ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Μελέτη και σχεδιασμός ορθοπεδικού βοηθήματος για πρόληψη μυοσκελετικών παθήσεων με αξιοποίηση της DFAM

Διπλωματική εργασία

ΟΝΟΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ *Μαρταβαντζή Μαρία*
Ιδιότητα Συγγραφέα *Φοιτήτρια Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών*

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ
Ντιντάκης Ιωάννης

Ακαδημαϊκό έτος 2024-2025

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα 2
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων 4
Πρόλογος 5
Εισαγωγή 6
Abstract 7
Κεφάλαιο 1 8
1 Εισαγωγή στην προσθετική κατασκευή 8
1.1 Ιστορική αναδρομή 8
1.2 Τρόπος λειτουργίας 9
1.3 Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής 11
1.4 Πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής 11
1.5 Εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής 12
1.5.1 Προσθετική κατασκευή στην ορθοπεδική 13
Κεφάλαιο 2 15
2 Σπονδυλική στήλη 15
2.1 Παθήσεις της σπονδυλικής στήλης 16
2.1.1 Σκολίωση 16
2.1.2 Κύφωση 17
2.2 Συντηρητική θεραπεία με κηδεμόνα 18
2.2.1 Κηδεμόνας Milwaukee 19
2.2.2 Κηδεμόνας Boston 19
2.2.3 Κηδεμόνας DDB 20
2.2.4 Κηδεμόνας Chêneau & Rigo Chêneau 20
2.2.5 Άλλοι κηδεμόνες 21
2.2.6 Συμβατική μέθοδος κατασκευής κηδεμόνα 21
2.2.7 Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία CAD/CAM 22
2.2.8 Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία CAD/FEM 23
2.2.9 Μέθοδος κατασκευής FEM σε συνδυασμό με Topology Optimization 24
2.2.10 Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία Additive Manufacturing 26
2.3 Σύγκριση μεθόδων κατασκευής κηδεμόνα 27
Κεφάλαιο 3 29
3 Διεργασίες προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή ορθοπεδικού κηδεμόνα 29
3.1 Στερεολιθογραφία SLA/SL 29
3.2 Εκτόξευση και εναπόθεση φωτοπολυμερούς υλικού PJ 30
3.3 Εναπόθεση τηγμένου υλικού FDM 31
3.4 Επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ SLS 33
3.5 Υλικά προθετικής κατασκευής 34

3.5.1 Υλικά κατασκευής ορθοπεδικού κηδεμόνα με τη διεργασία FDM 35
Κεφάλαιο 4 39
4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας 39
4.1 Λογισμικό Solidworks 39
4.1.1 Περιβάλλον λογισμικού Solidworks 39
4.1.2 Εντολές σχεδίασης 40
4.1.3 Solidworks Topology Study 41
4.2 Πειραματικό μέρος 42
4.3 Συμπεράσματα 48
Κεφάλαιο 5 49
5 Δομές πλέγματος (Lattice Structure) 49
5.1 Λογισμικό nTop 49
5.1.1 Μονάδα Κυψέλης (Unit Cell) 50
5.1.2 Κατηγοριοποίηση μονάδων κυψέλης 50
5.1.3 Παραμετρική μονάδα κυψέλης (Parameter Unit Cell) 51
5.1.4 Χάρτες Κυψελών (Cell Maps) 51
5.1.5 Κατηγορίες Cell Maps 51
5.2 Εισαγωγή τρισδιάστατου μοντέλου CAD στο λογισμικό nTop 52
5.2.1 Implicit Body from CAD Body 53
5.2.2 Thicken Body & CAD Face List 54
5.2.3 Boolean Intersect, Boolean Subtract & Boolean Union 54
5.2.4 Periodic Lattice 56
5.2.5 Mesh from Implicit Body 57
5.3 Homogenization στο λογισμικό nTop 57
5.3.1 Homogenize Unit Cell 57
5.3.2 Διαδικασία ομογενοποίησης 59
5.4 Static & Topology Study στο λογισμικό Solidworks 60
5.5 Συμπεράσματα – σύγκριση μελέτης 63
Βιβλιογραφία/Αναφορές 64

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

AM	Additive Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
ASTM	American Society for Testing and Material
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
CNC	Computer Numerical Control
FEM	Finite Element Modeling
CTLSO	Cervical Thoracic Lumbar Sacral Orthosis
TLSO	Thoracic Lumbar Sacral Orthosis
SLA/SL	Stereolithography
PJ	Photopolymer Jetting/Polyjet
FDM	Fused Deposition Modelling
SLS	Selective Laser Sintering

Πρόλογος

Ο σχεδιασμός βελτιστοποιημένων αντικειμένων αποτελεί μια συνεχής απαίτηση για τη βιομηχανία καθώς επιταχύνεται από την ανάπτυξη νέων παραγωγικών διαδικασιών που αλλάζουν ριζικά τον τρόπο παραγωγής όλων των προϊόντων, είτε για σύνθετα και πολύπλοκα προϊόντα είτε για απλά καθημερινά αντικείμενα. Απαιτήσεις όπως η κατασκευή ελαφριών δομών, η εξοικονόμηση υλικού, η μείωση του χρόνου κατασκευής είναι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τόσο το χρόνο όσο και το κόστος του παραγόμενου αντικειμένου.

Η ανάπτυξη ενός προϊόντος είναι μία σύνθετη διαδικασία, στο στάδιο της παραγωγής όλα σχεδόν τα βήματα μπορούν να εξυπηρετηθούν από λογισμικά σχεδιομελέτης και παραγωγής CAD/CAM (Computer Aided Design/Manufacturing) με εργαλεία για μελέτη και προσομοίωση παραγωγής CAE (Computer Aided Engineering). Υπάρχουν εξειδικευμένα λογισμικά που εξυπηρετούν αποκλειστικά ανάγκες βελτιστοποίησης μορφής και λειτουργίας. Εξαιτίας όμως της αυξανόμενης ανάγκης για διαχείριση ανάλογων διαδικασιών τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά όπως το SOLIDWORKS ενσωματώνουν στο περιβάλλον CAD κατάλληλα εργαλεία.

Όπως επίσης η τεχνική της Αντίστροφης Μηχανικής (Reverse Engineering) στο παρελθόν, αφορούσε αποκλειστικά εξειδικευμένες βιομηχανίες και τεχνολογίες. Με την εμπορική χρήση τεχνολογιών όπως η 3D σάρωση (3D Scanning) και η Προσθετική Κατασκευή AM (Additive Manufacturing) η ανάγκη για διαδικασίες Αντίστροφης Μηχανικής είναι πλέον εμφανής στους περισσότερους κατασκευαστικούς κλάδους.

Εισαγωγή

Προσθετική κατασκευή AM (Additive manufacturing) είναι ο καθιερωμένος πλέον όρος αυτού που τα προηγούμενα χρόνια αποκαλούνταν ταχεία πρωτοτυποποίηση RP (Rapid Prototyping) και σήμερα είναι γνωστό στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing). Είναι μια μέθοδος κατασκευής εξαρτημάτων μέσω της επάλληλης τοποθέτησης υλικού σε στρώματα. Η επάλληλη αυτή τοποθέτηση υλικού ποικίλει στον τρόπο που πραγματοποιείται ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και το υλικό. Οι τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής αναπτύσσονται τα τελευταία τριάντα χρόνια, τεράστια ώθηση έδωσε η ραγδαία ανάπτυξη τόσο της επιστήμης των υπολογιστών, όσο και της επιστήμης των υλικών. Αναμφισβήτητα, η προσθετική κατασκευή αποτελεί τη μεγαλύτερη τεχνολογική επανάσταση των τελευταίων ετών καθώς υπόσχεται να αναβαθμίσει πολλούς τομείς και να επηρεάσει σημαντικά τον τρόπο ζωής. Σήμερα, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό που χρησιμοποιούνται σε όλους τους παραγωγικούς κλάδους για την παραγωγή τελικών αντικειμένων. Με αφετηρία τους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής και των ιατρικών προϊόντων, η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη σχεδόν οποιουδήποτε είδους καταναλωτικού προϊόντος. Ο σημαντικότερος από όλους τους παράγοντες που διαθέτουν οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι η δημιουργία εξατομικευμένων προϊόντων. Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Βελτιστοποίησης σχεδίασης ορθοπεδικού κηδεμόνα με προσθετική κατασκευή» παρουσιάζει τη παραδοσιακή μέθοδος κατασκευής ενός κηδεμόνα σε σύγκριση με την παραγωγή με τη βοήθεια Η/Υ και συστήματα CAD/CAM. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται η παραγωγή εξατομικευμένων κηδεμόνων για παθήσεις σπονδυλικής στήλης μέσω της χρήσης της Προσθετικής Κατασκευής. Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έως σήμερα προτείνουν διάφορους σχεδιασμούς που προκύπτουν κυρίως από την εμπειρία και τη γνώση του ορθωτικού, αλλά είναι αδύνατο να εξασφαλίσουν ένα βέλτιστο σχεδιαστικό αποτέλεσμα όπως είναι η κατασκευής ενός εξατομικευμένου νάρθηκα. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με τη χρήση προηγμένων σχεδιαστικών εργαλείων και κατασκευαστικών μεθόδων στόχο έχει την σχεδίαση ενός εξατομικευμένου κηδεμόνα. Τα προγράμματα CAD/CAE/CAM που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία συντελούν στις μεθόδους σχεδίασης, υπολογισμού και κατασκευής. Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι το Solidworks της Dassault Systemes, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα για σχεδίαση, κατασκευή και έλεγχο του προϊόντος. Ένα από τα βασικά βήματα για κάθε σχεδιαστή που χρησιμοποιεί το λογισμικό είναι η ύπαρξη του “Topology Study”, χρησιμοποιήθηκε για να υλοποιηθεί μια μελέτη με επαναλήψεις σχεδιασμού προκειμένου να μειωθεί το βάρος του κηδεμόνα χωρίς να επηρεαστεί το διορθωτικό αποτέλεσμα. Η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να προσφέρει ένα ελαφρύτερο και άνετο αποτέλεσμα για τον ασθενή και ταυτόχρονα να πληροί τα κριτήρια υψηλής αντοχής που απαιτούνται. Τα σχέδια μελέτης τοπολογικής βελτιστοποίησης ταιριάζουν τέλεια με διαδικασίες προσθετικής κατασκευής AM (Additive Manufacturing) που έχουν πιο επιεικούς κανόνες σχεδιασμού και μπορούν εύκολα να αναπαράγουν πολύπλοκες γεωμετρίες. Η εναπόθεση τηγμένου υλικού FDM (Fused Deposition Modelling) είναι μία από τις μεθόδους της προσθετικής κατασκευής που μπορεί να εφαρμοστεί για ορθωτικές και προσθετικές εφαρμογές. Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζουν τη δυνατότητα εφαρμογής της χρήσης συστημάτων σχεδιομελέτης και παραγωγής σε συνδυασμό με την τεχνολογία της AM ως μία εναλλακτική επιλογή για τον σχεδιασμό και την κατασκευή εξατομικευμένων ιατρικών προϊόντων.

Λέξεις κλειδιά: Προσθετική Κατασκευή AM (Additive Manufacturing), συστήματα σχεδιομελέτης CAD/CAE/CAM, εξατομικευμένος κηδεμόνας σπονδυλικής στήλης, λογισμικό πακέτο Solidworks της Dassault Systemes, Τοπολογική Βελτιστοποίηση (Topology Study), FDM (Fused Deposition Modelling)

Abstract

AM (Additive manufacturing) is a generally accepted term of what was previously known as RP (Rapid Prototyping) whereas now it is commonly known as (3D Printing). It is a method of constructing components by applying several layers of the material. This method of applying the material varies according to the technology and the material used. The technology of AM has developed over the last thirty years. However, the rapid development in the computer science as well as that of the science of materials have boosted the technology of AM immensely. Undoubtedly, AM constitutes the most significant technological achievement of the last few years since it is bound to upgrade multiple sectors and impact our way of life extensively. Nowadays AM technology has developed to such an extent that it is utilized in all industrial sectors for the production of the end product. To begin with the industries of car manufacturing, aerospace engineering and medical products, AM is applied in the design and development of almost any kind of consumer products. The most important aspect of AM technology is its ability to customize products. This undergraduate thesis entitled "Improved design of orthopedic back brace with the use of AM technology" presents the conventional construction method of a back brace as opposed to that with the help of a computer and CAD/CAM systems. In the past few years there has been an increase in the implementation of the production of customized back braces for spinal disorders with the use of AM technology. The studies conducted so far have put forward several designs which are mainly the result of experience and knowledge of orthotist, however, they have not been able to ensure the best possible design effect such as a customized splint. The objective of this undergraduate thesis is to design a customized back brace with the use of state-of-the-art design tools and construction methods. The CAD/CAE/CAM programs, which are used in the field of industry, are conducive to the design, calculation and construction methods. The software used for the purpose of this assignment was Solidworks of Dassault Systemes, which enables design, construction and quality control of the end product. One of the basic steps for every designer who makes use of this software is the existence of "Topology Study", which was used to conduct a study with design repetitions with a view to reducing the weight of the back brace without affecting the corrective effect. The implementation of topology study can provide the patient with a lighter and comfortable structure which will also meet durability requirements. The designs for topology study match perfectly with AM (Additive Manufacturing) procedures which have more flexible design standards and can easily reproduce complex geometry patterns. FDM (Fused Deposition Modelling) is one of AM methods which can be implemented in the case of orthotic and prosthetic applications. The results of this undergraduate thesis present the extent to which the CAD/CAE/CAM systems combined with AM technology can be implemented as an alternative option for the design and construction of customized medical products.

Key words: Additive Manufacturing (AM), CAD/CAE/CAM systems, custom-made back brace, Solidworks - Dassault Systemes, Topology Study, FDM (Fused Deposition Modelling)

Κεφάλαιο 1

1 Εισαγωγή στην προσθετική κατασκευή

Η Προσθετική Κατασκευή AM (Additive Manufacturing) καθιερώθηκε σταδιακά για την περιγραφή κατασκευαστικών τεχνολογιών και μεθόδων παραγωγής, μέσω διαδικασιών ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής επιτυγχάνεται μία μετασχηματιστική προσέγγιση στη βιομηχανική παραγωγή, που επιτρέπει τη δημιουργία ελαφρύτερων και ισχυρότερων εξαρτημάτων και συστημάτων [1].

Ενώ η προσθετική κατασκευή φαίνεται νέα σε πολλούς, στην πραγματικότητα υπάρχει εδώ και αρκετές δεκαετίες. Είναι μια ακόμη τεχνολογική πρόοδος που έγινε δυνατή με τη μετάβαση από τις αναλογικές στις ψηφιακές διαδικασίες. Στη σημερινή εποχή, μπορεί να φέρει ψηφιακή ευελιξία και αποτελεσματικότητα στις κατασκευαστικές λειτουργίες, καθώς είναι μία τεχνολογία που προσφέρει βελτιωμένη απόδοση, πολύπλοκες γεωμετρίες και απλοποιημένη κατασκευή [1].

Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιεί λογισμικό δεδομένων σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή CAD (Computer Aided Design) ή τρισδιάστατο σαρωτή αντικειμένων (3D scanner) για να κατευθύνει το υλικό, στρώμα με στρώμα, σε ακριβή γεωμετρικά σχήματα. Όπως υποδηλώνει το όνομά της, προσθέτει υλικό για τη δημιουργία ενός αντικειμένου. Αντίθετα, όταν δημιουργείτε ένα αντικείμενο με παραδοσιακά μέσα, είναι συχνά απαραίτητο να αφαιρέσετε υλικό μέσω μηχανικής κατεργασίας όπως το φραιζάρισμα ή άλλων μέσων [1].

Οι κατεργασίες κοπής, και πιο γενικά αφαίρεσης υλικού (κοπή, τόρνευση, φρεζάρισμα), υπήρξαν οι πρώτες στις οποίες κατέστη δυνατός ο ψηφιακός προγραμματισμός και έλεγχος των μηχανών CNC (Computer Numerical Control) (εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου με χρήση Η/Υ). Η εξέλιξη της τεχνολογίας CNC σε συνδυασμό με την εξέλιξη των συστημάτων σχεδίασης CAD και των δυνατοτήτων των Η/Υ, οδήγησε σταδιακά στη σύνδεση των δύο αυτών τεχνολογιών και την ανάπτυξη εφαρμογών λογισμικού CAD/CAM. Τα συγκεκριμένα τεχνολογικά επιτεύγματα είναι αυτά που αποτέλεσαν και τη βάση για την εμφάνιση, στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, και την ανάπτυξη μιας νέας οικογένειας κατασκευαστικών τεχνολογιών, της Προσθετικής Κατασκευής AM (Additive Manufacturing) [1,2].

Η τεχνολογία αυτή είναι μία μέθοδος κατασκευής όπου με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις (layers) δημιουργείται το επιθυμητό κομμάτι, αντί να αφαιρέσει υλικό για να δημιουργήσει ένα μέρος. Η AM συνδυαζόμενη διαδοχικά με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει σημαντικά τους χρόνους και τα κόστη ανάπτυξης ενός προϊόντος. Το γεγονός ότι το τεχνολογικό κόστος συνεχώς μειώνεται, ενισχύει τη δυναμική της τεχνολογίας και διευρύνει το πεδίο εφαρμογών της. Με αφετηρία τους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής και των ιατρικών προϊόντων, η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη σχεδόν οποιουδήποτε είδους καταναλωτικού προϊόντος [1,2].

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση RP (Rapid Prototyping) συνίσταται από μια ομάδα τεχνολογιών που καθιστούν εύκολη και γρήγορη την κατασκευή μοντέλων ή συναρμολογήσεων στρώμα σε στρώμα (layer by layer) και μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Με τη βοήθεια της RP υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν γρήγορα φυσικά αντικείμενα, απευθείας από κάποιο CAD (Computer Aided Design) μοντέλο, μέσω της συνεχόμενης πρόσθεσης υλικού σε μορφή στρώσεων της μίας πάνω στην άλλη. Η ανάπτυξη και η επιτυχής εμπορευματοποίηση αυτής της καινοτόμου οικογένειας κατασκευαστικών τεχνικών ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και από τότε έχει παρουσιάσει μεγάλη και ραγδαία πρόοδο. Το αρχικό κίνητρο για την εισαγωγή των μεθόδων RP (Rapid Prototyping) σε διάφορες βιομηχανίες, ήταν να υποστηρίξει τη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων σε ταχείς ρυθμούς και με χαμηλό κόστος [2,3].

Είναι πολύ ενδιαφέρον το γεγονός ότι αιτήσεις για ανάλογες πατέντες υποβλήθηκαν συγχρόνως το 1984 στην Ιαπωνία (Murutani), τη Γαλλία (Andre et al.) και τις ΗΠΑ (Maters τον Ιούλιο και Hull τον Αύγουστο). Όλες αυτές οι πατέντες περιέγραφαν μια παρόμοια ιδέα για την κατασκευή ενός 3D αντικειμένου μέσω της επιλεκτικής πρόσθεσης διαδοχικών στρωμάτων υλικού του ενός επάνω στο άλλο. Ωστόσο, η πρώτη εμπορική διαδικασία παρουσιάστηκε στην Έκθεση Autofact στο Detroit, το Νοέμβριο του 1987, από τον Charles W. Hull, με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας SL/SLA (stereolithography), κατά την οποία λεπτά στρώματα φωτοευαίσθητου (UV light-sensitive) υγρού πολυμερούς στερεοποιούνταν με τη χρήση δέσμης λέιζερ. Ο ίδιος στη συνέχεια ίδρυσε και την εταιρία 3D Systems Inc, που είναι πλέον από τις κύριες εταιρίες του κλάδου [2,3].

Σήμερα υπάρχουν περισσότερες από τριάντα διαδικασίες, μερικές από τις οποίες είναι εμπορικές, ενώ άλλες βρίσκονται υπό εξέλιξη σε εργαστήρια έρευνας και άλλες βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Η ακρίβεια των μεθόδων ταχείας πρωτοτυποποίησης RP έχει βελτιωθεί σημαντικά και βελτιώνεται συνεχώς, οι επιλογές των υλικών είναι σχετικά πολλές και συνεχώς αυξάνονται και το εύρος των εφαρμογών συνεχώς διευρύνεται και επεκτείνεται η χρήση της τεχνολογίας σε νέους τομείς. Τα μοντέλα που παράγονται από τις μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίηση χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για λειτουργικές δοκιμές, για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων σε μικρές ποσότητες και για την παραγωγή εργαλείων παραγωγής τελικών αντικειμένων. Η ταχεία πρωτοτυποποίηση RP είχε καθιερωθεί για να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας. Στην πορεία χρησιμοποιήθηκε και ο όρος ταχεία εργαλεία RT (Rapid Tooling) με τον οποίο περιγράφονται οι τεχνολογίες που υιοθέτησαν τις γρήγορες τεχνικές διαμόρφωσης ενός πρωτοτύπου στην κατασκευή τόσο εργαλείων όσο και καλουπιών [2,3].

Σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως ο όρος Προσθετική Κατασκευή AM (Additive Manufacturing), που ορίζεται από τον παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης American Society for Testing and Material (ASTM F42) ως η διαδικασία συνένωσης υλικών, συνήθως στρώμα πάνω σε στρώμα, για την δημιουργία αντικειμένων από τρισδιάστατα μοντέλα δεδομένων. Σε αντίθεση με τις αφαιρετικές κατασκευαστικές τεχνολογίες όπως οι συμβατικές μηχανικές κατεργασίες. Οι τεχνολογίες που περιγράφονται με τον όρο προσθετική κατασκευή δεν μπορούν να χαρακτηριστούν νέες καθώς αναπτύσσονται τα τελευταία 30 χρόνια. Αρχικός στόχος των τεχνολογιών αυτών αποτελούσε η γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Γι' αυτό το λόγο η πρώτη ονομασία που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τις τεχνολογίες αυτές ήταν ταχεία πρωτοτυποποίηση. Ο όρος AM υιοθετήθηκε για να σηματοδοτήσει τη δυνατότητα που παρέχουν πλέον οι τεχνολογίες για απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων έτοιμων προς χρήση [2,3].

Προσθετική κατασκευή AM (Additive Manufacturing) είναι ο καθιερωμένος πλέον όρος αυτού που τα προηγούμενα χρόνια αποκαλούσαμε «ταχεία πρωτοτυποποίηση» RP (Rapid Prototyping) και σήμερα είναι γνωστός στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing). Ο όρος της Τριδιάστατης Εκτύπωσης (3D printing) υιοθετήθηκε από τα κύρια μέσα μαζικής ενημέρωσης. Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση πούδρας και κεφαλές έγχυσης (powder bed and inkjet head 3d printing) αναπτύχθηκε το 1989 από το MIT και το 1995 η εταιρία Z Corp πήρε τα αποκλειστικά δικαιώματα. Σήμερα, η Z Corp είναι εταιρία της 3D Systems. Η προσθετική κατασκευή είναι ο ευρύτερος και πιο ολοκληρωμένος όρος. Στην πορεία, ωστόσο, των χρόνων καθιερώθηκε ο όρος της 3D εκτύπωσης να χρησιμοποιείται ως συνώνυμος αυτού της Προσθετικής Κατασκευής. Στην πραγματικότητα ο όρος της 3D εκτύπωσης περιγράφει μόνο μία από τις διαδικασίες της προσθετικής κατασκευής σύμφωνα με την επιτροπή ASTM F42 [2,3].

1.2 Τρόπος λειτουργίας

Για την παραγωγή ενός πρωτοτύπου με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής, από την εικονική αναπαράσταση του συστήματος CAD (Computer Aided Design) μέχρι το τελικό φυσικό αποτέλεσμα μεσολαβούν αρκετά βήματα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να αναλυθεί η ροή της διαδικασίας, κάτι το οποίο εξαρτάται από την οπτική και την εξοικείωση με την εκάστοτε συσκευή. Δηλαδή αν, για παράδειγμα, αφορούσε μόνο το κομμάτι του σχεδιασμού τότε θα υπήρχαν περισσότερα βήματα κατά την αρχική φάση σχεδιασμού του προϊόντος. Ενώ, αν αφορούσε μόνο, το κατασκευαστικό κομμάτι τότε θα υπήρχαν περισσότερα βήματα στις φάσεις που απαιτούνται για την κατασκευή ενός μοντέλου. Οι διαφορετικές τεχνολογίες της AM χειρίζονται αυτή την αλληλουχία των βημάτων με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Παρακάτω θα αναλυθούν τα οκτώ κύρια διαδοχικά βήματα της διαδικασίας [2,3].

Αρχικά, το προϊόν μοντελοποιείται πρώτα σε σύστημα 3D σχεδίασης, κάθε εξάρτημα του προϊόντος που πρόκειται να παραχθεί με το σύστημα προσθετικής κατασκευής, περιγράφεται η εξωτερική γεωμετρία του από ένα ψηφιακό μοντέλο. Η AM δεν θα υπήρχε αν δεν υπήρχαν τα 3D συστήματα CAD, αφότου αποκτήθηκε η δυνατότητα να αναπαρίστανται στερεά αντικείμενα στους υπολογιστές, αναπτύχθηκε και η τεχνολογία για τη φυσική αναπαραγωγή των αντικειμένων αυτών [2,3].

Από τα συστήματα σχεδίασης CAD παίρνουμε ένα αρχείο τύπου STL (stereo lithography), μια μορφή αρχείου που άρχισε από την εταιρία 3D Systems το 1990. Το αρχείο αυτό προσεγγίζει την ακριβή γεωμετρία του μοντέλου CAD με μια απλοποιημένη μαθηματική μορφή. Το αρχείο αυτό περιγράφει τη μορφή του αντικειμένου (εσωτερική και εξωτερική). Ένα αρχείο STL δεν περιέχει καμία πληροφορία αναφορικά με μονάδες, χρώμα, υλικό ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό. Οι περιορισμοί αυτοί έχουν οδηγήσει προσφάτως στην υιοθέτηση μιας νέας μορφής αρχείου «AMF» (Additive Manufacturing File Format). Η μορφή αυτή αποτελεί πλέον διεθνές ASTM/ISO πρότυπο που επεκτείνει τη μορφή STL, ώστε να περιλάβει διαστάσεις, χρώμα, υλικό και πολλές άλλες χρήσιμες πληροφορίες [2,3].

Η τυποποιημένη STL χρησιμοποιείται από όλα τα συστήματα προσθετικής κατασκευής. Αφότου, ολοκληρωθεί η δημιουργία του αρχείου STL που περιγράφει το κομμάτι πρέπει να μεταφερθεί στη μηχανή AM. Εδώ θα πρέπει το αρχείο να υποστεί μια σχετική επεξεργασία, ώστε το κομμάτι να έχει το κατάλληλο μέγεθος για την κατασκευή του, θέση και προσανατολισμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν εδώ δεν τις διαθέτουν όλες οι μηχανές AM. Προκειμένου να εκτελεστούν οι αναγκαίες λειτουργίες προτού σταλεί το αρχείο δεδομένων στη μηχανή, χρησιμοποιείτε ειδικό λογισμικό διαχείρισης αρχείων STL, που είτε διατίθενται προς αγορά, είτε είναι ελεύθερα προς εγκατάσταση από το διαδίκτυο [2,3].

Στη συνέχεια, η μηχανή AM πρέπει να προετοιμαστεί κατάλληλα, προτού να αρχίσει η διαδικασία κατασκευής. Όλες οι μηχανές AM έχουν τουλάχιστον μερικές παραμέτρους προετοιμασίας που σχετίζονται ειδικά με την εκάστοτε μηχανή ή διεργασία. Η προετοιμασία αυτή αναφέρεται σε κατασκευαστικές παραμέτρους όπως είναι οι περιορισμοί που εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής, η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας, το πάχος της στρώσης και οι διάφορες επιλογές χρονισμού [2,3].

Η κατασκευή του κομματιού είναι κυρίως μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που εκτελείται χωρίς ουσιαστική επιτήρηση, η διεργασία περνά στην πλήρως ελεγχόμενη φάση της κατασκευής από υπολογιστή. Αυτή είναι η φάση κατά την οποία πραγματοποιείται η στρωματική κατασκευή. Απαιτείται στοιχειώδης μόνο παρακολούθηση της μηχανής, ώστε να αποφευχθεί ο παράγοντας λάθους όπως, για παράδειγμα, να έχει εξαντληθεί το υλικό κατασκευής ή να υπάρχει κάποιο σφάλμα στην ηλεκτρική τροφοδοσία της μηχανής και το λογισμικό. Όσο δεν εντοπίζονται λάθη, κατά την εκτέλεση της κατασκευής οι μηχανές AM επαναλαμβάνουν τη διαδικασία επίστρωσης μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή [2,3].

Όταν η μηχανή ολοκληρώσει την κατασκευή, το κομμάτι πρέπει να απομακρυνθεί από τη μηχανή, η οποία μπορεί να διαθέτει ασφαλιστικές δικλίδες/μηχανισμούς που να εξασφαλίζουν, ότι η θερμοκρασία της είναι αρκούντως χαμηλή ή ότι δεν βρίσκονται σε κίνηση κάποια μέρη της. Στη συνέχεια, το κομμάτι είτε πρέπει να αποχωριστεί από την κατασκευαστική πλατφόρμα επάνω στην οποία είχε παραχθεί, είτε να απομακρυνθεί από το επιπλέον υλικό που το περιβάλλει. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλες οι διεργασίες AM έχουν κάποιες απαιτήσεις καθαρισμού στη φάση αυτή [2,3].

Έπειτα, όταν τα κομμάτια απομακρυνθούν από τη μηχανή, ιδανικά, θα έπρεπε να είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν αμέσως, αυτό αν και συμβαίνει σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν αποτελεί την πλέον συνηθισμένη περίπτωση και τα κατασκευαζόμενα κομμάτια απαιτούν σημαντική μετεπεξεργασία. Η μετεπεξεργασία αναφέρεται στο στάδιο της αποπεράτωσης ενός κομματιού, αυτό απαιτεί χρόνο, καθώς και προσεκτική χειρωνακτική εργασία από έμπειρο προσωπικό. Για παράδειγμα, μπορεί να απαιτείται αστάρωμα η βαφή, ώστε να έχουν μία αποδεκτή επιφανειακή υφή και φινίρισμα [2,3].

Στο τελευταίο στάδιο, μετά την επεξεργασία, τα κομμάτια είναι έτοιμα προς χρήση. Μια λεπτομέρεια που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι, τόσο οι διεργασίες όσο και τα χρησιμοποιούμενα υλικά της AM βελτιώνονται με ταχύτατους ρυθμούς. Συνεπώς, οι σχεδιαστές θα πρέπει να ενημερώνονται για τις εξελίξεις ώστε να είναι σε θέση να αξιοποιούν την AM για να καλύψουν τις σχεδιαστικές ανάγκες τους κατά τον καλύτερο τρόπο [2,3].

1.3 Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογίες ΑΜ χρησιμοποιούνται όλο και συχνότερα για την παραγωγή προϊόντων προοριζόμενων για τον τελικό χρήστη ή καταναλωτή. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής, τόσο σε εμπορικό επίπεδο όσο και σε ερευνητικό, καθώς το πεδίο εφαρμογών της τεχνολογίας επεκτείνεται συνεχώς και ερευνώνται νέες εφαρμογές, μέθοδοι λειτουργίας και υλικά παραγωγής [2,3].

Στις πιο γνωστές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής συγκαταλέγονται οι επτά επιμέρους κατηγορίες όπως έχουν καθοριστεί από την επιτροπή ASTM F42, οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω:

i. Πολυμερισμός με φως σε κάδο (vat photopolymerization) : διεργασίες οι οποίες χρησιμοποιούν φωτοπολυμερές υλικό σε υγρή κατάσταση μέσα σε κάδο, το οποίο μέσω πολυμερισμού που προκαλείται από παρουσία φωτός στερεοποιείται επιλεκτικά. Αντιπροσωπευτικές και διαδεδομένες τεχνολογίες της κατηγορίας αυτής είναι η Στερεολιθογραφία SLA/SL (Stereolithography) και η επεξεργασία με ψηφιακό φως DLP (Digital Light Processing) [2,3].

ii. Εκτόξευση και εναπόθεση υλικού (material jetting) : διεργασίες ink-jet εκτύπωσης, σταγονίδια πρώτης ύλης εναποτίθενται επιλεκτικά. Σε αυτή την κατηγορία κυριότερη τεχνολογία είναι η εκτόξευση και εναπόθεση φωτοπολυμερούς υλικού PJ (Photopolymer Jetting) [2,3].

iii. Εκτόξευση και εναπόθεση συνδετικού (binder jetting) : διεργασίες κατά τις οποίες εκτυπώνεται συγκολλητική ουσία επάνω σε μία κλίνη πούδρας ώστε να συγκολληθούν οι κόκκοι της και να δημιουργηθούν οι διατομές του κατασκευαζόμενου κομματιού. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σε αυτή την κατηγορία είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) [2,3].

iv. Εξώθηση υλικού (material extrusion) : διεργασίες οι οποίες εναποθέτουν υλικό επιλεκτικά μέσω ακροφυσίου ή στομίου, το οποίο σαρώνοντας με κατάλληλο τρόπο δημιουργεί τις διατομές του κατασκευαζόμενου κομματιού. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σε αυτή την κατηγορία είναι η εναπόθεση τηγμένου υλικού FDM (Fused Deposition Modelling), τόσο για πλαστικά όσο και για μέταλλα [2,3].

v. Σύντηξη πούδρας υλικού σε κλίνη (powder bed fusion) : διεργασίες οι οποίες χρησιμοποιούν ένα δοχείο γεμάτο με πούδρα υλικού, όπου επεξεργάζεται επιλεκτικά από μία ενεργειακή πηγή που είναι συνήθως ένα λέιζερ σάρωσης ή μια δέσμη ηλεκτρονίων. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες σύντηξης πούδρα υλικού σε κλίνη είναι επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ SLS (Selective Laser Sintering), άμεση σύντηξη μετάλλου με λέιζερ DMLS (Direct Metal Laser Sintering), επιλεκτική τήξη με λέιζερ SLM (Selective Laser Melting) και τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων EBM (Electron Beam Melting) [2,3].

vi. Επάλληλα επίπεδα φύλλα υλικού (sheet lamination) : φύλλα υλικού συγκολλούνται για να σχηματίσουν ένα αντικείμενο, διεργασίες οι οποίες σε κάθε πέρασμα εναποθέτουν ολόκληρη στρώση υλικού, το οποίο έχει τη μορφή φύλλων στερεού υλικού. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες είναι η τεχνολογία κατασκευή αντικειμένων με φύλλα LOM (Laminated Object Manufacturing) και η υπερηχητική ενοποίηση (Ultrasonic Consolidation) [2,3].

vii. Άμεση εναπόθεση ενέργειας DED (directed energy deposition) : διεργασίες οι οποίες συγχρόνως εναποθέτουν υλικό συνήθως σε μορφή πούδρας ή σύρματος, και παρέχουν την απαραίτητη θερμική ενέργεια έτσι ώστε να συνενώνει υλικά λιώνοντας τα καθώς το υλικό εναποτίθεται [2,3].

1.4 Πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής

Έχει διαπιστωθεί ότι η προσθετική κατασκευή παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται η καλύτερη απεικόνιση των ιδεών, ο ευκολότερος εντοπισμός σχεδιαστικών ατελειών, ο μειωμένος χρόνος πρωτοτυποποίησης και η σημαντικότατη μείωση του κόστους, που συνδέεται με τη δυνατότητα ανάπτυξης ορθών σχεδιαστικών λύσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα [2,3].

Το πλεονέκτημα της ταχύτητας δεν αναφέρεται μόνο στον χρόνο που δαπανάται για την κατασκευή ενός κομματιού. Η επιτάχυνση της ανάπτυξης ενός προϊόντος οφείλεται κυρίως στο ότι χρησιμοποιούνται υπολογιστές από την αρχή μέχρι το τέλος κατά τη διαδικασία παραγωγής. Ως σημείο εκκίνησης χρησιμοποιείται το 3D CAD σύστημα και η μεταφορά των δεδομένων στην μηχανή ΑΜ είναι απρόσκοπτη, υπάρχει δηλαδή μικρότερος προβληματισμός αναφορικά με την μετατροπή των δεδομένων ή την ερμηνεία του σχεδιαστικού στόχου. Το απρόσκοπτη στην όλη διαδικασία αναφέρεται και στη μείωση ακριβώς των σταδίων της διαδικασίας. Άσχετα με την πολυπλοκότητα του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί, η κατασκευή στη μηχανή ΑΜ πραγματοποιείται σε ένα και μοναδικό βήμα. Είναι πλέον δυνατόν να παραχθούν τελικά προϊόντα και όχι μόνο τα πρωτότυπά τους. Οι όροι ταχεία κατασκευή RM (Rapid Manufacturing) και άμεση ψηφιακή κατασκευή DDM (Direct Digital Manufacturing) χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν τη χρήση της ΑΜ για την παραγωγή αντικειμένων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως τελικά προϊόντα [2,3].

Η τεχνολογία επιτρέπει στους μηχανικούς να σχεδιάζουν εξαρτήματα που ενσωματώνουν πολύπλοκη γεωμετρική μορφή, καθώς δεν είναι δυνατή χρησιμοποιώντας άλλες μεθόδους. Πολύπλοκα χαρακτηριστικά μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας σε ένα σχέδιο, τα μέρη που προηγουμένως απαιτούσαν συναρμολόγηση και συγκόλληση ή συγκόλληση πολλών τεμαχίων μπορούν τώρα να αναπτυχθούν ως ένα μόνο εξάρτημα, γεγονός που προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα. Οι σχεδιαστές δεν περιορίζονται πλέον στους περιορισμούς των παραδοσιακών μηχανών και μπορούν να δημιουργήσουν εξαρτήματα με μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού [2,3].

Η εξοικονόμηση χρόνου κατασκευής και παραγωγής αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα, εφόσον, εξατομικευμένα προϊόντα μπορούν να παραχθούν γρήγορα με σχεδόν μηδαμινή σπατάλη υλικού. Τα εξαρτήματα κατασκευάζονται απευθείας από ένα τρισδιάστατο αρχείο CAD, το οποίο εξαλείφει το κόστος και τη χρονοβόρα διαδικασία δημιουργίας εξαρτημάτων. Ταυτόχρονα, μία πληθώρα διαφορετικών υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μεθόδους της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, στα οποία συμπεριλαμβάνονται μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οργανικά υλικά (κερί, χαρτί, άμμος), βιο-συμβατά υλικά ή βιο-υλικά κ.ά. Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών αποτέλεσε μία από τις προϋποθέσεις για την ευρύτερη ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΜ και για την υιοθέτηση τους σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της βιομηχανίας [2,3].

Στο άμεσο μέλλον αναμένονται πολύ περισσότερες εφαρμογές παραγωγής κομματιών με ΑΜ διεργασίες, καθώς τα υλικά βελτιώνονται αφού εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια, βελτιωμένη μηχανική αντοχή και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ενισχύονται η προτυποποίηση και η επαναληψιμότητα, η χρήση ΑΜ επιτρέπει στις κατασκευάστριες εταιρείες να διατηρούν μόνο ψηφιακά μοντέλα των κομματιών-εξαρτημάτων, αυτό είναι αρκετά ευκολότερο και οικονομικά συμφερότερο από τη φυσική αποθήκευση κομματιών. Τέλος, όσον αφορά τη πιστοποίηση των παραγωγικών μεθόδων, η ταχύτητα και το κόστος αναφορικά με τον χρόνο που μεσολαβεί από τη σύλληψη της ιδέας μέχρι την εμφάνιση ενός προϊόντος στην αγορά, κυρίως όταν πρόκειται για πολύπλοκες ή εξατομικευμένες γεωμετρίες, αποτελούν την απόδειξη των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής [2,3].

1.5 Εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή διανύει πλέον την τρίτη δεκαετία τεχνολογικής εξέλιξης όσον αναφορά την εφαρμογή της για εμπορικούς σκοπού. Αρκετές σημαντικές αλλαγές, κατά την πάροδο του χρόνου, οδήγησαν στη βελτίωση της κατασκευαστικής ακρίβειας, των μηχανικών ιδιοτήτων των κομματιών, στην διερεύνηση του πεδίου εφαρμογών, καθώς και στη μείωση του κόστους τόσο των μηχανών όσο και των κομματιών που παράγονται από αυτές. Λόγω των προαναφερόμενων χαρακτηριστικών, η τεχνολογία ΑΜ βρίσκει εφαρμογή σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος πεδίων, όπως, για παράδειγμα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην αεροδιαστημική, στον τομέα της ιατρικής και οδοντιατρικής και σε πολλά άλλα [2,3].

Η χρησιμότητα της ΑΜ στην αεροδιαστημική και στην αυτοκινητοβιομηχανία οφείλεται κυρίως στις δυνατότητες πολύπλοκης γεωμετρικής επεξεργασίας που προσφέρει και στον χρόνο ανάπτυξης του προϊόντος που είναι δυνατόν να εξοικονομηθεί. Η αυτοκινητοβιομηχανία ήταν ο πρώτος κλάδος που υιοθέτησε την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, με το πλεονέκτημα να έχει πρωτοπορήσει σε πολλές εφαρμογές στην ανάπτυξη προϊόντων. Οι βιομηχανίες παραγωγής αυτοκινήτων και οι προμηθευτές του συγκεκριμένου κλάδου

χρησιμοποίησαν ΑΜ κομμάτια για να εντοπίσουν και να διορθώσουν σφάλματα στις γραμμές συναρμολόγησης. Χρησιμοποίησαν, δηλαδή, ΑΜ κομμάτια, για να ελέγξουν τις διαδικασίες παραγωγής, προκειμένου να διαπιστώσουν πιθανά προβλήματα πριν τη τελική συναρμολόγηση. Καθώς η αλλαγή της γραμμής παραγωγής που απαιτείται για την παραγωγή ενός νέου προϊόντος, αποτελεί τεράστια επένδυση, η δυνατότητα έγκαιρης πρόληψης πιθανών προβλημάτων κατά την παραγωγή συνεπάγεται πολύ μεγάλη εξοικονόμηση οικονομικών πόρων [2].

Οι μεγαλύτερες βιομηχανίες αεροδιαστημικής στις ΗΠΑ και την Ευρώπη επιδιώκουν να χρησιμοποιούν ΑΜ διεργασίες σε εφαρμογές που σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή. Για παράδειγμα, πολεμικά και πολιτικά αεροπλάνα της Boeing φέρουν εξαρτήματα που έχουν κατασκευαστεί με ΑΜ διεργασίες. Η εταιρία αναφέρει ότι υπάρχουν πάνω από 200 διαφορετικά εξαρτήματα σε τουλάχιστον 16 μοντέλα αεροσκαφών της. Τα πλαστικά εξαρτήματα στα πολιτικά αεροπλάνα πρέπει να πληρούν τις ανάλογες προδιαγραφές αναφλεξιμότητας, και έτσι η υιοθέτησή τους καθυστέρησε μέχρι να αναπτυχθούν PBF πολυμερή επιβραδυνόμενης ανάφλεξης [2].

Όσον αναφορά το τομέα της ιατρικής, η χρήση της ΑΜ για διαγνωστικούς σκοπούς αποτέλεσε την πρώτη πιθανότατα ιατρική εφαρμογή της ΑΜ. Οι χειρουργοί εργάζονται σε ομάδες, στις οποίες συμμετέχουν υποστηρικτικά ιατροί άλλων ειδικοτήτων και νοσοκόμοι κατά τη διάρκεια μιας χειρουργικής επέμβασης. Χρησιμοποιούν μοντέλα για να αντιληφθούν καλύτερα οι ίδιοι τις πολύπλοκες χειρουργικές διαδικασίες και για να επικοινωνούν με τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας. Στις πολύπλοκες χειρουργικές διαδικασίες απαιτείται, επίσης, να κατανοήσει ο ασθενής τη διαδικασία και να συμφωνήσει με αυτή. Συνεπώς, ο χειρουργός μπορεί να χρησιμοποιήσει τα μοντέλα για αυτόν το σκοπό [2].

Είναι πλέον γνωστό ότι, σε πολύπλοκες περιπτώσεις, τα ΑΜ μοντέλα βοηθούν στη μείωση του χρόνου της επέμβασης, επιτρέποντας στους χειρουργούς όχι μόνο να την έχουν προγραμματίσει από πριν καλύτερα, αλλά και να αντιλαμβάνονται ορθότερα την κατάσταση που επικρατεί κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να διατεθεί μέσα στο χειρουργείο το φυσικό μοντέλο του οργάνου που εγχειρίζουν και στο οποίο μπορούν άμεσα να αναφερθούν. Οι κατασκευαστές ΑΜ μηχανών έχουν αναπτύξει ευρύ φάσμα υλικών επιτρέποντας την αποστείρωση των ιατρικών μοντέλων, προκειμένου αυτά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στο χειρουργείο, χωρίς τον κίνδυνο μολύνσεων [2].

Καθώς οι διεργασίες της τεχνολογίας ΑΜ εξελίσσονται και βελτιώνονται ο αριθμός των εφαρμογών συνεχώς αυξάνεται. Οι διάφορες εφαρμογές επωφελούνται κατά διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό από τα επιμέρους χαρακτηριστικά της ΑΜ, επισημαίνοντας έτσι την ευελιξία της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στην παρόν υποενότητα αναφέρθηκαν κάποια παραδείγματα εφαρμογών της τεχνολογίας ΑΜ, η συγκεκριμένη εργασία αφορά την συνεισφορά της προσθετικής κατασκευής στον τομέα της ορθοπεδικής [2,3].

1.5.1 Προσθετική κατασκευή στην ορθοπεδική

Οι μοναδικές δυνατότητες που προσφέρουν οι ΑΜ τεχνολογίες όπως η δυνατότητα να κατασκευαστούν κομμάτια με εξατομικευμένη γεωμετρική μορφή και με ακριβής αναπαραγωγή του ψηφιακού CAD μοντέλου έγιναν γρήγορα αντιληπτές και αξιοποιήθηκαν από το κλάδο της ιατρικής. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ΑΜ μοντέλα χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές από την αρχή σχεδόν της εμπορικής διάθεσης της τεχνολογίας [2,3].

Αρχικά, οι ιατροί χρησιμοποιούν την τεχνολογία της ιατρικής απεικόνισης για να δημιουργήσουν 3D εικόνες που θα τους επιτρέψουν να παρατηρήσουν το όργανο που θέλουν να εξετάσουν υπό οποιαδήποτε γωνία και να εκτιμήσουν έτσι καλύτερα την αντίστοιχα ιατρική κατάστασή του. Η Αξονική Τομογραφία CT (Computerised Tomography), η 3D Μαγνητική Τομογραφία MRI (Magnetic Resonance Imaging), η 3D υπερηχογραφία (3D Ultrasound) και η Τρισδιάστατης Σάρωσης/3D laser Scanning (για απεικόνιση της εξωτερικής μορφής) είναι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν παράλληλα με τις τεχνικές 3D αναπαράστασης και μπορούν να δώσουν ακριβή, γρήγορα και μεγάλης ευκρίνειας δεδομένα [2,3].

Τα δεδομένα της 3D απεικόνισης χρησιμοποιούνταν μόνο για απεικονιστικούς και διαγνωστικούς σκοπούς. Στη συνέχεια, η χρήση τους επεκτάθηκε στο χώρο των συστημάτων CAD/CAM, με την ΑΜ τεχνολογία να

αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο φυσικής υλοποίησης των αντίστοιχων μοντέλων, λόγω ακριβώς της μορφολογικής πολυπλοκότητας που εμφανίζουν από τη φύση τους τα ανθρώπινα όργανα και μέλη. Τα ιατρικά δεδομένα που συλλέγονται από τους ασθενείς είναι ουσιαστικά μοναδικά και ξεχωριστά για κάθε άτομο. Ο αυτόματος και μη εξειδικευμένος χαρακτήρας της ΑΜ την καθιστά την προφανή μέθοδο παραγωγής προϊόντων από δεδομένα ασθενών [2,3].

Διεργασίες που βασίζονται σε ΑΜ τεχνικές συμβάλλουν σημαντικά σε διαφορετικές κατηγορίες ιατρικών εφαρμογών όπως για παράδειγμα χειρουργικά και διαγνωστικά βοηθήματα. Κάποιες από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής στον τομέα της ορθοπεδικής είναι η δημιουργία μοσχευμάτων/εμφυτευμάτων (implants), όπως επίσης και η κατασκευή εξατομικευμένων ορθοπεδικών προσθέσεων (prostheses) και ορθώσεων (orthoses). Η όρθωση μπορεί να οριστεί ως μια τεχνητή εξωτερική βοηθητική συσκευή που υποστηρίζει τα άκρα ή τη σπονδυλική στήλη για να αποτρέψει ή να βοηθήσει οποιαδήποτε κίνηση γίνεται από τους ασθενείς. Ενώ, όσον αφορά την πρόσθεση, μπορεί να οριστεί ως ένα τεχνητό μέρος του σώματος που αντικαθιστά πλήρως το μέρος του σώματος που λείπει [4].

Αρχικός στόχος της τεχνολογίας ήταν η παραγωγή φθηνών και πλήρως λειτουργικών μελών για άτομα που έχουν υποστεί ακρωτηριασμό. Η ανάγκη για κατασκευή προσθέσεων μέσω της ΑΜ γίνεται όλο και πιο μεγάλη, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού δεν χρησιμοποιεί τεχνητά άκρα λόγω του υψηλού κόστους τους. Μέσω της τεχνολογίας ΑΜ και των πολυάριθμων σχεδιαστικών επιλογών που πλέον είναι διαθέσιμες ακόμα και στο διαδίκτυο, η κατασκευή εξατομικευμένων προσθέσεων με υψηλή αισθητική μπορεί να γίνει άμεσα και με πολύ χαμηλό κόστος [4].

Στη συνέχεια, η χρήση της ΑΜ επεκτάθηκε για τη δημιουργία εξατομικευμένων, λειτουργικών και άνετων ορθώσεων για τη σπονδυλική στήλη. Όλο και περισσότερες μελέτες γίνονται στον τομέα αυτό, οι οποίες στοχεύουν στην αντικατάσταση των κλασικών μεθόδων κατασκευής των ορθώσεων από την προηγμένη τεχνολογία της ΑΜ. Βασικός σκοπός των μελετών είναι να αντικατασταθούν οι κλασικοί ορθοπεδικοί νάρθηκες με εξατομικευμένες συσκευές, ώστε να εξαλειφθούν προβλήματα μη-συμβατότητας, περιορισμένης άνεσης και λειτουργικότητας, καθώς και κακής υγιεινής λόγω της συνεχούς χρήσης, τα οποία παρουσιάζονται συχνά [4].

Οι ορθώσεις, γνωστές και ως νάρθηκες, υποστηρίζουν και τροποποιούν τα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος. Ανάλογα με το προσβεβλημένο τμήμα του σώματος, οι ορθώσεις κατηγοριοποιούνται σε ορθώσεις άνω άκρων, ορθώσεις σπονδυλικής στήλης και ορθώσεις κάτω άκρων. Μπορούν να ονομαστούν με βάση τις αρθρώσεις που εμπλέκονται, όπως ορθώσεις καρπού-χεριού (wrist-hand orthoses), οσφυϊκές ορθώσεις (lumbar orthoses) και ορθώσεις αστραγάλου-ποδιού (ankle-foot orthoses). Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται οι ορθώσεις σπονδυλικής στήλης ή διαφορετικά ονομάζονται ορθοπεδικοί κηδεμόνες σπονδυλικής στήλης [4].

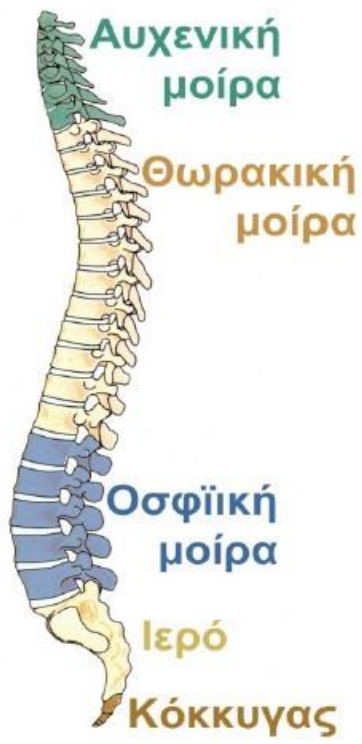
Η ΑΜ χρησιμοποιείται με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς για την κατασκευή κομματιών με βάση τα προσωπικά ιατρικά δεδομένα ενός ατόμου. Στην ιατρική το κύριο πλεονέκτημα που εμφανίζει η ΑΜ είναι η δυνατότητα της να λάβει απευθείας υπόψη της ιατρικά δεδομένα του ασθενούς, έτσι ώστε να εξευρεθούν λύσεις στα αντίστοιχα ιατρικά προβλήματα. Η τεχνολογία αυτή συμβάλλει σημαντικά στην εξατομίκευση ενός μοντέλου, όπως για παράδειγμα, όσον αφορά την σπονδυλική στήλη ενός ατόμου όπου θα αποσαφηνιστεί στο επόμενο κεφάλαιο [4].

Κεφάλαιο 2

2 Σπονδυλική στήλη

Η σπονδυλική στήλη αποτελείται από 33 σπόνδυλους, επτά αυχενικούς, δώδεκα θωρακικούς, πέντε οσφυϊκούς, πέντε ιερούς και τρεις έως τέσσερις κοκκυγικούς. Ένας τυπικός σπόνδυλος αποτελείται από το σπονδυλικό σώμα και το σπονδυλικό τόξο. Το σπονδυλικό σώμα βρίσκεται προς τα εμπρός και είναι αυτό κυρίως που δέχεται το βάρος του σώματος. Το μέγεθος του σπονδυλικού σώματος αυξάνει από την αυχενική προς την οσφυϊκή μοίρα. Το σπονδυλικό τόξο συνδέεται σταθερά με τη πίσω επιφάνεια του σπονδυλικού σώματος [5].

Ανάμεσα στο σπονδυλικό σώμα και το τόξο σχηματίζεται ο σπονδυλικός σωλήνας, ο οποίος περιέχει και προστατεύει το νωτιαίο μυελό. Οι σπόνδυλοι είναι οι οστέινες μονάδες της σπονδυλικής στήλης που της επιτρέπουν συλλογικά να κινείται, ενώ παράλληλα προστατεύουν το νωτιαίο μυελό και τα νεύρα. Παρά το γεγονός ότι το εύρος κίνησης μεταξύ δύο οποιονδήποτε σπονδύλων είναι περιορισμένο, η μεταξύ των σπονδύλων κινητικότητα αθροίζεται κατά μήκος της διαδρομής της σπονδυλικής στήλης [5].



Εικόνα 2 *Σπονδυλική στήλη* [6].

Η σπονδυλική θέση βρίσκεται στο πίσω μέρος του σώματος, σε μέση θέση, και όταν την παρατηρούμε από τα πλάγια εμφανίζει ορισμένες καμπές. Αυτές απορροφούν τους κραδασμούς του σώματος και προστατεύουν τη σπονδυλική στήλη από τραυματισμούς, αυξάνοντας την κινητικότητα και την ικανότητα της σπονδυλικής στήλης να αντέχει τα φορτία [5].

Οι πρωτογενείς καμπές της σπονδυλικής στήλης είναι κοίλες προς τα εμπρός και εντοπίζονται στην θωρακική και την ιερή περιοχή. Οι δευτερογενείς καμπές, είναι κοίλες προς τα πίσω, εντοπίζονται στην αυχενική και οσφυϊκή περιοχή και φέρνουν το κέντρο βαρύτητας στην κατακόρυφη γραμμή. Έτσι επιτρέπει στο βάρος του σώματος να ισορροπεί πάνω στη σπονδυλική στήλη με τρόπο που να απαιτεί την όσο δυνατόν μικρότερη ποσότητα μυϊκής ενέργειας, για τη διατήρηση της όρθιας δίποδης στάσης [5].

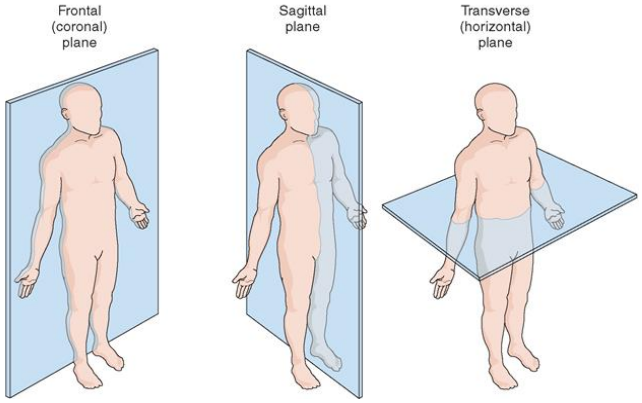
Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της σπονδυλικής στήλης που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι, το φυσιολογικό εύρος της φυσιολογικής αυχενικής λόρδωσης είναι περίπου 30^0-50^0, της θωρακικής κύφωσης 20^0-50^0 και της οσφυϊκής λόρδωσης 30^0-80^0 [5].

Η οπίσθια επιφάνεια του σώματος αποτελείται από τον μυοσκελετικό άξονα στήριξης του κορμού. Τα σκελετικά και μυϊκά στοιχεία στηρίζουν το βάρος του σώματος, μεταδίδουν κινήσεις προς τα κάτω άκρα δια μέσου της πυέλου, υποστηρίζουν και κρατούν το κεφάλι στη θέση του και συγκρατούν τα άνω άκρα, υποβοηθώντας τις κινήσεις τους. Προσδίδεται ευστάθεια, κινητικότητα και προστασία με τη βοήθεια της σπονδυλικής στήλης καθώς και ένα εύρος κινήσεων στο οποίο περιλαμβάνονται η κάμψη, η έκταση, η πλάγια κάμψη και η στροφή [5].

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ο μεσοσπονδύλιος δίσκος, ο οποίος λειτουργεί σαν σύνδεσμος μεταξύ δύο σπονδυλικών σωμάτων και δομείται από τον ινώδη δακτύλιο και τον πηκτοειδή πυρήνα. Ο δίσκος αυτός δίνει ευλυγισία ώστε να επιτρέπει μικρό βαθμό κίνησης ανάμεσα σε κάθε ζεύγος οστών. Είναι ελαστικός για να επιτρέπει κινήσεις αλλά και αρκετά ισχυρός ώστε να κρατά τους σπονδύλους ενωμένους και να αντέχει το βάρος του σώματος. Οι συνεχείς αλλαγές πίεσης που ασκείται στους δίσκους καθώς εκτελούνται οι καθημερινές δραστηριότητες μεταβάλλουν την ποσότητα του υγρού και του υλικού. Την νύχτα κατά τη διάρκεια της ανάπαυσης, χωρίς να ασκείται καμία πίεση στη ράχη, οι δίσκοι απορροφούν ξανά υγρό και θρεπτικά συστατικά. Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν σαν αποσβεστήρες κρούσεων (αμορτισέρ) της σπονδυλικής στήλης [5].

2.1 Παθήσεις της σπονδυλικής στήλης

Η σπονδυλική στήλη είναι ένα πολύπλοκο συγκρότημα οστών (σπονδύλων), νεύρων, συνδέσμων, μυών και αρθρώσεων που λειτουργούν από κοινού για την παροχή στήριξης, σταθερότητας και ευελιξίας. Υπάρχουν διάφορες παθήσεις της σπονδυλικής στήλης, όπου με τον όρο παραμόρφωση της σπονδυλικής στήλης εννοείται η σκολίωση, η κύφωση και η σπονδυλόλυση/σπονδυλολίσθηση. Η παραμόρφωση είναι μια ανωμαλία στις καμπύλες της σπονδυλικής στήλης, όπου προκαλούν σημαντικές μορφολογικές και βιολογικές μεταβολές, συνήθως προκαλείται σοβαρή δυσκαμψία και αλλοιώσεις του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να επηρεάζεται η κίνηση και η στάση του σώματος και να αποτελεί εμπόδιο στις δραστηριότητες της καθημερινής ζωής. Παρακάτω στις επόμενες υποενότητες, θα αναλυθεί η σκολίωση και η κύφωση [5].



Εικόνα 2.1 *Μετωπιαίο-οβελιαίο-οριζόντιο επίπεδο* [7].

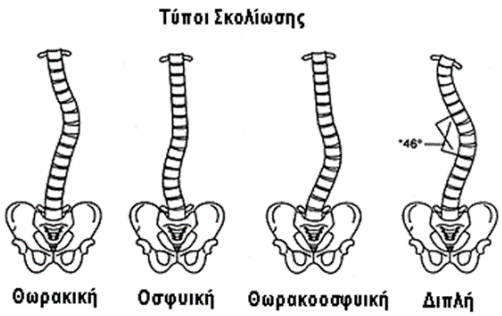
Προτού όμως, να αναφερθούν τα τρία επίπεδα κίνησης στα οποία μελετιούνται οι παραμορφώσεις της σπονδυλικής στήλης. Τα τρία επίπεδα κίνησης είναι το μετωπιαίο, το οβελιαίο και το εγκάρσιο. Μετωπιαίο ή στεφανιαίο, είναι ένα κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται μέσα από το σώμα από το ένα πλάι προς το άλλο και το χωρίζει σε πρόσθιο και οπίσθιο μισό. Οβελιαίο, είναι ένα κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται μέσα από το σώμα από εμπρός προς τα πίσω και το χωρίζει σε δεξιό και αριστερό μισό («μέση γραμμή»). Εγκάρσιο ή οριζόντιο, είναι ένα επίπεδο που διέρχεται οριζόντια μέσα από το σώμα και το χωρίζει σε άνω και κάτω μισό. Αυτά τα επίπεδα ορίζονται με το άτομο να στέκεται όρθιο σε ανατομική θέση, τα τρία βασικά επίπεδα είναι κάθετα μεταξύ τους και διασχίζουν το κέντρο βάρους του σώματος [7].

2.1.1 Σκολίωση

Η διεθνής λέξη Σκολίωση (Scoliosis) προέρχεται από την αρχαία Ελληνική λέξη σκολιός δηλαδή στρεβλός/ στραβός, από το ρήμα σκολιούμαι, δηλαδή παίρνω στραβή πορεία. Σκολίωση είναι μία παθολογική πλάγια κύρτωση της σπονδυλικής στήλης, δεν περιορίζεται μόνο στην δεξιόπλευρη ή αριστερόπλευρη κύρτωση, αλλά συνδυάζεται και με μια ελαφρά στροφή ενός σπονδύλου πάνω σε ένα άλλο. Μία πολύπλοκη τρισδιάστατη στροφική παραμόρφωση της σπονδυλικής στήλης και του κορμού [8,9].

Η σκολίωση είναι μια πάθηση η οποία επιφέρει αλλαγές και στα τρία επίπεδα κίνησης. Προκαλεί ένα πλάγιο κύρτωμα στο μετωπιαίο επίπεδο, μία αξονική στροφή στο οριζόντιο επίπεδο και μία αλλαγή στα φυσιολογικά κυρτώματα του οβελιαίου επιπέδου (κύφωση και λόρδωση). Η σπονδυλική στήλη χάνει το φυσιολογικό σχήμα της και μοιάζει περισσότερο με “C” ή “S” παρά με ευθεία γραμμή όταν παρατηρείται από την οπίσθια όψη. Οι ασθενείς μπορεί να έχουν αναπνευστική δυσλειτουργία, οσφυαλγία και δυσκολίες στην καθημερινότητά τους εάν δεν διορθωθεί η σκολίωση τους [8,9].

Όσον αναφορά τη διάγνωση της σκολίωσης γίνεται αρχικά με κλινική εξέταση. Συγκεκριμένα με την δοκιμασία επίκυψης που είναι δηλαδή κάμψη του κορμού προς τα εμπρός με τα γόνατα σε έκταση, γνωστό ως Adam’s test. Κατ΄ αυτόν το τρόπο μπορεί να διαπιστωθεί αν υπάρχει απόκλιση και στροφή στους σπονδύλους. Η σκολίωση που αφορά την οσφυϊκή μοίρα ή την θωρακο-οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης προκαλεί συνηθώς ασυμμετρία λεκάνης και μέσης. Στη συνέχεια για να επιβεβαιωθεί η διάγνωση, γίνεται ακτινογραφία της σπονδυλικής στήλης από όρθια θέση και μετριέται σε γωνία Cobb. Η γωνία Cobb, αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα της σπονδυλικής στήλης και αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης της σοβαρότητας της



Εικόνα 2.1.1 *Τύποι σκολίωσης* [9].

σκολίωσης. Οι καμπύλες σκολίωσης κατηγοριοποιούνται σε θωρακικές, θωρακο-οσφυϊκές, οσφυϊκές και διπλές (διπλοί συνδυασμοί θωρακικών, θωρακο-οσφυϊκών και οσφυϊκών) [8.9].

Οι συνηθέστεροι τύποι σκολίωσης αναπτύσσονται για άγνωστους λόγους, χαρακτηρίζονται ως ιδιοπαθής και εμφανίζονται συνήθως στην παιδική, εφηβική ή ενήλικη ζωή. Όταν υπάρχει από την γέννηση, γνωστή και ως συγγενής σκολίωση, συνοδεύεται συνήθως και από άλλες αναπτυξιακές ανωμαλίες. Στους πάσχοντες αυτούς υπάρχει στενή σχέση με άλλες δυσπλασίες του θωρακικού τοιχώματος και της ουρογεννετικής οδού, καθώς και με διάφορες καρδιοπάθειες [5].

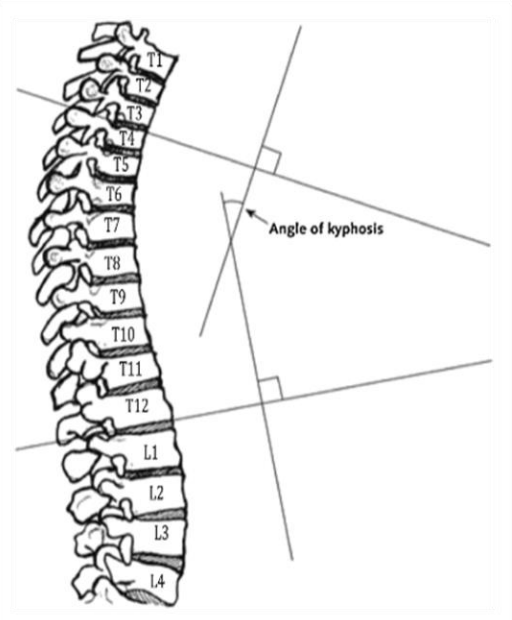
Η ομάδα αυτή πασχόντων χρήζει εκτίμηση από πολλούς ειδικούς. Επίσης η σκολίωση είναι δυνατόν να εκδηλωθεί ως μια κεντρική ή περιφερική νευρολογική διαταραχή, νευροπαθητική σκολίωση, παρατηρείται σε παιδιά με εγκεφαλική παράλυση ή πολιομυελίτιδα. Σπάνια αλλά σημαντική ομάδα σκολίωσης αποτελεί η νευρομυϊκή σκολίωση που προκαλείται από μυϊκή ανωμαλία, για τη διάγνωση της χρειάζεται μυϊκή βιοψία. Άλλες παθήσεις που μπορούν να προκαλέσουν σκολίωση είναι τα οστικά νεοπλάσματα, οι όγκοι του νωτιαίου μυελού και οι εντοπισμένες δισκοκήλες [5].

2.1.2 Κύφωση

Η κύφωση είναι μία ανώμαλη κύρτωση της θωρακικής μοίρας που δημιουργεί υβώδη παραμόρφωση, υπερβολική οπίσθια κύρτωση (καμπούρα). Η κατάσταση αυτή παρατηρείται σε ορισμένες παθολογικές καταστάσεις, από τις οποίες η περισσότερο σοβαρή είναι συνήθως επακόλουθο φυματιώδους προσβολής, που ήταν πολύ διαδεδομένη πριν από την εμφάνιση αντιφυματικών φαρμάκων [5,8].

Η γωνία της κύφωσης μετριέται, όπως και της σκολίωση, με την μέθοδο Cobb. Ο κλινικός έλεγχος περιλαμβάνει την αξιολόγηση της στάσης, το τεστ επίκυψης (Adam's test) και τον έλεγχο της ελαστικότητας της σπονδυλικής στήλης. Στην αξιολόγηση της στάσης, τα άτομα που πάσχουν από κύφωση εμφανίζουν χαλαρή στάση, με τους ώμους σε έσω στροφή, συχνά προτεταμένο το κεφάλι προς τα εμπρός και συνήθως αυξημένη λόρδωση στην μέση [8,9].

Ο ακτινολογικός έλεγχος για την κύφωση περιλαμβάνει μία προφίλ ακτινογραφία, βάση της οποίας μετριέται και η κυφωτική γωνία. Κανονικά η κυφωτική γωνία θα έπρεπε να μετρηθεί ακτινολογικά από τον Θ1 σπόνδυλο έως τον Θ12, όμως επειδή στις ακτινογραφίες ποτέ δεν απεικονίζονται ευκρινώς οι σπόνδυλοι από τον Θ3 και επάνω, έχει καθιερωθεί πως η μέτρηση θα πρέπει να γίνεται από τον Θ3 έως τον Θ12. Η κυφωτική γωνία είναι αυτή που σχηματίζεται από την τομή των κάθετων γραμμών που ξεκινούν από την άνω επιφάνεια του σώματος του Θ3 σπονδύλου και την κάτω επιφάνεια του σώματος του Θ12 σπονδύλου αντίστοιχα [8,9].



Εικόνα 2.1.2 *Μέτρηση της γωνίας Cobb* [9].

Η εύκαμπτη κύφωση μπορεί να διορθωθεί προσωρινά από τον γιατρό ή τον ασθενή κατά τη διάρκεια της εξέτασης. Είναι δυνατόν να έχει δημιουργηθεί από αδυναμία των ραχιαίων μυών ή να είναι αντισταθμιστική σε μεγάλη οσφυϊκή λόρδωση. Οι εύκαμπτες κυφώσεις είναι γενικά ομαλές σε αντίθεση με τις δύσκαμπτες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η νόσος του Scheuermann, η φυματιώδης προσβολής θωρακικού σπονδύλου, η γεροντική κύφωση και άλλες. Ο συνηθέστερος τύπος που συναντάται είναι η κύφωση τύπου Scheuermann, ειδικότερα σε παιδιά στην φάση της ανάπτυξης στην εφηβεία. Η σωστή διάγνωση βασίζεται στον κλινικό και ακτινολογικό έλεγχο. Στην κύφωση τύπου Scheuermann κλινικά παρατηρείται σημαντική δυσκαμψία της σπονδυλικής στήλης [5,8].

2.2 Συντηρητική θεραπεία με κηδεμόνα

Η αντιμετώπιση και η θεραπεία της σπονδυλικής στήλης διαφέρει ανάλογα με τη πάθηση. Κατά τη διάγνωση η θεραπεία μπορεί να είναι είτε συντηρητικής αντιμετώπισης είτε χειρουργικής. Σε κάθε περίπτωση η τακτική παρακολούθηση είναι απαραίτητη [8,10].

Η εφαρμογή κηδεμόνα έχει χρησιμοποιηθεί συχνά ως συντηρητική θεραπεία για την αντιμετώπιση των πιο κοινών παραμορφώσεων της σπονδυλικής στήλης. Οι κηδεμόνες σπονδυλικής στήλης ενδείκνυνται για ασθενείς με σκολίωση, κύφωση, λόρδωση και στροφή των σπονδύλων. Ποικίλλουν τα είδη των κηδεμόνων που χρησιμοποιούνται και διαφοροποιούνται ανάλογα με τη παραμόρφωση. Βασική προϋπόθεση είναι ότι η εφαρμογή ενός κηδεμόνα υφίσταται μέχρι την σκελετική ωρίμανση του ασθενούς [8,10].

Η Scoliosis Research Society (S.R.S.) είναι ένας διεθνής μη κερδοσκοπικός επιστημονικός οργανισμός που ασχολείται με την θεραπεία των παθήσεων της σπονδυλικής στήλης, ιδρύθηκε το 1966 στις Η.Π.Α. Σύμφωνα με τα πρότυπα που έχουν καθοριστεί, οι σημερινοί κηδεμόνες ταξινομούνται ανάλογα με τις περιοχές του σώματος που επηρεάζουν. Τα αρχικά των αγγλικών λέξεων Cervical (αυχενικός), Thoracic (θωρακικός), Lumbar (οσφυϊκός), Sacral (ιερός) και της λέξης Orthosis (κατασκευή & συγκράτηση) σχηματίζουν τα ονόματα των κατηγοριών CTLSO, TLSO, TO και TLO. Με αυτό το τρόπο καθορίζεται το ύψος και η έκταση εφαρμογής και δράσης του κηδεμόνα [8,10].

Ένα άλλος διαχωρισμός που γίνεται είναι ανάλογα με το τρόπο λειτουργίας τους χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στους κηδεμόνες παθητικής και ενεργητικής διόρθωσης [8,10].

- Κηδεμόνες Παθητικής Διόρθωσης, οι διορθώσεις των σπονδυλικών κυρτωμάτων επιτυγχάνονται μόνο με τις δυνάμεις που ασκούνται από το κηδεμόνα προς το σώμα του ασθενούς.
- Κηδεμόνες Ενεργητικής Διόρθωσης, προκαλούνται με τη δραστηριοποίηση ενεργητικών διορθωτικών δυνάμεων από το μυϊκό σύστημα του ίδιου του ασθενή.

Ουσιαστικά ο όρος κηδεμόνας ενεργητικής διόρθωσης εννοεί ότι οι διορθώσεις των παραμορφώσεων γίνονται, σε μεγάλο ποσοστό, με την ενεργοποίηση μυϊκών δυνάμεων τόσο από τον ίδιο τον παθόντα όσο κι αντανακλαστικά από τον ίδιο τον οργανισμό, παράλληλα με όσες προκαλούνται άμεσα απ' τις πιέσεις που εξασκεί το ίδιο το μηχάνημα πάνω στον αξονικό σκελετό. Δεν υπάρχει κηδεμόνας καθαρά ενεργητικής διόρθωσης, χωρίς κάποιο ποσοστό παθητικής διόρθωσης των κυρτωμάτων με δυνάμεις που εξασκούνται άμεσα από τον κηδεμόνα [8,10].

Οι κηδεμόνες διακρίνονται ακόμα σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με το τρόπο που έχουν κατασκευασθεί, αν είναι δηλαδή προκατασκευασμένοι (Prefabricated) ή εξατομικευμένης κατασκευής (Custom made). Μία εξατομικευμένη κατασκευή ενός κηδεμόνα αυξάνει το κόστος παραγωγής και τον απαιτούμενο χρόνο προσαρμογής στις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του κάθε ασθενή [8,10].

Ιστορικά προηγήθηκαν οι εξατομικευμένοι (Custom-made) κηδεμόνες και έπειτα ακολούθησαν οι προκατασκευασμένοι (Prefabricated), με στόχο τη μείωση του κόστους κατασκευής. Στη σημερινή εποχή, η διάκριση μεταξύ των δύο παραπάνω τύπων κηδεμόνα, εξαρτάται από το αν τα κύρια και ουσιαστικά για τη λειτουργία του τμήματα, κατασκευάζονται από την αρχή και ανάλογα με τον κάθε ασθενή ή υπάρχουν προκατασκευασμένα και σε διάφορα μεγέθη για κάθε περίπτωση προς επιλογή και συναρμολόγηση [8,10].

Πέρα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους κηδεμόνες μεταξύ τους, ο κηδεμόνας πρέπει να είναι σχετικά άνετος και να εξασκεί τις πιέσεις που πρέπει χωρίς να προκαλεί πόνο ή να εμποδίζει τις απλές καθημερινές κινήσεις, όπως το βάδισμα ή το κάθισμα. Ακόμα και όταν περιβάλλει και πιέζει τον θώρακα πρέπει να επιτρέπει άνετη αναπνοή. Ο κηδεμόνας είναι η πιο αποτελεσματική μη χειρουργική θεραπεία, σαν πρωταρχικό σκοπό έχει να αποτρέψει την εξέλιξη της παραμόρφωσης. Στη συνέχεια θα αναλυθούν μερικά είδη κηδεμόνων τα οποία έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί [8,10].

2.2.1 Κηδεμόνας Milwaukee

Ο κηδεμόνας Milwaukee είναι τύπου CTLSO, κατασκευάστηκε το 1945 από τον Blount και Schmidt στη πολιτεία των ΗΠΑ, χρησιμοποιήθηκε για μετεγχειρητική αποκατάσταση περιστατικών σκολίωσης μετά από σπονδυλοδεσία και έπειτα ως μέσο συντηρητικής θεραπείας. Είναι σχεδιασμένος ώστε ασκώντας εξωτερική δύναμη στο κορμό του ασθενούς να προκαλεί πιέσεις σε επιλεγμένα σημεία του σώματος με στόχο τη διακοπή ή επιδείνωση μίας σκολιωτικής παραμόρφωσης. Εξαιτίας του μεταλλικού δακτυλίου που εφαρμοζόταν στο λαιμό απορρίφθηκε από ασθενείς και αντικαταστάθηκε από τον υπομασχάλιο κηδεμόνα τύπου Boston [11,12].



Εικόνα 2.2.1 *Milwaukee* [13].

Στη σημερινή μορφή του κηδεμόνα, το πυελικό τμήμα κατασκευάζεται από θερμοπλαστικό υλικό και αποτελεί τη βάση του κηδεμόνα, μπορεί να είναι προκατασκευασμένο σε διάφορα μεγέθη ή εξατομικευμένης κατασκευής μετά τη λήψη εκμαγείου (καλούπι). Οι μεταλλικές ράβδοι είναι δύο πίσω, οι οποίες ισαπέχουν μεταξύ τους, και μία μπροστά, συνδέονται με το πυελικό τμήμα και με τον μεταλλικό δακτύλιο γύρω από το λαιμό. Ο μεταλλικός δακτύλιος εφαρμόζει ακριβώς κάτω από το πηγούνι και σκοπός του είναι να κρατήσει το κεφάλι προς τα πίσω. Τα πίεστρα είναι σταθερά και κινητά, ενώνονται με ιμάντες επάνω στις ράβδους, και έχουν διαφορετικό σχήμα και θέση ανάλογα με το τύπο σκολίωσης του κάθε ασθενούς [11,12].

2.2.2 Κηδεμόνας Boston

Ο υπομασχάλιος κηδεμόνας Boston κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1970 από τον John Hall και Bill Miler στο νοσοκομείο της Βοστώνης, της Μασαχουσέτης. Υπήρξε ο πρώτος κηδεμόνας τύπου TLSO και ήταν η πιο συχνά χρησιμοποιημένη θεραπεία κηδεμόνα για άτομα με σκολίωση. Είναι ανοιχτός στην πλάτη και διορθώνει τη σκολίωση της σπονδυλικής στήλης πιέζοντας τη σπονδυλική στήλη με μικρά επιθέματα. Η αποδοχή λόγω της καλύτερης αισθητικής και η τήρηση του θεραπευτικού προγράμματος είναι οι αιτίες όπου οι θωρακο-οφυιεροί κηδεμόνες TLSO γίνονται περισσότερο αποδοτικοί έναντι των CTLSO κηδεμόνων. Ακόμα ένα πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι ο TLSO κηδεμόνας μπορεί να φορεθεί κάτω από τα ρούχα χωρίς να γίνεται αντιληπτός [14].



Εικόνα 2.2.2 *Κηδεμόνας Boston* [14].

Ο σχεδιασμός του βασίστηκε στην συμμετρία και την ύπαρξη σημείων πίεσης στις κορυφές των υβών, ανάλογα με το τύπο της σκολίωσης. Ο κηδεμόνας Boston έπειτα από τη λήψη γύψινου εκμαγείου του εκάστοτε ασθενούς, στη σημερινή του μορφή κατασκευάζεται από θερμοπλαστικό υλικό συνήθως πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο. Ο κηδεμόνας στην οπίσθια επίπεδη πλευρά του είναι κομμένος κάθετα και τον δένουν τρεις ή τέσσερις οριζόντιοι υφασμάτινοι ιμάντες. Τα εσωτερικά πίεστρα τοποθετούνται στα σημεία των κορυφών των υβών και είναι φτιαγμένα από αφρώδες υποαλλεργικό υλικό όπως το Plastazote [14,15].

Οι διαμορφώσεις των πιέστρων στο εσωτερικό του κηδεμόνα επιτυγχάνουν να αυξάνουν την όρθια θέση της σπονδυλικής στήλης. Η αποτελεσματικότητα του Boston brace στη μείωση της σκολιωτικής καμπύλης ενισχύεται μέσω της χρήσης ενεργητικού και παθητικού μηχανισμούς. Μία λεπτομέρεια που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι εξαιτίας του μήκους του κηδεμόνα, που βρίσκεται μεταξύ της ωμοπλάτης και της κάτω γλουτιαίας περιοχής, δεν συνιστάται να χρησιμοποιείται για πολύ υψηλή καμπύλη παραμόρφωσης (καμπύλη μεγαλύτερη από 40 μοίρες). Οι κηδεμόνες TLSO έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν τον κίνδυνο εξέλιξης της καμπύλης παραμόρφωσης και μπορούν να προστατεύσουν τους ασθενείς από την ανάγκη χειρουργικής επέμβασης [14,15].

2.2.3 Κηδεμόνας DDB

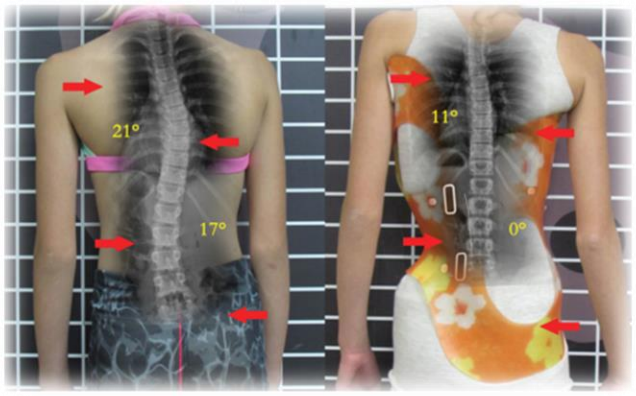
Ο Δυναμικός Αντιστροφικός Κηδεμόνας DDB (Dynamic Derotation Brace) είναι η εξέλιξη του κηδεμόνα Boston και ανήκει στην κατηγορία των υπομασχάλιων TLSO κηδεμόνων. Σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1980 στην Ελλάδα από χειρουργούς της Μονάδας Σκολίωσης και Σπονδυλικής Στήλης του Ορθοπεδικού Νοσοκομείου «ΚΑΤ» στην Αθήνα και θεωρείται ο πιο δημοφιλής τύπος κηδεμόνα συντηρητικής θεραπείας ιδιοπαθούς σκολίωσης σε Ελλάδα και Κύπρο. Η κύρια διαφορά του DDB κηδεμόνα είναι η τοποθέτηση ελασμάτων από αλουμίνιο στην πίσω πλευρά του κηδεμόνα με αντιστροφική (derotation) δράση [16].



Εικόνα 2.2.3 *Κηδεμόνας DDB* [16].

Η δράση του DDB (Dynamic Derotation Brace) βασίζεται τόσο στην διόρθωση των κυρτωμάτων όσο και των στροφικών παραμορφώσεων της θωρακοοσφυϊκής μοίρας. Το κύριο μέρος του κηδεμόνα κατασκευάζεται από πολυβινυλοχλωρίδιο PVC (polyvinylchloride) πάχους 3 mm, με εσωτερική επένδυση από plastazote. Ανοίγει στο πίσω μέρος και στερεώνεται με τρεις ή τέσσερις ιμάντες. Ανάλογα με τη πάθηση και με το σημείο που χρειάζεται να ασκείται η πίεση από το κηδεμόνα τοποθετούνται και οι μεταλλικές ράβδοι από αλουμίνιο (ημιάκαμπτο κράμα αλουμινίου) [16].

2.2.4 Κηδεμόνας Chêneau & Rigo Chêneau



Εικόνα 2.2.4 *Κηδεμόνας Rigo-Cheneau* [17].

Ο κηδεμόνας, ο οποίος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Dr. Jacques Chêneau (Toulouse) και τον καθηγητή Matthias (Münster) το 1979 στη Γαλλία, ονομάστηκε αρχικά Chêneau-Toulouse-Münster (CTM) αλλά το "Chêneau brace" επικράτησε ως κοινό όνομα στον υπόλοιπο κόσμο. Είναι κηδεμόνας τύπου TLSO και τον χαρακτηρίζει ότι είναι ασύμμετρος. Το στήριγμα του κηδεμόνα είναι κατασκευασμένο από θερμοπλαστικό υλικό όπως το πολυπροπυλένιο, και το άνοιγμά του είναι πρόσθιο και συγκρατείται με ιμάντες Velcro. Οι περιοχές των μαξιλαριών εντοπίστηκαν, διαμορφώθηκαν και προσανατολίστηκαν ώστε να παρέχουν ένα συνδυασμένο αποτέλεσμα εκτροπής-παρέκκλισης. Ο αρχικός μηχανισμός που πρότεινε ο Chêneau ήταν η δημιουργία μιας ισχυρής περιοχής πίεσης μαξιλαριού στο μπροστινό μέρος του στέρνου στο επίπεδο του ύβου, αφήνοντας χώρο στην πλάτη για να διορθωθεί η παραμόρφωση στην θωρακική μοίρα της σπονδυλικής στήλης [17,18,19].

Ο κηδεμόνας Rigo Cheneau βασίζεται στον κηδεμόνα Cheneau, κατασκευάστηκε τη δεκαετία του ‘90, είναι ασύμμετρος κηδεμόνας και εξίσου λειτουργικός εφόσον δένει πρόσθια, παρέχει ατομική θεραπεία σε τρισδιάστατο επίπεδο με στόχο την επιμήκυνση της σπονδυλικής στήλης. Ο κηδεμόνας τύπου TLSO Rigo-Chêneau είναι μια διορθωτική συσκευή κατασκευασμένη για να φέρει τον κορμό και τη σπονδυλική στήλη στην καλύτερη δυνατή διορθωμένη ευθυγράμμιση χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό δυνάμεων που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του κορμού από ειδικά σχεδιασμένα μαξιλαράκια, όπου η δράση τους διευκολύνεται από χώρους διαφυγής. Όλα τα επιθέματα είναι τοποθετημένα, διαμορφωμένα και προσανατολισμένα με πολύ συγκεκριμένο τρόπο ώστε να πιέζουν επιλεγμένες περιοχές του κορμού για να φέρουν τον ασθενή στην καλύτερη δυνατή 3D διόρθωση, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές δεν αγγίζονται από τον κηδεμόνα, δηλαδή περιοχές “εκτόνωσης”. Η διορθωτική αντίδραση του σώματος εξαρτάται από το επίπεδο, το σχήμα και τον προσανατολισμό των μαξιλαριών [17,18,19].

2.2.5 Άλλοι κηδεμόνες

Εκτός από τα είδη που αναφέρθηκαν, που ανήκουν στην κατηγορία των πλαστικών ή άκαμπτων κηδεμόνων και είναι προκατασκευασμένοι ή εξατομικευμένες κατασκευές, χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός από κηδεμόνες. Οι κηδεμόνες Charleston και Providence είναι κηδεμόνες νυχτερινής θεραπείας (nighttime brace) τους χαρακτηρίζει το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται μόνο κατά τη διάρκεια του ύπνου. Ακόμα μία κατηγορία αποτελούν οι μαλακοί ή δυναμικοί κηδεμόνες που είναι έτοιμες κατασκευές σε διάφορα μεγέθη με πολύ μικρότερο κόστος κατασκευής. Ένα παράδειγμα μαλακού κηδεμόνα είναι ο TriaC, αναπτύχθηκε στην Ολλανδία και το όνομα του παραπέμπει στα αρχικά των λέξεων Comfort (άνεση), Control (έλεγχος) και Cosmesis (αισθητική) [19,20].

Η αποτελεσματικότητα κατά τη διάρκεια εφαρμογής ενός κηδεμόνα εξαρτάται από τους μηχανισμούς διόρθωσης τον κυρτωμάτων και τον τρόπο κατασκευής του κηδεμόνα. Η πλειοψηφία σχεδόν που τοποθετούνται για την αντιμετώπιση των παραμορφώσεων της σπονδυλικής στήλης βασίζεται στην αρχή πιέσεως των τριών σημείων. Είτε πλάγια αριστερά ή δεξιά για την διόρθωση της σκολίωσης, είτε πρόσθιο-οπίσθια για την κύφωση. Επιλέγονται τα σωστά σημεία και τοποθετούνται ειδικά πίεστρα από μαλακό υλικό. Ο κηδεμόνας είναι προτιμότερο να είναι εξατομικευμένης κατασκευής, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλή στήριξη στις λαγόνιες ακρολοφίες και η ακριβής εφαρμογή του. Στις υποενότητες που θα ακολουθήσουν θα περιγραφεί η συμβατική και η σύγχρονη κατασκευή ενός κηδεμόνα [19,20].

2.2.6 Συμβατική μέθοδος κατασκευής κηδεμόνα

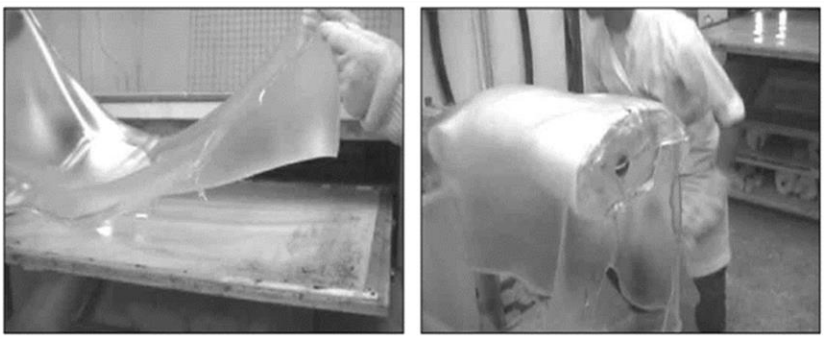
Η παραδοσιακή μέθοδος κατασκευής ενός άκαμπτου κηδεμόνα περιλαμβάνει τη λήψη εκμαγείου (καλούπι) από το κορμό του ασθενούς. Για να κατασκευασθεί το εκμαγείο σύμφωνα με το μοτίβο της καμπύλης της σπονδυλικής στήλης του ασθενούς τύλιγαν το σώμα με επιδέσμους γύψου, η διαδικασία αυτή γινόταν σε ειδικό κρεβάτι ανάταξης. Στη συνέχεια για τη δημιουργία του εκμαγείου γέμιζαν το εσωτερικό του με γύψο, έπειτα ακολουθούσε χειρονακτική επεξεργασία του καλουπιού. Οι απαιτούμενες διορθώσεις για να δημιουργηθεί το τελικό εκμαγείο, γινόταν με αφαίρεση και προσθήκη γύψου σε συγκεκριμένες περιοχές. Αυτή η χειροκίνητη τεχνική απαιτεί χρόνο, κατανάλωση υλικού και παρουσιάζει άλλοτε χαμηλή ακρίβεια [21,22].



Εικόνα 2.2.6 *Εκμαγείο γύψου* [21].

Ως επακόλουθο για τη διαδικασία παραγωγής ενός ορθοπεδικού κηδεμόνα απαιτείται η εισαγωγή ενός θερμοπλαστικού φύλλου σε ειδικό φούρνο υψηλών θερμοκρασιών (>180 ^{O}C). Το υλικό αποσπάται από το φούρνο και παρατηρείται πόσο εύκαμπτο είναι. Αυτό συμβαίνει διότι έχει αποκτήσει όλες τις ιδιότητες της πλαστικής παραμόρφωσης. Τοποθετείται επάνω στο εκμαγείο με κατάλληλους χειρισμούς πίεσης από τον ορθωτικό. Με αποτέλεσμα το θερμοπλαστικό να σταθεροποιείται στο τελικό του σχήμα. Έπειτα θα κοπεί η απαιτούμενη γραμμή κοπής και οι ιμάντες συγκράτησης θα στερεωθούν στον κηδεμόνα. Εσωτερικά του κηδεμόνα, σε αντιστοιχία με τους ύβους τοποθετούνται τα πίεστρα [21,22].

Η κύρια ιδιότητα των θερμοπλαστικών υλικών είναι ότι όταν το υλικό θερμανθεί, όποια δύναμη του ασκείται μπορεί να το παραμορφώσει προσωρινά, (ελαστική παραμόρφωση). Στη συνέχει μόλις ψυχθεί μετατρέπεται και πάλι σε στερεό (πλαστική παραμόρφωση). Τα θερμοπλαστικά υλικά με τα οποία κατασκευάζονται οι κηδεμόνες είναι το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο [23].



Εικόνα 2.2.6.1 *Διαδικασία παραγωγής κηδεμόνα* [24].

Επομένως, η εμπειρία και η τεχνογνωσία του ορθωτικού είναι βασικοί παράγοντες για την αποτελεσματικότητα της θεραπείας στην συμβατική μέθοδο. Στην συμβατική μέθοδο έχουν εντοπιστεί ορισμένα μειονεκτήματα, όπως ότι απαιτείται μεγάλος χρόνος κυρίως για την λήψη του εκμαγείου και της διαδικασίας διόρθωσης του γύψου, αλλά και της κατασκευής του κηδεμόνα. Ο ευρύς όγκος κατανάλωσης υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για να κατασκευασθεί το καλούπι του ασθενούς, είναι από τα κύρια μειονεκτήματα, εφόσον έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας το εκμαγείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περεταίρω. Επίσης, η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για τη λήψη του εκμαγείου μπορεί να χαρακτηριστεί δυσμενής και να επηρεάσει αρνητικά την ψυχολογία του ασθενή. Με τη συμβατική μέθοδο συνεπάγεται, μη καταγραφεί των δεδομένων γεωμετρίας του σώματος του ασθενούς για μελλοντική χρήση και σχετικά χαμηλή κατασκευαστική ακρίβεια [21,22].

2.2.7 Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία CAD/CAM

Για δεκαετίες ο συμβατικός τρόπος για να κατασκευαστεί ένας κηδεμόνας ήταν με γύψο, περιλαμβάνοντας μία σειρά από χειροκίνητα και εμπειρικά βήματα που βασίζονται στην εμπειρία και τη γνώση του ορθωτικού (orthotist). Σήμερα, η τεχνολογική επανάσταση δίνει τη δυνατότητα να αποκατασταθεί ο τρόπος κατασκευής ενός κηδεμόνα με προηγμένες τεχνικές, όπου στόχο έχουν τη βελτίωση του σχεδιασμού, της κατασκευής και της ποιότητας του κηδεμόνα. Αυτό έχει επιτευχθεί με την εξέλιξη της τεχνολογίας CAD/CAM η οποία προέκυψε ως αποτέλεσμα της εξέλιξης των Η/Υ. Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και η μείωση του κόστους μαζικής μνήμης των Η/Υ "άνοιξαν το δρόμο" για την επεξεργασία του όγκου δεδομένων που απαιτούν τα σύγχρονα μοντέλα CAD [3,25].

Η σχεδίαση με την βοήθεια Η/Υ CAD (Computer Aided Design) και η παραγωγή με τη βοήθεια Η/Υ CAM (Computer Aided Manufacturing) είναι δύο όροι με τους οποίους χαρακτηρίζονται τα συστήματα σχεδιομελέτης και παραγωγής. Σκοπός της χρήσης CAD/CAM είναι η δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου, όπου στοχεύει στη βελτιστοποίηση της μορφής, της διάταξης, της απόδοσης και της παραγωγής του προϊόντος. Η ανάπτυξη των συστημάτων σχεδιομελέτης και παραγωγής με χρήση Η/Υ, CAD/CAM άρχισε τη δεκαετία του 1970 στη βιομηχανία. Ωστόσο, το πρώτο σύστημα CAD/CAM για προσθετικά μέλη και ορθοπεδικά είδη (orthotics) αναπτύχθηκε το 1979, από τον James Foort και την ερευνητική του ομάδα στο Πανεπιστήμιο της Βρετανικής Κολομβίας [3,25].

Ένα σύστημα CAD/CAM για να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός κηδεμόνα αποτελείται από τρεις βασικές μονάδες. Η πρώτη είναι το laser scan, το οποίο μετατρέπει τις τρισδιάστατες πληροφορίες του σώματος σε αρχείο δεδομένων ψηφιακής μορφής. Η δεύτερη μονάδα είναι ο ηλεκτρονικός υπολογιστή που χρησιμοποιείται για τη λήψη ενός αρχείου, τον χειρισμό της εικόνας στην οθόνη, και για να επιτρέπει σε ορθωτικούς και προσθετολόγους να σχεδιάσουν εισάγοντας δεδομένα. Τέλος, η τρίτη μονάδα είναι η εργαλειομηχανή (milling machine) που λαμβάνει το διορθωμένο αρχείο από τον Η/Υ και αναπαράγει το τρισδιάστατο μοντέλο, δηλαδή το εκμαγείο του κηδεμόνα [3,21,22,25].

Στην περίπτωση να ξεκινήσει η διαδικασία από πραγματικό πρωτότυπο, όπως είναι η κατασκευή ενός ορθοπεδικού κηδεμόνα χρησιμοποιείται η τυπική μεθοδολογία αντιστροφής μηχανικής (reverse engineering). Το πρωτότυπο, δηλαδή η εξωτερική γεωμετρία του κορμού του ασθενούς, σαρώνεται από 3D σαρωτή και τα αποτελέσματα είναι ένα νέφος σημείων (point cloud), το οποίο πρέπει να απαλλαχθεί από δεδομένα που δεν ανήκουν στο μοντέλο, να επεξεργαστούν και μετά από μια σειρά από σαρώσεις και επεξεργασία των νεφών σημείων δημιουργείται το πολυγωνικό μοντέλο. Το πολυγωνικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε διάφορες εφαρμογές ή μπορεί να μετατραπεί σε μοντέλο βασισμένο σε επιφάνειες, το οποίο μπορεί να εισαχθεί σε ένα σύστημα σχεδιομελέτης [3,21,22,25].

Η αντίστροφη μηχανική είναι μέρος των συστημάτων σχεδιομελέτης, αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικευμένα προγράμματα λογισμικού για διάφορες εφαρμογές, ειδικά για την περίπτωση πολύπλοκων και οργανικών μορφών. Το λογισμικό CAD, για την προετοιμασία ενός εξατομικευμένου κηδεμόνα, δίνει τη δυνατότητα καταγραφής του σκελετού της σπονδυλικής στήλης και του εξωτερικού κορμού, δηλαδή μπορεί να ενσωματωθεί η ακτινογραφία στο σκαναρισμένο σώμα [3,21,22,25].

Οι διορθώσεις που πραγματοποιούνται στο εικονικό μοντέλο του εκμαγείου επιδιώκεται να είναι ακριβείς για το καλύτερο αποτέλεσμα. Η βάση στήριξης του κηδεμόνα διαμορφώνεται από την περιοχή των λαγονίων οστών, δημιουργώντας ισορροπία και από τις δύο μεριές ώστε να είναι εφικτές οι περιστροφικές κινήσεις. Συνεχίζονται οι διορθώσεις, δίνοντας τις πιέσεις και τις αντιστροφές, έχοντας δώσει χώρο για τις εκτονώσεις των πιέσεων όπου αυτό απαιτείται. Τοποθετείται πάλι η ακτινογραφία για να ελεγχθεί αν είναι ακριβείς το αποτέλεσμα ή χρειάζονται περαιτέρω ρυθμίσεις. Το επόμενο βασικό βήμα είναι η επιμήκυνση, διότι στη διαδικασία διόρθωσης των παραμορφώσεων της σπονδυλικής στήλης, ο ανθρώπινος σκελετός "κερδίζει" στο ύψος του [3,21,22,25].

Το μοντέλο που έχει προκύψει αντιπροσωπεύει το εκμαγείο του κηδεμόνα, το οποίο μπορεί να εξαχθεί ως αρχείο STL. Σχεδόν όλες οι μηχανές CNC δέχονται ως δεδομένα αρχεία της μορφής STL. Το τρισδιάστατο ψηφιακό εκμαγείο μπορεί να κατασκευασθεί με ακρίβεια χιλιοστού σε οποιαδήποτε εργαλειομηχανή ψηφιακής καθοδήγησης CNC (Computer Numerical Control). Η κατεργασία για να δημιουργηθεί η μορφή του καλουπιού λαμβάνει χώρα από ένα κομμάτι αφρού πολυουρεθάνης PU (polyurethane). Η κατασκευή του κηδεμόνα ολοκληρώνεται με την τεχνική κενό αέρος (vacuuming), ένα κομμάτι θερμοπλαστικό, πολυαιθυλένιο PE (polyethylene) ή πολυπροπυλένιο PP (polypropylene) που προσαρμόζεται στο εκμαγείο. Έχοντας πλέον σταθεροποιηθεί στο τελικό του σχήμα. Ακολουθεί η κοπή του κηδεμόνα από το μοντέλο αφρού και ορισμένα βήματα φινιρίσματος. Το χρησιμοποιημένο σώμα αφρού PU παραμένει ως απόβλητο ή υπόκειται σε ανακύκλωση [3,21,22,25].

Οι μέθοδοι CAD/CAM έχουν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό και την κατασκευή κηδεμόνων με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του σχεδιασμού και της απόδοσης εξαλείφοντας τα μειονεκτήματα της συμβατικής μεθόδου. Η χρήση των μεθόδων CAD/CAM όχι μόνο μειώνει τον χρόνο κατασκευής στο ένα τρίτο αυτού της συμβατικής μεθόδου, αλλά βοηθά επίσης στην τυποποίηση της διαδικασίας κατασκευής και προάγει την ακρίβεια. Σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο, οι προηγμένες μέθοδοι κατασκευής στηριγμάτων βασίζονται σε μικρότερο βαθμό στην τεχνογνωσία του ορθωτικού. Στη συνέχεια θα περιγραφεί η κατασκευή ενός κηδεμόνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method) [3,21,22,25].

2.2.8 Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία CAD/FEM

Σήμερα με όλα τα τεχνολογικά επιτεύγματα που κυριαρχούν, όταν πρόκειται να κατασκευασθεί ένα προϊόν είναι αρχικά απαραίτητη η κατασκευή μοντέλου του προϊόντος, το οποίο υποβάλλεται σε διάφορες δοκιμασίες που αποτελούν προσομοιώσεις των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και μελετώντας της συμπεριφορά του εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση του. Οι προσεγγιστικές μέθοδοι, και σε αυτή τη τεχνολογία όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ευδοκίμησαν όταν οι Η/Υ απέκτησαν σημαντική υπολογιστική ισχύ, έτσι αναπτύχθηκε ο κλάδος της μηχανικής των συστημάτων ανάλυσης και προσομοίωσης CAE (Computer Aided Engineering). Από τις προσεγγιστικές μεθόδους ξεχώρισε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Modeling), κατά την οποία στο κύκλο ανάλυσης χρησιμοποιούνται εργαλεία για ανάλυση συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας [3].

Λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών υπάρχει η δυνατότητα της κατασκευής εικονικών μοντέλων αλλά και η προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας τους με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Όταν τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Modeling) χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδιασμού, μειώνουν τη λήψη τυχαίων αποφάσεων και αυξάνουν την αποτελεσματικότητα του κηδεμόνα. Οι τεχνικές προσομοίωσης, όπως το FEM, παρέχουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της κλινικής αποτελεσματικότητας των θεραπειών με κηδεμόνες. Οι τεχνικές προσομοίωσης εξετάζουν την αλληλεπίδραση τριών κύριων γεωμετριών, του σκελετού, της επιφάνειας του κορμού και του κηδεμόνα. Η σημασία των τεχνικών προσομοίωσης έγκειται στη μέτρηση της αλληλεπίδρασης κορμού-κηδεμόνα, η οποία είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό εξατομικευμένων κηδεμόνων [21,22,25].

Η σκελετική γεωμετρία, λαμβάνεται από διπλή ακτινογραφία (οπίσθια, πρόσθια και πλάγια όψη), η εξωτερική γεωμετρία του κορμού ανακατασκευάζεται με τη χρήση μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης (3D Scanning), έτσι ώστε τα δεδομένα του ασθενούς εξάγονται σε Η/Υ όπου δημιουργείται το μοντέλο του κηδεμόνα με χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design), για την προετοιμασία ενός εξατομικευμένου FEM. Κατά τη διαδικασία προσομοίωσης υπολογίζονται κλινικοί δείκτες, συγκεκριμένα, οι παραμορφώσεις

της επιφάνειας του κορμού και η καμπυλότητα της σπονδυλικής στήλης, οι γεωμετρικές ιδιότητες του κηδεμόνα, η γραμμή περικοπής του νάρθηκα, η περιοχή ανοίγματος, οι αριθμοί των ιμάντων και ο προσανατολισμός των πιέσεων [21,22,25].

Η διαδικασία τροποποίησης ενός μοντέλου κηδεμόνα επαναλαμβάνεται για τη βελτίωση των κλινικών δεικτών. Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός του στηρίγματος που θεωρείται ότι έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη διόρθωση καμπύλης επιλέγεται ώστε να δημιουργηθεί το καλούπι από μια μηχανή φρεζαρίσματος που θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη θερμοδιαμόρφωση του κηδεμόνα. Η διαδικασία παραγωγής με χρήση συστημάτων CAD/FEM σκοπεύει να βελτιστοποιήσει τη θέση και το μέγεθος της πίεσης που ασκείται από τα επιθέματα, για να βελτιώσουν τη διόρθωση της καμπύλης και να μειώσουν το υλικό του κηδεμόνα για ελαφρύτερο και λεπτότερο στήριγμα [21,22,25].

Ωστόσο, σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο που στηριζόταν κυρίως στην τεχνογνωσία του ορθωτικού, οι προηγμένες μέθοδοι κατασκευής κηδεμόνων βασίζονται στον εφαρμοσμένο αλγόριθμο FEM, εστιάζοντας στην ποιότητα του κηδεμόνα και στα χαρακτηριστικά των επιθεμάτων πίεσης. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζεται με σχεδιασμό και σύστημα κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή CAD/CAM, FEM επιτρέποντας την προσομοίωση, τη διόρθωση του κηδεμόνα καθώς και τον υπολογισμό των εφαρμοζόμενων πιέσεων. Η κατασκευή κηδεμόνα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο CAD/FEM έχει αποδειχθεί ότι εξοικονομεί περίπου το ήμισυ του χρόνου που καταναλώνεται στη συμβατική μέθοδο [21,22,25].

2.2.9 Μέθοδος κατασκευής FEM σε συνδυασμό με Topology Optimization

Η Δομική Βελτιστοποίηση (Structural Optimization) αντικατέστησε την εμπειρική και επαναληπτική βελτίωση του σχεδιασμού με το χέρι με μία συστηματική διαδικασία που βασίζεται στη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η φιλοσοφία των μεθόδων βελτιστοποίησης επιδιώκει τη βέλτιστη σχεδιαστική λύση για τη δημιουργία ελαφρύτερων κατασκευών ικανοποιώντας παράλληλα κριτήρια όπως η αντοχή και η λειτουργικότητα. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης σχετικά με τον σχεδιασμό, βελτιστοποίηση μεγέθους (Size Optimization), σχήματος (Shape Optimization) και τοπολογίας (Topology Optimization) [26,27,28].

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization) είναι ο πιο κοινός τύπος δομικής βελτιστοποίησης (Structural Optimization), χρησιμοποιείται στην αρχική φάση του σχεδιασμού για την πρόβλεψη της βέλτιστης κατανομής υλικού μιας κατασκευής και λαμβάνει υπόψη τις λειτουργικές προδιαγραφές και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς. Ωστόσο, στη πιο δημοφιλή μέθοδο τοπολογικής βελτιστοποίησης συγκαταλέγεται η μέθοδος SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), μεταφράζεται ως μέθοδος Στερεού Ισοτροπικού Υλικού με Ποινικοποίηση για ενδιάμεσες πυκνότητες υλικού και αναπτύχθηκε από τους Bendsoe and Kikuchi (1988) και Rozvany and Zhou (1992) [26,27,28].

Η βασική ιδέα είναι να προβλεφθεί η βέλτιστη κατανομή υλικού εντός ενός δεδομένου σχεδιαστικού χώρου, για δεδομένες περιπτώσεις φορτίου, οριακές συνθήκες, περιορισμούς κατασκευής και απαιτήσεις απόδοσης. Η παραδοσιακή προσέγγιση στη τοπολογική βελτιστοποίηση είναι η διακριτοποίηση (mesh) ενός τομέα σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζονται ισότροπες στερεές μικροδομές. Κάθε στοιχείο είτε είναι γεμάτο με υλικό για περιοχές που απαιτούν υλικό, είτε αδειάζει από υλικό για περιοχές όπου μπορεί να αφαιρεθεί υλικό δηλαδή αντιπροσωπεύει κενά. Η κατανομή πυκνότητας του υλικού εντός ενός τομέα σχεδίασης, συμβολίζεται με ρ, είναι διακριτή και σε κάθε στοιχείο εκχωρείται μια δυαδική τιμή, $\rho = 1$ όπου απαιτείται υλικό (μαύρο) και $\rho = 0$ όπου αφαιρείται το υλικό (λευκό) [26,27,28].

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization) είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης σχήματος που χρησιμοποιεί αλγοριθμικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση της διάταξης του υλικού εντός ενός χώρου που ορίζεται από τον χρήστη για ένα δεδομένο σύνολο φορτίων, συνθηκών και περιορισμών. Η τοπολογική βελτιστοποίηση μεγιστοποιεί την απόδοση και την αποδοτικότητα του σχεδιασμού αφαιρώντας το περιττό υλικό από περιοχές που δεν χρειάζεται να φέρουν σημαντικά φορτία για τη μείωση του βάρους ή την επίλυση προκλήσεων σχεδιασμού όπως η μείωση του συντονισμού ή της θερμικής καταπόνησης. Τα σχέδια που παράγονται με τοπολογική βελτιστοποίηση συχνά περιλαμβάνουν ελεύθερες μορφές και περίπλοκα σχήματα που είναι πολύπλοκα ή αδύνατο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Ωστόσο, τα

σχέδια της τοπολογικής βελτιστοποίησης ταιριάζουν απόλυτα με διαδικασίες προσθετικής κατασκευής AM (Additive Manufacturing) που έχουν πιο επιεικούς κανόνες σχεδιασμού και μπορούν εύκολα να αναπαράγουν πολύπλοκα σχήματα χωρίς πρόσθετο κόστος όπως αναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο [26,27,28].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι κηδεμόνες σπονδυλικής στήλης διατίθενται για την διόρθωση της εφηβικής ιδιοπαθής σκολίωσης και την πρόληψη της εξέλιξης της καμπύλης. Παρά την αποτελεσματικότητα στην θεραπεία και την πρόληψη της σκολιωτικής παραμόρφωσης που έχει σημειωθεί ανά έτη, αρκετές φορές σε κλινικό περιβάλλον, οι ασθενείς συνήθως νιώθουν άβολα, υπέρβαροι και ογκώδεις όταν φορούν τον κηδεμόνα. Η λειτουργική δυσφορία εξαιτίας του όγκου μπορεί να μειώσει τη θέληση του ασθενούς να πραγματοποιήσει τη θεραπεία φορώντας το στήριγμα. Επομένως σήμερα, με τη βοήθεια της τοπολογικής βελτιστοποίησης (topology optimization) αφαιρώντας το περιττό υλικό από το κηδεμόνα τον καθιστά εξίσου λειτουργικό, χωρίς να επηρεάζει το διορθωτικό αποτέλεσμα [29].

Για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του κηδεμόνα, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που εφαρμόζουν αισθητήρα πίεσης για τη μέτρηση των πιέσεων μεταξύ του κηδεμόνα και του κορμού, καθώς και τη μέτρηση της τάσης του ιμάντα. Αυτό συμβαίνει για να εκτιμηθεί η διορθωτική επίδραση του κηδεμόνα, τα σημεία δηλαδή που ασκούν περισσότερη πίεση στη σπονδυλική στήλη. Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Modeling) για να μιμηθεί το διορθωτικό αποτέλεσμα του κηδεμόνα όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη υποενότητα [29].

Με τη βοήθεια της μεθόδου FEM, ένα μοντέλο προσομοίωσης, δείχνει τις τρισδιάστατες παραμορφώσεις και αξιολογεί τις θέσεις των επιθεμάτων πίεσης που ασκούνται στην σπονδυλική στήλη. Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τοπολογική βελτιστοποίηση επιτυγχάνει τον επανασχεδιασμό του κηδεμόνα σπονδυλικής στήλης αφαιρώντας τη περιττή κατανομή υλικού [29].

Ο κηδεμόνας Boston, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται ευρέως ως συντηρητική θεραπεία σε περιπτώσεις σκολίωσης στην σπονδυλική στήλη προκειμένου να αποτραπεί η εξέλιξη της καμπύλης. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στο διορθωτικό αποτέλεσμα, την πίεση επαφής μεταξύ κορμού και κηδεμόνα, και την ένταση των ιμάντων. Υπάρχουν λίγες διαθέσιμες πληροφορίες για την τροποποίηση του κηδεμόνα όσον αναφορά το βάρος του. Ύστερα από μελέτη που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε ότι περίπου το 50% του συνόλου του κηδεμόνα είναι περιττό υλικό. Ωστόσο, προκειμένου να τροποποιηθεί και να κατασκευασθεί το στήριγμα βολικά, αυτή η μελέτη αφαίρεσε υλικό μόνο στο μπροστινό μέρος και στην άνω-πλάγια πλευρά διότι τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης έδειξαν ότι το πλεόνασμα υλικού εντοπίστηκε σε αυτές τις περιοχές. Αντίθετα, περιττό υλικό μέσα στο κηδεμόνα δεν αφαιρέθηκε λόγω δυσκολιών στην κατασκευή [29].

Από εμβιομηχανική άποψη, μία σκολιωτική παραμόρφωση σπονδυλικής στήλης παρουσιάζει μεγαλύτερη παραμόρφωση στο στεφανιαίο επίπεδο. Επομένως, οι πλευρικές δυνάμεις που δημιουργούνται από το στήριγμα είναι αρκετά σημαντικές. Αντίθετα, οι προσθιοπίσθιες δυνάμεις στο οβελιαίο επίπεδο δεν είναι τόσο σημαντικές. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης καθόρισαν ότι το μεγαλύτερο μέρος υλικού που μπορούσε να αφαιρεθεί χωρίς καμία απώλεια της διορθωτικής δράσης του κηδεμόνα βρισκόταν στο μπροστινό μέρος και λιγότερο περιττό υλικό βρισκόταν στην πλάγια πλευρά [29].

Κλινικά παρατηρείται ότι οι ασθενείς σπάνια βιώνουν πληγές ή έλκος που προκαλούνται από τις πιέσεις του κηδεμόνα Boston. Πιθανώς αυτό συμβαίνει επειδή η πίεση επαφής μπορεί να εκτονωθεί κατά διαστήματα με την κίνηση του κορμού. Αντίθετα, τα περισσότερα προβλήματα όσον αφορά το κηδεμόνα εστιάζονται στον όγκο του και τη δυσφορία που προκαλεί. Συνεπώς, ο ελαφρύτερος κηδεμόνας θα πρέπει να κάνει τον ασθενή να αισθάνεται πιο άνετα, ειδικά όταν φοράει το στήριγμα για εκτεταμένο διάστημα, πετυχαίνοντας το ίδιο διορθωτικό αποτέλεσμα. Προκειμένου να μειωθεί το βάρος του κηδεμόνα και να εκτιμηθεί η διορθωτική του επίδραση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEM σε συνδυασμό με τοπολογική βελτιστοποίηση για επανασχεδιασμό του κηδεμόνα. Η θεωρία της τοπολογικής βελτιστοποίησης επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει το βάρος του χωρίς καμία απώλεια του διορθωτικού αποτελέσματος [29].

2.2.10 Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία Additive Manufacturing

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής έχει συμβάλλει σημαντικά σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα ιατρικών εφαρμογών για την κατασκευή κομματιών με βάση τα προσωπικά ιατρικά δεδομένα ενός ατόμου, όπως αναλύθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο. Οι διαδικασίες παραγωγής ενός εξατομικευμένου ορθοπεδικού κηδεμόνα που χρησιμοποιούν τη τεχνολογία AM (Additive Manufacturing) παρουσιάζουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη μελέτη της χρήσης εναλλακτικών υλικών, για τη βελτίωση της λειτουργικότητας και τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Περιορισμοί όπως είναι ο χρόνος και το κόστος που απαιτείται για το σχεδιασμός και τη παραγωγή ενός κηδεμόνα, εξαλείφονται με την τεχνολογία της AM. Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής είναι μια πρόοδος που προσφέρει μοναδικές ευκαιρίες για βιοϊατρικές εφαρμογές [30].

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις όπως αναλύθηκε στις παραπάνω υποενότητες, έχουν δώσει την ευκαιρία να αναπτυχθούν εναλλακτικές προσεγγίσεις στην κατασκευή κηδεμόνα σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο που απαιτούσε τη χειρωνακτική χύτευση και διόρθωση. Πλέον η μέθοδος κατασκευής ενός κηδεμόνα περιλαμβάνει τρισδιάστατη απεικόνιση για τη δημιουργία της εικονικής γεωμετρίας του κορμού του ασθενούς και τη χρήση συστημάτων CAD/CAM για σχεδίαση και κατασκευή με τη βοήθεια Η/Υ. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός ότι, η τεχνολογία της AM δεν θα μπορούσε να υπάρχει πριν από την εμφάνιση του 3D CAD, καθώς η τεχνολογία είναι ψηφιακά καθοδηγούμενη [2].

Όπως έχει τεκμηριωθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, AM μοντέλα χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές εξαιτίας των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών της τρισδιάστατης απεικόνισης (3D scanning). Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών και στους δύο τομείς, επιτεύχθηκε μεγαλύτερη ακρίβεια στα ιατρικά μοντέλα. Τα συγκεκριμένα τεχνολογικά επιτεύγματα σε συνδυασμό με την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν σε ένα ελαφρύτερο και ταυτόχρονα λειτουργικό, αισθητικό αλλά και άνετο για τον ασθενή αποτέλεσμα [2].

Όσον αναφορά την παραγωγή ενός κηδεμόνα, αρχικά, λαμβάνονται ακριβή ανατομικά δεδομένα ενός ασθενή, με βάση τα οποία προσαρμόζεται το γενικό σχέδιο του προϊόντος. Τα δεδομένα του ασθενή λαμβάνονται από τον ορθωτικό, που είναι εξοικειωμένος με τη διαδικασία. Σημαντικό παράγοντα για την επιτυχημένη εφαρμογή εξατομικευμένων συσκευών για τη διόρθωση της σκολίωσης, αποτελεί η δυνατότητα ταχείας και εύκολης εκτέλεσης της σχεδιαστικής διαδικασίας. Στη συνέχεια, η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει AM κατασκευαστικές διεργασίες, η χρήση της άμεσης ψηφιακής κατασκευής διευκολύνει τόσο τους κατασκευαστές όσο και τους ιατρούς. Το προϊόν λειτουργεί πιο αποτελεσματικά, με λιγότερη ενόχληση και πιο άνετα, δεδομένου ότι η κατασκευή ταιριάζει καλύτερα στον συγκεκριμένο ασθενή [30].

Υπάρχουν αρκετά εργαλεία λογισμικού για την υποβοήθηση των χρηστών κατά την προετοιμασία ιατρικών δεδομένων για AM εφαρμογές. Όσο περισσότερο οργανική μορφή έχει ένα προϊόν, τόσο πιο δύσκολη είναι η απόδοση της μορφής του από το σύστημα CAD. Το τελικό μοντέλο αν σχεδιαστεί κατευθείαν στον υπολογιστή μπορεί να μην έχει την ακριβή επιθυμητή μορφή. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι τεχνικές αντίστροφης σχεδίασης (reverse engineering) για τη δημιουργία αρχικά ενός μοντέλου επιφανειών του προϊόντος και στη συνέχεια ενός πλήρους μοντέλου CAD που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του προϊόντος [2,3,30].

Τα λογισμικά αυτού του είδους εστιάζουν στη μεταφορά των δεδομένων που παράγονται από ιατρικά συστήματα σάρωσης και τη δημιουργία στη συνέχεια των καθιερωμένων STL αρχείων. Δηλαδή, τα μοντέλα που κατασκευάζονται είναι αντίγραφα των ιατρικών δεδομένων. Τα συστήματα λογισμικού διαθέτουν λειτουργίες που επιτρέπουν την επεξεργασία και τη μέτρηση των μοντέλων [2,3,30].

Οι AM μηχανές απαιτούν γενικά κάποια σχετική τεχνογνωσία από τον χρήστη, προκειμένου να επιτύχουν μοντέλα αξιόλογής ποιότητας, αν και πολλές από τις νεότερες χαμηλού κόστους μηχανές δεν απαιτούν ιδιαίτερες ικανότητες για τον χειρισμό τους, η προετοιμασία των αρχείων και κάποιες εργασίες μετεπεξεργασίας μπορεί να απαιτούν περισσότερες ικανότητες. Οι δεξιότητες που πιθανότατα απαιτούνται για την επεξεργασία δεδομένων με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών πακέτων μπορούν να βρεθούν στα ακτινολογικά τμήματα, δεδομένου ότι οι εργασίες επεξεργασίας και προετοιμασίας των ψηφιακών μοντέλων είναι παρόμοιες με εκείνες της διαχείρισης και της ερμηνείας των CT και MRI εικόνων/μοντέλων. Οι τεχνικοί,

ωστόσο, στο συγκεκριμένο κλάδο δεν είναι συνηθισμένοι στο να κατασκευάζουν και να διαχειρίζονται φυσικά μοντέλα. Οι δεξιότητες αυτές χαρακτηρίζουν τμήματα προσθετικής και ορθωτικών βοηθημάτων. Παρά την εφαρμογή των μεθόδων CAD/CAM στη διαδικασία σχεδιασμού, η διαδικασία διόρθωσης εξακολουθεί να απαιτεί τη συμβουλή ενός ορθωτικού για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική σχεδίαση του κηδεμόνα [2,30].

Αξίζει να αναφερθεί ότι εν έτη 2022 η Rehabline είναι η μοναδική εταιρεία στην Ελλάδα που κατασκευάζει κηδεμόνες σκολίωσης και κύφωσης με τρισδιάστατο (3D) σκάνερ και με τη βοήθεια του 7-axis Victor robotic system με στόχο την ιδανική εφαρμογή αλλά και την άνεση του χρήστη. Οι εφτά άξονες που διαθέτει το ρομποτικό μηχάνημα, παρέχουν τη μέγιστη ακρίβεια στο τελικό αποτέλεσμα. Η Rehabline είναι η πρώτη που έφερε την εκτύπωση 3d στα Βαλκάνια με το ρομποτικό μηχάνημα προσθετικών και ορθοτικών Victor και τα λογισμικά Cube και Rodin 4d Neo [31].



Εικόνα 2.2.10 *7-axis Victor robotic system* [31].

2.3 Σύγκριση μεθόδων κατασκευής κηδεμόνα

Ο κηδεμόνας σπονδυλικής στήλης είναι μία άκαμπτη συσκευή από πλαστικό υλικό, προσαρμοσμένη στη γεωμετρία του κορμού του ασθενούς. Κατασκευάζεται από θερμοπλαστικά όπως το πολυπροπυλένιο ή το πολυαιθυλένιο, με σύνηθες πάχος 4 mm. Ο κηδεμόνας ασκεί μια εξωτερική δύναμη στον κορμό, η οποία προσδίδει διορθωτικές δυνάμεις στη σπονδυλική στήλη [32].

Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται μπορεί να περιλαμβάνουν διαμήκη έλξη, πλευρική πίεση από τα επιθέματα και τους ιμάντες ή πίεση επαφής από το ίδιο το κέλυφος του κηδεμόνα. Γενικά, η ιδέα του σχεδιασμού του, ακολουθεί την αρχή διόρθωσης του «συστήματος τριών σημείων» όπου εφαρμόζεται δύναμη στη κορυφή, όπου ο σπόνδυλος αποκλίνει περισσότερο από την κεντρική σπονδυλική στήλη, ακολουθούμενος από δύο αντισταθμίσεις δυνάμεις, μία ανώτερη και μία κατώτερη από την κορυφή [32].

Η θεραπεία με κηδεμόνα ήταν ένα ζήτημα για τους ασθενείς, επειδή η χρήση ενός κηδεμόνα είναι άβολη. Επίσης λόγω αισθητικής, μπορεί να δημιουργήσει αρνητική εικόνα σώματος για τον ασθενή και να είναι ανεπιθύμητη η ολοκλήρωση της θεραπείας. Επιπλέον, η παραδοσιακή διαδικασία κατασκευής του κηδεμόνα μπορεί να είναι επίπονη, χρονοβόρα και δαπανηρή τόσο για τους ασθενείς όσο και για τους ορθωτικούς. Παρά την ευρεία χρήση αυτής της τεχνικής, υπάρχουν μειονεκτήματα της χειρωνακτικής διόρθωσης καλουπιών, καθώς η χύτευση απαιτεί σημαντική ποσότητα υλικών, εργαλείων και χρόνου. Κατά μέσο όρο, χρειάζονται 60 λεπτά για να γίνει μόνο ο γύψος από έναν ασθενή και η γεωμετρία του διορθωμένου καλουπιού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνογνωσία του ορθωτικού [30,32].

Επί του παρόντος, η διαδικασία κατασκευής του κηδεμόνα χρησιμοποιεί είτε τη παραδοσιακή μέθοδο ή μέθοδο σχεδίασης/κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD/CAM). Και οι δύο μέθοδοι δημιουργούν εκμαγείο από το σώμα του ασθενή, δηλαδή καλούπι, και θερμοδιαμορφώνοντας εφαρμόζουν πλαστικό περιμετρικά από το καλούπι για να δημιουργήσουν ένα στήριγμα. Η όλη διαδικασία κατασκευής και τοποθέτησης μπορεί να διαρκέσει μερικές εβδομάδες από τη συνταγογράφηση έως ο ασθενής φορέσει το στήριγμα [32].

Με την πρόοδο των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής, οι εφαρμογές στο κλινικό περιβάλλον μπορούν να εφαρμόσουν θετικά αλλαγές στον τομέα της υγείας. Τα πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής περιλαμβάνουν προσαρμοσμένη γεωμετρία, δημιουργία τυπωμένων αντικείμενων με υψηλή ακρίβεια και λείες επιφάνειες. Επίσης, υπάρχει ποικιλία υλικών εκτύπωσης και πλήρως διαμόρφωση που επιτρέπει προσαρμοσμένη αντοχή και βάρος. Η προσθετική κατασκευή μειώνει επίσης τον χρόνο επανάληψης σχεδίασης, μειώνει το κόστος σε προσαρμοσμένα εξαρτήματα, εξαλείφει τη συναρμολόγηση πολύπλοκων δομών και ορισμένα συστήματα μπορούν ακόμη και να αναμειγνύουν υλικά για τη δημιουργία εξαρτημάτων με διαφορετικά χρώματα και ιδιότητες υλικού [4].

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές αφαιρετικές τεχνολογίες κατασκευής, η προσθετική κατασκευή AM, είναι μια τεχνική που δημιουργεί αντικείμενα από τρισδιάστατα δεδομένα, συνήθως με τρόπο επίπεδο προς επίπεδο, χρησιμοποιώντας ψηφιακά ελεγχόμενα και λειτουργικά εργαλεία τοποθέτησης υλικών. Σε σύγκριση με τη συμβατική κατασκευή, η AM μειώνει σημαντικά τα απόβλητα υλικών, συντομεύει την περίοδο κατασκευής και εξαλείφει την ανάγκη για τις περισσότερες χειρωνακτικές λειτουργίες που βασίζονται σε δεξιότητες του ορθωτικού [4].

Όταν χρησιμοποιείτε η μέθοδος CAD/CAM, μπορεί ένας κηδεμόνας να δημιουργηθεί καταγράφοντας το σχήμα του σώματος του ασθενή με 3D σαρωτή και στέλνοντας το αρχείο εξόδου (.STL) για απευθείας εκτύπωση. Αυτή η προσέγγιση παρέχει μια νέα λύση για την κατασκευή τέτοιων συσκευών. Ο κηδεμόνας έχει την ικανότητα προσαρμογής διαφορετικού πάχους σε συγκεκριμένα σημεία, ανάλογα που ασκείται περισσότερη πίεση. Οι καινοτομίες που προσφέρει η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, δίνουν πλέον τη δυνατότητα για ένα πιο ελαφρύ, λιγότερο αισθητό και πιο άνετο στήριγμα. Επιπλέον, εξαλείφοντας τα επίπονα ενδιάμεσα βήματα της παραδοσιακής διαδικασίας κατασκευής, οδηγούν σε αυξημένη συμμόρφωση του ασθενούς για την σωστή τήρηση της θεραπείας. Χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι ο χρόνος που απαιτείται για να λάβει ο ασθενής τον ορθοπεδικό κηδεμόνα και το κόστος εργασίας, όπου έχουν μειωθεί σημαντικά [32].

Κεφάλαιο 3

3 Διεργασίες προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή ορθοπεδικού κηδεμόνα

Η παραγωγή με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή CAM (Computer Aided Manufacturing) βοηθάει τους μηχανικούς στην παραγωγή των προϊόντων ή των πρωτοτύπων. Το CAM πραγματοποιεί τη μετάβαση από τα εικονικά μοντέλα που δημιουργούνται στο CAD στα φυσικά προϊόντα. Η τεχνολογία αυτή, συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας και την αύξηση της ποιότητας εισάγοντας τεχνικές επισκόπησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Σημαντική προσθήκη στα εργαλεία παραγωγής με χρήση υπολογιστή είναι και η διαχείριση της προσθετικής κατασκευής AM (Additive Manufacturing), της τεχνολογίας που ξεκίνησε ως Ταχεία Πρωτοτυποποίηση RP (Rapid Prototyping) για την παραγωγή πρωτότυπων και σήμερα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τελικών προϊόντων απλοποιώντας τη σχεδίαση καθώς και την συναρμολόγηση τους [2,3].

Πίσω από τη διαδικασία σχεδιασμού ενός ορθοπεδικού κηδεμόνα, υπάρχει μια ποικιλία μεθόδων προσθετικής κατασκευής AM (Additive Manufacturing) που μπορούν να εφαρμοστούν για ορθωτικές και προσθετικές εφαρμογές. Στις πιο συνηθισμένες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής για αυτή την εφαρμογή συγκαταλέγονται η μέθοδος της στερεολιθογραφία SLA/SL (Stereolithography), η εκτόξευση και εναπόθεση φωτοπολυμερούς υλικού PJ (Photopolymer Jetting/Polyjet), η εναπόθεση τηγμένου υλικού FDM (Fused Deposition Modelling), και η επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ SLS (Selective Laser Sintering), όπου θα αναλυθούν στις επόμενες υποενότητες [32].

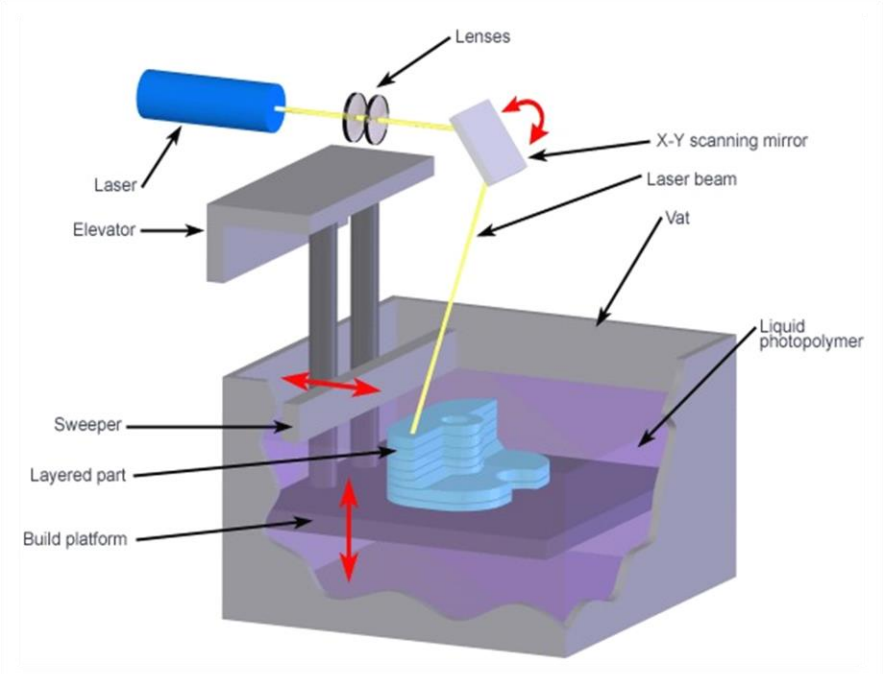
3.1 Στερεολιθογραφία SLA/SL

Η ονομασία του STL αρχείου προέρχεται από τη λέξη StereoLithography (Στερεολιθογραφία) αναπτύχθηκε από τον Charles W. Hull και αποτέλεσε την πρώτη εμπορικά διαθέσιμη AM διεργασία από την αμερικανική εταιρία 3D Systems στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Ορισμένοι εισηγούνται ότι η λέξη STL παριστάνει τα αρχικά Stereolithography Tessellation Language δηλαδή γλώσσα της ψηφιδοποίησης για στερεολιθογραφία. Τα αρχεία STL, όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, δημιουργούνται από 3D CAD δεδομένα μέσα στο ίδιο το CAD σύστημα και εξάγουν την αναπαράσταση του τρισδιάστατου μοντέλου. Η στερεολιθογραφία SLA/SL αναπτύχθηκε ως μέθοδος για την παραγωγή στερεών αντικειμένων, τυπώνοντας διαδοχικά λεπτά επίπεδα το ένα επάνω από το άλλο, χρησιμοποιώντας υλικό ευαίσθητο σε υπεριώδεις ακτίνες. Ο όρος φωτοπολυμερισμός σε κάδο (vat polymerization), όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.3, είναι ένας γενικός όρος ο οποίος συμπεριλαμβάνει την SL καθώς και άλλες συγγενείς με αυτές διεργασίες [2,3].

Οι διεργασίες φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιούν ως πρωταρχικά υλικά υγρά, συνήθως ρητίνες όπου υπό την επίδραση της ακτινοβολίας, αντιδρούν χημικά και στερεοποιούνται. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται φωτοπολυμερισμός και εξαρτάται από εμπλεκόμενους χημικούς παράγοντες. Τα φωτοπολυμερή αναπτύχθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1960 και αμέσως χρησιμοποιήθηκαν για εμπορικούς σκοπούς, για τη στερεοποίηση των πολυμερών που διατίθενται στο εμπόριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά και διαφορετικά είδη ακτινοβολιών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι ακτίνες γ, οι ακτίνες X, οι δέσμες ηλεκτρονίων, η UV ακτινοβολία και σε ορισμένες περιπτώσεις το ορατό φως. Στην AM στα εμπορικά συστήματα χρησιμοποιείται μόνο ακτινοβολία UV ή ορατού φωτός. Στα συστήματα SL χρησιμοποιείται αποκλειστικά ακτινοβολία UV, γενικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τύποι ακτινοβολιών, για παράδειγμα, στη μηχανή SLA-250 της 3D Systems χρησιμοποιείται λέιζερ ηλίου καδμίου (HeCd) με μήκος κύματος 325 nm [2].

Με την επιλεκτική στερεοποίηση μίας υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης, με τη βοήθεια ενός UV laser, μπορεί να δημιουργηθεί ένα στερεό 3D αντικείμενο. Τα κομμάτια δημιουργούνται με τη διαδοχική κατασκευή των στρώσεων που αντιστοιχούν στις διατομές της μίας επάνω στην άλλη. Οι στρώσεις αυτές δημιουργούνται από μία δέσμη laser που σαρώνει την επιφάνεια της ρητίνης στα σημεία που πρέπει να στερεοποιηθούν και κινείται με τέτοιο τρόπο, όπως προκύπτει από την παραγωγή των τομών από το μοντέλο CAD ή από δεδομένα αντίστροφης μηχανικής. Το κομμάτι κατασκευάζεται πάνω σε μία πλατφόρμα η οποία είναι βυθισμένη στον κάδο με τη ρητίνη. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί ο σχηματισμός μιας στρώσης η πλατφόρμα βυθίζεται λίγο και με

τη βοήθεια σαρωτή επικαλύπτεται με νέο στρώμα υγρής ρητίνης. Η δέσμη λέιζερ διαγράφοντας τις κατάλληλες διαδρομές σχηματίζει την επόμενη στρώση του CAD μοντέλο κατασκευάζοντας έτσι το αντικείμενο από κάτω προς τα επάνω, η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώστε να παραχθεί το αντικείμενο [2,3].



Εικόνα 3.1 *Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας Στερεολιθογραφίας* [2].

Μια δεύτερη ακτίνα λέιζερ χρησιμοποιείται ταυτόχρονα ώστε να επιβεβαιώνει ότι η επιφάνεια του ρευστού βρίσκεται στη σωστή θέση, δηλαδή η υγρή ρητίνη καλύπτει ολόκληρο το τεμάχιο που έχει μεταφερθεί προς τα κάτω. Επίσης, για τη δημιουργία ενός μοντέλου υπολογίζονται αυτόματα από το σύστημα οι περιοχές που χρειάζονται στήριξη (support structure). Οι υποστηρικτικές κατασκευές είναι απαραίτητες ώστε να διασφαλιστεί ότι η κατασκευή θα είναι στερεή και τμήματα του αντικειμένου που ίσως εξέχουν δεν θα παρασυρθούν στο κάδο της μηχανής που βρίσκεται η υγρή ρητίνη κατά τη κατασκευαστική φάση. Στα στάδιο του καθαρισμού του αντικειμένου, ο χειριστής οφείλει να φοράει προστατευτικό εξοπλισμό όπως γάντια, ένδυμα και μάσκα, καθώς η ρητίνη είναι τοξική και ο χρησιμοποιούμενος διαλύτης όπως η ακετόνη είναι ανθυγιεινή σε μεγάλες ποσότητες. Κατά τη διάρκεια της φάσης του καθαρισμού και του φινιρίσματος ο χειριστής της μηχανής αφαιρεί και τα στηρίγματα. Στο τέλος της διαδικασίας το αντικείμενο τοποθετείται σε ένα θάλαμο ώστε να πολυμεριστεί περαιτέρω για τελική σκλήρυνση [2,3].

Η στερεολιθογραφία είναι μια ευρέως χρησιμοποιημένη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής. Το κύριο προτέρημα της μεθόδου όπου την ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι η γεωμετρική ακρίβεια του κομματιού και η ποιότητα της επιφάνειας. Την χαρακτηρίζει το καλό φινίρισμα των αντικειμένων και η σχετική γρήγορη ταχύτητα της διαδικασίας. Ο χρόνος δημιουργίας ενός αντικειμένου εξαρτάται από το μέγεθος, την πολυπλοκότητά του και μπορεί να διαρκέσει από λίγες ώρες μέχρι μία ημέρα. Ένα μειονέκτημα της διαδικασίας αποτελεί η χρήση φωτοπολυμερών, διότι οι χημικές συνθέσεις των εμπορικών υλικών είναι περιορισμένες στα ακρυλικά και εποξειδικά. Τα σημερινά SL υλικά που χρησιμοποιούνται δεν παρουσιάζουν την αντοχή σε κρούση και την ανθεκτικότητα, είναι γνωστό ότι με την πάροδο του χρόνου υποβαθμίζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες με αποτέλεσμα αυτοί οι περιορισμοί να εμποδίζουν τις SL διεργασίες από το να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές παραγωγής προϊόντων [2,3].

3.2 Εκτόξευση και εναπόθεση φωτοπολυμερούς υλικού PJ

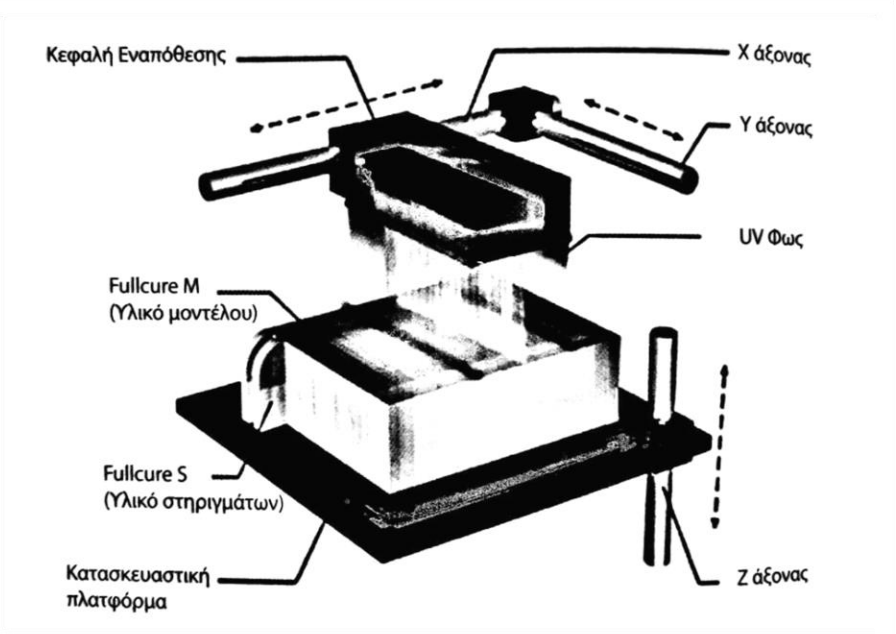
Η Quadra ήταν η πρώτη μηχανή εκτόξευσης/ψεκασμού και εναπόθεσης φωτοπολυμερούς υλικού PJ (Photopolymer Jetting/Polyjet). Αναπτύχθηκε το 2000 για εμπορικούς σκοπούς από την ισραηλινή εταιρία Object Geometries, και το 2001 ακολούθησε η αναθεωρημένη έκδοσή της η Quadra Tempo. Και οι δύο αυτές μηχανές εναπόθεταν φωτοπολυμερές υλικό χρησιμοποιώντας κεφαλές εκτύπωσης με περισσότερα από 1500 ακροφύσια. Η εταιρία Object Geometries, το 2012, συνενώθηκε με τη Stratasys και σήμερα διατίθενται πιο εξελιγμένες μηχανές. Αντιπροσωπευτικές μηχανές της τεχνολογίας αυτής, διατίθενται επίσης εμπορικά και από την εταιρία 3D Systems, με ονομασία MJP (Multijet Printing) [2,3].

Η τεχνολογία Photopolymer Jetting χρησιμοποιεί κεφαλές εκτύπωσης για επιλεκτική εκτόξευση

φωτοπολυμερούς υλικού. Οι μηχανές Polyjet έχουν συνήθως δύο ή περισσότερες κεφαλές εκτόξευσης, η μία κεφαλή είναι για την εκτόξευση του υλικού κατασκευής και η άλλη για την εκτόξευση του υλικού στήριξης. Η δημιουργία αντικειμένων με πολλαπλές κεφαλές εκτόξευσης του υλικού δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά υλικά και σε διάφορα χρώματα. Η Stratasys διαθέτει στην αγορά τις Eden, Alaris και Connex, μηχανές της τεχνολογίας PJ που επιτρέπουν να συνδυαστούν πολλά υλικά που βασίζονται στα ακρυλικά φωτοπολυμερή, με στρώσεις πάχους 0,006 in με κεφαλές που διαθέτουν 1536 μεμονωμένα ακροφύσια σε ένα μόνο μοντέλο με αποτέλεσμα την ταχύτητα και την μεγάλη αποτελεσματικότητα εναπόθεσης υλικού [2].

Οι κεφαλές εκτόξευσης υλικού κινούνται προς τις κατεύθυνσης X-Y πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής, κάθε φωτοπολυμερική στρώση στερεοποιείται από υπεριώδεις φως αμέσως αφού εκτυπωθεί, επιτρέποντας την κατασκευή στρωμάτων το ένα επάνω στο άλλο, παράγοντας έτσι πλήρως πολυμερισμένα μοντέλα χωρίς να απαιτείται μετεπεξεργασία πολυμερισμού. Οι κεφαλές εκτόξευσης εναποθέτουν ένα μόνο στρώμα του δομικού υλικού ολισθαίνοντας κατά μήκος του άξονα X [2,3].

Μόλις ολοκληρωθεί ένα στρώμα, η πλατφόρμα κατασκευής πέφτει κατά μήκος του άξονα Z και το επόμενο στρώμα φωτοπολυμερών εκτινάσσεται από τις κεφαλές. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Τα αντικείμενα που παράγονται δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία συνεπώς αυτό σημαίνει ότι έχουν καλό φινίρισμα και η διαδικασία παραγωγής έχει καλή ακρίβεια. Οι υποστηρικτικές δομές αφαιρούνται με το χέρι και με πλύσεις με νερό υπό πίεση, η εταιρία Stratasys χρησιμοποιεί υδατοδιάλυτα στηρίγματα στα περισσότερα από τα νέα της μηχανήματα [2,3].



Εικόνα 3.2 *Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας Polyjet της Stratasys* [2].

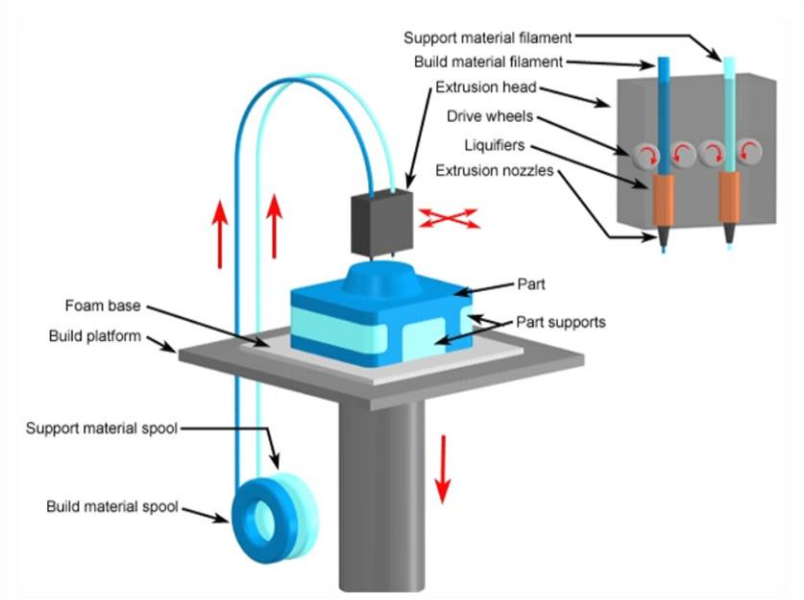
Το κύριο προτέρημα της διεργασίας εκτοξεύσεις και εναπόθεσης φωτοπολυμερούς υλικού είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή ταχύτητα κατασκευής, πολύ καλή ακρίβεια, λείες επιφάνειες και εξαιρετικά λεπτές λεπτομέρειες. Οι μηχανές PJ είναι σημαντικά οικονομικότερες σε σχέση με άλλες AM μηχανές, όπως τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν lasers. Η υψηλή ταχύτητα και η επεκτασιμότητα σχετίζονται μεταξύ τους διότι οι κεφαλές εκτύπωσης με εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες ακροφύσια είναι δυνατόν να εναποτίθεται ταχέως μεγάλη ποσότητα υλικού και να καλύπτει σημαντική έκταση επιφάνειας. Επεκτασιμότητα σημαίνει ότι προστίθενται μία επιπλέον κεφαλή εκτύπωσης. Ακόμη, η ικανότητα έγχρωμης εκτύπωσης αποτελεί σημαντική πρόοδο για το κλάδο της προσθετικής κατασκευής, διότι για μεγάλο χρονικό διάστημα τα αντικείμενα μπορούσαν να κατασκευαστούν με ένα μόνο χρώμα. Ένα βασικό μειονέκτημα της διεργασίας αποτελεί το γεγονός ότι ακόμα και σήμερα η επιλογή των υλικών είναι περιορισμένη. Τα εμπορικά διατιθέμενα υλικά περιορίζονται σε βιομηχανικά κεριά και φωτοπολυμερή [2].

3.3 Εναπόθεση τηγμένου υλικού FDM

Η διαδικασία FDM (Fused Deposition Modelling) αναπτύχθηκε από τον S. Scott Crump, το 1992 και την εκμεταλλεύτηκε εμπορικά η εταιρία Stratasys. Η FDM χρησιμοποιεί έναν θερμαινόμενο θάλαμο για τη ρευστοποίηση υλικού, το οποίο παρέχεται στο σύστημα υπό μορφή συνεχούς νήματος. Το υλικό εξωθείται με

την άσκηση πίεσης διαμέσου ενός ακροφυσίου. Τα δυνατά σημεία της FDM είναι κυρίως το εύρος των υλικών που χρησιμοποιούνται και οι μηχανικές ιδιότητες των κομματιών που κατασκευάζονται με αυτή τη τεχνολογία. Τα κομμάτια που έχουν κατασκευαστεί με FDM συγκαταλέγονται μεταξύ των πλέον ανθεκτικών κομματιών των διεργασιών προσθετικής κατασκευής οι οποίες μεταχειρίζονται πολυμερή υλικά [2,3].

Η μέθοδος λειτουργίας της τεχνολογίας αυτής είναι τήξη και ένωση (τήξη ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ένα στερεό υλικό μετατρέπεται σε υγρό, συνήθως με την εφαρμογή θερμότητας ή πίεσης). Η διαδικασία υλοποιείται εξωθώντας λιωμένο υλικό διαμέσου ελεγχόμενου στομίου, πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής. Το υλικό αρχικά είναι σε στερεή μορφή σε ένα καρούλι, το οποίο τροφοδοτείται στο πίσω μέρος της μηχανής. Το εξωθούμενο υλικό σε πρώτη φάση πρέπει να είναι σε ημιστερεά κατάσταση κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο [2,3].



Εικόνα 3.3 *Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας FDM* [2].

Στη συνέχεια, διατηρώντας συγχρόνως το σχήμα του θα πρέπει να συγκολλείται στο υλικό που έχει ήδη εναποτεθεί στην προηγούμενη στρώση, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα συμπαγές αντικείμενο. Η θερμοκρασία του υλικού παραμένει για λίγο χρονικό διάστημα υψηλή ώστε να συγκολληθεί με τις στρώσεις που έρχεται σε επαφή. Όλη η διάταξη λειτουργεί εγκλωβισμένη σε κατάλληλο θάλαμο, ο οποίος διατηρεί τη θερμοκρασία λίγο πιο χαμηλά από την θερμοκρασία τήξης της πρώτης ύλης. Με αυτό τον τρόπο μόνο μια ποσότητα θερμικής ενέργειας πρέπει να διοχετεύεται στην κεφαλή προκειμένου να τηχθεί η πρώτη στρώση, καθιστώντας την διαδικασία εξαιρετικά αποδοτική και καλύτερα ελεγχόμενη [2,3].

Η εξώθηση του υλικού διαμέσου του ακροφυσίου ελέγχεται από την πτώση πίεσης μεταξύ του θαλάμου και της ατμόσφαιρας και την ταχύτητα κίνησης όλης της διάταξης του ακροφυσίου σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, έτσι ώστε το υλικό να αποτίθεται παίρνοντας τη μορφή διαδοχικών επιπέδων του τρισδιάστατου μοντέλου. Η διάταξη του ακροφυσίου κατά την δημιουργία μιας στρώσης κινείται στους άξονες X-Y χρησιμοποιώντας σύστημα με κοχλίες ή ιμάντες κίνησης. Η μετακίνηση κατά τον άξονα Z για την δημιουργία της επόμενης στρώσης γίνεται είτε με τη μετακίνηση της πλατφόρμας προς τα κάτω είτε με την μετακίνηση του συστήματος κίνησης του ακροφυσίου προς τα πάνω. Σε ένα σύστημα το οποίο διαθέτει έναν μόνο θάλαμο εξώθησης, τα στηρίγματα του είναι κατασκευασμένα με υλικό ίδιο με του κομματιού [2,3].

Το φάσμα των Stratasys FDM μηχανών είναι πολύ ευρύ, από τις χαμηλού κόστους, μικρών διαστάσεων και με την ελάχιστη μεταβλητότητα μηχανές έως τις μεγάλες, περισσότερο πολυχρηστικές και ιδιαίτερα εξελιγμένες μηχανές που αναπόφευκτα είναι δαπανηρότερες. Επίσης, η εταιρία αναγνωρίζει ότι πολλά από τα κομμάτια που παράγονται από τις μηχανές της δεν είναι αμέσως κατάλληλα για τελική εφαρμογή και ενδέχεται να χρειάζονται αρκετό φινίρισμα. Το φινίρισμα μπορεί να είναι ένα μείγμα χημικά προκαλούμενης εξομάλυνσης με διαλύτες που τήκουν ελαφρά την επιφάνεια του κομματιού ή μια κατεργασία λείανσης χρησιμοποιώντας διττανθρακική σόδα ως μια ελαφρά λειαντική χημική ουσία καθαρισμού. Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται αστάρωμα και εφαρμογή βερνικιών, προκειμένου να επιτύχουμε το ενδεδειγμένο χρώμα και ποιότητα της επιφάνειας του κομματιού [2].

Διατίθεται μια μεγάλη ποικιλία υλικών, το πλέον συνηθισμένο υλικό είναι το ABSplus το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις τωρινές Stratasys FDM μηχανές. Το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) παρέχει ευνοϊκές μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή, σκληρότητα και ακαμψία σε σύγκριση με άλλα κοινά πολυμερή. Ορισμένες μηχανές διαθέτουν επίσης μείγμα ABS με πολυανθρακικό PC (Polycarbonate).

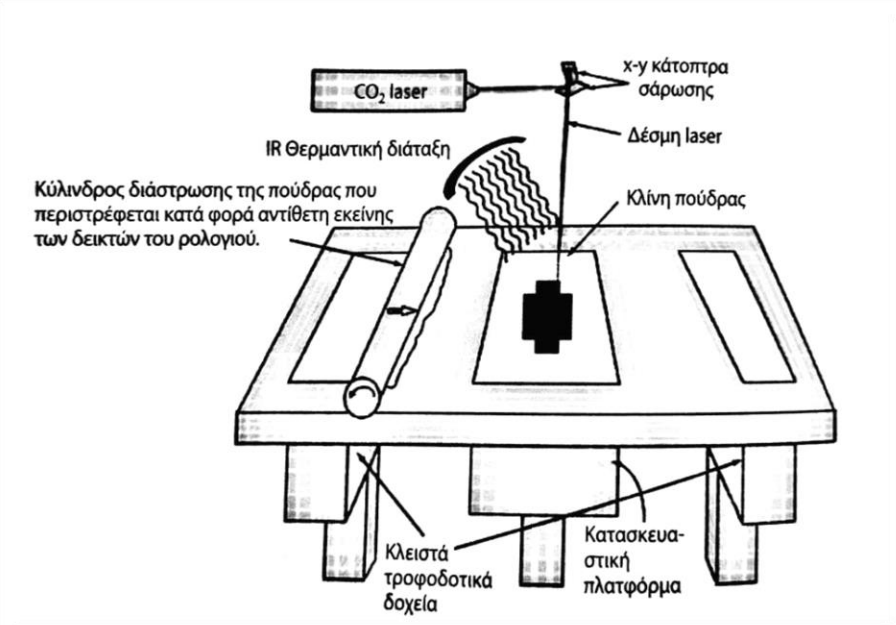
Υπάρχουν άλλα τρία υλικά διαθέσιμα για την FDM τεχνολογία, Ένα υλικό βασισμένο κυρίως στο PC διαθέτει καλύτερες εφελκυστικές ιδιότητες, με αντοχή σε κάμψη στα 104 MPa, μια παραλλαγή αυτού του υλικού είναι το PC-ISO αν και ασθενέστερο από το πρωτότυπο με αντοχή σε κάμψη στα 90 MPa είναι πιστοποιημένο για χρήση ως υλικό συσκευασίας τροφίμων και φαρμάκων, αλλά και για τη κατασκευή ιατρικών συσκευών. Το ULTEM 9085, έχει ιδιαίτερα ικανοποιητικές αξιολογήσεις αναφορικά με τη συμπεριφορά του κατά την καύση. Εάν σε συγκεκριμένες εφαρμογές υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις αναφορικά με την θερμική εκτροπή κάμψης μια εναλλακτική θα ήταν η πολυφαινυλοσουλφόνη PPSF (Polyphenylsulfone) [2].

Όπως και στις υπόλοιπες διεργασίες προσθετικής κατασκευής, έτσι και στην FDM τεχνολογία υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα όπως, όσον αναφορά, την κατασκευαστική ταχύτητα, εφόσον για να επιτευχθεί ένα καλό επίπεδο ακρίβειας απαιτείται υψηλότερος χρόνος κατασκευής. Επίσης, να σημειωθεί ότι όλα τα ακροφύσια έχουν κυκλική διατομή, επομένως, είναι αδύνατο να διαγραφούν εξωτερικές αιχμηρές γωνίες, οπότε σε κάθε γωνιά ή ακμή θα σχηματιστεί αναπόφευκτα μία στρογγύλευση με ακτίνα ισοδύναμη εκείνης του ακροφυσίου. Στην πραγματικότητα το αντικείμενο που κατασκευάζεται εξαρτάται από το ακροφύσιο, τα χαρακτηριστικά της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης, καθώς και την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υλικού κατά τη στερεοποίηση του [2].

3.4 Επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ SLS

Οι διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη PBF (Powder Bed Fusion) συγκαταλέγονται μεταξύ των πρώτων AM διεργασιών για εμπορική χρήση. Η επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ/επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ SLS (Selective Laser Sintering) αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Austin του Τέξας στις Ηνωμένες Πολιτείες, από τους Dr. Carl Deckard και Dr. Joe Beaman στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και αποτέλεσε τη πρώτη PBF του εμπορίου. Αυτοί οι δυο δημιούργησαν μια εταιρία, την DTM Corporation όπου το 2001 αγοράστηκε από την 3D Systems [2,3].

Η διαδικασία χρησιμοποιεί ένα υψηλής ισχύος λέιζερ CO_2 προκειμένου να μπορεί να κατεργαστεί μια ποικιλία υλικών. Η διαδικασία SLS μπορεί να χρησιμοποιήσει ως πρώτη ύλη, σε μορφή πούδρας, πλαστικό, γυαλί, κεραμικά υλικά καθώς και συγκεκριμένα κράματα μετάλλων. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου SLS πραγματοποιείται μέσω του CO_2 laser όπου συσσωματώνει επιλεγμένες περιοχές, αναγκάζοντας τα σωματίδια να λιώσουν και να στερεοποιηθούν. Ανήκει στη μέθοδο τήξης/σύντηξης, εφόσον για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος υπάρχουν δύο μεταβατικές φάσεις από στερεό σε ρευστό και πίσω πάλι σε στερεό [3].



Εικόνα 3.4 *Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας SLS* [2].

Ένας περιστρεφόμενος κύλινδρος, αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού, στρώνει μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους πάνω σε μια κατασκευαστική πλατφόρμα, σε πρώτη φάση όλο το υλικό θερμαίνεται από το λέιζερ σε μια υψηλή θερμοκρασία, μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού, και έτσι διευκολύνει το λέιζερ να υψώσει θερμοκρασία λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά τη σκόνη. Η προθέρμανση της πούδρας και η διατήρηση υψηλότερης θερμοκρασίας εντός της κατασκευαστικής πλατφόρμας είναι απαραίτητες, προκειμένου να αποτραπεί η στρέβλωση του κομματιού που οφείλεται σε θερμική συστολή διαστολή κατά τη κατασκευαστική φάση. Η κατασκευή του

κομματιού πραγματοποιείται εντός ενός κλειστού θαλάμου ο οποίος είναι γεμάτος με αέριο άζωτο, ώστε να ελαχιστοποιούνται η οξείδωση και η αποδόμηση του υλικού της πούδρας. Στην συνέχεια εναποτίθεται το επόμενο στρώμα πούδρας επάνω στην πλατφόρμα κατασκευής και ακολουθεί η ίδια διαδικασία εκ νέου προκειμένου να σχηματίσει το επιθυμητό αντικείμενο. Σε αυτή την τεχνολογία δεν απαιτείται δομή υποστήριξης καθώς η περίσσεια της σκόνης κάθε στρώματος λειτουργεί σαν στήριγμα για το κατασκευαζόμενο αντικείμενο [2,3].

Απαιτείται ένα χρονικό διάστημα, στη διάρκεια του οποίου τα κομμάτια ψύχονται σταδιακά, κάτι που είναι απαραίτητο, έτσι ώστε να αποκτήσουν ομογενώς μια αρκετά χαμηλή θερμοκρασία η οποία να επιτρέπει τη διαχείριση και την έκθεση τους στην εξωτερική θερμοκρασία και ατμόσφαιρα. Εάν τα κομμάτια ή η κλίνη της πούδρας εκτεθούν πρόωρα στην εξωτερική θερμοκρασία και την ατμόσφαιρα οι πούδρες μπορεί να αποδομηθούν με την παρουσία του οξυγόνου και τα κομμάτια να στρεβλώσουν λόγω την θερμικής συστολής. Στο τέλος της διαδικασίας, τα κομμάτια απομακρύνονται από την κλίνη πούδρας, καθαρίζονται από υπολείμματα της ασύνδετης πούδρας που τα περιβάλλει και αν είναι αναγκαίο πραγματοποιούνται επιπλέον κατεργασίες φινιρίσματος. Τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα της μεθόδου SLS εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε μηχανικές φορτίσεις συνεπώς έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς και ποικιλία επιλογής πρώτων υλών που μπορεί να επεξεργαστεί [2,3].

Οι PBF διεργασίες αναπτύχθηκαν αρχικά για την παραγωγή πλαστικών πρωτοτύπων με τη χρήση laser, στη συνέχεια επεκτάθηκε σε πούδρες μεταλλικών και κεραμικών υλικών. Η πλέον συνηθισμένη πηγή θερμότητας είναι τα lasers ενώ παραλλαγές στρωματικής σύντηξης υλικών σε πούδρα εμφανίζονται καθημερινά στο εμπόριο. Αποτέλεσμα είναι οι PBF διεργασίες να είναι ευρύτατα διαδεδομένες και να παρουσιάζουν ευρύ φάσμα υλικών κατασκευής. Εξαιτίας των ιδιοτήτων των υλικών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων [2].

Οι νεότερες μηχανές εμφανίζουν αρκετές βελτιώσεις, σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα, αναφορικά με την ακρίβεια του κομματιού, την ομοιομορφία της θερμοκρασίας, την ταχύτητα κατασκευής, την επαναληψιμότητα της διεργασίας, την ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και την ποιότητα επιφάνειας του κομματιού. Όμως τα βασικά χαρακτηριστικά επεξεργασίας και η γενικότερη διαμόρφωση του συστήματος παραμένουν ίδια με εκείνα που περίγράφτηκαν παραπάνω [3].

Η τεχνολογία των PBF διεργασιών μπορεί να επεξεργαστεί ευρύτατη ποικιλία υλικών σε αντίθεση με πολλές άλλες AM διεργασίες. Η διαστασιολογική ακρίβεια και η ποιότητα της επιφάνειας επηρεάζονται από τις συνθήκες λειτουργίας και το μέγεθος των σωματιδίων της πούδρας. Αυτό σημαίνει ότι σωματίδια μικρότερου μεγέθους δημιουργούν γεωμετρικά ακριβέστερα κομμάτια με περισσότερο λείες επιφάνειες αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυσκολίες κατά τη διαχείριση και τη διάστρωση τους. Σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες διαστάσεις σωματιδίων, όπου είναι ευκολότερη η επεξεργασία της πούδρας αλλά υστερεί σε ότι αφορά την ποιότητα της επιφάνειας, τα λεπτότερα χαρακτηριστικά κατασκευής καθώς και το λεπτό στρώμα πούδρας που μπορεί να υλοποιηθεί [2].

3.5 Υλικά προθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή AM (Additive Manufacturing) αναπτύχθηκε με βάση τα πολυμερή υλικά, τα βιομηχανικά κεριά και τα φύλλα χαρτιού. Στη συνέχεια ακολούθησαν τα συνθετικά υλικά, τα μέταλλα και τα κεραμικά. Με τις πρώτες φωτοπολυμεριζόμενες ρητίνες δημιουργούνταν μοντέλα πού ήταν ψαθυρά και στρεβλώνονταν πολύ εύκολα. Στις διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη με λέιζερ, η πούδρα που χρησιμοποιούνταν αλλοιωνόταν πολύ γρήγορα μέσα στη μηχανή ενώ πολλά από τα χρησιμοποιούμενα υλικά οδηγούσαν σε αντικείμενα μειωμένης μηχανικής αντοχής [2].

Με την πάροδο του χρόνου αναπτύσσονταν υλικά για να ικανοποιήσουν ειδικά τις ανάγκες των διεργασιών της προσθετικής κατασκευής. Έτσι, τα υλικά διαμορφώθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται στις λειτουργικές παραμέτρους των διαφορετικών διεργασιών, καθώς και να οδηγήσουν σε τελικά προϊόντα με βελτιωμένες ιδιότητες. Πλέον τα κομμάτια εμφανίζουν μεγαλύτερη διαστασιολογική ακρίβεια, βελτιωμένη μηχανική αντοχή και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η ανάγκη για εισαγωγή νέων υλικών έχει ως συνέπεια την κατάλληλη διαμόρφωση και βελτίωση των χαρακτηριστικών των διεργασιών AM, ώστε

να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν υλικά υψηλότερων θερμοκρασιών με στόχο να υλοποιηθούν λεπτότερα μορφολογικά χαρακτηριστικά και να ολοκληρώνεται η κατασκευαστική διαδικασία σε μικρότερο χρονικό διάστημα [2].

Σημαντικό ρόλο στις διεργασίες της προσθετικής κατασκευής έχουν τα βιοϋλικά, η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής επεκτείνεται με επιταχυνόμενους ρυθμούς στην ιατρική, ιδιαίτερα στον τομέα της μηχανικής ιστών και της αποκατάστασης καθώς επίσης και στην κατασκευή ορθώσεων και προσθετικών με υψηλή δομική πολυπλοκότητα και ευελιξία σχεδιασμού [2].

Τα βιοϋλικά χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα που έχουν εμφυτευτεί μέσα στο ανθρώπινο σώμα για να αντικαταστήσουν μέλη με δυσλειτουργία ή βλάβη. Τα υλικά αυτά δεν πρέπει να παράγουν τοξικές ουσίες, ενώ πρέπει να είναι συμβατά με τους ιστούς του σώματος, ώστε να αντικατασταθεί επιτυχώς η λειτουργία του αντίστοιχου οργάνου, χωρίς να βάλει σε κίνδυνο τον ασθενή ή να δημιουργήσει πιθανό πρόβλημα στον οργανισμό του ασθενούς μετά την επέμβαση. Τα βιοϋλικά ταξινομούνται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, σε μέταλλα (και κράματα), κεραμικά, πολυμερή και σύνθετα υλικά. Η δυνατότητα που έχουν τα βιοϋλικά να μπορούν να ενσωματωθούν πλήρως με το σώμα, ονομάζεται βιοσυμβατότητα [23].

Όσον αναφορά την παραγωγή ορθωτικών εφαρμογών, τα υλικά που χρησιμοποιούνται οφείλουν να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις όπως είναι η βιοσυμβατότητα, η αντοχή, η ανθεκτικότητα, το ελάχιστο δυνατό βάρος και η ευκολία κατασκευής. Ο μεγαλύτερος αριθμός των διαφόρων πολυμερών υλικών βρίσκονται κάτω από την κατηγορία των πλαστικών. Τα πλαστικά υλικά τα οποία, μέχρι σήμερα, είναι ιδανικά για κατασκευή ορθοπεδικού κηδεμόνα σπονδυλικής στήλης, είναι το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο, χαρακτηρίζονται ως ανθεκτικά, υποαλλεργικά υλικά, εύκολα στο καθάρισμα και χωρίς να προκαλούν δυσοσμία [2,23].

Το πολυπροπυλένιο PP (Polypropylene) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που χρησιμοποιείται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών, με σημείο τήξης τους 165 ^{o}C. Είναι ένα από τα ελαφρύτερα πολυμερή ανάμεσα σε όλα τα βασικά πλαστικά με πυκνότητα 0,908 gr/cm^3. Το πολυπροπυλένιο είναι ένα υλικό το οποίο το χαρακτηρίζει η αντοχή στην τριβή, η ικανότητα να απορροφά τους κραδασμούς, η ακαμψία που είναι από 1,2 έως 1,6 GPa καθώς και η αντοχή στην θραύση (20 - 40 MPa). Στην επόμενη υποενότητα θα αναφερθούν υλικά που χρησιμοποιούνται σε FDM τεχνολογίες για την κατασκευή ορθοπεδικού κηδεμόνα [23].

3.5.1 Υλικά κατασκευής ορθοπεδικού κηδεμόνα με τη διεργασία FDM

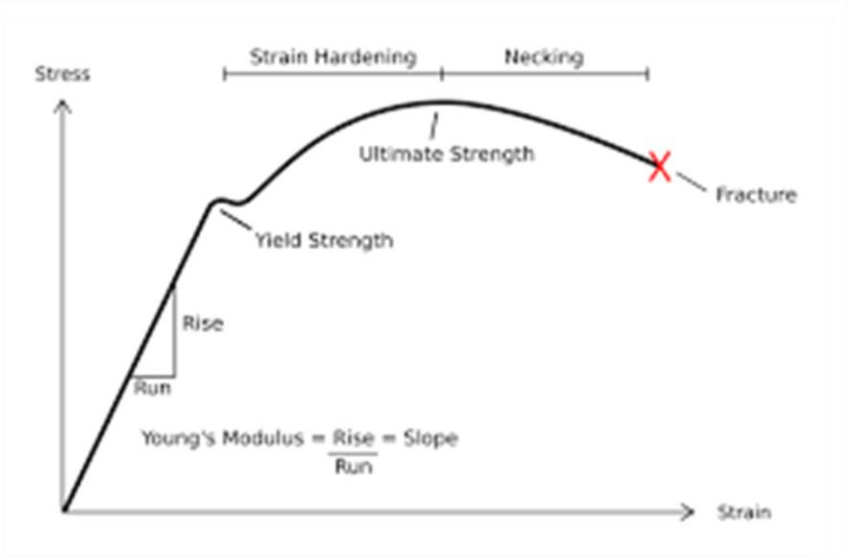
Η εναπόθεση τηγμένου υλικού FDM (Fused Deposition Modelling) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες διεργασίες προσθετικής κατασκευής. Η συγκεκριμένη διεργασία έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής διαστασιολογικής ακρίβειας, της ευκολίας χρήσης καθώς, επίσης και ένα ευρύ φάσμα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία. Πραγματοποιήθηκε μία μελέτη στην οποία χρησιμοποίησαν την τεχνολογία FDM για να κατασκευασθεί ένας κηδεμόνας σπονδυλικής στήλης, με στόχο την διόρθωση της σκολιωτικής παραμόρφωσης. Η μελέτη αυτή στοχεύει στον προσδιορισμό του κατάλληλου υλικού και όγκου ώστε να επιτευχθεί η βελτίωση της άνεσης και η λειτουργικότητα του κηδεμόνα. Ανάμεσα στις τέσσερις μεθόδους προσθετικής κατασκευής, που αναφέρθηκαν παραπάνω, και σύμφωνα με τον όγκο κατασκευής, τον αριθμό των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, το κόστος μηχανής, την ακρίβεια της μεθόδου και τις διαδικασίες μετεπεξεργασίας, η μέθοδος FDM ήταν η συνιστώμενη προσέγγιση για ορθωτικές εφαρμογές [32,2].



Εικόνα 3.5.1 *Fortus 450 mc* [33].

Η μηχανή FORTUS 450mc (Stratasys) της τεχνολογίας FDM, ενδεχομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την διαδικασία παραγωγής ενός κηδεμόνα σπονδυλικής στήλης. Η μηχανή αυτή υποστηρίζει 14 θερμοπλαστικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων των ABS-M30, ABS-M30i, ABS-ESD7, ASA, Nylon 12, Nylon 12 Carbon Fiber/ Nylon 12CF (ενισχυμένο με ανθρακονήματα), polycarbonate PC (πολυανθρακικό), PC-ABS, PC-ISO, ULTEM 9085, ULTEM 1010, Antero 800NA, Antero 840CN03, ST-130. Για παράδειγμα, το ABS-M30i είναι ένα ισχυρό βιοσυμβατό υλικό ικανό για αποστείρωση και κατάλληλο για χρήση σε ιατρικές συσκευές. Το ABS διαθέτει

καλή αντοχή και ευκαμψία, μπορεί να αντέξει θερμοκρασίες από -20 έως 80 ºC και έχει σημείο τήξης τους 105 ºC. Είναι ιδανικό για χρήση σε συστήματα παραγωγής με FDM και SLA [32,33].



Εικόνα 3.5.2 *Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης* [23].

Τα κριτήρια των ιδιοτήτων των υλικών ήταν βασισμένα στο μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity/Young modulus), στην αντοχή σε εφελκυσμό UTS (Ultimate Tensile Strength) και στην ολκιμότητα (ductility) σε σύγκριση με το παραδοσιακό κηδεμόνα πολυπροπυλενίου. Το μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση του ελαστικού ή αρχικά γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, ο βαθμός δηλαδή κατά τον οποίο παραμορφώνεται μία κατασκευή εξαρτάται από την τάση στην οποία υπόκειται. Η εφελκυστική αντοχή TS (Tensile Strength) είναι η τάση στο μέγιστο της καμπύλης μηχανικής τάσης-παραμόρφωσης και αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει μία κατασκευή σε εφελκυσμό, δηλαδή εάν αυτή η τάση εφαρμόζεται και διατηρείται θα επέλθει η θραύση. Η ολκιμότητα (ductility) είναι μία ακόμη σημαντική μηχανική ιδιότητα, αποτελεί μέτρο του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό στο σημείο της θραύσης. Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής [23,32].

Για τη συγκεκριμένη μελέτη σύμφωνα με τις ιδιότητες του υλικού και τις προδιαγραφές των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής που σχετίζονται με την κατασκευή του κηδεμόνα, επιλέχθηκε το ULTEM 1010 και το Nylon 12. Η ρητίνη ULTEM 1010 είναι ένα θερμοπλαστικό πολυαιθεριμίδιο (PEI) υψηλής απόδοσης. Έχει υψηλό σημείο τήξης περίπου 350 ºC, επομένως δεν μπορεί να εκτυπωθεί από όλους τους εκτυπωτές FDM, πρέπει να πληροί προϋποθέσεις όπως η θερμαντική πλάκα να είναι ικανή να φτάσει τουλάχιστον τους 230 ºC και στην διαδικασία εξώθησης τους 350 ºC, απαραίτητα κλειστό θάλαμο [32,33].

Το ULTEM 1010 έχει υψηλή αντοχή στη θερμότητα ενώ παρουσιάζει τον χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ των υλικών FDM. Σε συνδυασμό με τις ιδιότητες υψηλής αντοχής, η ρητίνη ULTEM 1010 είναι ένα τέλειο υλικό για απαιτητικές και εξειδικευμένες εφαρμογές. Για ειδικές ιατρικές εφαρμογές, το ULTEM 1010 CG (Certified Grade/πιστοποιημένος βαθμός) συνοδεύεται από πρόσθετη τεκμηρίωση που αποδεικνύει τη συμμόρφωση με τα βιομηχανικά πρότυπα για βιοσυμβατότητα ISO 10993 και USP Class VI [33].



Εικόνα 3.5.3 *Ultem 1010 filament* [33].

Το Nylon 12 συνδυάζει το πλεονέκτημα της ελευθερίας σχεδιασμού με ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα καλής εκτύπωσης, είναι ένα δυνατό και σκληρό υλικό με αρκετή ελαστικότητα. Η αντοχή, η σκληρότητα και οι εξαιρετικές ιδιότητες κόπωσης του Nylon 12 το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές που περιλαμβάνουν κλείσιμο με κουμπώματα, αντικείμενα που εφαρμόζουν πίεση και εξαρτήματα ανθεκτικά στους κραδασμούς [33].

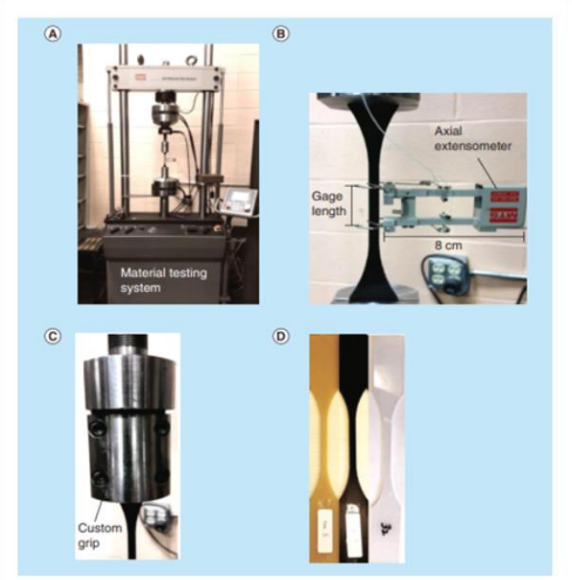
Σε σύγκριση με το πολυπροπυλένιο, το παραδοσιακό υλικό κατασκευής κηδεμόνα, το ULTEM 1010 είναι ισχυρότερο υλικό με 2,5 φορές υψηλότερο UTS (αντοχή σε εφελκυσμό) και πιο άκαμπτο υλικό με 2 φορές υψηλότερο Young Modulus (μέτρο ελαστικότητας). Το Nylon 12 είχε κοινές ιδιότητες υλικού, όπως το πολυπροπυλένιο, όσον αφορά την

αντοχή διαρροής (yield strength), το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) και την επιμήκυνση εφελκυσμού (tensile elongation at yield). Για να συγκριθούν οι μηχανικές ιδιότητες του ULTEM 1010, του Nylon 12 και του πολυπροπυλενίου, αυτά τα τρία υλικά ήταν όλα παρασκευασμένα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D638-14 (American Society for Testing and Materials) [23,32].

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών εξακριβώνονται εκτελώντας προσεκτικά σχεδιασμένα πειράματα σε εργαστήριο, που προσομοιάζουν όσο τον δυνατόν περισσότερο στις συνθήκες λειτουργίας. Όταν ένα φορτίο είναι στατικό ή μεταβάλλεται σχετικά αργά με τον χρόνο και εφαρμόζεται ομοιόμορφα σε μια κάθετη διατομή ή επιφάνεια ενός σώματος, η μηχανική του συμπεριφορά μπορεί να εξακριβωθεί με μία απλή δοκιμή τάσης-παραμόρφωσης, συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι βασικοί τρόποι με τους οποίους το φορτίο μπορεί να εφαρμοστεί είναι τρείς, ο εφελκυσμός, η θλίψη και η διάτμηση [23,32].

Μία από τις πιο συνηθισμένες μηχανικές δοκιμές τάσης-παραμόρφωσης είναι ο εφελκυσμός. Η δοκιμή του εφελκυσμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που θεωρούνται σημαντικές στη διαδικασία του σχεδιασμού. Συνήθως, ένα δοκίμιο παραμορφώνεται μέχρι τη θραύση του, αυξάνοντας σταδιακά το εφελκυστικό φορτίο που εφαρμόζεται μονοαξονικά κατά μήκος του μεγάλου άξονα του δοκιμίου. Δοκίμια της μορφής «κόκαλο σκύλου (dogbone)» επιλέγονται ώστε κατά τη διάρκεια της δοκιμής η παραμόρφωση να περιορίζεται στη στενότερη κεντρική περιοχή, η οποία παρουσιάζει ομοιόμορφη διατομή καθ' όλο το μήκος της και ακόμη μειώνει την πιθανότητα η θραύση να εμφανιστεί στα άκρα του δοκιμίου [23,32].

Μία τυπική δοκιμή τάσης - παραμόρφωσης καλύπτει αρκετά λεπτά της ώρας και είναι καταστρεπτική, καθώς το δοκίμιο παραμορφώνεται μόνιμα και συνήθως θραύεται. Τα δείγματα είχαν μακρύτερη και φαρδύτερη χειρολαβή ώστε να παρέχουν περισσότερη επιφάνεια επαφής με τις λαβές δοκιμής για να διασφαλιστεί ότι η περιοχή θραύσης ήταν εντός του περιορισμένου τμήματος αντί της περιοχής της λαβής. Δοκιμάστηκαν τρία πάχη σχεδίασης, 2,5 mm, 3,25 mm και 4 mm για το ULTEM 1010 και το Nylon 12, ενώ για το πολυπροπυλένιο δοκιμάστηκε πάχος 4 mm καθώς ήταν το τυπικό πάχος του στηρίγματος [23,32].



Εικόνα 3.5.4 *Εξοπλισμός και δείγματα δοκιμής εφελκυσμού. (Α) MTS 810 σύστημα δοκιμής υλικού μοντέλο 318.10. (Β) MTS 634.12E-24 axial extensometer. (Γ) Προσαρμοσμένη λαβή. (D) ULTEM1010 χρυσό δοκίμιο, Nylon12 μαύρο δοκίμιο και πολυπροπυλένιο λευκό δοκίμιο* [32].

Ένα MTS 810 Model 318.10 (Material Testing System) χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό το σύστημα δοκιμών περιελάβανε υδραυλικό ανυψωτικό, υδραυλικό ενεργοποιητή, κελί φόρτισης εμβέλειας 10 N (Newtons) και σύστημα ελέγχου. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα ζευγάρι προσαρμοσμένων λαβών για να εξασφαλιστεί ότι δεν ολισθαίνει κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Για να επιτευχθεί η μέτρηση της καταπόνησης χρησιμοποιήθηκε MTS 634.12E-24 axial extensometer (MTS Systems Corporation). Το επιμηκυνσιόμετρο είχε μήκος μετρητή 2,54 cm και μέγιστη διαδρομή 1,27 cm, που αντιστοιχεί σε μέγιστη μέτρηση καταπόνησης 50%. Η ακρίβεια του συγκεκριμένου μοντέλου επιμηκυνσιόμετρο ισχύει για δοκιμές με πρότυπα ASTM E83 Class B1 και ISO 9513 Class 05 [32].

Όλα τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μήκος, πλάτος και πλάτος μήκους μετρητή 25,8 cm, 2,8 cm και 0,6 cm, αντίστοιχα (Το μήκος του μετρητή είναι το μήκος αναφοράς που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς επιμήκυνσης). Το δοκίμιο τοποθετείται στις αρπάγες της διάταξης δοκιμής μέσω των άκρων του. Οι μηχανές δοκιμής του εφελκυσμού σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιμηκύνουν τα δοκίμια με σταθερό ρυθμό και να μετρούν συνεχώς και ταυτόχρονα το στιγμιαίο εφαρμοζόμενο φορτίο (με ένα κελί φόρτισης) και την προκύπτουσα επιμήκυνση (χρησιμοποιώντας ένα επιμηκυνσιόμετρο) [23,32].

Στα δείγματα εφαρμόστηκαν φορτία με ρυθμούς 5 mm/min, 10 mm/min και 25 mm/min για τα υλικά ULTEM 1010, Nylon 12 και πολυπροπυλένιο, αντίστοιχα. Αυτοί οι ρυθμοί φόρτωσης ήταν εντός του συνιστώμενου εύρους επιτρεπόμενης θραύσης του δείγματος εντός 0,5–5 λεπτών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D638-14. Χρησιμοποιήθηκε υψηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας για το ULTEM 1010 επειδή ήταν πιο εύθραυστο θα έσπαγε νωρίτερα και ξαφνικά, με λιγότερη επιμήκυνση. Χαμηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε για το Nylon 12 και το πολυπροπυλένιο, επειδή αναμενόταν επιμήκυνση πριν σπάσουν. Οι δοκιμές με ULTEM 1010 μπορούσαν να αντέξουν μεγαλύτερη δύναμη, αλλά δεν μπορούσαν να επιμηκυνθούν τόσο πολύ. Από την άλλη πλευρά, οι δοκιμές με Nylon 12 μπορούσαν να αντέξουν μόνο χαμηλότερη δύναμη παρόμοια με το πολυπροπυλένιο, αλλά μπορούσαν να επιμηκυνθούν πολύ περισσότερο, με μετατόπιση κοντά στο πολυπροπυλένιο [32].

Ένα αρχείο με τη γεωμετρία του σώματος ενός εθελοντή ασθενή, χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση δύο κηδεμόνων σπονδυλικής στήλης πλήρους κλίμακας με πάχος 2,54 mm με κενά στο πίσω μέρος και στα πλαϊνά με υλικά ULTEM 1010 και Nylon 12. Επιλέχθηκε το χαμηλότερο πάχος σύμφωνα με τους ορθωτικούς εφόσον είχε αποδεκτές μηχανικές ιδιότητες από την προηγούμενη δοκιμή εφελκυσμού. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα του ULTEM 1010 και του Nylon 12 ήταν ίση ή μεγαλύτερη από το τυπικό υλικό του κηδεμόνα, το πολυπροπυλένιο, το οποίο θα επέτρεπε μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας με το πάχος του στηρίγματος λεπτότερο [32].

Οι ασθενείς θα αισθάνονται πιο άνετα με ένα λεπτότερο στήριγμα καθώς θα ήταν ελαφρύτερο, κατάλληλο για αναπνοή και αισθητικά πιο διακριτικό. Για την αξιολόγηση των τρισδιάστατων τυπωμένων κηδεμόνων, όπως το σχήμα του νάρθηκα, τη δυνατότητα τροποποίησης θερμότητας, τα επιθέματα πίεσης, την ασφάλεια θραύσης, την ευελιξία του κηδεμόνα να φορεθεί και αφαιρεθεί κατά τη διάρκεια των καθημερινών δραστηριοτήτων, ο χρόνος παραγωγής, η εργασία, το κόστος υλικού και τελικό βάρος του διαμορφωμένου κηδεμόνα συγκρίθηκε με τον παραδοσιακό [32].

Όλα τα πάχη ULTEM 1010 έδειξαν υψηλότερη ακαμψία από το πολυπροπυλένιο και όλα τα πάχη Nylon12 παρουσίασαν χαμηλότερη ακαμψία από το πολυπροπυλένιο. Το 4 mm ULTEM 1010 είχε 109,6% υψηλότερη ακαμψία από το πολυπροπυλένιο και το 2,5 mm Nylon12 είχε 44,1% χαμηλότερη ακαμψία. Οι μηχανικές ιδιότητες ήταν σημαντικές για τον προσδιορισμό του κατάλληλου υλικού και πάχους για την κατασκευή του κηδεμόνα. Το Nylon 12 με πάχος 2,5–3,25 mm είχε μεγαλύτερη ευελιξία και τα πλησιέστερα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως το πολυπροπυλένιο πάχους 4 mm. Ο κηδεμόνας ULTEM 1010 έσπασε μετά από 615 φορές ενώ ο κηδεμόνας από Nylon 12 χειρίστηκε 2920 φορές το άνοιγμα και το κλείσιμο. Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών όπως η αντοχή, η σκληρότητα, η πυκνότητα, η αντοχή στη φθορά και η αντοχή στη θερμότητα λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή των υλικών για εκτύπωση [28].

Κεφάλαιο 4

4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

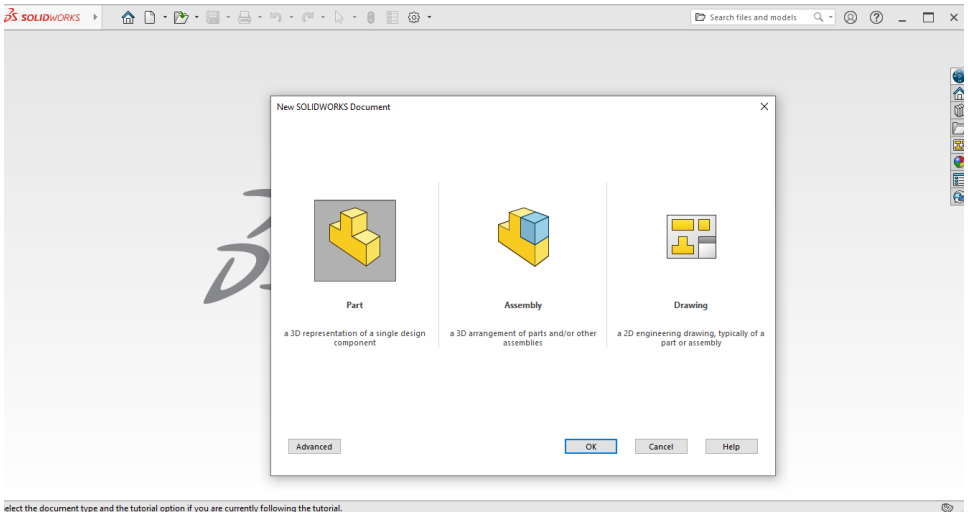
Η παρόν διπλωματική εργασία, στόχο έχει να σχεδιαστεί ένας ορθοπεδικός κηδεμόνας σπονδυλικής στήλης για αποκατάσταση της σκολιωτικής παραμόρφωσης. Ο κηδεμόνας προορίζεται να κατασκευασθεί με την μέθοδο της προσθετικής κατασκευής με σκοπό να επιτευχθεί ένα άνετο και ελαφρύτερο στήριγμα, με όσο το δυνατόν λιγότερο υλικό είναι εφικτό, σε σύγκριση με το παραδοσιακό κηδεμόνα πολυπροπυλενίου. Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως είναι ένας κηδεμόνας, καθώς επίσης συνδυάζει το πλεονέκτημα της μείωσης του απαιτούμενου υλικού και την επιτάχυνση της όλης διαδικασίας. Το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του κηδεμόνα είναι το Solidworks της Dassault Systemes και παρακάτω θα επεξηγηθεί η διαδικασία.

4.1 Λογισμικό Solidworks

Η χρήση των λογισμικών πακέτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη προϊόντων. Τα προγράμματα CAD/CAE/CAM που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία συντελούν στις μεθόδους σχεδίασης, υπολογισμού και κατασκευής. Ένα λογισμικό πακέτο όπως είναι το Solidworks της Dassault Systemes παρέχει τη δυνατότητα για σχεδίαση, κατασκευή και έλεγχο του προϊόντος. Πραγματοποιεί τη μετάβαση από τα εικονικά μοντέλα στα φυσικά προϊόντα απλοποιώντας και ελέγχοντας τις διαδικασίες πριν την παραγωγή τελικών προϊόντων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιτυχή κυκλοφορία του εκάστοτε προϊόντος, εφόσον μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά του προϊόντος προτού να κατασκευασθεί. Η τεχνολογία αυτή, συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας και την αύξηση της ποιότητας εισάγοντας τεχνικές επισκόπησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Οι δυνατότητες που προσφέρουν, τέτοια λογισμικά πακέτα έχουν ξεπεράσει τις προσδοκίες για τις οποίες αρχικά σχεδιάστηκαν. Άλλα δημοφιλή λογισμικά είναι το CREO της PTC, το NX της Siemens, το Inventor και το Fusion 360 της Autodesk, το CATIA επίσης της Dassault Systemes κ.α. Το Solidworks αποτελεί το πιο ευρέως διαδεδομένο λογισμικό CAD.

4.1.1 Περιβάλλον λογισμικού Solidworks

Κατά την έναρξη του λογισμικού Solidworks με τη βοήθεια της εντολής **«New»** εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο **«New SOLIDWORKS Document»** ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο αρχείο. Στη συνέχεια επιλέγεται το εικονίδιο **«Part»** για να σχεδιαστεί το αντικείμενο.

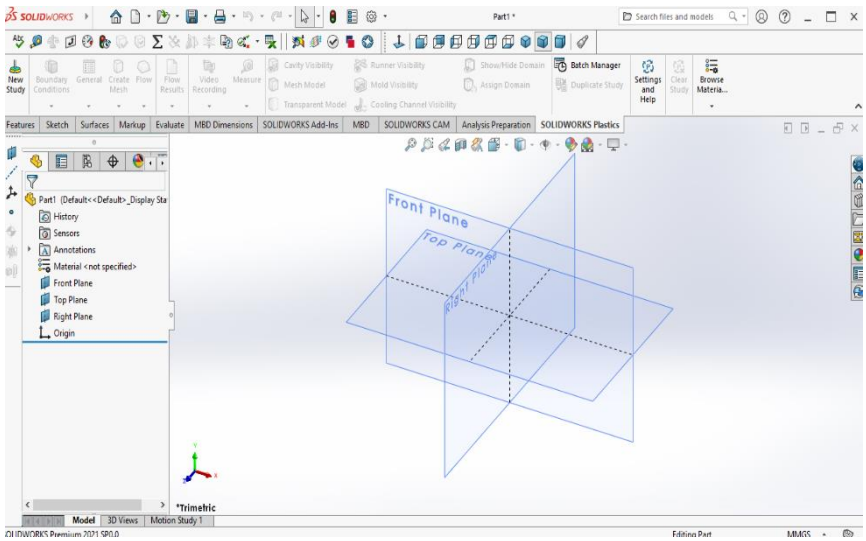


Εικόνα 4.1.1 *Solidworks 2021.*

Με την επιλογή της εντολής **«Part»**, όπως φαίνεται στην επόμενη Εικόν 4.1.1.1, εμφανίζεται στην οθόνη το περιβάλλον σχεδίασης του λογισμικού, το βασικό menu και η γραμμή εντολών, καθώς επίσης και οι

τρεις όψεις στις οποίες πραγματοποιείται η σχεδίαση, το Front Plane, το Top Plane και το Right Plane δηλαδή η πρόοψη, η κάτοψη και η δεξιά πλάγια όψη.

Οι βασικές περιοχές του λογισμικού που βοηθούν για τη σχεδίαση οποιουδήποτε αντικειμένου:



Εικόνα 4.1.1.1 *Solidworks 2021.*

- **Main Menu** περιέχει τη λίστα εντολών File, Edit, View, Insert, Tools, Windows, Help.
- **Command Manager** περιέχει τις καρτέλες εντολών Features, Sketch, Surfaces, Markup, Evaluate, MBD Dimensions, Solidworks Add-Ins, MBD, Solidworks CAM, Analysis Preparation, Solidworks Plastics.
- **Feature Manager** βρίσκεται στο αριστερό μέρος της επιφάνειας εργασιών του λογισμικού και περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα βήματα σχεδίασης του αντικειμένου.
- **Περιοχή σχεδίασης** στο επάνω μέρος της περιοχής σχεδίασης βρίσκεται η καρτέλα Heads-up ενώ κάτω αριστερά το σύστημα συντεταγμένων.

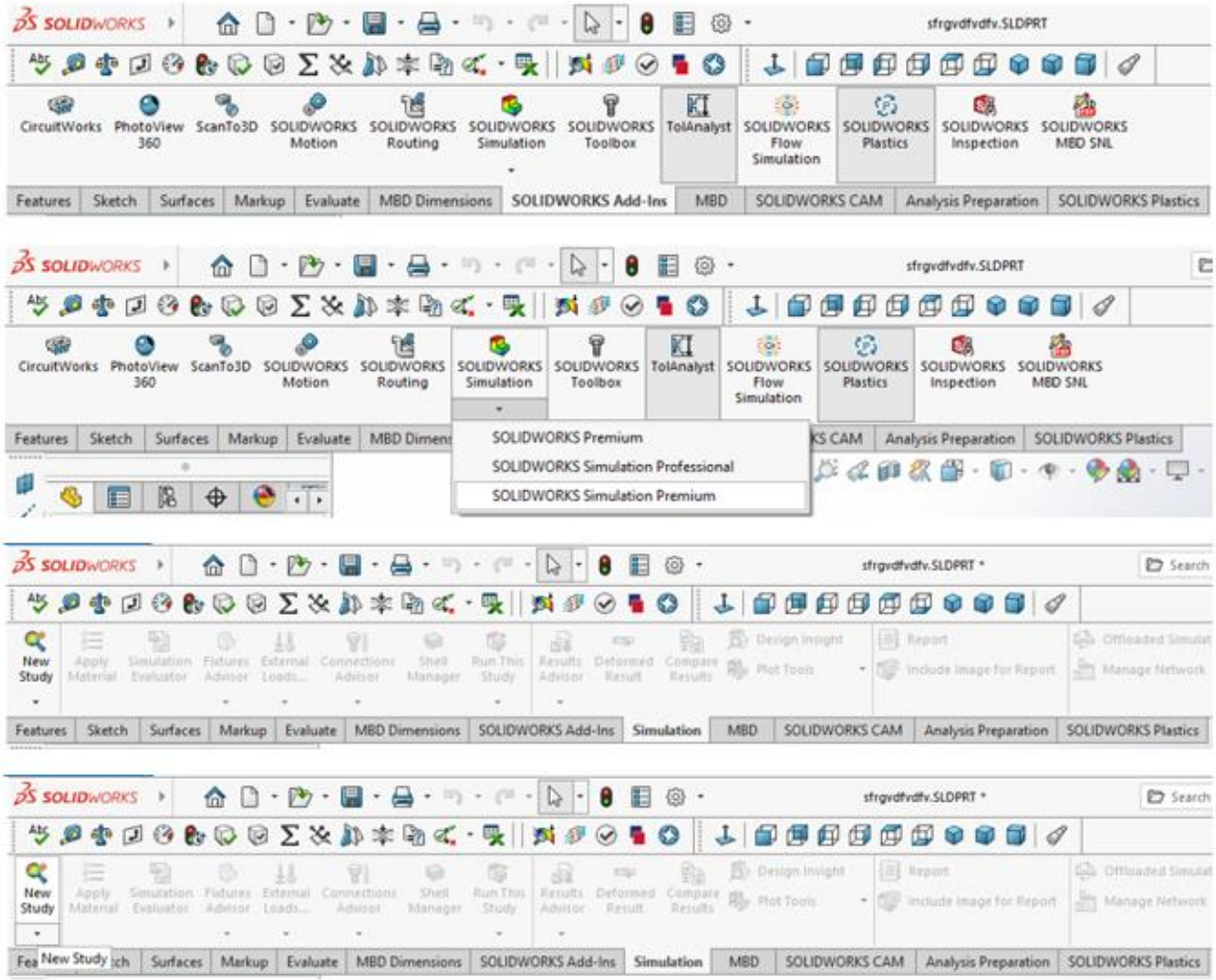
4.1.2 Εντολές σχεδίασης

Αρχικά το πρώτα βήμα είναι η επιλογή του επιπέδου σχεδιασμού Front, Top ή Right Plane, στη συνέχεια επιλέγεται από την περιοχή Command Manager η εντολή **«sketch»**. Με την εντολή sketch εμφανίζονται όλα τα εργαλεία που δίνουν την δυνατότητα για τον 2D σχεδιασμό, γραμμές οποιασδήποτε γεωμετρίας, όπως ευθείες, καμπύλες, κύκλους, ελλείψεις και ημικύκλια. Βασικό εργαλείο για το σχεδιασμό οποιουδήποτε αντικειμένου είναι η εντολή **«Smart Dimension»** με την οποία γίνεται η εισαγωγή των επιθυμητών διαστάσεων. Άλλες δυνατότητες που περιλαμβάνει η εντολή sketch είναι η εντολή **«Offset entities»** η οποία δημιουργεί ακριβές αντίγραφο μιας γεωμετρίας. Η εντολή **«Convert entities»** χρησιμοποιείται για να φτιαχτεί μία οντότητα της γεωμετρίας του σκίτσου η οποία ταιριάζει με άλλη γεωμετρία του μοντέλου. Η εντολή **«Mirror entities»** δημιουργεί αντίγραφο ενός σχήματος σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς και η εντολή **«Trim entities»** χρησιμοποιείται για να γίνει αφαίρεση ανεπιθύμητων τμημάτων από το σχέδιο τα οποία συμπίπτουν με άλλο τμήμα του σχεδίου.

Έπειτα από την περιοχή Command Manager επιλέγεται η εντολή **«Features»**, με τη βοήθεια της καρτέλας features προσεγγίζεται η μετατροπή από τη δισδιάστατη (2D) στην τρισδιάστατη (3D) σχεδίαση, οποιαδήποτε γεωμετρία έχει σχεδιαστεί με την εντολή sketch μπορεί να μετατραπεί σε 3D μορφή. Από τις πιο βασικές εντολές της καρτέλας features είναι η **«Extruded Boss/Base»** όπου χρησιμοποιείται για την επέκταση της τρίτης διάστασης ενός 2D σχεδίου. Η εντολή **«Revolved Boss/Base»** η οποία χρησιμοποιείται για την δημιουργία 3D αντικειμένων γύρω από έναν άξονα συμμετρίας. Η εντολή **«Extruded Cut»** χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υλικού από το εκάστοτε αντικείμενο. Η εντολή **«Lofted Boss/Base»** χρησιμοποιείται για την επέκταση του δισδιάστατου σχεδίου σε τρισδιάστατο οποιασδήποτε γεωμετρικής οντότητας του σχήματος συμπεριλαμβανομένων καμπυλών. Η εντολή **«Fillet»** μετατρέπει γωνίες σε καμπυλοειδή επιφάνεια και η εντολή **«Chamfer»** χρησιμοποιείται για τη μετατροπή γωνιών σε επίπεδη επιφάνεια. Η εντολή **«Reference Geometry»** δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί επιπλέον Plane για σχεδίαση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι υπάρχουν αρκετές ακόμα εντολές του λογισμικού, στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφονται αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό ενός κηδεμόνα.

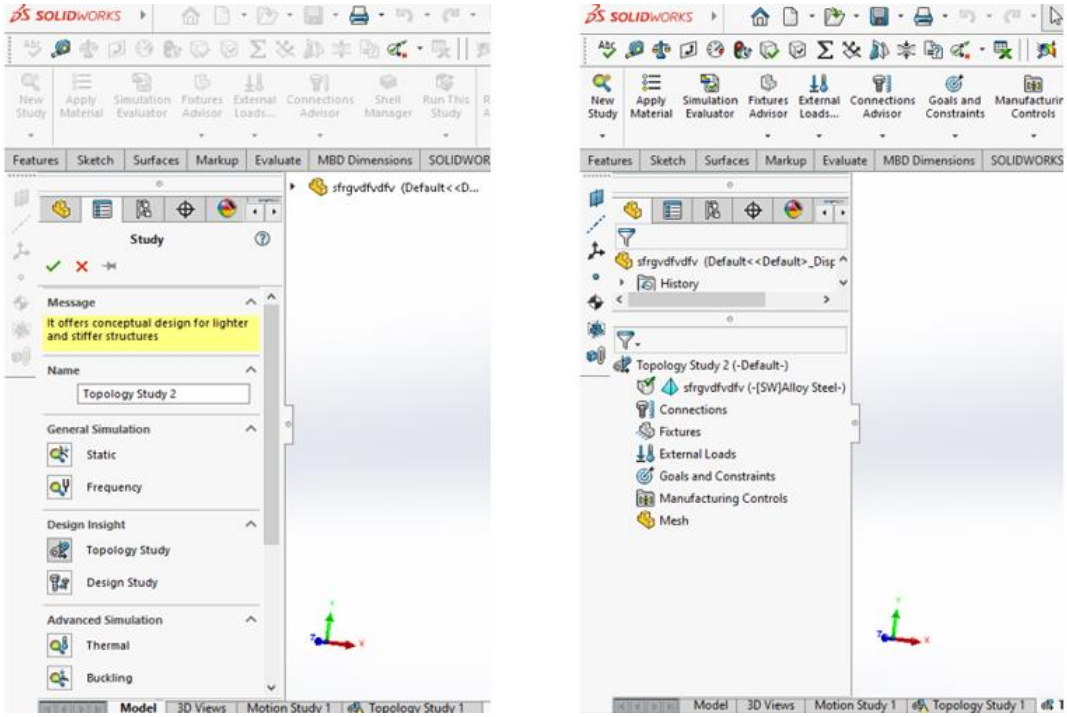
4.1.3 Solidworks Topology Study

Το λογισμικού Solidworks παρέχει τη δυνατότητα για μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης, η ύπαρξη του "Topology Study" είναι ένα από τα βασικά βήματα για κάθε σχεδιαστή που χρησιμοποιεί το λογισμικό solidworks και προστέθηκε πρώτη φορά το 2018. Με αυτό το εργαλείο μπορεί να βρεθεί αυτόματα η βέλτιστη σχεδιαστική λύση, δηλαδή το σχέδιο που είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ και ταυτόχρονα εξίσου αρκετά ισχυρό όσον αναφορά την αντοχή σε κάμψη, στρέψη ή εφελκυσμό. Στην περιοχή Command Manager από τις καρτέλες εντολών επιλέγεται το **«Solidworks Add – Ins»** έπειτα, επιλέγεται το **«Solidworks Simulation Premium»**. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία νέα καρτέλα **«Simulation»** ώστε από την περιοχή **«New Study»** να υλοποιηθεί η νέα μελέτη.



Εικόνα 4.1.3 *Solidworks Simulation Premium.*

Για να διεξαχθεί η μελέτης της τοπολογικής βελτιστοποίησης, από τη περιοχή New Study επιλέγεται το **«Topology Study»** όπου ανοίγει το παράθυρο επεξεργασιών. Μέσω του εργαλείου Topology Study δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί μη παραμετρική βελτιστοποίηση, με βάση τις παραμέτρους που καθορίζονται από το χρήστη το λογισμικό αυτόματα δείχνει που μπορεί να αφαιρεθεί το υλικό για να ελαχιστοποιηθεί η μάζα. Η μελέτη της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης ξεκινώντας με ένα μέγιστο χώρο σχεδίασης (που αντιπροσωπεύει το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος για ένα εξάρτημα) και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα εφαρμοζόμενα φορτία, τα εξαρτήματα και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς, αναζητά μια νέα διάταξη υλικού, εντός των ορίων της μέγιστης επιτρεπόμενης γεωμετρίας, ανακατανέμοντας το υλικό. Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα επιβάλλεται να ικανοποιεί όλες τις απαιτούμενες μηχανικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις.



Εικόνα 4.1.3.1 *Solidworks Topology Study.*

4.2 Πειραματικό μέρος

Για το πειραματικό μέρος της εργασίας, λήφθηκαν μετρήσεις από μία κοπέλα στην εφηβεία ηλικίας 13 ετών, 47 κιλά και 1,73 ύψος. Πάσχει από εφηβική ιδιοπαθής σκολίωση διπλού τύπου, δεξιά θωρακική μοίρα και αριστερά οσφυϊκή μοίρα, και έχει διαγνωσθεί από τα 6 της χρόνια. Ακολουθεί συντηρητική θεραπεία με κηδεμόνα για αποκατάσταση της παραμόρφωσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ανά 3 cm ύψους που "κερδίζει" το κορίτσι απαιτείται ρύθμιση στα πίεστρα, ενώ στα 5 cm πρέπει να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί νέος κηδεμόνας.



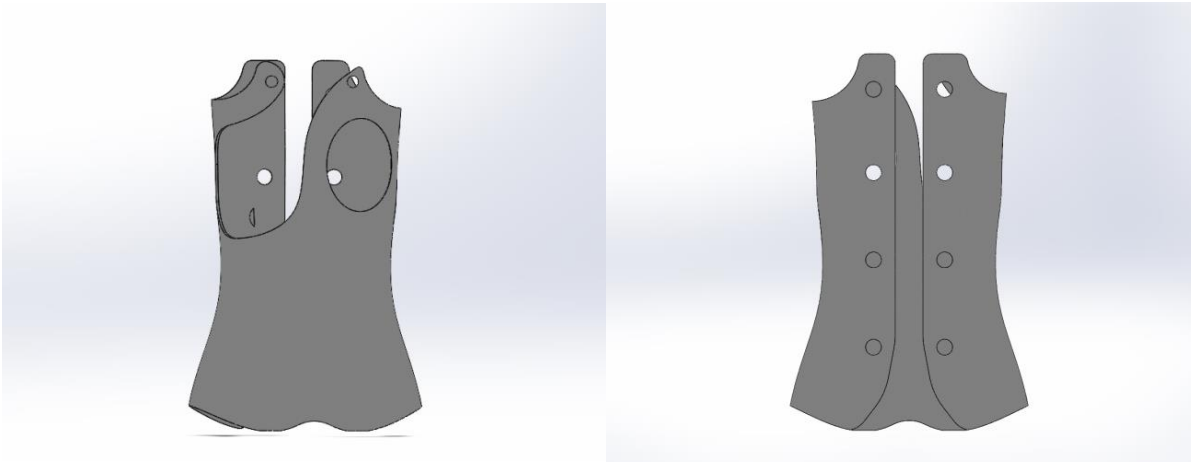
Εικόνα 4.2 *Κηδεμόνας ΣΣ.*

Η προσεγμένη κατασκευή του κηδεμόνα χαρακτηρίζεται από τις ομαλές εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες, το καλό φινίρισμα στις λεπτομέρειες και από το σχεδιασμό του. Παρατηρείται η τοποθέτηση δύο μεταλλικών ελασμάτων στην δεξιά θωρακική μοίρα και αντίστοιχα στην αριστερή οσφυϊκή, τα οποία έχουν τοποθετηθεί ώστε να ασκείται πίεση μέσω των επιθεμάτων χωρίς όμως να προκαλούν πόνο ή να εμποδίζουν την αναπνοή. Επίσης είναι εμφανές οι τέσσερις ιμάντες σύσφιξης στο πίσω μέρος του κηδεμόνα και ο ένας μπροστά που στόχο έχουν την καλή στήριξη και εφαρμογή ώστε να ασκούνται οι πιέσεις στα επιθυμητά σημεία. Οι δύο ιμάντες στην δεξιά θωρακική μοίρα, δένουν στο αριστερό μέρος του κηδεμόνα, ενώ οι άλλοι δύο ιμάντες στην αριστερή οσφυϊκή μοίρα, δένουν στο δεξί μέρος του κηδεμόνα. Συνεπώς η δράση του κηδεμόνα χαρακτηρίζεται από δυνάμεις με αντιστροφή. Ο κηδεμόνας είναι υπομασχάλιος και μπορεί να φορεθεί κάτω από τα ρούχα χωρίς να γίνεται αντιληπτός έχει επιτευχθεί ένα εξαιρετικό αποτέλεσμα με πάχος μικρότερο των 3 mm. Η κατασκευή είναι από υποαλλεργικό, θερμοπλαστικό υλικό πολυπροπυλενίου και τα εσωτερικά επιθέματα από αφρώδες υλικό.



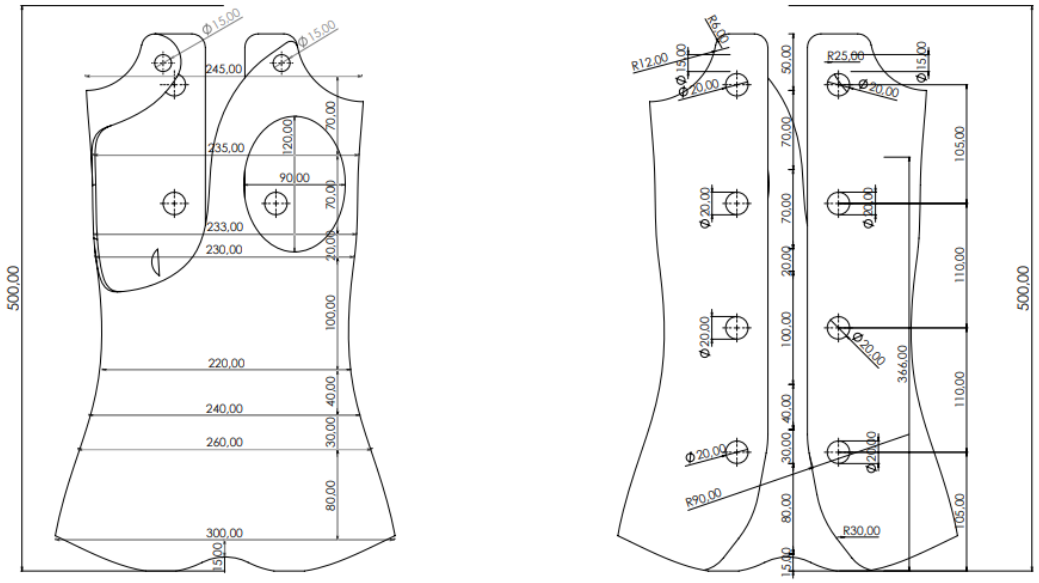
Εικόνα 4.2.1 *Ελάσματα, ιμάντες και πίεστρα.*

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τη βοήθεια του λογισμικού Solidworks σχεδιάστηκε ένας κηδεμόνας με βάση τις μετρήσεις που λήφθηκαν. Στην συνέχεια εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ώστε να συγκριθεί αν μπορεί να επιτευχθεί ένα εξίσου καλό αποτέλεσμα ο οποίος όμως θα προοριζόταν να κατασκευασθεί με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής. Παρατίθεται το ψηφιακό μοντέλο του κηδεμόνα που σχεδιάστηκε δίνοντας πάχος τριών χιλιοστών (3 mm) στην εξωτερική του επιφάνεια, με στόχο την πλήρη άνεση του ασθενή και την αποφυγή να δημιουργηθούν πληγές εξαιτίας της πίεσης που ασκείται κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του κηδεμόνα. Στην υποενότητα 4.1.2 έχουν αναφερθεί οι εντολές σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 4.2.2 *3D Πρόοψη και πίσω όψη.*

Με τη βοήθεια των εντολών **«New» → «New SOLIDWORKS Document» → «Drawing»** παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2.3 το δισδιάστατο σχέδιο με όλες τις διαστάσεις σε χιλιοστά (mm).



Εικόνα 4.2.3 *2D Πρόοψη και πίσω όψη.*

Βασικό στάδιο της μελέτη αποτελεί η ανάλυση, ο υπολογισμός και η βελτιστοποίηση του εκάστοτε προϊόντος. Η ανάλυση που βασίζεται στα πεπερασμένα στοιχεία και αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής, κινηματικής, θερμότητας κλπ. διεξήχθει από το SOLIDWORKS Simulation που είναι ενσωματωμένο στο περιβάλλον CAD.

Η μέθοδος αυτή είναι εφικτό να διαχειριστεί κάθε μορφή γεωμετρίας του αντικειμένου, όλα τα υλικά από τα οποία μπορεί να αποτελείται, όλες τις οριακές συνθήκες και όλες τι συνθήκες κίνησης, φόρτισης, θέρμανσης που μπορεί να υπόκειται.

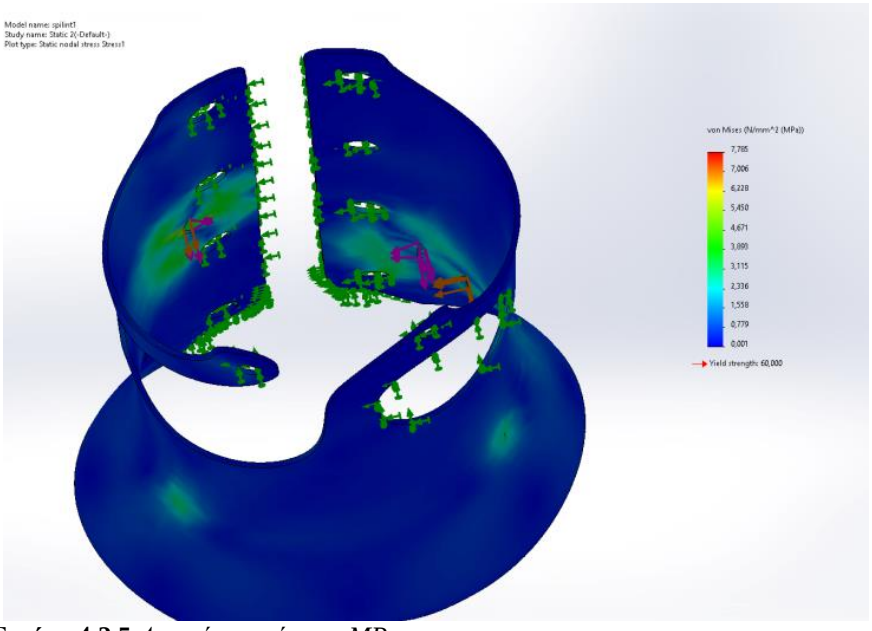
Το πρώτο στάδιο στη λειτουργία των συστημάτων αποτελεί η διαίρεση του σώματος υπό εξέταση σε συνδεδεμένα αλλά μη επικαλυπτόμενα στοιχεία. Αυτό επιτυγχάνεται με ψηφιοποίηση του σώματος σε κόμβους (nodes) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους κατάλληλα για τη δημιουργία των στοιχείων (elements). Η συλλογή των κόμβων και των στοιχείων συνιστούν το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Στη λειτουργία του συστήματος μια βασική επιλογή που κάνει κάθε χρήστης είναι η επιλογή του είδους των στοιχείων που θα χρησιμοποιήσει για να ενώσει τους κόμβους που θα ορίσει το μοντέλο. Η αποτύπωση της γεωμετρίας από ένα διακριτοποιημένο σώμα είναι μια δύσκολη διαδικασία που εξαρτάται στον μεγαλύτερο βαθμό από την ικανότητα του σχεδιαστή και των διαθέσιμων εργαλείων του κάθε λογισμικού, για την αποφυγή λανθασμένων αποτελεσμάτων τα σύγχρονα λογισμικά έχουν αυτοματοποιήσει τη διαδικασία.



Εικόνα 4.2.4 *Διακριτοποίηση.*

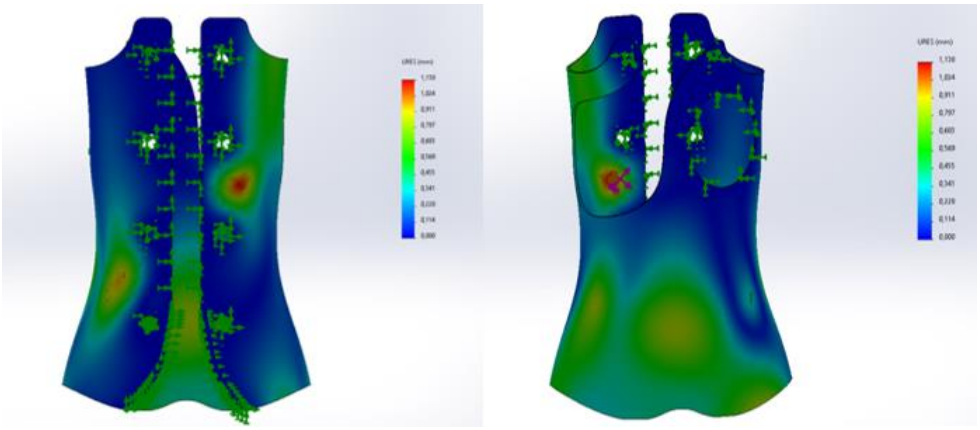
Έχοντας την γεωμετρία της κατασκευής, τον κατασκευαστικό νόμο του υλικού, τις αρχικές τάσεις και τις δεσμευμένες μετακινήσεις σε κάποια σημεία στήριξης του σώματος, ζητούμενο της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός των άγνωστων μετακινήσεων και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις και τάσεις σε κάθε απειροστό στοιχείο της κατασκευής. Για την στατική ανάλυση είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του υλικού και οι οριακές συνθήκες. Για προβλήματα μηχανικής, οι ιδιότητες του υλικού εξαρτώνται από το μέτρο Young και το λόγο Poisson. Όσον αφορά τον προσδιορισμό των φορτίων και των οριακών συνθηκών, το φορτίο μπορεί να είναι σημειακό ή κατανεμημένο, να είναι σταθερό ή να μεταβάλλεται με το χρόνο.

Για να προσομοιωθούν οι συνθήκες λειτουργίας θεωρήθηκε ότι ο κηδεμόνας είναι πακτωμένος (fixed) όπως υποδεικνύουν τα πράσινα διανύσματα. Για τα φορτία που ασκούνται κατά τη λειτουργία/εφαρμογή του κηδεμόνα, έχουν οριστεί οι μέγιστες δυνάμεις σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στις περιοχές που δένουν οι ιμάντες συγκράτησης καθώς και στη πυελική περιοχή που αποτελεί τη βάση στήριξης του κηδεμόνα όπως υποδεικνύουν τα μωβ διανύσματα.



Εικόνα 4.2.5 *Απεικόνιση τάσεων MPa.*

Η ζητούμενη παράμετρος προσεγγίζεται στο κάθε στοιχείο με ένα πολυώνυμο. Η παράμετρος μπορεί να είναι μια τιμή ή ένα διάνυσμα (π.χ. μετατόπιση). Ο βαθμός της πολυωνυμικής προσέγγισης εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων σε κάθε στοιχείο, τον αριθμό των αγνώστων σε κάθε κόμβο και από ορισμένες συνθήκες συνέχειας μεταξύ των ορίων των στοιχείων.



Εικόνα 4.2.6 *Απεικόνιση μετατόπισης (mm).*

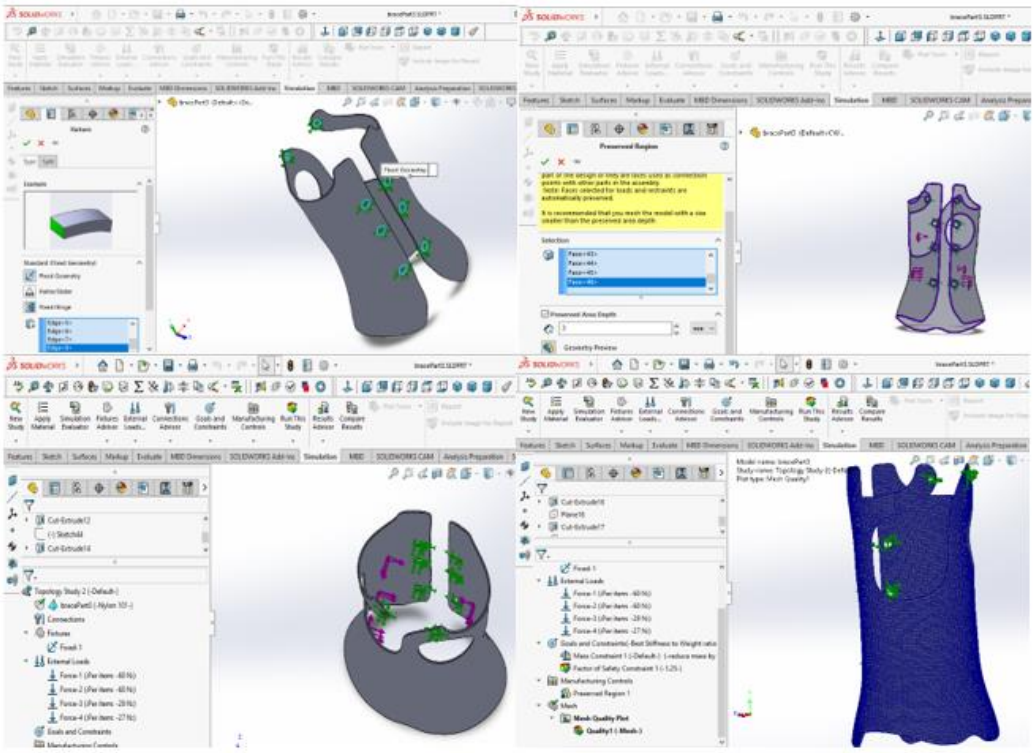
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι 7,785 MPa με το όριο ελαστικότητας (Yield Strength) να είναι στα 60 MPa, και η μέγιστη μετατόπιση 1,138 mm. Διατηρώντας τις συνθήκες φόρτισης και τους περιορισμούς από την στατική ανάλυση που προηγήθηκε, ορίστηκαν ως στόχοι της ανάλυσης η μείωση της μάζας κατά 50%.

Στην συνέχεια μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού Solidworks έλαβε χώρα η μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης του εξατομικευμένου κηδεμόνα σπονδυλικής στήλης. Για να διεξαχθεί το «Topology Study» και να "τρέξει" η επίλυση του προβλήματος είναι αρχικά απαραίτητο να καθοριστούν βασικά βήματα που θα αναλυθούν παρακάτω.

i. Από το παράθυρο **«Fixtures»** → **«Fixed Geometry»** γίνεται ο διαχωρισμός πεδίων σχεδιασμού, δηλαδή επιλέγεται ποια επιφάνεια του σχήματος παραμένει σταθερή.
ii. Από το **«External Loads»** → **«Force»** καθορίστηκε στο σύστημα SI, η δύναμη σε Newton (N) που θα ασκηθεί στο κηδεμόνα ίση με 49 (N), 29 (N) και 60 (N).
iii. Από το παράθυρο **«Goals and Constraints»** → **«Best Stiffness to weight ratio (default)»** → **«Reduce mass by (percentage)»** → **50%** επιλέγεται το ποσοστό επί της εκατό του υλικού που επιθυμείτε να αφαιρεθεί κατά τη μελέτη.
iv. Το βήμα στο παράθυρο **«Manufacturing Controls»** → **«Add Preserved Region»** χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται κάποια σημεία του εκάστοτε τεμαχίου να διατηρηθούν προστατευμένα και να μην μεταβληθεί το βάρος τους.
v. **«Mesh»** → **«Create Mesh»** το λογισμικό δημιουργεί αυτόματα πλέγμα λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο, την επιφάνεια και άλλες γεωμετρικές λεπτομέρειες. Το μέγεθος του δημιουργούμενου πλέγματος εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του μοντέλου. Ο έλεγχος πλέγματος επιτρέπει να καθοριστούν διαφορετικά μεγέθη στοιχείων για εξαρτήματα, όψεις, άκρες και κορυφές.
vi. Από το παράθυρο **«Apply Material»** → **«Plastic»** επιλέχθηκε, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το βελτιστοποιημένο κηδεμόνα σπονδυλικής στήλης και πληροί τις εξής προδιαγραφές:

Παράμετρος	Τιμή
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (Elastic Modulus) N/mm^2	1000
Λόγος Poisson v (Poisson's Ratio)	0,3
Πυκνότητα ρ (Mass Density) kg/m^3	1150
Αντοχή διαρροής (Yield Strength) N/mm^2	60

vii. Το τελευταίο βήμα είναι το παράθυρο **«Run This Study»** στο οποίο κατά τη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος μπορεί να αφαιρεθεί υλικό ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο σχεδιαστικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 4.2.7 *Topology Study*.

Από τα στιγμιότυπα οθόνης που λήφθηκαν κατά τη μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης διακρίνονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν και οι παράμετροι που ορίστηκαν, μέσω του λογισμικού Solidworks. Η μελέτη διήρκεσε περίπου 3 ώρες.

Για να επιτευχθεί η μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης με επιτυχία είναι απαραίτητο να οριστούν οι στόχοι που αναλύονται παραπάνω και σχετίζονται με τις περιοχές του μοντέλου που ενδεχομένως πρέπει να παραμείνουν ανέπαφες, με το επιθυμητό ποσοστό μείωσης της μάζας, με το ελάχιστο ή μέγιστο επιθυμητό πάχος τοιχωμάτων, οι μέγιστες αποδεκτές τάσεις και παραμορφώσεις, ο συντελεστής ασφαλείας καθώς και γεωμετρικοί στόχοι που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες μεθόδους κατασκευής.

Αρχικά για την κατασκευή του κηδεμόνα έχουν σχεδιαστεί στην πίσω όψη έξι διαμπερές οπές καθώς και δύο στην πρόοψη με σκοπό το δέσιμο των ιμάντων. Αυτές οι οπές στην μελέτη της βελτιστοποίησής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως εναλλακτικός τρόπος ώστε να ξεχωρίζουν τα είδη στήριξης. Η πάκτωση περιλαμβάνει δυνάμεις και ροπές σε όλες τις διευθύνσεις, έτσι δεν επιτρέπει καμία μετατόπιση ή περιστροφή.

Στην συνέχεια όπως και στην μελέτη των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζονται τα φορτία που ασκούνται. Πραγματοποιήθηκαν κάποιες εσωτερικές λεπτότοιχες τομές στα σημεία όπου εφαρμόζεται η μέγιστη τάση από τα επιθέματα πίεσης και τους ιμάντες καθώς επίσης και στην περιοχή της πυέλου δεξιά και αριστερά όπου θεωρείται ως βάση στήριξης του κηδεμόνα. Το μέγεθος των δυνάμεων που χρησιμοποιήθηκε ήταν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Είναι αρκετά ενδιαφέρον το γεγονός ότι τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται ανάλογα με τη στάση σώματος του ασθενή. Οι μεγαλύτερες μειώσεις της έντασης συμβαίνουν όταν οι ασθενείς είναι ξαπλωμένοι, ανεξάρτητα από την αρχική καθορισμένη τάση, οι πιο σημαντικές μειώσεις στην τάση του ιμάντα παρατηρούνται σταθερά στην πλάγια κατάκλιση, την πρηνή και την ύπτια θέση, τόσο για τους θωρακικούς όσο και για τους ιμάντες της πυέλου.

Έπειτα παρουσιάζονται τα σημεία που έχουν επιλεχθεί να παραμείνουν αμετάβλητα κατά την μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης και στην συνέχεια τους δίνετε πάχος 3 χιλιοστών (mm) όσο και το αρχικό πάχος σχεδιασμού του κηδεμόνα.

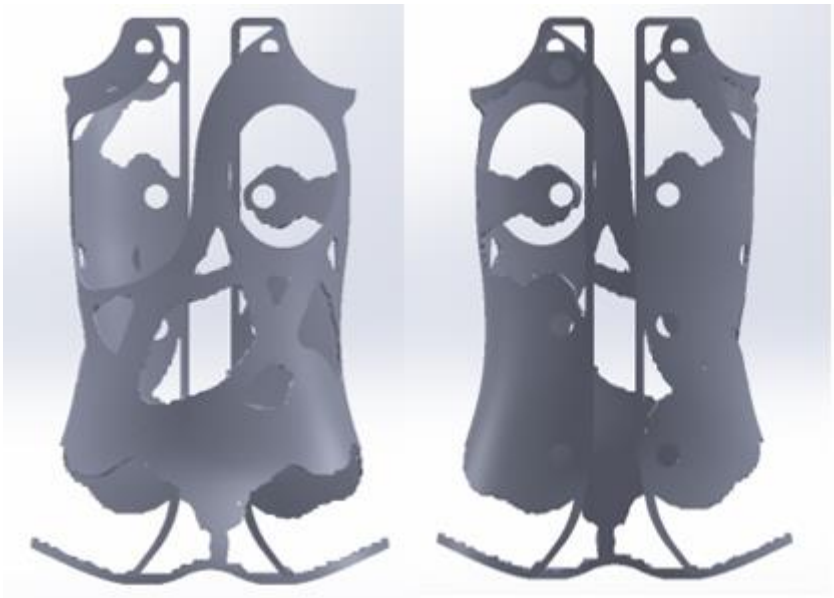
Το τελευταίο στάδιο πριν την επίλυση περιλαμβάνει το πλέγμα που δημιουργεί αυτόματα το λογισμικό

Solidworks. Τα βέλτιστα αποτελέσματα της όλης διαδικασίας προκύπτουν μέσω της διακριτοποίησης (mesh) του μοντέλου. Η διαδικασία διακριτοποίησης (meshing) αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για τα τελικά αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης και υπάρχει άμεση συσχέτιση με το χρόνο ολοκλήρωσης της ανάλυσης. Όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία που περιλαμβάνουν το μοντέλο, τόσο περισσότερος είναι ο χρόνος και η υπολογιστική ισχύς που απαιτούνται για να επιτευχθεί ο απαραίτητος υπολογισμός των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.2.8 *Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης.*

Όταν ολοκληρώθηκε η εκτέλεση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, το λογισμικό προτείνει την γεωμετρία που παρουσιάζεται (εικόνα 4.2.8) και δημιουργεί ένα ευκρινές χρωματικό διαχωρισμό μεταξύ των περιοχών του ψηφιακού μοντέλου που μπορούν να αφαιρεθούν καθώς και εκείνων που χρήζουν να διατηρηθούν προκειμένου να ικανοποιούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις του στηρίγματος. Όπως παρατηρείται και από την κλίμακα δίπλα από το τεμάχιο, με το μπλε και το μωβ χρώμα εμφανίζονται οι περιοχές του μοντέλου που μπορούν να αφαιρεθούν δηλαδή συμμετέχουν λιγότερο στην δυσκαμψία. Ενώ με αποχρώσεις του κίτρινου χρώματος εμφανίζονται οι περιοχές που συμμετέχουν άμεσα στην δυσκαμψία της γεωμετρίας ώστε να ικανοποιείται η λειτουργικότητα και σαφώς πρέπει να διατηρηθούν.



Εικόνα 4.2.6 *Απεικόνιση τοπολογικής βελτιστοποίησης.*

Για την καλύτερη απεικόνιση της προτεινόμενης γεωμετρίας, υπάρχει η επιλογή smoothed mesh, εφόσον έχει ορισθεί από την αρχή της μελέτης το επιθυμητό ποσοστό μείωσης της μάζας (50%) το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει πιθανές γεωμετρίες που προκύπτουν και με μικρότερα ή μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης. Τα μικρότερα ποσοστά μείωσης έχουν ως αποτέλεσμα την προσθήκη

περισσότερου υλικού στις αντίστοιχες περιοχές του μοντέλου. Η επιλογή της καταλληλότερης πυκνότητας υλικού σε αυτό το στάδιο εξαρτάται εξολοκλήρου από την κρίση και την εμπειρία του μηχανικού.

4.3 Συμπεράσματα

Οι στόχοι των μεθόδων βελτιστοποίησης επιδιώκουν την αναλογία μάζας και στιβαρότητας, δηλαδή το ελαφρύτερο δυνατό αποτέλεσμα σε συνδυασμό με τη μέγιστη δυσκαμψία που μπορεί να ικανοποιήσει τους λειτουργικούς στόχους της εκάστοτε κατασκευής. Η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης (Topology Optimization) προσφέρει μία νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία με αξιοσημείωτη μείωση μάζας. Η προσθετική κατασκευή μπορεί να επιτύχει σχεδόν οποιαδήποτε σύνθετη δομή σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, συνεπώς η μεθοδολογία της τοπολογικής βελτιστοποίησης τείνει να ταιριάζει με τη χρήση της προσθετικής κατασκευής.

Στην παρούσα εργασία με τη βοήθεια του λογισμικού Solidworks της Dassault Systems πραγματοποιήθηκε ανάλυση μελέτης τοπολογικής βελτιστοποίησης σε ένα μοντέλο νάρθηκα σπονδυλικής στήλης με στόχο να προσφέρει στον εκάστοτε ασθενή ένα ελαφρύτερο και ταυτόχρονα λειτουργικό στήριγμα. Για την ορθή κατασκευή ορθωτικών συσκευών όπως ο νάρθηκας σπονδυλικής στήλης βασική προϋπόθεση αποτελεί τα πραγματικά ανατομικά χαρακτηριστικά του ασθενούς να απεικονιστούν με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία της τρισδιάστατης σάρωσης από την οποία δίνεται η δυνατότητα συλλογής και επεξεργασίας πολύπλοκης γεωμετρικά πληροφορίας, όπως είναι η εξωτερική επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος καθώς και της αξονικής τομογραφίας CT (Computerized Tomography) από την οποία οι μετρήσεις που προκύπτουν μπορεί να αποκλίνουν το πολύ μέχρι 0,2 mm από την πραγματική τιμή. Σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας και στους δύο τομείς μπορεί να προκύψει ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο.

Παρά το γεγονός ότι τα βήματα που ακολουθήθηκαν προσομοιάζουν την διαδικασία κατασκευής ενός εξατομικευμένου κηδεμόνα, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δεν πληρούν τις προδιαγραφές για να τυπωθεί μία όρθωση με σκοπό την πρόληψη των παθήσεων της σπονδυλικής στήλης στην παιδική και εφηβική ηλικία. Τα μεγέθη της τάσης των ιμάντων, η πίεση που ασκείται από τα πρόσθετα επιθέματα, οι δυνάμεις ανάμεσα στον κορμό και το στήριγμα καθώς επίσης και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία μπορεί να κατασκευασθεί με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής μία εξατομικευμένη κατασκευή ήταν όλα καθορισμένα σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Ενώ η μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης κατέληξε σε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα μέσω του λογισμικού Solidworks και φαίνεται να μειώνεται η απαιτούμενο ποσότητα υλικού, το ψηφιακό μοντέλο σαν σχεδιαστικό αποτέλεσμα δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα.

Μία τέτοια κατασκευή απαιτεί την εφαρμογή της αντίστροφης μηχανικής ώστε να εμφανίζονται με ακρίβεια τα σημεία που πρέπει να εφαρμοστούν οι δυνάμεις καθώς και τη συμβουλή ενός ορθωτικού. Στην τεχνολογική διαδικασία της παραδοσιακής κατασκευής, ένας ασθενής που χρειάζεται προσθετική ή ορθωτική συσκευή απευθύνεται σε έναν προσθετικό ή ορθωτικό για να λάβει σχετικές ανθρωπομετρικές μετρήσεις

Την σημερινή εποχή οι μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, βασικό πλεονέκτημα της μεθοδολογίας είναι η κατασκευή οποιασδήποτε γεωμετρικής πολυπλοκότητας καθώς με την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής τοποθετείται υλικό επίπεδο προς επίπεδο. Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής AM καθιστά δυνατή την αύξηση της λειτουργικής απόδοσης με μικρότερο βάρος. Επιπλέον, μπορεί να μειώσει την ανάγκη για διαδικασίες συναρμολόγησης. Οι αλγόριθμοι τοπολογικής βελτιστοποίησης προσδιορίζουν τη βέλτιστη κατανομή του υλικού ώστε να πληρούνται οι οριακές συνθήκες που έχουν τεθεί. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την λήψη των απαραίτητων μετρήσεων, την διαδικασία σχεδίασης καθώς και την μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα ικανό να τυπωθεί παρουσιάζει μία ενδιαφέρουσα εξέλιξη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα της ορθοπεδικής.

Κεφάλαιο 5

5 Δομές πλέγματος (Lattice Structure)

Οι δομές πλέγματος (lattice structures) είναι μια μορφή αρχιτεκτονικής δομής που αποτελείται από επαναλαμβανόμενα μοτίβα συνδεδεμένων κόμβων και ακμών, δημιουργώντας ένα δίκτυο που μπορεί να φέρει φορτία. Εμφανίζονται σε διάφορα επιστημονικά πεδία και η τεχνολογία αυτή ξεχωρίζει για κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και εφαρμογές, τα επαναλαμβανόμενα φορτία, η ελαφρότητα και η μηχανική αντοχή είναι μερικά από αυτά [34].

Οι δομές πλέγματος αποτελούνται από ένα βασικό μοτίβο που επαναλαμβάνεται σε όλη την έκταση της δομής. Αυτή η επανάληψη επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων και την αύξηση της αντοχής. Η ελαφρότητα στις κατασκευές επιτυγχάνεται λόγω των κενών μεταξύ των στοιχείων τους. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές όπου το βάρος είναι κρίσιμος παράγοντας, όπως στην αεροναυπηγική και τη βιομηχανία αυτοκινήτων. Όμως το γεγονός αυτό, παρά το μικρό βάρος τους, οι δομές πλέγματος μπορούν να είναι εξαιρετικά ανθεκτικές. Η γεωμετρία τους επιτρέπει την απορρόφηση και διασπορά των φορτίων, καθιστώντας τις ανθεκτικές σε μεγάλες πιέσεις και καταπονήσεις. Επίσης ακόμα ένα χαρακτηριστικό για το οποίο ξεχωρίζουν οι δομές πλέγματος είναι ότι μπορούν να προσαρμοστούν και να σχεδιαστούν ώστε να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις φορτίου και λειτουργικότητας. Η προσαρμοστικότητα αυτή τις καθιστά χρήσιμες σε πολλές εφαρμογές, μερικές από αυτές θα αναφερθούν παρακάτω [34].

Μερικά παραδείγματα που βρίσκει εφαρμογή η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι στην κατασκευή αεροπλάνων και διαστημικών σκαφών όπου το χαμηλό βάρος και η υψηλή αντοχή είναι απαραίτητα. Όπως επίσης, σε πλαίσια αυτοκινήτων για τη βελτίωση της ασφάλειας και τη μείωση του βάρους. Καθώς δεν μπορεί να λείπει και ο κλάδος της ιατρικής με χρήση σε προσθετικές κατασκευές, όπου η ελαφρότητα και η δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες του ασθενούς είναι σημαντικές. Δηλαδή, χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως βιομηχανικά εξαρτήματα, ιατρικές συσκευές και προϊόντα καταναλωτών όπου η βελτιστοποίηση της αντοχής και της ελαφρότητας είναι κρίσιμη [34].

Οι δομές πλέγματος είναι πολυδιάστατες και κρίσιμες για την ανάπτυξη ελαφριών, ανθεκτικών και ευέλικτων κατασκευών και προϊόντων σε πολλές βιομηχανίες και επιστημονικά πεδία [34].

5.1 Λογισμικό nTop

Το λογισμικό nTop (πρώην nTopology) αποτελεί ένα σύγχρονο εργαλείο σχεδιασμού που απευθύνεται στον κλάδο των μηχανικών της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, των ιατρικών συσκευών και του βιομηχανικού σχεδιασμού. Ιδρύθηκε το 2015 από τον Bradley Rothenberg με στόχο την δημιουργία οποιαδήποτε γεωμετρίας ανεξάρτητα από το πόσο περίπλοκη μπορεί να είναι έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις προϊόντων υψηλής απόδοσης. Το λογισμικό nTop χαρακτηρίζεται από την ομάδα των ιδρυτών του ως «το λογισμικό της επόμενης γενιάς» καθώς διαφέρει από τα παραδοσιακά CAD λογισμικά, εφόσον λειτουργεί με την πεποίθηση ότι η ικανότητα των μηχανικών να καινοτομούν δεν πρέπει να περιορίζεται από το λογισμικό σχεδιασμού που χρησιμοποιούν. Το nTop χρησιμοποιείται για την κατασκευή πρωτοποριακών προϊόντων καθώς είναι ένα λογισμικό που έχει συνδυάσει τεχνολογίας/τεχνικές όπως Lattice Structure (Δομές Πλέγματος), Generative Design (Δημιουργικός Σχεδιασμός), Topology Optimization (Τοπολογική Βελτιστοποίηση), Simulation (Προσομοίωση), Design Automation (Αυτοματοποίηση Σχεδιασμού), Integrations (Ενσωματώσεις), Implicit Interop, Field Optimization (Βελτιστοποίηση Πεδίου) για να προσφέρουν λύσεις δημιουργώντας ελαφριά και άριστα εξαρτήματα με ενσωματωμένες λειτουργικές απαιτήσεις [34].

Το λογισμικό nTop χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία για την μελέτη εφαρμογής της τεχνολογίας Lattice Structure, σε συνδυασμό με τη μελέτη Ομογενοποίησης (Homogenization). Παρακάτω θα αναλυθούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού [34].

5.1.1 Μονάδα Κυψέλης (Unit Cell)

Η μονάδα κυψέλης (Unit Cell) στο πλαίσιο των πλεγμάτων (Lattices) στην πλατφόρμα nTop (nTopology) αναφέρεται σε ένα βασικό δομικό στοιχείο το οποίο επαναλαμβάνεται για να δημιουργήσει ένα μεγαλύτερο και πιο πολύπλοκο πλέγμα. Η πλατφόρμα nTop χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την ανάλυση προηγμένων μηχανικών κατασκευών, ειδικά αυτών που δημιουργούνται με μεθόδους πρόσθετης κατασκευής (Additive Manufacturing) [34].

Μία μονάδα κυψέλης είναι το μικρότερο επαναλαμβανόμενο τμήμα ενός πλέγματος. Αυτή η μονάδα μπορεί να είναι απλή ή πολύπλοκη ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Οι μονάδες κυψέλης επαναλαμβάνονται σε τρεις διαστάσεις για να σχηματίσουν το συνολικό πλέγμα. Αυτή η επαναληψιμότητα εξασφαλίζει ομοιογένεια και συμμετρία στη δομή. Επίσης, μπορούν να παραμετροποιηθούν, δηλαδή οι διαστάσεις και οι ιδιότητές τους μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια για να επιτευχθεί η επιθυμητή μηχανική συμπεριφορά και οι φυσικές ιδιότητες. Στο λογισμικό nTop υπάρχει η δυνατότητα για επιλογή από μία βιβλιοθήκη προκαθορισμένων μονάδων κυψέλης ή η δημιουργία, χρησιμοποιώντας παραμετρικά εργαλεία σχεδίασης [34].

Η πλατφόρμα παρέχει εργαλεία για την ανάλυση και βελτιστοποίηση των μονάδων κυψέλης με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η αντοχή, η ακαμψία, και η απορρόφηση ενέργειας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μονάδων κυψέλης, όπως, Tetragonal (τετραγωνική), Hexagonal (εξαγωνική), Rhombic (ρομβική), Octahedral (οκταεδρική), κάθε τύπος έχει διαφορετικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Οι προσομοιώσεις στο λογισμικό nTop μπορούν να προβλέψουν την συμπεριφορά του πλέγματος κάτω από διάφορες συνθήκες όπως φορτία και θερμοκρασία [34].

5.1.2 Κατηγοριοποίηση μονάδων κυψέλης

Στην πλατφόρμα nTop, οι μονάδες κυψέλης κατηγοριοποιούνται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τη γεωμετρία και τις ιδιότητες τους. Τρεις από τους βασικούς τύπους είναι οι Graph Unit Cell, TPMS Unit Cell και Orient Unit Cell [34].

Graph Unit Cell είναι μια μονάδα κυψέλης που βασίζεται σε γραφήματα (graphs) για να ορίσει τη γεωμετρία της. Τα γραφήματα είναι δομές που αποτελούνται από κόμβους (nodes) και ακμές (edges), και η χρήση τους επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων και συνδεδεμένων πλεγμάτων. Στην πλατφόρμα nTop, οι Graph Unit Cells μπορούν να παραμετροποιηθούν εύκολα και να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν πλέγματα με επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες [34].

TPMS Unit Cell (Triply Periodic Minimal Surface Unit Cell) είναι μια μονάδα κυψέλης που βασίζεται σε επιφάνειες με ελάχιστη καμπυλότητα που επαναλαμβάνονται τριπλά περιοδικά στον χώρο. Οι TPMS είναι γνωστές για τις εξαιρετικές μηχανικές τους ιδιότητες και τη βιοσυμβατότητά τους, καθιστώντας τες ιδανικές για βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως, για παράδειγμα, τα οστικά εμφυτεύματα. Κάποια κοινά παραδείγματα TPMS είναι οι επιφάνειες Gyroid, Schwarz, και Diamond [34].

Walled TPMS Unit Cell είναι μια ειδική παραλλαγή της τυπικής TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) μονάδας κυψέλης. Αυτή η παραλλαγή περιλαμβάνει την προσθήκη "τοιχωμάτων" (walls) στις επιφάνειες της TPMS κυψέλης, με αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας και των μηχανικών ιδιοτήτων της μονάδας. Τα τοιχώματα προσθέτουν επιπλέον υλικό στις ελάχιστες επιφάνειες της TPMS, ενισχύοντας την αντοχή και την ακαμψία της δομής [34].

Orient Unit Cell είναι μια μονάδα κυψέλης στην οποία η κατεύθυνση (προσανατολισμός) της κυψέλης μπορεί να καθοριστεί και να παραμετροποιηθεί. Αυτός ο τύπος κυψέλης επιτρέπει τον έλεγχο του τρόπου που το πλέγμα ευθυγραμμίζεται με τον άξονα ή τη γεωμετρία του αντικειμένου που σχεδιάζεται. Ο έλεγχος του προσανατολισμού μπορεί να είναι κρίσιμος για την επίτευξη συγκεκριμένων μηχανικών ή αισθητικών ιδιοτήτων στο τελικό προϊόν [34].

Η κατανόηση και η αξιοποίηση των μονάδων κυψέλης επιτρέπει στους μηχανικούς και σχεδιαστές να δημιουργήσουν αποδοτικές και προηγμένες κατασκευές που δεν θα ήταν δυνατές με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής [34].

5.1.3 Παραμετρική μονάδα κυψέλης (Parameter Unit Cell)

Parameter Unit Cell είναι το παράθυρο όπου μπορεί να ρυθμιστούν και να παραμετροποιηθούν οι διαστάσεις, η μορφή και οι ιδιότητες της κυψέλης που έχει επιλεχθεί. Αυτές οι παράμετροι επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών της κυψέλης, δίνοντάς τη δυνατότητα να προσαρμοστεί το σχέδιο στις ανάγκες της εφαρμογής [34].

Το παράθυρο αυτό δίνει δύο επιλογές ανάμεσα σε Implicit View και Graph View όπου στην πρώτη περίπτωση στο Implicit View, η γεωμετρία της κυψέλης περιγράφεται μέσω εξισώσεων ή αλγορίθμων που καθορίζουν τις επιφάνειες και τις δομές της κυψέλης. Αυτή η μέθοδος είναι πιο μαθηματική και αλγοριθμική, επιτρέποντας την περιγραφή πολύπλοκων γεωμετριών με ακρίβεια και λιγότερη υπολογιστική ισχύ. Ενώ στη δεύτερη περίπτωση στο Graph View, η γεωμετρία της κυψέλης περιγράφεται μέσω διαγραμμάτων και κόμβων. Είναι μια πιο οπτική και διαισθητική μέθοδος για τον σχεδιασμό και την κατανόηση της δομής της κυψέλης. Χρησιμοποιεί nodes και edges για να περιγράψει τη σύνθεση της κυψέλης και επιτρέπει τη γρήγορη προσαρμογή και επεξεργασία των στοιχείων της [34].

Όταν επιλέγεται το Implicit View δίνεται η επιλογή για Thickness, αυτό το πάχος αναφέρεται στο πάχος των τοιχωμάτων της κυψέλης ή των επιφανειών που συνθέτουν τη γεωμετρία της κυψέλης. Το πάχος αυτό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως την αντοχή, την ακαμψία, και το βάρος του. Έτσι, η ρύθμιση του πάχους σου επιτρέπει να βελτιστοποιήσεις την κυψέλη για συγκεκριμένες εφαρμογές και απαιτήσεις [34].

5.1.4 Χάρτες Κυψελών (Cell Maps)

Το Cell Maps επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν και να διαχειρίζονται πολύπλοκες γεωμετρίες κυψελών (cells). Αυτές οι γεωμετρίες χρησιμοποιούνται συνήθως για να δημιουργήσουν δομές που είναι ελαφριές αλλά ταυτόχρονα ανθεκτικές, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπως η αεροδιαστημική και η ιατρική, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω [34].

Οι χρήστες μπορούν να δημιουργούν πλέγματα κυψελών με διάφορα σχήματα και μεγέθη. Αυτά τα πλέγματα μπορούν να είναι περιοδικά ή μη περιοδικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Υπάρχει η δυνατότητα να προσαρμόζονται οι διαστάσεις, η διάταξη και τα χαρακτηριστικά των κυψελών ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της δομής τους [34].

Επίσης, το nTop παρέχει εργαλεία για την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων των πλεγμάτων κυψελών και για τη βελτιστοποίηση της δομής τους με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις φορτίου και υλικών. Το πιο σημαντικό είναι ότι το εργαλείο Cell Maps επιτρέπει το συνδυασμό των κυψελωτών δομών με άλλες γεωμετρίες για να δημιουργηθούν πολύπλοκες και ολοκληρωμένες κατασκευές [34].

5.1.5 Κατηγορίες Cell Maps

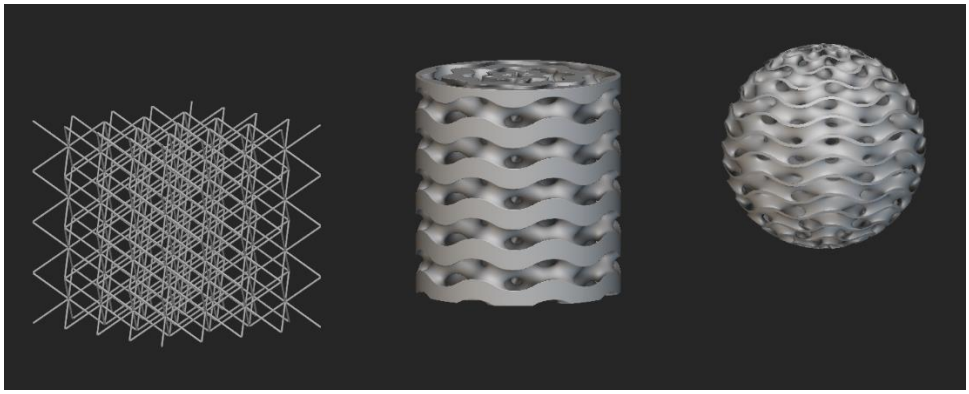
Οι τρεις βασικές κατηγορίες Cell Maps στο λογισμικό nTop (nTopology) είναι Rectangular Cell Maps, Cylindrical Cell Maps και Spherical Cell Maps. Κάθε κατηγορία έχει συγκεκριμένες εφαρμογές και χρήσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τις ανάγκες της κατασκευής και της εφαρμογής [34].

Rectangular Cell Maps (Ορθογωνικοί Χάρτες Κυψελών), δημιουργούν ένα πλέγμα κυψελών με ορθογωνική διάταξη, όπου κάθε κυψέλη είναι ένας μικρός ορθογώνιος χώρος. Αυτός ο τύπος χάρτη επιτρέπει τη δημιουργία πλεγμάτων που είναι εύκολο να κατασκευαστούν και να αναλυθούν λόγω της απλότητας και της κανονικότητάς τους [34].

Cylindrical Cell Maps (Κυλινδρικοί Χάρτες Κυψελών) αφορούν μια μέθοδο για τη δημιουργία και τον

έλεγχο γεωμετρικών μοτίβων με βάση κυψελωτές δομές σε κυλινδρικά συστήματα αναφοράς. οι κυλινδρικοί χάρτες κυψέλης παρέχουν έναν τρόπο για να διατάσσεται και να προβάλλεται μοτίβα κυψελών (όπως κυψελοειδείς ή περιοδικές δομές) σε επιφάνειες ή όγκους με κυλινδρική συμμετρία. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου η δομή που δημιουργείται πρέπει να προσαρμοστεί σε κυλινδρικές γεωμετρίες, όπως σωλήνες, ακροφύσια ή άλλα κυλινδρικά εξαρτήματα [34].

Spherical Cell Maps είναι μια μέθοδος που επιτρέπει τη δημιουργία και τον έλεγχο κυψελωτών δομών σε σφαιρικά συστήματα συντεταγμένων. Όπως και με τους κυλινδρικούς χάρτες κυψέλης, αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τη διανομή κυψελωτών μοτίβων σε σφαιρικές επιφάνειες ή όγκους, όπου οι συντεταγμένες βασίζονται στη σφαιρική συμμετρία. Για παράδειγμα, κρανία σε βιοϊατρικές εφαρμογές [34].



Εικόνα 5.1.5 *Rectangular, Cylindrical & Spherical Volume Lattice* [34].

5.2 Εισαγωγή τρισδιάστατου μοντέλου CAD στο λογισμικό nTop

Στην πλατφόρμα nTop, τα αρχεία που εισάγονται πρέπει να έχουν συμβατές μορφές CAD ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν και να χρησιμοποιηθούν για μοντελοποίηση και διακριτοποίηση με ακρίβεια. Οι πιο συνηθισμένες μορφές αρχείων CAD που υποστηρίζει η πλατφόρμα nTop περιλαμβάνουν μορφές αρχείων όπως .sat & .sab, .prt, .sldpart κ.α..

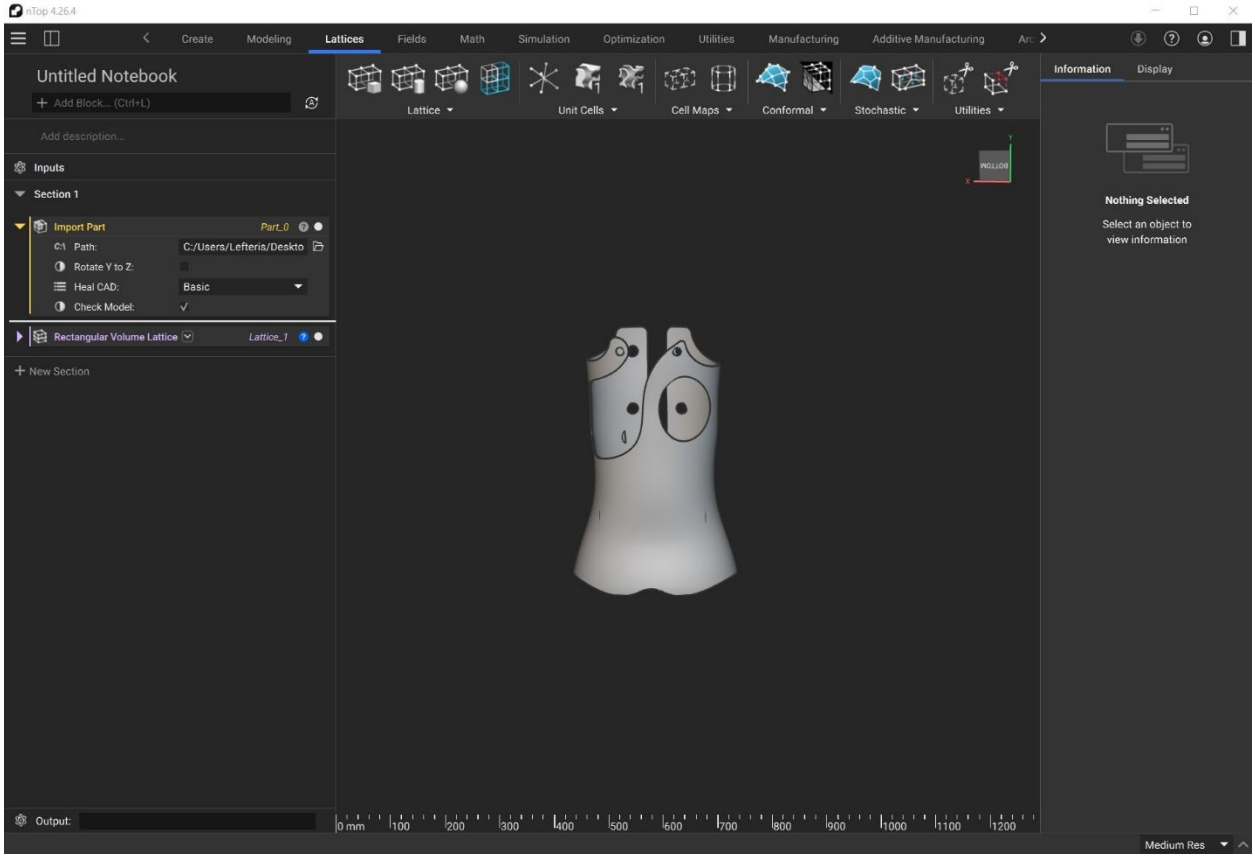
Η χρήση αυτών των μορφών αρχείων είναι σημαντική για λόγους όπως η συμβατότητα, εφόσον οι μορφές αυτές είναι ευρέως αποδεκτές και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία CAD, διασφαλίζοντας ότι τα αρχεία μπορούν να εισαχθούν και να επεξεργαστούν χωρίς προβλήματα συμβατότητας. Ένας σημαντικός λόγος ακόμα είναι η υψηλή ακρίβεια γεωμετρίας και τοπολογίας, που είναι απαραίτητη για ακριβή μοντελοποίηση και διακριτοποίηση. Όπως και η υποστήριξη λογισμικού αφού, η πλατφόρμα nTop έχει σχεδιαστεί για να δουλεύει άψογα με αυτές τις μορφές, παρέχοντας εργαλεία για την επεξεργασία και την ανάλυση των εισαγόμενων μοντέλων. Υπάρχουν τρεις κύριοι διαφορετικοί μέθοδοι εισαγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου στην πλατφόρμα nTop:

i. ***Drag & Drop***
Με ανοιχτό το παράθυρο της πλατφόρμας nTop, από τον εξερευνητή αρχείων σύρεται και αφήνεται στο περιβάλλον εργασίας του nTop το αρχείο με τη συμβατή μορφή όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

ii. ***File -> Import***
Menu -> File -> Import -> Εξερεύνηση Αρχείων -> Μορφή αρχείου με συμβατή κατάληξη ή
CTRL – i -> Εξερεύνηση Αρχείων -> Μορφή αρχείου με συμβατή κατάληξη

iii. ***Import Block***
Στην γραμμή αναζήτησης (+ Add Block) πληκτρολογείται “Import” ή CTRL – L ώστε να εισαχθεί το επιλεγμένο block.

Για την εισαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου στην πλατφόρμα nTop χρησιμοποιήθηκε η κατάληξη αρχείου .sat και η μέθοδος Drag & Drop.



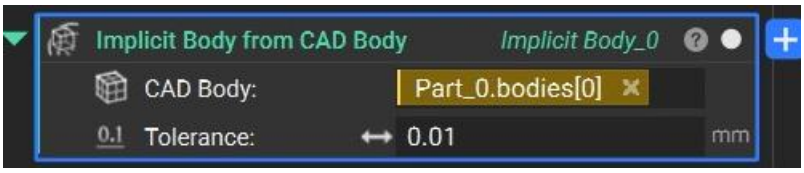
Εικόνα 5.2 *Εισαγωγή τρισδιάστατου μοντέλου στο λογισμικό nTop.*

5.2.1 Implicit Body from CAD Body

Η εντολή "Implicit Body from CAD Body" στο λογισμικό nTop μετατρέπει ένα σώμα CAD (από συμβατές μορφές αρχείων όπως .sat, .sab, .prt, .sldpart κ.λπ., σε ένα implicit (έμμεσος) σώμα. Αυτό είναι ένα κρίσιμο βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού και ανάλυσης, καθώς τα implicit σώματα παρέχουν πολλές προοπτικές και πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά CAD μοντέλα.

Η εντολή μετατρέπει την γεωμετρία του CAD μοντέλου σε μια μορφή που χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις για να περιγράψει το σχήμα. Αυτή η περιγραφή είναι γνωστή ως implicit μορφή όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η implicit γεωμετρία χρησιμοποιεί συνεχείς μαθηματικές συναρτήσεις για την περιγραφή του όγκου και των επιφανειών, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά CAD μοντέλα που χρησιμοποιούν γεωμετρίες με επιφάνειες και πολύγωνα.

Παρέχει αυξημένη ακρίβεια στις γεωμετρίες, καθώς οι μαθηματικές συναρτήσεις μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια πολύπλοκα σχήματα χωρίς τον περιορισμό των πολύγωνων. Προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη μοντελοποίηση, επιτρέποντας την εύκολη παραμετροποίηση και μετασχηματισμό των γεωμετριών. Οι implicit γεωμετρίες είναι ιδανικές για παραμετρικό σχεδιασμό, προσομοιώσεις φυσικών φαινομένων (π.χ. θερμική ανάλυση, δομική ανάλυση), και βελτιστοποίηση σχεδιασμού.



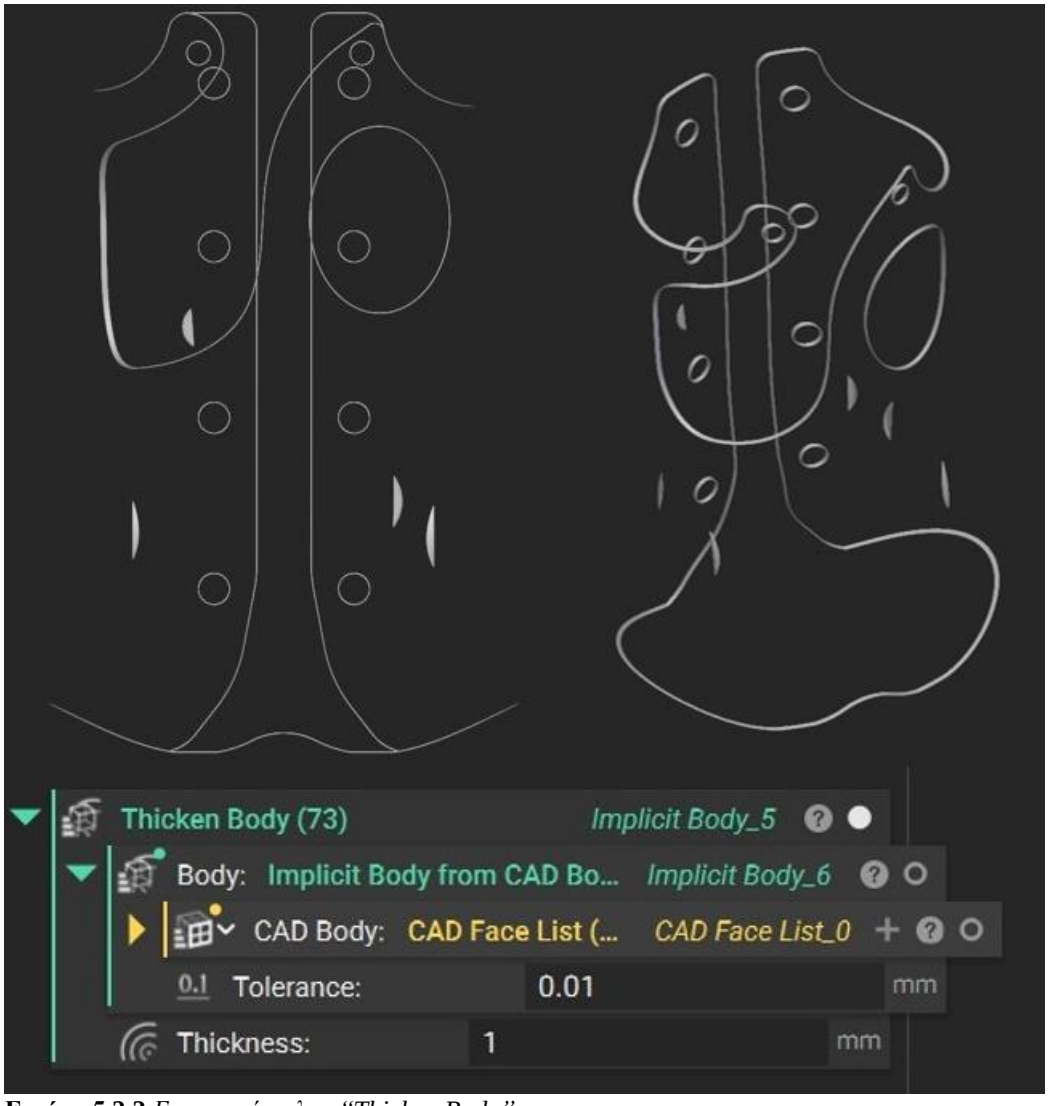
Εικόνα 5.2.1 *Implicit Body from CAD Body.*

Η παράμετρος Tolerance στο παράθυρο της εντολής "Implicit Body from CAD Body" στην πλατφόρμα nTop καθορίζει το επίπεδο ακρίβειας που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη μετατροπή της γεωμετρίας του CAD

μοντέλου σε ένα implicit σώμα. Συγκεκριμένα, αυτή η παράμετρος ελέγχει πόσο “πιστά” η γεωμετρία του αρχικού CAD μοντέλου θα αναπαραχθεί στο νέο implicit μοντέλο. Tolerance (Ανοχή), είναι ένα μέτρο της επιτρεπόμενης απόκλισης ή σφάλματος μεταξύ της αρχικής γεωμετρίας του CAD μοντέλου και της παραγόμενης implicit γεωμετρίας. Εκφράζεται συνήθως σε μονάδες μήκους όπως για παράδειγμα τα χιλιοστά.

5.2.2 Thicken Body & CAD Face List

Το μπλοκ “Thicken Body” πυκνώνει το τμήμα και προς τις δύο κατευθύνσεις, χρησιμοποιώντας το όριο του σώματος ως κεντρική γραμμή του πάχους. Εφόσον έχει εισαχθεί το τρισδιάστατο μοντέλο στην πλατφόρμα nTop, χρησιμοποιήθηκε η εντολή “Thicken Body” περιμετρικά στις ακμές (edges) του τεμαχίου και στις επιφάνειες (faces) που ασκούνται οι δυνάμεις ώστε να παραμείνουν με σταθερό πάχος και αμετάβλητα σε κάθε μελέτη εφαρμογής. Το μπλοκ “CAD Face List” χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή πολλαπλών όψεων CAD (CAD faces) για την οριοθέτηση της οριακής συνθήκης (Boundary Condition).

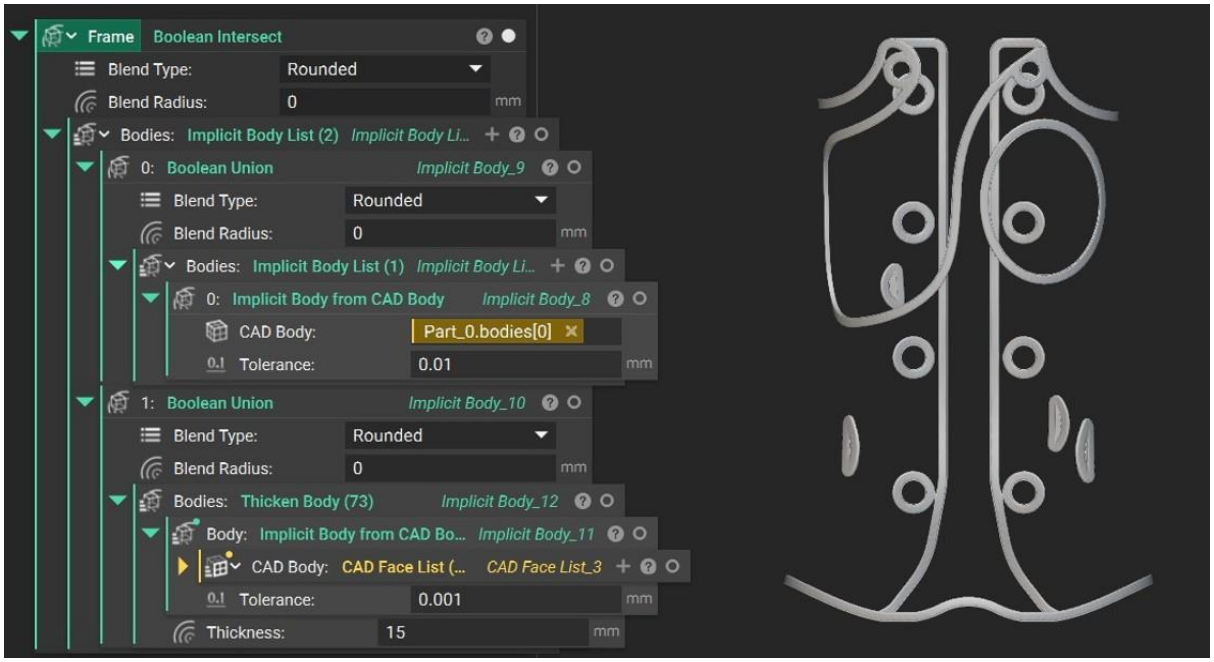


Εικόνα 5.2.2 *Εφαρμογή μπλοκ “Thicken Body”.*

5.2.3 Boolean Intersect, Boolean Subtract & Boolean Union

Το μπλοκ “Boolean Intersect” είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων γεωμετριών μέσω του υπολογισμού της τομής μεταξύ δύο ή περισσότερων Implicit σωμάτων. Διατηρεί μόνο την περιοχή όπου τα Implicit σώματα επικαλύπτονται ή τέμνονται. Με άλλα λόγια, το αποτέλεσμα της τομής είναι η γεωμετρία που προκύπτει από τις κοινές περιοχές των επιλεγμένων σωμάτων. Καθώς επίσης δίνει τη δυνατότητα για μίξη των

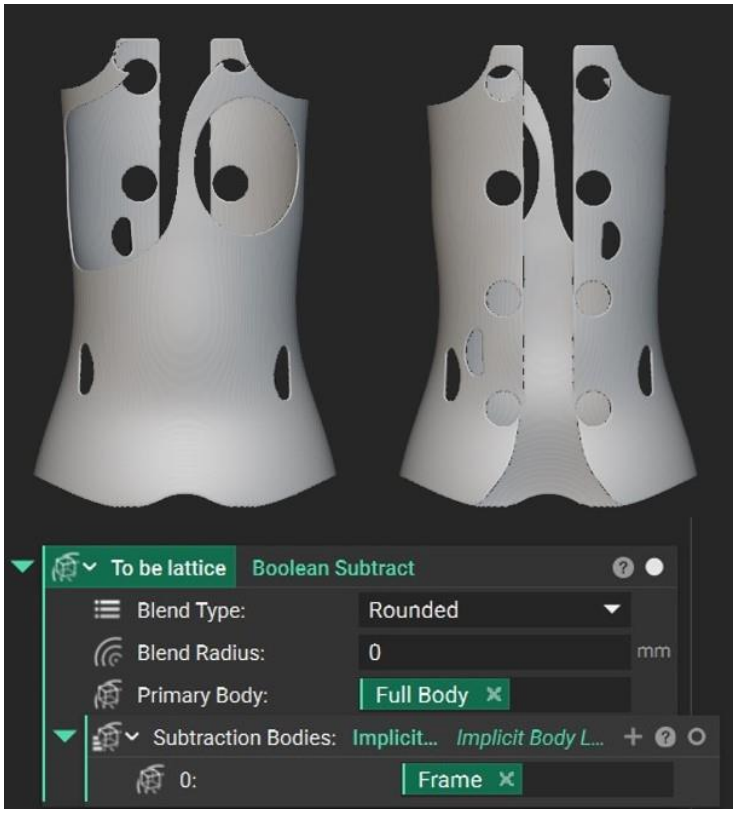
γεωμετριών (Optional Blending), δηλαδή επιτρέπει την «λείανση» των γωνιών ή των αιχμών που δημιουργούνται στην τομή των σωμάτων, δημιουργώντας μια πιο ομαλή μετάβαση μεταξύ των γεωμετριών. Το μπλοκ “Boolean Intersect” χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία για την τελική υλοποίηση του Frame του τεμαχίου.



Εικόνα 5.2.3 *Frame τρισδιάστατου μοντέλου.*

Το μπλοκ “Boolean Subtract” χρησιμοποιείται για να αφαιρεί ένα ή πολλαπλά Implicit Body που τέμνεται με ένα ή περισσότερα σώματα. Το αποτέλεσμα είναι ένα νέο γεωμετρικό σχήμα από το οποίο λείπουν τα τμήματα που επικαλύπτονταν με το σώμα που αφαιρέθηκε. Το τελικό σώμα περιέχει μόνο την περιοχή που ήταν αποκλειστικά στο αρχικό σώμα και δεν τέμνονταν με τα σώματα που αφαιρέθηκαν.

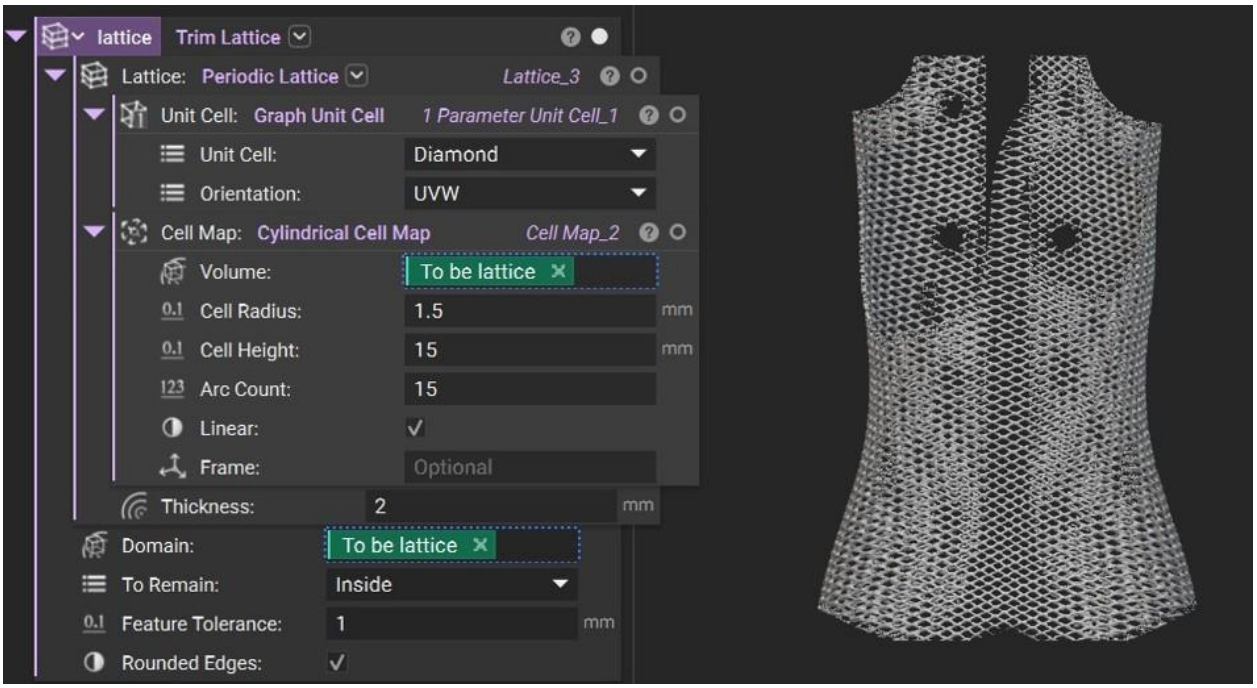
Το μπλοκ “Boolean Union” χρησιμοποιείται για την ένωση δύο ή περισσότερων Implicit Body σε ένα ενιαίο γεωμετρικό σώμα. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει τη συγχώνευση πολλών γεωμετριών σε μια ενιαία οντότητα, χωρίς να διατηρούνται οι περιοχές όπου τα σώματα επικαλύπτονται ως ξεχωριστά.



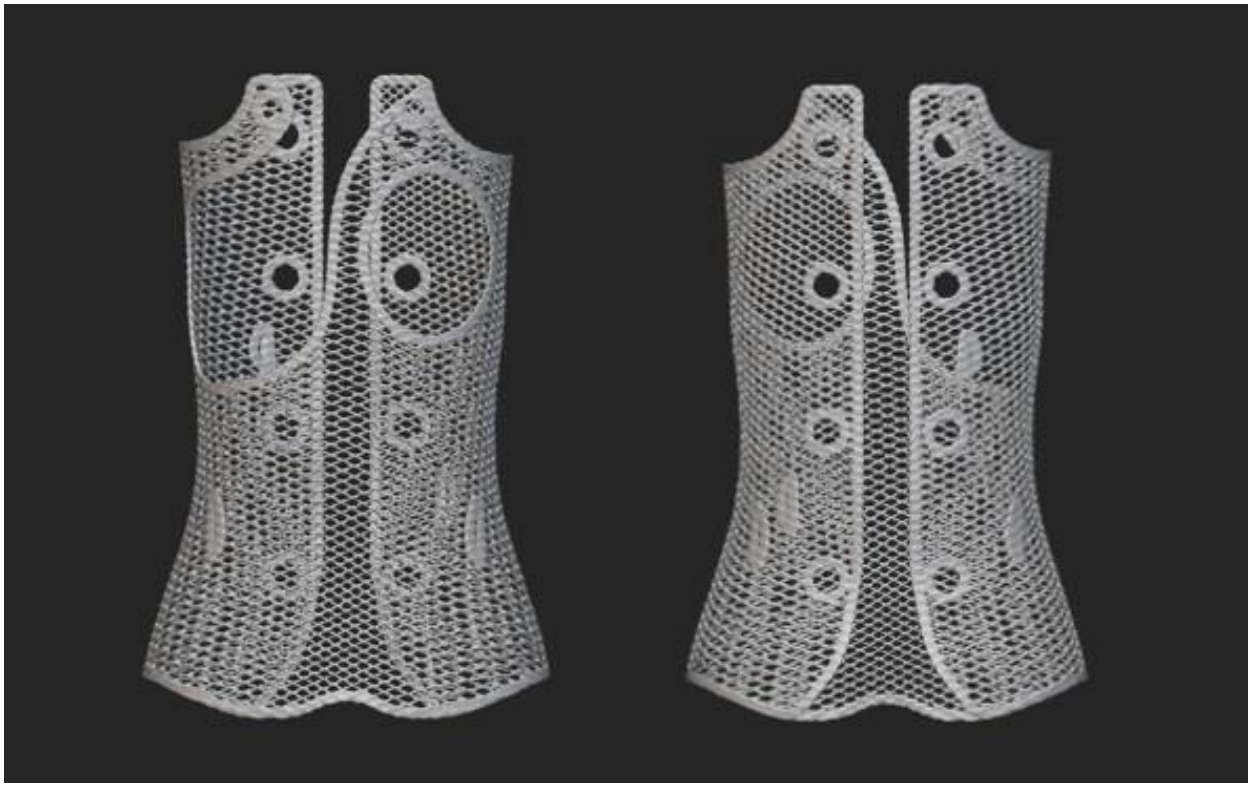
Εικόνα 5.2.3.1 *Εφαρμογή μπλοκ “ Boolean Subtract ”.*

5.2.4 Periodic Lattice

Periodic Lattice είναι ένα δομικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία **περιοδικών πλεγμάτων** (lattices), τα οποία επαναλαμβάνουν κυψελωτές μονάδες (Unit Cells) σε έναν καθορισμένο χώρο με συγκεκριμένο μοτίβο, όπως εξηγήθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου.



Εικόνα 5.2.4 *Periodic Lattice.*

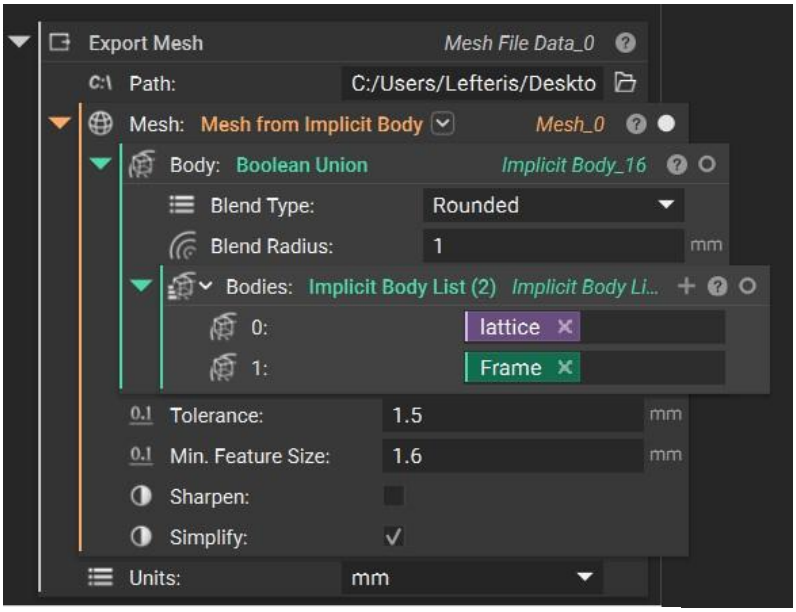


Εικόνα 5.2.4.1 *Πλεγματική δομή τρισδιάστατου μοντέλου μπροστά & πίσω όψη.*

5.2.5 Mesh from Implicit Body

Με τη βοήθεια του μπλοκ “ Mesh from Implicit Body ” το οποίο δημιουργεί διακριτοποίηση (Mesh) από ένα Implicit Body και μπορεί να διατηρήσει ευκρινή χαρακτηριστικά αλλά και να μειώσει τον αριθμών τριγώνων του τελικού αποτελέσματος, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου από το λογισμικό nTop. Από το μπλοκ εξαγωγής επιλέχθηκε η αποθήκευση του αρχείου σε κατάληξη .stl ώστε να είναι συμβατή με το λογισμικό Solidworks όπου θα ακολουθήσει η μελέτη σύγκρισης.

Κατά τη μεταφορά του αρχείου από το λογισμικό nTop στο λογισμικό Solidworks διαπιστώθηκε ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης στο τρισδιάστατο μοντέλο με τη πλεγματική δομή. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου πληροφορίας που υπάρχει στο πλέγμα, χρειάζεται τεράστια υπολογιστική ισχύ. Συνεπώς, παρακάτω θα ακολουθήσει η διαδικασία μελέτης της ομογενοποίησης (Homogenization) από τη πλατφόρμα nTop.



Εικόνα 5.2.5 *Mesh from Implicit Body.*

5.3 Homogenization στο λογισμικό nTop

Ο σκοπός της ομογενοποίησης του τρισδιάστατου μοντέλου είναι να μειωθεί η πολυπλοκότητα του και αυτό επιτυγχάνεται καθώς μετατρέπεται σε πιο απλό μοντέλο το οποίο είναι πιο εύκολο να αντιμετωπιστεί με λιγότερη υπολογιστική ισχύ. Η ομογενοποίηση μπορεί να βοηθήσει στην απλοποίηση του μοντέλου ενός συστήματος, καθιστώντας το πιο εύκολο να κατανοηθεί και να διαχειριστεί αλλά και στην εξοικονόμηση χρόνου καθώς μειώνονται οι υπολογισμοί που απαιτούνται για την προσομοίωση ενός συστήματος. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η ομογενοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα με πολύ μεγάλες κλίμακες όπου θα ήταν ανέφικτη η προσομοίωση εξαιτίας των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Στον τομέα της μηχανικής, για παράδειγμα, η ομογενοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιμετωπιστεί ένα υλικό που έχει πολύπλοκη μικροδομή. Αντί να μελετηθεί κάθε μικροσκοπική λεπτομέρεια, μπορεί να θεωρηθεί το υλικό ως ένα ομογενές μέσο, με ιδιότητες που εξαρτώνται μόνο από τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων του [34,35].

Κατά τη διάρκεια της ομογενοποίησης, λαμβάνεται υπόψη η μέση τιμή των χαρακτηριστικών ή των ιδιοτήτων του συστήματος και αγνοούνται οι λεπτομέρειες που είναι λιγότερο σημαντικές για το συνολικό αποτέλεσμα. Η ομογενοποίηση συνήθως πραγματοποιείται μέσω μαθηματικών μεθόδων που λαμβάνουν υπόψη τη μικροσκοπική δομή του συστήματος και αποσκοπούν στο να προσεγγίσουν το σύστημα με ένα ομογενοποιημένο μοντέλο. Ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος και το πεδίο εφαρμογής, χρησιμοποιούνται διάφορες μαθηματικές τεχνικές [34,35].

5.3.1 Homogenize Unit Cell

Το μπλοκ “ Homogenize Unit Cell ” μπορεί να υπολογίσει τις αποτελεσματικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες μιας μονάδας κυψέλης. Όταν εφαρμόζονται σε στερεό όγκο, αυτές οι ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της δομικής και θερμικής απόδοσης μιας δομής πλέγματος που καταλαμβάνει αυτόν τον όγκο που αποτελείται από αυτό το στοιχείο μονάδας. Με αυτόν τον τρόπο, μπορείτε να εκτιμήσετε την απόδοση σε μακροεπίπεδο της γεωμετρίας του πλέγματος χωρίς να συνδυάσετε τη σύνθετη δομή του. Αυτό εξοικονομεί χρόνο και υπολογιστική προσπάθεια για την ανάλυση δομών πλέγματος με στατική ή θερμική ανάλυση [34,35].

Το μπλοκ λειτουργεί εφαρμόζοντας φορτία μονάδας στο κελί μονάδας με τους εξής τρόπους:

i. ***Μηχανικά :*** 6 μοναδιαία φορτία παραμόρφωσης στις κατευθύνσεις εφελκυσμού (X, Y, Z) και διάτμησης (XY, XZ, YZ) υπό περιοδικές οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό της πραγματικής ακαμψίας της μονάδας κυψέλης. Το μπλοκ υπολογίζει τα 21 συστατικά Cij του πίνακα ανισότροπης ακαμψίας.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Εικόνα 5.3.1 *Πίνακας ανισότροπης ακαμψίας* [34].

ii. ***Θερμικό :*** 3 μοναδιαία φορτία θερμοκρασίας υπό περιοδικές οριακές συνθήκες στις κατευθύνσεις X, Y και Z για τον υπολογισμό της αποτελεσματικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμότητας της κυψέλης μονάδας. Το μπλοκ υπολογίζει τα έξι συστατικά kij της ανισότροπης μήτρας θερμικής αγωγιμότητας.

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix}$$

Εικόνα 5.3.1.1 *Πίνακας ανισότροπης θερμικής αγωγιμότητας* [34].

Εκτός από τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, υπολογίζεται και η αποτελεσματική πυκνότητα της μονάδας κυψέλης. Οι πιο συχνές χρήσεις της ομογενοποίησης είναι για να γίνει ανάλυση σε πολύπλοκες δομές σε πλέγματα (lattices) και υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής των ιδιοτήτων του υλικού που θα προκύψει.

Πλεονεκτήματα :

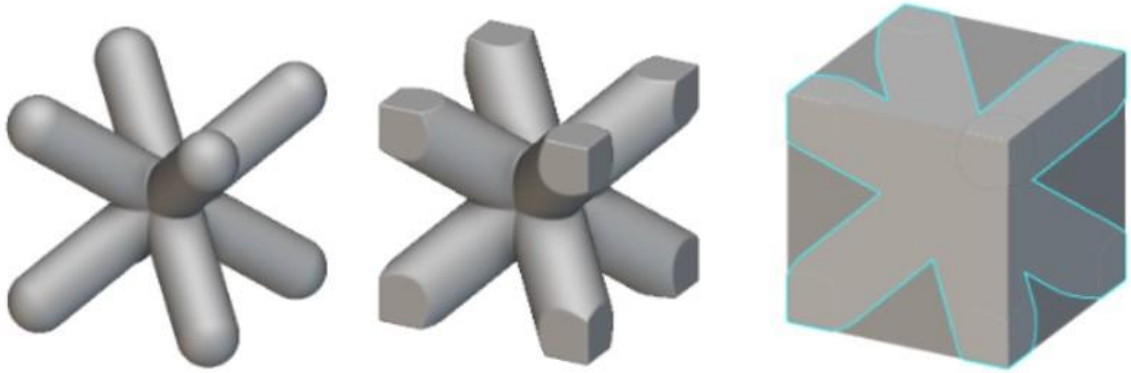
- Μια γρήγορη μέθοδος ανάλυσης δικτυωμάτων.
- Λειτουργεί για κάθε τύπο πλέγματος.
- Λειτουργεί σε μεγάλες και υψηλής πυκνότητας δικτυωτές κατασκευές.

Μειονεκτήματα :

- Περισσότερα βήματα ρύθμισης.
- Ελάχιστη ακριβής επιλογή σε σύγκριση με τη χρήση προσομοιώσεων συμπαγούς στοιχείου ή στοιχείου δέσμης.
- Χωρίς εφέ άκρων.
- Χωρίς συγκεντρώσεις στρες.
- Αγνοεί την ακτίνα πλέγματος-τοίχου ανάμειξης.
- Το πάχος της σοφίτας L πρέπει να είναι ομοιόμορφο.

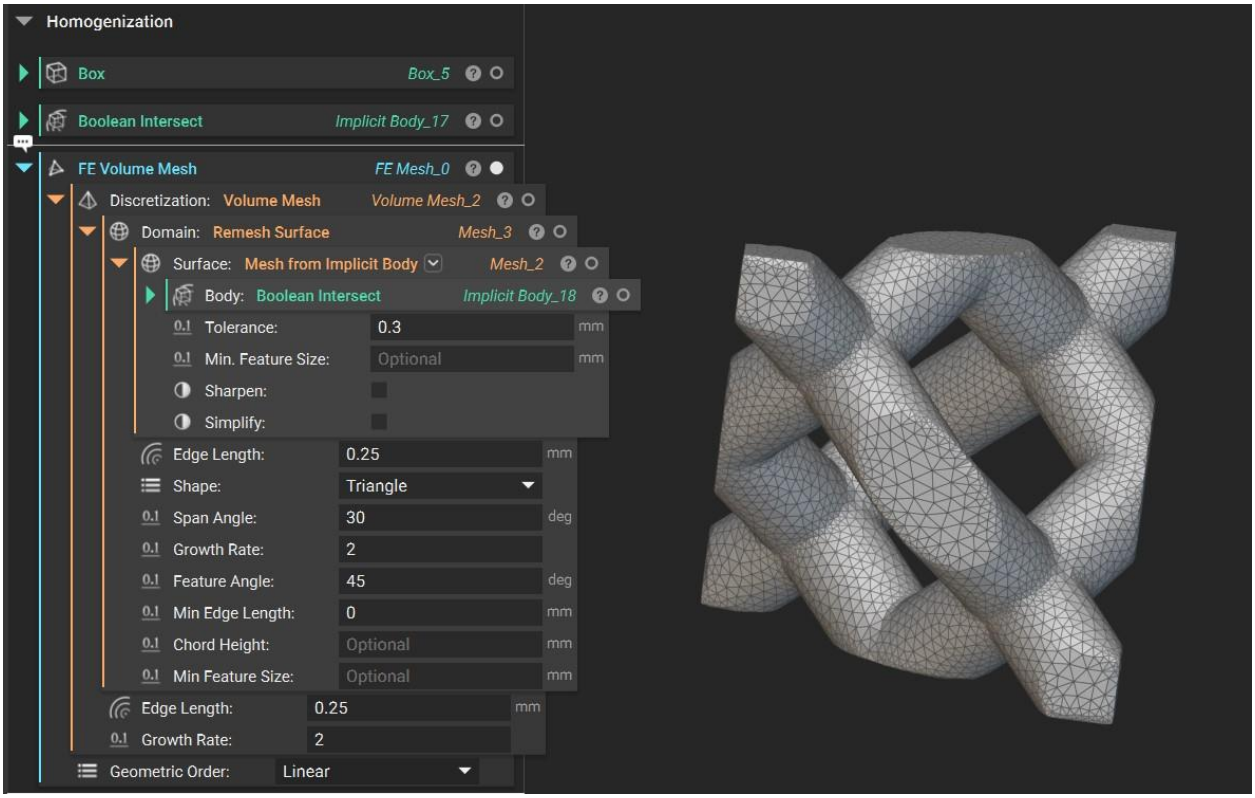
5.3.2 Διαδικασία ομογενοποίησης

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το μπλοκ “Unit Cell Model” που έχει ιδιότητες πλέγματος, ιδιότητες στερεού και ιδιότητες υλικού μαζί με το μπλοκ “Design Volume” το οποίο είναι το Implicit Body όπου περιβάλλει ακριβώς τα όρια του unit cell, συνήθως είναι ένα κουτί. Τα unit cell με στρογγυλεμένες γωνίες συνήθως κόβονται για να χωρέσουν σε ένα κουτί.



Εικόνα 5.3.2 *Εφαρμογή μπλοκ “Unit Cell Model” & “Design Volume”* [34].

Tolerance, η ανοχή αναζήτησης για τη δημιουργία μιας άκαμπτης σύνδεσης μεταξύ των περιοδικών ορίων της κυψέλης μονάδας. Η τιμή ανοχής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να συλλαμβάνει τους κόμβους στα περιοδικά όρια, αλλά αρκετά μικρή ώστε να αποφεύγεται ο υπερβολικός περιορισμός αυτών των ορίων. Μια συνιστώμενη τιμή είναι το 10% του μεγέθους του στοιχείου του πλέγματος κυψέλης μονάδας.



Εικόνα 5.3.2.1 *Διακριτοποίηση μονάδας κυψέλης - Unit Cell Mesh.*

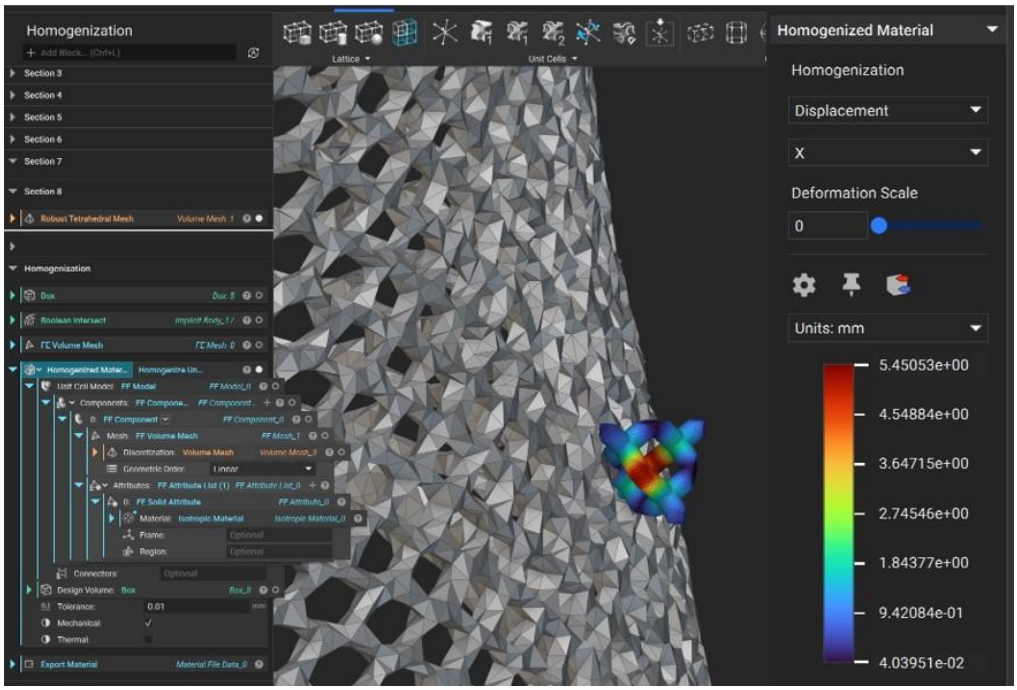
Mechanical and Thermal checkboxes, από προεπιλογή, στο μπλοκ έχει επιλεγεί η επιλογή Μηχανική για τον υπολογισμό των ενεργών ελαστικών ιδιοτήτων. Προαιρετικά, ο έλεγχος της επιλογής Θερμική θα ζητήσει από το μπλοκ να υπολογίσει τις αποτελεσματικές θερμικές ιδιότητες, όπως η ανισότροπη αγωγιμότητα της κυψέλης μονάδας και η ειδική θερμική χωρητικότητα.

Στη συνέχεια με το μπλοκ “Isotropic Material” προστέθηκε το υλικό με τις ιδιότητες που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη αυτή. Τα ισοτροπικά υλικά είναι υλικά των οποίων οι ιδιότητες παραμένουν ίδιες όταν δοκιμάζονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις.



Εικόνα 5.3.2.2 *Εφαρμογή μπλοκ “Isotropic Material”*

Έπειτα εφόσον έχει οριστεί και το υλικό ολοκληρώνεται η μελέτη εφαρμογής της ομογενοποίησης, στην γεωμετρία που έχει οριστεί στο τρισδιάστατο μοντέλο. Η δομή πλέγματος αντικατέστησε έναν όγκο που αντιπροσωπεύει ολόκληρο το πλέγμα.



Εικόνα 5.3.2.3 *Ομογενοποίηση πλέγματος.*

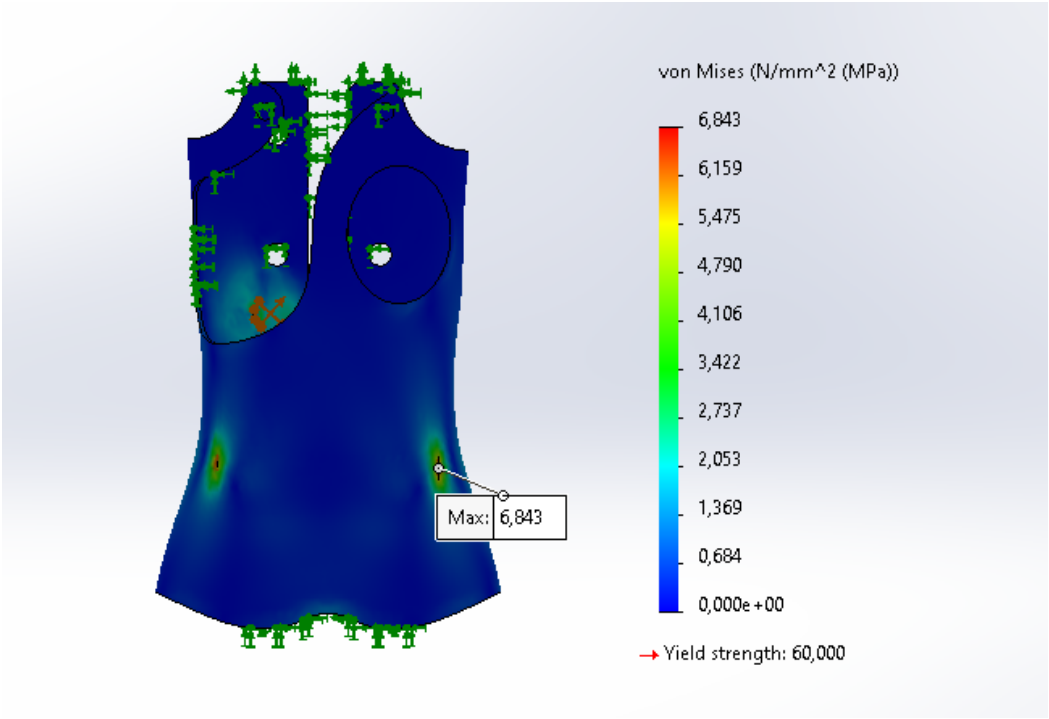
Τέλος για την εξαγωγή του υλικού από το μπλοκ “Homogenize Unit Cell” χρησιμοποιήθηκε το μπλοκ “Export Material” Το μπλοκ Export material επιτρέπει την επιλογή διαφόρων τύπων αρχείων, συμπεριλαμβανομένου του .csv, .txt, .cdb κ.ά.

5.4 Static & Topology Study στο λογισμικό Solidworks

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση της μελέτης με το νέο τεμάχιο της πλεγματικής δομής η μελέτη έλαβε χώρα στο λογισμικό Solidworks και τα βήματα ακολουθήθηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως στην αρχική μελέτη, με τη διαφορά ότι δημιουργήθηκε ένα νέο υλικό στο λογισμικό solidworks όπου εκεί εισάχθηκαν τα δεδομένα που λήφθηκαν από το αρχείο .csv της πλατφόρμας nTop.

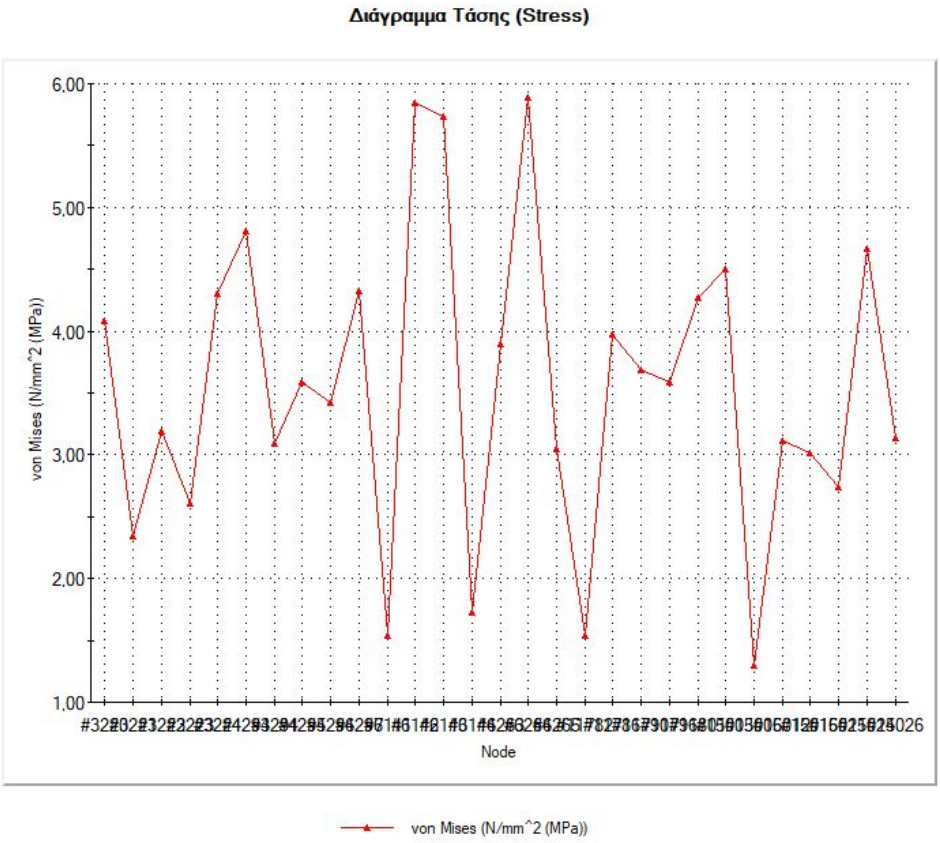
Μία μορφή αρχείου CSV περιλαμβάνει με ακρίβεια δεδομένων τις παραμέτρους που περιγράφουν το υλικό, όπως το μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus), τη πυκνότητα (Density) και το λόγο Poisson, καθώς αυτά είναι κρίσιμα για τη δημιουργία του υλικού στο Solidworks.

Στη συνέχεια, στο Solidworks δημιουργείται ένα νέο υλικό στη βιβλιοθήκη υλικών όπου κατά τη δημιουργία εισάγονται απευθείας τα δεδομένα από το αρχείο CSV. Όπου αρχικά πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό να λαμβάνει υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες του νέου υλικού.



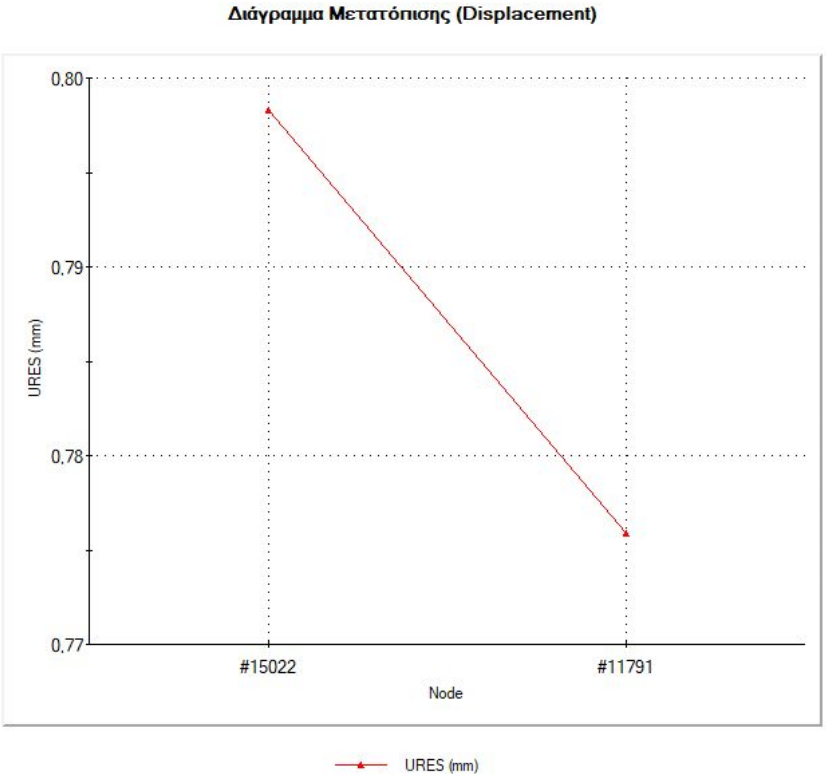
Εικόνα 5.4 *Απεικόνιση αναπτυσσόμενης τάσης με το νέο υλικό.*

Η μετατόπιση (Displacement) και η αναπτυσσόμενη τάση (Stress) είναι δύο βασικές παραμέτρους που αναλύονται στις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων FEA (Finite Element Analysis) στο SolidWorks.



Εικόνα 5.4.1 *Διάγραμμα Stress / Nodes (στοιχεία με την μέγιστη τάση).*

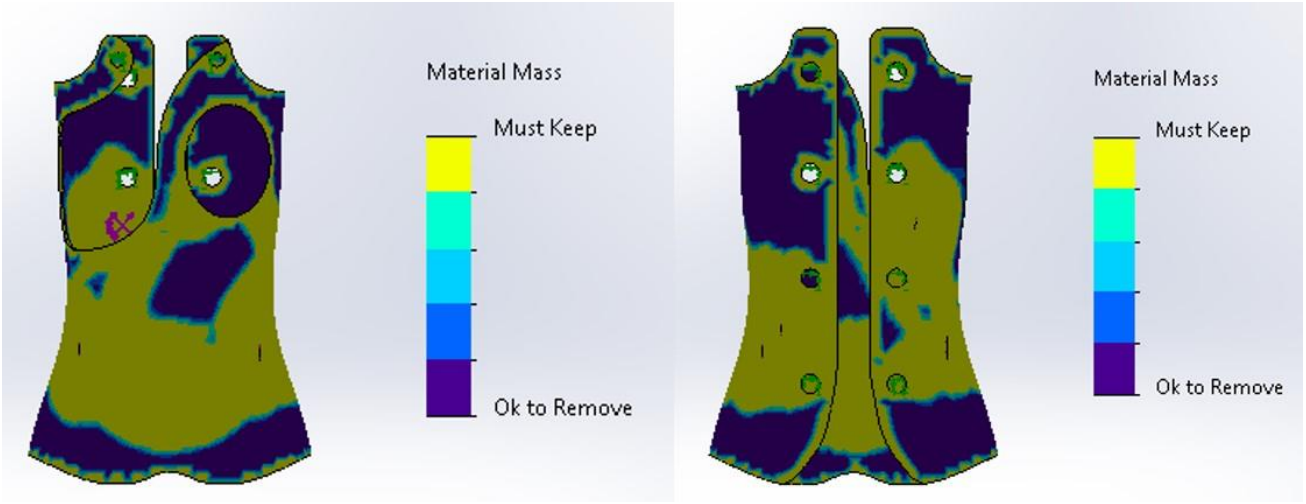
Η αναπτυσσόμενη τάση (Stress) είναι η εσωτερική δύναμη που αναπτύσσεται ανά μονάδα επιφάνειας λόγω των εφαρμοζόμενων φορτίων. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση υπολογίστηκε 6,843 MPa αυτή η τιμή διασφαλίζει ότι η τάση δεν ξεπερνά την αντοχή του υλικού δηλαδή το όριο ελαστικότητας και το όριο θραύσης. Καθώς επίσης εντοπίζει τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων (stress concentrations).



Εικόνα 5.4.2 *Διάγραμμα Displacement / Nodes (στοιχεία με την μέγιστη τάση).*

Η μετατόπιση είναι η απόσταση που μετακινείται ένα σημείο του σώματος από την αρχική του θέση λόγω των φορτίων που εφαρμόζονται, στη δοκιμή μελέτης τα φορτία παρέμειναν ίδια όπως με την αρχική μελέτη που αναφέρονται στο κεφάλαιο 4. Η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να επιτευχθεί στη μελέτη υπολογίστηκε 0,810 mm και πρέπει να ελεγχτεί αν το αντικείμενο παραμορφώνεται υπερβολικά σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια μετακίνησης για να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα του.

Στη συνέχεια ακολούθησε η μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Topology Study) ακριβώς με τα ίδια φορτία και λήφθηκαν οι ίδιοι παράμετροι για το νέο υλικό.



Εικόνα 5.4.1 *Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης με το νέο υλικό.*

Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι μια προηγμένη τεχνική σχεδιασμού που επιτρέπει τη δημιουργία ελαφρύτερων και πιο αποδοτικών δομών, διατηρώντας παράλληλα τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες. Είναι η διαδικασία υπολογισμού και βελτίωσης της διάταξης υλικού σε ένα εξάρτημα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το βάρος, να βελτιωθεί η απόδοση και να ικανοποιηθούν προκαθορισμένοι μηχανικοί περιορισμοί όπως όρια τάσεων και παραμορφώσεων.

5.5 Συμπεράσματα – σύγκριση μελέτης

Η ομογενοποίηση (homogenization) σε πλεγματικές δομές στο λογισμικό nTop είναι μια διαδικασία που επιτρέπει την αποτελεσματική μοντελοποίηση και ανάλυση πολύπλοκων, περιοδικών ή επαναλαμβανόμενων δομών, όπως τα lattice structures, σε μηχανικά ή βιοϊατρικά συστήματα.

Η ομογενοποίηση προσπαθεί να απλοποιήσει την ανάλυση μιας πλεγματικής δομής αντικαθιστώντας τη με ένα ισοδύναμο υλικό που έχει παρόμοιες ιδιότητες, όπως αντοχή, ακαμψία ή θερμική αγωγιμότητα. Αυτό γίνεται επειδή οι λεπτομερείς υπολογισμοί για κάθε κύτταρο του πλέγματος μπορεί να είναι εξαιρετικά χρονοβόροι και υπολογιστικά δαπανηροί.

Αντί να εξετάζονται όλες οι μικροδομές της πλεγματικής γεωμετρίας, υπολογίζονται μακροσκοπικές ιδιότητες για το σύστημα, οι οποίες προκύπτουν από τη μικροσκοπική γεωμετρία. Η γεωμετρία του επαναλαμβανόμενου κυττάρου (unit cell) εξετάζεται σε βάθος. Αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση της μηχανικής απόκρισης, όπως η ακαμψία και η αντοχή. Το unit cell μπορεί να είναι οποιαδήποτε μορφή, όπως κυβικό, κυλινδρικό ή κάποια άλλη ειδική γεωμετρία.

Δηλαδή η πλεγματική δομή αντικαθίσταται με ένα ισοδύναμο συνεχές υλικό, το οποίο περιγράφεται από τις ιδιότητες που προέκυψαν. Αυτό το συνεχές υλικό χρησιμοποιείται σε μεγάλης κλίμακας προσομοιώσεις, επιταχύνοντας την ανάλυση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αντοχή της πλεγματικής δομής δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό της αλλά και από το σχέδιο, τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό του unit cell. Έτσι, η επιλογή του σωστού unit cell για συγκεκριμένες εφαρμογές είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της αντοχής και της απόδοσης της δομής.

Η ακρίβεια μακροσκοπικής ανάλυσης αναφέρεται στο πόσο ακριβείς είναι οι υπολογισμοί που περιγράφουν τη συμπεριφορά της δομής σε μακροσκοπικό επίπεδο, δηλαδή σε επίπεδο που δεν εξετάζει τις λεπτομέρειες του unit cell, αλλά την ολική συμπεριφορά της δομής ως συνεχές υλικό. Όταν γίνεται ανάλυση σε ένα συμπαγές σώμα (όχι πλέγμα), η μακροσκοπική συμπεριφορά του περιγράφεται με ακρίβεια μέσω των εξισώσεων της μηχανικής των υλικών.

Παραμετρος	Αρχική προσέγγιση με Τοπολογική Βελτιστοποίηση		Προσέγγιση με Πλεγματική Δομή & Ομογενοποίηση	
Βάρος	Υψηλότερο	0,785 kg	Χαμηλότερο	0,358 kg
Αντοχή/ακαμψία	Καλή		Εξαρτάται από το unit cell	
Υπολογιστικός χρόνος	Περίπου 3 ώρες		Λιγότερο από 10 λεπτά	
Κατασκευαστική δυσκολία	Ίδια (Additive Manufacturing)		Ίδια (Additive Manufacturing)	
Ακρίβεια Μακροσκοπικής Ανάλυσης	Υψηλή		Σχεδόν ίδια μετά την ομογενοποίηση	
Δυνατότητα Βελτίωσης	Περιορισμένη		Αυξημένη εξαιτίας του Lattice και της νέας βελτιστοποίησης	

Βιβλιογραφία/Αναφορές

[1]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing?fbclid=IwAR1VcqFhabuFBvH2mQWcflKnRiY1XgUJqGSp8VrcRuTkXOesdeREMi1GlzE
2021 GENERAL ELECTRIC

[2]
Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ Τρισδιάστατη εκτύπωση, ταχεία πρωτοτυποποίηση και άμεση ψηφιακή κατασκευή
Εκδόσεις Κριτική, 1η Έκδοση Νοέμβριος 2017

[3]
Νικόλαος Μπιλάλης, Εμμανουήλ Μαραβελάκης
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
Εκδόσεις Κριτική, 3η Έκδοση Οκτώβριος 2020

[4]
Wang, Y., Tan, Q., Pu, F., Boone, D., & Zhang, M. (2020). A review of the application of additive manufacturing in prosthetic and orthotic clinics from a biomechanical perspective. Engineering, 6(11), 1258-1266.

[5]
Richard L. Drake, Wayne Vogl, Adam W. M. Mitchell
GRAY'S Ανατομία - 2η Ελληνική Έκδοση
Παναγιώτης Ν. Σκανδαλάκης 2006

[6]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.spinehealth.gr/anatomia/
SPINE HEALTH [Εικόνα στο διαδίκτυο]
2015 © Copyright - Spine Health

[7]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: http://aspecrowder.blogspot.com/2014/09/movements-of-body.html
AS Physical Education [Εικόνα στο διαδίκτυο]

[8]
Παναγιώτης Π. Συμεωνίδης
ΠΑΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΚΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΥΟΣΚΕΛΕΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
UNIVERSITY STUDIO PRESS 1996

[9]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.skoliosi.com/
Schroth Scoliosis & Spine Clinic [Εικόνα στο διαδίκτυο]
All rights reserved 2024 | Powered By Life Design

[10]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.srs.org/
2022 Scoliosis Research Society. All Rights Reserved | Sitemap | Terms of Use

[11]

Razeghinezhad, R., Kamyab, M., Babaee, T., Ganjavian, M. S., & Bidari, S. (2021). The effect of brace treatment on large curves of 40° to 55° in adolescents with idiopathic scoliosis who have avoided surgery: a retrospective cohort study. Neurospine, 18(3), 437.

[12]
Maruyama, T., Takeshita, K., & Kitagawa, T. (2008). Milwaukee brace today. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, 3(3), 136-138.

[13]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.physio-pedia.com/Milwaukee_brace
Physiopedia [Εικόνα στο διαδίκτυο]
© Physiopedia 2024 | Physiopedia is a registered charity in the UK, no. 1173185

[14]
Karimi, M. T., & Rabczuk, T. (2020).
Evaluation of the efficiency of Boston brace on scoliotic curve control: A review of literature. The journal of spinal cord medicine, 43(6), 824-831.

[15]
Périé, D., Aubin, C. E., Petit, Y., Beauséjour, M., Dansereau, J., & Labelle, H. (2003). Boston brace correction in idiopathic scoliosis: a biomechanical study. *Spine*, *28*(15), 1672-1677.

[16]
Grivas, T. B., Bountis, A., Vrasami, I., & Bardakos, N. V. (2010).
Brace technology thematic series: the dynamic derotation brace. Scoliosis, 5(1), 1-13.

[17]
Wood, G. I. (2017). The Principles and Biomechanics of the Rigo Chêneau Type Brace. Innovations in Spinal Deformities and Postural Disorders, 169.

[18]
Kotwicki, T., & Cheneau, J. (2008). Biomechanical action of a corrective brace on thoracic idiopathic scoliosis: Cheneau 2000 orthosis. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, 3(3), 146-153.

[19]
Rigo, M., & Jelačić, M. (2017). Brace technology thematic series: the 3D Rigo Chêneau-type brace. Scoliosis and spinal disorders, 12(1), 1-46.

[20]
Karavidas, N. (2019). Bracing in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis: Evidence to date. Adolescent health, medicine, and therapeutics, 10, 153.

[21]
Bidari, S., Kamyab, M., Ghandhari, H., & Komeili, A. (2021). Efficacy of Computer-Aided Design and Manufacturing Versus Computer-Aided Design and Finite Element Modeling Technologies in Brace Management of Idiopathic Scoliosis: A Narrative Review. Asian spine journal, 15(2), 271.

[22]
Weiss, H. R., Tournavitis, N., Nan, X., Borysov, M., & Paul, L. (2017). Workflow of CAD/CAM scoliosis brace adjustment in preparation using 3D printing. The open medical informatics journal, 11, 44.

[23]
William D. Callister, JR., David G. Rethwisch
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
2017, 2016 ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

[24]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.sapkasgeorge.gr/
Σάπκας Γεώργιος Καθηγητής Ορθοπαιδικής [Εικόνα στο διαδίκτυο]
© Copyright Sapkas George 2014 - 2020

[25]
Wong, M. S., Cheng, J. C. Y., & Lo, K. H. (2005). A comparison of treatment effectiveness between the CAD/CAM method and the manual method for managing adolescent idiopathic scoliosis. Prosthetics and orthotics international, 29(1), 105-111.

[26]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.altair.com/topology-optimization/
2022 Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved. We are currently listed on Nasdaq as ALTR.

[27]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.solidworks.com/
2002-2022 Dassault Systèmes SolidWorks Corporation

[28]
Krishna, L. S. R., Mahesh, N., & Sateesh, N. (2017). Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing. Materials today: proceedings, 4(2), 1414-1422.

[29]
Liao, Y. C., Feng, C. K., Tsai, M. W., Chen, C. S., Cheng, C. K., & Ou, Y. C. (2007). Shape modification of the Boston brace using a finite-element method with topology optimization. Spine, 32(26), 3014-3019.

[30]
Sanz-Pena, I., Arachchi, S., Halwala-Vithanage, D., Mallikarachchi, S., Kirumbara-Liyanage, J., McGregor, A., ... & Newell, N. (2021). Characterising the mould rectification process for designing scoliosis braces: Towards automated digital design of 3d-printed braces. Applied Sciences, 11(10), 4665.

[31]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://rehabline-chronopoulos-gougis.gr/2020/01/15/kidemones-skoliosis-kyfosis-me-to-rompot-3d-victor/ [Εικόνα στο διαδίκτυο]
2022 RehabLine

[32]
Ng, K. J., Duke, K., & Lou, E. (2019). Investigation of future 3D printed brace design parameters: evaluation of mechanical properties and prototype outcomes. *Journal of 3D printing in medicine*, *3*(4), 171-184.

[33]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/fortus-450mc/ [Εικόνα στο διαδίκτυο]
Copyright Stratasys 2022

[34]
Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.ntop.com/
© nTopology Inc. 2024. All rights reserved.
Privacy policy | EULA | Terms of use | Press

[35]
Ntintakis, I., & Stavroulakis, G. E. (2022). Infill microstructures for additive manufacturing. *Applied Sciences*, *12*(15), 7386.