^[22]

Το μεγαλύτερο κομμάτι της βιβλιογραφίας που απασχολείται με τη μελέτη FRP δεν απασχολείται με FRP (με συνεχείς ίνες) που έχουν δημιουργηθεί μέσω της FDM διαδικασίας. Φαίνεται πως αν δημιουργηθούν κενά ανάμεσα στις στρώσεις και δεν εγχυθούν καταλλήλως οι ίνες τότε ο τανυστής των τάσεων μπορεί να βγει έως και 10% μικρότερος από τη θεωρητική εκτίμηση.^[23] Σε πειράματα που έγιναν χρησιμοποιώντας τον εκτυπωτή Mark One για την παρασκευή CFRP υλικών φαίνεται πως ο τανυστής των τάσεων δεν ακολουθεί τον κανόνα ανάμειξης που ισχύει στο σύνθετο υλικό.^[24] Επιπρόσθετα φαίνεται πως αυξάνοντας την ποσότητα και άρα των όγκο των ινών αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας και ο τανυστής των τάσεων.^[25]

3.2 Η διαδικασία εκτύπωσης

3.2.1 Η τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω της μοντελοποίησης εναπόθεσης συγχωνεύματος (FDM)

Για τη δημιουργία τρισδιάστατων πολυμερικών μερών η διαδικασία FDM είναι μία από τις πιο συνήθεις. Συνήθη υλικά αποτελούν το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid) και PC (Polycarbonate) όπως επίσης και θερμοπλαστικά υλικά. Τα υλικά αυτά προμηθεύονται στο μηχάνημα ως νήματα τυλιγμένα σε καρούλια. Τα νήματα οδηγούνται μέσω σωλήνων στην κεφαλή εκτύπωσης όπου θα θερμανθούν ελαφρώς παραπάνω από την θερμοκρασία τήξης τους. Στην υγρή τους μορφή τα υλικά έχουν αρκετά μεγάλο ιξώδες και μπορούν να εναποθετηθούν σε μικρές λωρίδες στην πλατφόρμα εκτύπωσης, όπως φαίνεται και παρακάτω στην εικόνα 3.6. Συνήθως, για να εξασφαλιστεί πως το παραγόμενο υλικό μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα από την πλατφόρμα εκτύπωσης, πρώτα έχουμε εφαρμόσει κάποιου είδους ουσία.



Εικόνα 3.6 Αναπαράσταση τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω της μοντελοποίησης με εναπόθεση συγχωνεύματος (FDM).

Η κεφαλή εκτύπωσης μπορεί να κινηθεί κατά τον x και y άξονα και η πλατφόρμα κατά τον z. Καθώς η κεφαλή εναποθέσει την πρώτη στρώση του υλικού, η πλατφόρμα θα μετακινηθεί κατακόρυφα προς τα κάτω για να αφήσει χώρο να εναποτεθεί η επόμενη στρώση, μέχρις ότου να εκτυπωθεί πλήρως το εξάρτημα.

Σημαντικές παράμετροι για τη διαδικασία FDM:

- Η θερμοκρασία εκτύπωσης

Η θερμοκρασία εκτύπωσης καθορίζεται από το υλικό που χρησιμοποιούμε για εκτύπωση. Αν η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ένας εκτυπωτής δεν αρκεί για να φτάσει την θερμοκρασία τήξης του υλικού, τότε το υλικό αυτό δεν είναι κατάλληλο για χρήση σε αυτόν τον εκτυπωτή.

Επίσης αν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή τότε το υλικό μπορεί να καθυστερήσει να στερεοποιηθεί.

- Η ταχύτητα της κεφαλής εκτύπωσης

Η ταχύτητα με την οποία εκτυπώνει η κεφαλή έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για την ποιότητα του εκτυπωμένου υλικού αν συνυπολογιστεί η σχέση της με τη θερμοκρασία εκτύπωσης. Αν η κεφαλή έχει μεγαλύτερη ταχύτητα απ' όσο χρειάζεται τότε η εκτύπωση του υλικού θα είναι ασυνεχής, απόληξη της οποίας θα είναι δυσμενέστερες

μηχανικές ιδιότητες του εκτυπωμένου εξαρτήματος. Αν η ταχύτητα είναι μικρότερη τότε υπάρχει ο κίνδυνος το υλικό να στερεοποιηθεί μέσα στους σωλήνες της κεφαλής και να ο εκτυπωτής.

- Το ελάχιστο βήμα με το οποίο μετακινείται η πλατφόρμα εκτύπωσης κατά τον z άξονα

Το ελάχιστο βήμα με το οποίο μετακινείται η πλατφόρμα εκτύπωσης κατά τον z άξονα καθορίζει το ελάχιστο πάχος ανάμεσα στις στρώσεις που είναι δυνατό. Όσο πιο μικρό το βήμα τόσο πιο ακριβής γίνεται η εκτύπωση.

Αυτό το μέγεθος αναφέρεται ως η “ανάλυση” του εκτυπωτή.

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας διαφόρων πλεονεκτημάτων και περιορισμών της τρισδιάστατης εκτύπωσης πολυμερών μέσω της FDM διαδικασίας, όπως βρίσκονται βιβλιογραφικά^[26], όπου ισχύουν και για εκτύπωση FRP.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ FDM	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ FDM
ΜΕΓΑΛΗ ΠΟΙΚΙΛΙΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.	Γραμμή εκτύπωσης ανάμεσα στις στρώσεις.
ΕΥΚΟΛΗ ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΜΕΤΑΞΥ ΥΛΙΚΩΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.	Η κεφαλή ώθησης πρέπει συνεχώς να κινείται αλλιώς το υλικό κολλάει.
ΧΑΜΗΛΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.	Η αντοχή του εξαρτήματος είναι μικρή κάθετα στον άξονα εκτύπωσης.
ΓΡΗΓΟΡΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΛΕΠΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ.	Όσο περισσότερα κομμάτια έχει μία επιφάνεια τόσο αυξάνει ο χρόνος εκτύπωσης.
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗΝ ΤΑΞΗ ΤΩΝ +/- 0,125 ΧΙΛΙΟΣΤΩΝ.	Μεταβολές στην θερμοκρασία κατά τη διαδικασία εκτύπωσης μπορεί να οδηγήσει σε αποστρωματοποίηση.
ΔΕΝ ΧΡΕΙΑΖΕΤΑΙ ΕΠΟΠΤΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.	

Πίνακας 3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης της μεθόδου FDM.

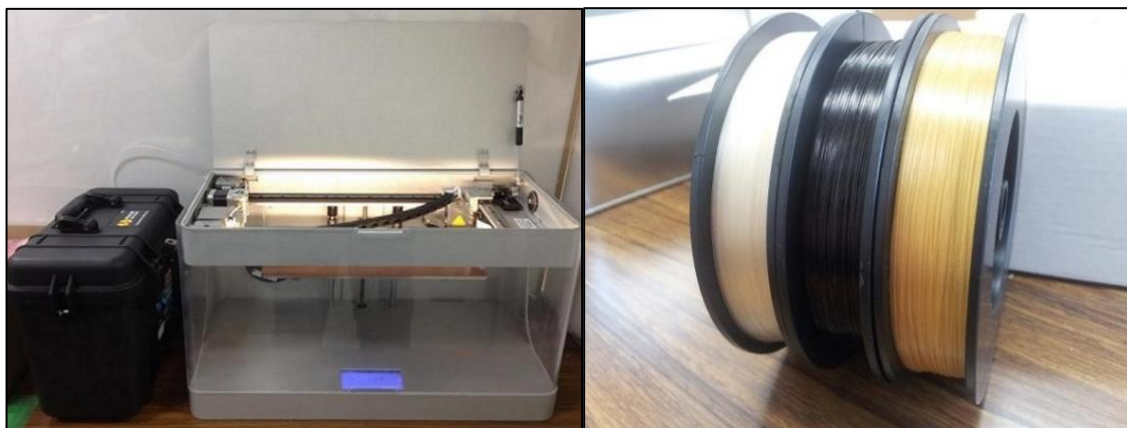
3.2.2 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Mark Two

Το 2015 η εταιρεία MarkForged κυκλοφόρησε ένα νέο είδος τρισδιάστατων εκτυπωτών, αφού ήταν ο πρώτος που χρησιμοποιούσε την FDM μέθοδο για την εκτύπωση πολυμερών ενισχυμένα με συνεχείς ίνες. Ο εκτυπωτής ήταν ο Mark One και λόγω της επιτυχίας το 2016 κυκλοφόρησε τη βελτιωμένη έκδοσή του, τον Mark Two.

3.2.2.1 Συγκρίνοντας τους δύο εκτυπωτές

Και στις δύο περιπτώσεις οι μέγιστες διαστάσεις εκτύπωσης είναι 320mm x 132mm x 154mm μήκος, πλάτος και ύψος αντίστοιχα. Η κεφαλή εκτύπωσης έχει δύο στόμια, ένα για την εναπόθεση της πολυμερικής μήτρας κι ένα για το υλικό

που θα αποτελέσει την ίνα. Εκτός από νάιλον⁹ ο εκτυπωτής μπορεί να χρησιμοποιήσει το υλικό Oghx¹⁰ ως υλικό για μήτρα. Ενώ για υλικό της ίνας μπορεί να χρησιμοποιήσει υαλώδη, άνθρακα, Aramid¹¹ αλλά και υλικά τύπου High Strength High Temperature (HSHT).



Εικόνα 3.7 Αριστερά: ο εκτυπωτής MarkTwo, Δεξιά: Καρούλια με υλικό που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον εκτυπωτή (από αριστερά προς τα δεξιά: υαλώδης ίνας, ίνα άνθρακα, ίνα από υλικό Aramid).

Η εταιρεία MarkForged δίνει το σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται ως μήτρα (πίνακας 2.2) και των FRP υλικών που δύναται να χρησιμοποιήσει^[27] (πίνακας 2.3)

Ιδιότητα	Nylon
Τάση εφελκυσμού κατά την διαρροή [MPa]	31
Τάση εφελκυσμού κατά την θραύση [MPa]	54
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	0,94
Παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού κατά την διαρροή [%]	27
Παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού κατά τη θραύση [%]	260
Αντοχή στην κάμψη [MPa]	32

Πίνακας 3.2 Επιλεγμένα στοιχεία των μηχανικών ιδιοτήτων, για το υλικό που χρησιμοποιείται ως μήτρα, όπως δίνονται από την εταιρεία “MarkForged 3D Printers”.

Ιδιότητα	Υλικό ινών άνθρακα
Αντοχή στον εφελκυσμό [MPa]	700

⁹ Το καρούλι του νάιλον περιέχει 1000cm³ και είναι έγκλειστο σε μία μαύρη αδιάβροχη θήκη. Αυτό αφού το νάιλον, ως υλικό, απορροφά σχετικά εύκολα νερό, το οποίο μπορεί να απολετήσει κίνδυνο όταν θερμάνουμε το υλικό κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης, στους 265°C κι έτσι να αρχίζει να βράζει και να επηρεάσει το υλικό δίνοντας χαμηλής ποιότητας εκτυπωμένα προϊόντα.

¹⁰ Πολυμερικό προϊόν στο οποίο έχουν ήδη εναποτεθεί μικρο ίνες άνθρακα, άρα είναι πιο ανθεκτικό από το νάιλον.

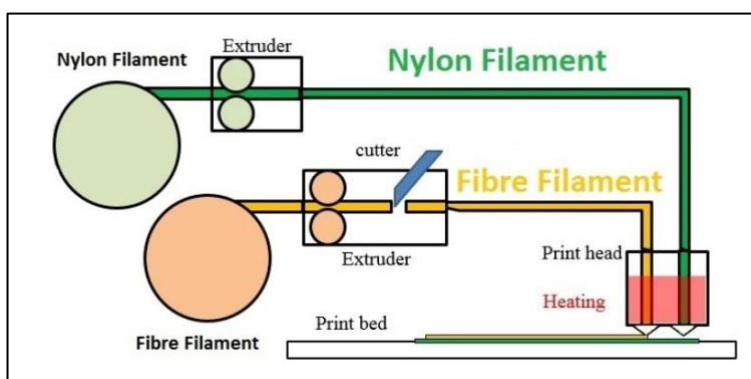
¹¹ Κλάση υλικών ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες.

Παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού κατά την θραύση [%]	1,5
Μέτρο ελαστικότητας[GPa]	54
Αντοχή στη θλίψη [MPa]	320
Παραμόρφωση λόγω θλίψης κατά την θραύση [%]	0.7

Πίνακας 3.3 Επιλεγμένα στοιχεία μηχανικών ιδιοτήτων, για το υλικό που χρησιμοποιείται για την εναπόθεση των ινών άνθρακα, όπως δίνονται από την εταιρεία “MarkForged 3D Printers”.

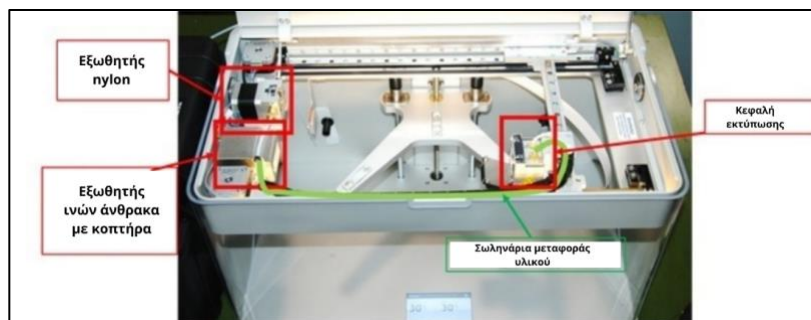
3.2.2.2 Τα υλικά προς εκτύπωση από το καρούλι στην κεφαλή εκτύπωσης

Αμφότερα τα υλικά, από τα δικά τους καρούλια, προμηθεύουν την κεφαλή εκτύπωσης, μέσω σωλήνων, καταλήγοντας στο ξεχωριστό τους ακροφύσιο που αποτελεί μέρος της κεφαλής. Κατά την εκτύπωση του εξαρτήματος το μηχάνημα μπορεί και εναποθέτει μόνο ένα υλικό τη φορά, δεν μπορεί να εναποθέσει δηλαδή ταυτόχρονα και το υλικό της μήτρας και αυτό των ινών. Το σύστημα μετάγγισης των δύο υλικών στα ακροφύσια της κεφαλής είναι πανομοιότυπο για τα δύο υλικά, με τη μοναδική διαφορά να είναι ότι το σύστημα μετάγγισης του υλικού των ινών έχει μηχανισμό όπου κόβει το νήμα στο επιθυμητό μήκος εκτύπωσης.



Εικόνα 3.8 Το σύστημα εξώθησης των ινών από τα καρούλια στην κεφαλή εκτύπωσης (Με το πράσινο παριστάνεται το nylon υλικό και με σομόν η ίνα). Επίσης φαίνεται ο μηχανισμός κοπής στο σύστημα της ίνας.

Και στα δύο συστήματα μετάγγισης υπάρχει ένας ωθητής όπου είναι υπεύθυνος για την ώθηση των νημάτων στα ακροφύσια της κεφαλής. Όταν το υλικό που προορίζεται για τη μήτρα καταλήγει στην κεφαλή εκτύπωσης θερμαίνεται στους 265°C κι έτσι γίνεται έτοιμο για εναπόθεση. Το υλικό που προορίζεται για την εναπόθεση των ινών θα ξεκινήσει να εκτυπώνεται αφού πρώτα εναποθεθεί μία στρώση μήτρας. Δηλαδή αφού τοποθετηθεί μια στρώση του υλικού της μήτρας, το μηχάνημα κάνει μια παύση και συνεχίζει στην εκτύπωση στρώσης του υλικού των ινών. Όπως και το πρώτο υλικό, έτσι και αυτό των ινών, θερμαίνεται στους 265°C αναγκάζοντας την ρητίνη που περιβάλλει το νήμα των ινών να λειτουργήσει ως ενοποιητής ανάμεσα στην πολυμερική μήτρα και τις ίνες. Όταν χρησιμοποιηθεί αρκετό υλικό για τη στρώση των ινών, ο κόφτης που βρίσκεται κοντά στον ωθητή του συστήματός του κόβει το νήμα για την καλύτερη εξοικονόμηση υλικού.



Εικόνα 3.9 Κάτοψη μηχανισμού εκτύπωσης.

Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης ενός στρώματος η κεφαλή εκτύπωσης κινείται στο οριζόντιο επίπεδο στον x και y άξονα με τη βοήθεια κάποιων μοτέρ. Μόλις τελειώσει μια στρώση η κεφαλή σταματάει να κινείται ενώ η πλατφόρμα εκτύπωσης κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω¹², στον z άξονα, δίνοντας τη δυνατότητα στην κεφαλή να μπορέσει να συνεχίσει με την εκτύπωση της επόμενης στρώσης πάνω στην προηγούμενη. Οι κινήσεις αυτές είναι αυτοματοποιημένες.



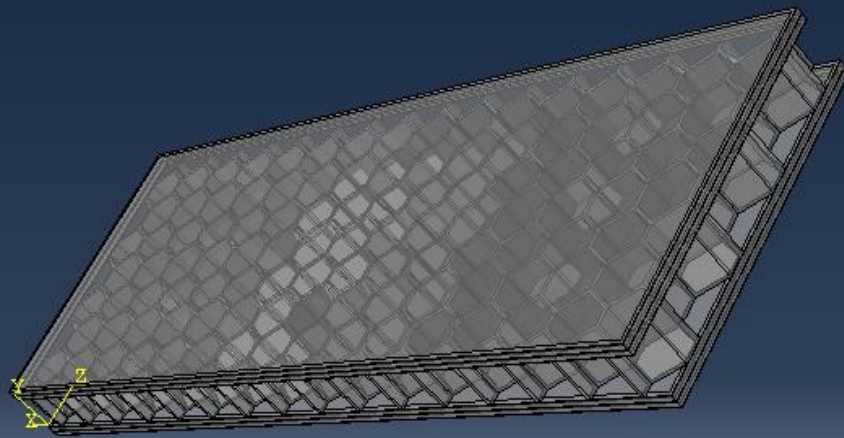
Εικόνα 3.10 Κάτοψη εκτυπωτή όπου φαίνονται τα μοτέρ κίνησης των αξόνων.

¹² Θα μετακινηθεί με βήμα $0,1\text{mm}$ για το υαλώδες υλικό ή Aramid και με $0,125\text{mm}$ όταν εναποτίθενται οι ίνες άνθρακα. Η διαφορά έγκειται στις διαφορετικές διαμέτρους των νημάτων.

Η διάμετρος του νήματος με τις ίνες άνθρακα μετρήθηκε στα $0,374\text{mm}$, η οποία είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από το πάχος των στρώσεων, άρα για να μπορέσει το υλικό εκτυπωθεί έπρεπε να αλλάξουμε την κυλινδρική του μορφή σε ορθογώνια, με ύψος αυτό της ανάλυσης της εκτύπωσης, $0,125\text{mm}$, και αφού η επιφάνεια της διατομής του στόμιου είναι $0,10986\text{mm}^2$, τότε το μήκος του ορθογωνίου βγαίνει $0,87888\text{mm}$.

Κεφάλαιο 4

Το περιβάλλον προσομοίωσης Abaqus CAE και η σχεδίαση του δοκιμίου



- 4.1 Δημιουργία μερών (parts) και συναρμολόγησης (assembly)
- 4.2 Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και προσανατολισμός
- 4.3 Δημιουργία πλέγματος ανάλυσης (Mesh)
- 4.4 Ο ορισμός των αλληλεπιδράσεων
- 4.5 Ορισμός Step, περιοριστικών συνθηκών (BC), καταπόνησης (Load) και προσομοίωσης (Job)

Το λογισμικό Abaqus CAE είναι ένα αρκετά χρήσιμο λογισμικό το οποίο προσομοιώνει διάφορα μηχανικά προβλήματα όπως δονήσεων, θερμικής επίδρασης, συγκρούσεων κα. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει μία σειρά από στάδια στη σχεδίαση για την επιτυχή προσομοίωση και μελέτη. Τα στάδια αυτά είναι τα εξής:

- Σχεδίαση ενός ή παραπάνω μερών (Part)
- Ορισμός ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται και τυχόν προσανατολισμού (Material)
- Συναρμολόγηση μερών στο επιθυμητό δοκίμιο (Assembly)
- Ορισμός βήματος (Step)
- Ορισμός αλληλεπιδράσεων (Interaction)
- Ορισμός δεσμευτικών συνθηκών και καταπόνησης (Boundary Conditions, Load)
- Δημιουργία πλέγματος ανάλυσης (Mesh)
- Παραγγελία προσομοίωσης (Job)

Μια ιδιαίτερη σημείωση που πρέπει να κάνουμε είναι πως το πρόγραμμα δεν είναι προγραμματισμένο να λειτουργεί με μονάδες και άρα να μπορεί μόνο του να κάνει απαραίτητες μετατροπές για την άρτια εξέλιξη της μελέτης. Θεωρεί πως ο χρήστης έχει σε κάθε σημείο της σχεδίασης υπόψιν του τις μονάδες που χρησιμοποιεί και τις μεταβάλλει αντίστοιχα. Εδώ χρησιμοποιούνται ως αναφορά και μονάδα μέτρησης τα mm και άρα οι τιμές για τα διάφορα μεγέθη θεωρούνται όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω:

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Πίνακας 4.1 Το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται στις επεξεργασίες μέσω του Abaqus CAE. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται σε αυτήν τη μελέτη.

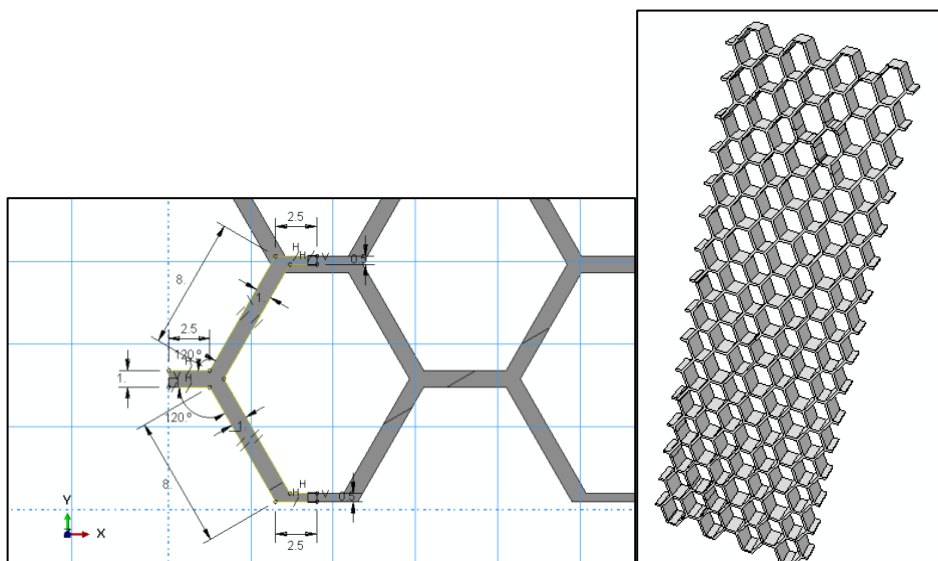
Έτσι για παράδειγμα για τα 150MPa θα δοθεί η τιμή 150, για τα 200mm η τιμή 200 κοκ.

4.1 Δημιουργία μερών (parts) και συναρμολόγησης (assembly)

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα είτε να σχεδιάσει τα επιθυμητά μέρη¹³ είτε να εισάγει .CAD σχέδια από κάποιο άλλο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης. Εδώ έγινε πλήρης σχεδιασμός του δοκιμίου. Ξεκινώντας με τη σχεδίαση μισής

¹³ κάθε μέρος που σχεδιάζεται έχει ένα ξεχωριστό τύπο στοιχείων από το οποίο απαρτίζεται. Αυτά έχουν και ξεχωριστή κωδική ονομασία. Για παράδειγμα στη συγκεκριμένη εργασία η πολυμερική μήτρα (honeycomb) απαρτίζεται από C3D8 (Continuum 3D 8 Nodes, αναφερόμενο στα nodes, ακμές, που δημιουργεί το στοιχείο), ενώ οι ίνες από άνθρακα απαρτίζονται από C3D10M (Continuum 3D 10 Nodes).

κυψελίδας η οποία αντιγράφηκε ξανά και ξανά για να δημιουργήσει ολόκληρη την honeycomb διάταξη που θέλουμε (Σχήμα 4.1).



Εικόνα 4.1 Δεξιά: Η γεωμετρία της κυψελίδας, αριστερά: ολόκληρη η διάταξη honeycomb.

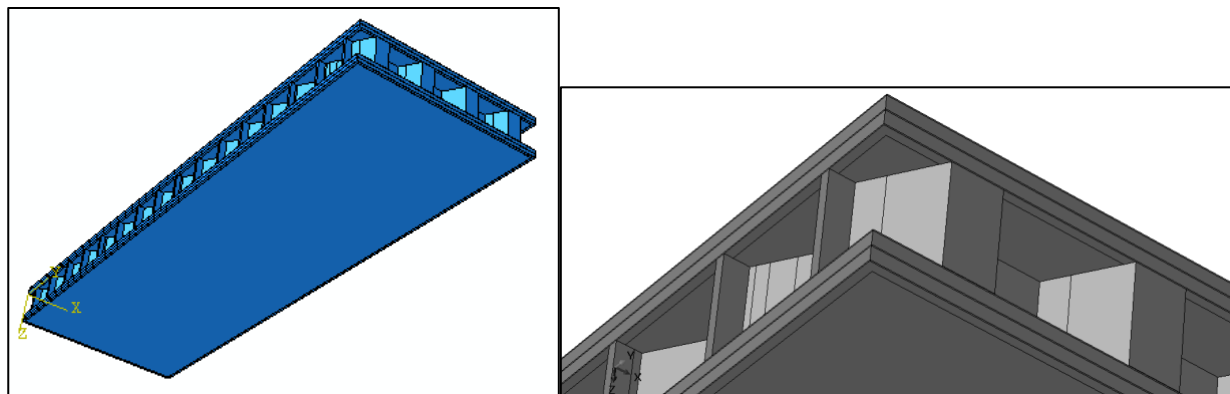
Ο ορισμός των διαστάσεων έγινε έχοντας υπόψη τα όρια εκτύπωσης του εκτυπωτή 320mm x 132mm x 160mm. Για να είμαστε ασφαλείς πάρθηκε υπόψη το σύνολο αυτών των διαστάσεων -10%. Έτσι καταλήξαμε στις διαστάσεις, βάσει αυτών που ορίσαμε στην ημικυψελίδα: 72mm x 226,702503mm και πάχος 10mm για το honeycomb.

Στις ίδιες διαστάσεις ορίστηκαν τα sheets με διαφορά πως το πάχος του είναι 3mm.

Στη συνέχεια με την επιλογή assembly μπορεί να γίνει η συναρμολόγηση, δηλαδή η δημιουργία του τελικού δοκιμίου από τα ξεχωριστά μέρη. Παρόλο που συναρμολογείται το τελικό δοκίμιο το πρόγραμμα ακόμα δεν το θεωρεί ως ένα ενιαίο αντικείμενο. Ή θα πρέπει να επιλεγεί συγκεκριμένη εντολή όπου ορίζει τον τρόπο που αλληλοεπιδρούν οι δύο επιφάνειες που είναι σε επαφή κάτω από την κατηγορία εντολών της ενότητας interaction (Contact surface to surface, contact self contact) ή μπορεί να θεωρηθεί, όλα ή τμήμα των μερών, ως ένα ενιαίο σώμα μέσω της επιλογής whole κάτω από την κατηγορία assembly. Εδώ, αφού το δοκίμιο θα εκτυπωθεί ενιαίο και δεν τυπώνονται ξεχωριστά τα μέρη, θεωρήσαμε και το προσομοιωθέν δοκίμιο ως ενιαίο (τα μέρη honeycomb και sheets).

Για τη δημιουργία των ινών σχεδιάστηκαν πρώτα απομονωμένα τα κομμάτια τις ορθογωνικής κατασκευής τους με μήκη όσο οι διαστάσεις των sheets αλλά διαστάσεις της διατομής αυτές που συζητήθηκαν στην υποσημείωση 12 στην υποενότητα “3.2.2.2 Τα υλικά προς εκτύπωση από το καρούλι στην κεφαλή εκτύπωσης”.

Οι ίνες άνθρακα πρέπει κι αυτές να θεωρηθούν ένα ενιαίο σώμα από μόνες τους κι όχι ένα σύνολο 4 ινών κάθε φορά. Έτσι με την ίδια διαδικασία, που ακολουθήθηκε στη μήτρα, τις ορίζουμε ως ένα σώμα, τις οποίες ενσωματώνουμε στα sheets της μήτρας. Ενσωματώθηκαν τρεις ίνες, περιμετρικά, σε κάθε sheet της μήτρας.



Εικόνα 4.2 Αριστερά: Η διάταξη πλήρως συναρμολογημένη όπως φαίνεται από την κατηγορία Assembly του Abaqus CAE, δεξιά: Η ενσωμάτωση των ινών άνθρακα από πιο κοντινή άποψη.

4.2 Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και προσανατολισμός

Η διαδικασία ορισμού υλικών είναι η εξής: Δημιουργία υλικού με ορισμού μηχανικών μεγεθών, δημιουργία τμήματος το οποίο επιλέγουμε να χαρακτηρίζεται από αυτό το υλικό και τέλος ορισμός των διαφόρων μερών βάσει των επιθυμητών sections. Έτσι, αν η κατασκευή είναι σύνθετη και από διάφορα υλικά και μέρη μπορεί ο χρήστης πιο προσεκτικά να ορίσει, με την επιθυμητή λεπτομέρεια τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

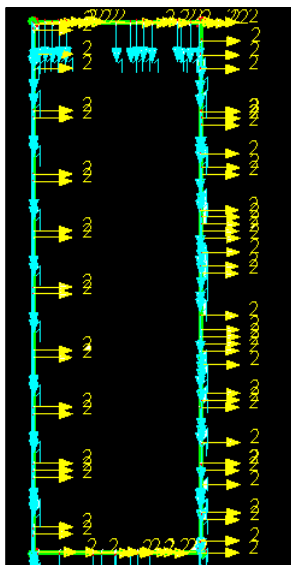
Εδώ χρησιμοποιήθηκαν και άρα ορίστηκαν δύο υλικά: ηγλον και ίνες άνθρακα (το οποίο ονοματίστηκε στο πρόγραμμα CFR – Carbon Fiber Reinforcer).

Για το ηγλον ορίστηκαν ελαστικές ιδιότητες και πιο συγκεκριμένα δόθηκε πυκνότητα $0,00115 \text{ gr/mm}^3$, σταθερά του Young 940 MPa (για την αρμονία των μονάδων ορίστηκε ως 940 και όχι $940 \cdot 10^6$, μιας που χρησιμοποιούμε mm) και λόγος του Poisson 0.3 .

Το CFR έχει ορθοτροπικές ιδιότητες, άρα έπρεπε να επιλέξουμε την αντίστοιχη επιλογή από το πρόγραμμα και να το ορίσουμε κατάλληλα. Χρησιμοποιήσαμε πυκνότητα $0,015 \text{ gr/mm}^3$ και σταθερές (σε MPa):

$D_{1111}=30089,6$ $D_{1122}=0,483$ $D_{2222}=1233,6$ $D_{1133}=0,483$ $D_{2233}=0,483$ $D_{3333}=1233,6$ $D_{1212}=557,8$ $D_{1313}=557,8$
 $D_{2323}=858,1$

Τέλος, πρέπει να δοθεί συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων (προσανατολισμός) στα ορθοτροπικά υλικά όταν χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα. Αυτό αφού παρόλο που προϋπάρχει σύστημα συντεταγμένων, δεν αρκεί για τα ορθοτροπικά υλικά και πρέπει να ορισθούν συστήματα συντεταγμένων για όλες τις δυνατές όψεις του ανισοτροπικού υλικού ώστε να μπορεί να υπολογίσει τον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η επίδραση της δύναμης. Εδώ χρησιμοποιήθηκε η “discrete” επιλογή από τις επιλογές ορισμού προσανατολισμού.



Εικόνα 4.3 Ο προσανατολισμός που δόθηκε σε όλα τα μέρη του ορθού τοπικού υλικού.

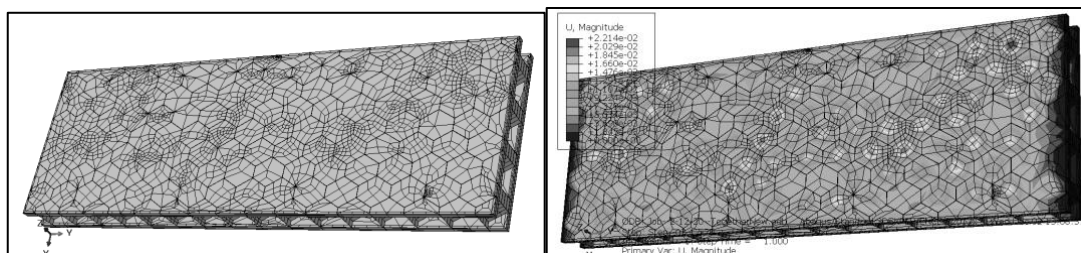
4.3 Δημιουργία πλέγματος ανάλυσης (Mesh)

Το βήμα της δημιουργίας του πλέγματος ανάλυσης είναι από τα πλέον σημαντικά στην επεξεργασία μέσω του Abaqus CAE αφού ο τύπος και το μέγεθος του πλέγματος θα καθορίσουν το αποτέλεσμα και τον χρόνο διεξαγωγής της ανάλυσης. Είναι απαραίτητο αυτό το κομμάτι καθώς αν δεν υπήρχε το πρόγραμμα θα θεωρούσε πως το υλικό έχει άπειρα σημεία, άρα θα δημιουργούσε άπειρες εξισώσεις για να λύσει. Με τη δημιουργία του πλέγματος και της “Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων” (Finite Element Analysis – FEA) το πρόγραμμα χρησιμοποιεί πεπερασμένο αριθμό στοιχείων¹⁴ κι άρα εξισώσεων.

Στο Abaqus CAE υπάρχουν 3 είδη πλεγματικών στοιχείων: εξαεδρικά, τετραεδρικά και σφηνοειδή. Η πιο συνηθισμένη επιλογή αποτελεί η εξαεδρική καθώς έχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια μεταξύ των επιλογών ενώ έχει ελαφρώς μεγαλύτερο χρόνο ανάλυσης. Επίσης ενώ είναι ιδανική επιλογή για απλά μέρη δεν είναι η καταλληλότερη για πιο σύνθετες γεωμετρίες κι έτσι συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις επιλέγονται οι υπόλοιπες επιλογές.

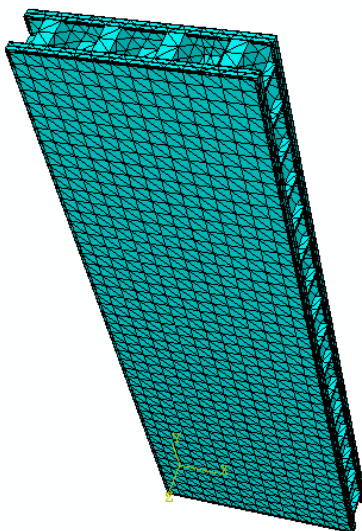
Εδώ λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου, αποδεικνύεται σύνθετη και μη ταιριαστή η εξαεδρική επιλογή. Πρώτες προσπάθειες δημιουργίας εξαεδρικού πλέγματος στο συγκεκριμένο δοκίμιο από τη μία ήταν αρκετά χρονοβόρες γιατί απαιτούσαν επιπρόσθετο χειροκίνητο τεμαχισμό μερών στο εσωτερικό του honeycomb λόγω αδυναμίας αυτόματου ορισμού από το σύστημα, αλλά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4 η ανωμαλία με τον οποίο ο χειροκίνητος τεμαχισμός αποτυπώνεται στα sheets του δοκιμίου δίνει ανομοιογενή αποτελέσματα. Για παράδειγμα από το προαναφερθέν σχήμα φαίνεται πως όλες οι περιοχές των sheet, που βρίσκονται στο κέντρο των εξαγώνων του honeycomb, θα έπρεπε να καταπονούνται περισσότερο (και άρα να έχουν κόκκινο χρώμα) αλλά αυτό φαίνεται μόνο σε μερικά σημεία, τα οποία είναι έτσι λόγω περισσότερων στοιχείων από την κοπή.

¹⁴ με τον όρο στοιχεία, σε αυτήν την υποενοότητα, περιγράφονται οι μικρές περιοχές χώρου στις οποίες διαιρείται το δοκίμιο.



Εικόνα 4.4 Δεξιά: Το honeycomb sandwich με εξαερδικό πλέγμα ανάλυσης, Αριστερά: Οι παραμορφώσεις του δοκιμίου λόγω καταπόνησης (χρησιμοποιώντας εξαγωνικό πλέγμα ανάλυσης για την αποτύπωση των αποτελεσμάτων).

Έτσι επιλέχθηκαν τα τετραεδρικά στοιχεία για τη δημιουργία του πλέγματος τα οποία κατανεμήθηκαν ομοιόμορφα. (Σχήμα 4.5). Το mesh size¹⁵ είναι 0,75mm στο honeycomb sandwich, δημιουργώντας 2.000.000 στοιχεία και 0,1mm για καθένα από τα πλαίσια CFR, δημιουργώντας 60.000 στοιχεία για το καθένα.



Εικόνα 4.5 Το πλέγμα ανάλυσης, τετραεδρικών στοιχείων, του τελικού δοκιμίου.

4.4 Ο ορισμός των αλληλεπιδράσεων

Οι ίνες άνθρακα θεωρούνται ενσωματωμένες στην nylon μήτρα, οπότε επιλέχθηκε η αντίστοιχη επιλογή από τα εργαλεία της κατηγορίας interaction. Διαλέγουμε την επιλογή constrain και πιο συγκεκριμένα embedded region από τις δυνατές επιλογές. Στη συνέχεια επιλέγονται οι περιοχές που θεωρούμε ενσωματωμένες (κάθε ίνα ξεχωριστά) και στη συνέχεια η host περιοχή, όπου σε αυτήν την περίπτωση είναι η μήτρα. Το Abaqus CAE προμηθεύει από μόνο του διάφορα στοιχεία, απαραίτητα για την σχέση των δύο υλικών, όπως συντ. τριβής: 10^{-5} κα.

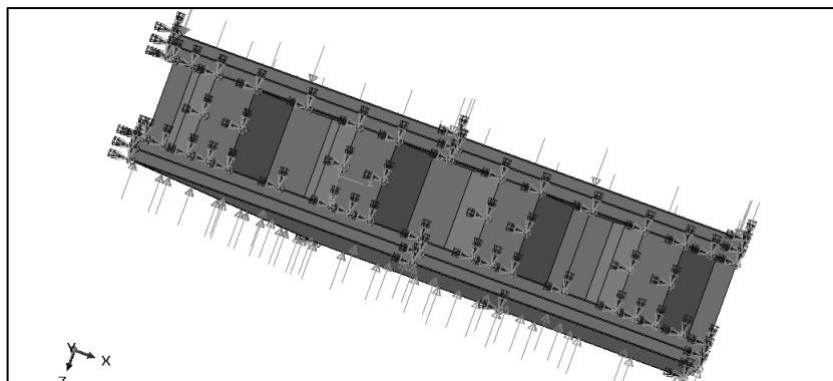
¹⁵ το μέγεθος των στοιχειωδών τμημάτων.

4.5 Ορισμός Step, περιοριστικών συνθηκών (BC), καταπόνησης (Load) και προσμοίωσης (Job)

Για το βήμα: Το Abaqus CAE θεωρεί τη δημιουργία των μερών, τη συναρμολόγηση και τον ορισμό των υλικών ως ένα αρχικό βήμα μέσα στην πορεία για την ανάλυση. Θα πρέπει ο χρήστης, όμως, να ορίσει ένα καινούργιο βήμα όπου αναφορικά ως προς εκείνο ορίζεται η καταπόνηση και η προσομοίωση. Μέσα από το νέο αυτό βήμα ορίζονται τα διαστήματα των τμημάτων του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης (increment size, increments, simulation time). Για μια ακόμη φορά το πρόγραμμα έχει αυτόματες προεπιλογές.

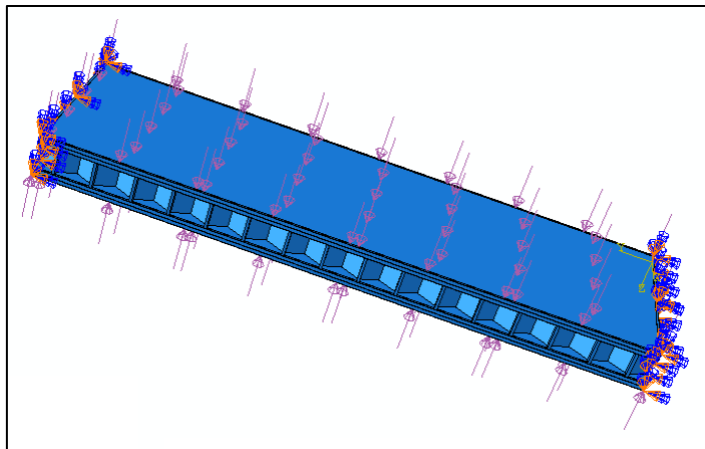
Το πρόγραμμα διαθέτει διάφορα είδη βημάτων που αντιστοιχούν στις διάφορες μεθόδους της ανάλυσης πχ static, dynamic, coupled κα. Εδώ χρησιμοποιείται στατική ανάλυση.

Δεσμευτικές συνθήκες (BC): Η επιλογή των BC γίνονται μέσα από τα εργαλεία της κατηγορίας Load. Το πρόγραμμα δίνει αρκετές επιλογές δεσμεύσεων, ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας που επιλέγουμε για το δοκίμιο. Εδώ επιλέχθηκε ο πλήρης περιορισμός (μεταφορικός και στροφικός) των ολιγομήκων τοιχωμάτων μέσω της επιλογής ENCASTRATE (Σχήμα 4.6). Να αναφερθεί πως δεν επιλέχθησαν μόνο οι πλάγιες επιφάνειες της μήτρας αλλά και τα τμήματα των κυψελίδων που βρίσκονται ακριβώς από κάτω και οι ίνες όπου βρίσκονται ενσωματωμένες, αλλά περιμετρικά των sheets.



Εικόνα 4.6 Οι περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας στη μία από τις δύο πλευρές του δοκιμίου όπως φαίνεται το πρόγραμμα.

Load: Όπως προαναφέρθηκε η καταπόνηση μπορεί να ορισθεί μόνο μέσα από έξτρα βήμα της ανάλυσης. Ο ορισμός της καταπόνησης επιλέγεται κι αυτός μέσα από τις επιλογές της κατηγορίας Load. Στην ανάλυση που μελετάει αυτή η εργασία, ασκήσαμε ομοιόμορφα κατανεμημένη δύναμη με τη μορφή πίεσης τιμής 200MPa. (Σχήμα 4.7).



Εικόνα 4.7 Η καταπόνηση όπως παρουσιάζεται στο Abaqus CAE.

Η τιμή αυτή επιλέχθηκε για να προσομοιάζει τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εκτόξευση μικροδορυφόρων, οχημάτων κα προς το διάστημα, σύμφωνα με τα διεθνή στάνταρ ασφαλείας, όπως χρησιμοποιούνται από τη NASA.^[28]

Παραγγελία προσομοίωσης: Το τελικό στάδιο αποτελεί αυτό της παραγγελίας της προσομοίωσης μέσω της εντολής Job. Εδώ, κάτω από την ομώνυμη κατηγορία στο πρόγραμμα, παραγγέλλεται η προσομοίωση, η οποία θα είναι ανάλογη του βήματος στο οποίο θα την ορίσουμε και οι υπολογιστικές επιλογές που μπορεί να θελήσει να κάνει ο χρήστης, όπως να επιλεγούν οι αριθμοί CPU που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή αν θα δώσουμε την επιλογή στην ανάλυση να λύνει μη γραμμικά προβλήματα που ανακύπτουν, μέσω της ενεργοποίησης της διαταγής nlgeom.

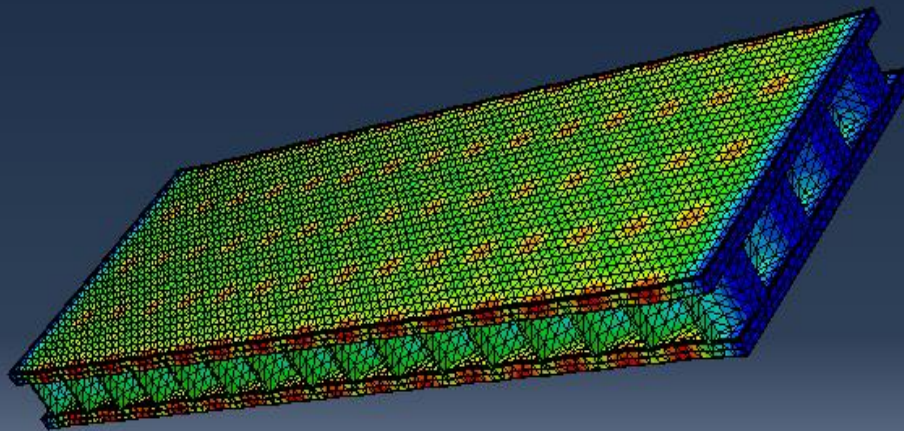
Επίσης πριν την έναρξη της προσομοίωσης, ο χρήστης, μέσω της επιλογής Field Output View μπορεί να επιλέξει τα στοιχεία της ανάλυσης που επιθυμεί να απολάβει.

Εδώ, συν τοις άλλοις, ζητήσαμε τα εξής αποτελέσματα:

- S= τάσεις που αναπτύσσονται.
- MISESMAX= Μέγιστη ισοδύναμη τάση von Mises.
- U= Μετατοπίσεις και περιστροφές.

Κεφάλαιο 5

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης



5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα

5.2 Οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά Mises

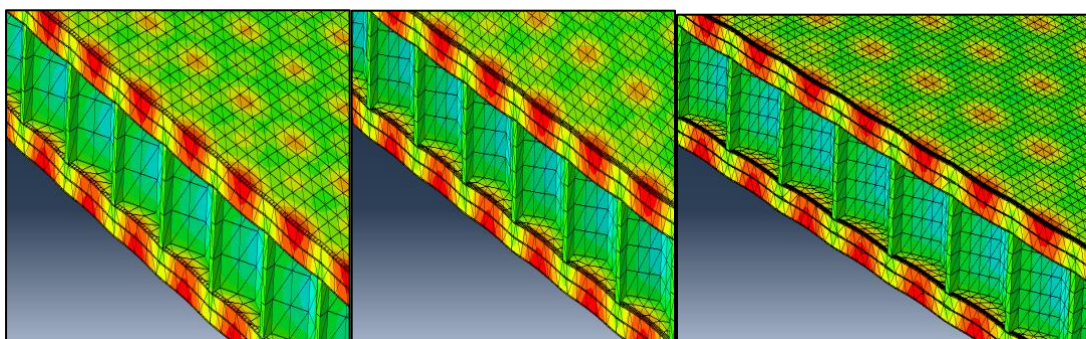
5.3 Οι μετατοπίσεις

5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα

5.1.1 Το mesh size

Πριν παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα χρειάζεται να ξαναεπαναλάβουμε μία σημαντική λεπτομέρεια στην παράθεση των αποτελεσμάτων. Το mesh size ρυθμίζει αποφασιστικά τι αποτελέσματα εξάγουμε, καθώς όσο περισσότερο τμηματοποιούμε το δοκίμιο σε μικρότερα στοιχειώδη τμήματα, τόσο πιο ακριβή θα είναι τα αποτελέσματα που βγαίνουν.

Για παραδειγμα μπορούμε να δούμε παρακάτω την επίδραση του mesh size στα αποτελέσματα, έχοντας κάνει μία δοκιμή στο δείγμα μας, ασκώντας πίεση 10MPa, κατά αντίστοιχο τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω (Εικόνα 5.1, Πίνακας 5.1). Στην πρώτη περίπτωση (Τεστ Α) ορίσαμε mesh size στο honeycomb 3mm και στο CFRP 0,7mm, στην δεύτερη (Τεστ Β) 2.5mm στο honeycomb και 0,3mm στο CFRP και στην τρίτη (Τεστ Γ) 2mm στο honeycomb και 0,2mm στο CFRP.



Εικόνα 5.1 Η επίδραση του mesh size (για honeycomb και CFRP αντίστοιχα) στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και κατανομής της απόκρισης. Αριστερά: Τεστ Α, Κέντρο: Τεστ Β, Δεξιά: Τεστ Γ.

Προσομοίωση	Μέγιστη Μετατόπιση (mm)	Μέγιστη τάση von Mises (MPa)	Χρόνος περάτωσης προσομοίωσης (min)	Σύνολο στοιχείων προσομοίωσης (Honeycomb + CFRP)
Τεστ Α	0,626	52,51	1	37.930 + 997
Τεστ Β	0,639	59,82	3	77.628 + 5.930
Τεστ Γ	0,645	62,21	20	152.803 + 14.341

Πίνακας 5.1 Οι μέγιστες τιμές μετατόπισης και τάσης von Mises για τα τεστ με διαφορετικό mesh size και άλλα δεδομένα.

Παρατηρούμε αρχικά πως μικρότερο mesh size δίνει πιο αληθή αποτελέσματα κάνοντας πιο αναλυτική την κατανομή. Επίσης, εκτός από την κατανομή παρατηρούμε πως σε κάθε περίπτωση αλλάζουν και οι μέγιστες τιμές mises που εμφανίζονται.

Παρόλαυτα, όλο και μικρότερο mesh size σημαίνει, όλο και πιο πολλά τμήματα για ανάλυση, δηλαδή όλο και πιο πολλές εξισώσεις προς επίλυση. Παραδείγματος χάριν, στο συγκεκριμένο δοκίμιο honeycomb με mesh size 3mm δημιουργούνται 250.000 ξεχωριστά στοιχεία, με 1,5mm δημιουργούνται 500.000, ενώ με 0.5mm δημιουργούνται

2.000.000. Τέτοιος όγκος μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για την ανάλυση καθώς πρέπει να λάβουμε υπόψη τις υπολογιστικές δυνατότητες που απαιτούνται. Η όλο και μεγαλύτερη ανάλυση αποτελεί δυσκολία για τους συμβατικούς υπολογιστές, ακόμα και με καλές δυνατότητες. Για παράδειγμα μία προσπάθεια ανάλυσης με mesh size 0,5mm για το honeycomb και 0.1mm για το CFRP με πίεση 200MPa, απαιτούσε ικανότητες 9,5 GB μνήμης RAM. Απαίτηση που δεν μπορεί να συμβιβαστεί με ελεύθερο χώρο σε κάποιον σκληρό δίσκο.¹⁶

Συμπερασματικά πρέπει να πούμε πως από τη μία παίζει, καθοριστικό, ίσως, ρόλο, το mesh size που χρησιμοποιούμε στην ανάλυσή μας, όμως από την άλλη παίρνει να παίρνουμε υπόψη και τις υπολογιστικές απαιτήσεις της ανάλυσης. Έτσι, πρέπει να υπολογίζονται σε συνδιασμό και να παίρνεται υπόψη ένας βαθμός απόκλισης από την πραγματική καταπόνηση που μπορεί να ασκηθεί στο δοκίμιο.

5.1.2 Οι απλουστεύσεις στις ιδιότητες των υλικών

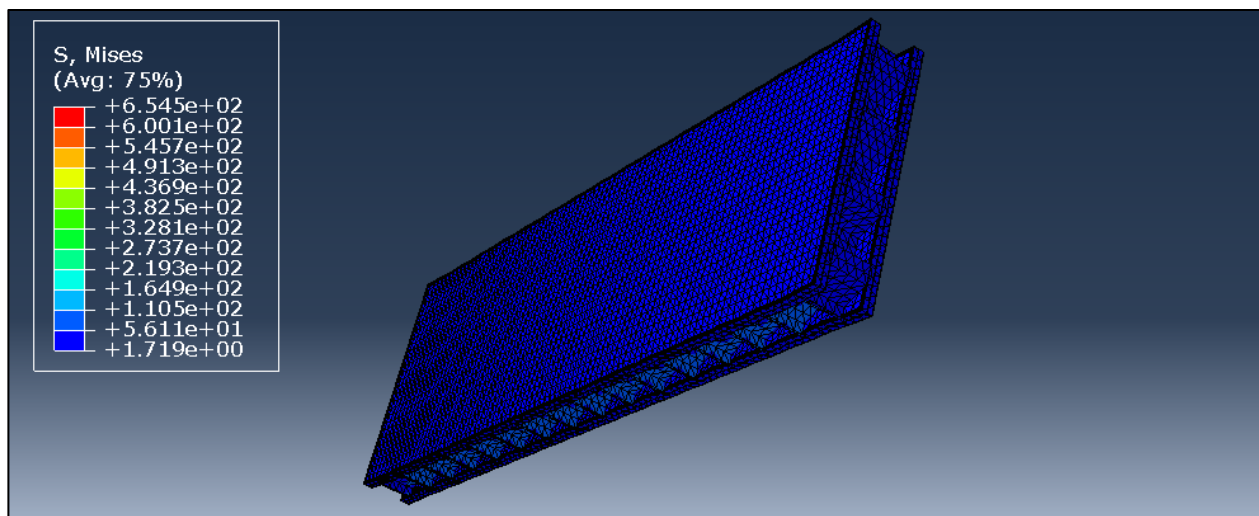
Προς απλοποίηση της διαδικασίας θεωρήσαμε για το δοκίμιο πως το υλικό nylon έχει ιστροπικές ιδιότητες και το CFR ορθοτροπικές. Τέτοιες απλουστεύσεις παίζουν ένα μικρό ρόλο στην απόκλιση των αποτελεσμάτων από την πραγματικότητα. Σε μία έρευνα^[29] με όμοιες απλουστεύσεις, υλικό και ανάλυση, παρατηρήθηκε διαφορά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αυτά της μηχανικής αντοχής, κατά έναν παράγοντα 1,53 φορές μεγαλύτερη στον εφελκυσμό και 1,12 στη θλίψη. Η διαφορά αποδόθηκε και σε αυτούς τους παράγοντες.

5.2 Οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά Mises

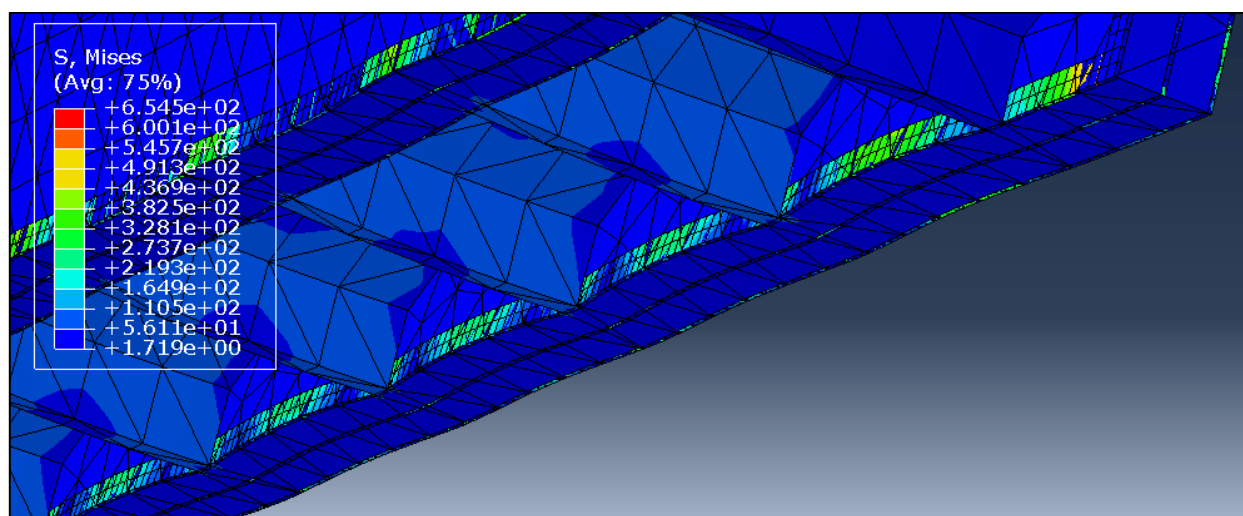
Από τα αποτελέσματα της παραγγελίας της προσομοίωσης παρατηρούμε τα εξής. Για την θλιπτική τάση των 200 MPa παρατηρούμε να αναπτύσσονται τάσεις μέχρι και 650 MPa¹⁷. (Εικόνες 5.2, 5.3)

¹⁶ Οι απαιτήσεις αυτές αποθηκεύονται αυτόματα από το πρόγραμμα σε αρχείο της μορφής .dat με το όνομα της παραγγελίας της προσομοίωσης που ορίζει ο χρήστης, στην προκαθορισμένη διεύθυνση αποθήκευσης των αρχείων της προσομοίωσης.

¹⁷ Για λόγους που προαναφέραμε στην εισαγωγή του κεφαλαίου 4.1, οι μονάδες των τάσεων στα στοιχεία των εικονων 5.2, 5.3 είναι σε MPa.



Εικόνα 5.2 Οι ισοδύναμες μέγιστες τάσεις κατά Mises που αναπτύσσονται στο δοκίμιο.



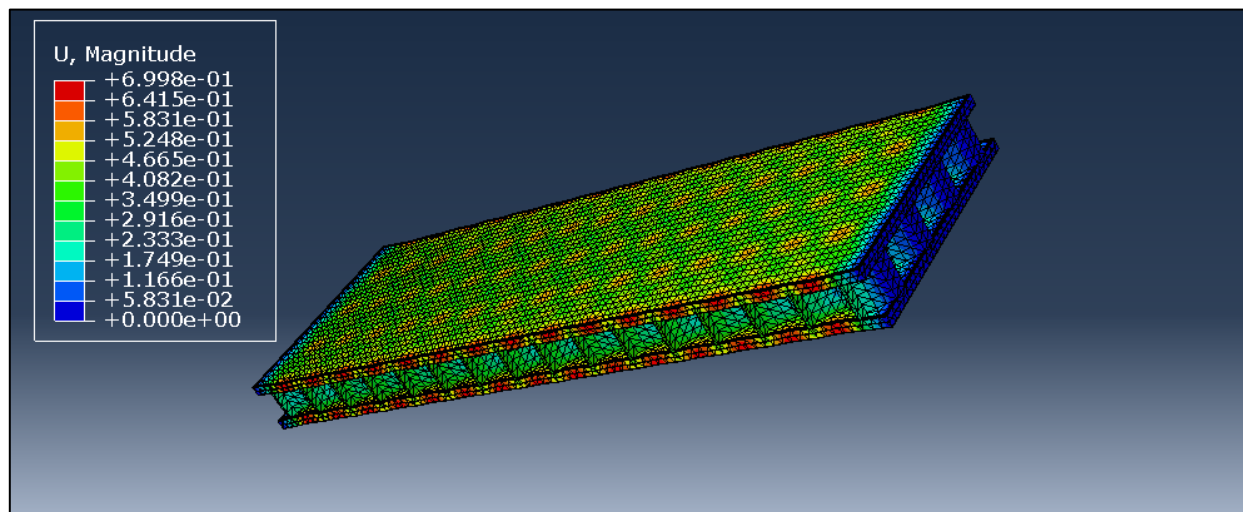
Εικόνα 5.3 Η κατανομή των ισοδύναμων μέγιστων τάσεων κατά Mises όπως συγκεντρώνονται στις ίνες.

Παρατηρείται από την ανάλυση πως το συντριπτικό σύνολο της καταπόνησης συγκεντρώνεται στις ίνες άνθρακα, περιμετρικά του δοκιμίου, αγγίζοντας και τάσεις 650 MPa.

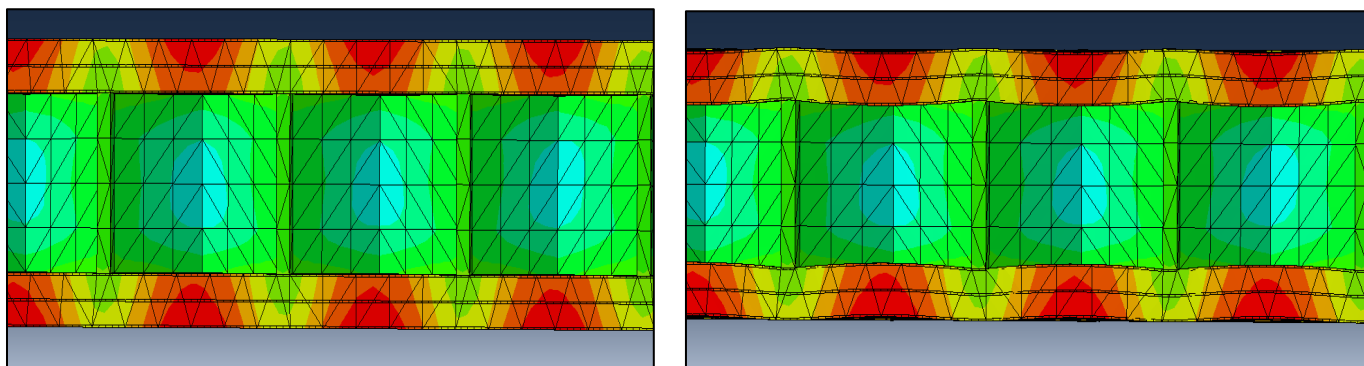
Ελάχιστη καταπόνηση εμφανίζεται και στην honeycomb διάταξη, κυρίως στο μεσαίο τμήμα, αλλά μικρότερη τιμή, από 10 έως 100 MPa.

5.3 Μετατοπίσεις

Οι μετατοπίσεις λόγω καταπόνησης παρουσιάζουν μία ομοιομορφία με μέγιστη τιμή τα 0,699 mm να εμφανίζεται στα πλαϊνά τοιχώματα των sheet panels του honeycomb (Εικόνες 5.4, 5.5)



Εικόνα 5.4 Η κατανομή των μετατοπίσεων στο δοκίμιο.



Σχήμα 5.5 Η παραμορφώσεις-μετατοπίσεις όπως φαίνονται στη πλάγια όψη του δοκιμίου. Αριστερά: χωρίς καταπόνηση, Δεξιά: με καταπόνηση.

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 5.5, τα πλαϊνά τοιχώματα έχουν συμπιεστεί προς τα μέσα κατά 9,1%, αφού αρχικά το ύψος του δοκιμίου ήταν 16mm, ενώ μετά κατέληξε στα 14,7mm. Η ίδια παραμόρφωση παρατηρείται καθ' όλο το μήκος του δοκιμίου.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και επίλογος



6.1 Συμπεράσματα και επίλογος

Από την προσομοίωση-ανάλυση που πραγματοποιήθηκε βλέπουμε πως για μία αναμενόμενη καταπόνηση κατά μία πιθανή εκτόξευση, για ένα δοκίμιο το οποίο αποτελεί μέρος αυτής μίας τέτοιας συσκευής, θα αναπτύσσονται τάσεις κοντά στα 650MPa και παραμόρφωση που φτάνει το 9,1%.

Επίσης, θεωρητικά, περιμένουμε από τη μέθοδο εκτύπωσης τη δημιουργία μικροκενών ανάμεσα στις στρώσεις των ινών, πράγμα το οποίο επιφέρει μείωση των μηχανικών αντοχών.

Τέτοιες τιμές είναι αρκετά μεγάλες και μπορούν να προκαλέσουν από πλαστική παραμόρφωση μέχρι και θραύση του δοκιμίου. Ιδιαίτερα άμα σκεφτούμε τις απαιτήσεις που χρειάζονται για την ασφάλεια των ανθρώπων και τις επιτυχημένες αποστολές, τέτοιες αποδόσεις είναι ακόμα μη αξιοποιήσιμες. Στο ερώτημα αν “μπορεί ένα σύνθετο υλικό ενισχυμένο με συνεχείς ίνες άνθρακα, τυπωμένο από 3D printer που χρησιμοποιεί τη μέθοδο FDM να αποτελέσει εφικτή λύση σε δομικές εφαρμογές στην αεροδιαστημική βιομηχανία;”, η απάντηση μάλλον είναι όχι ακόμα.

Ίσως πιο αναβαθμισμένες λειτουργίες και διορθώσεις στον εκτυπωτή δώσουν πιο καλά κι αξιόπιστα αποτελέσματα στο μέλλον. Για παράδειγμα, θα βοηθούσε προς αυτήν την κατεύθυνση, η δυνατότητα εναπόθεσης των ινών με βάση τις προτιμήσεις του χρήστη ή η δυνατότητα μεταβολής της θερμοκρασίας εκτύπωσης ή της ταχύτητας τη κεφαλής εκτύπωσης.

Παρόλαυτα το παραχθέν δοκίμιο εμφανίζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από αντίστοιχα εκτυπωμένα από άλλα υλικά, όπως ηγλιοη, Αλουμίνιο^[30] κα, δείχνοντας έτσι ο εκτυπωτής μία σχετική υπεροχή. Παρόλο που δεν είναι ακόμα πλήρως έτοιμη η μέθοδος του Additive Manufacturing για ευρεία χρήση στην αεροδιαστημική βιομηχανία, είναι αρκετά έτοιμη για χρήση σε όλους τους υπόλοιπους τομείς που έχουμε αναφέρει στην εργασία

Στο βαθμό όπου η μελλοντική έρευνα προσπαθεί να επιλύσει τέτοια εμπόδια, θα φτάνει πιο κοντά σε καλύτερες μηχανικές αποκρίσεις και θα κατακτιέται μία όλο και καλύτερη κατανόηση, πρακτική και αξιοποίηση.

Παράρτημα 1

Η διαστημική και συνολικά η αεροναυπηγική επιστήμη γίνονται όλο και περισσότερο από τους σημαντικότερους κλάδους επιστήμης και βιομηχανίας. Η, κάτι παραπάνω από, εκατοντάχρονη εξέλιξη της συμπυκνώνει αρχικά την εσωτερική ανάγκη του ανθρώπου, ολοένα και περισσότερο να κατανοεί το περιβάλλον του, να μπορεί να το κάνει κτήμα του. Η ίδια η βιομηχανία, παράλληλα, απαιτεί όλο και περισσότερα εργαλεία για την αποδοτικότητα της, απαιτεί την επαναστατικοποίηση των μέσων που ήδη χρησιμοποιεί, για να μπορέσει να καλύψει τις συνεχώς διευρυνόμενες ανάγκες της, φτάνοντας ακόμα στο σημείο να μπορούμε να λέμε, σήμερα, πως μπορεί αυτός ο χώρος να αποτελεί πεδίο κερδοφορίας, έχοντας έτσι, διπλή φύση.

Με αντίστοιχο τρόπο βλέπουμε την εξέλιξη της βιομηχανίας των υπολογιστών από τη δεκαετία του '60 έως τη δεκαετία του '80 και '90. Η δημιουργία των η/υ δεν αποτέλεσε όνειρο του Μπίλ Γκέιτς και του Στηβ Τζομπς, αλλά ήταν ανάγκη της βιομηχανίας της περιόδου η πιο απαιτητική αυτοματοποίηση των η/υ και λειτουργικών πράξεων, όπου στο βαθμό που ξεπέρασε το μέτρο της αναγκαιότητας, μπόρεσε να γίνει διαθέσιμο για εμπορική χρήση. Κανείς δεν θα μπορούσε για παράδειγμα να φανταστεί τον ENIAC ως προσωπικό υπολογιστή, αφού εξυπηρετούσε εκείνη την περίοδο, άλλο σκοπό. Σήμερα, παρόλο που τις τελευταίες δεκαετίες δεν βλέπουμε αλματώδη εξέλιξη στη διαστημική τεχνολογία, σε σχέση με τις δεκαετίες '50-'80, έχει κατακτηθεί συλλογικά τόσο μεγάλη τεχνογνωσία όπου αρχίζει κι αυτός ο κλάδος, όχι μόνο να αποτελεί πεδίο κερδοφορίας ιδιωτών (βλ. Έλον Μασκ) αλλά να μπορούμε να μιλάμε πλέον για τουριστικά ταξίδια, δημιουργία αποικιών κτλ.

Ακολουθεί μία ιστορική παράθεση σταθμών στη διαστημική και αεροναυπηγική.

- 1903: η πρώτη πτήση με αεροπλάνο, διάρκειας 12", από τους αδερφούς Wright.
- 1957: εκτοξεύεται ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος σε τροχιά γύρω από τη Γη, από την ΕΣΣΔ, ο Sputnik 1.
- 1959: εκτοξεύεται ο δορυφόρος Luna 1, το πρώτο αντικείμενο φτιαγμένο από άνθρωπο, που φτάνει στο φεγγάρι, από την ΕΣΣΔ.
- 1959 εκτοξεύεται ο δορυφόρος Luna 2, το πρώτο αντικείμενο φτιαγμένο από άνθρωπο που προσεληνώθηκε, από την ΕΣΣΔ.
- 1959: εκτοξεύεται ο δορυφόρος Luna 3, όπου τράβηξε την πρώτη φωτογραφία της σκοτεινής πλευράς της Σελήνης, από την ΕΣΣΔ.
- 1961: ο πρώτος άνθρωπος ταξιδεύει στο διάστημα, ο σοβιετικός κοσμοναύτης Γιούρι Γκαγκάριν, με το σκάφος Vostok 1.
- 1963: η πρώτη γυναίκα ταξιδεύει στο διάστημα, η σοβιετική κοσμοναύτης Βαλεντίνα Τερέσκοβα.
- 1969: Με την αποστολή του Apollo 11 ο Νιλ Άρμστρονγκ γίνεται ο πρώτος άνθρωπος που πατάει στο φεγγάρι.
- 1970: πραγματοποιείται η πρώτη εμπορική πτήση από τη Νέα Υόρκη έως το Λονδίνο από το Boeing 747 το οποίο χωρούσε 480 επιβάτες.
- 1976: κατασκευάζεται το υπερηχητικό Concorde.
- 1977: εκτοξεύονται τα Voyager 1 και Voyager 2. Σήμερα το Voyager 1 αποτελεί το πιο μακρινό τεχνητό αντικείμενο που έχει φτιάξει ο άνθρωπος.
- 1998: κατασκευάζεται ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS)

Η παραπάνω εξελικτική διαδικασία δεν ήρθε χωρίς δυσκολίες καθώς η αεροναυπηγική και η διαστημική εξερεύνηση έχουν κάποια διαχρονικά προβλήματα και δυσκολίες. Η απαρίθμηση των εμποδίων αποτελεί συζήτηση εκτεταμένης ανάλυσης με πολλούς παράγοντες ^[31]. Εδώ θα δοθεί ένας προβληματισμός αναφορικά με το κόστος των διαστημικών αποστολών συναρτήσει της μάζας της αποστολής, και των αναγκών για όλο και πιο ανθεκτικά ελαφριά υλικά.

Πρόβλημα #1: Η μάζα και το κόστος της αποστολής

Το 1903 ο Ρώσος φυσικός Τσιολκόφσκι απάντησε στο ερώτημα αν θα μπορούσε ένας πύραυλος να φτάσει την απαιτούμενη ταχύτητα για να φτάσει στο διάστημα, μέσω της σχέσης:

$$\Delta v = v_e \ln \left(\frac{m_0}{m_f} \right) = I_{sp} g_0 \ln \ln \left(\frac{m_0}{m_f} \right) \quad M_f = 1 - \frac{m_1}{m_0} = 1 - e^{-\frac{\Delta v}{v_e}}$$

όπου m_0 είναι η αρχική μάζα του πυραύλου, με τα καύσιμα (υγρή μάζα πυραύλου), m_f η τελική μάζα του πυραύλου, χωρίς τα καύσιμα (στεγνή μάζα), I_{sp} η αποδοτικότητα των καυσίμων, g_0 η επιτάχυνση της βαρύτητας και Δv η ταχύτητα του πυραύλου και M_f η κλασματική μάζα προώθησης. Με τις παραπάνω σχέσεις εξηγείται πώς μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα ενός πυραύλου για να μπορέσει να φτάσει την ταχύτητα που θα του επιτρέψει να φτάσει στο διάστημα. Όσο μικρότερος είναι ο παράγοντας m_1 , τόσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας M_f .

Γίνεται ευδιάκριτο, ακόμα και σε θεωρητικό επίπεδο πως η συνολική μάζα που απαιτείται για έναν πύραυλο ή συνολικά μία αποστολή παίζει καθοριστικό ρόλο. Η μάζα μιας αποστολής, σε γενικές γραμμές, απαρτίζεται από την μάζα των καυσίμων, τη μάζα του οξυγόνου, που αποθηκεύεται για τις επανδρωμένες αποστολές, και τη μάζα του σκάφους. Η κατάλληλη μείωση της μάζας του σκάφους, καθώς αυτό δύναται πιο εύκολα να μειωθεί, κάνει πιο εύκολη την επίτευξη της απαιτούμενης ταχύτητας μειώνοντας έτσι το κόστος καυσίμων (είτε τα απαιτούμενα καύσιμα για αυτόν τον στόχο είτε τα παραπάνω καύσιμα για την μάζα που μειώνουμε).

Το κόστος μιας διαστημικής αποστολής στοιχίζει περίπου 20.000\$ για κάθε κιλό και σύμφωνα με τη NASA “για να μπορέσει η πρόσβαση στο διάστημα να είναι ασφαλής και οικονομική ώστε να ανοίξει την πόρτα στην εξερεύνηση, τη συχνή μελέτη και την εμπορική χρήση πρέπει το κόστος να πέσει 1 τάξη μεγέθους”.^[31]

Αυτό το πρόβλημα βρίσκει σημασία και σε άλλες πλευρές των διαστημικών αποστολών όπως στα Large Space Structures κ.α.

Άρα ένα από τα βασικά προβλήματα, που διαχρονικά υπάρχει, είναι πώς μπορούμε να μειώσουμε κατάλληλα τη μάζα της αποστολής μειώνοντας το κόστος, κρατώντας την αποδοτικότητα;

Πρόβλημα #2: Η αντοχή των υλικών

Το περιβάλλον των εξωτερικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας και του διαστήματος είναι αρκετά απαιτητικό και απαιτεί υλικά που να αντέχουν σε εξαιρετικά δύσκολες και ακραίες συνθήκες. Από την εκτόξευση, την καταπόνηση κατά την πτήση και την πίεση της ατμόσφαιρας και της επιτάχυνσης, τυχόν προσκρούσεις με μικρά σε μέγεθος διαστημικά σκουπίδια (space debris) μέχρι τις συνθήκες περιβάλλοντος του διαστήματος (χαμηλές θερμοκρασίες, διάφορα πίεσης κ.α).

Παράλληλα καθώς ο όγκος αποστολών θα αυξάνεται στο μέλλον ένας ακόμα προβληματισμός που εμπεριέχεται σε αυτό το πρόβλημα δεν είναι μόνο η κατασκευή αλλά και η εύκολη και κατά περίπτωση παραγωγή. Θα είναι παράλογο να εφαρμόσουμε ένα ανθεκτικό ναίμεν υλικό αλλά να χρειάζεται μήνες η παρασκευή του εξαρτήματος, αφού άμα χρειαστεί ανταλλακτικό και είναι ήδη στην εξέλιξη της αποστολής τότε αυτή η επιλογή απονείμει μοιραία.

Το ερώτημα που μπαίνει είναι τι καινούργια υλικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να καλύψουμε αυτές τις ανάγκες που συνεχώς αυξάνονται;

Μπορούμε να μαζέψουμε τους παραπάνω προβληματισμούς σε δύο ερωτήματα:

Ερώτημα #1: Τι υλικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε που είναι πιο ελαφριά και πιο ανθεκτικά;

Ερώτημα #2: Με ποια μέθοδο μπορούμε καλύτερα να τα κατασκευάζουμε;

Βιβλιογραφία

- [1] C. Elanchezian, B. Vijaya Ramnath, J. Hemalatha, "Mechanical behaviour of glass and carbon fiber composites at varying strain rates and temperatures".
- [2] Q. Zhang, X. Yang, P. Li, G. Huang, S. Feng, C. Shen, B. Han, X. Zhang, F. Jin, F. Xu, T. J. Lu, "Bioinspired engineering of honeycomb structures - using nature to inspire human innovation", *Progress in materials Science* 74 (2015) pg 332-400.
- [3] <http://blog.appinc.co/honeycomb-structures-properties-and-uses>
- [4] ASTM, "F2792-10el standard terminology for additive manufacturing technologies" ASTM International, 2010.
- [5] S. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review" *Int J Adv Manf Technol*, vol. 67, pg 1191-1203, 2013.
- [6] Z. W., Y. Liu, J. Deng, Y. Guo, K. Jiang, P. Wang, Z. Yu, Y. Shen, "Laser intensity effect on mechanical properties of wood-plastic composite parts fabricated by selective laser sintering", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol.26, pg 125-136, 2013.
- [7] M. Salmi, K.-S. Paloheimo, J. Tuomi, J. Wolff, A. Makitie, "Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing)", *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, vol. 41, no. 7, pg 603-609, 2013.
- [8] J. Giannatsis, V. Dedoussis, "Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 1, pg 116-127, 2009.
- [9] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet, "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing", *Virtual and Physical Prototyping*, vol.11, no. 3, pg 209-225, 2016.
- [10] N. Labonnote, A. Ronnquist, B. Manum, P. Ruther, "Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities", *Automation in Construction*, vol. 72, no.3, pg 347-366, 2016.
- [11] U. Fasel, D. Keidel, L. Baumann, G. Cavolina, M. Eichenhofer, P. Ermanni, "Composite additive manufacturing of morning aerospace structures" *Manufacturing Letters* 23 (2020) 85-88.
- [12] H. Krueger, "Standardization for Additive Manufacturing in Aerospace", *Engineering* 3 (2017) 585.
- [13] <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/releases/2020/future-rocket-engines-may-include-large-scale-3d-printing.html>
- [14] R. Maghnani, "An exploratory study: The impact of additive manufacturing on the Automobile industry", *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 5, no. 5, pg 1-4, 2015.
- [15] M. Sakin, Y. C. Kiroglu, "3D Printing of buildings: construction of the sustainable houses of the future by BIM", *Energy Procedia*, vol. 134, pg. 702-711, 2016.
- [16] <https://www.independebt.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/3-d-printing-clay-house-world-first-b1840131>
- [17] C. L. Ventola, "Medical Application for 3D Printing: Current and Projected Uses", *Medical Devices*, vol. 39, no. 10, pg. 1-8, 2014.
- [18] A. Simchi, H. Pohl, "Direct laser sintering of iron-graphite powder mixture", *Materials Science and Engineering A*, vol. 383, pg 191-200, 2004.
- [19] N. Taniguchi, T. Nishiwaki, H. Kawada, "Tensile strength of unidirectional cfrp laminate under high strain rate", *Adv Composite Mater.*, vol. 16, pg 167-180, 2007.

- [20] T. Okay, N. Takeda, "Size effect on tensile strength of unidirectional cfrp composites - experiment and simulation", *Composite Science and Technology*, vol. 62, pg 2053-2064, 2002.
- [21] E. K. Gamsteds, R. Talreja, "Fatigue damage mechanisms in unidirectional carbon-fibre-reinforced plastics", *Journal of Materials Science*, vol.34, pg 2535-2546, 1999.
- [22] Z. Maekawa, H. Hamada, A. Yokoyama, S. Ishibashi, "Reliability evaluation on mechanical characteristics of CFRP", 1st Japan International SAMPE Symp., pg 1274-1279, 1989.
- [23] M. Matsuzaki, M. Veda, M. Namiki, T.-K. Jeong, H. Asahara, K. Horiguch, T. Nakamura, A. Todoroki, Y. Hirano, "Three dimensional printing of continuous fiber composites by in-nozzle impregnation", *Scientific Reports*, vol. 6, 2016.
- [24] E. van der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, R. Matzuzaki, "3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermoplastic (CFRTP) tensile test specimen", *Open Journal of Composite Material*, vol. 6, pg 18-27,2016.
- [25] G. W. Melenka, B.K.O. Cheung, J.S. Schofield, M.R. Dawson, J.P. Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fibers-reinforced 3D printed structures", *Composite Structure*, vol. 153, pg 875-886.
- [26] J. Skelton, "Fused deposition modeling. 3D printers an 3D printing technologies almanac" <http://3d-print.blogspot.com/2008/02/fused-deposition-modelling.html>, 2018
- [27] MarkForged, *Mechanical Properties*, 2016.
- [28] <https://standards.nasa.gov/standard/gsfsc/gsfsc-std-7000>
- [29] E. van der Klift, "3D printed unidirectional carbon fibre reinforced polymers for aerospace applications", pg 76, 2017
- [30] E. van der Klift, "3D printed unidirectional carbon fibre reinforced polymers for aerospace applications", pg 81, 2017
- [31] NASA, "Space technology grand challenges", https://www.nasa.gov/offices/oct/strategic_integration/grand_challenges_detail.html