



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

---

**Κατάταξη, οργάνωση και παραμετροποίηση πλεγματικών δομών για αξιοποίηση σε εξαρτήματα Προσθετικής Κατασκευής**

---

Classification, organization and parameterization of lattice structures for utilization in Additive Manufactured components

(Αλέξανδρος Πετράκος)

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σταμάτιος Πολύδωρας

Αθήνα Οκτώβριος, 2022

## Σημείωμα συγγραφέα – Ευχαριστίες

*<< Ζωή! δεν είναι τίποτε γλυκύτερο στον κόσμο  
απ' την πεντάμορφη ζωή, την ηλιοφωτισμένη!  
Ζωή, κι αν έρχεσαι γοργά κι από χαρές γεμάτη,  
κι αν έρχεσαι με βάσανα και μ' έγνοιες και μ' αρρώστιες,  
ζωή του γέρου και του νιου, της φτώχειας και του πλούτου,  
με της δουλειάς τον ιδρωτα, με της αργίας τη γλύκα,  
με την ειρήνην ήμερη, με τους αγρίους πολέμους,  
και μ' όλες τις καλοκαιριές και μ' όλους τους χειμώνες,  
Ζωή, κι όπως κι α δείχνεσαι, Ζωή, κι ό,τι κι αν είσαι,  
αν είσαι πράγμα ή όνειρο, καλή κακή κι αν είσαι,  
χαρά σ' εσέ, δόξα σ' εσέ κι αγάπες και τραγούδια! >>*

Κωστής Παλαμάς

Με αφορμή το πολυαγαπημένο ποίημα του Κωστή Παλαμά του οποίου από μικρός είχα το άκουσμα και αγάπησα μέσα από τους παππούδες μου, θα ήθελα με αυτόν τον τρόπο να τους ευχαριστήσω για κάθε προσπάθεια που έκαναν ώστε να προσφέρουν στην οικογένεια μου το καλύτερο δυνατό. Όπως επίσης τους γονείς μου που στάθηκαν αρωγοί σε κάθε δυσκολία. Τη σύζυγό μου και έμπνευση μου μέσα στη ζωή, γιατί όχι μόνο μου χάρισε δύο υπέροχα παιδιά αλλά και παρόλο τις δυσκολίες της καθημερινότητας, η πίστη, η αγάπη της και η υποστήριξή της είναι άξια θαυμασμού. Τέλος με μεγάλη αγάπη αφιερώνω στα παιδιά μου την όλη προσπάθεια να κλείσω και αυτόν τον κύκλο κατευθύνσεων διότι σε κάθε σημείο της ζωής μου, μου δημιουργούν με το ελάχιστό τους, την απαιτούμενη ενέργεια να συνεχίζω στο παραπάνω.

Πέρα από τους κοντινούς μου ανθρώπους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της Διπλωματικής Εργασίας, Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Πολύδωρα Σταμάτη που με τυπικότητα, ενδιαφέρον, αμεσότητα και σεβασμό με βοήθησε σε όλη την διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας μου και εύχομαι η ζωή - όπως και αν τα φέρει - να συνεχίσει να ζει με τα ίδια αξιόλογα χαρακτηριστικά. Ακόμη με προσωπική προσευχή ευχαριστώ τον Θεό για κάθε βήμα στη ζωή μου και Τον καλώ να με συνοδεύει σε κάθε μου προσπάθεια για οποιοδήποτε θέλημά Του.

## Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία παρατίθενται οι σύγχρονες δυνατότητες που παρέχει η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ) και οι οικογένειες από τις οποίες αποτελείται. Η εργασία αναφέρεται σε όλο το εύρος των Κυψελωτών Δομών και επικεντρώνεται στις Πλεγματικές Δομές (ΠΔ) και τις μεθόδους απόδοσης αυτών στις κατασκευές με ΠΚ.

Τεκμηριώνεται ο κάθε τύπος ΠΔ με έμφαση στα αποδιδόμενα χαρακτηριστικά, όπως αυτά ελήφθησαν από πειραματικά ευρήματα δημοσιευμένης βιβλιογραφίας.

Επιπλέον εξηγούνται οι μέθοδοι προσαρμογής των δομών και αναλύεται η Τοπολογική Βελτιστοποίηση (TB) συναφών κατασκευών με ΠΚ.

Αποτυπώνονται όλες οι πληροφορίες σχετικά με τις κυψελωτές δομές και τα χαρακτηριστικά τους σε ψηφιακά φύλλα επεξεργασίας (MS Excel) και ύστερα εφαρμόζεται προγραμματισμός σε σχεσιακή βάση διαχείρισης δεδομένων (MS Access) όπου αποθηκεύονται και οργανώνονται τα στοιχεία σε κατανομημένους πίνακες όπου με κατάλληλες ερωτήσεις (Queries) υλοποιείται η λειτουργία της διευκόλυνσης της άντλησης πληροφοριών.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά την ανάλυση των πληροφοριών, χαρακτηριστικών, δυνατοτήτων, μεθόδων/ τεχνικών 3D εκτύπωσης και σχεδιασμού κυψελωτών δομών. Το δεύτερο περιλαμβάνει την επεξήγηση και παρουσίαση της εφαρμογής της εργασίας, η οποία έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον σχεσιακής βάσης δεδομένων της εταιρίας Microsoft (Access).

## Abstract in English

In this thesis the modern capabilities offered by Additive Manufacturing (AM) are given and the families of the latter. The work refers to the whole spectrum of Cellular Structures and focuses on Lattice Structures (LS) and their fabrication methods on components via AM.

Every type of LS is documented with emphasis on the attributed characteristics as taken from experimental results found in bibliography.

Additionally, adaptation methods of the structures are explained and the Topological Optimization (TO) relevant AM-fabricated structures is analyzed.

All the information regarding Cellular Structures and their characteristics are captured on digital spreadsheets (MS Excel) and programming is applied on a relational database management system (MS Access) where data is registered and organized in distribution tables for ease of data gathering via queries.

This work is divided into two sections. The first section concerns the analysis of information, characteristics, capabilities, methods of 3D printing and design techniques of the Cellular Structures. The second section includes the explanation and presentation of the work's application, which has been implemented in a relational database environment of the Microsoft company (Access).

## Πίνακας περιεχομένων

<b>Κατάταξη, οργάνωση και παραμετροποίηση πλεγματικών δομών για αξιοποίηση σε εξαρτήματα Προσθετικής Κατασκευής</b>	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Σημείωμα συγγραφέα – Ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Abstract in English	2
Κατάλογος εικόνων	5
Εισαγωγή	7
Συνομογραφίες και θεώρηση όρων	9
Ορισμοί	10
Σκοπός της εργασίας	11
Κεφάλαιο 1 – Πλεγματικές δομές	12
1.1 Εισαγωγή στις Πλεγματικές Δομές – Ορισμός και Ταξινόμηση	12
1.2 Κατηγορίες Πλεγματικών Δομών στις εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής	13
1.3 Μέθοδοι σχεδιασμού και μονάδες κελιών - κυψελών	15
1.4 Οικογένειες πλεγματικών δομών	15
1.4.1 Strut-based lattices	17
1.4.2 Triply periodic minimal surface (TPMS) lattices	19
1.4.3 Planar-base lattices	21
1.5 Εφαρμογές και παραδείγματα δομών πλέγματος σε κατασκευές	22
1.6 Voronoi – ψηφιδωτή μέθοδος (Tessellation method)	24
1.6.1 Ορισμός διαγράμματος Voronoi	26
1.7 Custom Lattices – Προσαρμοσμένα πλέγματα	27
1.8 Topology optimized lattices – Δομές με Τοπολογική Βελτιστοποίηση	27
1.9 Δυνατότητες και δυναμική πλεγματικών δομών προσθετικής κατασκευής	29
1.9.1 Κατασκευαστικές μέθοδοι και τεχνικές	29
1.9.2 Υλικά κατασκευής πλεγμάτων	29
1.9.3 Ακρίβεια διαστάσεων κατασκευής	31
1.9.4 Χρησιμότητα και οφέλη πλεγματικών δομών	32
1.9.4.1 Μηχανικά οφέλη	34
1.9.4.2 Βελτίωση λόγου αντοχής προς βάρος	34
1.9.4.3 Παραγωγή μεγάλων αξιοποιήσιμων επιφανειών	34

1.9.4.4	Βελτίωση απορρόφησης έντασης κρούσης-----	34
1.9.4.5	Βελτίωση απορρόφησης ανεπιθύμητων δονήσεων – μηχανικών θορύβων -----	35
1.9.5	Το Δυναμικό των πλεγμάτων τηρώντας τις αρχές του DFAM -----	35
1.9.5.1	Δομή κελιού πλέγματος -----	36
1.9.5.2	Μέγεθος και πυκνότητα κελιών -----	36
1.9.5.3	Επιλογή υλικού -----	37
1.9.5.4	Προσανατολισμός κελιών -----	37
1.9.6	Σχεδιασμός πλεγματικής δομής -----	38
1.9.6.1	Παραδείγματα απόκρισης δομών πλέγματος-----	38
1.9.6.2	Απόδοση Δομής σύμφωνα με το μέγεθος του κελιού -----	40
1.9.7	Κίνητρο για έρευνα-----	40
Κεφάλαιο 2 – Κύριο μέρος, ανάπτυξη βάσης δεδομένων πλεγματικών δομών -----		41
2.1	Επιλογή πλέγματος δομής ανάλογα την επιθυμητή συμπεριφορά -----	41
2.2	Σύστημα Διαχείρισης Βάσης Δεδομένων και αξιοποίησή της -----	41
2.2.1	Βάσεις δεδομένων -----	41
2.2.2	Σχεσιακές βάσεις δεδομένων-----	42
2.2.2.1	Πρωτεύον κλειδί – Primary Key, Ξένο κλειδί – Foreign Key, Περιορισμοί - Constraints	42
2.2.3	Σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων Microsoft “Access” -----	43
2.2.4	Γλώσσα SQL -----	44
2.2.4.1	Μοντελοποίηση Διαγραμμάτων Συσχέτισης Οντοτήτων - Entity Relationship Diagram (ERD)	44
2.3	Δημιουργία RDBMS πλεγματικών δομών σε περιβάλλον MS Access-----	45
2.3.1	Καταχώρηση πινάκων -----	45
2.3.1.1	Ενδιάμεσος πίνακας -----	45
2.3.2	Ανάπτυξη σχέσης μεταξύ πληροφοριών – πινάκων -----	46
Σχόλια - Συμπεράσματα -----		47
Επεκτάσεις – Προοπτικές εργασίας -----		48
Βιβλιογραφία - Αναφορές-----		49
Παραρτήματα -----		52

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Δομές πλέγματος: (a) τυχαία δικτυωμένες δομών, (b) περιοδική επαναλαμβανόμενη διάταξη κυψελών δομής πλέγματος, (c) ψευδο-περιοδικές δομές πλέγματος. Αναφ. [17] .....	14
Εικόνα 2: Βαθμιδωτή δομή πλέγματος. Αναφ. [16] .....	14
Εικόνα 3: Μοντέλο κυψελωτών δομών. Αναφ. [11].....	16
Εικόνα 4: Ενδεικτικά τρισδιάστατα μοντέλα δομών με βάση τις αντηρίδες. Αναφ. [10] .....	17
Εικόνα 5: Σχέδιο της σόλας παπουτσιού με διαφορετικές τοπολογίες δομής με βάση τις αντηρίδες. Αναφ. [10] .....	18
Εικόνα 6: Αριστερά περιοδική πλεγματική δομή/ Δεξιά στοχαστική πλεγματική δομή. Αναφ. [8] .....	19
Εικόνα 7: Διάγραμμα Τοπολογίας πλέγματος για μια δομή γυροειδούς σε τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων Αναφ. [49] .....	20
Εικόνα 8: Ενδεικτικά τρισδιάστατα μοντέλα δομών TPMS που παρουσιάζουν ένα κελί μονάδας και μια δομή διαμόρφωσης $2 \times 2 \times 2$ για Schwarz Primitive, Gyroid και Schwarz Diamond. Αυτά μπορούν να δημιουργηθούν με το χειρισμό των τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Αναφ. [9]. .....	21
Εικόνα 9: Από αριστερά προς τα δεξιά α) δομή πλέγματος με βάση την επιφάνεια, συγκεκριμένα γυροειδής (gyroid) δομή TPMS. β) δομή πλέγματος που βασίζεται σε αντηρίδες (Strut-based) συγκεκριμένα body centered cubic (BCC) γ) δομή με πλέγμα επίπεδου μοτίβου (planar-based) ή πλέγμα 2,5 διαστάσεων. Αναφ. [8] .....	22
Εικόνα 10: Η σέλα ενός ποδηλάτου η οποία πάνω από μία μεταλλική βάση έχει ως “μαξιλαράκι” μία εκτυπωμένη από τρισδιάστατο εκτυπωτή τεχνολογίας DLS (Digital Light Synthesis) και δομή strut-based όπως φαίνεται στην εικόνα. Αναφ. [12].....	22
Εικόνα 11: Η σόλα ενός παπουτσιού φτιαγμένη σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με δομή πλέγματος Strut-Based και Τοπολογική Βελτιστοποίηση σύμφωνα με τα αθλητικά χαρακτηριστικά του αθλητή Αναφ. [13].....	23
Εικόνα 12: Η πιο στιβαρή ηλεκτρική κιθάρα μέχρι στιγμής φτιαγμένη σε 3D εκτυπωτή τεχνολογίας DMLS από σκόνη τιτανίου. Παρόλο τη στιβαρότητά της το συνολικό βάρος παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Αναφ. [14].....	23
Εικόνα 13: Τα ελαστικά του μέλλοντος είναι φτιαγμένα από 3D εκτυπωτή. Τα συγκεκριμένα μοιάζουν πολύ με την μέθοδο επίπεδου μοτίβου (2,5D) και λόγω έλλειψης αέρα -aerless- δεν αστοχούν εύκολα. Αναφ. [15] .....	24
Εικόνα 14: Αυτό είναι ένα κομμάτι του διαγράμματος Voronoi ενός τυχαίου συνόλου σημείων σε ένα τρισδιάστατο πλαίσιο. Τα κελιά είναι όλα κυρτά πολύεδρα. Αναφ. [19].....	24
Εικόνα 15: Η ψηφίδωση Voronoi αναπαράγεται με ακτινωτή ανάπτυξη των επιφανειών από τα σημεία προς τα έξω. α) αριστερά - αρχικό στάδιο αναπαραγωγής ψηφίδωσης β) δεξιά - τελικό στάδιο αναπαραγωγής ψηφίδωσης. Αναφ. [19].....	25
Εικόνα 16: Διαδικασία δημιουργίας δομής Voronoi. (A) Κατανομή των σπόρων εντός του πεδίου σχεδίασης, (B) τριγωνισμός Delaunay, (C) Αναγνώριση των διχοτόμων γραμμών, (D) Δομή ψηφίδωσης Voronoi Αναφ. [56]. .....	26
Εικόνα 17: Ψηφίδωση Voronoi με διάφορες τιμές της μεταβλητής α: (A) κανονική α = 0, (B) α = 0,5, (C) α = 0,7, και (D) πλήρως τυχαία α = 1 Αναφ. [56]. .....	27
Εικόνα 18: Μοναδιαίο Κελί σε διάφορα ποσοστά τετράπλευρης δομής και εικοσάπλευρης δομής, ποικίλους μηχανικής ιδιότητας Αναφ. [40]. .....	28

Εικόνα 19: Υβριδική κατασκευή με 3 διαφορετικές δομές Αναφ. [40].....	28
Εικόνα 20: Κράματα μετάλλων και τομείς εφαρμογής Αναφ. [41] .....	30
Εικόνα 21: Μεταβλητές από τις οποίες αποτελείται μία πλεγματική δομή στην ΠΚ. Node: Κόμβος, Cell: Κελί, Beam: Αντηρίδα. Αναφ. [31] .....	32
Εικόνα 22: Ονομασία και χαρακτηριστικά δομών Bravais .....	33
Εικόνα 23: Εικονική μορφή δομών Bravais .....	33
Εικόνα 24: Παραδείγματα α) δομής κελιών πλέγματος, b) μεγέθους και πυκνότητας κελιών, c) υλικό προσθετικής κατασκευής d) προσανατολισμός κελιών. Αναφ. [31].....	36
Εικόνα 25: Στοιχεία αντηρίδας ως συνάρτηση της διαμέτρου και της γωνίας κλίσης. Αναφ. [41] .....	37
Εικόνα 26: Εμφάνιση σχέσης πινάκων – Database - στο χώρο της Microsoft Access.....	46
Εικόνα 27: Παράθυρο επιλογής πινάκων στη βάση.....	46
Εικόνα 28: Διαδικτυακή εφαρμογή Lucidchart. Χώρος ανάπτυξης ERD. (Παράδειγμα προσπαθειών εφαρμογής πινάκων για απόδοσή τους σε γλώσσα SQL) Αναφ.[55].....	52

## Εισαγωγή

Από μια τεχνική ανάλυση της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος της Αμερικής – Environmental Protection Agency (EPA) με την βρετανική εταιρεία Ricardo Inc. Αναφ. [42], διαπιστώθηκε ότι για κάθε δέκα λίβρες (περίπου 4,5 κιλά) που αφαιρούνταν από ένα βενζινοκίνητο αυτοκίνητο, η συνδυασμένη σχετική οικονομία καυσίμου του οχήματος αυξήθηκε κατά 0,15%. Η μείωση βάρους είναι ακόμη πιο σημαντική στην αεροδιαστημική, όπου κάθε κιλό μπορεί να κοστίζει περίπου 10.000 \$, υπάρχει επομένως μεγάλη ζήτηση για λειτουργικά εξαρτήματα που κατασκευάζονται με ελάχιστο ή και ελαφρύτερο υλικό. Στη σύγχρονη βιομηχανία, η μέθοδος της Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ), υλοποιώντας διαφόρων ειδών δομές πλέγματος, μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Αρκετά χρόνια τώρα αλλά κυρίως τις τελευταίες δύο δεκαετίες, παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, παράλληλα με τον ταχύτατα εξελισσόμενο τομέα της πληροφορικής που προσφέρει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες στην επεξεργασία δεδομένων και γενικά σε όλες τις ψηφιακά υποστηριζόμενες διαδικασίες. Μέσω της τεχνικής της Προσθετικής Κατασκευής έχουμε πλέον και τον τρόπο και τα μέσα να επιταχύνουμε τον σχεδιασμό, την παραγωγή και τη διάθεση νέων προϊόντων και κατασκευών υψηλής συνθετότητας και πολυπλοκότητας, με ικανοποιητική ακρίβεια κατασκευής και χαμηλότερο κόστος σε σχέση με παλαιότερα. Κύριο ρόλο έχουν τα λογισμικά και σχεδιαστικά πακέτα που βασίζονται στη χρήση των Πεπερασμένων Στοιχείων. Ως αποτέλεσμα αυτού, είναι η επένδυση πολλών σχεδιαστών ή/και μηχανικών σε τεχνικές Δομικής Βελτιστοποίησης (Structural Optimization) για την ανάπτυξη νέων προϊόντων ή τη βελτιστοποίηση ήδη υπάρχοντων, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως και φαίνεται να αποδίδει σημαντικά πλεονεκτήματα και δυνατότητες. Η Δομική Βελτιστοποίηση (ΔΒ) με το ανάλογο λογισμικό πρόγραμμα αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στη διαδικασία σχεδιασμού δομών όπου απαιτούνται ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και στοχεύει στη βέλτιστη λύση σχεδιασμού για δημιουργία ελαφρών κατασκευών, ικανοποιώντας παράλληλα συγκεκριμένα κριτήρια και περιορισμούς που είναι καθορισμένα από τον μηχανολογικό σχεδιασμό προϊόντος και σχετίζονται π.χ. με τη στατική και δυναμική αντοχή, τη λειτουργικότητα, ελαστικότητα κλπ.

Μία από τις πιο κοινές μεθόδους βελτίωσης είναι η Τοπολογική Βελτιστοποίηση (Topology Optimization). Η μέθοδος αυτή σήμερα είναι ενσωματωμένη σε εμπορικά υπολογιστικά πακέτα λογισμικών (CAE Software). Για να επιτευχθεί όμως υψηλή απόδοση με ελάχιστο δυνατό βάρος, οδηγεί συχνά σε υψηλής πολυπλοκότητας γεωμετρία στο βελτιστοποιούμενο αντικείμενο, δύσκολο έως αδύνατο να αποδοθεί από τις συμβατικές κατασκευαστικές διαδικασίες (αφαιρετικές τεχνολογίες και τεχνικές μορφοποίησης). Επομένως, η κατασκευασιμότητα (manufacturability) των δομών προς επίτευξη είναι μία εξίσου σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Εδώ έρχεται στις μέρες μας να δώσει λύση η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ – Additive Manufacturing), ή αλλιώς Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3DE - 3D Printing), συνεχώς εξελισσόμενη η ίδια, καθώς έχει εκτείνει εξαιρετικά τα όρια της κατασκευασιμότητας.

Η τεχνολογία αυτή όπως προκύπτει και από την ονομασία της “Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ)” βασίζεται κατά κύριο λόγο στη διαδοχική πρόσθεση στρώσεων υλικού τη μία πάνω στην άλλη, βάση ενός σχεδίου, το οποίο το λαμβάνει μέσω ψηφιακών τρισδιάστατων δεδομένων από μοντέλο CAD, επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία αρκετά πολύπλοκων γεωμετρικών/ μορφολογικών χαρακτηριστικών που δεν επιβαρύνουν ανάλογα το κόστος της εκάστοτε τελικής δομής. Επομένως, η δυνατότητα που δίνει η τεχνολογία της ΠΚ για σχεδιαστική ελευθερία κάνει εφικτή τη δημιουργία στοιχείων και δομών,



τα οποία προκύπτουν από την Τοπολογική Βελτιστοποίηση (TB) και έχουν θεωρητικά το βέλτιστο δυνατό σχεδιαστικό αποτέλεσμα. Ο συνδυασμός της TB ως σχεδιαστικό και παραμετρικό εργαλείο με τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας της ΠΚ ως κατασκευαστική μέθοδος, μπορεί να επιφέρει μία νέα επανάσταση στην παραγωγή νέων καινοτόμων προϊόντων για τη σύγχρονη βιομηχανία και για αυτό το λόγο μελετάται εις βάθος τα τελευταία χρόνια σε διάφορα πεδία εφαρμογής, όπως π.χ. στην ιατρική, αεροδιαστημική, αεροναυπηγική, αρχιτεκτονική, αυτοκινητοβιομηχανία, κ.ά.

Παράλληλα εξελίσσονται οι πλεγματικές δομές οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τις δυναμικές ιδιότητές τους και έτσι να μπορούν να είναι εμφανείς οι καλύτερες επιλογές των πλεγματικών δομών από έναν επαγγελματία ή μη, σε μία μελλοντική κατασκευή με την μέθοδο τις Προσθετικής Κατασκευής και Τοπολογικής Βελτιστοποίησης.

## Συντομογραφίες και θεώρηση όρων

Όρος	Ακρωνύμιο
Κυψελοειδείς - Κυψελωτές Δομές	ΚΔ
Πλεγματικές Δομές	ΠΔ
Προσθετική Κατασκευή	ΠΚ
Τοπολογική Βελτιστοποίηση	TB
Additive Manufacturing	AM
Binder Jetting	BJT
Boundary Representation	BREP
Conformal Lattice Structures	CLS
Constraints	CON
Computer-aided design	CAD
Database Management system	DBMS
Design For Additive Manufacturing	DFAM
Directed Energy Deposition	DED
Foreign Key	FK
Fused Deposition Modelling	FDM
Fused Filament Fabrication	FFF
Laser Powder Bed Fusion	L-PBF
Material Extrusion	MEX
Material Jetting	MJT
Poisson's Ratio	PR
Powder Bed Fusion	PBF
Primary Key	PK
Relational Database Management System	RDBMS
Sheet Lamination	SHL
Stereolithography	SLA
Topology Optimization	TO
Triply Periodic Minimal Surfaces	TPMS
Vat Photopolymerization	VPP

*Πίνακας 1: Όροι - Ακρωνύμια*

## Ορισμοί

- Δικτύωμα ή/και Πλέγμα (Lattice)

“Δικτύωμα ή/και Πλέγμα” είναι μια κανονική γεωμετρική διάταξη σημείων ή αντικειμένων σε μια περιοχή ή στο χώρο.

- Λόγος Poisson (Poisson’s ratio)

Ο “λόγος Poisson” είναι ο λόγος της εγκάρσιας συστολής ενός υλικού – κατασκευής, προς τη διαμήκη επέκτασή του σε μια φυσιολογική κατάσταση έντασης. Αναφ. [\[43\]](#)

- Σύστημα Διαχείρισης Βάσης Δεδομένων (Database Management System)

Με τον όρο “Σύστημα Διαχείρισης Βάσης Δεδομένων”, εννοείται είτε κάποιο λογισμικό μέσω του οποίου γίνεται η δημιουργία, η διαχείριση, η συντήρηση και η χρήση μιας ηλεκτρονικής βάσης δεδομένων ή ένα σύνολο αλληλοσχετιζόμενων προγραμμάτων που λειτουργούν και διαχειρίζονται τα δεδομένα μιας τέτοιας βάσης. Αναφ. [\[51\]](#)

## Σκοπός της εργασίας

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ψηφιακού χώρου/ βάσης δεδομένων με κατάλληλα στοιχεία, ταξινομημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμη πληροφορία σε κάθε χρήστη που θέλει να αναζητήσει την κατάλληλη πλεγματική δομή για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου προϊόντος που θέλει να υλοποιήσει με κοινές και μη μεθόδους 3D εκτύπωσης. Έχουν δημιουργηθεί αρχεία δεδομένων (Data Files) στα οποία έχει στηθεί η βάση των δεδομένων και η πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό είναι η Access της εταιρείας Microsoft, η οποία τοποθετείται κατά κύριο λόγο διαδικτυακά και μπορεί να έχει πρόσβαση ο κάθε χρήστης από οποιονδήποτε δικτυωμένο υπολογιστή. Η εργασία στηρίζεται λοιπόν όχι στον τρόπο εκτύπωσης και κατασκευής της δομής ενός προϊόντος αλλά στην επιλογή του πλέγματος της δομής ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά που επιλέγονται.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας η έννοια "Cell" θεωρείται ως το ελάχιστο δομικό στοιχείο της εκάστοτε ευρύτερης δομής στην οποία αναφερόμαστε, την οποία αποδίδουμε με τον όρο κελί. Τις δε απαντώμενες στην ξένη βιβλιογραφία ως, "Cellular structures" αποδίδουμε τον όρο κυψελοειδείς - κυψελωτές δομές ή/και κατασκευές, προς διάκριση από τις κυψέλες εντόμων της φύσης και την μορφή τους και συσχετίζουμε της τελευταίες ως "Honeycomb structures". Επίσης για τον όρο "Unit Cell", ο οποίος και αυτός χρησιμοποιείται στην αναφορά του ελάχιστου δομικού στοιχείου της εκάστοτε ευρύτερης δομής, αποδίδεται ο όρος μοναδιαίο κελί.

Όσον αφορά την έννοια "Lattice" θα αποδοθεί ως πλέγμα ή/και δικτύωμα και ως επακόλουθο η αναφορά "Lattice structures" θα μεταφραστεί ως πλεγματικές δομές (ΠΔ) ή/και δομές πλέγματος, διακρινόμενες εννοιολογικά από τα "meshes" και "mesh structures" στα οποία χρησιμοποιούνται για αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

## Κεφάλαιο 1 – Πλεγματικές δομές

### 1.1 Εισαγωγή στις Πλεγματικές Δομές – Ορισμός και Ταξινόμηση

Οι δομές πλέγματος είναι ένας τύπος κυψελωτών δομών που έχουν ένα σύνολο γεωμετρικών, κατασκευαστικών και δυναμικών χαρακτηριστικών που διασυνδέονται μέσω των άκρων και των επιφανειών τους. Οι δομές πλέγματος αναγνωρίζονται από ένα κελί μονάδας ορισμένης γεωμετρίας που επαναλαμβάνεται στο χώρο. Έχουν γενικά υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, καλά χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας και καλές ιδιότητες ακουστικής μόνωσης. Ανάλογα με τη γεωμετρία της μονάδας κυψέλης (Μοναδιαίο κελί), η δομή αυτής της κυψέλης μπορεί να ταξινομηθεί σε πλέγματα που βασίζονται σε αντηρίδες (Strut-based/ διασυνδεδεμένες αντηρίδες καθορισμένης διατομής, αριθμού και γωνιών), σε πλέγματα Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS/ σύνθετες επιφάνειες που δημιουργούνται από μαθηματικές εξισώσεις και στη συνέχεια δίνεται ένα ορισμένο πάχος) και σε πλέγματα με βάση τις επίπεδες επιφάνειες ή αλλιώς και Planar-based lattices. Τα σύνθετα πλέγματα TPMS μπορούν να σχεδιαστούν, για κατασκευή ή μοντελοποίηση, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα το λογισμικό Flatt Pack, GEN3D lattice software ή παρόμοια, ενώ τα πλέγματα που βασίζονται σε γόνατα/ αντηρίδες μπορούν να σχεδιαστούν σε γενικό λογισμικό CAD αφού καθοριστεί η σχέση μεταξύ του μεγέθους των χαρακτηριστικών, των μεγεθών των κελιών και του αριθμού των αντηρίδων. Τα πλέγματα με βάση τις αντηρίδες μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας πολλές τεχνικές, όπως FFF, L-PBF, τήξη δέσμης ηλεκτρονίων, χύτευση με τη μέθοδο χαμένου κεριού και διαμόρφωση φύλλου υλικού. Οι δύο τελευταίες μέθοδοι προτείνονται περισσότερο για την κατηγορία δόμησης επίπεδων επιφανειών διότι είναι προσβάσιμες μόνο για απλά σχέδια πλέγματος (δηλαδή σχέδια χωρίς περίπλοκα χαρακτηριστικά) και υποφέρουν από συμβατικά κατασκευαστικά προβλήματα (προβλήματα ροής ρευστού, αναποτελεσματική χρήση υλικών και γενικά περιορισμένη ικανότητα προσαρμογής). Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι η προσθετική κατασκευή και ειδικά το L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) είναι η πιο ευνοϊκή τεχνική για την κατασκευή σύνθετων δικτυωμάτων (τόσο με βάση αντηρίδας “Strut-based” όσο και πλέγματα “TPMS”).

Η L-PBF έχει την ικανότητα να παράγει ισχυρά, ελαφριά και σύνθετα μεταλλικά και πολυμερή εξαρτήματα και να κατασκευάζει εξαρτήματα πλήρους πυκνότητας χωρίς να χρειάζεται μετά-επεξεργασία σε ορισμένες περιπτώσεις.

Σε γενικές γραμμές, οι δομές πλέγματος ορίζονται ως οι τρισδιάστατες δομές που αποτελούνται από διαδοχικά και επαναλαμβανόμενα σε διάταξη διασυνδεδεμένα κελιά, τα οποία μπορούν επίσης να κατανοηθούν ως μια πορώδης δομή υλικού που αποτελείται από διασυνδεδεμένες αντηρίδες και κόμβους σε τρισδιάστατο χώρο. Δεν μπορούμε να σταθούμε όμως μόνο σε αυτόν τον ορισμό διότι ως επακόλουθο η βαθμιδωτή δομή πλέγματος που εμφανίζεται στη δομική σχεδίαση, δεν μπορεί να οριστεί με διάκριση της περιοδικής και της μη περιοδικής διάταξης μοναδιαίων κελιών.

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900:2021(en) (Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary) Αναφ. [30], πλεγματική δομή (lattice structure) ορίζεται ως μία γεωμετρική διάταξη που αποτελείται από διασυνδεδεμένους δεσμούς μεταξύ κορυφών που δημιουργούν μια λειτουργική δομή.

## 1.2 Κατηγορίες Πλεγματοικών Δομών στις εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής

Όσον αφορά την ταξινόμηση των δικτυωτών - πλεγματοικών δομών, σύμφωνα με τη διάταξη των μοναδιαίων κελιών σε δικτυωτού τύπου δομές, οι δομές πλέγματος γενικά χωρίζονται σε τυχαίες δομές πλέγματος και σε περιοδικές δομές πλέγματος. Μετά το σχεδιασμό και την TB των κατασκευών με ΠΚ, οι Wang και Rosen Αναφ. [45] ήταν οι πρώτοι που πρότειναν επιπροσθέτως τις ομοιογενείς ή αλλιώς σύμμορφες δομές πλέγματος (Conformal Lattice Structures - CLS) Αναφ. [44]. Σε σύγκριση με τις περιοδικές κατασκευές δικτυωτού πλέγματος, οι σύμμορφες δομικές κατασκευές μπορούν να ενισχύσουν ή να εδραιώσουν πολύπλοκες επιφάνειες στο εύρος διαστάσεων από 0.1 έως 10 mm.

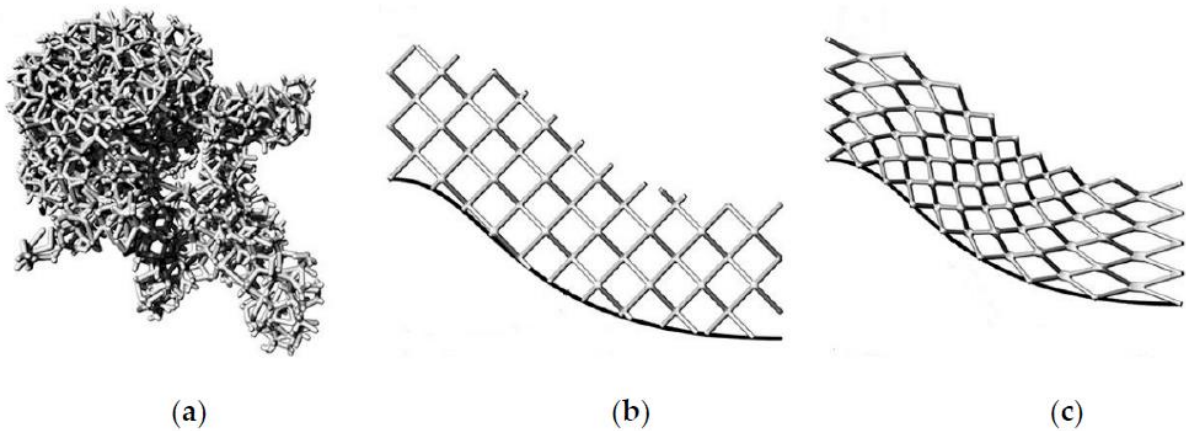
Ο Dong et al. Αναφ. [17] περιέγραψε λεπτομερώς την ταξινόμηση των κατασκευών πλέγματος. Διαίρεσε τις δομές πλέγματος σε τρεις κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία είναι οι τυχαία δικτυωμένες δομές ή οι διαταραγμένες δομές πλέγματος (όπως φαίνεται στην εικόνα 1a). Τα κελιά μονάδας των τυχαίων δομών πλέγματος κατανέμονται τυχαία στον χώρο σχεδιασμού και έχουν διαφορετικές Τοπολογικές Δομές και μεγέθη.

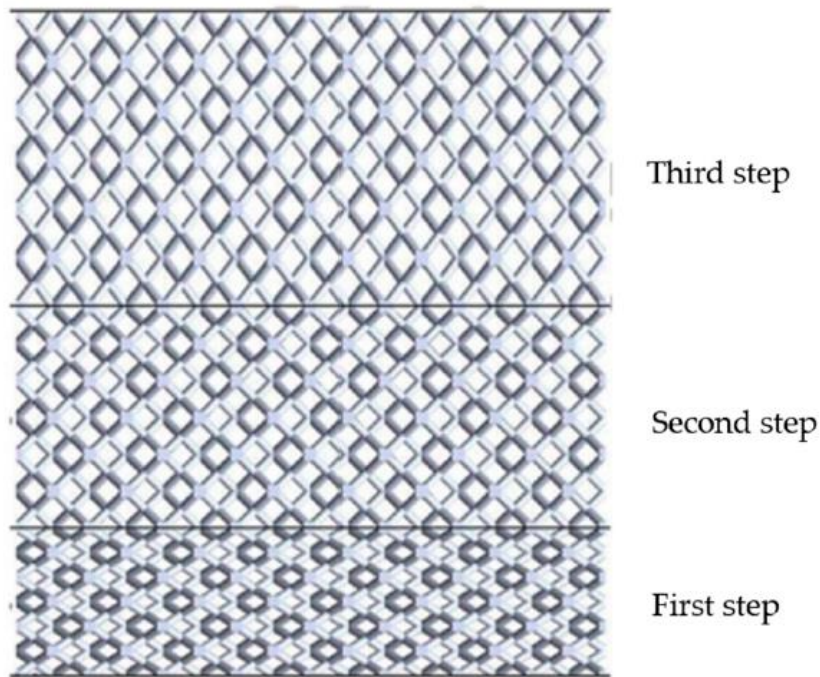
Η δεύτερη κατηγορία είναι οι περιοδικές κατασκευές πλέγματος. Αυτό το είδος δομών πλέγματος μπορεί να θεωρηθεί ως η δομή που σχηματίζεται από περιοδική επαναλαμβανόμενη διάταξη κυψελών πλέγματος με συγκεκριμένο σχήμα, τοπολογία και μέγεθος στον τρισδιάστατο Ευκλείδειο χώρο (όπως φαίνεται στην εικόνα 1b).

Η Τρίτη κατηγορία είναι οι ψευδο-περιοδικές δομές πλέγματος, στις οποίες ανήκουν οι προαναφερόμενες ομοιογενείς (CLS) δομές. Στις δομές ψευδο-πλέγματος κάθε μοναδιαίο κελί έχει μόνο την ίδια τοπολογία, το μέγεθός του είναι διαφορετικό (όπως φαίνεται στην εικόνα 1c) Αναφ. [17].

Αν και οι δομές πλέγματος χωρίζονται σε τυχαίες, περιοδικές και ψευδείς, μπορούν να αντιπροσωπεύουν τη διάταξη κελιών μονάδας στο χώρο, είναι δύσκολο όμως να αναπαρασταθεί η μορφή διάταξης κελιών μονάδας για δομή κλιμακούμενου (Gradient) πλέγματος. Για παράδειγμα, η κλιμακούμενη δομή πλέγματος περιλαμβάνει τρεις ορόφους (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2), κάθε βήμα δομής πλέγματος έχει την ίδια τοπολογία κελιών και κανονική διάταξη, αλλά η τοπολογία και η διάταξη κελιών μεταξύ των βημάτων είναι διαφορετικές. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δύσκολο να ταξινομηθεί η δομή του πλέγματος ως περιοδική ή μη περιοδική κυψελωτή δομή. Επιπλέον, με την έρευνα των υλικών θετικού λόγου Poisson (PPR) και αρνητικού λόγου Poisson (NPR), πολλοί μηχανικοί έχουν αρχίσει να μελετούν δομές πλέγματος με διαφορετικό λόγο Poisson Αναφ. [43], σε σχέση με αυτόν που έχουν οι απλές δομές στη φύση, οι οποίες δομές συνήθως ονομάζονται ως μη ομοιόμορφες δομές πλέγματος. Εν ολίγοις, οι κλιμακούμενες δομές και οι ανομοιόμορφες δομές πλέγματος θα πρέπει συνολικά να αναφέρονται ως μη ομοιόμορφες δομές.



Εικόνα 1: Δομές πλέγματος: (α) τυχαία δικτυωμένες δομών, (β) περιοδική επαναλαμβανόμενη διάταξη κυψελών δομής πλέγματος, (γ) ψευδο-περιοδικές δομές πλέγματος. Αναφ. [17]



Εικόνα 2: Βαθμιδωτή δομή πλέγματος. Αναφ. [16]

Υπάρχει ένα κοινό σημείο στους παραπάνω ορισμούς της δομής πλέγματος, ότι η δομή πλέγματος είναι μια τρισδιάστατη δομή χώρου. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθούν να υπάρχουν ελλείψεις στον παραπάνω ορισμό της δομής. Επιπλέον, η κλιμακούμενη δομή πλέγματος εμφανίζεται στον δομικό σχεδιασμό, η οποία δεν μπορεί να οριστεί με διάκριση της περιοδικής και της μη περιοδικής διάταξης μοναδιαίων κελιών.



### 1.3 Μέθοδοι σχεδιασμού και μονάδες κελιών - κυψελών

Από την άποψη του δομικού σχεδιασμού, μια δομή πλέγματος μπορεί να δημιουργηθεί από την επανάληψη μιας μονάδας κυψέλης ακολουθώντας ένα συγκεκριμένο χωρικό μοτίβο. Έτσι, ο σχεδιασμός μιας δομής πλέγματος περιλαμβάνει σχεδιασμό κυψέλης μονάδας και σχεδιασμό μοτίβου.

Ένα μοναδιαίο κελί είναι το μικρότερο στοιχείο που συνθέτει και χαρακτηρίζει ολόκληρη τη δομή του πλέγματος. Μπορεί να σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας (1) μια πρωτογενή μέθοδο, στην οποία το κελί αποτελείται από ορισμένα γεωμετρικά αρχικά χαρακτηριστικά, (2) μια άρρητη μέθοδο βασισμένη στην επιφάνεια, στην οποία η επιφάνεια του κελιού μονάδας ορίζεται από μαθηματικές εξισώσεις, και 3) μια μέθοδο Τοπολογικής Βελτιστοποίησης, στην οποία η γεωμετρία των κελιών λαμβάνεται μέσω υπολογισμών βελτιστοποίησης.

Η πρωτογενής μέθοδος βασίζεται σε μία απλή προσέγγιση που βασίζεται σε πράξεις [Boolean](#) απλών γεωμετρικών σχημάτων.

Η άρρητη μέθοδος που βασίζεται στις επιφάνειες είναι επίσης μια αποτελεσματική προσέγγιση στο σχεδιασμό μοναδιαίων κελιών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί άρρητες εξισώσεις για να αναπαραστήσει την επιφάνεια ενός κελιού μονάδας στον τρισδιάστατο χώρο. Η εξίσωση  $F(x, y, z) = 0$  ορίζει ένα σύνολο τριών συντεταγμένων μιας συνάρτησης, η οποία καθορίζει έναν πίνακα σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας χρησιμοποιεί έναν μαθηματικό αλγόριθμο για να πραγματοποιήσει τη βέλτιστη κατανομή υλικού, ενώ μια δομή πλέγματος εισάγει πόρους σε ένα στερεό για να επιτύχει την αποτελεσματική χρήση του υλικού. Έτσι, μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας έχουν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό για βέλτιστη απόδοση σε κλίμακα μοναδιαίων κελιών (unit cell).

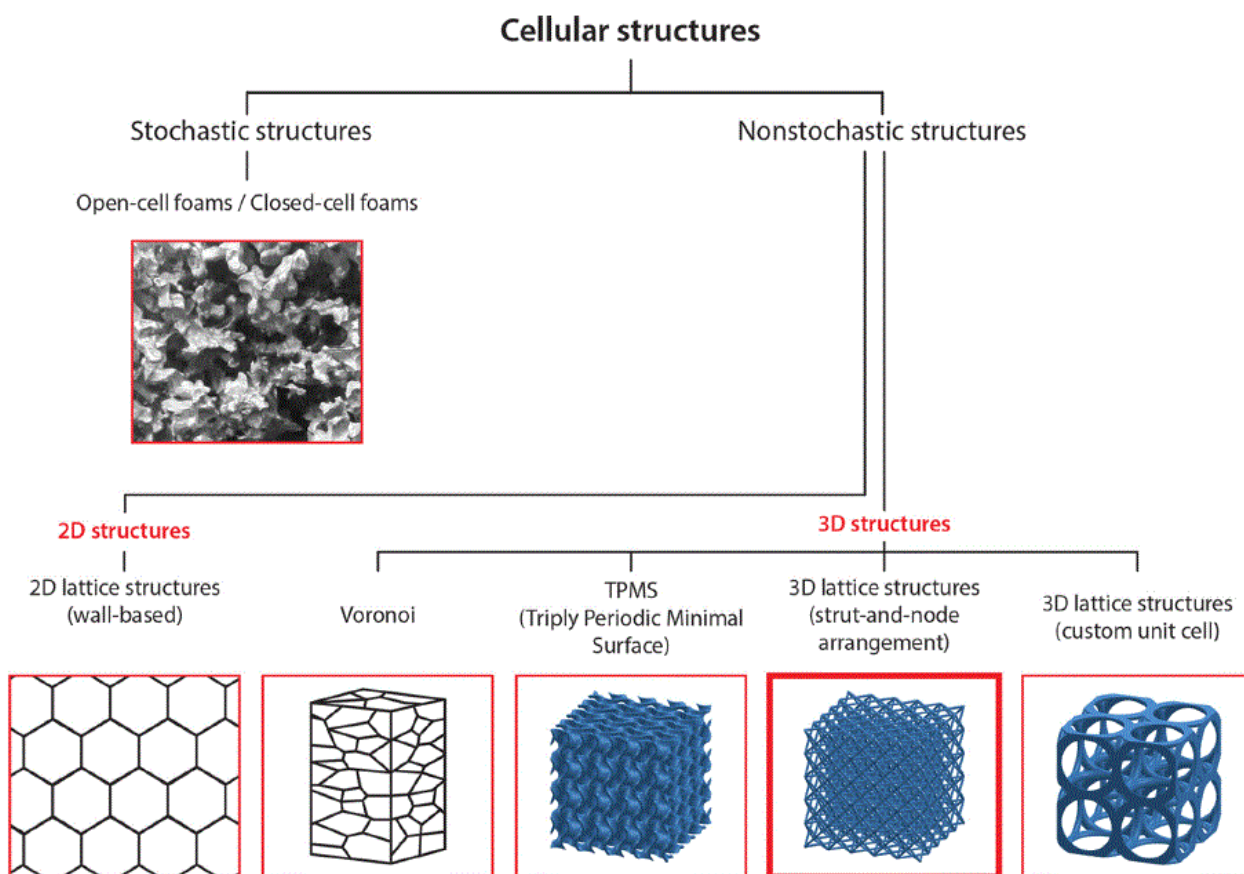
### 1.4 Οικογένειες πλεγματικών δομών

Σε ορισμένες ακαδημαϊκές μελέτες, οι κυψελωτές δομές (cellular structures) είναι συχνά ισοδύναμες με δομές πλέγματος (lattice structures) λόγω της παραμέλησης των διαφορών μεταξύ των δομών αφρού (Foam structures) και των δομών κηρήθρας (Honeycomb structures). Στην πραγματικότητα, σε σύγκριση με τους αφρούς και τις κηρήθρες, οι δικτυωτές - πλεγματικές δομές έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Αποδείχθηκε επίσης από τους Queheillalt et al. και Clough et al. Αναφ. [47] ότι οι δομές πλέγματος έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την αντοχή σε θλίψη και διάτμηση αντί των δομών αφρού (foam) και κηρήθρας (honeycomb), όταν σχεδιάζονται για να καταστέλλουν τον λυγισμό. Με άλλα λόγια, οι κατασκευές πλέγματος έχουν πολλές ανώτερες ιδιότητες που δεν έχουν οι δομές αφρού και κηρήθρας λόγω της μοναδικής ιδιότητας της πλέξης. Δηλαδή, κάθε μοναδικό κελί, ακόμη και κάθε αντηρίδα στη δομή του πλέγματος μπορεί να οριστεί ως μεταβλητή σχεδίασης και να βελτιστοποιηθεί ώστε να ικανοποιεί συγκεκριμένες προσαρμοσμένες απαιτήσεις λειτουργικά, πράγμα που σημαίνει ότι οι μηχανικές ιδιότητες των πλεγματικών δομών είναι πιο ευέλικτες στον έλεγχο και ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι έχουν καλύτερη απόδοση από τις κατασκευές με δομές αφρού και κηρήθρας.



Οι δομές πλέγματος αποτελούνται από ένα βασικό μοναδιαίο κελί με καθορισμένη γεωμετρία που επαναλαμβάνεται περιοδικά στο χώρο. Τα πλέγματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους, 2D ή 3D, τυχαία ή περιοδικά, στοχαστικά και μη στοχαστικά, ανοιχτά ή κλειστά, ομοιογενή ή ετερογενή, αλλά οι πιο ιδιαίτερες είναι οι δομές που είναι βασισμένες σε αντηρίδες ή οι τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες (TPMS). Τόσο η διάταξη όσο και η γεωμετρία των μοναδιαίων κελιών των 2D και 3D μη στοχαστικών δομών μπορούν να ελεγχθούν.

Η δομή TPMS που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα έχει μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό, που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Nottingham, που αναφέρεται στην Αναφ. [7].



Εικόνα 3: Μοντέλο κυψελωτών δομών. Αναφ. [11]

Οι δομές πλέγματος είναι σημαντικές σε όλες τις βιομηχανίες, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση των φυσικών ιδιοτήτων ενός εξαρτήματος με το ελάχιστο δυνατό υλικό και βάρος. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι πλεγμάτων δόμησης που αποδίδονται με ΠΚ:

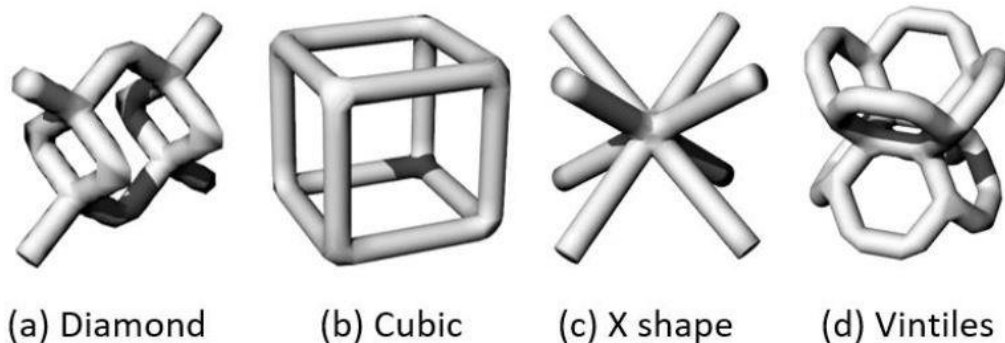
1. Τα πλέγματα με βάση τις αντηρίδες ή αλλιώς και Strut-based lattices.

2. Τα πλέγματα με βάση τις επιφάνειες ή αλλιώς και Surface Lattices, όπου στην ουσία αυτό τον ρόλο θα παίξουν οι τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες ή αλλιώς και Triply Periodic Minimal Surface (TPMS).
3. Τα πλέγματα με βάση τις επίπεδες επιφάνειες ή αλλιώς και Planar-based lattices.

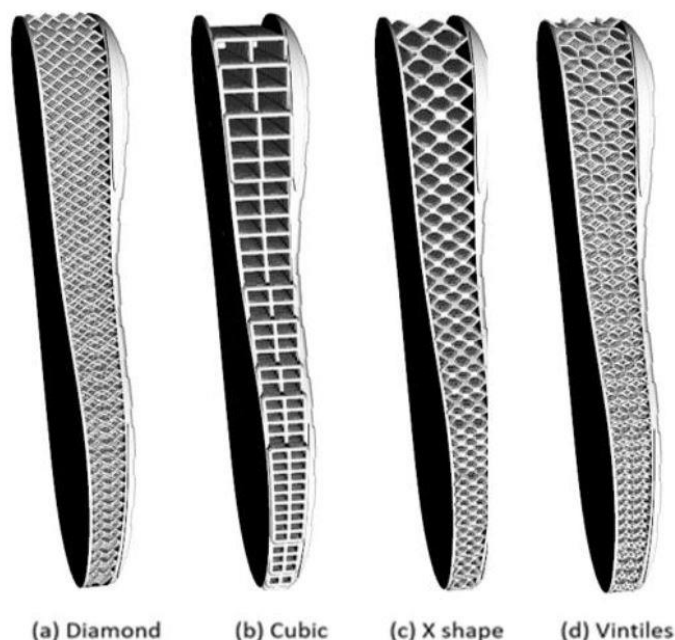
#### 1.4.1 Strut-based lattices

Οι δομές με βάση τις αντηρίδες αποτελούνται από μια σειρά μορφών που μοιάζουν με ράβδους και συνδέονται μεταξύ τους με διαφορετικούς προσανατολισμούς για να σχηματίσουν τα διαφορετικά κελιά μονάδας του πλέγματος.

Όπως διακρίνεται στην εικόνα παρακάτω, ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι ράβδοι μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της δομής του πλέγματος. Γενικά, τα πλέγματα που βασίζονται σε αντηρίδες ήταν ο πιο κοινός τύπος κατασκευής δικτυωτού πλέγματος, ωστόσο, ο σωστός σχεδιασμός πλεγματικών δομών με βάση τις αντηρίδες μπορεί τελικά να είναι δύσκολος.



Εικόνα 4: Ενδεικτικά τρισδιάστατα μοντέλα δομών με βάση τις αντηρίδες. Αναφ. [10]



Εικόνα 5: Σχέδιο της σόλας παπουτσιού με διαφορετικές τοπολογίες δομής με βάση τις αντηρίδες. Αναφ. [10]

Στα πλέγματα που βασίζονται σε αντηρίδα, το κάθε κελί αποτελείται από μια ομάδα εγκάρσιων ράβδων - αντηρίδων ( $s$ ) διασυνδεδεμένων μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι ( $n$ ).

Ο αριθμός των αντηρίδων ( $s$ ) και των κόμβων ( $n$ ) του κελιού είναι κρίσιμος για την πρόβλεψη του μηχανισμού παραμόρφωσής του. Στην πραγματικότητα, μπορούν να επηρεάσουν τον βαθμό συνδεσιμότητας και ελευθερίας του μοναδιαίου κελιού που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από τον αριθμό  $M$  (Maxwell) με την παρακάτω εξίσωση:

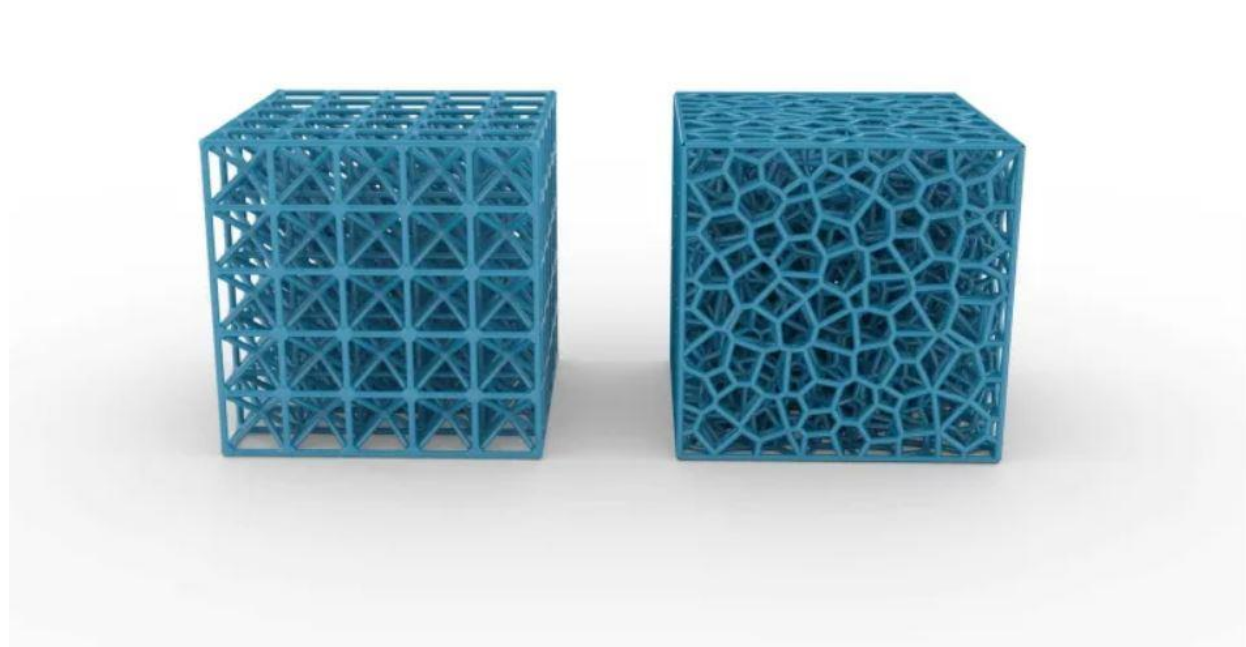
$$M = s - 3n + 6$$

όπου  $M$  είναι ο αριθμός Maxwell,  $s$  είναι ο αριθμός των αντηρίδων και  $n$  είναι ο αριθμός των κόμβων μέσα στο μοναδιαίο κελί.

Εάν  $M < 0$ , η δομή είναι υπό-δύσκαμπτη, οι αντηρίδες δεν μπορούν να εξισορροπήσουν τις εξωτερικές δυνάμεις, οι ροπές μεταφέρονται στους κόμβους και η συμπεριφορά παραμόρφωσης κυριαρχείται από κάμψη. Εάν  $M \geq 0$ , η δομή είναι υπερβολικά/απλά άκαμπτη, οι ροπές δεν μεταφέρονται στους κόμβους και η συμπεριφορά παραμόρφωσης κυριαρχείται από τάνυση. Οι δομές που κυριαρχούν σε τάνυση χαρακτηρίζονται από υψηλότερο συντελεστή και αντοχή διαρροής. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αντηρίδων και των κόμβων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός Maxwell και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μηχανική αντοχή και η ακαμψία του στοιχείου. Αν και ο αριθμός Maxwell είναι μια καλή μέθοδος για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς παραμόρφωσης της δομής, δεν είναι υπό όλες τις συνθήκες ο καταλληλότερος συντελεστής, καθώς η διαμόρφωση και ο προσανατολισμός της αντηρίδας (άρα και μεγαλύτερο πλήθος αντηρίδων) δεν μπορεί να βελτιώσει την ακαμψία του κελιού αλλά απλώς

να αυξήσει τον αριθμό Maxwell. Ωστόσο, η πλειοψηφία των εφαρμογών απαιτεί μικρότερα μεγέθη. Αναφ. [37].

Ως προς τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι ράβδοι – αντηρίδες στις strut-based δομές μας δίνεται ένα επιπλέον χαρακτηριστικό για τον τύπο του πλέγματος. Ορισμένα πλέγματα έχουν το ίδιο επαναλαμβανόμενο μοναδικό κελί σε ολόκληρο το τμήμα. Αυτά είναι γνωστά ως περιοδικά πλέγματα. Η εναλλακτική λύση είναι τα κελιά να συνδέονται τυχαία σε όλη την δομή. Αυτές ονομάζονται δομές στοχαστικού πλέγματος. Τα στοχαστικά πλέγματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιοϊατρικές εφαρμογές καθώς μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να μοιάζουν πάρα πολύ με τις ιδιότητες του ανθρώπινου οστού και επομένως είναι ιδανικά στην επανασύνδεση με οστικές δομές μέσα στο σώμα.



Εικόνα 6: Αριστερά περιοδική πλεγματική δομή/ Δεξιά στοχαστική πλεγματική δομή. Αναφ. [8]

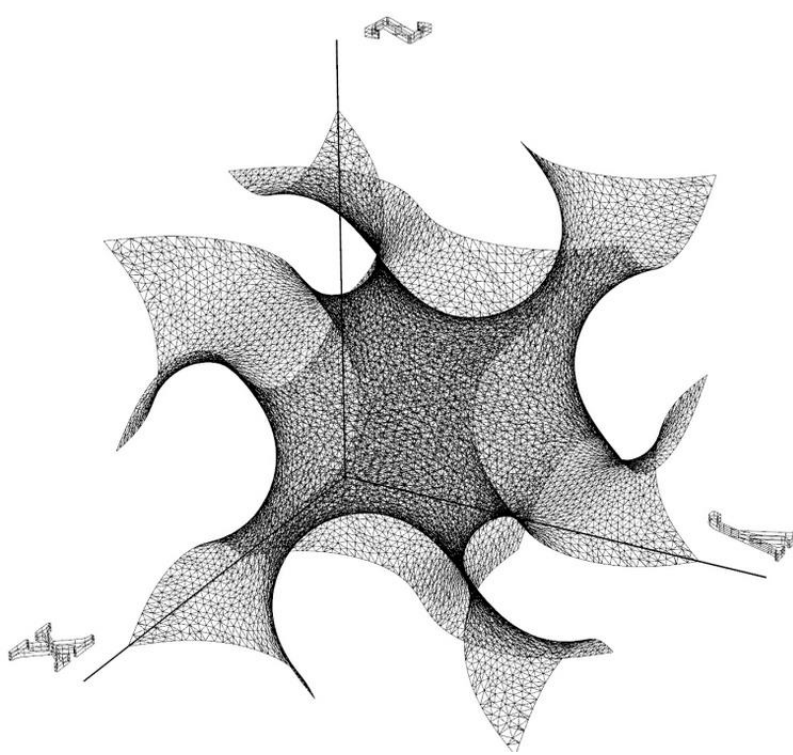
#### 1.4.2 Triply periodic minimal surface (TPMS) lattices

Πλέγματα που δημιουργούνται από τριγωνομετρικές εξισώσεις. Οι λύσεις αυτών των εξισώσεων υλοποιούν την πλεγματική Δομή που θα εφαρμοστεί.

Ένα υποσύνολο δικτυωμάτων που βασίζονται στην επιφάνεια είναι οι τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες (TPMS). Οι δομές TPMS ορίζονται χρησιμοποιώντας τριγωνομετρικές εξισώσεις. Η τροποποίηση της εξίσωσης ελέγχει το σχήμα, το μέγεθος και την πυκνότητα της τρισδιάστατης δομής. Ένα διάσημο παράδειγμα είναι η δομή του γυροειδούς πλέγματος (gyroid). Η δομή του γυροειδούς ορίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0$$

Όπου οι γωνίες  $x$ ,  $y$ ,  $z$  είναι η λύση της εξίσωσης στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που οριοθετεί τα χαρακτηριστικά της δομής.

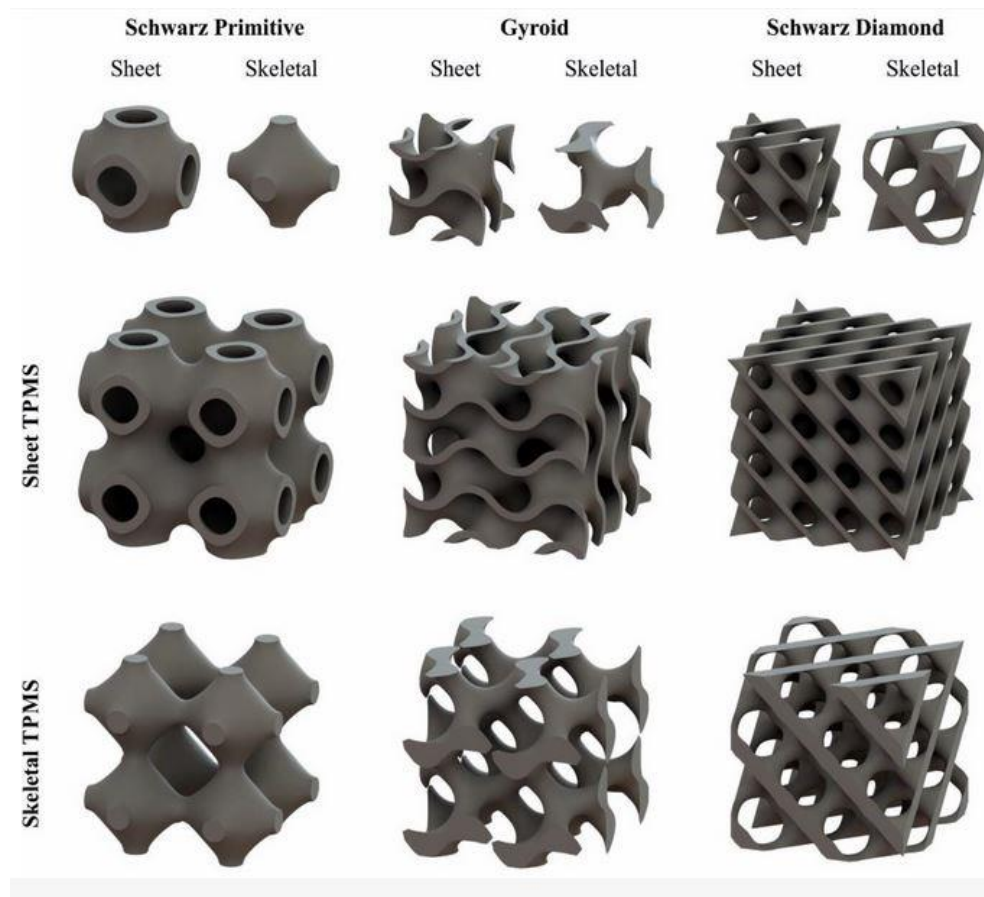


Εικόνα 7: Διάγραμμα Τοπολογίας πλέγματος για μια δομή γυροειδούς σε τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων Αναφ. [49]

Οι δομές TPMS εμφανίζονται σε δύο διαφορετικές μορφές, αυτές είναι γνωστές ως πλέγματα επιφάνειας, με βάση το φύλλο (sheet) και με βάση τον σκελετό (skeletal). Κάθε ένα από τα πλέγματα TPMS μπορεί να τροποποιηθεί από το λογισμικό προετοιμασίας της δομής ώστε να έχει μία από αυτές τις φόρμες.

Οι φυλλοειδείς (sheet) και σκελετικές (skeletal) εκδόσεις των δικτυωμάτων TPMS όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς, όπως το βίο-ικρίωμα για το σκελετικό πλέγμα και η υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο των δομών TPMS που βασίζονται σε φύλλα, τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές θερμικής διαχείρισης. Επίσης οι φυλλοειδείς εκδόσεις των δικτυωμάτων TPMS προσφέρουν υψηλότερη ειδική ακαμψία από ότι οι σκελετικές και έχουν πιο συχνή εφαρμογή σύμφωνα με την βιβλιογραφία που εξετάστηκε.





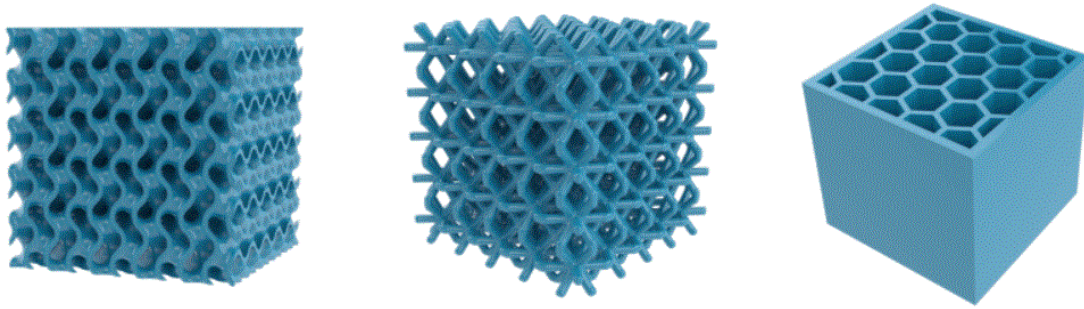
Εικόνα 8: Ενδεικτικά τρισδιάστατα μοντέλα δομών TPMS που παρουσιάζουν ένα κελί μονάδας και μια δομή διαμόρφωσης  $2 \times 2 \times 2$  για Schwarz Primitive, Gyroid και Schwarz Diamond. Αυτά μπορούν να δημιουργηθούν με το χειρισμό των τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Αναφ. [9].

### 1.4.3 Planar-base lattices

Δομές που δημιουργήθηκαν ως περιοδικό μοτίβο σε ένα επίπεδο δύο διαστάσεων και στη συνέχεια εξωθήθηκαν σε μία μόνο κάθετη κατεύθυνση για να δημιουργήσουν την τρισδιάστατη δομή όπως φαίνεται στην Εικόνα 9 (γ). Αναφέρονται και ως 2 ή 2,5 διαστάσεων δομή.

Αυτές οι δομές είναι εξαιρετικά χρήσιμες όταν σχεδιάζονται με σκοπό την ελαχιστοποίηση της χρήσης του υλικού για την κατασκευή ενός προϊόντος διότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε υπάρχει περισσευούμενο υλικό ώστε να μειωθεί η συνολική μάζα του υλικού που απαιτείται για την εκτύπωση ενός εξαρτήματος ή προϊόντος.

Οι επίπεδες πλεγματικές δομές είναι ο απλούστερος τύπος δομής και συνήθως μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε παραδοσιακό λογισμικό CAD ως μοντέλο BREP (Boundary Representation – Αναπαράσταση ορίων).



Εικόνα 9: Από αριστερά προς τα δεξιά α) δομή πλέγματος με βάση την επιφάνεια, συγκεκριμένα γυροειδής (gyroid) δομή TPMS. β) δομή πλέγματος που βασίζεται σε αντηρίδες (Strut-based) συγκεκριμένα body centered cubic (BCC) γ) δομή με πλέγμα επίπεδου μοτίβου (planar-based) ή πλέγμα 2,5 διαστάσεων. Αναφ. [8]

## 1.5 Εφαρμογές και παραδείγματα δομών πλέγματος σε κατασκευές



Εικόνα 10: Η σέλα ενός ποδηλάτου η οποία πάνω από μία μεταλλική βάση έχει ως “μαξιλαράκι” μία εκτυπωμένη από τρισδιάστατο εκτυπωτή τεχνολογίας DLS ([Digital Light Synthesis](#)) και δομή strut-based όπως φαίνεται στην εικόνα. Αναφ. [12]



Εικόνα 11: Η σόλα ενός παπουτσιού φτιαγμένη σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με δομή πλέγματος Strut-Based και Τοπολογική Βελτιστοποίηση σύμφωνα με τα αθλητικά χαρακτηριστικά του αθλητή Αναφ. [13]



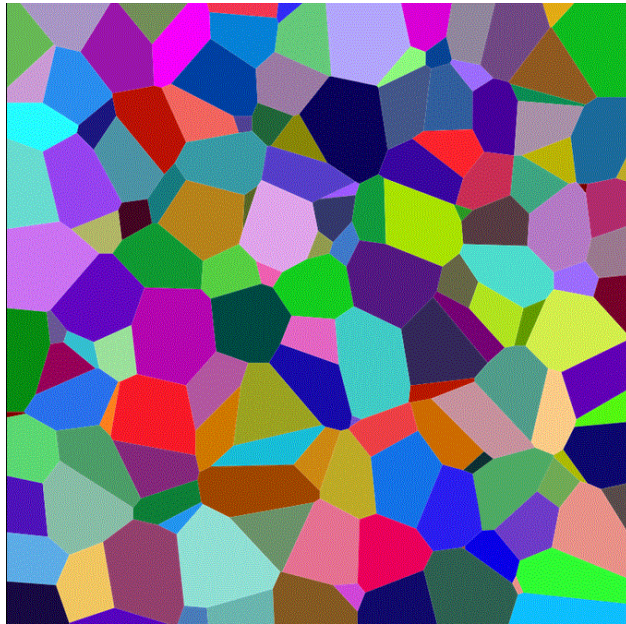
Εικόνα 12: Η πιο στιβαρή ηλεκτρική κιθάρα μέχρι στιγμής φτιαγμένη σε 3D εκτυπωτή τεχνολογίας DMLS από σκόνη τιτανίου. Παρόλο τη στιβαρότητά της το συνολικό βάρος παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Αναφ. [14]





Εικόνα 13: Τα ελαστικά του μέλλοντος είναι φτιαγμένα από 3D εκτυπωτή. Τα συγκεκριμένα μοιάζουν πολύ με την μέθοδο επίπεδου μοτίβου (2,5D) και λόγω έλλειψης αέρα -aerless- δεν αστοχούν εύκολα. Αναφ. [15]

## 1.6 Voronoi – ψηφιδωτή μέθοδος (Tessellation method)

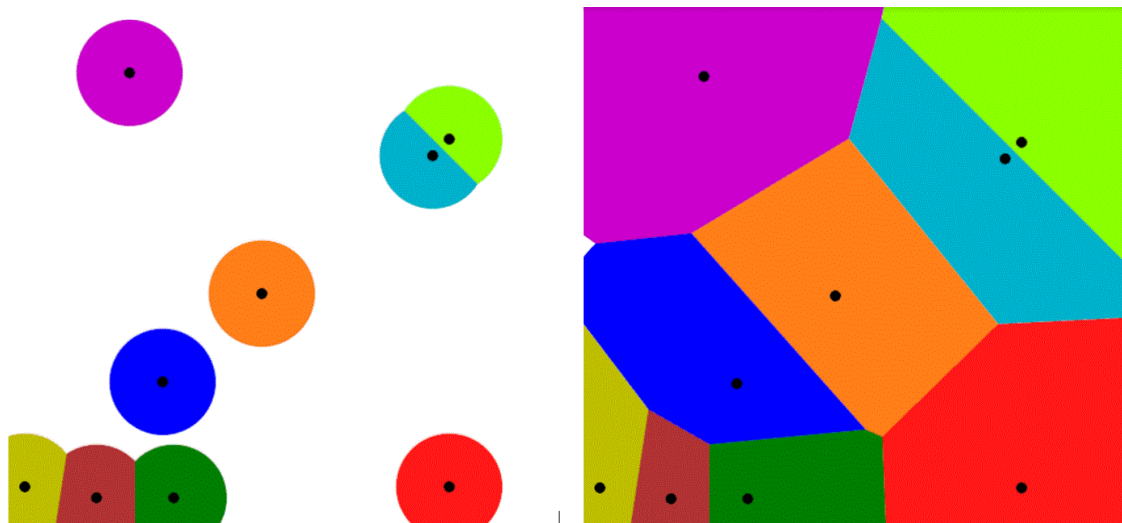


Εικόνα 14: Αυτό είναι ένα κομμάτι του διαγράμματος Voronoi ενός τυχαίου συνόλου σημείων σε ένα τρισδιάστατο πλαίσιο. Τα κελιά είναι όλα κυρτά πολύεδρα. Αναφ. [19]

Είναι γνωστοί αρκετοί αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για την κατασκευή διαγραμμάτων Voronoi, είτε άμεσα (όπως το ίδιο το διάγραμμα) είτε έμμεσα ξεκινώντας με έναν [τριγωνισμό Delaunay](#) Αναφ. [20]

Στη μετρολογία επιφανειών, η ψηφίδωση Voronoi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μοντελοποίηση τραχύτητας επιφάνειας.

Στη γεωμετρία, τα διαγράμματα Voronoi μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρουν τον μεγαλύτερο κενό χώρο μέσα σε ένα σύνολο σημείων και σε ένα πολύγωνο που τα περικλείει.



Εικόνα 15: Η ψηφίδωση Voronoi αναπαράγεται με ακτινωτή ανάπτυξη των επιφανειών από τα σημεία προς τα έξω. α) αριστερά - αρχικό στάδιο αναπαραγωγής ψηφίδωσης β) δεξιά - τελικό στάδιο αναπαραγωγής ψηφίδωσης. Αναφ. [19]

Τα διαγράμματα Voronoi χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό τρισδιάστατων μοτίβων γεωμετρίας.

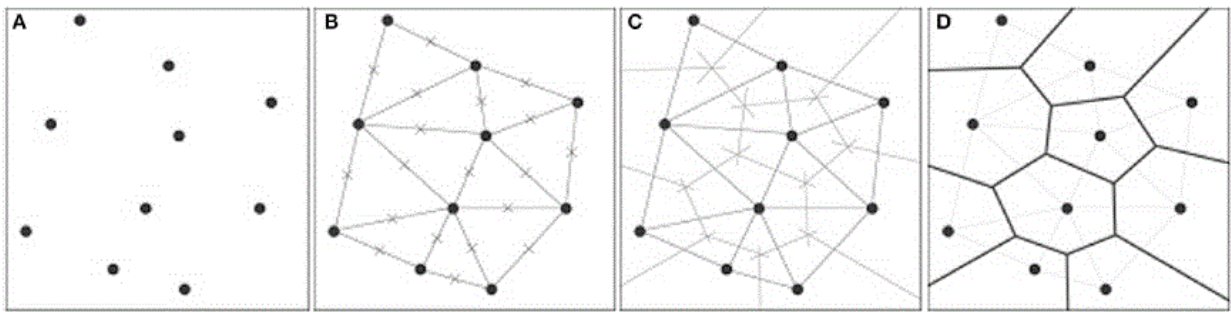
Η δομή Voronoi αν και ανήκει στην οικογένεια των πλεγματικών δομών συνήθως ξεχωρίζεται λόγω της επεκτασιμότητας και πολυπλοκότητας που μπορεί να έχει η ψηφίδωση - πλέξη της δομής του.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τεμαχισμός του [μετρικού χώρου](#), που καθορίζεται από τις αποστάσεις ως προς ένα ορισμένο σύνολο διακριτών στοιχείων, είναι η βάση της ψηφίδωσης Voronoi, η οποία καθιστά δυνατή τη μεταφορά αυτών των βιομιμητικών μορφών στο σχεδιαστικό περιβάλλον.

Η Voronoi ψηφίδωση μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε δισδιάστατες όσο και σε τρισδιάστατες δομές, επιτρέποντας πολλές εφαρμογές στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, επειδή η χρήση μη συμβατικών μοτίβων στη διαμόρφωση Προσθετικών Κατασκευών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, π.χ. επιτρέπει να έχουμε ακανόνιστες και μη επαναλαμβανόμενες προσόψεις. Δεδομένου ότι οι μηχανικές ιδιότητες του σχεδίου Voronoi επηρεάζονται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, για να κατανοηθεί πλήρως αυτή η εξάρτηση, είναι απαραίτητο να εμβαθύνουμε τη διαδικασία για τη δημιουργία της ψηφίδωσης Voronoi και του τριγωνισμού Delaunay. Το μοτίβο Voronoi αποτελείται από μια χωρική περιοχή διακριτοποιημένη από κυρτά πολύγωνα που γεμίζουν τον χώρο. Αναφ. [56].

### 1.6.1 Ορισμός διαγράμματος Voronoi

Η διαδικασία σχεδιασμού της ψηφίδωσης Voronoi ξεκινά με τον ορισμό ενός συνόλου σημείων (ονομάζονται επίσης σπόροι, τοποθεσίες ή γεννήτριες) εντός του χώρου σχεδιασμού, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Κατά συνέπεια, κάθε σημείο συνδέεται με τα πλησιέστερα γειτονικά σημεία. Η προκύπτουσα γεωμετρία ονομάζεται τριγωνισμός Delaunay. Για να προσδιοριστούν τα κέντρα των τριγώνων Delaunay, σημειώνονται τα μέσα σε κάθε τμήμα και σχεδιάζονται οι διχοτόμοι. Οι γραμμές που δημιουργούνται από την ένωση αυτών των ορθογώνιων τμημάτων αντιπροσωπεύουν τις άκρες των περιοχών Voronoi. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο πολυγωνικών κελιών που ορίζουν το διάγραμμα Voronoi Αναφ. [56].



Εικόνα 16: Διαδικασία δημιουργίας δομής Voronoi. (A) Κατανομή των σπόρων εντός του πεδίου σχεδίασης, (B) τριγωνισμός Delaunay, (C) Αναγνώριση των διχοτόμων γραμμών, (D) Δομή ψηφίδωσης Voronoi Αναφ. [56].

Η μέθοδος της τυχαίας δομής Voronoi, όπως προτάθηκε από τους Silva και Gibson (1997) Αναφ. [58] και Zhu et al. (2001b) Αναφ. [57], συνίσταται στη δημιουργία  $n$  τυχαίων σπόρων σε αυθαίρετο τετραγωνικό εμβαδόν ( $A_0$ ). Για κανονικές δομές πλέγματος κηρήθρας, που αποτελούνται από πανομοιότυπα κελιά με έξι πλευρές και γωνία κορυφής  $120^\circ$ , η απόσταση ( $\delta_i$ ) μεταξύ δύο γειτονικών σπόρων είναι παντού σταθερή και ίση με την απόσταση μεταξύ δύο σημείων στο κανονικό πλέγμα ( $d_0$ ).

$$d_0 = \sqrt{\frac{2A_0}{n\sqrt{3}}}$$

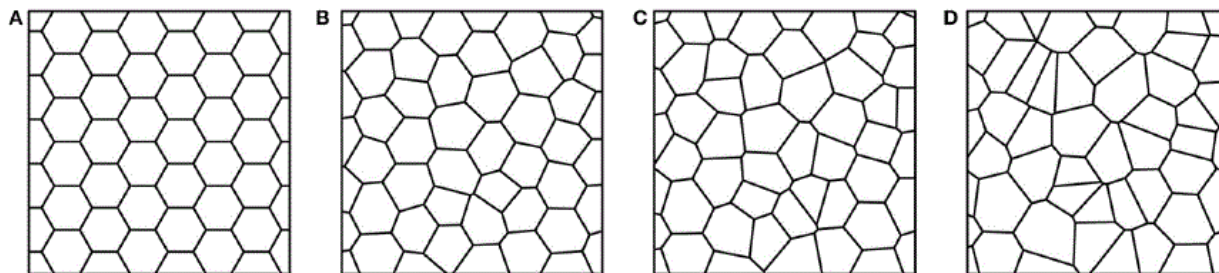
Για να ληφθούν  $n$  κελιά στην περιοχή  $A_0$ , είναι απαραίτητο η απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε γειτονικών πυρήνων στην τυχαία διαμόρφωση  $\delta_i$  να είναι μικρότερη από την  $d_0$ . Το περιοδικό μοτίβο Voronoi δημιουργείται απλώς με την αντιγραφή αυτών των σημείων σε γειτονικές περιοχές και τη διαγραφή των τμημάτων από την τετραγωνισμένη περιοχή.

Η μέτρηση του βαθμού διαταραχής μιας ψηφίδας Voronoi μπορεί να ληφθεί μέσω:

$$\alpha = 1 - \frac{\delta}{d_0}$$

η οποία ενημερώνει για τη διαταραγμένη φύση του σχεδίου.





Εικόνα 17: Ψηφίδωση Voronoi με διάφορες τιμές της μεταβλητής  $\alpha$ : (A) κανονική  $\alpha = 0$ , (B)  $\alpha = 0,5$ , (C)  $\alpha = 0,7$ , και (D) πλήρως τυχαία  $\alpha = 1$  Αναφ. [56].

## 1.7 Custom Lattices – Προσαρμοσμένα πλέγματα

Πέρα από τις γνωστές πλεγματικές δομές με τις υποκατηγορίες και τα καθορισμένα σχήματα των κελιών τους, μπορεί να γίνει επίσης σχεδιασμός και προσαρμογή πλεγμάτων όπου αυτό μας επιτρέπει να ορίσουμε κατά επιλογήν τα κελιά της δομής μίας κατασκευής. Οποιαδήποτε γεωμετρία μπορεί να μοντελοποιηθεί εφόσον χωράει στα όρια ενός κύβου και να μετατραπεί σε πλέγμα μετά από έναν αξιόλογο ποιοτικό έλεγχο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για όποιον θέλει να πειραματιστεί με τις ιδιότητες και τις δυνατότητες ενός πλέγματος. Είτε αυτό είναι στην μηχανική απόδοση (αντοχή στρέβλωσης κλπ.) είτε σε οτιδήποτε άλλο. Οι επιλογές γεωμετρίας εφόσον συνεργάζονται με το κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα μπορούν να βελτιστοποιηθούν και να προσομοιωθούν χωρίς περιορισμούς.

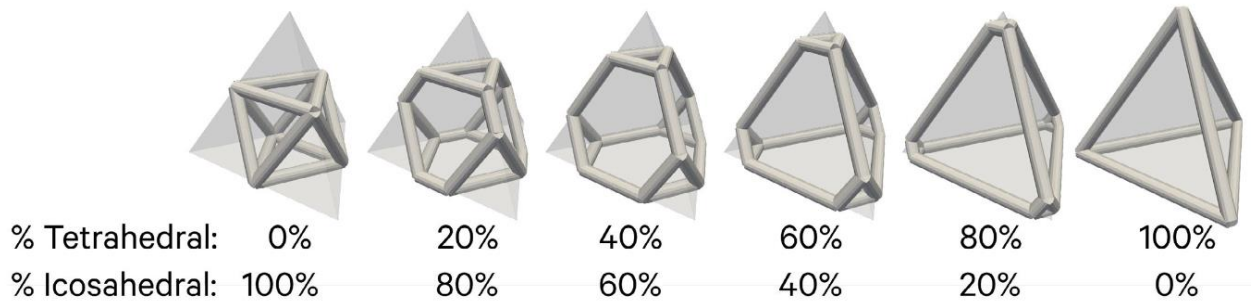
## 1.8 Topology optimized lattices – Δομές με Τοπολογική Βελτιστοποίηση

Η δυνατότητα και ιδιαιτερότητα κατασκευής μίας πλεγματικής δομής εξαρτάται από την τοπολογία του πλέγματος (δηλαδή, το σχήμα, το μέγεθος και το ποσοστό του κλάσματος όγκου του κελιού). Το σχήμα κελιού αναφέρεται στη συνδεσιμότητα μεταξύ των μοναδικών κελιών σε μια δομή και καθορίζει εάν η δομή είναι αυτό-υποστηριζόμενη κατά τη διάρκεια της κατασκευής της. Η πιο θεμελιώδης απαίτηση για την κατασκευή οποιουδήποτε δικτυωτού πλέγματος είναι η αυτό-υποστήριξη.

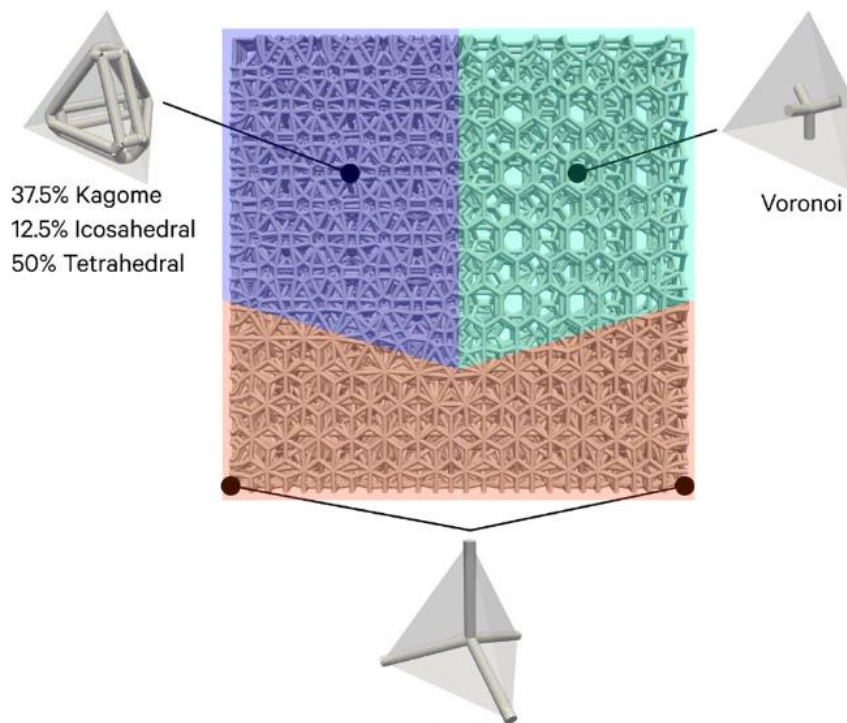
Η Τοπολογική Βελτιστοποίηση παρέχει τη λύση της βέλτιστης κατανομής υλικού στο χώρο σχεδιασμού και είναι αποτελεσματικό και λογικό να καθοδηγείται ο σχεδιασμός της δομής του πλέγματος μέσω της κατανομής της πυκνότητας που δημιουργείται από την TB. Αναφ. [28] Η αντικειμενική συνάρτηση αυτής της βελτιστοποίησης ορίστηκε για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας παραμόρφωσης.

Στις μέρες μας στην Τοπολογική Βελτιστοποίηση μίας κατασκευής έχουν προστεθεί και άλλες δύο έννοιες TB. Της ποικίλους μηχανικής ιδιότητας όπου μπορεί ένα κελί να ανήκει σε μία δομή αλλά να τείνει έως ένα ποσοστό να μετατραπεί σε διαφορετικού είδους δομή με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών της παραγόμενης δομής, και αυτή της υβριδικής

κατασκευής όπου σε διαφορετικά σημεία του προϊόντος χρησιμοποιούνται διαφορετικές δομές για την κατασκευή του. Για παράδειγμα:



Εικόνα 18: Μοναδιαίο Κελί σε διάφορα ποσοστά τετράπλευρης δομής και εικοσάπλευρης δομής, ποικίλους μηχανικής ιδιότητας Αναφ. [40].



Εικόνα 19: Υβριδική κατασκευή με 3 διαφορετικές δομές Αναφ. [40].

Ο Χουσεΐν Αναφ. [48] πραγματοποίησε πειραματικές δοκιμές σε δομές πλέγματος για να βρει την επίδραση της δυνατότητας κατασκευής κυψελωτών δομών με βάση την τοπολογία κελιού, δηλαδή το σχήμα του κελιού, το μέγεθος και το κλάσμα όγκου του.

## 1.9 Δυνατότητες και δυναμική πλεγματοκτών δομών προσθετικής κατασκευής

### 1.9.1 Κατασκευαστικές μέθοδοι και τεχνικές

Ένα άλλο κεφάλαιο και πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό γενικά στην έννοια της ΠΚ το οποίο διαμορφώνει τις δυνατότητες δόμησης της επιλεγμένης κατασκευής είναι η κύρια διεργασία της επιλεγόμενης κατασκευαστικής τεχνολογίας της ΠΚ, δηλαδή ο τρόπος εκτύπωσης του προϊόντος που θέλουμε να υλοποιήσουμε.

Πολλές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, με διαφορετικά χαρακτηριστικά κατασκευής η κάθε μία, υπάρχουν διαθέσιμες στην αγορά με πολυάριθμες διαφορετικές επιλογές ως πρώτη ύλη.

Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά οι αρχικές κατηγορίες της κάθε τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής σύμφωνα με το ανάλογο πρότυπο (ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary). Αυτές οι αρχικές κατηγορίες αναλύονται επιπλέον σε άλλες τεχνικές ΠΚ. Αναφ. [30]:

- Binder Jetting (BJT)
- Directed Energy Deposition (DED)
- Material Extrusion (MEX)
- Material Jetting (MJT)
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Sheet Lamination (SHL)
- Vat Photopolymerization (VPP)

### 1.9.2 Υλικά κατασκευής πλεγμάτων

Τα υλικά κατασκευής των δομών πλέγματος στην προσθετική κατασκευή δεν είναι σε αυτή τη διπλωματική εργασία ένα βασικό στοιχείο για την επιλογή της καταλληλότερης δομής σε μία κατασκευή διότι προσπαθούμε να μελετήσουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά των πλεγματοκτών δομών, αυτούσια και χωρίς επιπλέον παράγοντες υπολογισμού.

Σίγουρα όμως ένα βασικό χαρακτηριστικό για μία στιβαρότερη και αποτελεσματικότερη κατασκευή είναι η επιλογή κατάλληλου υλικού εκτύπωσης αναλόγως την κάθε κατασκευαστική περίπτωση.

Σε γενικά πλαίσια η Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Τήγματος - Fused Deposition Modeling (FDM), επίσης γνωστή μέθοδος ως Fused Filament Fabrication (FFF), και η Στερεολιθογραφία – Stereolithography (SLA) είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι τρισδιάστατης εκτύπωσης σε επίπεδο καταναλωτή.

Πολλά υλικά, απλά αλλά και σύνθετα υπό διάφορες μορφές έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια κυρίως όμως σε μορφή ρητίνης. Κάθε εταιρία ερευνά νέα υλικά για τις δυναμικές αποδόσεις των εφαρμογών που την απασχολούν με αποτέλεσμα να έχουμε ποικίλες επιλογές υλικών στην αγορά. Για το λόγο αυτό ο μηχανικός σχεδίασης έχει πάρα πολλές επιλογές υλικών και συνεχώς προστίθενται και

άλλες. Αυτές οι επιλογές πάντα θα πρέπει να ακολουθούνται με τη γνώση του κατάλληλου συστήματος και τεχνικής εκτύπωσης.

Ενώ η 3D εκτύπωση μπορεί να δημιουργήσει διάφορα αντικείμενα από μια γκάμα πρώτων υλών από πλαστικά και μέταλλα, η διαθέσιμη επιλογή πρώτων υλών δεν είναι εξαντλητική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν μπορούν όλα τα μέταλλα ή τα πλαστικά να ελέγχονται μέσω της θερμοκρασίας ή/και ακτινοβολίας αρκετά ώστε να επιτρέπεται αυτού του είδους η τεχνική κατασκευής.

Παρακάτω θα δούμε πίνακα με αναφορά σε διάφορα κράματα μετάλλων και τον τομέα εφαρμογής τους.

Application area	Aluminum	Maraging steel	Stainless steel	Titanium	Cobalt chrome	Nickel super alloys	Precious metals
Aerospace	X		X	X	X	X	
Medical			X	X	X		X
Energy, oil and gas			X				
Automotive	X		X	X			
Marine			X	X		X	
Machinability and weldability	X		X	X		X	
Corrosion resistance			X	X	X	X	
High temperature			X	X		X	
Tools and molds		X	X				
Consumer products	X		X				X

Εικόνα 20: Κράματα μετάλλων και τομείς εφαρμογής Αναφ. [41]

### 1.9.3 Ακρίβεια διαστάσεων κατασκευής

Όσο για την ακρίβεια της διαδικασίας παραγωγής με ΠΚ, μπορεί να είναι διαφορετική στις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια ενός εξαρτήματος σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται από τον προσανατολισμό του σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της ΠΚ.

Μέχρι στιγμής η τεχνολογία Material jetting είναι η πιο ακριβής διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έχει ακρίβεια διαστάσεων  $\pm 0,1\%$  και κατώτερο όριο μεγέθους εκτύπωσης περίπου  $\pm 0,014$  mm. Η θερμότητα χρησιμοποιείται κατά πολύ λιγότερο στη διαδικασία αυτή σε σχέση με τις άλλες τεχνικές, επομένως είναι πολύ δύσκολο να προκύψουν προβλήματα παραμόρφωσης και συρρίκνωσης διότι εναποθέτει ρητίνη από μικροσκοπικά ακροφύσια - nozzles σε μια επιφάνεια κατασκευής με γρήγορα περάσματα και τη στερεοποιεί αμέσως με ακτινοβολία UV. Σίγουρα όμως η κάθε τεχνολογία έχει τον σκοπό της.

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι όσο μικρότερο είναι το ύψος του στρώματος εκτύπωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση, πράγμα που σημαίνει ότι η εκτυπωμένη επιφάνεια θα είναι πιο λεία και πιο λεπτομερής. Το μειονέκτημα όμως ενός μικρότερου ύψους στρώματος είναι ότι η διαδικασία εκτύπωσης θα διαρκέσει περισσότερο χρόνο λόγω της ανάγκης για περισσότερα στρώματα. Επιπλέον, τα λεπτότερα στρώματα δεν εγγυώνται πάντα καλύτερες εκτυπώσεις. Αναφ. [29]

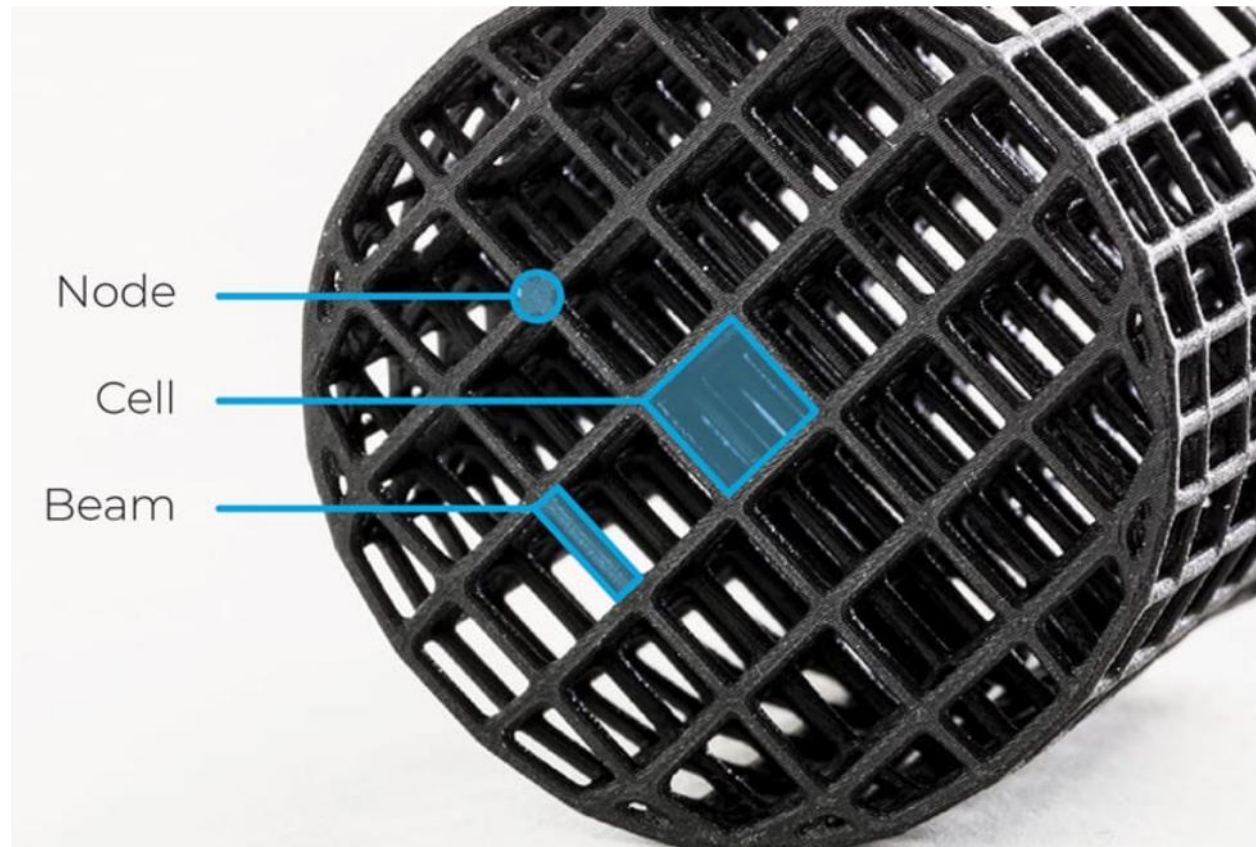
Αυτό που επηρεάζει την ακρίβεια των διαστάσεων μίας κατασκευής με ΠΚ είναι Αναφ. [36]:

1. Ακρίβεια μηχανήματος: Μερικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι απλώς πιο ακριβείς από άλλους. Πολλοί κατασκευαστές παρέχουν τυπικές διαστάσεις για τα καλά σχεδιασμένα εξαρτήματα που κατασκευάζονται σε ένα καλά συντηρημένο μηχάνημα.
2. Υλικά: Η επιλογή του σωστού υλικού για την κατασκευή θα αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια με την οποία μπορεί να εκτυπωθεί.
3. Μέγεθος αντικείμενου: Γενικά, τα μικρά αντικείμενα μπορούν να εκτυπωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι τα μεγάλα. Τα μεγαλύτερα αντικείμενα έχουν μεγαλύτερες επιφάνειες και ως επόμενο περισσότερα σφάλματα κατασκευής.
4. Στρέβλωση και συρρίκνωση: Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, πιθανόν να παραμορφώσουν και να συρρικνώσουν τα υλικά κατά την διάρκεια της διαδικασίας της εκτύπωσης. Μεγάλος όγκος υλικού, επίπεδες επιφάνειες και μη υποστηριζόμενες κατασκευές μπορούν όλα να παραμορφωθούν και θα πρέπει να αποφεύγονται.
5. Υποστηρικτικές δομές/ Κατασκευές στήριξης: Η παρουσία δομών στήριξης μπορεί να είναι απαραίτητη για την επίτευξη κατασκευής με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, η αφαίρεση αυτών των δομών στήριξης επηρεάζει το φινίρισμα της επιφάνειας του προϊόντος.
6. Μετά-επεξεργασία: Η κατάλληλη φροντίδα της κατασκευής μετά την εκτύπωσή του μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την τελική ακρίβεια του φινιρίσματος και της γεωμετρίας της τελικής κατασκευής. Οι κατάλληλες διαδικασίες ψύξης ή/και σκλήρυνσης είναι απαραίτητες για να διατηρηθούν τα αντικείμενα στο επιθυμητό σχήμα.



#### 1.9.4 Χρησιμότητα και οφέλη πλεγματικών δομών

Με την εφαρμογή κατάλληλης πλεγματικής δομής στη δημιουργία προσθετικής κατασκευής οι μηχανικοί μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των προϊόντων τους σε πολύ μεγάλο βαθμό στο βάρος, στο κόστος, στην εμφάνιση, ακόμα και σε ιδιαίτερες δυνατότητες του τελικού προϊόντος. Οι πλεγματικές δομές κατά κύριο λόγο αποτελούνται από ένα διαμορφωμένο δίκτυο κόμβων και δοκών ή αντηρίδων, που μειώνουν δραματικά το βάρος αλλά διατηρούν τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.



Εικόνα 21: Μεταβλητές από τις οποίες αποτελείται μία πλεγματική δομή στην ΠΚ. Node: Κόμβος, Cell: Κελί, Beam: Αντηρίδα. Αναφ. [31]

Η ενσωμάτωση δομών πλέγματος επιτρέπει στους μηχανικούς να εξερευνήσουν περισσότερο τον χώρο της σχεδίασης αναθεωρώντας την επιθυμητή απόδοση του προϊόντος τους.

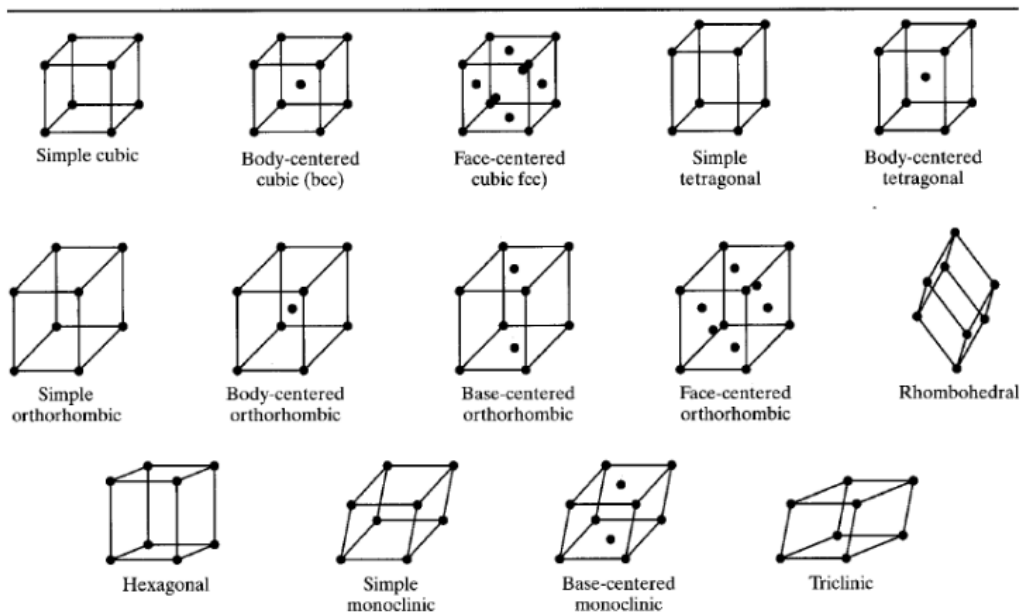
Υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι τύποι πλεγματικής δομής που έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά (τρόποι παραμόρφωσης, τροποποιημένη αντίδραση σε συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης, απορρόφηση δυνάμεων ή δονήσεων, αισθητική, κλπ.). Πολλές από αυτές τις δομές πλέγματος είναι εμπνευσμένες και προέρχονται από [φυσικές κρυσταλλικές δομές](#) και συγκεκριμένα από τα τρισδιάστατα συστήματα δομών Bnavais Αναφ. [33]. Ο μελετητής μπορεί να προσθέσει σε επιλεγμένη δομή επιπλέον επίπεδα

(fillets) και εγκάρσιες ράβδους (crossbars) και με ορισμένες παραλλαγές ή/και επαναλήψεις δομών να δημιουργήσει μία άλλη πρωτότυπη πλεγματική δομή.

Παρακάτω φαίνονται τα κατανομημένα τρισδιάστατα συστήματα δομών Bravais:

System	Axial lengths and angles	Bravais Lattice	Lattice Symbol
Cubic	Three equal axes at right angles $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Body-centered Face-centered	P I F
Tetragonal	Three axes at right angles, two equal $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Body-centered	P I
Orthorhombic	Three unequal axes at right angles $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Body-centered Base-centered Face-centered	P I C F
Rhombohedral (trigonal)	Three equal axes, equally inclined $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Simple	R
Hexagonal	Three equal coplanar axes at $120^\circ$ , third axis at right angles $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	Simple	P
Monoclinic	Three unequal axes, one pair not at right angles $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Simple Base-centered	P C
Triclinic	Three unequal axes, unequally inclined and none at right angles $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Simple	P

Εικόνα 22: Ονομασία και χαρακτηριστικά δομών Bravais



Εικόνα 23: Εικονική μορφή δομών Bravais

Από τις πιο σημαντικές δομές πλέγματος είναι η κυβική με κέντρο το πρόσωπο (face-centered cubic - FCC), η κυβική με κέντρο το σώμα (body-centered cubic - BCC) και η εξαγωνική (hexagonal closest packed - HCP), ή οποία δεν θεωρείται να προέρχεται από τα συστήματα δομών Bravais, Αναφ. [32].

Μέσω της τεχνικής της πλεγματικής δομής, η συνολική μάζα του εξαρτήματος μπορεί να μειωθεί κατά 90% ή περισσότερο, ρυθμίζοντας με ακρίβεια τις παραμέτρους του πλέγματος στα φυσικά φορτία του εξαρτήματος με TB. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα και οφέλη τα οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε μέσω αυτών των κατασκευαστικών τεχνικών δόμησης των προϊόντων Αναφ. [31].

#### 1.9.4.1 Μηχανικά οφέλη

Τα μηχανικά οφέλη των πλεγμάτων είναι γνωστά εδώ και χρόνια. Αν προσέξετε, θα δείτε πλέγματα στη φύση (όπως τα οστά, η κηρήθρα των μελισσών, οι μικρό-δομές των κρυστάλλων κλπ.) καθώς και στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Πάρτε ως παράδειγμα τους ουρανοξύστες ή ακόμα και του Πύργου του Άιφελ: Η δομή της κατασκευής στηρίζει αποτελεσματικά το βάρος του συνολικού όγκου. Η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος που είναι εφικτή με τις πλεγματικές δομές επαληθεύεται και αποδίδεται ως αρχιτεκτονικό επίτευγμα. Παρομοίως, στο σχεδιασμό προϊόντων, τα μηχανικά πλεονεκτήματα των δομών αυτών (π.χ. μεγάλη επιφάνεια, εξαιρετική απορρόφηση κραδασμών, προστασία από κρούσεις, αντοχή σε πίεση) δίνουν τη δυνατότητα στους σχεδιαστές προϊόντων να αφηφούν τους περιορισμούς της παραδοσιακής κατασκευής για να δημιουργήσουν νέα, ίσως και καλύτερα σε απόδοση, προϊόντα.

#### 1.9.4.2 Βελτίωση λόγου αντοχής προς βάρος

Στη βελτίωση του λόγου αντοχής προς το βάρος ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος, υπάρχουν γενικά δύο τρόποι.

- a. Μέσω της παραδοσιακής κατασκευής, αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση των υλικών σε μη κρίσιμες περιοχές για τη βελτιστοποίηση της χρήσης υλικών.
- b. Μέσω της πλέξης, όπου μπορεί να αφαιρεθεί υλικό στις κρίσιμες περιοχές του εξαρτήματος. Παρόλο που η πλέξη μειώνει τη συνολική αντοχή του εξαρτήματος, η εξοικονόμηση βάρους μπορεί να βελτιώσει αυτή την αναλογία αντοχής προς βάρος.

#### 1.9.4.3 Παραγωγή μεγάλων αξιοποιήσιμων επιφανειών

Με τα πλέγματα δεν πραγματοποιείται μόνο ελαχιστοποίηση βάρους αλλά μπορούν να παραχθούν μεγαλύτερες αξιοποιήσιμες επιφάνειες. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνονται για παράδειγμα και οι ανταλλαγές θερμότητας όπως στους εναλλάκτες θερμότητας (ψήκτρες) που χρησιμοποιούνται πχ. σε υπολογιστές. Τα πλέγματα μπορούν να αυξήσουν δραματικά την ποσότητα της διαθέσιμης επιφάνειας αυτού του εναλλάκτη είτε να την παράξουν πιο οικονομικά, ακόμα και όπου απαιτούνται ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, η προσθετική κατασκευή με τις πλεγματικές δομές της μπορεί να λάβει χώρα.

#### 1.9.4.4 Βελτίωση απορρόφησης έντασης κρούσης

Τα πλέγματα μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην προστασία των προϊόντων από πτώσεις ή συγκρούσεις, απορροφώντας καλύτερα την ενέργεια πρόσκρουσης και δόνησης. Τα πλέγματα

μπορούν, είτε να ενσωματωθούν σε ένα προϊόν όπως για παράδειγμα σε ένα κράνος μοτοσυκλέτας για να μειώσουν την καταπόνηση από τυχόν πρόσκρουση, είτε να χρησιμοποιηθούν ως αναλώσιμο υλικό για την προστασία των κρίσιμων εξαρτημάτων ενός προϊόντος ή/και ανθρώπου. Ένα πλέγμα θα μπορούσε, για παράδειγμα, να χρησιμοποιηθεί γύρω ή μέσα σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα για την προστασία τους από ένα δυναμικό γεγονός, όπως μια πολύ συχνή τυχαία πτώση ή ακόμη και να προσφέρει προστασία από χημικές ουσίες.

#### *1.9.4.5 Βελτίωση απορρόφησης ανεπιθύμητων δονήσεων – μηχανικών θορύβων*

Τα κατασκευασμένα πλέγματα με ΠΚ δίνουν στους μηχανικούς έναν νέο τρόπο για την εξάλειψη του μηχανικού θορύβου όπως τις δονήσεις οι οποίες μπορεί να είναι δυσάρεστες για τους χρήστες και να υποβαθμίσουν την απόδοση των μηχανημάτων.

Ορισμένα πλέγματα είναι αποτελεσματικά στην απόσβεση δονήσεων λόγω της σχετικά μεγάλης ευκαμψίας και της ικανότητάς τους να αντέχουν και να ανακτούν μεγάλες τάσεις δόνησης. Τα πλέγματα θα μπορούσαν, για παράδειγμα, να ενσωματωθούν σε βοηθητικό κομμάτι απομόνωσης θορύβου σε βαρύ εξοπλισμό ή/και κινητήρα ώστε να μειώσουν την ποσότητα ενέργειας που πηγαίνει στο σύστημα κατασκευής. Ο ρυθμιζόμενος χαρακτήρας των πλεγμάτων επιτρέπει στους μηχανικούς να βελτιώνουν τα σχέδια ώστε να ταιριάζουν με την κάθε εφαρμογή.

#### *1.9.5 Το Δυναμικό των πλεγμάτων τηρώντας τις αρχές του DFAM*

Η προσθετική κατασκευή επεκτείνεται σε νέες εφαρμογές και ευκαιρίες για νέα προϊόντα στο εμπόριο, υπάρχουν όμως σχεδιαστικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν ολοκληρωθεί ένα λειτουργικό πλέγμα. Σε αυτό το σημείο παρεμβαίνει ο σχεδιασμός για την προσθετική κατασκευή (DFAM). Το DFAM βοηθά τους μηχανικούς σχεδιασμού να διασφαλίσουν ότι τα εκτυπωμένα κομμάτια τους ταιριάζουν με την πρόθεση του σχεδιασμού και εξασφαλίζει την απρόσκοπτη μετάβαση από την ταχεία πρωτοτυποποίηση στην ταχεία παραγωγή Αναφ. [34].



Εικόνα 24: Παραδείγματα α) δομής κελιών πλέγματος, β) μεγέθους και πυκνότητας κελιών, γ) υλικό προσθετικής κατασκευής δ) προσανατολισμός κελιών. Αναφ. [31].

Ορισμένες σημαντικές θεωρήσεις για το DFAM περιλαμβάνουν όπως φαίνεται και στην εικόνα 24. Αναφ. [31]:

- a) τη δομή των κελιών πλέγματος
- b) το μέγεθος και την πυκνότητα των κελιών
- c) την επιλογή υλικού και
- d) τον προσανατολισμό των κελιών

#### 1.9.5.1 Δομή κελιού πλέγματος

Υπάρχει μια τεράστια ποικιλία κυψελωτών δομών, ο κατάλογος αυτών των δομών είναι πολύ μεγάλος και συνεχώς αυξάνεται. Από τις πιο συνηθισμένες δομές στην ΠΚ είναι οι πλεγματικές δομές: cubic, star, octet, hexagonal, diamond και tetrahedron. Οι δομές των μοναδιαίων κελιών μπορούν να διαμορφωθούν και ακόμη να αναμιχθούν με διαφορετικές δομές ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της τελικής κατασκευής.

#### 1.9.5.2 Μέγεθος και πυκνότητα κελιών

Το μέγεθος και η πυκνότητα των κελιών αναφέρονται στο μέγεθος ενός μεμονωμένου μοναδιαίου κελιού και στο πλήθος των κελιών που επαναλαμβάνονται σε έναν συγκεκριμένο χώρο. Το ίδιο το μέγεθος του κελιού εξαρτάται από το πάχος και το μήκος των μελών του και των συνδετικών κόμβων. Τα μεγαλύτερα κελιά μπορεί να είναι ευκολότερο να εκτυπωθούν αλλά μπορεί επίσης να δρουν πιο άκαμπτα. Αντίστοιχα τα μικρότερα κελιά επιτρέπουν πιο ομοιογενείς αποκρίσεις του συστήματος αλλά περιορίζονται από τα χαρακτηριστικά μεγέθη.



### 1.9.5.3 Επιλογή υλικού

Το υλικό που θα επιλεγεί για την κατασκευή μπορεί να καθορίσει τις πιθανές ιδιότητες του πλέγματος. Τα ελαστομερή ή μαλακά υλικά απαιτούν γενικά πυκνότερο πληθυσμό κελιών για να μειωθεί η χαλάρωση - λύγιση κατά την εκτύπωση. Αντίθετα, τα πλέγματα που εκτυπώνονται με ένα πιο άκαμπτο υλικό επιτρέπουν γενικά μεγαλύτερο εύρος σχεδιασμού με λεπτότερα μέλη και μεγαλύτερα μεγέθη κελιών.

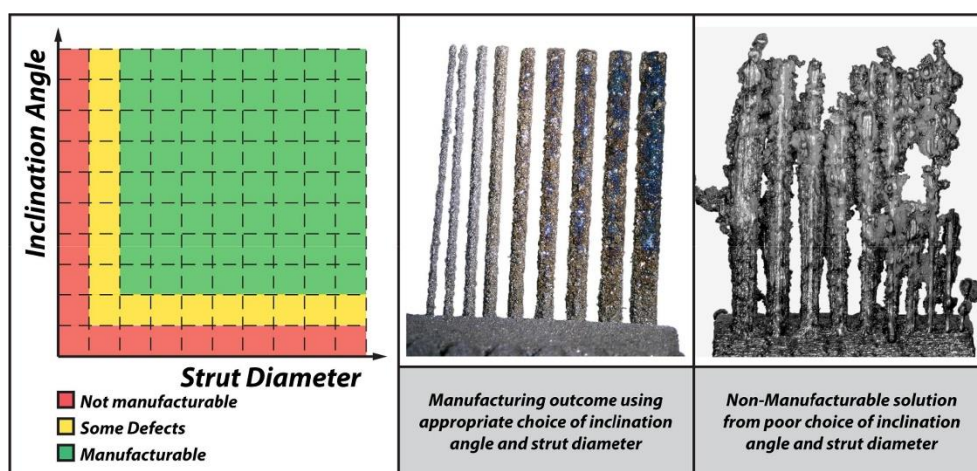
### 1.9.5.4 Προσανατολισμός κελιών

Η γωνία υπό την οποία εκτυπώνεται ένα κελί μπορεί να επηρεάσει την επιτυχία της εκτύπωσης, επειδή επηρεάζει την ποσότητα και την τοποθέτηση των απαιτούμενων στηριγμάτων. Σε γενικές γραμμές, ένα καλά επιλεγμένο και προσανατολισμένο πλέγμα είναι αυτοφερόμενο, δηλαδή δεν απαιτεί ξεχωριστά στηρίγματα για την στήριξη της κατασκευής του. Συχνά, μια δομή μπορεί να περιστραφεί για να μειωθούν τα στηρίγματα.

Η διαμόρφωση των επαναλαμβανόμενων μοναδιαίων κελιών ενός πλέγματος ανοίγουν το δρόμο σε αμέτρητα μεγέθη κελιών, σχήματα και χαρακτηριστικά απόδοσης.

Η εγγενής πολύπλοκη φύση των πλεγμάτων καθιστά σχεδόν αδύνατη τη δημιουργία τους με οποιονδήποτε άλλο τρόπο παρά μόνο με την προσθετική κατασκευή.

Γνωρίζοντας λοιπόν τις μεθόδους και τα χαρακτηριστικά των τύπων ΠΚ όπως επίσης και τα διάφορα υλικά τα οποία μπορεί να επιλέξει ο μηχανικός σε συνδυασμό με την γνώση που αναδύεται από τη βιβλιογραφία για την καλύτερη επιλογή δομής πλέγματος ανάλογα την εφαρμογή, θα υπάρχει στην διάθεσή του ένα ισχυρό συμβουλευτικό εργαλείο για να επιτύχει κατασκευαστικά το βέλτιστο τελικό προϊόν που επιθυμεί.



Εικόνα 25: Στοιχεία αντηρίδας ως συνάρτηση της διαμέτρου και της γωνίας κλίσης. Αναφ. [41]

### 1.9.6 Σχεδιασμός πλεγματικής δομής

Ο σχεδιασμός πλεγματικών δομών λαμβάνει υπόψιν ορισμένα ή όλα τα ακόλουθα στοιχεία σχεδιασμού:

- Γεωμετρία: Η γεωμετρία ενός πλέγματος αναφέρεται στο φυσικό μέγεθος και το σχήμα των τμημάτων του και στον τρόπο με τον οποίο το μοτίβο τους διατάσσεται σε όλη τη δομή της κατασκευής. Οι μεμονωμένες μονάδες στη δομή ενός πλέγματος είναι γνωστές ως μοναδιαία κελιά.
- Ακαμψία/διαμόρφωση: Η δυσκαμψία ή το μέτρο ελαστικότητας του πλέγματος αναφέρεται στη δύναμη που απαιτείται για την παραμόρφωση της δομής του. Το μέτρο προσδιορίζεται συνήθως για μικρές παραμορφώσεις όταν η απόκριση του πλέγματος είναι πλήρως ελαστική.
- Απόκριση λυγισμού: Η απόκριση λυγισμού περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο μια δομή πλέγματος υποχωρεί/ παραμορφώνεται. Εξαρτάται από τη δομική αστάθεια των στοιχείων του πλέγματος κατά την διάρκεια μίας παραμόρφωσης. Δεν παρουσιάζουν όλες οι δομές πλέγματος λυγισμό και ο λυγισμός δεν είναι πάντα ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό.
- Διασπορά ενέργειας: Η διάχυση ενέργειας μιας δομής πλέγματος αναφέρεται στην ικανότητά της να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωσή της.

#### 1.9.6.1 Παραδείγματα απόκρισης δομών πλέγματος

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει στις παρακάτω δομές από ελαστομερές υλικό, μπορούν να παρουσιαστούν κάποια σχετικά αποτελέσματα για τις αποκρίσεις των δομών αυτών υπό παραμορφωτικές-συμπιεστικές δυνάμεις. Αναφ. [35]

- **Δομή Cubic:**

Ο βαθμός παραμόρφωσης δεν αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας.

Το απλό κυβικό πλέγμα (Simple cubic) έχει ανελαστική συμπεριφορά λυγισμού, η οποία παράγει διαφορετική απόκριση όταν φορτίζεται και όταν αποφορτίζεται. Η ανελαστική συμπεριφορά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της διάχυσης ενέργειας.

Η απόκριση λυγισμού αυτού του απλού κυβικού πλέγματος (simple cubic lattice) παράγει ένα κατώφλι δύναμης που το καθιστά καλό υποψήφιο για εφαρμογές ατομικής προστασίας και για τη θωράκιση ευαίσθητων εξαρτημάτων. Αυτός ο τύπος πλέγματος είναι επίσης αποτελεσματικός για την πλήρωση κενών μεταξύ εξαρτημάτων σε συγκροτήματα.

- **Δομή Kelvin:**

Σε αντίθεση με το απλό κυβικό πλέγμα, η δομή πλέγματος κελιών Kelvin έχει χαμηλό σημείο λυγισμού, πράγμα που σημαίνει ότι οι δοκοί της τεντώνονται σε απόκριση σε δύναμη. Η δομή πλέγματος Kelvin δεν έχει επίπεδο σημείο όπου συμβαίνει μόνιμη πλαστική παραμόρφωση λόγω θραύσης της δομής (Πλατό) και συμπιέζεται συνεχώς με απλή ελαστική δυσκαμψία μέχρι να συμπιεστεί πλήρως.

Η δομή πλέγματος Kelvin αποθηκεύει ενέργεια με την συμπιεστική παραμόρφωσή της και την επιστρέφει με την ανακούφιση της εφαρμογής της δύναμης, για αυτό και είναι ένας καλός υποψήφιος για την αντικατάσταση αφρού σε προϊόντα υπό στατική συμπίεση, όπως μαξιλάρια καθισμάτων ή χειρολαβές. Με τα περίπλοκα εξαγωνικά κελιά του, η δομή Kelvin είναι αρκετά εντυπωσιακή οπτικά, καθιστώντας τη μια επιλογή για εφαρμογές αισθητικής και μόδας.

- **Δομή Body-Centered:**

Η δομή αυτή στο λυγισμό ανταποκρίνεται με αυξανόμενη δύναμη ανά μονάδα μετατόπισης έως ότου συμπιεστεί πλήρως. Το μέτρο ελαστικότητάς της είναι πολύ χαμηλότερο σε σύγκριση με το απλό κυβικό πλέγμα και δεν έχει επίπεδο σημείο Πλατό.

Όπως και η μονάδα Kelvin, το σωματο-κεντρικό πλέγμα (Body-Centered) αποθηκεύει ενέργεια με την ελαστική παραμόρφωσή του και επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα, όπως ένα ελατήριο, όταν αφαιρείται η δύναμη.

Με την ελαστική απόκριση σε υψηλές τάσεις, το πλέγμα Body-Centered είναι ένας καλός υποψήφιος για την αντικατάσταση αφρού σε προϊόντα υπό στατική συμπίεση. Οι γωνιακοί δοκοί που δείχνουν προς το κέντρο του κελιού καθιστούν την απόκρισή του ομοιόμορφη και συνεπή.

- **Δομή Body-Centered Cubic (BCC):**

Το σωματο-κεντρικό κυβικό πλέγμα (BCC) συνδυάζει το σωματο-κεντρικό πλέγμα και το απλό κυβικό πλέγμα σε μια ενιαία δομή.

Δεδομένου ότι το πλέγμα BCC συνδυάζει δύο τύπους τρισδιάστατα εκτυπωμένων πλεγμάτων, η απόκρισή του στον λυγισμό είναι ένας συνδυασμός και των δύο. Αυτό το πλέγμα λυγίζει όπως το απλό κυβικό πλέγμα, αλλά έχει πιο σταθερή συμπεριφορά μετά το λυγισμό.

Επειδή το πλέγμα BCC συνδυάζει τόσο ελαστική όσο και καμπτική απόκριση, είναι δυνατή η προσαρμογή της αποθήκευσης και της διάχυσης ενέργειας για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων εφαρμογών.

Το πλέγμα BCC είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές που επωφελούνται από μια προσαρμοσμένη ελαστική και θλιβόμενη απόκριση. Λειτουργεί επίσης καλά όταν ένα προϊόν απαιτεί διάχυση ενέργειας με πιο σταθερή απόκριση από την καθαρή λυγηρότητα που παρατηρείται στο απλό κυβικό πλέγμα.



#### 1.9.6.2 Απόδοση Δομής σύμφωνα με το μέγεθος του κελιού

Έχει παρατηρηθεί ότι οι ΠΔ όπου είναι κατασκευασμένες είτε με ανοιχτού είτε με κλειστού τύπου κελιά, για διαφορετικά μεγέθη μοναδιαίων κελιών τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης είναι παρόμοια επειδή δείχνουν παρόμοια αντίδραση. Παρόλα αυτά οι δομές πλέγματος με μικρότερα μεγέθη κελιών, λόγω του μεγαλύτερου πλήθους μοναδιαίων κελιών, κατανέμουν τη συμπιεστική τάση καλύτερα στο σύνολο της δομής, έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, περίπου 5 έως και 20 % υψηλότερη όσον αφορά την ακαμψία και θεωρούνται καλύτερα στο σχεδιασμό με μεγαλύτερη ασφάλεια σε σχέση με τις δομές που αποτελούνται από μεγαλύτερα μεγέθη μοναδιαίων κελιών. Αυτό σημαίνει ότι κατανέμουν το φορτίο πιο αποτελεσματικά και ιδίως όταν μιλάμε για κελιά κλειστού τύπου.

#### 1.9.7 Κίνητρο για έρευνα

Η ανάπτυξη υλικών για τις δομές πλέγματος υποκινείται από την επιθυμία σχεδιασμού πολύ-λειτουργικών υλικών και δομών που δεν είναι μόνο ελαφριά και άκαμπτα αλλά διαθέτουν, μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών, επίσης μια επιθυμητή δονητική απόκριση και ιδιότητες θερμικής μεταφοράς. Η ανάγκη να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των αφρών μετάλλου έχει ωθήσει την ανάπτυξη δικτυωτών - πλεγματικών κατασκευών - δομών, μια διαδικασία που έχει επωφεληθεί από γνώσεις που έχουν ήδη αποκτηθεί μέσω πειραμάτων και μελέτης στερεών με κυψελωτή δομή. Ομοίως, η συσσωρευμένη έρευνα σχετικά με τη δυναμική των περιοδικών δομών και (όπως εξαρτήματα αεροσκαφών και συμβατικά σύνθετα υλικά) παρείχε μια πολύτιμη βάση γνώσεων για τη μελέτη των χαρακτηριστικών διάδοσης κυμάτων σε δομές πλέγματος. Η ακόλουθη λίστα παρέχει μια ελλιπής αλλά ενδεικτική περίληψη των προσπαθειών και των κινήτρων για την τρέχουσα έρευνα στις πλεγματικές δομές των κατασκευών με ΠΚ.

- Σχεδίαση ελαφριών και άκαμπτων-στιβαρών κατασκευών με βέλτιστο πυρήνα πλέγματος για πολύ-λειτουργικές εφαρμογές. Σε αυτή τη γραμμή έρευνας, οι συνεχείς προσπάθειες στοχεύουν στην προσαρμογή της αποτελεσματικής ακαμψίας και αντοχής του πυρήνα της αντηρίδας του δικτυωτού πλέγματος για την επίτευξη υψηλής απόδοσης με τη χαμηλότερη δυνατή πυκνότητα. Η ανακάλυψη νέων γεωμετριών μονάδων κυψελών που χρησιμοποιούν βελτιστοποίηση τοπολογίας και άλλες υπολογιστικές μεθόδους είναι μια πολλά υποσχόμενη οδός για περαιτέρω βελτιώσεις.
- Προηγμένη μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση σύνθετων δομών πλέγματος. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη τεχνικών ομογενοποίησης για πλέγματα και εις βάθος μελέτες σχετικά με την επίδραση της απόσβεσης και των μη γραμμικοτήτων στη συμπεριφορά διασποράς των δικτυωμάτων.
- Ανάπτυξη δομής κελιών πλέγματος με συντονίσιμες ελαστοδυναμικές και αμετάβλητες ιδιότητες.
- Ανάπτυξη [μεταϋλικών](#) σε στυλ πλέγματος βασισμένα σε περιοδικές μικρό-αρχιτεκτονικές με εξαιρετικές δυναμικές (ακουστικές και/ή ελαστικές) αποτελεσματικές ιδιότητες, που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση συμβατικών υλικών.
- Δημιουργία καινοτόμων υλικών νάνο-δομής πλέγματος βασισμένα σε περιοδικές αρχιτεκτονικές για μηχανικές και θερμικές εφαρμογές.

## Κεφάλαιο 2 – Κύριο μέρος, ανάπτυξη βάσης δεδομένων πλεγματικών δομών

### 2.1 Επιλογή πλέγματος δομής ανάλογα την επιθυμητή συμπεριφορά

Υπάρχουν πολυάριθμα γεωμετρικά σχήματα κατάλληλα για πλεγματικές δομές. Μία από τις προκλήσεις που δημιουργούνται είναι η επιλογή της καταλληλότερης δομής σύμφωνα με τον σκοπό ενσωμάτωσης του πλέγματος σε συγκεκριμένη εφαρμογή.

Όπως προαναφέρθηκε οι μηχανικές ιδιότητες των πλεγματικών δομών είναι πιο ευέλικτες στον έλεγχο και στην προσαρμογή από άλλου είδους κυψελωτές δομές και ως εκ τούτου έχουν καλύτερη απόδοση από τις κατασκευές με δομές αφρού και κηρήθρας. Σε σύνθετες δομές είναι απαραίτητη η αποτελεσματική επισκόπηση και επιλογή πλεγματικών δομών από ήδη υπάρχουσες και καταγεγραμμένες δομές, σύμφωνα και με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατασκευής που απαιτούνται. Ακόμα θα πρέπει αξιολογείται αν υπάρχει ανάγκη για κλιμακωτή δομή με διαβαθμίσεις των μεγεθών των κελιών ανά περιοχή κατασκευής.

Η χρησιμότητα της οργάνωσης πληροφορίας επί πλεγματικών δομών που επιχειρείται στην παρούσα εργασία είναι να μπορεί να εξυπηρετήσει περιπτώσεις κατασκευών όχι μόνο με απλές και συνήθεις δομές, αλλά και με εντονότερα προσαρμοσμένες, περισσότερο συμβατές με συγκεκριμένες απαιτήσεις και δεδομένες κατασκευαστικές δυνατότητες ΠΚ. Η ανάγκη αυτή εξυπηρετείται πολύ αποτελεσματικά με την υιοθέτηση της έννοιας των βάσεων δεδομένων.

### 2.2 Σύστημα Διαχείρισης Βάσης Δεδομένων και αξιοποίησή της

#### 2.2.1 Βάσεις δεδομένων

Με τον όρο βάσεις δεδομένων αναφερόμαστε σε οργανωμένες, διακριτές συλλογές σχετιζόμενων δεδομένων ηλεκτρονικά και ψηφιακά αποθηκευμένων, στο λογισμικό που χειρίζεται τέτοιες συλλογές (Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων, ή DBMS) και στο γνωστικό πεδίο που το μελετά. Πέρα από την εγγενή της ικανότητα να αποθηκεύει δεδομένα, η βάση δεδομένων παρέχει μέσω του σχεδιασμού και του τρόπου ιεράρχησης των δεδομένων, τα αποκαλούμενα συστήματα διαχείρισης περιεχομένου, δηλαδή τη δυνατότητα γρήγορης άντλησης και ανανέωσης των δεδομένων. Για παράδειγμα ένας τηλεφωνικός κατάλογος, για παράδειγμα, θεωρείται βάση δεδομένων, καθώς αποθηκεύει και οργανώνει σχετιζόμενα τμήματα πληροφορίας, όπως είναι το όνομα και ο αριθμός τηλεφώνου. Ωστόσο, οι σύγχρονες βάσεις δεδομένων υλοποιούνται κυρίως ψηφιακά, με τυποποιημένες μεθόδους σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ελέγχονται από λογισμικό DBMS και συνιστούν αντικείμενο επιστημονικής και τεχνικής μελέτης από το αντίστοιχο ακαδημαϊκό πεδίο. Αναφ. [18].

## 2.2.2 Σχεσιακές βάσεις δεδομένων

Στην εν λόγω εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων οι οποίες μας βοηθάνε στη συσχέτιση των πληροφοριών μεταξύ τους μέσω πινάκων με δεδομένα συνήθως σε μορφή XML, XLSX και άλλα.

Στις σχεσιακές βάσεις δεδομένων ένας πίνακας είναι ένα σύνολο στοιχείων - τιμών που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο κατακόρυφων στηλών (προσδιοριζόμενες με το όνομα) και οριζόντιων σειρών (γραμμές), όπου το κελί είναι η μονάδα όπου τέμνονται μια γραμμή και μια στήλη. Ένας πίνακας έχει έναν καθορισμένο αριθμό στηλών, αλλά μπορεί να έχει οποιονδήποτε αριθμό σειρών. Κάθε σειρά προσδιορίζεται από μία ή περισσότερες τιμές που εμφανίζονται σε ένα συγκεκριμένο υποσύνολο στηλών. Μια συγκεκριμένη επιλογή στηλών που προσδιορίζουν μοναδικά τις γραμμές ονομάζεται Πρωτεύον κλειδί (Primary key). Αναφ. [19] Οι βάσεις αυτές ελέγχονται από σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων (Relational Database Management System, RDBMS)

Κατά τη σχεδίαση μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων, διαιρούνται οι πληροφορίες σε πίνακες, ο καθένας από τους οποίους έχει μόνο ένα πρωτεύον κλειδί που ενδέχεται να είναι και συνδυασμός στηλών. Περιληπτικά οι τύποι των σχέσεων μεταξύ πινάκων σε σύστημα RDBMS μπορεί να είναι ένα προς ένα, ένα προς πολλά ή/και πολλά προς πολλά με την βοήθεια ενός ενδιάμεσου πίνακα.

Ο τρόπος αυτός έχει ακολουθηθεί με σκοπό τον καλύτερο δυνατό έλεγχο των δεδομένων.

Σειρά κατάταξης οικογένειας κατηγορίας A (Primary key)	Ονομασία κελιού	Χαρακτηριστικά	Σχόλια
1	Κελί A1	Χαρακτηριστικό για κελί A1	Σχόλια για κελί A1
2	Κελί B2	Χαρακτηριστικό για κελί B2	Σχόλια για κελί A1
3	Κελί Γ3	Χαρακτηριστικό για κελί Γ3	Σχόλια για κελί A1

Πίνακας 2: Παράδειγμα πίνακα βάσης αποθήκευσης

### 2.2.2.1 Πρωτεύον κλειδί – Primary Key, Ξένο κλειδί – Foreign Key, Περιορισμοί - Constraints

Στις βάσεις δεδομένων οι ορισμοί Primary Key (PK), Foreign Key (FK) και Constraints των δεδομένων ενός πίνακα είναι οι κύριοι περιορισμοί και καθορισμοί λειτουργιών των δεδομένων.

PK είναι ένας περιορισμός που προσδιορίζει με μοναδικό χαρακτηρισμό κάθε εγγραφή σε έναν πίνακα. Τα πρωτεύοντα κλειδιά πρέπει να περιέχουν Μοναδικές - UNIQUE τιμές και δεν μπορούν να περιέχουν Μηδενικά. Ένας πίνακας πρέπει να έχει μόνο ένα πρωτεύον κλειδί και αυτό μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες στήλες στον πίνακα.

FK είναι ένας περιορισμός που αποτελείται από μία στήλη ή πλήθος στηλών σε έναν πίνακα, που έχει αναφορά στο PK ενός άλλου πίνακα. Ο πίνακας με το FK ονομάζεται θυγατρικός πίνακας (Child table) και ο πίνακας με το PK ονομάζεται πίνακας αναφοράς ή γονικός πίνακας (Parent table).

Τα Constraints χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό κανόνων και αναφορών για τα δεδομένα μεταξύ πινάκων στη σχεσιακή βάση δεδομένων. Τα Constraints ευθύνονται για τη ορισμό, τη λειτουργία και αλληλεπίδραση των PK και FK στους πίνακες. Χρησιμοποιούνται επίσης για τον περιορισμό του τύπου των δεδομένων που μπορούν να εισαχθούν σε έναν πίνακα, αυτό διασφαλίζει την αξιοπιστία των δεδομένων που εισάγονται.

Οι περιορισμοί μπορεί να είναι σε επίπεδο στήλης ή σε επίπεδο πίνακα. Οι περιορισμοί επιπέδου στήλης ισχύουν για μια ορισμένη στήλη και οι περιορισμοί επιπέδου πίνακα ισχύουν για ολόκληρο τον πίνακα δεδομένων Αναφ. [53].

Κατά την καταχώρηση ενός πίνακα και των στηλών από τις οποίες αποτελείται, σε μία βάση δεδομένων ορίζεται για κάθε στήλη επίσης ο τύπος των δεδομένων για τα οποία θέλουμε να επιτρέπεται η εισαγωγή. (πχ. Αριθμός, Ναι/Όχι, Σύντομο κείμενο, Ημερομηνία/Ώρα κλπ.) Αναφ. [54].

### 2.2.3 Σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων Microsoft “Access”

Για τους λόγους της εργασίας επιλέχθηκε το σύστημα – εργαλείο RDBMS της Microsoft, η Access. Η Microsoft Access είναι ένα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων της Microsoft που συνδυάζει, μηχανή σχεσιακής βάσης δεδομένων με ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας χρήστη και εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού. Ανήκει στα προγράμματα χαμηλού επιπέδου κώδικα προγραμματισμού ([low-code development platform](#)). Παρέχει ένα διαδικτυακό ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης ([integrated development environment](#) - IDE) που χρησιμοποιεί διάφορους οδηγούς, λειτουργίες drag-and-drop και επεξεργαστικές ιδιότητες για τη δημιουργία δια δραστικών ερωτημάτων και φορμών.

Η Access δεν είναι μία πλήρως υποστηριζόμενη δωρεάν λειτουργία και για αυτό θα πρέπει ο ενδιαφερόμενος προς επεξεργασία αυτής, να αγοράσει άδεια χρήσης και λειτουργίας του πακέτου Microsoft Office. Αντί αυτού ο χρήστης έχει την επιλογή να κατεβάσει δωρεάν από το διαδίκτυο, την εφαρμογή της Microsoft «Access Run Time» όπου δωρεάν ο χρήστης που θέλει να χρησιμοποιήσει και να μελετήσει την υπάρχουσα βάση, αποκτά αυτή τη δυνατότητα με περιορισμούς.

Για τη λειτουργικότητα της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Microsoft Access με κανονική άδεια λειτουργίας, δημιουργίας και επεξεργασίας της βάσης δεδομένων. Μέσα στο χώρο εργασίας (Workspace) της Access δημιουργήθηκαν οι πίνακες των δεδομένων που έχουν καταγραφεί από τη Βιβλιογραφία, μέσω επιλογών εισαγωγής πινάκων μορφής Excel που διατίθενται στο χρήστη. Άλλος πιο κλασικός τρόπος επεξεργασίας και εισαγωγής δεδομένων ή/και πινάκων που ισχύει σε όλες τις βάσεις δεδομένων είναι μέσω της γλώσσας προγραμματισμού SQL.

## 2.2.4 Γλώσσα SQL

Η SQL (Structured Query Language) είναι μία γλώσσα υπολογιστών στις βάσεις δεδομένων, που σχεδιάστηκε για τη διαχείριση των δεδομένων, σε ένα σύστημα RDBMS και η οποία, αρχικά, βασίστηκε στη σχεσιακή άλγεβρα. Η γλώσσα αυτή αναπτύχθηκε στην εταιρία IBM Αναφ. [52].

Παρακάτω φαίνεται παράδειγμα των εντολών εισαγωγής πίνακα και ορισμού πρωτεύοντος και ξένου κλειδιού, σε γλώσσα SQL:

```
CREATE TABLE " (ΟΝΟΜΑ ΠΙΝΑΚΑ) "  
  (  
    " (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ_1) " NUMBER(*,0),  
    " (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ_2) " NUMBER(*,0),  
    " (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ_3) " VARCHAR2(200),  
    " (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ_4) " VARCHAR2(200),  
    CONSTRAINT " (ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ-CONSTRAINT_1) " PRIMARY KEY (" (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ <<ΓΙΑ  
ΟΡΙΣΜΟ ΩΣ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΚΛΕΙΔΙ>>") )  
  USING INDEX ENABLE  
  )  
/  
ALTER TABLE " (ΟΝΟΜΑ ΠΙΝΑΚΑ) " ADD CONSTRAINT " (ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ-CONSTRAINT_2) " FOREIGN  
KEY (" (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ <<ΓΙΑ ΟΡΙΣΜΟ ΩΣ ΞΕΝΟ ΚΛΕΙΔΙ>>") )  
  REFERENCES " (ΟΝΟΜΑ ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ) " (" (ΟΝΟΜΑ ΣΤΗΛΗΣ-ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΛΕΙΔΙΟΥ-ΑΠΟ  
ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ) ") ENABLE  
/
```

### 2.2.4.1 Μοντελοποίηση Διαγραμμάτων Συσχέτισης Οντοτήτων - Entity Relationship Diagram (ERD)

Για την εν λόγω εργασία έγινε επιπλέον προσπάθεια εισαγωγής των πινάκων στη βάση δεδομένων μέσω του SQL κώδικα. Η δυνατότητα προγραμματισμού, της βάσης των δεδομένων και των προγραμμάτων που αναπτύσσονται στην πλατφόρμα, μέσω SQL κώδικα είναι το πιο βασικό χαρακτηριστικό όλων των μορφών βάσεων δεδομένων ακόμα και παλαιότερων εκδόσεων αυτών. Ο κώδικας SQL αναπαράχθηκε μέσω δευτερεύοντος διαδικτυακού προγράμματος, του [Lucidchart](#) και της λειτουργίας μοντελοποίησης διαγραμμάτων συσχέτισης οντοτήτων - Entity Relationship Diagram (ERD) που προσφέρει ([Βλέπε Παραρτήματα](#)). Δημιουργήθηκε στο Lucidchart το μοντέλο πινάκων που ικανοποιούσε τις απαιτήσεις της εργασίας και με εξαγωγή δεδομένων σε γλώσσα SQL, αναπαράχθηκε ο κατάλληλος κώδικας με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά γραφής SQL. Τέλος στον χώρο εκτέλεσης κώδικα της πλατφόρμας Access εκτελέστηκε με επιτυχία ο κώδικας και δημιουργήθηκαν αμέσως οι πίνακες με τα ορισμένα από τον κώδικα, πρωτεύοντα κλειδιά, ξένα κλειδιά και τύποι δεδομένων κάθε στήλης.

## 2.3 Δημιουργία RDBMS πλεγματοικών δομών σε περιβάλλον MS Access

Δημιουργήθηκαν αρχικά πίνακες σε αρχεία Excel με σκοπό να καταγραφούν διακριτά όλες οι οικογένειες και τα είδη των δομών που έχουν επισκοπηθεί και παρουσιασθεί. Ύστερα οι κατηγορίες αυτές αναπτύχθηκαν σε περισσότερους πίνακες με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται η σχέση τους με την δομή των μοναδιαίων κελιών που συγκροτούν τις πλεγματοικές δομές. Εν συνεχεία προστέθηκαν τα πεδία των δεδομένων όλων των πινάκων με την προσθήκη χαρακτηριστικών ή/και σχολίων σε μορφή στηλών. Ο τρόπος δημιουργίας και επεξεργασίας ενός πίνακα ως βάση αποθήκευσης γίνεται τοποθετώντας ξεχωριστά, τον τίτλο του χαρακτηριστικού που θέλουμε να καταγράψουμε για κάθε δεδομένο, με μία ονομασία στις διαφορετικές στήλες του πίνακα και η κάθε γραμμή ανήκει σε διαφορετική καταγραφή δεδομένων.

### 2.3.1 Καταχώρηση πινάκων

Οι εισαχθέντες πίνακες της εργασίας στον χώρο της βάσης δεδομένων της Microsoft Access είναι οι εξής όπως φαίνονται [στα Παραρτήματα](#).

#### 2.3.1.1 Ενδιάμεσος πίνακας

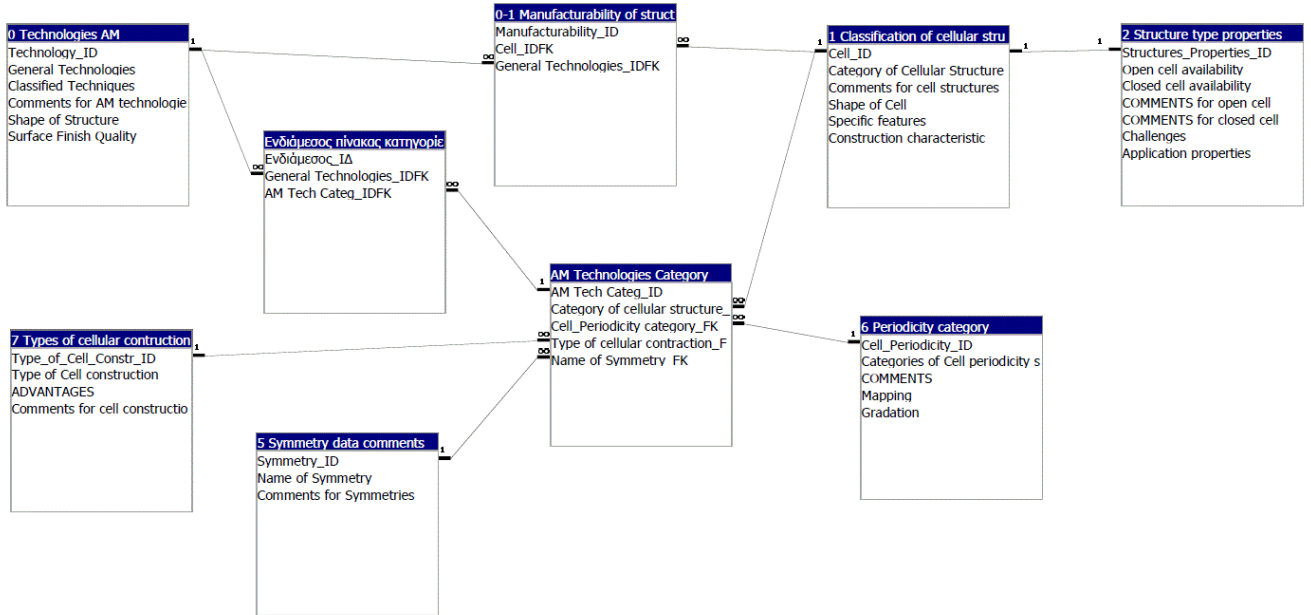
Μεταξύ των πινάκων δημιουργήθηκαν σχέσεις ένα-προς-ένα και ένα-προς-πολλά ώστε να εξυπηρετηθούν οι λόγοι της εργασίας στην λειτουργία της αναζήτησης δεδομένων. Χρειάστηκε επίσης να δημιουργηθούν πίνακες με σχέσεις πολλά-προς-πολλά οι οποίοι δημιουργούνται με παρόμοιο τρόπο όπως οι υπόλοιπες σχέσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις όμως χρειάζεται να διαμορφώνεται ένας νέος “βοηθητικός” πίνακας ώστε να συνδεθούν με αυτόν οι άλλοι δύο με τη σχέση ένα-προς-πολλά και ως αποτέλεσμα αυτοί μεταξύ τους έμμεσα με τη σχέση πολλά-προς-πολλά. Αυτός ο νέος πίνακας ονομάζεται ενδιάμεσος πίνακας ή/ και πίνακας σύνδεσης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι πίνακες: Manufacturability of structures, Ενδιάμεσος πίνακας κατηγορίες και AM Technologies Category όπως φαίνονται στις εικόνες 26 και 27, εκτελούν αυτό το καθήκον.

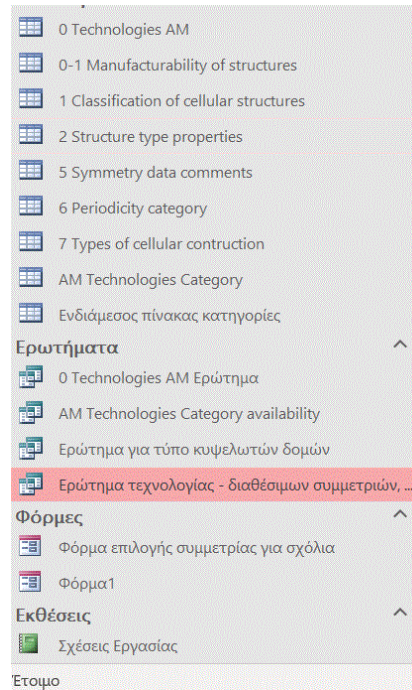


### 2.3.2 Ανάπτυξη σχέσης μεταξύ πληροφοριών – πινάκων

Η σχέση που δημιουργήθηκε μεταξύ των πινάκων της εργασίας μετά την επεξεργασία και εισαγωγή τους, έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 26: Σχέσης πινάκων – Database - στο χώρο της Microsoft Access



Εικόνα 27: Παράθυρο επιλογής πινάκων στη βάση δεδομένων

Αποτέλεσμα της σχέσης αυτής είναι να μπορεί ο οποιοσδήποτε χρήστης να διερευνήσει τα αποθηκευμένα δεδομένα εύκολα μέσω τη παρουσίασης αυτών σε μορφή κλασσικής αναφοράς, να εισάγει δικά του πειραματικά συμπεράσματα και στοιχεία ως νέες καταχωρήσεις στους ήδη υπάρχοντες πίνακες και να συλλέγει με αυτόν τον τρόπο όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις κυψελωτές δομές στην τεχνολογία ΠΚ που τον ενδιαφέρει. Επίσης έχουν δημιουργηθεί για αυτό το σκοπό ερωτήματα τα οποία να κατευθύνουν τον χρήστη να αναζητήσει πιο εύκολα την πληροφορία που τον ενδιαφέρει.

Ο λόγος ύπαρξης των ερωτημάτων βρίσκεται στο διαμορφωμένο φιλτράρισμα δεδομένων, μετά από κατάλληλο αίτημα του χρήστη, για παρουσίαση επιθυμητών αποτελεσμάτων ή/και λειτουργία ενέργειας στα δεδομένα της βάσης.

## Σχόλια - Συμπεράσματα

Η γνώση των εκάστοτε κατάλληλων διαμορφώσεων πλέγματος από δομική άποψη και οι καλά καθορισμένες κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού θα επιτρέψουν στους μηχανικούς σχεδιασμού να μειώσουν περαιτέρω το βάρος μιας κατασκευής και να αυξήσουν τη δομική απόδοση κατά το σχεδιασμό μιας προσθετικής κατασκευής.

Με βάση τα κυρίως πειραματικά στοιχεία που έχουν παρθεί από τη βιβλιογραφία, νέα και παλιά, μπορούμε να πούμε πως βρισκόμαστε σε ένα πολύ καλό επίπεδο γνώσης της ιδιομορφίας και των χαρακτηριστικών των διαφόρων δομών πλέγματος στην δημιουργία κατασκευών με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούμε να επιλέξουμε μέσω κάποιων κριτηρίων την καταλληλότερη, μέχρι στιγμής, πλεγματική δομή μίας κατασκευής προς μελέτη. Προφανώς όμως μία πιο εξειδικευμένη περίπτωση κατασκευής μπορεί να διαφέρει στην επιλογή κατάλληλης πλεγματικής δομής λόγω μη καταγεγραμμένων περιπτώσεων συνδυασμού, υλικών δόμησης, μεθόδου εκτύπωσης και ρυθμίσεις αυτού, οριακών συνθηκών (κατάσταση υλικού, θερμοκρασία, υγρασία, ακτινοβολία), μετάβασης ασκούμενων δυνάμεων προς κάποια κατεύθυνση κλπ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πριν την μαζική παραγωγή και διάθεση στην αγορά να χρήζει διερεύνησης η υποκείμενη τρισδιάστατη κατασκευή μετά από την επιλογή και εφαρμογή της πιθανότερης κατάλληλης πλεγματικής δομής για την χρήση του. Μία πολύ σημαντική επιλογή που πρέπει να γίνει σε κάθε περίπτωση είναι η κατάλληλη μέθοδος εκτύπωσης με την κατάλληλη ακρίβεια κατασκευής ώστε να αποφευχθούν όσο το δυνατόν περισσότερες αστοχίες κατά την εκτύπωση της κάθε δομικής κυψέλης που έχει επιλεχθεί, διότι για παράδειγμα στραβή αντηρίδα σημαίνει και πολύ μικρότερη δυναμική αντοχή ανά μονάδα κυψέλης. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με φυσικές δοκιμές πάνω στο εκτυπωμένο υλικό, πάντα αναλόγως με την χρήση του. πχ Εφελκυσμό, Συμπίεση, Δόνηση, Ηχομόνωση, Θερμομόνωση ακόμη και σε Διηλεκτρικές Δοκιμές αν λαμβάνει την ανάλογη χρήση και υλικό.

## Επεκτάσεις – Προοπτικές εργασίας

Το κύριο μέρος της εργασίας καλύπτει σε ένα βασικό επίπεδο τις περισσότερες πτυχές και δυνατότητες που θα μπορούσε να προφέρει μία σχεσιακή βάση δεδομένων σχετικά με την κατάταξη, οργάνωση και παραμετροποίηση των κυψελωτών δομών για την αξιοποίησή τους από το κοινό στην Προσθετική Κατασκευή. Εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου υλοποίησης της σε σχέση με τον όγκο άρθρων και δημοσιεύσεων που πρέπει να μελετηθούν ωστόσο, αφήνει ανοικτά αρκετά περιθώρια βελτίωσης και ανάπτυξης.

Ένα χαρακτηριστικό που θα μπορούσε να αναπτυχθεί ως επέκταση της εργασίας αυτής εκτός από την πρόσθεση δεδομένων, είναι η εφαρμογή της βάσης δεδομένων σε online RDBMS, δωρεάν διαθέσιμο με περισσότερες δυνατότητες διεπαφής με τον χρήστη μέσω της ανάπτυξης στοχευμένων εφαρμογών και ερωτημάτων. Ένα παράδειγμα, κατάλληλο και χωρίς χρεώσεις, διαδικτυακού προγράμματος RDBMS για αυτή τη χρήση είναι το “APEX” της εταιρίας ORACLE.

Κατά συνέπεια, με την ευκολία της αναζήτησης συγκεκριμένου ιστότοπου αποδιδόμενου από το διαδικτυακό RDBMS, θα μπορούσε ο ενδιαφερόμενος από οποιονδήποτε υπολογιστή να εισέρχεται σε διαδικτυακό χώρο όπου να του εμφανίζονται, μέσω ανεπτυγμένων εφαρμογών, πολλές επιλογές αναζήτησης πλεγματικών ή άλλων δομών.

Ακόμη, θα μπορούσε να υλοποιηθεί στο μέλλον αναζήτηση με βάση των πειραματικά καταγεγραμμένων χαρακτηριστικών τους υπό χρονική ταξινόμηση.

Η δυνατότητα της χρονικής ταξινόμησης των πειραματικών χαρακτηριστικών επιτρέπει την νεότερη καταχώρηση δεδομένων από κάθε ερευνητή μηχανικό στην ενότητα της Προσθετικής Κατασκευής με ιχνηλασιμότητα σε παλαιότερες λιγότερο πετυχημένες πειραματικές προσπάθειες.

Επιπλέον, η ενεργοποίηση της λειτουργίας της εισόδου για το κοινό, στο διαδικτυακό σύστημα βάσης δεδομένων, μέσω δημιουργίας λογαριασμού περιορισμένης (limited) προσβασιμότητας, με κωδικούς χρήσης, συμβάλλει στην υλοποίηση ενός βασικού επιπέδου ασφαλείας.

Τέλος, μπορεί να ενσωματωθεί μία σελίδα ενημέρωσης του χρήστη σχετικά με την ευρωπαϊκή νομοθεσία προστασίας προσωπικών δεδομένων (GDPR) έτσι ώστε να υπάρχει διαφάνεια και σαφήνεια στο τι δεδομένα προσωπικού χαρακτήρα επεξεργάζονται από την ιστοσελίδα αλλά κυρίως, οι χρήστες να είναι πλήρως ενημερωμένοι έχοντας τελικώς δώσει ή όχι τη συγκατάθεση τους.

## Βιβλιογραφία - Αναφορές

- [1] Gibson, L.J.; Ashby, M.F., 1997, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 16–21.
- [2] Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A.; Bubb, S.L.; Young, P.; Raymont, D. 2014, *Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering*. *J. Mater. Process. Technol.*, 214, 856–864.
- [3] Tao, W.; Leu, M.C. 2016, *Design of lattice structure for additive manufacturing*. In *Proceedings of the 2016 International Symposium on Flexible Automation Cleveland (ISFA 2016)*, Cleveland, OH, USA, 1–3 August 2016; pp. 326–332.
- [4] Gibson, L.J. *Modelling the mechanical behavior of cellular materials*. *Mater. Sci. Eng. A* **1989**, 110, 1–36.
- [5] Jimmy Wales , Angela Beesley Starling, 2004, *fandom*. Retrieved May, 2021, <https://science.fandom.com/el/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%8B%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C>
- [6] Wenjin Tao, Ming C. Leu *Design of lattice structure for additive manufacturing*, August 2016, DOI:10.1109/ISFA.2016.7790182
- [7] Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A., Panesar, A., Williams, C., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., and Hague, R., 2017, “*Insights Into the Mechanical Properties of Several Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structures Made by Polymer Additive Manufacturing*,”
- [8] Altair, 2021, Gen3D. Retrieved February, 2022, <https://gen3d.com/news-and-articles/types-of-lattices-for-additive-manufacturing/>
- [9] Paschalis Charalampous, Nikolaos Kladovasilakis, Konstantinos Tsongas, Ioannis Kostavelis, Dimitrios Tzetzis, Dimitrios Tzovaras, 2021, *Experimental and Computational Investigation of Lattice Sandwich Structures Constructed by Additive Manufacturing Technologies*
- [10] Dong Guoying, Tessier Daniel, Zhao Yaoyao Fiona, 2019, *DESIGN OF SHOE SOLES USING LATTICE STRUCTURES, FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING*
- [11] Francesco Tamburrino, Serena Graziosi, Monica Bordegoni, 2018, *The Design Process of Additively Manufactured Mesoscale Lattice Structures: A Review*
- [12] Fizik. Retrieved October, 2021, [https://www.fizik.com/eu\\_en/antares-versus-evo-r1-adaptive.html](https://www.fizik.com/eu_en/antares-versus-evo-r1-adaptive.html)
- [13] Adidas, 2020, Adidas. Retrieved March, 2022, <https://www.adidas.gr/blog/562694-futurecraftstrung>
- [14] 3D printing industry. Retrieved January, 2022, <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-turns-heavy-metal-rock-legend-yngwie-malmsteen-fails-to-break-sandviks-smash-proof-3d-printed-guitar-153028/>
- [15] 3D natives, 2019. Retrieved January, 2022, <https://www.3dnatives.com/en/uptis-3d-printed-tire-140620194/>
- [16] Xiao L., Song W. 2018, *Additively manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments*. *Int. J. Impact Eng.*, 111, 255–272. [CrossRef]
- [17] Dong, G., Tang, Y., Zhao, Y.F., 2017, *A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing*. *J. Mech. Des. Trans. ASME* 2017, 139, 100906. [CrossRef]

- [18] Wikipedia, 2022, Βάση δεδομένων. Retrieved April, 2022, [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%AC%CF%83%CE%B7\\_%CE%B4%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%AC%CF%83%CE%B7_%CE%B4%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD)
- [19] Wikipedia, 2022, Voronoi diagram. Retrieved May, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi\\_diagram#Geometry](https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi_diagram#Geometry)
- [20] Wikipedia, 2022, Delaunay triangulation. Retrieved May, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay\\_triangulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation)
- [21] Wikipedia, 2022, Poisson's ratio. Retrieved July, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio)
- [22] Wikipedia, 2022, Young's modulus. Retrieved July, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s\\_modulus](https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus)
- [23] Mathias H. Luxner, Juergen Stampfl, Heinz E. Pettermann, 2007, Numerical simulations of 3D open cell structures – influence of structural irregularities on elasto-plasticity and deformation localization, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.08.039>
- [24] Fast Radius, 2018. Retrieved July, 2022, <https://www.fastradius.com/resources/elastomeric-polyurethane-epu-40-and-41/>
- [25] Carbon, 2022. Retrieved July, 2022, <https://www.carbon3d.com/materials/epx-82>
- [26] Liqcreate, 2022. Retrieved August, 2022, <https://www.liqcreate.com/product/premium-flex/>
- [27] Envision tec, 2019. Retrieved January, 2022, <https://enviontec.com/wp-content/uploads/2017/12/Beta-2020-E-Shore-A-.pdf>
- [28] O. Sigmund, 2014, *A 99 line topology optimization code written in Matlab Struct. Multidiscip. Optim.*, 21 (2), pp. 120-127
- [29] Brian Obudho, 2018, All3DP. Retrieved July, 2022, <https://all3dp.com/2/high-resolution-3d-printer-what-does-it-mean/>
- [30] ISO/ASTM 52900:2021, 2021, (en) Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. Retrieved June, 2022, [ISO/ASTM 52900:2021\(en\) Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary](https://www.iso.org/standard/75411.html)
- [31] Fast Radius, 2018, Understanding 3D printed lattices. Retrieved October, 2022, <https://www.fastradius.com/resources/understanding-3d-printed-lattices-performance-and-design-considerations/>
- [32] High techs base Inc., 2022. Retrieved October, 2022, <https://high-tech-guide.com/article/what-is-lattice-structure-in-additive-manufacturing>
- [33] Wikipedia, 2022, Crystal system. Retrieved October, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal\\_system#Bravais\\_lattices](https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_system#Bravais_lattices)
- [34] Fast Radius, 2018. Retrieved November, 2021, <https://www.fastradius.com/resources/beyond-prototyping-scaling-up-to-additive-manufacturing-for-production/>
- [35] Fast Radius, 2022. Retrieved May, 2022, <https://www.fastradius.com/resources/3d-lattice-design-elements/>
- [36] Marinus Nutma, 2019, 3D Printing Media Network. Retrieved February, 2022, <https://www.3dprintingmedia.network/quick-guide-dimensional-accuracy-3d-printing/>
- [37] Leonardo Riva, Paola Serena Ginestra & Elisabetta Ceretti, 2021, Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06631-4>
- [38] Engineering product design, 2021. Retrieved April, 2022, [https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/#7\\_types\\_of\\_Additive\\_manufacturing\\_technologies](https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/#7_types_of_Additive_manufacturing_technologies)



- [39] M. Benedetti, A. du Plessis, R.O. Ritchie, M. Dallago, S.M.J. Razavi, F. Berto, 2021, Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100606>
- [40] Carbon, 2022. Retrieved October, 2022, <https://design.carbon3d.com/>
- [41] Anton du Plessis, Seyed Mohammad, Javad Razavi, Matteo Benedetti, Simone Murchio, Martin Leary, Marcus Watson, Dhruv Bhate, Filippo Berto. (2022) Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100918>
- [42] National Service Center for Environmental Publications, 2022, United States Environmental Protection Agency, 2008. Retrieved December, 2021, [Peer Review for the PQA/Ricardo Report A Study of Potential Effectiveness of Carbon Dioxide Reducing Vehicle Technologies: 2008](#)
- [43] Wikipedia, 2022, Poisson's ratio. Retrieved July, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio)
- [44] Jason Nguyen, Sang-In Park, David W. Rosen, Luis Folgar, James Williams, 2012, Conformal Lattice Structure Design and Fabrication, [https://www.academia.edu/10638771/Conformal\\_Lattice\\_Structure\\_Design\\_and\\_Fabrication](https://www.academia.edu/10638771/Conformal_Lattice_Structure_Design_and_Fabrication)
- [45] H. Wang, D. Rosen, 2002, PARAMETRIC MODELING METHOD FOR TRUSS STRUCTURES <https://doi.org/10.1115/DETC2002/CIE-34495>
- [46] Wikipedia, 2022, Algebra Boole. Retrieved August, 2022, [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%86%CE%BB%CE%B3%CE%B5%CE%B2%CF%81%CE%B1\\_%CE%9C%CF%80%CE%BF%CF%85%CE%BB](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%86%CE%BB%CE%B3%CE%B5%CE%B2%CF%81%CE%B1_%CE%9C%CF%80%CE%BF%CF%85%CE%BB)
- [47] Chen Pan, Yafeng Han and Jiping Lu, 2020, Design and Optimization of Lattice Structures: A Review [[CrossRef](#)]
- [48] A. Hussein, *The development of lightweight cellular structures for metal additive manufacturing, 2013*, [[CrossRef](#)]
- [49] Alex Berciu, 2016, WeWantToLearn. Retrieved September, 2022, <https://wewanttorearn.wordpress.com/2016/03/17/triely-periodic-minimal-surfaces-topology/>
- [50] Wikipedia, 2022, Oracle Application Express. Retrieved August, 2022, [https://en.wikipedia.org/wiki/Oracle\\_Application\\_Express](https://en.wikipedia.org/wiki/Oracle_Application_Express)
- [51] Wikipedia, 2022, DBMS. Retrieved August, 2022, [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1\\_%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82\\_%CE%92%CE%AC%CF%83%CE%B7%CF%82\\_%CE%94%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1_%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82_%CE%92%CE%AC%CF%83%CE%B7%CF%82_%CE%94%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD)
- [52] Wikipedia, 2022, SQL. Retrieved August, 2022, <https://el.wikipedia.org/wiki/SQL>
- [53] W3Schools, 2022, SQL Tutorial. Retrieved August, 2022, <https://www.w3schools.com/sql/default.asp>
- [54] W3Schools, 2022, SQL Data types. Retrieved August, 2022, [https://www.w3schools.com/sql/sql\\_datatypes.asp](https://www.w3schools.com/sql/sql_datatypes.asp)
- [55] Lucidchart, 2022. Retrieved August, 2022, <https://www.lucidchart.com/pages/er-diagrams>
- [56] Giulia Angelucci and Fabrizio Mollaioli, 2018, Voronoi-Like Grid Systems for Tall Buildings, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00078>
- [57] Zhu H. X., Thorpe S. M. and Windle A. H., 2001, The geometrical properties of irregular two-dimensional Voronoi tessellations. *Phil. Mag. A Phys.* 81, 2765–2783, [doi:10.1080/01418610010032364](https://doi.org/10.1080/01418610010032364)
- [58] Matthew J. Silva, Lorna J. Gibson, 1997, The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids. *Int. J. Mech. Sci.* 39, 549–563, [doi:10.1016/S0020-7403\(96\)00065-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00065-3)



## Παραρτήματα

**AP Database diagram (crow's foot)** ☆

File Edit Select View Insert Arrange Share Help • Saved

Start a free trial to access unlimited shapes and documents!

Body \* Liberation Sans - 8 pt + B I U A T 1 px None

**Shapes**

- Shapes In Use
- Standard
  - Text
  - Rectangle
  - Yellow
  - Lightning bolt
  - Arrow
- Entity Relationship
  - Table
  - Table
  - Table
  - Table
- My saved shapes
  - Shape Library
  - Import Data

Database ER diagram

Shape libraries standardize best practices, save time and illustrate key connections.

Highlight important information by creating conditional formatting rules.

**Helpful resources**  
(Hold Shift + ⌘ or Ctrl, then click)

Εικόνα 28: Διαδικτυακή εφαρμογή Lucidchart. Χώρος ανάπτυξης ERD. (Παράδειγμα προσπαθειών εφαρμογής πινάκων για απόδοσή τους σε γλώσσα SQL) Αναφ. [55]

Πίνακες Δεδομένων

Πίνακας: Technologies of Additive Manufacturing

Technology_ID	General Technologies	Classified Techniques	Comments for AM technologies	Structure info	Surface Finish Quality	Material Used
1	Binder Jetting (BJT)	Furan Binder, Silicate Binder, Phenolic Binder, Aqueous-Based Binder, Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	A binding liquid is selectively deposited to join powder material together to form a 3D part, wide material selection	Wide material selection	Medium quality, high porosities on finished parts	Polymer, Metal, Ceramic Powder
2	Directed Energy Deposition (DED)	Laser-based DED, Electron beam-based DED, Plasma or Electric arc-based DED	3D objects are formed by melting material as it is being deposited using focused thermal energy such as laser, electron beam or plasma arc, expensive	Repair of damaged parts	Bad resolution	Metal powder, Wire
3	Material Extrusion (MEX)	Fused Deposition Modeling (FDM)	It creates 3D components using a continuous thermoplastic or composite material thread in filament form. An extruder feeds the plastic filament through an extruding nozzle, where it is melted and then selectively deposited layer by layer onto the build platform in a predetermined automated path, no multi material printing	Limited part resolution	Poor surface finish	Thermoplastics, ceramics, metal fillaments

4	Material Jetting (MJT)	PolyJet technology, NanoParticle Jetting (NPJ), Drop-On Demand (DOD)	Once a layer is complete, it's cured by either ultraviolet light in case of photosensitive material or heat cured for metal and ceramic parts, multi material jetting	Various	High surface finish	Photopolymer Wax
5	Powder Bed Fusion (PBF)	Laser Fused, Electron Beam fused, Fused with agent and energy, Thermally fused, Selective laser sintering (SLS), DMLS, SLM, Electron Beam Melting (EBM)	Either laser, heat or electron beam is used to melt and fuse the material together to form a three-dimensional object.	High specific strength & stiffness	High accuracy and details according to the technique used	Polymer, Metal, Ceramic powder
6	Sheet Lamination (SHL)	Laminated Object Manufacturing (LOM), Selective Lamination Composite Object Manufacturing (SLCOM), Plastic Sheet Lamination (PSL), Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials (CAM-LEM), Selective Deposition Lamination (SDL), Composite Based Additive Manufacturing (CBAM), Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)	It is the process of building a 3D object by stacking and laminating thin sheets of material, low cost	Better for Pyramidal or Tetrahedron structures	Good surface finish	Plastic film, Ceramic tape, Metallic sheet

7	Vat Photopolymerization (VPP)	Stereolithography (SLA), Direct Light Processing (DLP), Continuous Direct Light Processing (CDLP)	Produces 3D objects by selectively curing photopolymer liquid resin using light-activated polymerization, high building speed	Various	Very good quality	Photopolymer ceramics
---	-------------------------------------	--	---	---------	----------------------	--------------------------

Πίνακας: Classification of cellular structures

Cell_ID	Category of Cellular Structure	Comments for cell structures category	Shape of Cell	Specific features	Construction characteristic
1	Foam structures	Good for cushioning, seats and saddles, sports equipment, and even inner liners of prosthetic devices	The shape of the Unit cell and the orientation of cell walls are randomly generated	Easier to conform to surface/ fields.	Random Symmetry, Aperiodic, stochastic
2	Honeycomb structures	Offer high stiffness in a specific direction, Specific Energy Absorption	Regular shape, unit cells have the same size, evenly stacked in construction	Most well known, strong anisotropy, their use is beneficial when the environmental conditions are predictable and the honeycomb design can be oriented in such a way to extract maximum benefit, in this way it has very strong mass unit	Special case of the hexagonal lattice
3	Lattice structures	Offer all-around good mechanical properties	They accept more design and can have more properties and durability due to flexibility in controlling the structure	Variable, conform to structures where stiffness and resistance to bending is critical	Random, Periodic, Pseudo Periodic

Πίνακας: Structure type properties

Structures_Properties_ID	Open cell availability	Closed cell availability	COMMENTS for open cell	COMMENTS for closed cell	Challenges	Application properties
1	Yes	Yes	More soft and breathable and act like a spring, easily return to its original state after compression, conform to sealing applications, when the environmental stimulus (stress, flow, heat) is not as predictable and unidirectional then it is ideal for energy absorption, better isotropy, stable Poissons ratio, Young's modulus correlated with volume	More durable from open cell foams, ideal for liquid resistance, wide variety of material and density options, hydrostatic applications	Geometry complexity, fabrication constraints, Physical behavior	Metallic foam structures can have high porosity 40 to 98%, Good for Impact and blast energy absorption
2	Semi-open cell	YES	N/A	N/A	N/A	Specific stress direction
3	YES	YES	N/A	N/A	psysical behavior	Various



Πίνακας: Symmetry data comments

Symmetry_ID	Name of Symmetry	Comments for Symmetries
1	WEAIRE PHELAN (WP) - Foam	The perfect foam
2	RANDOM	N/A
3	RECTANGULAR (Tetrahedron)	N/A
4	HEXAGONAL VORONOI	a=0, 30% weaker than Hexagonal Honeycomb symmetry
5	TRIANGULAR	N/A
6	SQUARE	N/A
7	SIMPLE CUBIC	Energy dissipation, filling gaps between components for protection
8	CROSS-CUBE	N/A
9	BODY-CENTERED CUBIC (BCC)	Tailored elastic and compressive response, energy dissipation with a more stable response than the simple cubic lattice
10	OCTET-TRUSS	Classic Lattice variable pros
11	ALL FACE-CENTERED CUBIC (AFCC)	N/A
12	TRUNCATED CUBE	N/A
13	ISO TRUSS	N/A
14	BCC WITH vertical strut in z-axis (BCCZ)	N/A
15	TETRAHEDRON	Good for comfort applications due to its constant force stress plateau.
16	FACE-CENTERED CUBIC (FCC)	Classic Lattice variable pros
17	FCC WITH vertical strut in z-axis (FCCZ)	Good at Compression and traction
18	G7	N/A

19	2 Face centered cubic with BCC combined (F2BCC)	N/A
20	FCC + BCCZ (FBCCZ)	N/A
21	FBCCZ WITH X AND Y STRUTS (FBCCXYZ)	N/A
22	CUBOCTAHEDRON Z	N/A
23	DODECAHEDRON	Classic Lattice variable pros
24	RHOMBIC	Good for energy absorption at high strains.
25	RHOMBIC DODECAHEDRON	Tough structure, good results on biomedical implants
26	KELVIN CELL (KV)	High stiffness
27	Re-entrant auxetic	Good For topology
28	AUXETIC	Good For topology
29	OCTAHEDRON	Classic Lattice variable pros
30	DIAMOND Strut-based	Classic Lattice, Good stiffness
31	TRUNCATED OCTAHEDRON	N/A
32	TRUNCATED CUBOCTAHEDRON	N/A
33	OPTIMIZED LATTICE	N/A
34	KAGOME	Good for lightweighting because of its high stiffness to mass ratio, Linear response, Greater stress resistance than square and pyramidal symmetries
35	DIAGONAL	Classic Lattice variable pros
36	GIBSON-ASHBY	N/A
37	SQUARE GYROBICUPOLA	N/A
38	GREAT ICOSAHEDRON	N/A
39	ICOSAHEDRON	Good for lightweighting because of its high stiffness to mass ratio. Foam-like response.

40	REINFORCED BODY CENTERED CUBIC (RBCC)	N/A
41	WEAIRE PHELAN (WP) Strut-based	Reminds Voronoi
42	PILLAR TEXTILE	N/A
43	SPATIALLY VARIANT SELF-COLLIMATING	N/A
44	SIMPLE ORTHORHOMBIC	N/A
45	BODY CENTERED ORTHORHOMBIC	N/A
46	BASE CENTERED ORTHORHOMBIC	N/A
47	FACE CENTERED ORTHORHOMBIC	N/A
48	RHOMBOHEDRAL	N/A
49	HEXAGONAL - Classic Honeycomb	30% Stronger than Hexagonal Voronoi
50	SIMPLE MONOCLINIC	N/A
51	BASE CENTERED MONOCLINIC	N/A
52	TRICLINIC	N/A
53	X SHAPE	Good for Heat exchanging in sandwich structure
54	VINTILE	N/A
55	GYROID	No Need of Support Structures, especially useful for thermal management and heat exchanger applications due to its surface area
56	DIAMOND TPMS	N/A
57	DOUBLE-DIAMOND	N/A

58	SCHWARZ	N/A
59	NEOVIUS	N/A
60	SPLIT P	N/A
61	I-WP type	N/A
62	P type	N/A
63	D type	N/A
64	LIDINOID	Many similarities to Gyroid
65	KELVIN	Foam replacement in products under static compression, aesthetic applications
66	FISHER KOCH S	N/A
67	SCHWARZ PRIMITIVE	N/A
68	SCHOEN G	N/A
69	SCHWARZ D	N/A
70	SCHOEN IWP	N/A
71	SCHOEN FRD	N/A
72	PRIMITIVE	N/A
73	FR-D	N/A
74	SEA URCHIN (SU)	High stiffness in compression
75	VORONOI WITH VARIOUS (a)	Application on architectural constructions
76	CLASSIC FULL RANDOM VORONOI	a=1, Classic Voronoi Tessellation, Good aesthetics
77	V-OCTET	N/A

Πίνακας: Periodicity category

Cell_Periodicity_ID	Categories of Cell periodicity structures	COMMENTS	Mapping	Gradation
1	Random Structures	Various arragment of cells	N/A	N/A
2	Periodic repeated Structures	Arrangement of lattice cells with certain shape, topology, and size	Possible but Difficult	Possible but maybe bad Transitions
3	Pseudo-periodic Structures	Same cell topology, different sizes	Possible but Difficult	N/A

Πίνακας: Types of cellular construction

Type_of_Cell_Constr_ID	Type of Cell construction	ADVANTAGES	Comments for cell construction
1	Strut based lattices	N/A	They can be manufactured by both conventional methods and through CAD Software
2	Triply periodic minimal surface (TPMS) lattices	Higher structural rigidity, Easier construction in Additive Manufacturing with fewer failures	Difficult to manufacture with conventional methods due to complexity, preferred method with CAD software
3	Topology optimised lattices	N/A	Topology optimised lattices are designed by introducing changes to the base design of the unit cell of strut-based and TPMS lattices
4	Voronoi-Tessellation lattices	N/A	A good starting point for elastomeric lattices because of its non-linear, foam like, stress-strain response. Good for energy return
5	2,5D Periodicity	N/A	Making of Honeycomb Structures
6	No Periodicity	Gap filling for protection	Making of Foam Structures