



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
(SYSTEMS ENGINEERING)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

(ΠΔ 96 /2015/ ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ»

ΑΓΓΛΙΚΟΣ ΤΙΤΛΟΣ:

«3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR TELECOMMUNICATION APPLICATIONS»

ΥΠΟ:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ - ΜΑΡΙΟΥ ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΥ

A.M.: 2018018003

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

-

3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

**3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS**

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Δημητρίου – Μάριου ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΥ εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγήτρια Καρανάσιου Ειρήνη (Επιβλέπουσα)



Καθηγητής Δάρας Νικόλαος,.....



**Nikolaos
Matsatsinis**

Digitally signed by
Nikolaos Matsatsinis
Date: 2022.11.23
10:45:54 +02'00'

Καθηγητής Ματσατσίνης Νικόλαος,.....

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

**-
3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS**

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό Δημητρίου – Μάριου ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΥ

Έτος 2022

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

**3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS**

Η παρούσα διπλωματική
εργασία επικεντρώνεται στις
εφαρμογές της τεχνολογίας
τρειςδιάστατης εκτύπωσης
στις τηλεπικοινωνίες.

Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση
στη σημασία του 3D printing
στα τηλεπικοινωνιακά
συστήματα καθώς και στις
δυνατότητες που
προσφέρονται επί των
κεραιοσυστημάτων.

Πραγματοποιείται
ανάλυση εφαρμογών των
διάφορων τεχνικών, με
βαρύτητα στα πλεονεκτήματα
και μειονεκτήματά τους.

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

-

3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Ευχαριστίες

Τους κ.κ. Καθηγητές :

Δρ. Ειρήνη Καρανάσιου για την αμέριστη βοήθεια, στήριξη και καθοδήγηση ως επιβλέπουσα καθηγήτρια.

Δρ. Νικόλαο Δάρα για την καθοριστική του βοήθεια καθόλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Όλους τους καθηγητές του Δ.Δ.Π.Μ.Σ. «Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων» για την παροχή υψηλοτάτης ποιότητας Ακαδημαϊκής εκπαίδευσης.

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΜΑΡΙΟΣ

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

**-
3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS**

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Περιεχόμενα

Κατάλογος ακρωνυμίων	Σελ. 11
Κατάλογος σχημάτων	Σελ. 12
Κατάλογος πινάκων	Σελ. 12
Κατάλογος εικόνων	Σελ. 13
Πρόλογος	Σελ. 14
Abstract	Σελ. 16
1. Εισαγωγή	Σελ. 17
1.1 Η εξέλιξη στα ασύρματα και κινητά δίκτυα	Σελ. 17
1.2 Οι απαιτήσεις που οδήγησαν στα συστήματα 5G και κρίσιμες περιπτώσεις εφαρμογής	Σελ. 23
1.3 5G New Radio	Σελ. 30
1.4 Κεραίες και Φυσικό Επίπεδο στο 5G	Σελ. 35
2. Κεραίες Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης για 5G επικοινωνίες	Σελ. 45
2.1 Οι κεραίες τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης ως γενική τεχνολογία ενεργοποίησης 5G	Σελ. 45
2.2 Λογισμικά εργαλεία για τη σχεδίαση και εφαρμογή για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης	Σελ. 59
2.3 Προκλήσεις για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης με ιδιαίτερη μνεία στις κεραίες	Σελ. 74
3. Μέθοδοι Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	Σελ. 81
3.1 Μέθοδοι για Κατευθυνόμενη Γραφή - Direct Write	Σελ. 82
3.1.1 Εκτύπωση Εξώθησης Μελάνης - Inkjet Printing (IJP)	Σελ. 84
3.1.2 Εκτύπωση Εξώθησης Αεροσωματιδίων - Aerosol Jet Printing (AJP)	Σελ. 86
3.1.3 Κατευθυνόμενη Γραφή Μελάνης - Direct Ink Writing (DIW)	Σελ. 88
3.1.4 Σύγκριση μεθόδων Direct Write	Σελ. 89
3.2 Μέθοδοι για Προσθετική Μέθοδο Παραγωγής - Additive Manufacturing	Σελ. 94
3.2.1 Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης – Fused Deposition Modeling (FDM)	Σελ. 96
3.2.2 Στερεολιθογραφία - Stereolithography (SLA)	Σελ. 98
3.2.3 Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός – Digital Processing (DLP)	Σελ. 100
3.2.4 Αναυδόμενες Τεχνικές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης AM	Σελ. 102
4. Υλικά Κατασκευής Κεραιών με Χρήση Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	Σελ. 104
4.1 Διηλεκτρικά υλικά	Σελ. 107
4.2 Αγώγιμα Υλικά	Σελ. 112

4.3	Μεταϋλικά Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	Σελ. 119
5.	Αξιολόγηση Τεχνολογιών Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στα Εξαρτήματα Τηλεπικοινωνιών	Σελ. 120
6.	Συμπεράσματα	Σελ. 124
	Βιβλιογραφία	Σελ. 125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

3DP	Three Dimensional Printing
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AAS	Advanced Antenna Systems
AM	Additive Manufacturing
BJ	Binder Jetting
BW	Bandwidth
CAD	Computer – Aided Design
CAM	Computer – Aided Manufacturing
DLP	Digital Light Processing
DRA	Dielectric Resonator Antenna
EMB	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LENS	Laser Engineered Net Shape
LS	Laser Sintering
MJ	Material Jetting
NPJ	NanoParticle Jetting
PLA	Polyactic Acid
RFT	Radio Frequency Transmitter
RF	Radio Frequency
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Σύγκριση στους βασικούς πυλώνες λειτουργίας του 5G και 6G

Σχήμα 2: Διάγραμμα απασχόλησης δικτύων από συνδρομητές και μεταφοράς δεδομένων

Σχήμα 3: Μεθοδολογία για απόκτηση στοιχείων RF υψηλής απόδοσης

Σχήμα 4: Αναπαράσταση Inkjet Printing

Σχήμα 5: Αναπαράσταση Aerosol Jet Printing

Σχήμα 6: Αναπαράσταση Direct Ink Writing

Σχήμα 7: Αναπαράσταση Stereolithography (SLA)

Σχήμα 8: Αναπαράσταση Digital Light Processing (DLP)

Σχήμα 9: Αναπαράσταση Fused Deposition Modeling (FDM)

Σχήμα 10: Σύγκριση παραδοσιακή μεθόδου παραγωγής – τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των τεχνολογιών 5G και 6G

Πίνακας 2: Υλικά – Τύποι – Ιδιότητες αυτών

Πίνακας 3: Σύγκριση μεθόδων εκτύπωσης

Πίνακας 4: Ειδική αντίσταση και χαρακτηριστικά συγκεκριμένων μετάλλων

Πίνακας 5: Ειδική αντίσταση – Υλικά κατασκευής – χαρακτηριστικά εκτυπωμένων στοιχείων τηλεπικοινωνίας

Πίνακας 6: Είδη υλικών – μέθοδοι εκτυπώσεων – χαρακτηριστικά κατά την παρασκευή στοιχείων

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά αγώγιμων υλικών

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Δέσμη διάδοσης και ΜΙΜΟ, με χρωματικό κώδικα για τις διάφορες μεταδόσεις

Εικόνα 2: Διατάξεις κεραίας, χωρισμένης και σε υποδιατάξεις με διπλή πόλωση

Εικόνα 3: Διάταξη και υποδιατάξεις, κατά την υποστήριξη κέρδους της κεραίας και διεύθυνσης δέσμης

Εικόνα 4: Κατάλληλο Προηγμένο Σύστημα Κεραίας κατά συγκεκριμένη παραμετροποίηση

Εικόνα 5: Κεραίες Horn I

Εικόνα 6: Κεραίες Horn II

Εικόνα 7: Κεραίες patch

Εικόνα 8: Κεραία γραμμής Μαιάνδρου

Εικόνα 9: Κεραία Φακού Δείκτη Κλίσης I

Εικόνα 10: Κεραία Φακού Δείκτη Κλίσης II και κεντρικός λοβός

Εικόνα 11: Κεραία και σχεδιάγραμμα κεραίας ανακλαστικής συστοιχίας

Εικόνα 12: Κατασκευή Διπλέκτη και συναρμολόγηση – επιμετάλλωση

Εικόνα 13: Ιστοσελίδα Λήψης Autodesk Fusion 360

Εικόνα 14: Ιστοσελίδα Λήψης Autodesk AutoCAD

Εικόνα 15: Ιστοσελίδα Λήψης Ultimaker Cura

Εικόνα 16: Ιστοσελίδα Λήψης TinkerCAD

Εικόνα 17: Ιστοσελίδα Λήψης MeshLab

Εικόνα 18: Ιστοσελίδα Λήψης Solidworks

Εικόνα 19: Ιστοσελίδα Λήψης CATIA

Εικόνα 20: Ιστοσελίδα Λήψης OpenSCAD

Εικόνα 21: Ιστοσελίδα Λήψης FreeCAD

Εικόνα 22: Κεραία μονόπολο τύπου Fractal, με χρήση μεταλλικής AM τεχνολογίας

Εικόνα 23: Κεραία patch από εκτυπωτή τρισδιάστατης τεχνολογίας

Πρόλογος

Επιδιωκόμενος σκοπός της εργασίας είναι να αναδείξει την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε συνάφεια με τα οφέλη της και τα πλεονεκτήματά της, για χρήση στην κατασκευή εξαρτημάτων Ραδιοσυχνότητας και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Ενδείκνυται η χρήση και εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας, για παραγωγή κεραιοσυστημάτων για την υποστήριξη σύγχρονης τεχνολογίας (LTE Networks, 5G New Radio, κα), προσδίδοντας ιδιαίτερη σημασία σε παραγόμενα προϊόντα με χαμηλές απώλειες για την αξιοποίησή τους.

Παράλληλα εμφανίζονται οι δυνατότητες και οι τύποι κεραιών, για την υπηρετήση σύγχρονων συστημάτων επικοινωνίας, με την ανάλυση των χαρακτηριστικών τους και ιδιοτήτων τους, όπως ακριβώς και οι προκλήσεις που προκύπτουν κατά τη χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Ακόμη, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και στα οφέλη, πιο επεξηγηματικά όπως αυτό του χαμηλού κόστους παραγωγής των εξαρτημάτων και η λεπτομέρεια που δύναται να προσδώσουν οι εκτυπωτές κατά την κατασκευή υψηλής ανάλυσης προϊόντων, αντιμετωπίζοντας ζητήματα και προκλήσεις, που δεν είναι εφικτές - να ανταπεξέλθουν - κατά τη βιομηχανική και παραδοσιακή μέθοδο κατασκευής κεραιοσυστημάτων.

Μεγάλης σημασίας συμμετοχή στα εξαχθέντα αποτελέσματα, έχει το εκάστοτε υλικό ή κράμα υλικών που χρησιμοποιείται, καθώς και η τεχνική εκτύπωσης. Παραπέμπεται σημείωση για τη σημαντικότητα υλικών όπως:

- Διηλεκτρικά υλικά
- Αγώγιμα υλικά

Επιθυμητός στόχος της παραπάνω διπλωματικής εργασίας είναι να προσδώσει ερεθίσματα στον αναγνώστη έτσι ώστε να οικειοποιηθεί με τη συγκεκριμένη τεχνολογία, η οποία εκτιμάται ότι είναι τεχνολογία του μέλλοντος προς διερεύνηση και αξιοποίηση.

Abstract

The scope the present thesis is to highlight the components and advantages of state – of – the – art 3D printing technology in the field of radio frequencies and telecommunication systems applications.

3D printing technology has been proposed the past few years for the construction of antenna systems to support modern mobile technology (LTE Networks, 5G New Radio, etc), focusing on manufacturing low – cost products with advanced properties.

At the same time, the possibilities and types of antennas to serve modern communication systems are presented, including the analysis of their characteristics and properties, as well as the challenges that arise when using 3D printing technology.

Furthermore, the advantages and benefits of the proposed approaches are presented focusing on the cost effective production of the components and the detail that printers can provide when manufacturing high-resolution products while tackling issues and challenges that are not possible to overcome using current industrial and traditional manufacturing methods of antenna systems.

The material or alloy of materials used, as well as the printing technique, play an important role regarding the obtained results. The present thesis is an extensive review of the state – of – the – art technologies, methods and materials in the field of the continuously advancing 3D printing or telecommunication applications and components.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η εξέλιξη στα ασύρματα και κινητά δίκτυα

Η εκκίνηση της κινητής και ασύρματης τεχνολογίας επικοινωνίας βρίσκεται στη δεκαετία του 1980, με τη δημιουργία συστημάτων επικοινωνίας αναλογικής κινητής τηλεφωνίας με συγκεκριμένη μετάδοση δεδομένων – αρκετά περιορισμένη – σε ένα εύρος φάσματος επίσης μικρού μεγέθους.

Η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων οδήγησε τη δεκαετία του 1990 στη δημιουργία ψηφιακών δικτύων, ονόματι “Global system for mobile communications” (GSM – Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες). Η συγκεκριμένη γενιά κάλυψε την απαίτηση της τηλεφωνίας – φωνή – και των γραπτών μηνυμάτων – δεδομένα – με δυνατότητες χαμηλών ταχυτήτων μετάδοσης.

Το 2001 δημιουργήθηκε η πρωτοποριακή για την εποχή «Τρίτη Γενιά (3rd Generation - 3G)», προσδίδοντας ασύγκριτες ταχύτητες μετάδοσης σε σύγκριση με αυτές των παλαιότερων γενεών, με την τεχνολογική εξέλιξη να εισαγάγει το 2009, μέσω των Long Term Evolution (LTE) δικτύων, την ευρέως φάσματος τεχνολογία του 4G. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιεί την «Multiple – Input, Multiple Output (MIMO) – Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων» τεχνολογία και την «Orthogonal Frequency – Division Multiplexes (OFDM) – Ορθογώνια Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνοτήτων», παρέχοντας υπηρεσίες σε πολλαπλάσιο αριθμό συνδρομητών, με ποικιλία παροχής υπηρεσιών με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων για την έως τότε εποχή.

Το 2019 εισάγεται η τεχνολογία 5G (5th Generation – 5^{ης} Γενιάς), η οποία επεκτείνει σημαντικά τις ασύρματες επικοινωνίες και την κινητή τηλεφωνία ανάμεσα σε ανθρώπους και αντικείμενα – από αντικείμενα οικιακής χρήσης έως και βιομηχανικής παραγωγής – δικτυώνοντας σημαντικά σε έναν παγκόσμιο ιστό. Μελλοντικά προβάλλει ήδη η ανάγκη ανάπτυξης τεχνολογίας 6G, η οποία θα εφαρμοστεί με στρατηγικό στόχο την αξιοποίηση νέου πεδίου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, αλλά και εφαρμογές βελτίωσης υπηρεσιών από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη σε ένα υπερδίκτυο υπηρεσιών.

Η σημαντική διαφοροποίηση και η παγκοσμιοποίηση της τεχνολογίας των επικοινωνιών, διακρίνεται από την 1^η και 2^η Γενιά στην 3^η και 4^η Γενιά, οι οποίες αύξησαν κατακόρυφα τις δυνατότητες κάλυψης του παγκόσμιου περιβάλλοντος, τόσο επίγεια, όσο και θαλάσσια, υποθαλάσσια, υπέργεια και διαστημικά, δημιουργώντας ένα ύψιστης σημασίας ψηφιακό δίκτυο, με αλληλένδετα συστήματα που εξυπηρετούν το παραπάνω σκοπό.

Σημαντική παρατήρηση για τις δύο πρώτες γενιές, είναι η εγγραφή συνδρομητών στις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, στην αρχή του 20^{ου} αιώνα χρησιμοποιώντας την τεχνολογία (GSM), η οποία έγινε προσιτή οικονομικά και τεχνολογικά στην πλειοψηφία του ανεπτυγμένου κόσμου. Φυσικό επακόλουθο ήταν η προσέλκυση δισεκατομμυρίων ανθρώπων στις 3^η – 4^η Γενιά (3G – 4G), δίνοντας σπουδαία υποστήριξη στον πληθυσμό έκαστης χώρας, αλλά και η ανάπτυξη και διαχείριση τεχνολογιών, λόγω του υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, με την ενσωμάτωση χειρισμού στα συγκεκριμένα δίκτυα αντικειμένων [Internet of Things (IoT) – Industrial Internet of Things (IIoT)].

Το 5G δίκτυο θεμελιώνεται στη χρήση λογισμικών με βασικούς τεχνολογικούς πυλώνες όπως:

1. Software Defined Networks (SDN) – Δικτύωσης βάσει Λογισμικού
2. Network Functioning Virtualization (NFV) – Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών
3. Network Slicing (NS) Mobile Multi – Access Edge Computing (MEC) – Τεμαχισμός Δικτύου, Τεχνολογία Υπολογιστικής Άκρου
4. Massive multiple – input/multiple – output (MMIMO) – Συστοιχία Μαζικών Συστοιχιών Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων
5. Millimeter – wave (mmW) – Χιλιοστομετρικά Κύματα.

Οι συγκεκριμένες ενισχυμένες δυνατότητες υψηλών συχνοτήτων, έδωσαν την ευκαιρία βελτιωμένης – περισσότερης μεταφοράς δεδομένων, με μεγαλύτερη κάλυψη πεδίου και καλύτερες τιμές μεταφοράς δεδομένων. Μέσω του 5G, παρά το ήδη πυκνό ασύρματο και κινητό δίκτυο, διασυνδέθηκαν δεκάδες φορές περισσότερες συσκευές, αναπτύχθηκε η αλληλεξάρτηση M2M (Machine to Machine – Μηχανή προς Μηχανή), επεκτείνοντας σημαντικά το υπάρχον υφιστάμενο δίκτυο, παρέχοντας καλύτερη κάλυψη χώρων, εκμεταλλευόμενο τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων σε συγκεκριμένα φάσματα και τεχνολογίες και ενεργειακή αποδοτικότητα. Παρά την τεχνολογική ανάπτυξη που επήλθε, η δικτύωση του πλανήτη, έχει ακόμα σημαντικά άλματα να πραγματοποιήσει ώστε να ολοκληρωθεί. Η χαμηλού κόστους παροχής υπηρεσιών, χωρίς καθυστερήσεις και με υψηλές ταχύτητες διαδικτύου, σε όλες τις διαστάσεις και επίπεδα, προμηνύει τη δημιουργία δικτύου 6ης Γενιάς (6G) τα επόμενα χρόνια. Με το 5G να χρησιμοποιεί συγκεκριμένους παράγοντες «New Radio (NR)» (Νέο Ραδιοφάσμα), βελτίωσης σε σύγκριση με το παρελθόν, όπως:

1. Enhanced Mobile Broadband (eMBB) – Ευρυζωνικές Κινητές Υπηρεσίες Νέας Γενιάς
2. Massive Machine Type Communication (mMTC) – Υπηρεσίες Μαζικής Επικοινωνίας Μεταξύ Μηχανών
3. Ultra – Reliable Low Latency Communication (URLLC) – Υψηλής Αξιοπιστίας Μικρού Χρόνου Απόκρισης

Επιτυγχάνουν ταχύτητες Gbps (Gigabits per seconds – Γκιγκακύκλων ανά δευτερόλεπτο), παρουσιάζοντας αλματώδη εξέλιξη στη μεταφορά δεδομένων και στη δικτύωση των συνδρομητών, με καθυστερήσεις της τάξης του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Προσδίδονται πλεονεκτήματα, εύρεσης φάσματος αξιοποίησης για αυτούς τους σκοπούς και ενεργειακά αποδοτική κατανάλωση και πράσινη συμπεριφορά.

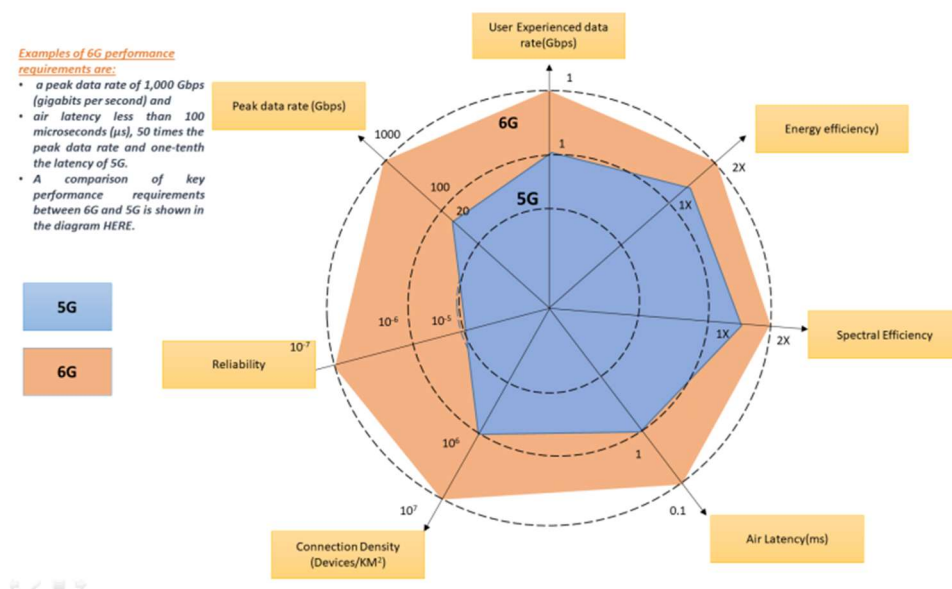
Τα παραπάνω πλεονεκτήματα και κατακτήσεις της επιστημονικής κοινότητας, προμηνύουν την ανάπτυξη τεχνολογικών αντικειμένων στο άμεσο μέλλον και σε συνάρτηση με τη μελέτη για την υλοποίηση και της 6G τεχνολογίας, με εφαρμογές όπως:

1. Virtual Reality (VR) – Εικονική Πραγματικότητα
2. Augmented Reality (AR) – Επαυξημένη Πραγματικότητα
3. Mixed Reality (MR) – Μικτή Πραγματικότητα
4. Autonomous vehicles – Αυτόνομα Οχήματα
5. Internet of Things (IoT) – Διαδίκτυο (Internet) των Πραγμάτων
6. Industry 4.0 – Βιομηχανία 4.0
7. Edge Intelligence (EI) – Νοημοσύνη κατά το Σημείο Γέννησης (Άκρου)
8. Επικοινωνίες από τα 6 GHz έως THz συχνοτήτων για περαιτέρω αξιοποίηση

9. Non Orthogonal Multiple Access – Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση
10. Large Intelligent Surfaces (LIS) – Μεγάλες Ευφυείς Επιφάνειες
11. Holographic Telepresence (HT) - Ολόγραμμα Τηλεπαρουσίας
12. Εξέλιξη Unmanned Aerial Vehicles (UAV) – Εξέλιξη Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (MEA)
13. Extended Reality (XR) – Εκτεταμένη Πραγματικότητα

Όλα τα παραπάνω απαιτούν μηδενικές καθυστερήσεις και υψηλές - πολύ ταχύτερες μετάδοσης δεδομένων, το οποίο προβλέπεται να υλοποιηθεί από ένα 6G κινητό (mobile) και ασύρματο (wireless) δίκτυο.

Παρακάτω η σύγκριση των 5ης και 6ης Γενιάς κινητών και ασύρματων δικτύων στις 7 κάτωθι κατηγορίες, δείχνει την τάξη μεγέθους για τη μελλοντική εξέλιξη.



Σχήμα 1: Σύγκριση στους βασικούς πυλώνες λειτουργίας του 5G και 6G [1]

Characteristics	5G Advanced	6G
Peak data rates	100 Gbps	1 Tbps
Latency	1 ms	<1 ms
Frequency bands	Sub 6 GHz, mmWave for fixed access	Sub 6GHz mmWave for mobile access, terahertz band, Non-RF e.g., VLC)
Device Services	Secure connectivity	Physical interaction in real-time scenarios
Network Type	SDN, NFV, Slicing	SDN, NFV, Intelligent Cloud, AI-based Slicing, Deep learning
Computing Techniques	Fog computing, Cloud computing	Quantum computing, Edge computing
Mobility	500 Km/h	>700 Km/h
Technology	D2D communication, Ultra-dense Network, Relaying, Small cell access, NOMA	Visible Light Communication, Quantum Communication, Hybrid access, Haptic technology
Application types	Reliable eMBB, URLLC, mMTC, Hybrid	MBRLLC, mURLLC, HCS, MPS
Architecture	Dense sub-6 GHz small cells with	Cell-free smart surfaces, Temporary hotspots using drones base stations

Πίνακας 1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των τεχνολογιών 5G και 6G [1]

1.2 Οι απαιτήσεις που οδήγησαν στα συστήματα 5G και κρίσιμες περιπτώσεις εφαρμογής

Η συνεχής απαίτηση για την αύξηση των συνδρομητών στο δίκτυο των προηγούμενων γενιών (1G – 4G), συναρτήσει της απαίτησης για υψηλότερες ταχύτητες στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και της σχεδόν μηδενικής καθυστέρησης, οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη των 5G δικτύων σε παγκόσμιο επίπεδο, για την κάλυψη των αναγκών. Η απαίτηση επίσης της υποστήριξης της τεχνολογικής κληρονομιάς των προηγούμενων γενεών εν μέρει, με τη νέα τεχνολογία επιτεύχθηκε διατηρώντας πολλά συστήματα, και κάνοντας τα συμβατά με αυτά του 5G. Υπάρχοντα συστήματα όπως το LTE, τεχνολογίες WiFi, κλπ, συναντάνε την επαναστατική τεχνολογία του 5G. Η φιλοσοφία πίσω από την έκφραση «Μηδενική καθυστέρηση με ταχύτητες gigabits per second», είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών νέας γενιάς, η οποία προσεγγίζει τιμές που στο παρελθόν σκιαγραφούνταν αδιανόητες και απλησίαστες.

Μηδενική καθυστέρηση κρίνεται αδύνατο αυτή τη στιγμή να επιτευχθεί, ωστόσο με την τεχνολογία 5G, οι ραδιοπομποδέκτες δεν θα αντιμετωπίσουν πρόβλημα υποβαθμίζοντας την απόδοση των συστημάτων λόγω καθυστερήσεων στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Το 5G δεν περιορίζεται μόνο στην ανθρώπινη επικοινωνία, αντίθετα έχει συμπεριλάβει στο ευρύ δίκτυο την συμπερίληψη και χρήση των άψυχων συστημάτων, διά του Internet of Things (IoT – Διαδίκτυο των Πραγμάτων), μέσω συσκευών που θα επικοινωνούν και μεταξύ τους, προσδίδοντας χρήσιμα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα σε ένα κορμό «ραχοκοκαλιάς» και τερματικών διατάξεων για την υποστήριξη και διαχείριση του συστήματος.

Οι ανάγκες των ανθρώπων, αυτές καθεαυτές έχουν αυξηθεί κατακόρυφα, καθώς από την τεχνολογία 2G και την ανάγκη για ομιλία μέσω κινητής τηλεφωνίας, με αντικειμενικό σκοπό τη μεταφορά φωνής, υπήρχαν καθυστερήσεις στη μετάδοση της φωνής έως και 100 χιλιοστά του δευτερολέπτου (milliseconds), ενώ πλέον με το 5G η καθυστέρηση στην ανταπόκριση και στη μεταφορά δεδομένων καμιά φορά μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και στην τάξη του 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου (millisecond) σε συστήματα με λειτουργίες αφής.

Από τις μητροπόλεις αρχικά, και μετέπειτα σε κάλυψη όλου του πλανήτη, θα προσφέρονται υψηλές ταχύτητες internet, της τάξης των Γκιγκακύκλων ανά δευτερόλεπτο (Gigabytes per second), προσφέροντας τη δυνατότητα διασύνδεσης αριθμού ατόμων και συσκευών, καθώς αυξάνονται σημαντικά οι ανάγκες καλύτερης απόδοσης, δικτυακής χωρητικότητας και ρυθμού δεδομένων ταχείας αποστολής και λήψης, τα οποία συνδυαστικά με τις αναπτυσσόμενες εφαρμογές θα απαιτούν και νεότερα συστήματα τα οποία θα μπορούν να τις εκτελέσουν.

Μερικές από τις περιπτώσεις χρήσης – εφαρμογές την 5G τεχνολογίας είναι:

1. Gigabytes στο δευτερόλεπτο
2. 3D videos και υψηλής ανάλυσης οθόνες (monitors) (4K) – Η βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας που προσφέρεται σε νεότερες οθόνες και η υψηλού ποιότητας παροχής πληροφορίας, όπως νέες τεχνολογίας 3D videos, απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων με μηδενική καθυστέρηση.
3. Εργασία και Gaming σε cloud servers – Απαιτείται πλέον για τη διεξαγωγή παιχνιδιών και videostreaming, υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων καθώς εκατομμύρια μπορούν να συνδεθούν και να αιτηθούν την προβολή προϊόντος

ή να συμμετάσχουν διαδραστικά σε παιχνίδια, τα οποία αναπτύσσονται με σκοπό την αλληλεπίδραση των παικτών σε πραγματικό χρόνο. Ίδια φιλοσοφία ακολουθείται σε εργασιακά περιβάλλοντα όπου υπάρχει η τηλεργασία και η εξ αποστάσεως επιχειρηματική δραστηριότητα εταιρειών με μεγάλο αριθμό εργαζομένων.

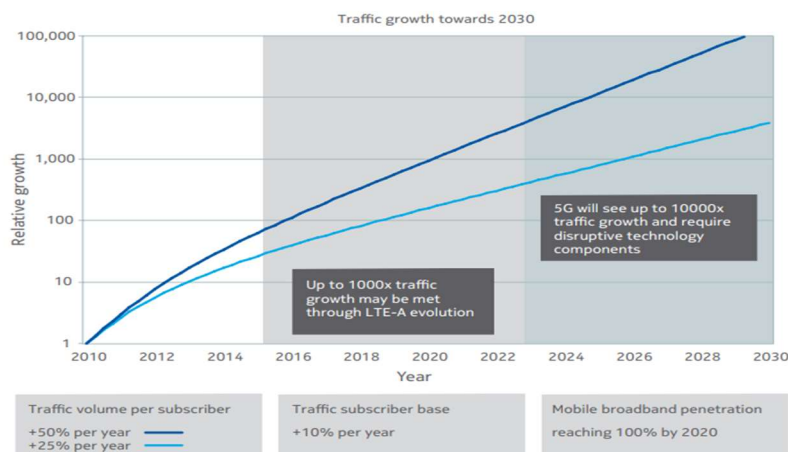
4. Επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality)– Χρειάζεται πολύ χαμηλή καθυστέρηση στη μετάδοση της πληροφορίας, καθώς χρησιμοποιείται για ψυχαγωγικούς και μετάδοσης πληροφορίας σκοπούς, και προβλέπεται ότι το επόμενο διάστημα θα γίνει ευρέως γνωστή η συγκεκριμένη μέθοδος. Ήδη πολλές εταιρείες έχουν αναπτύξει τις εφαρμογές τους, στις οποίες δραστηριοποιούνται παγκοσμίως συνδρομητές τους στο δίκτυο.
5. Εργοστασιακός αυτοματισμός και αυτοματισμός οχημάτων– Με τον τομέα της τεχνολογίας του 5G, καθίσταται επιτακτική ανάγκη κάλυψης στο internet, ανεξαρτήτως της τοποθεσίας και της ταχύτητας του οχήματος, προκειμένου να παρέχονται υπηρεσίες υψηλής ποιότητας ανεξάρτητα από τους ανωτέρω παράγοντες. Επίπρόσθετα η επαυξημένη πραγματικότητα, απαιτεί σύγχρονο δίκτυο 5G τεχνολογίας, καθώς μία σειρά από εφαρμογές στις οθόνες και στα συστήματα του οχήματος επιβάλλουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χαμηλές καθυστερήσεις για την απρόσκοπτη λειτουργία των επιβατών – οδηγού.
6. Mission Critical Broadcast – Κρίσιμη Εκπομπή Αποστολής, με επαυξημένες δυνατότητες διαχωρισμού και προτεραιοποίησης συγκεκριμένων εκπομπών μέσω ασύρματων ζεύξεων για την δρομολόγηση και διανομή των δεδομένων
7. Αυτόματη Πλοήγηση Οχημάτων – Εξ αποστάσεως χειρισμός αυτοκινήτου ή ακόμα και οχήματα χωρίς τον ανθρώπινο χειρισμό, που στο μέλλον θα μπορεί

να εκτελέσει μέσω της τεχνολογίας 5G, ολοκληρωμένες κινήσεις παρά τα υπόλοιπα οχήματα και τους οδηγούς του.

8. «Εξυπνες» κοινωνίες – Σε επίπεδο πόλης και οικίας θα υπάρχουν αλληλένδετα ασύρματα δίκτυα τα οποία παρέχουν με ενεργειακή απόδοση και χαμηλού κόστους συσκευές οι οποίες θα περιέχουν πολλαπλές υπηρεσίες. Για παράδειγμα αισθητήρες θερμοκρασίας, συσκευές καθημερινότητας, οικιακό εξοπλισμό και εφαρμογές καθημερινότητας, οι οποίες θα ελέγχονται απομακρυσμένα από συσκευή η οποία θα είναι στο δίκτυο.
9. Εφαρμογές Υγείας – οι οποίες επωφελούνται από τις ασύρματες επικοινωνίες 5G, προωθώντας την τηλεματική εργασία και εξέταση, την ενσωμάτωση ακριτικών περιοχών, σε επείγοντα περιστατικά και στο χειρισμό με χαμηλή καθυστέρηση συσκευών εντός του πλέγματος του δικτύου. Βασικές λειτουργίες και παρακολούθηση ζωτικών οργάνων παρακολουθούνται άμεσα με γρήγορο χρόνο απόκρισης σε κάθε σημείο του πλανήτη.
10. Logistics – Παρακολούθηση φορτίων/υλικών – παρέχεται κατά τη διαδικασία μεταφοράς, τήρησης, διανομής και ελέγχου των υλικών με υψηλή ακρίβεια, καθώς το ζήτημα δεν είναι τόσο οι υψηλές ταχύτητες, όσο η κάλυψη στο χώρο για την ανίχνευση σε οποιοδήποτε μέρος των μετακινούμενων αγαθών.

Τα παραπάνω απαιτούν τρεις βασικούς πυλώνες για να επιτραπεί η διεξαγωγή τους:

1. Εύρος Δυνατότητας Διακίνησης Δεδομένων - Throughput – Το ποσοστό της πληροφορίας και των δεδομένων που μεταδίδεται σε μία μονάδα χρόνου
2. Καθυστέρηση – Αξιοπιστία – Latency, Reliability – Η καθυστέρηση που παρουσιάζεται στα συστήματα κατά τη μετάδοση δεδομένων και η αξιοπιστία ότι αυτή θα είναι μικρής τάξεως
3. Ο αριθμός των συσκευών, το κόστος για αυτά, και η ισχύς που καταναλώνουν



Σχήμα 2: Διάγραμμα απασχόλησης δικτύου από συνδρομητές και μεταφοράς δεδομένων [2]

Οι πολλαπλές ανάγκες για χρήση εφαρμογών, 3D videos, cloud servers αποθηκευτικούς χώρους, και συνολικά η διαδραστικότητα και η σε πραγματικό χρόνο μετάδοση της πληροφορίας και των ειδοποιήσεων στους χρήστες και στις συσκευές που θα είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο.

Σημαντικό ζήτημα φαίνεται να είναι η κατανάλωση ισχύος που θα χρειαστούν οι συσκευές για να χρησιμοποιούν τους απαραίτητους πόρους για τη λειτουργία τους. Η μείωση του προβλήματος αυτού θα επιτευχθεί με την εκτέλεση ενεργειών, και λειτουργιών από τμήματα του δικτύου, και όχι από τους τελικούς ανταποκριτές οι οποίοι θα έχουν τις ασύρματες και κινητές συσκευές τους με απαιτήσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Η υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων και η αύξηση των συνδρομητών (ανθρώπων και μη), θα πολλαπλασιάσει χιλιάδες φορές τη χρήση δεδομένων την επόμενη δεκαετία. Ήδη οδεύοντας προς το 2030, αποδεικνύεται από στοιχεία η

χρησιμοποίηση ολοένα και περισσότερων πόρων, άρα και η επιτακτική ανάγκη εκσυγχρονισμού του δικτύου. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος με στέρεες βάσεις, δίδεται η λύση της αξιοποίησης νέων κομματιών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, σε υψηλότερες συχνότητες – με ό,τι συνεπάγεται αυτό ως προς τα χαρακτηριστικά τους – άρα και την αξιοποίηση μικρότερων μηκών κύματος, εφαρμόζοντας νέες τεχνολογίες σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, πομποδέκτες και κεραιές, οι οποίες θα συνδράμουν στην αποτελεσματική εγκαθίδρυση ενός ευρύτερου παγκόσμιου δικτύου με τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Το δεδομένο της χαμηλής καθυστέρησης, κατά την μεταφορά δεδομένων στην τεχνολογία 5G, προσφέρει τεχνολογικά πλεονεκτήματα, προσεγγίζοντας τιμές της τάξης του 1 ms για καθυστέρηση μεταφοράς το οποίο επιτυγχάνει:

1. Υψηλή μεταφορά δεδομένων με χαμηλού κόστους εξοπλισμό
2. Άμεσες απαντήσεις διαδικασίας στο σύστημα (Εγρήγορση στην απάντηση αιτημάτων, εγρήγορση στη διασύνδεση και παραμετροποίηση, άμεσος προγραμματισμός, κλπ)
3. Άμεση αξιοποίηση και χειρισμός συσκευών μέσω συνδεδεμένων cloud servers με χαμηλό χρόνο απόκρισης

Μετριοούνται ταχύτητες της τάξης των 10 Gbit/s ανάμεσα στο δίκτυο κορμού (στην αγγλική γλώσσα backbone – αποτελεί τη «ραχοκοκαλιά» διασύνδεσης των κόμβων στο δίκτυο, έχοντας την ευθύνη μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων) της 5G τεχνολογίας – και υψηλότερες αυτής – και στο επίπεδο της κυψέλης μέχρι τον τελικό χρήστη ταχύτητα περί των 100 Mbit/s, επιτρέποντας στις ασύρματες επικοινωνίες να αντικαθιστούν με ίδια αξιοπιστία και παρόμοια χαρακτηριστικά με τις ενσύρματες επικοινωνίες. Επιτυγχάνεται με υψηλότερες συχνότητες, η κάλυψη περιοχών με

κατανάλωση χαμηλότερης ισχύος και εύρος φάσματος μεγαλύτερο, αφού δίνεται η δυνατότητα, από την αξιοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού χώρου. Δημιουργούνται καθημερινά μικρότερες κυψέλες με σκοπό να υπάρχουν περισσότερα Radio Access σημεία (Δίκτυα τα οποία μέσω επικοινωνιακών καναλιών διαφορετικών συχνοτήτων, μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα για την υποστήριξη του 5G δικτύου), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών, οι οποίοι έχουν απαιτήσεις χρήσης και αξιοποίησης πολλών δεδομένων με υψηλές ταχύτητες. Στις συγκεκριμένες μικρές κυψέλες θα είναι εφικτή η διασύνδεση μόνο ορισμένων συνδρομητών, όμως θα είναι δυνατή η αξιοποίηση υψηλών ταχυτήτων.

Η ακρίβεια της θέσης και η υψηλού επιπέδου κάλυψη είναι δυνατή πλέον και σε κλειστούς χώρους, εντός αυτών, καθώς για την κάλυψη χρησιμοποιούνται δυνατότητες και ενίσχυσης σήματος, με την υποστήριξη συσκευών που έχουν ρόλο στην κάλυψη εντός χώρων, ανάλογα τη θέση του ασύρματου και του κινητού ανταποκριτή, με στόχο την εξυπηρέτησή του.

Συμπερασματικά, οι νέες εφαρμογές της 5G τεχνολογίας, χρειάζονται εκσυγχρονισμό των συσκευών – hardware – software (υλικού και λογισμικού) που χρησιμοποιούν, και μελλοντικά θα προβάλλουν περισσότερες ανάγκες και απαιτήσεις. Κύρια χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να καλύπτονται ως βασικοί πυλώνες κατά τη διάδοση της 5ης γενιάς είναι η ευκαμψία και η αξιοπιστία, στις υπάρχουσες υπηρεσίες που προσφέρονται από την εκκίνηση λειτουργίας των 5G δικτύων έως και σήμερα.

1.3 5G New Radio

Το 5G New Radio ή 5G NR, είναι μία σειρά από πρωτόκολλα και καθορισμένες λειτουργίες που αντικαθιστούν τα LTE 4G πρωτόκολλα και διαδικασίες. Η όλη φιλοσοφία περί αυτού, πραγματεύεται την ανάπτυξη του δικτύου, το οποίο θα λειτουργεί σε μεγαλύτερες συχνότητες της ασύρματης και κινητής τεχνολογίας για ευρεία κάλυψη, εκμεταλλευόμενο τις δυνατότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ουσιαστικά μέσω των νέων προτύπων, επιτρέπονται μέσω μεγάλων κομματιών στο φάσμα, να εκτελούνται πολύπλοκες λειτουργίες του παρελθόντος όπως το live streaming σε υψηλή ποιότητα εικόνας, αλλά και η ενσωμάτωση στο δίκτυο, μεγαλύτερου αριθμού συσκευών, οι οποίες θα επικοινωνούν ασύρματα και θα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Παραδείγματος χάρη, σημειώνεται μέσω των προτύπων – standards του 5G New Radio, ανάπτυξη σε επικοινωνίες νέας τεχνολογίας όπως Machine – to – Machine (Μηχαή προς Μηχανή), Vehicle – to – Vehicle (Όχημα προς όχημα), Vehicle – to – Infrastructure (Όχημα προς Υποδομή).

Το πρότυπο – standard 5G New Radio δημιουργήθηκε από την 3rd Generation Partnership Project (3GPP), μία ένωση τηλεπικοινωνιακών οργανισμών, οι οποίοι εργάζονται με γνώμονα την ανάπτυξη προτύπων – πρωτοκόλλων για τις ασύρματες επικοινωνίες και τεχνολογία.

Η δημιουργία του 5G New Radio, αποτελείται από μηχανικές διεργασίες οι οποίες αναπτύχθηκαν για την 5G τεχνολογία, με εκτέλεση μεταφοράς δεδομένων μέσω του πυρήνα (core - backbone) του δικτύου με πολύ υψηλές ταχύτητες. Αποτελούν νέες τεχνολογίες, με την αλληλεπίδραση με τους πελάτες του δικτύου και των δυνατοτήτων που προσδίδονται, να μπορούν πλέον να ανταποκριθούν σε σύνθετες

απαιτήσεις για τη λειτουργία σε τόσο προχωρημένο επίπεδο. Με το 5G εισάγονται τα κάτωθι:

1. Διαφοροποίηση στα χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος – έως μήκη κύματος χιλιοστών (mmW), για την εκχώρηση χώρου και δυνατοτήτων σε πολλαπλές εφαρμογές, νέες κυψέλες και υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
2. Νέα διαμόρφωση – νέες μέθοδοι – όπως ορθογωνική συχνότητα – τμηματικής πολυπλεξίας - orthogonal frequency – division multiplexing – και κωδικοποίηση καναλιών δημιουργηθέντων πάνω στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.
3. Αλγόριθμοι επαναχρησιμοποίησης φάσματος, ακόμα και σε πυκνά περιβάλλοντα που δραστηριοποιούνται πολλοί συνδρομητές.
4. Πολλαπλές εισοδοι και πολλαπλές έξοδοι – MIMO, και εξελεγμένες μορφές δέσμης μεταφοράς δεδομένων με σύγχρονες δυνατότητες
5. Χρονικά περιθώρια στη λειτουργία για να αποφεύγεται η οποιαδήποτε καθυστέρηση κατά τη μετάδοση των δεδομένων και της πληροφορίας.

Τα παραπάνω αποτελούν σημαντικά οφέλη, του 5G New Radio, τα οποία προσδίδουν κέρδη σε χωρητικότητα, κάλυψη και απόδοση.

Για να επιτευχθεί η μετάβαση από το LTE πρότυπο (standard), στο 5G New Radio, κρίνεται αναγκαία η χρήση συσκευής που να υποστηλώνει μία ασύρματη

σύζευξη, να υποστηρίζει το Internet of Things, να εξοικονομεί ενέργεια από την εκπομπή σήματος μόνο κατά ουσιώδεις στιγμές, διαχωρίζοντας με τι ισχύ και τι ρυθμό πρέπει να έχει κατά τη μετάδοση, και συνολικά να υφίσταται πρωτόκολλο αυστηρούς μετάδοσης δεδομένων σύμφωνα με τις ανάγκες, λόγω των αυξημένων συνδρομητών – συσκευών εντός δικτύου.

Από τους ποικίλους τρόπους ανάπτυξης και λειτουργίας του 5G δικτύου, φανερώνονται ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα, για το ποιος τρόπος θα επιλεγεί, όπως η υπάρχουσα υποδομή, αν υπάρχει ή όχι εγκατεστημένο πλησίον ένα Greenfield Project (Από μηδενική βάση προηγούμενης τεχνολογίας, νέος εξοπλισμός για 5G δικτύωση), τον αριθμό των συνδρομητών και τι προσδοκίες έχουν από το δίκτυο. Οι κυριότεροι τύποι ανάπτυξης λειτουργίας του 5G New Radio είναι:

1. Αυτόνομη λειτουργία (Stand alone mode), χωρίς κανένα υπόστρωμα υποδομής 4G, ευνοούμενοι από όλα τα οφέλη του 5G.
2. Μη αυτόνομη λειτουργία (Non – Stand alone mode), με υβριδικά χαρακτηριστικά, καθώς υπάρχει υποδομή 4G στο δίκτυο η οποία και χρησιμοποιείται. Η συγκεκριμένη ανάπτυξη λειτουργίας περιορίζει τα οφέλη του 5G New Radio. Με αυτή τη μέθοδο υπάρχει σταδιακή χρησιμοποίηση και πρόοδος ανάλογα την τοποθεσία και την υπάρχουσα υποδομή.
3. Χρήση δυναμικού φάσματος, και στις λειτουργίες 4G και 5G, με τμηματικά καθήκοντα, χωρίς να αφιερώνεται κάποιο μέρος του φάσματος στη μία ή στην άλλη τεχνολογία.

Υποστηρίζονται στο 5G NR, χαμηλές, μεσαίες και υψηλής συχνότητας μπάντες, και κατατμίζονται σε εύρος κάτω των 6 GHz, περιοχές με συνδυαστικές ζώνες μικρότερων και μεγαλύτερων υποπεριοχών, καθώς και συχνότητες με μήκη κύματος της τάξης των χιλιοστών (mm). Επίσης στο 5G New Radio, υπάρχουν τμήματα του φάσματος τα οποία είναι ανοιχτά προς όλο τον πληθυσμό και τις συσκευές τους, και άλλα τα οποία χρειάζονται ειδική άδεια για να εισέλθουν.

Συγκρίνοντας τις δύο τεχνολογίες, καθώς το 4G περιοδικά αφοπλίζει τον εξοπλισμό του, σημαντικό είναι να γίνει αντιληπτό ότι, λόγω των υψηλότερων συχνοτήτων το 5G New Radio, δε μπορεί να λειτουργήσει με κεντρικούς κόμβους, αλλά χρειάζεται πολλά συνορεύοντα συστήματα και κεραιές οι οποίες να φτάνουν το τηλεπικοινωνιακό σήμα όπου απαιτείται. Αυτή η αναβάθμιση και πρόοδος συντελείται σε φάσεις, καθώς δεν απαιτείται ο τερματισμός χρήσης της μίας τεχνολογίας, για να περάσουμε στην επόμενη.

Σημείο αναφοράς αποτελούν και τα τεχνολογικά επιτεύγματα του 5G στην κινητή τηλεφωνία όπως:

1. Ευέλικτη αριθμολογία (Flexible numerology): σύνθετη μηχανική που προσαρμόζει τις χρονοθυρίδες και τα διαστήματα των υποφορέων τα οποία συνεισφέρουν χαμηλής καθυστέρησης σε διάφορες εφαρμογές, καθώς και στη συνύπαρξη LTE και NR.
2. Υβριδικό Αίτημα Αυτόματης Επανάληψης - Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ): το οποίο λειτουργεί στα χαμηλότερα επίπεδα δικτύων και υποστηρίζει τις διορθώσεις σφαλμάτων και τις υπηρεσίες αναμετάδοσης.

3. Η Πολυπλεξία με Διάρθρωση Χρόνου (Time Division Duplexing – TDD): στην οποία η φόρωση και η ανάληψη (uplink και datalink) δεδομένων στο δίκτυο, διεξάγονται στην ίδια συχνότητα.
4. Η Ανενεργή Κατάσταση (Inactive state): υποστηρίζει την εξοικονόμηση ενέργειας στο 5G NR, εξελίσσοντας τις καταστάσεις αδράνειας και ελέγχου για την κατανάλωση ισχύος πριν, κατά ή μετά τη μετάδοση δεδομένων.

1.4 Κεραίες και φυσικό επίπεδο στο 5G

Η 5G τεχνολογία αποτελεί το πλήρες δίκτυο μετάδοσης ασύρματης και κινητής επικοινωνίας, το οποίο περιλαμβάνει υψηλού επιπέδου ραδιοπρόσβαση (Radio Access Network) με:

1. Φυσικό Επίπεδο (Physical layer – PHY)
2. Το Κέντρο Πρόσβασης Ελέγχου Μέσων (Media Access Control– MAC)
3. Το Κέντρο Ελέγχου Ραδιοζεύξεων (Radio Link Control – RLC)
4. Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων (Packet Convergence Protocol –PCP)
5. Έλεγχος Πόρων Ραδιοσυχνοτήτων/Φάσματος (Radio Resource Control – RRC)
6. Δεδομένα Υπηρεσίας (Service Data)
7. Πρωτόκολλο Προσαρμογής (Adaptation Protocol – SDAP)

Οι λειτουργίες αυτές αξιοποιούνται στη διασύνδεση συσκευών και υποδομών δικτύου.

Οι συχνότητες στις οποίες λειτουργεί το 5G, είναι από 6 GHz έως και 100 GHz (mmWaves), και για την ορθή λειτουργία απαιτείται μία σειρά από διαδικασίες στο Φυσικό επίπεδο. Το 5G καλείται να υποστηρίξει την Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας - Frequency Division Duplexing (FDD) και την Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου - Time Division Duplexing (TDD). Ακρογωνιαίος λίθος της τεχνολογίας 5G είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών, τόσο στον κορμό του δικτύου, όσο και στις συσκευές των ανταποκριτών.

Ωστόσο, από τη μεταπήδηση της 4G τεχνολογίας στην 5G, δεν υπάρχει μία τόσο επαναστατική ιδέα και καινοτομία, όσον αφορά στις κεραίες των τηλεπικοινωνιών που χρησιμοποιούνται. Η δυνατότητα καλύτερης κάλυψης και η αξιοπιστία του συστήματος, βασίζονται στη μεμονωμένη ασύρματη ζεύξη στη Διόρθωση Σφαλμάτων Προώθησης - Forward Error Correction (FEC) και στο Υβριδικό Αυτόματο Αίτημα Επανάληψης - Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ).

Το 5G και το δύο κατώτερα επίπεδα του μοντέλου OSI έχουν σχεδιαστεί ώστε:

1. Να έχει υψηλό βαθμό ευελιξίας, καθώς υπάρχει ευρύ φάσμα υπηρεσιών οι οποίες συνδυάζονται με την κατηγορία των Βασικών Δεικτών Απόδοσης (Key Performance Indicators – KPI). Υπάρχει έντονη διαδραστικότητα και αλληλένδετες σχέσεις, λόγω των διαφορετικών συχνοτήτων, πολλαπλών υπηρεσιών που πρέπει να υποστηριχτούν και των μεθόδων μετάδοσης.
2. Να είναι ικανό να υποστηρίξει αποτελεσματικά πλειάδα συσκευών και διάφορους τύπους κεραιών, με υβριδικούς τύπους, κυματομορφές, αρχιτεκτονικές, διαφορετικά εύρη συχνοτήτων και παραμετροποιήσεις φερουσών συχνοτήτων.
3. Να επιτρέπει υψηλής ποιότητας υπηρεσίες, διαρκώς χωρίς διακοπές, μεριμνώντας για την απόδοση των κυψελών, χρησιμοποιώντας μεθόδους για μετρίασμό και εξάλειψη των παρεμβολών. Οφείλει η τεχνολογία να αντιμετωπίσει σε μητροπόλεις το ζήτημα της χωρητικότητας περί των δεδομένων και των εύρων που χρησιμοποιούνται σε περιοχές με μεγάλο πληθυσμό.

4. Να είναι ενεργειακά αποδοτικές και να καταναλώνουν την ελάχιστη δυνατή τιμή πόρων και ισχύος.
5. Να είναι ανθεκτικό ως προς το υλικό σε βλάβες, με χαμηλό κόστος απόκτησης, συντήρησης και αντικατάστασης, καθώς ζητήματα κοινά επηρεάζουν άμεσα και σε μεγαλύτερο βαθμό εξοπλισμό τα οποία λειτουργούν στην περιοχή των χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWaves).
6. Να είναι συμβατό στο μέλλον με τις επερχόμενες τεχνολογίες, ώστε να αξιοποιείται στο έπακρο η υπάρχουσα υποδομή και εγκαταστάσεις και να στηρίζεται το legacy support (Υποστήριξη Κληρονομιάς Παλαιότερης Τεχνολογίας). Ειδάλλως θα απαιτηθεί ο επανασχεδιασμός του δικτύου.
7. Απαιτείται στα δύο επίπεδα του OSI model να αναπτυχθούν διασυνδέσεις και συμβατικότητα μεταξύ 4G και 5G τεχνολογίας σε επίπεδο ακόμα και του Core Network, δηλαδή στη ραχοκοκαλιά του 5G.

Τονίζεται πλέον η ανάγκη για πιο πυκνή χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε κάθε κόμβο για τις ασύρματες επικοινωνίες. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση πολλών κεραιών στο πομπό ή/και στον δέκτη. Η συγκεκριμένη διαδικασία αναφέρεται γενικά ως MIMO και υλοποιείται από διάφορα συστήματα διαμορφώνοντας την εκπεμπόμενη ή τη ληφθείσα δέσμη, επιτρέποντας πολλαπλές προσβάσεις. Αυτό εξαρτάται πλήρως από το πόσες αυτόνομες ζεύξεις επικοινωνίας μπορούν να υλοποιηθούν ταυτόχρονα.

Στη ειδική λειτουργία διαφοροποίησης των ζεύξεων και διαύλων που δημιουργούνται, χρησιμοποιούνται διαφορετικά κομμάτια των κεραιών προκειμένου

να αξιοποιείται στο έπακρο η μετάδοση και να μην υπάρχουν διακοπές. Η λήψη ονομάζεται είτε Μονή Είσοδος – Πολλαπλές Έξοδοι (Single Input Multiple Output), είτε Πολλαπλές Είσοδοι – Πολλαπλές Έξοδοι (Multiple Input Multiple Output) προκειμένου να συνεχίζεται η αλυσίδα της σύνδεσης. Κατά τη διαμόρφωση της ακτινοβολούσας ζεύξης, το σήμα βασικής ζώνης που εκπέμπεται από κάθε κομμάτι της κεραίας, αυξάνει τον λόγο ανάμεσα σε σήμα πληροφορίας προς το θόρυβο και την παρεμβαλλόμενη ακτινοβολία που προστίθενται κατά την ατμοσφαιρική διάδοση.

Εξάγεται συνεπώς, το συμπέρασμα ότι, όσο περισσότερες κεραίες εκπομπής και λήψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τόσο πιο δυναμική γίνεται η χωρική ποικιλομορφία της διαμορφούμενης δέσμης, η πολυπλεξία και τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, ειδικά σκεπτόμενοι ότι τα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι ασύνδετα γενικά μεταξύ τους. Για προβλήματα και προκλήσεις εξασθένησης χρησιμοποιούνται μέθοδοι κωδικοποίησης για τη βέλτιστη αξιοποίηση των καναλιών επικοινωνίας. Το υλικό του εξοπλισμού, με τα χαρακτηριστικά του, τα οποία συμβάλλουν καθοριστικά στη διάδοση, προσφέρουν οφέλη σημαντικά με την κατευθυνόμενη – προσανατολισμένη εκπομπή με την πιο πρακτική μέθοδο εφαρμογής μεγάλων MIMO, που είναι η Πολυπλεξία με Διάρθρωση Χρόνου (Time Division Duplexing - TDD). Το μοναδικό μειονέκτημα διαφαίνεται να είναι ότι εκτελεί μονόδρομη απόστολή δεδομένων (Half – Duplex) κατά κάποια χρονική στιγμή, οπότε σε συγκεκριμένη συχνότητα το ήμισυ του χρόνου που εκπέμπει, του αφαιρείται η δυνατότητα της λήψης, το οποίο θα αποφευγόταν με τη χρήση της ίδιας συχνότητας σε πλήρη αποστολή (Full Duplex - FD).

Η σύγχρονη τεχνολογία έχει προχωρήσει στη δημιουργία προηγμένων κεραιών για την υπηρετήση του 5G δικτύου, οι οποίες διαλειτουργούν με το υπάρχον δίκτυο 4G. Παρουσιάζονται ωστόσο πρωτοποριακές μορφές ηλεκτρομαγνητικών δεσμών και

τεχνικές MIMO, όπως σχολιάστηκε ανωτέρω, με εργαλεία που βελτιώνουν την ποιότητα της επικοινωνίας μέχρι τον χρήστη. Οι νέες κεραιές υποστηρίζουν εξαιρετικά τόσο η ζεύξη φόρτωσης στο δίκτυο - uplink (UL), όσο και η ζεύξη λήψης από το δίκτυο - downlink (DL), με αυτές να δύναται να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλότερες συχνότητες.

Τα προηγμένα αυτά συστήματα κεραιών αποτελούνται από συστοιχία κεραιάς, και μηχανισμούς για τη ραδιοζεύξη και λειτουργία στη ζώνη βασικού σήματος. Με αυτά μπορούν να υλοποιηθούν με το κατάλληλο λογισμικό και αλγόριθμους, λειτουργίες οι οποίες δίνουν συγκεκριμένες δέσμες εκπομπής και δυνατότητας λήψης, αλλά και λειτουργίες MIMO. Επίσης με την σύζευξη διπολικών στοιχείων κεραιάς ορθογωνικά ενισχύεται η δυνατότητα διαχωρισμού της πληροφορίας σε κάθε διάσταση του χώρου. Σε ορισμένα συστήματα διάδοσης LTE δικτύων ακολουθείτε η τεχνική των πολλαπλών κεραιών κερδίζοντας σε απόδοση σημαντικά και εισαγάγοντας το Μαζικό (Massive) MIMO.

Όσον αφορά τη δέσμη της ακτινοβολούμενης ενέργειας, αυτή είναι σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, και συγκεκριμένο κανάλι προκειμένου να τη λάβει ένας συγκεκριμένος παραλήπτης/δέκτης. Διαμορφώνοντας τη φάση και το πλάτος του εκπεμπόμενου σήματος, επιτυγχάνεται η υψηλότερη ισχύς του σήματος που φτάνει στον χρήστη. Γενικευμένη δέσμη Η/Μ ακτινοβολίας, η οποία σε μητροπόλεις παρουσιάζει φαινόμενα διάθλασης, ανάκλασης ή περίθλασης, αντιμετωπίζεται με το να αποστέλλονται τα ίδια δεδομένα προς διάφορες κατευθύνσεις και υποδομές κυψέλης προκειμένου να μην χάνονται τα απαραίτητα δεδομένα. Ακυρώνονται αν έχουν φτάσει ήδη στο δέκτη, ώστε να μην σπαταλούνται πόροι στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα.

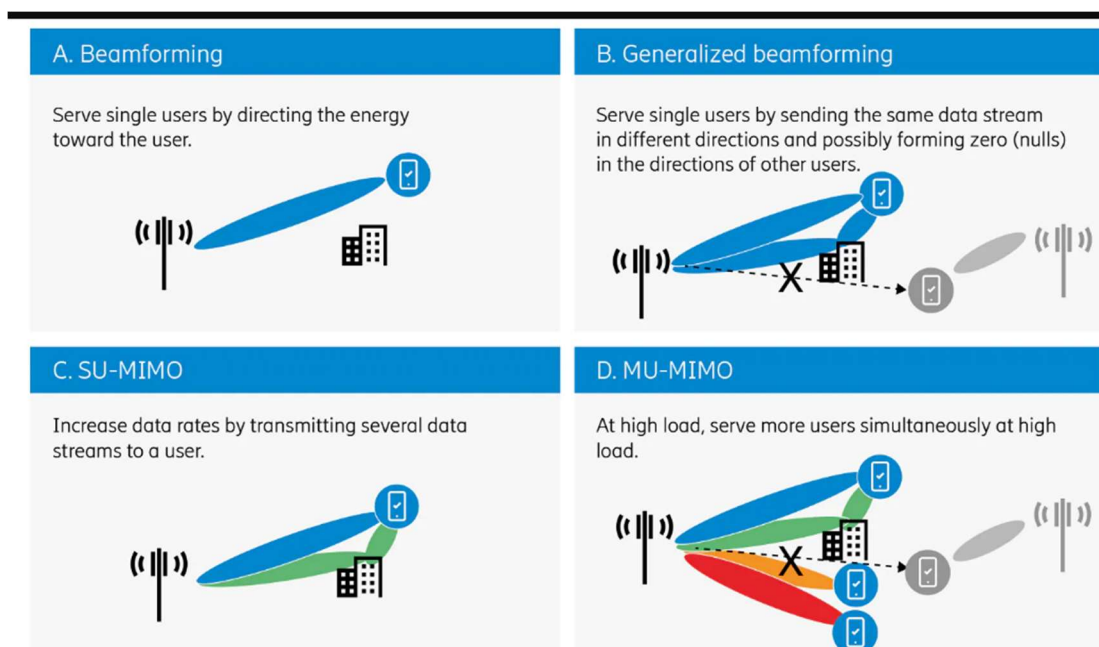


Figure 1: Beamforming and MIMO, with the different colors of the filled beams representing streams.

Εικόνα 1: Δέσμη διάδοσης και MIMO, με χρωματικό κώδικα για τις διάφορες μεταδόσεις [3]

Σχετικά το MIMO, το οποίο ορίζεται ως η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιώντας ίδιο χρόνο και συχνότητα ως πόρους, με τα δεδομένα να μπορούν να αποσταλούν σε ηλεκτρομαγνητική δέσμη, με κύριο σκοπό την αύξηση του εύρους της πληροφορίας που διαδίδεται, στη φιλοσοφία ότι είναι προτιμότερο να παραλαμβάνονται μεταδόσεις με χαμηλή ενέργεια η καθεμία, παρά μία η οποία να καταναλώνει υψηλή ισχύ προκειμένου να διαδοθεί το απαιτούμενο κύμα. Επίπλεον με τη χρήση χαμηλής ενέργειας, μειώνεται η πιθανότητας παρεμβολής μεταξύ των σημάτων.

Ο μεμονωμένος χρήστης στο MIMO (Single – user SU – MIMO), έχει την ικανότητα να μεταδίδει από μία ή περισσότερες πηγές – πόρους, από μία συστοιχία

κεραιών σε έναν χρήστη, έχοντας την επιλογή να διευρύνει ή να διαχειριστεί καταλλήλως το εύρος του φάσματος και των δυνατοτήτων. Απαιτούμενο από τον δέκτη είναι να μπορεί να παραλάβει από όλες τις συστοιχίες που του αποστέλλουν, δηλαδή να έχει τις ισάριθμες κεραίες.

Στους πολλαπλούς χρήστες MIMO (Multiple – user MU – MIMO), η προηγμένη κεραία αποστέλλει από διαφορετικά επίπεδά της ακτινοβολία, σε πολλούς χρήστες σε ίδιο χρόνο και συχνότητα, προσθέτοντας περισσότερους συνδρομητές και συσκευές εντός δικτύου. Για την επίτευξη του ανωτέρω απαιτείται η εύρεση δύο ή περισσότερων ανταποκριτών, οι οποίοι να είναι πομποί ή δέκτες την ίδια χρονική στιγμή.

Το σχήμα της συστοιχίας της κεραίας είναι συνήθως ορθογώνιο, επειδή προσφέρει υψηλού κέρδους δέσμες και μπορούν να διαδοθούν από μία σειρά γωνιών, ανάλογα εξυπηρετεί το σύστημα. Η διαλειτουργικότητα των στοιχείων της κεραίας συνεισφέρει υψηλότερο κέρδος, η οποία ενισχύεται αρκετά με τη μεταβολή της φάσης και του πλάτους κατά περίπτωση. Αυτό κατορθώνεται διαχωρίζοντας τα στοιχεία της κεραίας σε υπο – συστοιχίες (sub – arrays), οι οποίες δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους ή επηρεάζονται. Δύναται με μεθόδους ο έλεγχος της κατεύθυνσης και άλλων στοιχείων της συστοιχίας.

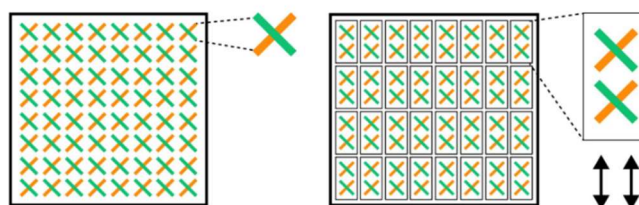
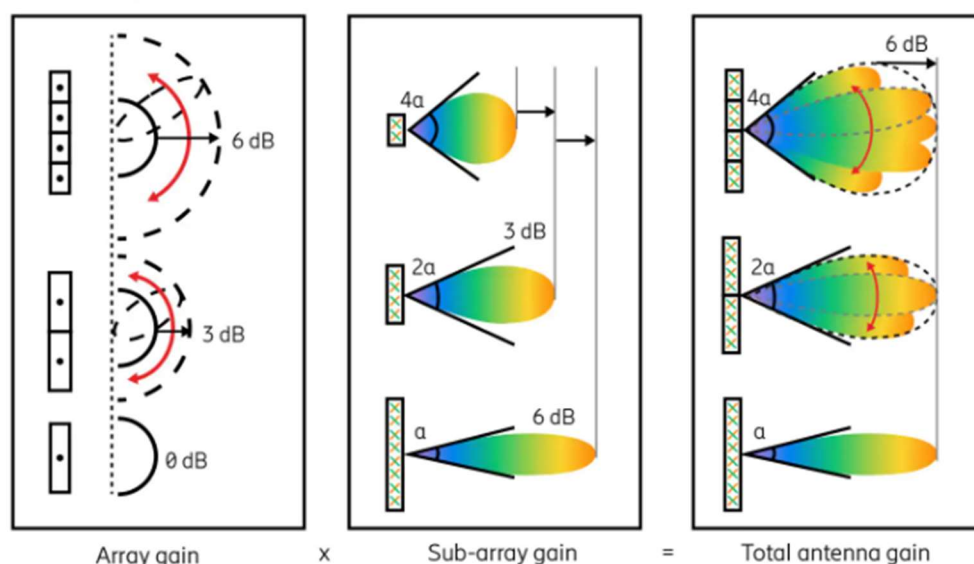


Figure 2: A typical antenna array (A) is made up of rows and columns of individual dual-polarized antenna elements (B). Antenna arrays can be divided into sub-arrays (C), with each sub-array (C) connected to two radio chains, normally one per polarization.

Εικόνα 2: Διατάξεις κεραίας, χωρισμένης και σε υποδιατάξεις με διπλή πόλωση [3]

Καθίσταται δυνατή η ανάλυση και σε περισσότερες διαστάσεις, ωστόσο δε παρέχονται ως αρχικό παράδειγμα για την κατανόηση μονοδιάστατου κεραιοσυστήματος. Το μέγεθος της συστοιχίας, τον αριθμό των υποσυστοιχιών, το συγκεκριμένο σχεδιασμό που έχουν να ακτινοβολούν, την κατεύθυνση του καθενός που αποτυπώνει το κέρδος της κεραίας.

Το συνολικό κέρδος της κεραίας, είναι το αποτέλεσμα του κέρδους της συστοιχίας και της υποσυστοιχίας. Το συνολικό άθροισμα των εμπλεκόμενων στοιχείων καθορίζουν επίσης το συνολικό κέρδος, επίσης με το εύρος και τη γωνία που η δέσμη αναπτύσσεται στο χώρο, το οποίο αποτελεί αναλόγως του κέρδους της κάθε περίπτωσης και σεναρίου, καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή της κατάλληλης κεραίας.



Εικόνα 3: Διάταξη και υποδιατάξεις, κατά την υποστήριξη κέρδους της κεραίας και διεύθυνσης δέσμης [3]

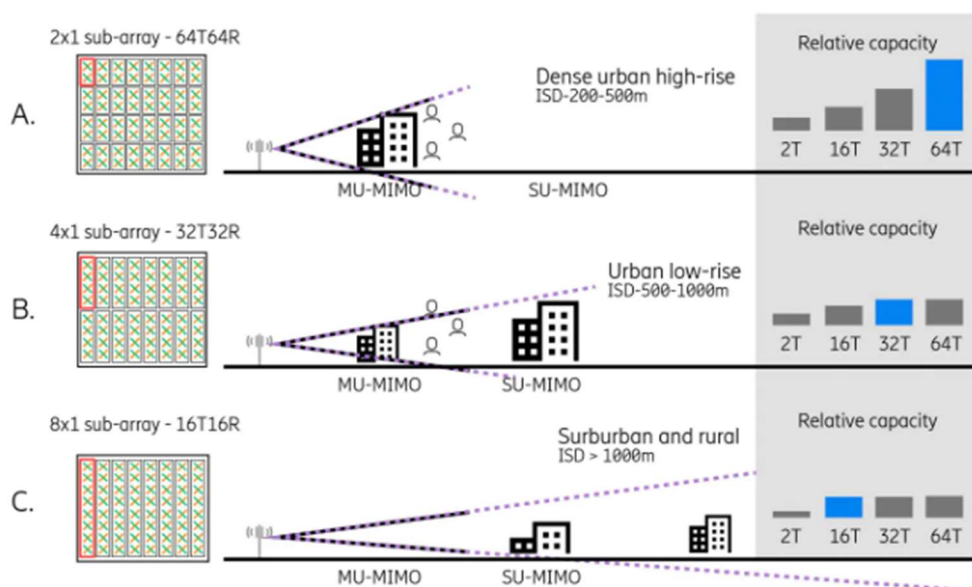


Figure 4: Suitable AAS configurations, schematic MU-MIMO and SU-MIMO usage ranges, and typical capacity gains in different deployment scenarios

Εικόνα 4: Κατάλληλο Προηγμένο Σύστημα Κεραίας κατά συγκεκριμένη παραμετροποίηση [3]

Ανάλογα τα διάφορα σενάρια που μπορεί να προκύψουν, χρησιμοποιείτε άλλη μεθοδολογία για την επιλογή κεραίας και της συστοιχίας της. Κάποια από τα σενάρια είναι:

1. Πυκνό αστικό πολυώροφο περιβάλλον, όπως στην εικόνα 4 - A
2. Αστική χαμηλή ανύψωση κτιρίων, όπως στην εικόνα 4 - B
3. Αγροτικό/Προαστικό περιβάλλον, όπως στο εικόνα 4 - C

Διαφαίνεται πιο καθαρά από ποτέ, στο πρώτο τέταρτο του 21^{ου} αιώνα, ότι για μεγάλης έκτασης περιβάλλοντα, υπάρχουν προηγμένες κεραίες που αποτελούν τον κορμό και την πρωτοποριακή κάλυψη δικτύων όπως το 4G και το 5G, συμπεριλαμβάνοντας δέσμες H/M κυμάτων και τεχνικές MIMO, οι οποίες βελτιώνουν

σημαντικά τις υπηρεσίες που παρέχονται στον συνδρομητή και στις πολυάριθμες συσκευές του. Οι κεραιές αυτές, εμφανώς παρουσιάζουν πρώτη φορά στην ιστορία της τεχνολογίας τέτοιες αποδόσεις και ταχύτητες, τόσο στη μετάδοση, όσο και στη λήψη. Στα αστικά περιβάλλοντα οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση εξυπηρετούν τον σκοπό της κάλυψης του πυκνού αστικού ιστού. Σε μικρότερες πόλεις, δεν απαιτείται κατακόρυφη πόλωση η οποία μάλιστα απαιτεί περισσότερους πόρους και ενέργεια. Ένας μικρός αριθμός κεραιών με την τεχνολογία 5G, δύναται να παρουσιάσει υψηλών επιδόσεων αποτελέσματα, και με βεβαιότητα η ανάπτυξη του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων στο μέλλον θα βοηθήσει να ενσωματωθούν οι τόσοι χρήστες, και να καλυφθούν ανάγκες που παρουσιάζονται καθημερινά.

Εν κατακλείδι, οι ασύρματες και κινητές επικοινωνίες, σημειώνουν σημαντική πρόοδο, όντας πιο οικονομικές, με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και με πόρους, εύρος συχνοτήτων και ταχύτητα εξαιρετικά βελτιωμένη. Με βεβαιότητα διακρίνεται και η σπουδαιότητα και η κρισιμότητα, για πολλές λειτουργίες, της μείωσης της καθυστέρησης που υπάρχει εντός και εκτός δικτύων κατά τη μετάδοση δεδομένων σε συνδυασμό με τις εφαρμογές που στηρίζονται στην άμεση απόκριση του συστήματος χωρίς καθυστερήσεις.

Κεφάλαιο 2

Κεραίες Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης για 5G επικοινωνίας

2.1. Οι κεραίες τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης ως γενική τεχνολογία ενεργοποίησης 5G

Η 5G τεχνολογία, καθώς και οι επερχόμενες στο μέλλον - όπως το 6G που ήδη σχεδιάζεται - εναπόκεινται από τη θεωρία σε μεγάλες - μεγάλων διαστάσεων - συστοιχίες κεραιών, ογκώδεις κατά κύριο λόγο και σε συγκεκριμένα τυποποιημένα μεγέθη, το οποίο τις καθιστά ακριβές κατά τη δημιουργία και ανακύπτει δυσκολία στην εγκατάστασή τους για τη δημιουργία μικρών κυψελών για τον εμπλουτισμό του δικτύου. Μία λύση, η οποία είναι οικονομική και δίνει μία νέα προοπτική στην κατασκευή κεραιών είναι η χρήση εκτυπωτών τρισδιάστατης τεχνολογίας, προκειμένου με συγκεκριμένα αγωγίμα υλικά και το κατάλληλο λογισμικό να δώσουν λύση στο μέγεθος και στην οικονομική παραγωγή των συστημάτων.

Οι μέθοδοι τρισδιάστατης σχεδίασης **Προσθετικής Μεθόδου Παραγωγής - Additive Manufacturing (AM)** και **Κατευθυνόμενης Γραφής - Direct Write (DW)**, έχουν ευρεία ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία, σχεδιάζοντας από σπίτια μέχρι μηχανικά εργαλεία υψηλής λεπτομέρειας, προσδίδοντας ιδιαίτερη ευκολία και εμπειρία στη

σχεδίαση, και αναπτύσσοντας τις δυνατότητες δημιουργίας ενδιαφέροντος εξοπλισμού για τη λειτουργία τηλεπικοινωνιακών συστημάτων 5G τεχνολογίας.

Ενδεικτικά να σημειωθεί ότι η AM και η DW μέθοδοι χτίζουν στρώμα με στρώμα το υλοποιούμενο σχέδιο, ενώ άλλες μέθοδοι αποσυνθέτουν κάποιο υλικό, διαμορφώνοντας το τελικό αποτέλεσμα με υψηλή ανάλυση σε κάθε επιφάνεια, και με μεγάλη ευελιξία. Με τις πρώτες μεθόδους γίνεται πιο προσιτό για τις τεχνολογίες κατασκευής συστημάτων ραδιοσυχνότητας, με τα κυκλώματά τους και τα ηλεκτρονικά τους, αποφεύγονται δυσκολίες του παρελθόντος κατά την κατασκευή, και αυξάνεται η ικανότητα παραγωγής σύνθετων μηχανισμών. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να υπάρχουν πολλαπλές δοκιμές υλικών και σχεδίων, δημιουργώντας πρότυπα τα οποία θα βελτιστοποιούνται και θα υπάρξει αλματώδης εξέλιξη. Ενδεικτικά καταγράφεται ότι η μελέτη και ανάπτυξη τέτοιων μεθόδων είναι ακόμα σε αρχικό σημείο, ωστόσο οι δυνατότητες που προσδίδονται δείχνουν ότι το μελλοντικό κέντρο βάρους για την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων κινούνται προς αυτήν την κατεύθυνση.

Τα ενεργά συστατικά ενός συστήματος Ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency – RF), βρίσκονται ακόμα σε πρωταρχικό σημείο καθώς απαιτείται μελέτη συγκεκριμένων υλικών για την κατασκευή τους, με βάση την απόδοσή τους και την ανάλυση που διαθέτουν. Τα παθητικά στοιχεία ωστόσο, μπορούν ήδη να παράγονται σε μεγάλο βαθμό με διάφορες τεχνικές που θα αναλυθούν, χρησιμοποιώντας κράματα υλικών μεταλλικών και διηλεκτρικών. Η κυψέλη με τους παράγοντες για τη δημιουργία αποτελεσματικών, και αποδοτικών συστημάτων για την υποστήριξη 5G τεχνολογίας είναι η κάτωθι:



Σχήμα 3: Μεθοδολογία για απόκτηση στοιχείων RF υψηλής απόδοσης [4]

Στο σχήμα διακρίνεται η προσέγγιση για τη φιλοσοφία που σχεδιάζεται αρχικά και προσομοιώνεται η απόδοση οφέλους, όπως κρίσιμοι παράγοντες που θα επηρεάζουν το κατασκευασθέν κεραιοσύστημα, και ύστερα σχεδιάζεται ο τρόπος κατασκευής όπως τα υλικά και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος εκτύπωσης. Θα ήταν εύλογο να χρησιμοποιηθούν ίνες με νανοτμήματα για να είναι συμβατό με το υπόστρωμα και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις πλακέτες. Κρίσιμο σημείο είναι ο όγκος των αποθεμάτων επάνω στο συσσωμάτωμα που δημιουργείται από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ο όγκος αφορά την αγωγιμότητα του μετάλλου και ύστερα επηρεάζονται από τους διαλύτες, τη χημεία των προσδεμάτων και των επιφανειοδραστικών, παράγοντες που χρειάζονται πολλές δοκιμές και μελέτη για να δώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο ζήτημα, αντιμετωπίζεται με την αξιοποίηση διαφορετικών μεθόδων εκτύπωσης για να υπάρχουν οφέλη από όλες τις τεχνικές. Προκαταβολικά επισημαίνεται ότι βασικά ζητήματα κατά την επεξεργασία από

τους 3D εκτυπωτές είναι η τραχύτητα των επιφανειών και το ποσοστό συσσωμάτωσης και επικόλλησης των υλικών μεταξύ τους, με γνώμονα την καλύτερη απόδοση του παραγόμενου αποτελέσματος.

Αναγνωρίζονται σημαντικές προοπτικές σχετικά με τις διαθέσιμες ευκαιρίες για επιπτώσεις σε εξαρτήματα ραδιοσυχνοτήτων υψηλής ποιότητας σε σύγκριση με τα βιομηχανικά κλασικής κατασκευής εξαρτήματα. Προκειμένου να μετριάσουν οι απώλειες αναλύονται οι σχέσεις δομής – ιδιότητας και κατά τη μεταεπεξεργασία.

Μέχρι στιγμής δεν πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τεχνικών παραγωγής τηλεπικοινωνιακών συστημάτων μεταξύ αποτελεσμάτων 3D printing και των παραδοσιακών τεχνικών. Με βεβαιότητα υπάρχουν καινοτόμες υλοποιήσεις εξαρτημάτων με ιδιαίτερη λεπτομέρεια, η οποία δε μπορεί να επιτευχθεί με τις κλασικές τεχνικές, αλλά πολλές παράμετροι πρέπει να διευθετηθούν έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος. Απαραίτητο είναι να βρεθούν κατάλληλα υλικά προς χρήση για εκτύπωση από τους τρισδιάστατους εκτυπωτές για τη δημιουργία παθητικών συσκευών ραδιοσυχνοτήτων RF. Τα υλικά αυτά θα είναι ικανά να διαμορφώσουν:

1. Τη διηλεκτρική σταθερά ή ηλεκτρική επιτρεπτότητα (ϵ)
2. Την αγωγιμότητα μετάλλου (σ)
3. Την εφαπτόμενη απωλειών ($\tan\delta$)

Όλα συναρτήσει της συχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί. Η ικανότητα να επιτρέπει τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (μ) του συστήματος, με τι τρόπο θα λειτουργεί, με τη σμίκρυνση των κεραιών και κυκλωμάτων, η οποία αποτελεί

καθοδηγητική φιλοσοφία πλέον είναι πολύ σημαντική. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να είναι εκτυπώσιμα μελάνια και συστήματα ρητίνης, τα οποία μπορούν να βρίσκονται στα άκρα του φάσματος για ϵ και μ , ενώ επιδίωξη είναι να γίνει το σ όσο πιο μεγάλο και το $\tan\delta$ όσο το δυνατόν χαμηλότερο. Τα διηλεκτρικά πολυμερή που έχουν $\tan\delta$ μικρότερο του 0,06 και πολύ χαμηλό ($<2,5$), είτε πολύ υψηλό (>10) ϵ , είναι υπερβολικά δύσκολα να εκτυπωθούν καθώς είναι πολυμερή κοντής αλυσίδας ή γεμισμένα με κεραμικά, αντίστοιχα.

Σημειωτέον δε, κατά την ανάλυση των τμημάτων που μπορούν να εκτυπωθούν είναι, τα διάφορα κυκλώματα τα οποία μπορεί να έχουν άλλες αποστολές και σκοπούς όπως:

1. Επικοινωνιακές δυνατότητες
2. Δυνατότητες αισθητήρων
3. Ενεργειακές δυνατότητες (συλλογής ενέργειας από τον ήλιο, θερμικής ενέργειας, εκμετάλλευση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας περιβάλλοντος, κλπ)

Δεδομένου ότι, καθημερινά όλα τα λοιπά συστήματα, και συνολικά η κοινωνία απαιτεί την ενσωμάτωση των πάντων στο δίκτυο τεχνολογίας 5G, θα απαιτηθούν διαφόρων ειδών τύποι κεραιάς προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας των συσκευών και συνδρομητών από διαφορετικές θέσεις και μορφές.

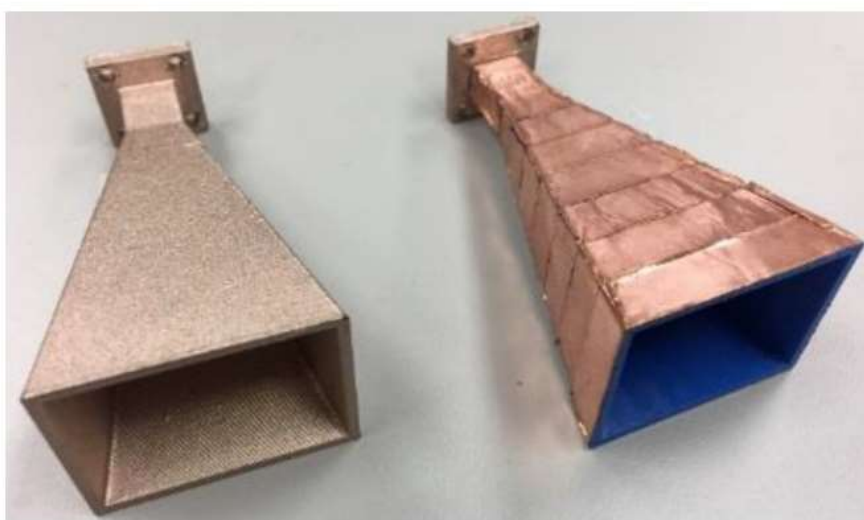
Η κύρια εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, γνωστή ως “Additive Manufacturing”, δημιουργεί πρωτότυπα, εξαρτήματα συστημάτων ή συσκευών. Μέσω του “Additive Manufacturing (AM)”, είναι δυνατή η δημιουργία τμημάτων σώματος, οχημάτων, κτιρίων και όλων των υποσυνόλων τους. Μπορούν για το

σκοπό αυτό να χρησιμοποιηθούν υλικά καινοτόμα, με συγκεκριμένες ιδιότητες ανάλογα την τεχνική με την οποία δημιουργούνται στους διάφορους εκτυπωτές. Συντελεστές – βασικοί πυλώνες για τον σκοπό αυτόν είναι η ταχύτητα, η προσαρμοστικότητα και η βιωσιμότητα.

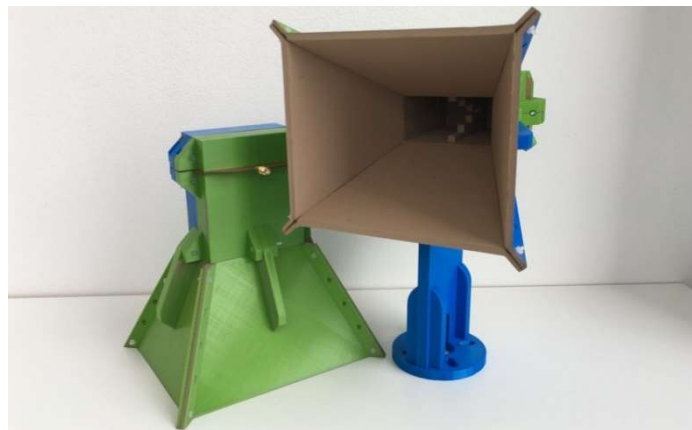
Η AM τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει σημαντική επίδραση και στη μηχανική μικροκυμάτων. Σπουδαία εφαρμογή είναι η παραγωγή κυματοδηγών, από την παλαιά τεχνική της επεξεργασίας μετάλλου ή ηλεκτροσχηματισμό, στην εκτύπωση τους από 3D printers, με υλικά υψηλής απόδοσης ραδιοσυχνοτήτων και με χαμηλό βάρος, προσδίδοντας μία σειρά πλεονεκτημάτων.

Εισάγονται κεραίες τρισδιάστατης τεχνολογίας, ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια με πολλαπλά πλεονεκτήματα. Κεραίες διαφορετικών τύπων όπως:

1. Κεραίες ανοίγματος - Horn (Horn Antennas)

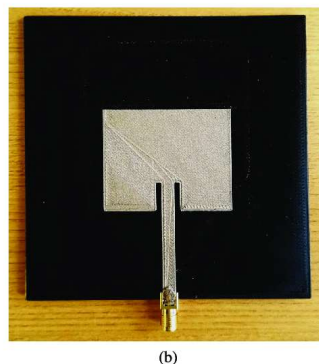
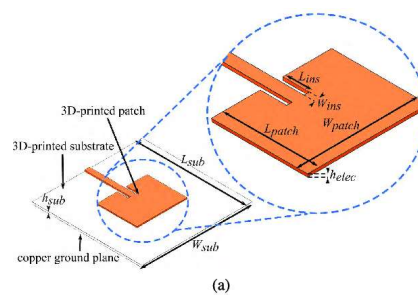


Εικόνα 5: Κεραίες Horn I



Εικόνα 6: Κεραίες Horn II

2. Κεραίες patch (Patch antennas) – Τυπωμένες κεραίες ή κεραίες μικροταινίας



Εικόνα 7: Κεραίες patch



3. Κεραίες γραμμής μαιάνδρου (Meander line antennas)



Εικόνα 8: Κεραία γραμμής Μαιάνδρου

4. Κεραίες φακού [Gradient Index (GRIN) lens antennas]

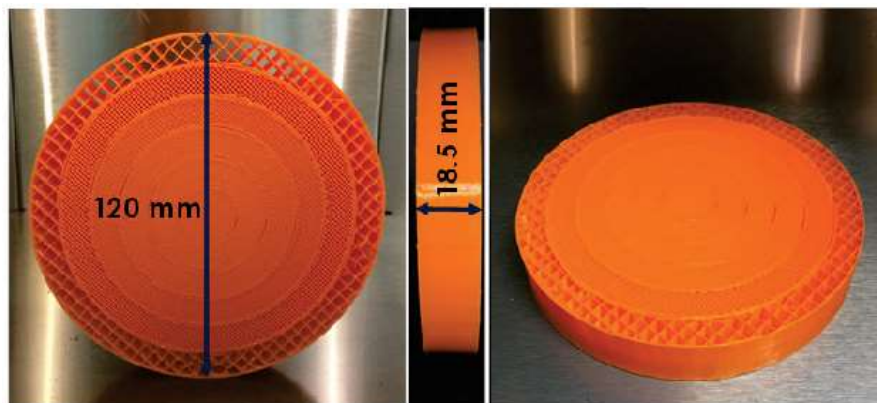
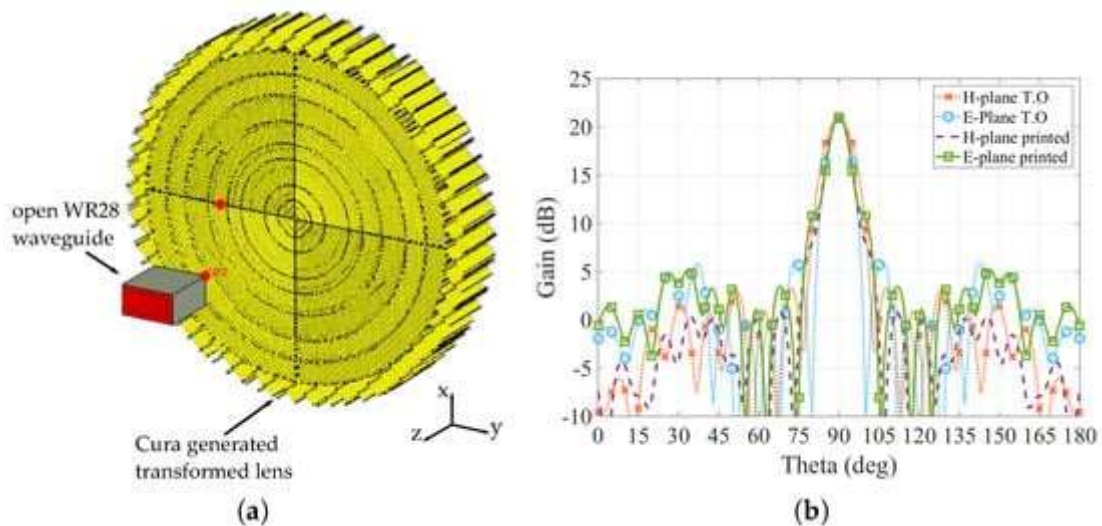


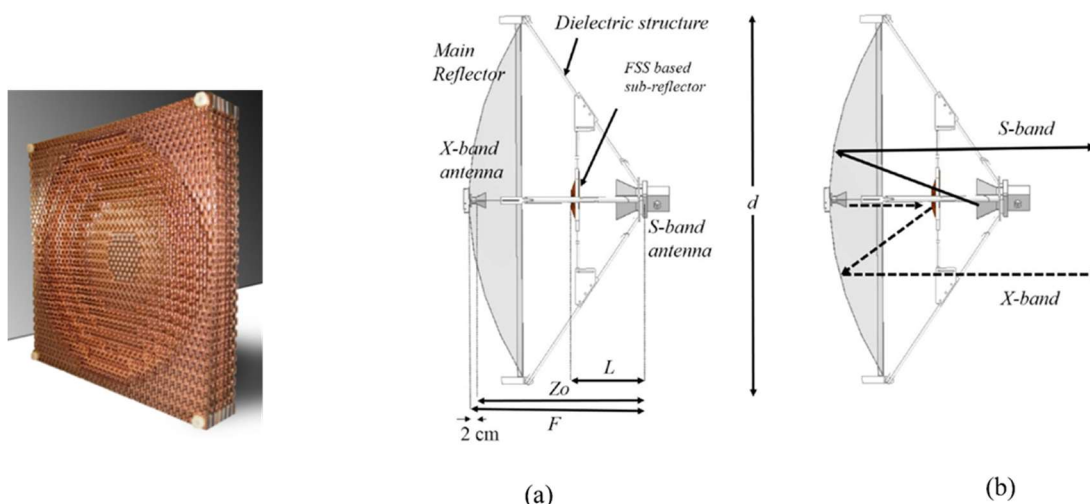
Fig. 1. 3D-printed planar lens

Εικόνα 9: Κεραία Φακού Δείκτη Κλίσης I



Εικόνα 10: Κεραία Φακού Δείκτη Κλίσης II και κεντρικός λοβός

5. Κεραίες ανακλαστικής συστοιχίας (Reflect – Array Antennas)



Εικόνα 11: Κεραία και σχεδιάγραμμα κεραίας ανακλαστικής συστοιχίας

Αρχική αναφορά για κάποιες μεθόδους παραγωγής κεραιών για 5G δίκτυα είναι:

1. Εκτυπωμένη κεραία με τη μέθοδο της πυροσυσσωμάτωσης και τήξης – Additive Manufacturing (AM), η οποία θα αναλυθεί και παρακάτω – αποτελεί μία τεχνική με τη χρήση δέσμης laser ή ηλεκτρονίων το οποίο λιώνει το επεξεργάσιμο υλικό σε τρισδιάστατες δομές. Για παράδειγμα δύο κεραίες χοάνης που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων Ku (12 – 18 GHz) μπορούν δημιουργηθούν με τη χρήση τεχνικής τήξης δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM). Υπάρχουν παρατηρήσεις για την τραχύτητα της επιφάνειας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της κεραίας και κυρίως το κέρδος (Gain). Όσο μεγαλύτερη συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη η επιρροή της παραμέτρου για το τελικό αποτέλεσμα.

Ήδη στον ερευνητικό τομέα εταιρειών, και σε εκθέσεις όπως του International Microwave Symposium (IMS) 2021, παρουσιάστηκαν από επιχειρήσεις όπως η 3D Fortify Inc. Και η Rogers Corp., σε κοινό τους πρόγραμμα, ότι ανέπτυξαν υλικά χαμηλών απωλειών με πολλαπλές φυσικές διαβαθμίσεις και ρυθμιζόμενη διαπερατότητα για την κάλυψη αναγκών 5G και πιλοτικά για μελλοντικές χρήσεις σε 6G τεχνολογίες δικτύων, προηγμένα ενεργά συστήματα κεραιών, για τεχνολογίες επικοινωνίας και ανίχνευσης - γεωδεσίας. Εφαρμογές του 3D printing ειδικά περιλαμβάνουν:

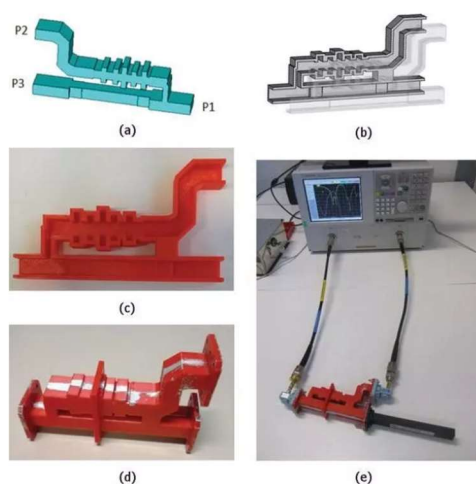
1. Στοιχειοκεραίες διαμόρφωσης δέσμης χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (Modulated Beam Transmit Array Antenna mm-Wave Frequencies)
2. Στοιχειοκεραίες μεταγωγής δέσμης χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (Switched Beam Transmit Array Antenna mm-Wave Frequencies)
3. Παραγωγή κεραιών Luneburg, με λειτουργία σε υψηλότερες συχνότητες GHz

Μέσω των αλγορίθμων και του λογισμικού για 3D printing, μπορούν να γίνονται άμεσες αλλαγές για βελτίωση των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη απόδοση ή αλλαγής των φυσικών διαστάσεων και πλευρών για να επιτευχθεί ο ανωτέρω στόχος.

Σε συνέχεια, περί της έκθεσης IMS, μία άλλη επιχείρηση, η Eravant, σημειώνει πρόοδο και βελτιώσεις στο σύστημα κυματοδηγού και σε κυματοδηγούς συνδεδεμένους σε ομοαξονικό καλώδιο με συνδέσεις άκρων (connectors Uni – Guide), μικρές και οικονομικές, προσδίδοντας ευελιξία στους χρήστες για το πώς θέλουν να τις διαχειριστούν.

Για τη δημιουργία εξαρτημάτων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές βάσει των ραδιοσυχνοτήτων υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι παραγωγής. Αυτές είναι:

1. Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (τήξης) – Fused Deposition Modeling (FDM) – Η εκτύπωση Μοντελοποίησης Συντηγμένης Εναπόθεσης αποτελεί τεχνική χαμηλού κόστους και χαμηλής ανάλυσης, και εναποθέτει εξαγόμενο από σωλήνα υλικό, κυρίως θερμοπλαστικού. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να παραχθούν παθητικά στοιχεία μικροκυμάτων – ραδιοσυχνοτήτων RF, που ονομάζονται διπλέκτες. Ο διπλέκτης – diplexer είναι μία συσκευή η οποία διαθέτει δύο δομές φιλτραρίσματος που συνδέονται σε έναν συνδυασμό τριών θυρών. Η εφαρμογή του διπλέκτη είναι σε επικοινωνιακά συστήματα, που χρησιμοποιούν μία κεραία τόσο για τη λήψη, όσο και για τη μετάδοση. Παρακάτω διακρίνεται σε σχέδιο ένας διπλέκτης, σχεδιασθέν με τρεις θύρες για να συνδέσουν τα φίλτρα, με διπλή κάμψη για τη σύνδεση φλαντζών του κυματοδηγού. Επίσης εκτυπώθηκε ένα κομμάτι στερέωσης για να κρατήσει δύο εξαρτήματα, και να αποφύγει τη διαρροή αέρα κατά τη λειτουργία του συστήματος. Ενδεικτικά μερικές φωτογραφίες παραγόμενου διπλέκτη – Diplexer:



(α) Διάταξη Diplexer, (β) μισό μοντέλο CAD, (γ) ένα εκτυπωμένο μισό, (δ) η συσκευή επιμεταλλωμένη και συναρμολογημένη και (ε) ρύθμιση μέτρησης

Εικόνα 12: Κατασκευή Διπλέκτη και συναρμολόγηση – επιμετάλλωση [5]

2. Εκτύπωση Εξώθησης Πολυμερών (Polyjet) – Η συγκεκριμένη τεχνική εκτυπώνει πολύ λεπτά μεγέθη στρώματος, παράγει λεία και ακριβή προϊόντα, χρησιμοποιώντας πλειάδα υλικών διαφορετικής ελαστικότητας, με υλικά που δύναται ακόμα να χρησιμοποιηθούν για γρήγορη εκτύπωση εργαλείων ή καλουπιών, εκτυπώνοντας έως και 100 εξαρτήματα ανάλογα το μέγεθος, το σχήμα και το υλικό – ουσία που χρησιμοποιείται για τη χύτευση. Εφαρμογή έχει αυτή η τεχνική σε πρωτότυπα σχέδια και κατασκευές βοηθητικές για προσαρμογή άλλων εξαρτημάτων, απαραίτητων για τη λειτουργία, σε καλούπια και ιατρικά μοντέλα – εργαλεία, όπως και σε εξαρτήματα και εφαρμογές αυτοκινήτων. Θεωρείτε μία από τις προηγμένες τεχνολογίες 3D printing, και όσον αφορά τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα δημιουργούν με την υψηλότερη ανάλυση και εξαιρετική στίλβωση επιφάνειας, με γρήγορο και οικονομικό τρόπο. Έχει αποδειχθεί υψηλή απόδοση σε φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων για να αποκόψουν ορισμένες συχνότητες με συνδυασμό κατασκευής προσθέτων και διαδικασία λεπτής

μεμβράνης, έχει παρατηρηθεί πολύ υψηλή απόδοση συμπεριλαμβανομένης της απώλειας επιστροφής του συντελεστή ποιότητας χωρίς φορτίο.

3. Στερεολιθογραφική Συσκευή (Stereolithography - SLA) – Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται από εκτυπωτές στερεολιθογραφίας, η οποία παράγει υγρή θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη φωτοπολυμερούς σε μία μικρή δεξαμενή (tank). Οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν μία διάτρητη πλατφόρμα κατασκευής, ένα λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), μία λεπίδα σάρωθρου, καθρέφτες και ένα κύκλωμα ελέγχου – ελεγκτή, που βασίζεται σε μικροεπεξεργαστή εκτός από τη μικροσκοπική δεξαμενή. Με την υπεριώδη ακτινοβολία έχουμε τη ρητίνη σκληρυμένη, η οποία ακτινοβολία εκτίθεται με ένα συγκεκριμένο σχέδιο για κάθε στρώμα – layer εκτύπωσης, το οποίο καθορίζεται με μία δέσμη laser πάνω ή έναν προβολέα κάτω από το επίπεδο κατασκευής. Ορισμένοι κατασκευαστές εξαρτημάτων χρησιμοποιούν για συστήματα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency), ειδικά μικρά κομμάτια, καθώς και αντικείμενα με λεπτές λεπτομέρειες ή χαρακτηριστικά.

2.2. Λογισμικά εργαλεία για τη σχεδίαση και εφαρμογή για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη τεχνική εκτύπωσης είναι μία διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων από ένα ψηφιακό αρχείο. Καλείται επίσης παραγωγή προσθέτων (Additive Manufacturing – AM). Η αγγλική λέξη 3D printing χρησιμοποιείται ευρέως για να παραχωρήσει την ερμηνεία της πρόσθεσης επεξεργασμένου υλικού για τη δημιουργία ενός αντικειμένου. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο, το 3D printing δύναται να δημιουργήσει αντικείμενα και κομμάτια αντικειμένων, τα οποία είναι πολύ δύσκολο ή αδύνατο να δημιουργηθούν με τους παραδοσιακούς τρόπους και μεθόδους.

Για τον ορισμό του λογισμικού του 3D printing, θέτουμε ότι πρόκειται για ένα λογισμικό που υποστηρίζει τη σχεδίαση τρισδιάστατων μοντέλων και ύστερα τα μετατρέπει σε αρχεία 3D printing. Το συγκεκριμένο λογισμικό επίσης επιτρέπει την επεξεργασία, το χειρισμό και την οπτικοποίηση του μοντέλου πριν να αποσταλεί στον εκτυπωτή.

Το λογισμικό του 3D printing χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ψηφιακών σχεδίων σε φυσικά αντικείμενα μέσω ενός εκτυπωτή ή άλλου λειτουργικού – βιομηχανικού εξοπλισμού – μηχανήματος. Μέσω των συγκεκριμένων λογισμικών μπορεί να δημιουργηθεί πλήθος αντικειμένων υψηλής δυσκολίας όπως βιομηχανικά εργαλεία ή οποιοσδήποτε άλλος εξοπλισμός. Το 2022 υπάρχουν πολλά λογισμικά που να εξυπηρετούν τη συγκεκριμένη επιδίωξη με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς.

Κυρίως υπάρχουν δύο τύποι 3D printing, αυτή της Μοντελοποίησης Συντηγμένης Εναπόθεσης (τήξης) (Fused Deposition Modeling - FDM), το οποίο όπως αναφέρθηκε και θα αναλυθεί παρακάτω πρόκειται για μία τεχνολογία που λιώνει και εξάγει κομμάτια πλαστικού χρησιμοποιώντας ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρολίου, και χτίζοντας το αντικείμενο στρώμα επί στρώματος (layer by layer). Ο δεύτερος τύπος όπως αναφέρθηκε επίσης ανωτέρω και θα αναλυθεί και στη συνέχεια είναι το SLA.

Υπάρχουν ποικίλα λογισμικά στα οποία μπορεί να γίνει η εργασία της σχεδίασης και ψηφιακής υλοποίησης στις μέρες μας, και θα αναλύσουμε αρκετά από αυτά τα εργαλεία παρακάτω:

1. Autodesk Fusion 360

Το Autodesk Fusion 360 αποτελεί ένα λογισμικό που δραστηριοποιείται κυρίως σε cloud servers, για λειτουργίες Σχεδίασης με τη Βοήθεια Υπολογιστή - Computer – Aided Design (CAD), Κατασκευής με τη Βοήθεια Υπολογιστή - Computer – Aided Manufacturing (CAM) και Μηχανικής με τη Βοήθεια Υπολογιστή - Computer – Aided Engineering (CAE) για την ανάπτυξη προϊόντων συνδυάζοντας βιομηχανική και μηχανική σχεδίαση, προσομοίωση, συνεργασία μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών, όλα σε ένα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα διαθέτει πολλά εργαλεία, δίνοντας ταχείες λύσεις γρήγορα και εύκολα για το σχεδιασμό με ένα ενσωματωμένο κυτίο εργαλείων. Είναι ουσιαστικά το πρώτο που συνδυάζει CAD, CAM και CAE σε μία ενιαία πλατφόρμα, βάσει των cloud servers, και διαλειτουργικότητα σε διαφορετικά λογισμικά υπολογιστών.

Διαθέτει στους χρήστες τη δυνατότητα τρισδιάστατης σχεδίασης με διάφορα εργαλεία για να δημιουργήσει τρισδιάστατα στερεά χρησιμοποιώντας το T – Splines (Μαθηματικό μοντέλο για τον ορισμό ελεύθερων μορφών επιφανειών) ή το NURBS (Non – Uniform Rational B – Splines). Η εφαρμογή επιτρέπει στον χρήστη να παράγει παραμετρικά μοντέλα, που είναι εύκολο να παραμετροποιηθούν στη συνέχεια για να βασίσουν την εργασία τους. Για τη συναρμολόγηση των διαφόρων μοντέλων, το λογισμικό επιτρέπει να εργάζεται ο χρήστης ταυτόχρονα σε αυτά σε ένα μοναδικό project, με την υποστήριξη ενός οδηγού – καθοδηγητή συναρμολόγησης για να μην υπάρχει σύγχυση κατά την συνένωση πολλαπλών μοντέλων. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων συσσωμάτων και να εξεταστεί η συμπεριφορά τους σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το λογισμικό επιτρέπει την σχεδιαστική ανάλυση για να πραγματοποιούνται δοκιμές προκειμένου να υπάρχουν βελτιστοποιήσεις πριν την εκτύπωση.

Οι χρήστες μπορούν να ελέγξουν για θερμική διαστολή και συστολή, αντοχή πτώση τάσης, κραδασμούς και πολλές άλλες παραμέτρους. Βασικές είναι και οι πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος όπως είναι η θερμοκρασία ή η υγρασία. Επίσης η χρήση εργαλείων CAM, προσφέρει τη δυνατότητα στους σχεδιαστές να εξάγουν τα μοντέλα τους σε μηχανικό κώδικα.

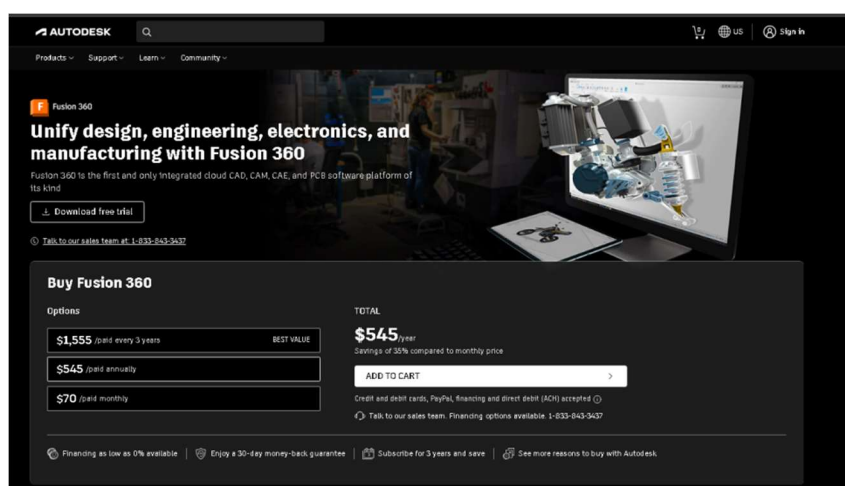
Στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου λογισμικού (framework) θεωρείται η δυνατότητα συνδυασμού σχεδίασης και δημιουργίας στην ίδια πλατφόρμα, εκτελώντας και 2D λειτουργίες. Είναι φιλικό προς νέους χρήστες βοηθώντας τους εισαχθέντες στην εκπαίδευση και στην εξέλιξη των εργασιών τους, δίνοντας τη δυνατότητα να συμμετάσχει κάποιος στη διαδικτυακή κοινότητα και να ανταλλάξει

ΒΙΤΖΗΛΑΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΜΑΡΙΟΣ
(ΑΜ: 2018018003)

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ**

**3D PRINTING TECHNOLOGIES FOR
TELECOMMUNICATION APPLICATIONS**

πληροφορίες με άλλους χρήστες της εφαρμογής. Υπάρχουν και διαδικτυακές βιβλιοθήκες για μία σειρά από σχέδια και τεχνικές.



Εικόνα 13: Ιστοσελίδα Λήψης Autodesk Fusion 360

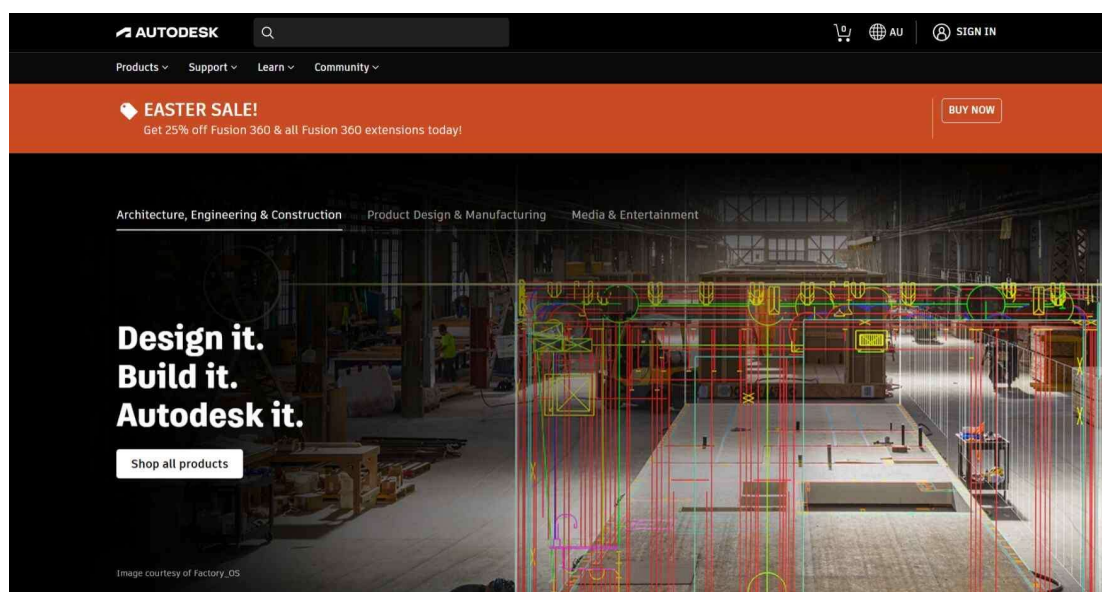
2. Autodesk AutoCAD

Απαρτίζει μία δωρεάν εφαρμογή επίδειξης, με ευκολία στη χρήση και σχεδίαση με εργαλεία που επιτρέπουν να δείξουν και να μετρήσουν τα αποτελέσματα του AutoCAD στο διαδίκτυο και σε κινητές συσκευές οποιαδήποτε στιγμή. Τα παραγόμενα αρχεία μπορούν να αποθηκευτούν σε cloud servers ή σε εξωτερικούς δίσκους για χρήση οπουδήποτε. Δύναται να χρησιμοποιηθεί επίσης σε λειτουργία 2D για μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ταχύτερη απόκριση σε σύνθετα σχήματα ή όταν εργάζεται σε πολυσύνθετα συστήματα. Η μεγέθυνση πραγματοποιείται με το Multi – Touch zoom (Πολλών – Επαφών Μεγένθυση), με γραφίδα και με το 3D orbit (Τρισδιάστατη Τροχιά).

Έχει σύγχρονο και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον διεπαφής για τη σχεδιαστική βελτίωση και υπάρχει η δυνατότητα δημοσιοποίησης σε πλατφόρμες της

εταιρείας για τη λήψη βοήθειας και υποστήριξης. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι σύγχρονα και καλύπτουν τις απαιτήσεις σχεδίασης και επεξεργασίας.

Στα θετικά της εφαρμογής καταλογίζονται οι αυξημένες δυνατότητες για παραγωγή σύνθετων 2D και 3D σχεδίων, χρησιμοποιώντας βασικές αρχές και εργαλεία της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και της κατασκευαστικής. Περιέχει πολλές λειτουργίες φιλικές προς το περιβάλλον και είναι συμβατό με 2D CAD αρχεία και πολλαπλά εργαλεία για τη σχεδίαση μοντέλων 3D. Συμβατό στην αλληλεπίδραση με προγράμματα όπως το Adobe Photoshop.



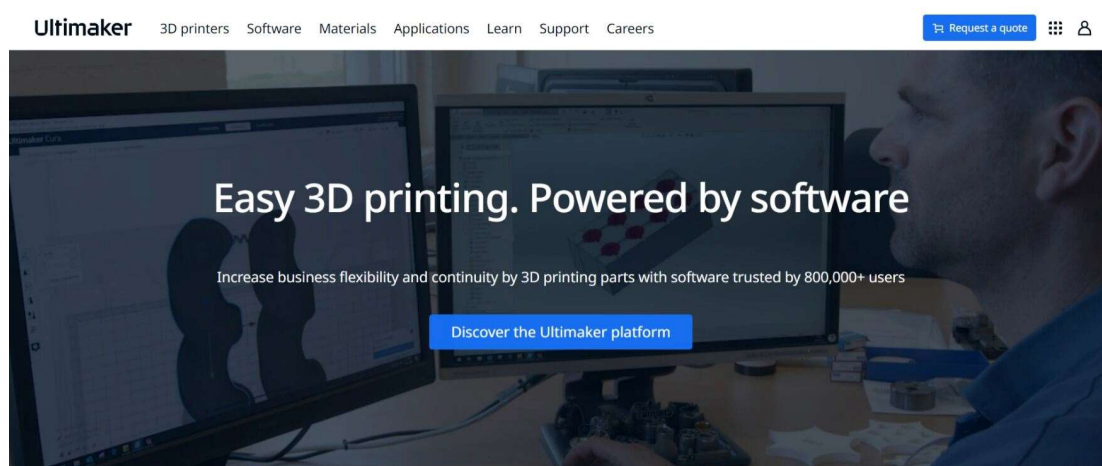
Εικόνα 14: Ιστοσελίδα Λήψης Autodesk AutoCAD

3. Ultimaker Cura

Το παρών λογισμικό είναι δωρεάν, και συνεργάζεται άριστα με τους αντίστοιχους εκτυπωτές 3D printing, το οποίο συνοδεύεται με μία σειρά από

δυνατότητες. Απαιτεί παραμετροποίηση ώστε να λειτουργεί ορθά και να εξάγει αποδοτικά αποτελέσματα σε κάθε φάση της εκτύπωσης. Αποτελεί από τις πιο προσιτές εφαρμογές, καθώς εισάγοντας ένα αρχείο STL, προβάλλει το περιεχόμενο, εφαρμόζεται το επιθυμητό μέγεθος και επεξεργάζεται τις αλλαγές που επιθυμεί ο χρήστης και μεταπέφτει στην εκτύπωση επίπεδο με επίπεδο αποδίδοντας τον εκτιμώμενο χρόνο περάτωσης του έργου. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει βοηθήσει τους μεμονωμένους χρήστες να ξεκινήσουν τη δραστηριοποίηση τους με το 3D printing, καθώς και μικρές επιστημονικές κοινότητες για πιλοτικά προγράμματα και σχεδιασμό σε οικονομικές τιμές απόκτησης. Επιτρέπει την εξαγωγή αρχείων και τη χρήση άλλου λογισμικού για ειδικές επεξεργασίες. Στη βιβλιοθήκη του λογισμικού δίνεται η δυνατότητα χρήσης έως 100 υλικών για να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση.

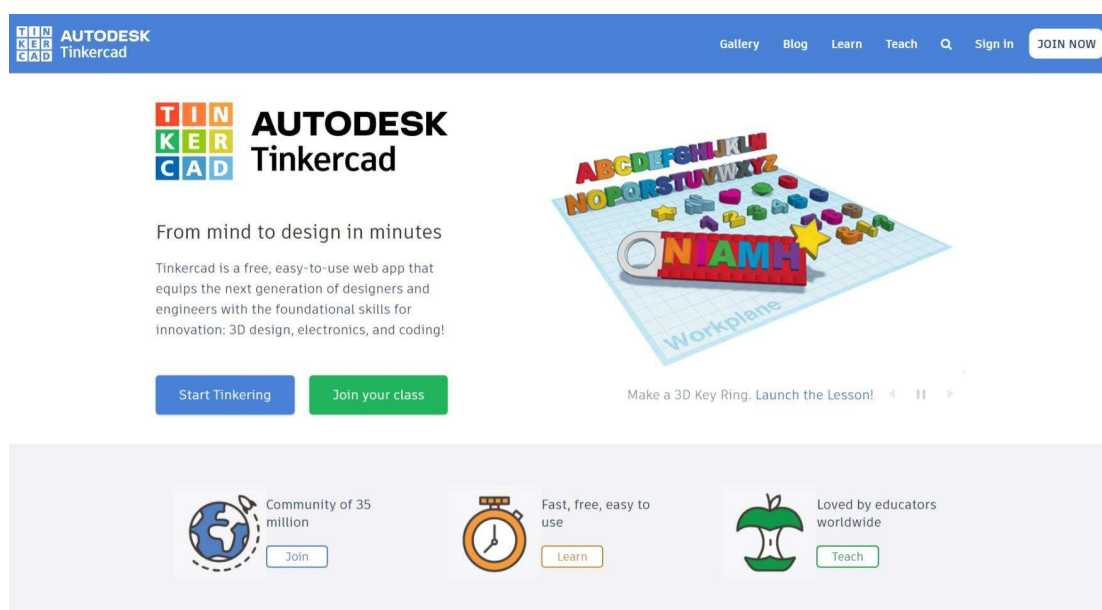
Στα θετικά του λογισμικού θεωρείται η καλή λειτουργία του με Πολυγαλακτικό οξύ (PLA), επιλογές στην ταχύτητα εκτύπωσης, στην ποιότητα της εκτύπωσης και στον χρόνο εκτύπωσης. Δύναται η διενέργεια δοκιμών προσομοίωσης με διαφορετικές παραμέτρους προκειμένου να ελέγχεται το αποτέλεσμα σε θεωρητικό πλαίσιο πριν την εκτύπωση.



Εικόνα 15: Ιστοσελίδα Λήψης Ultimaker Cura

4. TinkerCAD

Η συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιείται για σχεδίαση 3D αντικειμένων, ηλεκτρονικά και με κωδικοποίηση. Εργαλείο για αρχάριους, προκειμένου να εκπαιδευτούν στα αρχεία σχεδίασης, σε αντικείμενα προσωπικής ή οικιακής χρήσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω διαδικτύου και να μην εγκατασταθεί εφαρμογή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.



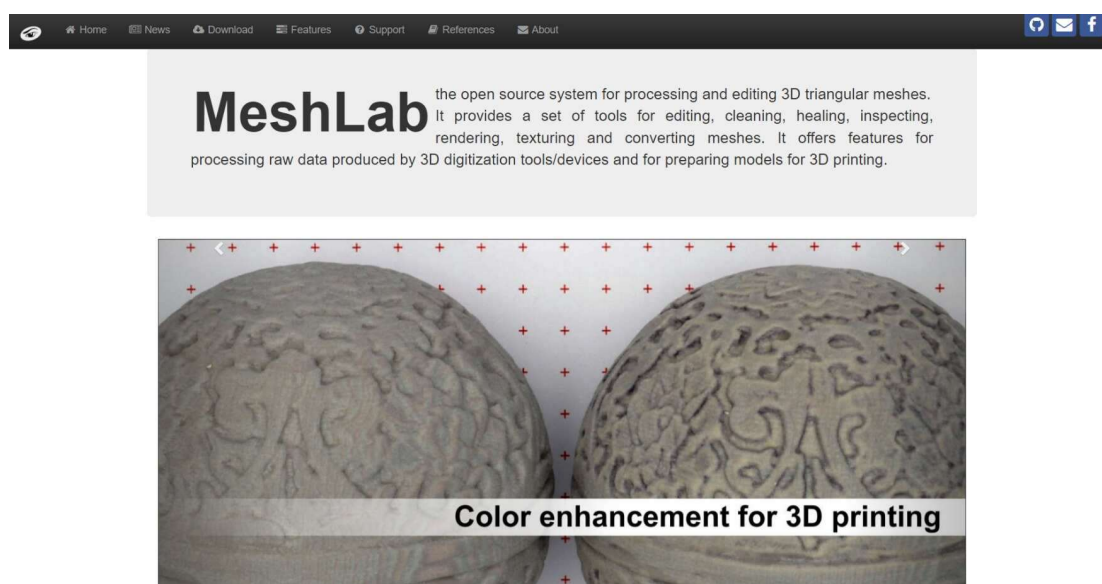
Εικόνα 16: Ιστοσελίδα Λήψης TinkerCAD

5. MeshLab

Το MeshLab είναι μία ανοιχτή εφαρμογή, για την επεξεργασία και σχεδίαση πλεγμάτων με μεγάλη λεπτομέρεια μεγάλων κατασκευών. Στο σύστημα σχεδίασης επιλέγεται το πλέγμα εργασίας και δύναται να επεξεργαστεί τα επίπεδα και τα

διαφορετικά πλέγματα επακριβώς. Υποστηρίζει αρκετά τα μεγάλα σχέδια, χωρίς να καταναλώνει μεγάλη υπολογιστική ισχύ, προσφέροντας αρκετά εργαλεία για την καλύτερη αξιοποίηση της εφαρμογής.

Διαθέτει τη λειτουργία αυτόματης επιδιόρθωσης στα τριγωνικά πλέγματα λειτουργίας, συνδυάζοντας διαφορετικά εργαλεία και φίλτρα.



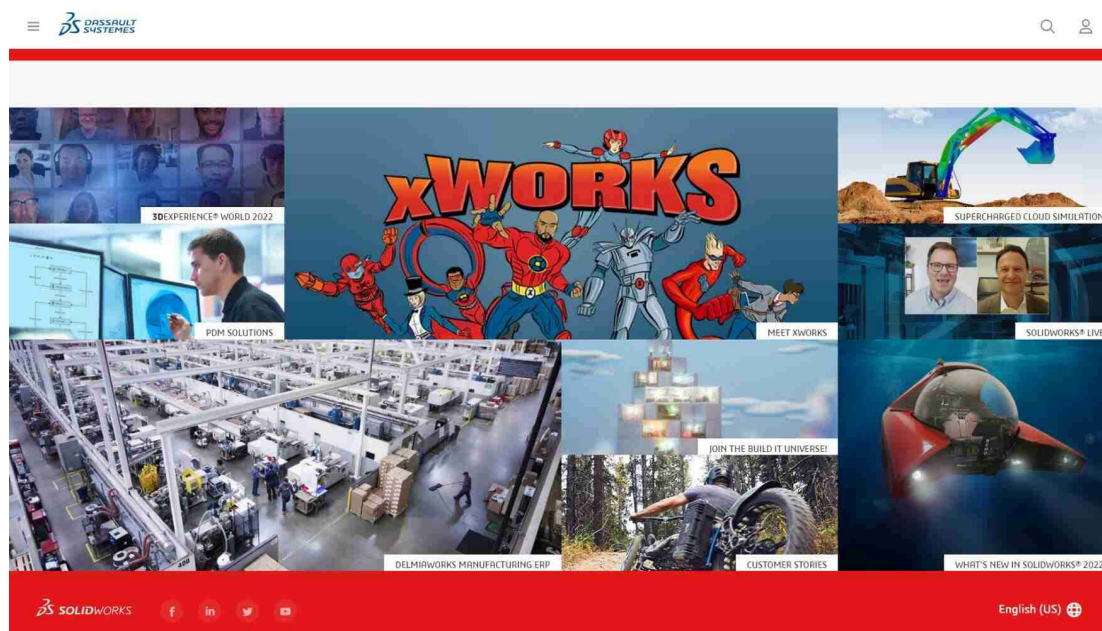
Εικόνα 17: Ιστοσελίδα Λήψης MeshLab

6. Solidworks

Το Solidworks αποτελεί ένα πρόγραμμα από τη Dassault Systemes, η οποία δημιουργεί μοντέλα Computer – Aided Design – CAD και Computer – Aided Engineering – CAE σε λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows, Linux και Mac. Το 2013

περισσότεροι από 2 εκατομμύρια μηχανικοί το χρησιμοποιούσαν σε εκατοντάδες χιλιάδες εταιρείες. Αποτελεί ένα σπουδαίο πρόγραμμα για τους σχεδιαστές και τους καλλιτέχνες, και τη συγκεκριμένη περίοδο οι χρήστες που χρησιμοποιούν CAD λογισμικά, απολαμβάνουν τις νέες καινοτομίες με αναβαθμίσεις σημαντικές και νέες εκδόσεις σε τακτική βάση με μεγάλη απόδοση, ευρεία χρήση και επαυξημένες δυνατότητες. Τέτοιου είδους λογισμικά παρέχουν λειτουργίες όπως:

- A. Λειτουργία Αρχαρίων
- B. Διαχείριση Παραμέτρων
- Γ. Αρχαιοθήκη – Βιβλιοθήκη σε Cloud Servers
- Δ. Αδειοδότηση Συνδρομητών
- Ε. Υποστήριξη Εφευρέτη



Εικόνα 18: Ιστοσελίδα Λήψης Solidworks

7. CATIA

Η εφαρμογή CATIA (Εφαρμογή Διάδρασης σε Τρισδιάστατη Σχεδίαση με τη Βοήθεια Υπολογιστή - Computer Aided Three – Dimensional Interactive Application) είναι μία πλατφόρμα CAD/CAM/CAE λογισμικού, η οποία αναπτύχθηκε επίσης από τη Dassault Systemes. Χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση, προσομοίωση, ανάλυση και κατασκευή προϊόντων σε διάφορες βιομηχανίες όπως της αεροδιαστημικής, της αυτοκίνησης, των καταναλωτικών αγαθών αλλά και για βιομηχανικές μηχανές. Διαθέτει κέντρο εξυπηρέτησης για τις υπάρχουσες εντολές λειτουργίας το οποίο αποτελείται από το 3D Sketcher, το 3D wireframe και τα Surface Design, Assembly Design, Drafting Generative Shape Design. Τη χρησιμοποιούν εταιρείες και βιομηχανίες όπως: AirBus Boeing, Coca Cola, Ford, Motor Company, Honda Motor Company, Mercedes – Benz, Nasa, Nissan Motor Company.

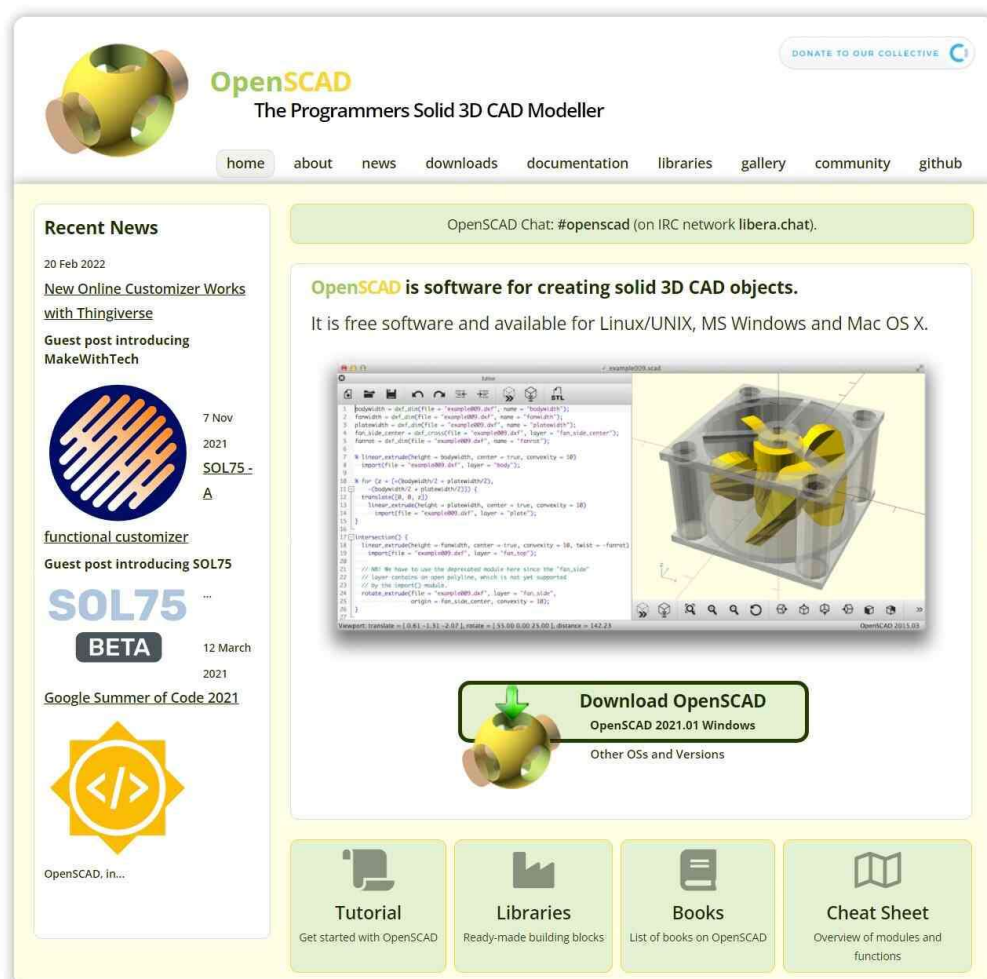


Εικόνα 19: Ιστοσελίδα Λήψης CATIA

8. OpenSCAD

Το OpenSCAD είναι ένα 2D/3D πρόγραμμα μοντελοποίησης βασισμένη σε λειτουργικό προγραμματισμό, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα προβολής του σχεδίου στην οθόνη, πριν από την εκτύπωση παρουσιάζοντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα, το οποίο μπορεί να εξαχθεί κιάλας σε διάφορες μορφές. Μέσω της γλώσσας προγραμματισμού δημιουργούνται δισδιάστατα και τρισδιάστατα σχήματα. Το κείμενο των εντολών αποτελεί λίστα καθορισμένων πράξεων. Προβάλλεται στην οθόνη το σχέδιο, σε πλέγμα που επιτρέπει την εξαγωγή σε ποικίλα αρχεία μορφής 2D/3D.

Παρέχει δύο κυρίως τεχνικές μοντελοποίησης, την κατασκευαστική στερεής γεωμετρία – constructive solid geometry (CSG) και η εξώθηση 2D πλεγμάτων – περιγραμμάτων – extrusion of 2D outlines. Το πρόγραμμα δέχεται DXF αρχεία και DGN – χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα αρχεία Teigha για δισδιάστατα σχήματα εντός αρχείων.



Εικόνα 20: Ιστοσελίδα Λήψης OpenSCAD

9. Rhinoceros 3D

Το λογισμικό Rhino χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει, να αναλύσει και να μεταφράσει NURBS καμπύλες, επιφάνειες και στερεά, χωρίς κανένα περιορισμένο στην πολυπλοκότητα, στο επίπεδο και στη μέγεθος εκτός από τις φυσικές δυνατότητες των υπολογιστών. Εκτός από 3D printing, δύναται να υποστηρίξει πολυγωνικά πλέγματα

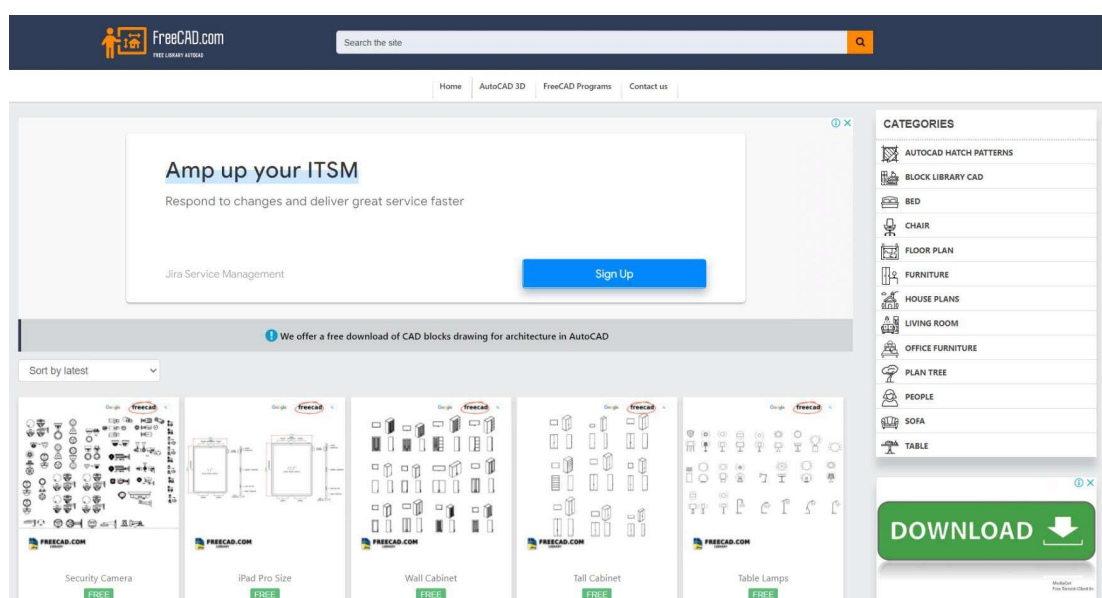
και να αποθηκευτεί σε Cloud Servers. Είναι προσιτό στη σχεδίαση και στη μηχανική σε κινούμενα γραφικά, σε γραφιστικά σχέδια, αλλά και σε τρισδιάστατες επιλογές προς εκτύπωση.

Πρόκειται για λογισμικό που αναπτύχθηκε από το Robert McNeel & Associates, το οποίο δημιουργεί σε CAD ακριβή μοντέλα NURBS κάθε είδους και σχήματος. Το εξαγόμενο αρχείο του λογισμικού είναι της μορφής ποικίλει, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί σε άλλες CAD εφαρμογές.

10. FreeCAD

Αποτελεί ένα λογισμικό 3D CAD, με ύψιστη ευκολία στη παραμετροποίηση ρυθμίσεων, εύκολο στη διαμόρφωση των σχεδίων, με δυνατότητα επιστροφής σε παρελθοντικά σχέδια για τις αλλαγές στο επεξεργάσιμο υλικό. Είναι λογισμικό open source, πλήρως επεξεργάσιμο, επεκτάσιμο σε άλλα προγράμματα και με κώδικα που είναι εύκολο να αναγνωστεί. Παράχθηκε με σκοπό τη μηχανική σχεδίαση και σχεδίαση προϊόντων. Δύναται να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα λειτουργικά συστήματα (Windows, Linux και Mac OSX), και στηρίχτηκε στο OpenCasCade, ένα δυναμικό πρόγραμμα γεωμετρικών σχημάτων, με προβολή – παρουσίαση 3D σχημάτων που παρέχεται από βιβλιοθήκες όπως η Coin 3D library και Python API.

Επιτρέπει τη σκιαγράφηση γεωμετρικών σχημάτων 2D, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για την κατασκευή 3D σχημάτων. Περιέχει πολλά εργαλεία για την προσαρμογή διαστάσεων, μεγεθών και επιπέδων, όπως επίσης εξάγει αποτελέσματα για τη βελτιστοποίηση 3D μοντέλων για υψηλής ποιότητας παραγωγή σχεδίων.



Εικόνα 21: Ιστοσελίδα Λήψης FreeCAD

Συμπερασματικά διαφαίνεται ότι έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από εφαρμογές σχεδίασης μοντέλων τρισδιάστατων σχημάτων, καθώς πλέον είναι αρκετά προσιτή η απόκτηση μέχρι και για προσωπική χρήση, αλλά και λόγω της υψηλής αξίας των παραγόμενων αγαθών που προσφέρουν με χαμηλό κόστος, πολλά πλεονεκτήματα και για αυτόν ακριβώς το λόγο, μεγάλες επιχειρήσεις άρχισαν τη συγκεκριμένη χρήση προϊόντων. Πλέον τα διάφορα λογισμικά αποτελούν φιλικά προς τους χρήστες, και παραμένει η ανάγκη ευρύτερης χρήσης σχεδιαστικών προγραμμάτων για την παραγωγή κεραιών, οι οποίες θα θεμελιώσουν περαιτέρω νέες τεχνολογίες όπως αυτή του 5G και 6G.

Ήδη πλεονεκτήματα όπως η φθηνή παραγωγή ανθεκτικών υλικών με υψηλά κέρδη για τις διάφορες κεραιές, έχουν δρομολογηθεί και υπάρχει ολοένα και

περισσότερη βιβλιογραφία, προκειμένου να βρεθούν καινοτόμες ιδέες για την υποστήριξη ενός μεγάλου δικτύου το οποίο θα έπρεπε να αναπτύσσεται με μεγαλύτερους ρυθμούς. Μηχανικοί και σχεδιαστές κεραιών, θα ήταν εύλογο να ξεκινήσουν την εκπαίδευση και τη θεμελίωση προτάσεων για υιοθέτηση τέτοιων τεχνικών δοκιμάζοντας μία σειρά από υλικά, τα οποία να εξυπηρετούν τον συγκεκριμένο σκοπό.

2.3 Προκλήσεις για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης με ιδιαίτερη μνεία στις κεραίες

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, αποτελεί τεχνολογία του μέλλοντος διότι είναι ικανή να παράγει σύνθετες κατασκευές ανεξαρτήτου μεγέθους σε τάχιστους χρόνους, έτσι παρατηρείται σημαντική προσπάθεια αύξησης της χρήσης της τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο υπάρχουν ακόμα ορισμένες προκλήσεις οι οποίες πρέπει να ξεπεραστούν για να χρησιμοποιηθεί το 3D printing σε μεγάλο εύρος στην παραγωγή τηλεπικοινωνιακών κεραιών. Κυριότερη πρόκληση είναι η ικανότητα των εκτυπωτών τρισδιάστατης τεχνολογίας να παράγουν στοιχεία κεραιών μεταλλικά και αγωγίμα προκειμένου να είναι αξιοποιήσιμα.

Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η επιμετάλλωση των εκτυπωμένων υλικών μετά την παραγωγή τους από τον εκτυπωτή προκειμένου να καθίστανται ικανά για διέλευση ηλεκτρονίων να έχουν ιδιότητες τηλεπικοινωνιακής κεραίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσδίδει έντονη πολυπλοκότητα στην κατασκευή της κεραίας, χρησιμοποιώντας ταινία χαλκού που επικολλάται πάνω από το μη αγωγίμο υλικό για να του προσδώσει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, είτε το βάψιμο με ειδικά spray αγωγίμου υλικού, ή τέλος να περάσει από ειδικές δεξαμενές μέσα στις οποίες θα έρθει ολόκληρο σε επαφή με ειδικά χημικά για την επίτευξη του στόχου. Η συγκεκριμένη πολυπλοκότητα να επιμεταλλωθεί η κατασκευή, καθώς και η εξάρτηση της ορθής διαδικασίας με την απόδοση της κεραίας είναι άμεση συνάρτηση από τις μεθόδους που ακολουθούνται και από το σχεδιασμό της κεραίας.

Υπάρχουν κεραιοσυστήματα τα οποία, βάφονται σε διαφορετικούς χρόνους και με διαφορετικές μεθόδους, είτε γιατί ο εκτυπωτής δε δύναται να εκτελέσει αυτή τη διαδικασία, είτε γιατί υπάρχουν πλεονεκτήματα σοβαρά από τη χρήση μεθόδων επιμετάλλωσης μετά την εκτύπωση του προϊόντος ενδιαφέροντος. Αυτή η ασυνέχεια κατά την κατασκευή, προκαλεί σημαντική επίδραση στην απόδοση της κεραίας, με τη μεγάλη πολυπλοκότητα να είναι κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να επιλυθεί στο άμεσο μέλλον. Ουσιαστικά υφίσταται ζήτημα συναρμολόγησης εκ νέου της κεραίας μετά την επιμετάλλωση, άρα και διαφορές κατά τη δομή και ευστάθειά της όσο ακέραιο σύστημα.

Βασικός παράγοντας επίσης για την απόδοση της κεραίας είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία σε ορισμένα υλικά εκτύπωσης είναι αρκετά μικρή, αν και αυτά είναι αγωγίμα και επηρεάζουν στο έπακρο την απόδοση της κεραίας. Κατά την κατασκευή μίας κεραίας από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, προτείνεται η χρήση ενός υλικού (filament), το οποίο να έχει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, ιδιαίτερα μετά την εκτύπωση διατηρώντας δύναμη και στιβαρότητα. Παρατίθεται ένας πίνακας με μερικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή 3D printed κεραιών όπως παρακάτω:

Material	Type	Properties
ABS	Dielectric	$\epsilon_r = 2.69$ $\tan \delta = 0.012$ @ 1 MHz
PLA	Dielectric	$\epsilon_r = 2.7$ $\tan \delta = 0.008$ @ 1 MHz
Vero White	Dielectric	$\epsilon_r = 2.97$ $\tan \delta = 0.0285$ @ 1.5 GHz
Black Magic 3D	Conductive filament	$\sigma \approx 167 \text{ S/m}$ [
Electrifi	Conductive filament	$\sigma \approx 1.67 \times 10^4 \text{ S/m}$ [
Stainless Steel 316L	Conductive	$\sigma \approx 1.35 \times 10^6 \text{ S/m}$ [
Aluminum AlSi10Mg	Conductive	$\sigma \approx 2.3 \times 10^7 \text{ S/m}$ [

Πίνακας 2: Υλικά – Τύποι – Ιδιότητες αυτών

Τα υλικά των παραπάνω κεραιών, και ισοδύναμα οι παραγόμενες κεραιές δημιουργούν δύο βασικές κατηγορίες, αυτή των α) διηλεκτρικών υλικών και αυτή των β) αγωγίμων υλικών. Ανεξάρτητα από τις ιδιότητες του κάθε υλικού παρουσιάζονται διαφορές λόγω και βασικών παραμέτρων, μη αλληλένδετο με τη γεωμετρική υπόστασή τους, αυτή της συχνότητας και της θερμοκρασίας παραγωγής και εκτύπωσης.

Μία δεύτερη πρόκληση, για τις κεραιές που εκτυπώνονται από τρισδιάστατους εκτυπωτές είναι η τραχύτητα των επιφανειών των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Οι τραχείς επιφάνειες τόσο εκτυπωμένων μετάλλων, όσο και διηλεκτρικών κατασκευών, είναι αυτή τη στιγμή πολύ μεγαλύτερες από τις επιθυμητές τιμές σε σύγκριση με τις χύδην κατασκευές. Εκτός από πρόκληση, μπορεί να σχολιαστεί ήδη ως μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είτε αυτή χρησιμοποιεί διηλεκτρικά υλικά που μεταλλοποιούνται στη συνέχεια, είτε αυτών που εκτυπώνονται απευθείας με ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά. Αυτό προκύπτει από τα χρησιμοποιούμενα υλικά, και είναι βασικό να λαμβάνεται υπόψη αν πρέπει να ακολουθείται η παραγωγή συστημάτων

ραδιοσυχνοτήτων RF, με τη χρήση μίας εκ των τεχνικών του 3D printing. Με γνώμονα την τραχύτητα της επιφάνειας της παραγόμενης κεραίας, η καλύτερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η Στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA), για διηλεκτρικά και για αγωγίμα υλικά. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας άρα και η απόδοση της κεραίας, κυρίως χρησιμοποιείται το γυάλισμα – στίλβωση της κατασκευής, ακόμα και με χειροκίνητες τεχνικές, ή με μηχανικές – χημικές διαδικασίες οι οποίες είναι πιο ακριβές όπως είναι λογικό, λόγω της ομοιομορφίας που προσδίδουν.

Μελλοντικά οφείλουν να αναπτυχθούν από την επιστημονική κοινότητα, μοντέλα τραχύτητας και λείανσης επιπέδων των παραγόμενων προϊόντων καθώς θα επιζητάτε η βελτιστοποίηση της απόδοσης της κεραίας, προκειμένου να αποφεύγεται το ανομοιομορφο προφίλ των διηλεκτρικών και μεταλλικών εκτυπώσεων στρώματος. Κάποιες τεχνικές τρισδιάστατης τεχνολογίας εκτύπωσης, οι οποίες θα αναλυθούν και στη συνέχεια, προσδίδουν διαφορετικά οφέλη για την αντιμετώπιση τέτοιας πρόκλησης. Παραδείγματος χάριν, η λιθογραφία και τα στοιχεία κεραίας βασιζόμενα σε τύπο γκοφρέτας μπορούν να φτάσουν σε λεπτομέρεια και διόρθωση ανάλυσης της τάξης των νανομέτρων (nm), ενώ οι πλακέτες, τα κυκλώματα και τα ηλεκτρονικά κατασκευαστικά προϊόντα μπορούν να έχουν ανάλυση δεκαδικών μικρομέτρων (μm). Η Στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA) και η Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling – FDM), στα σχήματα που δημιουργούν, έχουν τιμές μικρομέτρων (μm). Για τεχνικές πρόσθεσης μεταλλικών γραμμών, sprays και ψεκασμών και αερολυμάτων, έχει μεταβλητά αποτελέσματα, καθώς για την επίτευξη συχνοτήτων έως MHz, η τραχύτητα για την επίτευξη GHz συχνότητας, έχει πολλαπλά προβλήματα αυξάνοντας τις τιμές των παραμέτρων απωλειών. Αυτή τη στιγμή είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ένα στάδιο επιπρόσθετης χειροκίνητης κυρίως στίλβωσης, η οποία αν και μειώνει τη σπουδαιότητα της εκτύπωσης, είναι ωστόσο

απαραίτητη για να μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος της λείας επιφάνειας και του ποσοστού που απαιτείται για την ορθή λειτουργία του στοιχείου της κεραίας.

Μία τρίτη πρόκληση, στην κατασκευή κεραιών από 3D printers συναποτελεί η σπουδαιότητα της κατασκευαστικής ακρίβειας, καθώς η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται από το παραγόμενο αποτέλεσμα και κυριολεκτικά και από τη μικρότερη λεπτομέρεια. Μικρές ανακρίβειες μπορούν να διαστρεβλώσουν πλήρως το αποτέλεσμα και την αποδοτικότητα της κεραίας από τους στόχους που έχουν τεθεί. Με την αύξηση της συχνότητας, ουσιαστικά χειροτερεύει και αποκλίνει περισσότερο στην πραγματικότητα από το επιθυμητό έργο που θέλουμε να δημιουργηθεί, σε συνδυασμό με τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα της κεραίας που είναι σε πολύ μικρές διαστάσεις που επηρεάζουν άμεσα. Υπό αυτήν την έννοια, η ανάλυση που διαθέτει ο εκτυπωτής είναι ζωτικής σημασίας και αποτελεί βασική παράμετρο για την παραγωγή κεραιών, ειδικά για υψηλότερες συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογίες όπως το 5G. Άμεση λύση είναι η χρήση 3D εκτυπωτών με υψηλή ποιότητα ανάλυσης (High Resolution Quality), ωστόσο αυτή η κατεύθυνση οδηγεί σε κατακόρυφη αύξηση του κόστους παραγωγής.

Αν και οι κεραίες παραγόμενες από 3D printers παρέχουν μία σειρά από πλεονεκτήματα, σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους παραγωγής, είναι πλέον πιο εμφανές από ποτέ, ότι απαιτείται η διευθέτηση πολλών ζητημάτων για την υποστήριξη του εξελιγμένου εγχειρήματος. Η επίδοση των κεραιών από τρισδιάστατους εκτυπωτές, τόσο για τις προκλήσεις που ανακύπτουν στα παθητικά και ενεργά μέρη – στοιχείων ραδιοσυχνοτήτων, επηρεάζουν πλήρως το προϊόν. Για τα παθητικά μέρη η συχνότητα λειτουργίας και συντονισμού είναι συναρτήσι παραμέτρων γιατί αποτελούνται από ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες όπως η ηλεκτρική διαπερατότητα (ϵ), η αγωγιμότητα

μετάλλου (σ) και η εφαπτομένη απώλειας ($\tan\delta$). Η δραστική σμίκρυνση των κυκλωμάτων και ως συνεπακόλουθο των κεραιών συνολικά, η διαπερατότητα είναι επίσης μία μεταβλητή που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Την εξυπηρέτηση της ανάγκης ρύθμισης της συγκεκριμένης μεταβλητής, πρέπει να χρησιμοποιηθούν νέα υλικά, κυρίως εκτυπώσιμα μελάνια και συστήματα ρητίνης που να βρίσκονται στο κατάλληλο σημείο του φάσματος για να καθορίσει το ϵ και μ , κάνοντας το σ , όσο πιο υψηλό γίνεται και το $\tan\delta$ όσο χαμηλότερο γίνεται. Τα διηλεκτρικά πολυμερή που έχουν $\tan\delta$ μικρότερο από 0.06 και είτε πολύ χαμηλό ($<2,5$) είτε πολύ υψηλό (>10) ϵ είναι πολύ δύσκολο να εκτυπωθούν καθώς αποτελούν υλικά τα οποία είναι δύσκολο να δημιουργήσουν μακριές αλυσίδες σύνδεσης κατά την εκτύπωση ή είναι γεμισμένα με κεραμικά αντίστοιχα.

Τα διαθέσιμα εργαλεία Προσθετικής Κατασκευής (AM) – 3D printing, δε δύναται να υποστηρίξουν τα ανωτέρω, και δεν έχουν επιτευχθεί επίσης αγωγοί με μεταλλικό υλικό στο σ που απαιτείται για τη δημιουργία κεραιών ραδιοσυχνότητας με τα επιθυμητά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούνται αντιθέτως για μεγαλύτερου όγκου απόθεση αγωγίμου υλικού η Κατευθυνόμενη Γραφή (Direct Write - DW) μέθοδος με ίνες αργυρού (Argentum – Ag), το οποίο δεν είναι ένα ακριβό υλικό και η χημική ένωση είναι κατανοητή και προσδίδουν ποιοτικά και οικονομικά οφέλη. Τα συγκεκριμένα (Αργυρός και Χαλκός) υλικά ανοικοδομούνται ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα με την πάροδο του χρόνου, καθώς αντιδρούν υπό οποιασδήποτε συνθήκες περιβαλλοντικές, όπως επίσης είναι επιρρεπείς σε θείο (Sulfur) και οξείδωση αντίστοιχα. Τέτοια προβλήματα λύνονται με τη άλλα υλικά όπως είναι ο χρυσός, ωστόσο εκεί το κόστος παραγωγής αυξάνεται σημαντικά. Τα περισσότερα υλικά έτσι στο εμπόριο, έχουν μικρό χρόνο ζωής και σε συνδυασμό με τη μικρή έρευνα υλικών που έχει πραγματοποιηθεί για συστήματα ραδιοσυχνότητων, κατευθύνουν τους ερευνητές να

δημιουργούν μόνοι τους διάφορα κράματα για τη δοκιμή και κατασκευή στοιχείων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Βάσει του Συντελεστή Θερμικής Διαστολής (Coefficient of Thermal Expansion – CTE), και των ανακριβειών επιφανειακής ενέργειας, η εκτύπωση μεταλλικών αγωγών σε διηλεκτρικά υποστρώματα αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους μηχανικούς και σχεδιαστές τρισδιάστατων κατασκευών. Για την επίτευξη μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ), πρέπει το διηλεκτρικό στρώμα και ο μεταλλικός αγωγός να γίνουν ένα συσσωμάτωμα παραγόμενο από τεχνικές υψηλής θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούνται τεχνικές laser – φωτονικής για την αντιμετώπιση προκλήσεων δημιουργίας συσσωματώματος στην επιφάνεια υποστρωμάτων. Περαιτέρω έρευνα απαιτεί σαφώς την κατάρτιση – καταγραφή – αποτύπωση σχέσεων των υλικών και των ιδιοτήτων τους που αλληλεπιδρούν ξεχωριστά, καθώς και τη χρήση διαφορετικών τεχνικών εκτύπωσης μεταξύ με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ορισμένες φορές δύναται να χρησιμοποιείται σε κατώτερα στρώματα κατασκευής επίσης μεταλλικά υλικά, προκειμένου στα εξωτερικά επίπεδα του σχηματισμένου προϊόντος να μη χρησιμοποιείται υψηλή θερμοκρασίας τεχνική και να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα ο όγκος του υλικού ηλεκτρικής διαπερατότητας.

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλυθούν οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, για τη δημιουργία στοιχείων κεραιών ραδιοσυχνότητας για την κάλυψη των απαιτήσεων που προκύπτουν. Για κάθε μέθοδο, υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις και μέσα για τα μελάνια και τη ρητίνη που θα χρησιμοποιηθούν, αναλόγως και των εργαλείων που υφίστανται και είναι συμβατά για το χειρισμό των εκτυπωτών με τα διάφορα λογισμικά. Διάρκως εφευρίσκονται και χρησιμοποιούνται νέα είδη μελανιών και ρητίνης, για την υποστήριξη των συστημάτων ραδιοσυχνότητας, τα οποία έχουν ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, βασικές για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των κεραιών. Βασική παράμετρος με τις μεθόδους παραγωγής, είναι ως κριτήριο, η επεκτασιμότητα μετά την υλοποίηση, προκειμένου να επαυξάνεται η υψηλή επίδοση και η διατήρηση του αξιόμαχου του συστήματος. Οι νέες αναδυόμενες τεχνολογίες εκτύπωσης θα προσφέρουν τη δυνατότητα μικροκατασκευής και μακροκατασκευής πολύπλοκων τμημάτων κεραιοσυστημάτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει λάβει η κατασκευή κεραιών τύπου Horn για μικροκύματα, και στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων για την καλύτερη εμπέδωση και αξιοποίηση όλων των συστημάτων και αναδυομένων δυνατοτήτων.

3.1 Μέθοδοι για Κατευθυνόμενη Γραφή - Direct Write

Οι μέθοδοι της Κατευθυνόμενης Γραφής - Direct Write (DW) είναι αρκετά γρήγορες, χαμηλότερου κόστους και πολύ φιλικές για το περιβάλλον από άλλες παραδοσιακές τεχνικές. Βασίζεται ουσιαστικά στην προσθετική και όχι σε αφαιρετική διαδικασία υλικού για την υλοποίηση του σχεδιασμένου, σε λογισμικό, προϊόντος. Για την πρόσθεση μεταλλικών γραμμών και πρόσθεσης ιδιοτήτων σε διηλεκτρικά υλικά, από μεθόδους όπως η εκτύπωση Gravure και η εκτύπωση Screen, παρουσιάζουν το 2022 χαμηλή ποιότητα εκτύπωσης και μικρό ποσοστό ακρίβειας, συναρτήσει των επιδιωκόμενων στόχων που υπάρχουν για την εκπλήρωση των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Στον αντίποδα, οι μέθοδοι που αναπτύσσονται και έχουν πλέον ιδιαίτερη αξία λόγω της μεγάλης ακρίβειας και επίτευξης του στόχου για πρόσθεση μεταλλικών αγωγών επάνω στο υπόστρωμα, είναι η εκτύπωση εξώθησης μελάνης - Inkjet (IJP), η εκτύπωση εξώθησης αεροσωματιδίων - Aerosol Inkjet (AJP) και η Κατευθυνόμενη Γραφή Μελανιού - Direct Ink Writing (DIW). Για τη χρησιμοποίηση των ανωτέρων μεθόδων απαιτείται η σχεδίαση σε ένα Computer – Aided Design (CAD) πρόγραμμα, από το οποίο θα εξαχθεί από υπολογιστή, για να ενσωματωθεί αργότερα στον 3D τεχνολογίας εκτυπωτή, για τη διαχείριση και έλεγχο της διανομής και κατανομής των μελανιών που περιέχουν κολλοειδή εναιωρήματα μεταλλικών νανοσωματιδίων (nanoparticles – NPs) ή να περιέχουν άλλα υλικά τα οποία να είναι διηλεκτρικά ή να έχουν απαραίτητες ιδιότητες που να προσδίδουν οτιδήποτε είναι αναγκαίο για το κεραιόσυστημα. Με τη χρήση αυτών των υλικών και μεθόδων, μπορεί να εκτυπωθεί

μοτίβο διαφορετικού όγκου και πάχους, σε διάφορους αριθμούς υπερεκτυπώσεων, σε διαφορετικά στρώματα και για διαφορετικούς σκοπούς.

Κάθε μέθοδος, χρησιμοποιείται για συγκεκριμένη ανάλυση εκτύπωσης, δυνατότητας και ευελιξίας σχεδιασμού και επεκτασιμότητα που προσφέρει μελλοντικά, από τους αντίστοιχους μηχανισμούς εναπόθεσης εκτυπώσιμου υλικού. Σε κάθε επιθυμητή εφαρμογή, οφείλει ο χρήστης να επιλέγει την κατάλληλη μέθοδο, καθώς συναντάει διαφορετικά πλεονεκτήματα. Για αυτόν τον λόγο, θα γίνει ανάλυση για τις μεθόδους εκτύπωσης, τη μορφολογία των εκτυπώσιμων υλικών και πως η τραχύτητα επηρεάζει και σύγκριση μεταξύ τους, για να καταρτιστεί ένας οδηγός, ο οποίος να επεξηγεί ποια πρέπει να επιλέγεται ανάλογα το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα και τον αντικειμενικό σκοπό χρήσης των εκτυπωτών τρισδιάστατης τεχνολογίας, στο πρώτο τέταρτο του 21^{ου} αιώνα.

3.1.1 Εκτύπωση Εξώθησης Μελάνης - Inkjet Printing (IJP)

Η εκτύπωση εξώθησης μελάνης - Inkjet (IJP) είναι η πιο συνηθισμένη διαδικασία εκτύπωσης Κατευθυνόμενης Γραφής - Direct Write η οποία χρησιμοποιείται σήμερα σε πολύ μεγάλο βαθμό. Χρησιμοποιεί ένα μελάνι χαμηλού ιξώδους το οποίο εξάγεται από ένα ακροφύσιο με μορφή σταγόνων. Ένα σχέδιο δημιουργείται με την επικάλυψη των σταγονιδίων, η οποία σχηματίζει μία συνεχή γραμμή. Αλλάζοντας το ποσοστό επικάλυψης – πλήθος σταγονιδίων και όγκος – και της κατεύθυνσης της εκτύπωσης, επιτυγχάνεται η δημιουργία διαφορετικών χαρακτηριστικών που τίθενται ως στόχοι. Η απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και γραμμών μεταξύ τους πρέπει να είναι μικρότερη από 65%, ούτως ώστε να μην υπάρχει διόγκωση της τυπωμένης αγωγίμης γραμμής, καθώς η ανάλυση που πραγματώνεται είναι συνδυασμός της διαμέτρου των σταγονιδίων και της διασποράς κατά την επαφή με την επιφάνεια του επιπέδου υποστρώματος. Η μικρότερη εφικτή τιμή μεγέθους για τη διάμετρο των σταγονιδίων είναι 25 – 50 μm , είναι καλύτερα από άποψη διαδικασίας σε σύγκριση με τη μεταξοτυπία ή τη φωτολιθογραφία, ως βασικές παραδοσιακές μέθοδοι. Ωστόσο μπορεί να χρειάζονται άλλες μέθοδοι για την περαιτέρω σμίκρυνση της διαμέτρου των σταγονιδίων και της διασποράς που υφίστανται κατά την εκτύπωση.

Η πρόκληση της τεχνικής αυτής είναι η ανομοιομορφία που σκιαγραφείται ανάμεσα στις έντυπες γραμμές που εκτυπώνονται καθώς δεν ορίζεται σταθερή σε όλο της το μήκος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύχθηκε μία κατανομή των σταγονιδίων κατά την αποβολή τους σε ορισμένο ύψος με την ονομασία «coffee – ring» (δακτύλιος του καφέ), όπου η αποβολή του υγρού πιέζεται κυρίως στο κέντρο, έναντι του περιγράμματος στα άκρα, τα οποία είναι ιδιαίτερα λεπτά και εξατμίζονται σαφώς περισσότερο, δημιουργώντας ένα ρεύμα προς τις εξωτερικές κατευθύνσεις. Αυτή η μετρίαση του ρεύματος, δύναται να επιτευχθεί με τη χρήση

διαλυτών, οι οποίοι να έχουν υψηλότερο σημείο βρασμού και χαμηλότερη επιφανειακή τάση από τον κύριο διαλύτη μελανιού, για να μην υπάρχει απώλεια του κύριου υλικού. Αυτό θα προσιδιάσει στο φαινόμενο Marangoni, στο οποίο μία κλίση επιφανειακής τάσης δημιουργεί ένα ρεύμα προς τα μέσα και έτσι εξισορροπείτε το φυσικό προς τα έξω ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο, τα δύο ταυτόχρονα ρεύματα κυκλοφορούν τα μελάνια και στη συνέχεια αυτά στεγνώνουν, και δίνουν μία πιο ομοιόμορφη υφή. Το διμεθυλοφορμαμίδιο (Dimethylformam – DMF), όταν συνδυάζεται με νερό ως διαλύτης για νανοσμήματα (Nanoparticles) αργυρού (NP Ag), είναι αποτελεσματικό για την αντιμετώπιση του φαινομένου του «coffee ring», όπως επίσης και η εκτύπωση των γραμμών αντίθετα από την κατεύθυνση του ακροφυσίου, συντελούν στη δημιουργία ενός πιο ομοιόμορφου πλευρικού προφίλ.

3.1.2 Εκτύπωση Εξώθησης Αεροσωματιδίων - Aerosol Jet Printing (AJP)

Παρόμοια με την Εκτύπωση Εξώθησης Μελάνης - Inkjet Printing, είναι άλλη μία μέθοδος Κατευθυνόμενης Γραφής - Direct Write, η Εκτύπωση Εξώθησης Αεροσωματιδίων - Aerosol Jet Printing, με την κεφαλή του εκτυπωτή να ψεκάζει ως spray διαρκώς μελάνι που είτε έχει αραιωθεί με διαλύματα και συνήθως με υπερήχους σε σταγονίδια διαμέτρου 2 – 5 μm . Μία προστατευτική θήκη εκτός της κεφαλής καθοδηγεί το εξαγόμενο προϊόν που τρέχει κατά μήκος του υποστρώματος στη υποδηλωθείσα κατεύθυνση και με συγκεκριμένη διαδρομή. Ο προσανατολισμός και η εστίαση της δέσμης αποτρέπει τη φραγή της κεφαλής του ακροφυσίου. Για τον συγκεκριμένο λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελάνια με πολύ υψηλότερο ιξώδες από το Inkjet Printing, με περιορισμούς μέχρι τα 30 Centipoise (cP). Το προγραμματισμένο μοτίβο περατώνεται με το κλείσιμο ενός ηλεκτρομαγνητικού κλείστρου, προκειμένου να σταματήσει η ροή του μελανιού όταν η κεφαλή του εκτυπωτή βρίσκεται σε κατάλληλη θέση για να μην υπάρξουν μελλοντικές επιπλοκές. Τα σταγονίδια, όπως διαπιστώνεται, είναι μικρού μεγέθους και έτσι στεγνώνει κατευθείαν με την εναπόθεση με διάφορες πιθανές επιδράσεις στο τελικό αποτέλεσμα.

Υπάρχει επίσης, όπως και στην Εκτύπωση Εξώθησης Μελάνης - Inkjet Printing το φαινόμενο «δακτυλίου του καφέ» – «coffee ring», οπότε παρόμοιες διαδικασίες εξάτμισης όπως ανωτέρω, χρησιμοποιούνται και σε αυτήν την περίπτωση, χωρίς τα αποτελέσματα που καταγράφονται στο IJP. Η εμφανής διαφορά μεγέθους των ακροφυσίων AJP και IJP, εμφανίζει μειωμένα χαρακτηριστικά, αν μειωθεί περαιτέρω η διάμετρος, με το AJP να εμφανίζει ένα φαινόμενο πιτσιλίσματος έναντι μιας καθορισμένης αποβολής σταγονιδίων, λόγω ενός νέφους σωματιδίων που υπάρχει, προκαλώντας πιθανώς επιζήμια αποτελέσματα σε εκτυπώσεις ακρίβειας που

απαιτούνται και για την αποτύπωση λεπτομερειών (λεπτομερή σχέδια, στενότερες αποστάσεις εκτύπωσης, κα.).

3.1.3 Κατευθυνόμενη Γραφή Μελάνης - Direct Ink Writing (DIW)

Η κατευθυνόμενη Γραφή Μελάνης - Direct Ink Writing (DIW) χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό αντλίας ακριβείας και σύριγγες μεταβλητού διαμετρήματος για την αποβολή μελανιών με υψηλό ιξώδες. Λόγω της ροής και των ιδιοτήτων της μελάνης, η οποία αραιώνει τη διάτμηση, εξέρχεται ως υγρή από τον σωλήνα του ακροφυσίου αλλά στερεοποιείται μόλις αποτεθεί στο υπόστρωμα. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει την ταχεία τρισδιάστατη εκτύπωση και θεωρείται ως «άμεση θεραπεία» - «instant cure». Μερικές από τις υψηλότερες εκτυπωμένες αγωγιμότητες μέχρι σήμερα έχουν αποδειχθεί με το DIW από τους Lewis και Walker, οι οποίοι αναφέρουν ηλεκτρόδια Ag με αγωγιμότητα (G) $6,25 \times 10^7$ S/m, η οποία είναι τόσο κοντά στη μαζική αγωγιμότητα Ag ($6,25 \times 10^7$ S/m), όσο έχουν δείξει οι διάφορες δοκιμές. Η προσθήκη διαλύματος βουτανολιόλης αραιώνει το ιξώδες, έτσι ώστε το μελάνι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με IJP, με μελλοντικά αντικείμενα μελέτης για την αγωγιμότητα του κατά τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής.

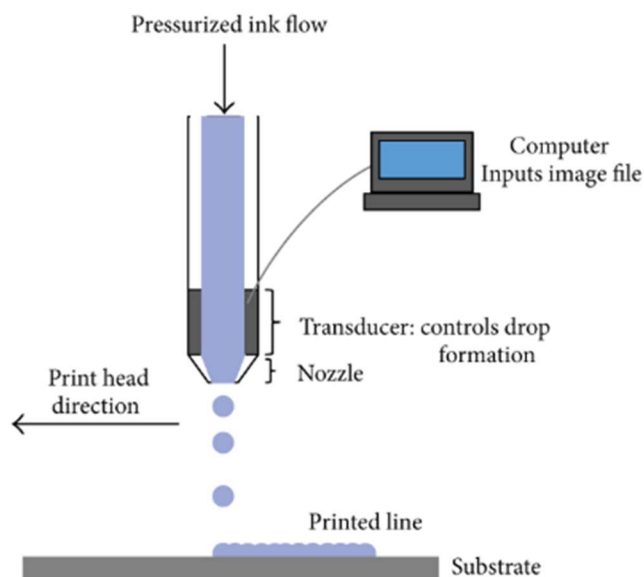
Αυτή η τεχνική είναι επίσης πολύ ευέλικτη, καθώς έχουν τυπωθεί πηκτώματα κολλοειδών, κεραμικά, κεριά, ακόμα και μετάξι. Αφού αποβληθεί από το ακροφύσιο, το μελάνι επικολλάται σε ένα πολυαξονικό πλέγμα, και έτσι επιτυγχάνεται η πολυκατευθυντική εκτύπωση για να επιτρέψει την αληθινή σύμμορφη εκτύπωση σε οποιαδήποτε επιφάνεια και επίπεδο. Δηλώνεται επίσης η δυνατότητα, λόγω του κοινού διαμετρήματος κεφαλής με το IJP, να χρησιμοποιεί πολλές κεφαλές ταυτόχρονα για υψηλούς ρυθμούς εκτύπωσης, όντας μία νέα τεχνική και αναδεικνύεται ως μία ευέλικτη μέθοδος που μπορεί να παίξει ιδιαίτερο ρόλο στην κατασκευή κεραιών, στοιχείων και εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης Ραδιοσυχνοτήτων (RF).

3.1.4 Σύγκριση μεθόδων Κατευθυνόμενης Γραφής - Direct Write

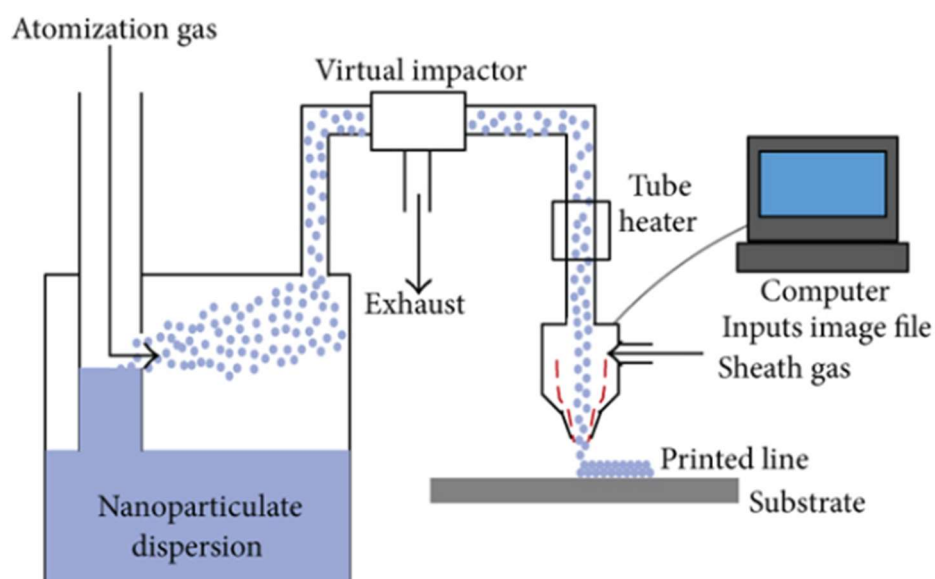
Το AJP και το DIW είναι σχετικά νεότερες τεχνολογίες – τεχνικές από το IJP. Στον πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές ανά στήλη για την κάθε τεχνική, αλλά και τα πλεονεκτήματα της καθεμίας. Εξάγονται συμπεράσματα για το ποια πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ανάλογα τις επιδιώξεις και τους στόχους που τίθενται. Επίσης παρακάτω υπάρχει σχηματικά αναπαράσταση της κάθε τεχνικής προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους.

Print method	Ink viscosity (cP)	Nozzle diameter (μm)	Feature size (μm)	Min. line thickness (μm)	Key benefits
IJP	1–30 [34]	20–60 [31, 39]	20–100 [34]	0.6 [31]	Low cost, multiple heads
AJP	1–1000 [36]	150–300 [40]	10–200 [40]	0.1 [40]	High throughput, thin layers, fine features
DIW	1–1000000 [21, 41]	0.1–1 [21, 42]	1–1000 [42]	0.5 [41]	Most precise, best resolution

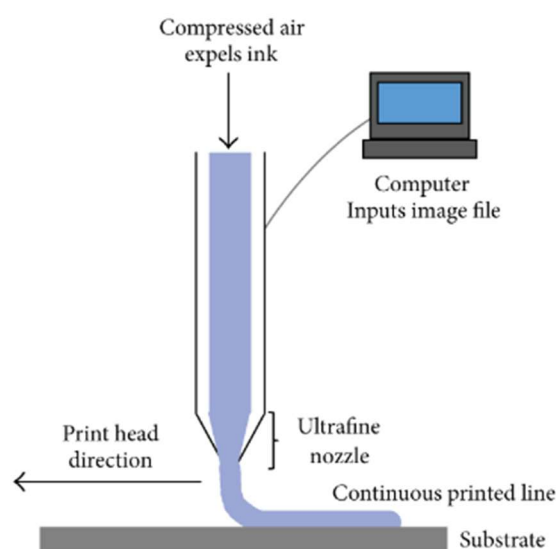
Πίνακας 3: Σύγκριση μεθόδων εκτύπωσης



Σχήμα 4: Αναπαράσταση Inkjet Printing [4]



Σχήμα 5: Αναπαράσταση Aerosol Jet Printing [4]



Σχήμα 6: Αναπαράσταση Direct Ink Writing [4]

Η τεχνική AJP είναι πιο ευέλικτη από την IJP διότι η πρώτη παράγει πολύ λεπτότερη ανάλυση. Διαπιστώθηκε ότι το πλάτος της εκτυπωμένης γραμμής μειώνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος εστίασης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού ροής αερίου περιβλήματος προς τον ρυθμό ροής του φέροντος αερίου. Η τυπική απόκλιση από εκτέλεση σε εκτέλεση μειώνεται, επιτρέποντας έτσι μία εξαιρετικά επαναλαμβανόμενη μείωση του μεγέθους των χαρακτηριστικών. Ωστόσο το DIW, λόγω του μικρού ακροφυσίου επιτρέπει την ακόμη πιο λεπτή εκτύπωση από το AJP.

Δεύτερη αξιοσημείωτη διαφορά είναι ότι τα συστήματα AJP βασίζονται σε διανύσματα για την προσέγγιση εκτύπωσης, σε αντίθεση με το IJP το οποίο δεν είναι τόσο ευέλικτο καθώς χρησιμοποιεί γραμμή προς γραμμή την όδευση επάνω σε εικονοστοιχεία χωρίς την ίδια ικανότητα ευελιξίας. Για παράδειγμα ένα τετράγωνο

μπορεί να εκτυπωθεί είτε με περιμετρικό μοτίβο, είτε με σερπεντίνη με το ρυθμό που στεγνώνει το μελάνι να επηρεάζει την ομαλότητα της τυπωμένης δομής.

Τρίτη σημείωση είναι η μεγάλη απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και του υποστρώματος, το οποίο επιτρέπει την εκτύπωση σε μη επίπεδα σύμμορφα υποστρώματα. Ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές όπως οι κεραιές ραδιοσυχνότητας 3D.

Τέταρτο σημείο σύγκρισης αποτελεί η ικανότητα του AJP να παράγει δομές υψηλότερης αγωγιμότητας από το IJP, λόγω του μεγάλου εύρους αποδεκτών ιξωδών, όπου το μελάνι μπορεί να περιέχει υψηλότερο ποσοστό βάρους μετάλλου, αυξάνοντας την πιθανότητα επαφής των μεταλλικών νανομερών – nanoparticles (NP).

Πέμπτον, το AJP δύναται να εκτυπώσει πολύ λεπτότερα μεμονωμένα περάσματα από το IJP, οδηγώντας σε αυξημένη ευελιξία σχεδιασμού όπως οι σπειροειδείς κεραιές και οι κεραιές τύπου Μαιάνδρου, είτε για την κατασκευή συσκευών και συστημάτων.

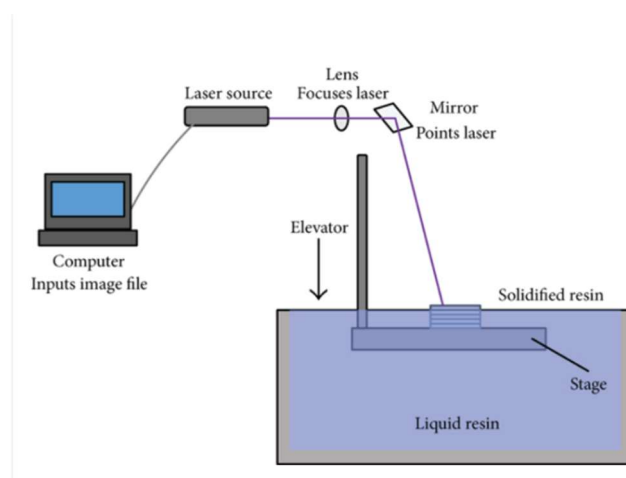
Μείζων μειονέκτημα του AJP είναι η μορφολογία της τυπωμένης γραμμής που προκύπτει. Διαπιστώθηκε ότι απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης για να επιτευχθεί η ίδια ειδική αντίσταση στις δομές των εκτυπώσεων με τεχνική AJP, έναντι των εκτυπώσεων με τεχνική IJP. Αυτό οφείλεται στο ότι η περιοχή επαφής με το υπόστρωμα αυξάνεται για την IJP, οδηγώντας σε μεγαλύτερη θερμική διάχυση και επομένως σε πιο προοδευτική πυροσυσσωμάτωση. Όπως επίσης ότι οι δομές AJP είναι πιο πορώδεις, οδηγώντας έτσι σε μειωμένη αποτελεσματική διατομή. Έχει προταθεί η χρήση νανοσωλήνων για την κάλυψη του

πορώδους, το οποίο προκαλεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, ώστε να καταπολεμηθεί η αύξηση αυτής της ειδικής αντίστασης για την ενίσχυση της αγωγιμότητας. Η ηλεκτρική πυροσυσσωμάτωση, αντί της πυροσυσσωμάτωσης σε φούρνο, έχει επίσης αποδειχθεί ότι παράγει αγωγιμότητα (G) τόσο υψηλή όσο και το ήμισυ αυτής του χύδην αργύρου με ΑJP.

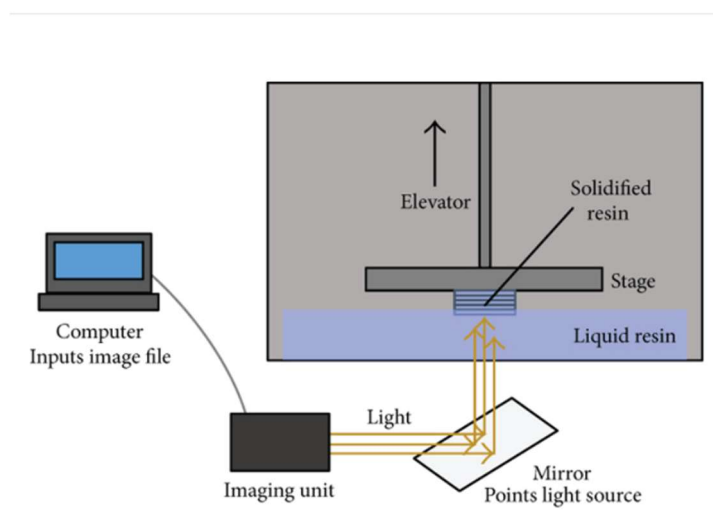
Το πλεονέκτημα του DIW σε σύγκριση με το IJP και το ΑJP έγκειται στην ικανότητα να παράγει εκτυπώσεις με πολύ καλύτερη ανάλυση. Ωστόσο πρέπει να διερευνηθούν οι περίπλοκες παράμετροι καθώς είναι μία νεότερη τεχνολογία και πρέπει να αναλυθεί στο έπακρο.

3.2 Μέθοδοι για Προσθετική Μέθοδο Παραγωγής - Additive Manufacturing

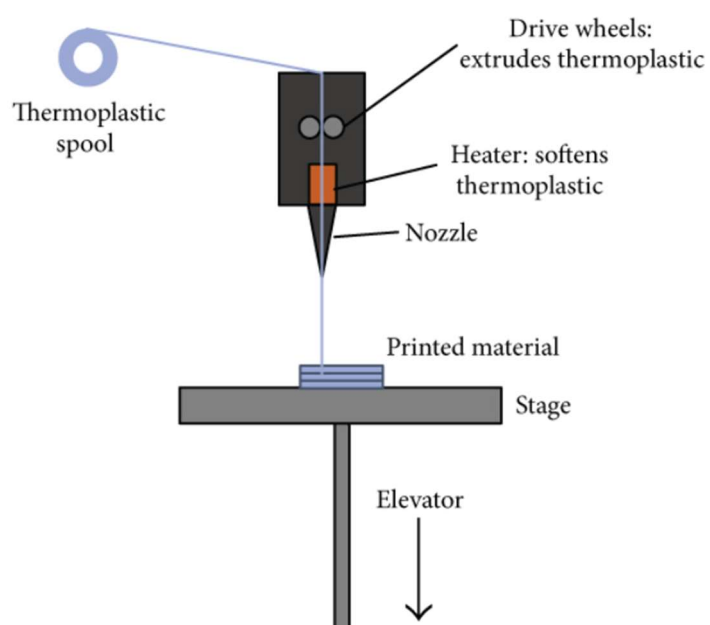
Σημαντικό αντικείμενο μελέτης, εκπαίδευσης και κατανόησης είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση διηλεκτρικών αντικειμένων και στοιχείων. Κάποιες από τις τεχνικές είναι η στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA), η μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling – FDM) και η ψηφιακή επεξεργασία φωτός (Digital Light Processing – DLP), μέσω των οποίων παράγονται πολυμερή στοιχεία με ιδιότητες για ηλεκτρονικά και συσκευές κεραιοσυστημάτων, διαφόρων ραδιοσυχνοτήτων. Οι ανωτέρω τεχνικές χρησιμοποιούν όλες τις διαδικασίες, που κατασκευάζουν το σχεδιασμένο πλάνο επίπεδο με επίπεδο (layer – by – layer), οι οποίες χρησιμοποιούν μία διαδικασία σκλήρυνσης για να μετατρέψουν τις ρητίνες σε στερεές δομές μέσω επεξεργασίας με φως ή θερμότητα. Παρακάτω παρατίθενται σχηματική αναπαράσταση της κάθε τεχνικής με τις λεπτομέρειες τους προκειμένου να κατανοηθούν ως διαδικασίες.



Σχήμα 7: Αναπαράσταση Stereolithography (SLA) [4]



Σχήμα 8: Αναπαράσταση Digital Light Processing (DLP) [4]



Σχήμα 9: Αναπαράσταση Fused Deposition Modeling (FDM) [4]

3.2.1 Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης – Fused Deposition Modeling (FDM)

Η πιο ώριμη τεχνολογία της Προσθετικής Μεθόδου Παραγωγής - Additive Manufacturing (AM) για παραγωγή διηλεκτρικών υλικών είναι η Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling – FDM). Στην τεχνική αυτή, τα νήματα θερμαίνονται και αποβάλλονται από την κεφαλή του ακροφυσίου και εναποτίθενται στο καλούπι εκτύπωσης σε σχήμα που ορίζεται από ένα αρχείο CAD σε συνεχή ροή εξώθησης. Καθώς συνεχίζεται η εκτύπωση, το νέο αποβληθέν υλικό από το ακροφύσιο, εξωθεί νέο πολυμερές υλικό, έτσι ώστε να συγχωνευτεί με το ήδη τυπωμένο στρώμα και για να σχηματίσει μία συμπαγή δομή. Η μείωση του πάχους κάθε επιπέδου, αυξάνει δραστικά την ομαλότητα της τελικής δομής αλλά ομοίως το χρόνο που απαιτείται για να σχηματιστεί η κατασκευή τελεσίδικα.

Αποτελεί μία τεχνική – προσέγγιση η οποία κινείται ουσιαστικά από τα πάνω προς τα κάτω, και για τις δομές που απαιτούν προσθήκη μέρους στήριξης, είτε αποκόπτεται μηχανικά είτε χρησιμοποιείται ως υλικό διαφορετική ρητίνη που είναι ικανή να διαλυθεί σε επιλεγμένο διαλύτη. Άρα σημειώνεται στα μειονεκτήματα ότι οι κατασκευές που παράγονται από την τεχνική FDM, απαιτούν κάποιο επίπεδο μεταεπεξεργασίας ανάλογα με την πολυπλοκότητά τους, όπως κόψιμο επιφάνειας με οργανικό οξύ για την περαιτέρω εξομάλυνση, ή καταπολέμηση των κενών αέρα που δύναται να υπάρχει ανάμεσα στα τυπωμένα επίπεδα – στρώματα, απαιτούν επεξεργασία για την ελαχιστοποίηση τέτοιων φαινομένων.

Όσον αφορά τις εφαρμογές της συγκεκριμένης τεχνικής, για την κατασκευή συστημάτων ραδιοσυχνοτήτων – κεραιών, είναι βασική η αρχή της ελάχιστης απώλειας εντός του επιπέδου υποστρώματος. Έχει διαπιστωθεί ότι οι δομές τεχνικής

FDM εμφανίζουν χαμηλότερη απώλεια $\tan\delta$ από τη Στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA). Επίσης η ενσωμάτωση ρητίνης πολυμερούς κυκλοολεφίνης (COP) με TiO_2 παρουσιάζει απώλεια $\tan\delta$ 0,0014 έως 17 GHz, αλλά οι τεχνικές FDM παράγουν υλικά με χαμηλότερη ανάλυση από αυτή της SLA ($>200\mu\text{m}$).

3.2.2. Στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA)

Η τεχνική εκτύπωσης στερεολιθογραφίας (Stereolithography – SLA) λειτουργεί εκθέτοντας – αποβάλλοντας μία φωτοευαίσθητη υγρή πολυμερή ρητίνη σε μία πηγή φωτός, συνήθως LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation), υπεριώδους ακτινοβολίας 100 mW, καθώς η έξοδος υψηλής ισχύος είναι επιθυμητή, για να γίνει στερεό το υγρό εκχύλισμα ρητίνης. Η πηγή laser εκπέμπει εκτελώντας εργασία σημείο προς σημείο (point – by – point) ή επίπεδο προς επίπεδο (line – by – line) και εισάγοντας αρκετή ενέργεια στη ρητίνη προκαλεί φωτοπολυμερισμό έτσι ώστε να διασταυρώσει αλυσιδωτά και να δημιουργηθεί στερεή δομή. Υπάρχουν και εκτυπωτές οι οποίοι μπορούν να εκτυπώνουν ανά ύψος από πάνω προς τα κάτω, και η πλάκα κατασκευής (υποστρώματα) βρίσκεται πάνω από το δοχείο της ρητίνης και αυξάνεται σε ύψος μετά την στερέωση κάθε επιπέδου, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν μία προσέγγιση αντίθετη. Οι ανοχές κάθε στρώσης είναι συγκεκριμένες, αλλά τα στρώματα έχουν γενικά πάχος 0,05 – 0,15 mm στον άξονα Z, με ακρίβεια 0,01 – 0,02 mm στο οριζόντιο επίπεδο x - y. Λόγω της προσθήκης στρώματος – επί – στρώματος και του ειδικού μοτίβου δημιουργίας μπορούν να ληφθούν λείες επιφάνειες με εξαιρετικά λεπτομερή χαρακτηριστικά.

Η τεχνική SLA και τα παραχθέντα προϊόντα ανά στρώμα προμηνύονται ιδιαίτερα υποσχόμενα για να χρησιμοποιούνται για κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων και μικροκυμάτων. Ορισμένες ιδιότητες δείχνουν ιδιότητες υλικού που δύναται να συγκριθούν με τις πλακέτες κυκλωμάτων (PCBs) FR – 4 ή FR4, με το προστιθέμενο πλεονέκτημα ότι είναι εύκαμπτες ή αυθαίρετου σχήματος, ενώ ένα τέτοιου είδους PCB είναι επίπεδο. Σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή διηλεκτρική σταθερά, όπως για

παράδειγμα για κυματοδηγούς και συσκευές, ολοένα και πιο μικροσκοπικές, τα εκτυπωμένα με SLA υλικά μπορεί να είναι καλύτερα από τα υλικά FDM.

3.2.3 Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός – Digital Light Processing (DLP)

Η τεχνική της Ψηφιακής Επεξεργασίας Φωτός (Digital Light Processing – DLP) είναι παρόμοια με το SLA καθώς χρησιμοποιεί μία πηγή φωτός προβολής για να στερεοποιήσει μια υγρή ρητίνη στρώμα προς στρώμα. Εν αντιθέσει με το SLA, αντί να κάνει εκτύπωση και στερεοποίηση με ένα laser, το DLP αναβοσβήνει μία ψηφιακή εικόνα κάθε στρώματος (laser) στην εκτεθειμένη ρητίνη. Έτσι κάθε στρώμα – επίπεδο δημιουργείται ταυτόχρονα και όχι σε ένα προφίλ διαδικασίας κατασκευής σε σημείο ή γραμμή. Η πλάκα κατασκευής, μετά την αποτύπωση του ενός επιπέδου – στρώματος, μετακινείται προς τα κάτω και το επόμενο στρώμα στερεοποιείται και σκληραίνει. Το DLP αποτελεί μία νεότερη τεχνική, σε σύγκριση με το SLA και το FDM, αλλά πλεονάζει γιατί με τη συνολική εκτύπωση με τη ψηφιακή εικόνα, μειώνει δραστικά τον χρόνο εκτύπωσης. Ο προβολέας αποτύπωσης της εικόνας επηρεάζει την ανάλυση, λόγω των pixels που απαιτούνται και το μέγεθός τους. Έτσι οι εκτυπώσεις που πλησιάζουν το μέγεθος του ενός pixel θα έχουν ολοένα και μικρότερη ανάλυση, δημιουργώντας μία αντιστάθμιση μεταξύ του μεγέθους της εκτύπωσης και της λαμβανόμενης ανάλυσης. Με αυτή την προσέγγιση δημιουργούνται ραβδώσεις γνωστές ως γραμμές voxel κατά μήκος του άξονα Z της εκτύπωσης και επομένως μπορεί να απαιτήσει κάποιο επίπεδο μεταεπεξεργασίας για να αποκτήσει πιο ομαλή εκτύπωση. Αναμένεται να γίνουν έρευνες για τα χαρακτηριστικά των εκτυπωμένων στοιχείων ραδιοσυχνοτήτων RF που δημιουργούνται με DLP διηλεκτρικά, αν και αναμένεται να είναι συγκρίσιμα με το SLA.

Η ελεγχόμενη αναστολή οξυγόνου επιτρέπει απλούστερη και ταχύτερη εκτύπωση της τεχνικής DLP. Στην περίπτωση που οι εκτυπωτές DLP είναι εξοπλισμένοι

με μία διαπερατή μεμβράνη κάτω από το κανάλι εκτύπωσης και αποκτούν μία «νεκρή ζώνη οξυγόνου», ένα λεπτό στρώμα ακατέργαστης υγρής ρητίνης μεταξύ του καναλιού εκτύπωσης που διαθέτει τη ψηφιακή εικόνα και την ήδη στερεοποιημένη ρητίνη. Ο πολυμερισμός ξεκινά από το σημείο όπου δεν υπάρχει πλέον οξυγόνο αλλά υπάρχουν ελεύθερες ρίζες (που παράγονται από φωτόνια από τον προβολέα DLP). Οι δυνάμεις αναρρόφησης έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεχή ανανέωση της ρητίνης καθώς το εξάρτημα έλκεται προς τα πάνω από τον κάδο, έτσι η διαδικασία είναι συνεχής και όχι σταδιακά όπως στις διαδικασίες SLA και τυπικών DLP. Έτσι, το ιξώδες και ο ρυθμός σκλήρυνσης της ρητίνης είναι οι περιοριστικοί παράγοντες της διαδικασίας επιτρέποντας εξαιρετικά μειωμένους χρόνους εκτύπωσης.

3.2.4 Αναδυόμενες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης AM

Η μέθοδος εκτύπωσης με ενσωμάτωση συρμάτινου πλέγματος υπερήχων που αναπτύχθηκε από ερευνητές του University of Texas El Paso - UTEP συνδυάζει FDM και θερμική ενσωμάτωση υπερήχων για τη χρήση καλωδίων και συρματοπλέγμα στις εκτυπωμένες θερμοπλαστικές επιφάνειες, γεγονός που επιτρέπει μη επίπεδες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων και κεραιών. Αυτή η μέθοδος επίσης παρακάμπτει τη σύντηξη. Ωστόσο, απαιτεί ακόμα κάποια μορφή έντυπης διασύνδεσης. Ενώ ο φωτοπολυμερισμός δεξαμενής, η FDM και η IJP είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες και κατανοητές τεχνικές μέχρι σήμερα, οφείλεται να επισημάνουμε τις αναδυόμενες τεχνικές παραγωγής AM, οι οποίες δύναται να διαδραματίσουν ρόλο στο μέλλον για την υλοποίηση δύσκολα κατασκευάσιμων εξαρτημάτων RF. Υπάρχει έντονα η τάση τα κατασκευασμένα εξαρτήματα να μικραίνουν ολοένα και περισσότερο, με εμφανιζόμενες ορισμένες τεχνικές υψηλότερης ανάλυσης, όπως ο πολυμερισμός 2 φωτονίων (2 – photon polymerization – 2PP). Το 2PP έχει διαδοθεί από την επιστημονική κοινότητα των μηχανολόγων μηχανικών επιδεικνύοντας μεγάλη αναλογία αντοχής προς πυκνότητα, και το συγκεκριμένο δεδομένο θα μπορούσε να παίξει ιδιαίτερο ρόλο για να καλύψει τις ανάγκες υψηλής ανάλυσης για συστήματα κεραιών και συστημάτων ραδιοσυχνοτήτων RF.

Η ηλεκτροϋδροδυναμική εκτύπωση είναι η αναλογική εκτύπωση υψηλής ανάλυσης του IJP. Με αυτή τη μέθοδο, οι ερευνητές έχουν πετύχει ανάλυση επιπέδου νανόμετρου (nano – meter – nm) και το επιτυγχάνουν με αλλαγές στα δυναμικά τάσης μεταξύ του ακροφυσίου του εκτυπωτή και της επιφάνειας που πρόκειται να εκτυπωθεί.

Αυτές οι μέθοδοι είναι ενδεδειγμένο να επηρεάσουν μελλοντικά συστήματα ραδιοσυχνοτήτων, αλλά ακόμα δεν έχει υπάρξει ευρεία υιοθέτηση τους μέχρι σήμερα. Ωστόσο, δύναται μελλοντικά να γίνει προσέγγιση παραγωγής υβριδικών τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης στο μέλλον.

Κεφάλαιο 4

Υλικά Κατασκευής Κεραιών με Χρήση Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Το σημαντικότερο κομμάτι για τη δημιουργία της κατασκευής που σχεδιάζεται σε λογισμικά είναι η επιλογή των κατάλληλων υλικών, προκειμένου ως στοιχείο να υλοποιηθεί η ορθή υποδομή με τις επιθυμητές ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές δύναται να είναι χημικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντολογικές πληροφορίες και θέματα ανισορροπίας που συνοδεύει κάθε υλικό ή συνδυασμό υλικών. Στο εμπόριο, πολλές επιχειρήσεις παραδίδουν τους εκτυπωτές τρισδιάστατης τεχνολογίας με τα δικά τους υλικά, τα οποία λειτουργούν καλύτερα κάτω από την επιχειρησιακή λειτουργία του εκτυπωτή και με δοκιμές και πιστοποιήσεις που έχουν δοθεί. Ανάλογα με την τεχνική που έχει επιλεγεί και χρησιμοποιείται, πραγματοποιείται η επεξεργασία του για την εκκίνηση της διαδικασίας εκτύπωσης.

Τα διάφορα υλικά μπορεί να είναι σε μορφή σκόνης, με συγκολλημένα τα διάφορα σωματίδια, είτε με τη χρήση κόλλας που ψεκάζει ο εκτυπωτής, είτε με τη χρήση θερμικής ενέργειας να λιώνουν και να στερεοποιούνται σε συσσωμάτωμα πιο επιλεκτικά και εξειδικευμένα. Υπάρχει η τρίτη επιλογή να είναι σε μορφή φύλλου πριν επεξεργαστεί, και έπειτα κατά την εκκίνηση της επεξεργασίας το αναλώσιμο υλικό ίσως να χρήζει σε κατάσταση προθέρμανσης για να αρχίσει η μετάβαση του σε στερεή μορφή από υγρή – ημιστερεά κατάσταση, για να υπάρχει καλύτερη συνοχή κατά την

εκτύπωση – απώθηση. Υπάρχουν επίσης φωτοευαίσθητα υλικά που ενεργοποιούνται με τη χρήση laser, δηλαδή ακτινοβολήσης.

Οι δυνατές μορφές του υλικού ανάλογα την τεχνική που χρησιμοποιείται είναι:

1. Υπό μορφή σκόνης (Powder Material) – μέταλλο, γύψος, κεραμική σκόνη, πλαστική σκόνη ή από συστατικά τροφίμων
2. Υπό μορφή στερεών φύλλων (Solid Sheets Material) – χαρτί, μέταλλο, κεραμικό, πλαστικό ή σε μορφή film ταινίας – επικαλυμμένης με σκόνη
3. Υπό μορφή ρευστού ή λιωμένου υλικού (Gel or Molten Material) – πλαστικό, ξύλο, μέταλλο, βιοσυμβατό ή άλλο υλικό και συνήθως υπό τη μορφή νήματος
4. Υπό μορφή φωτοπολυμερούς υγρού (Photopolymer Liquid Material) – συντίθεται από διαφορετικές ρητίνες με διαφορετικές ιδιότητες η καθεμία αλλά και στον συνδυασμό τους

Η βασική εναπόθεση μετάλλων επικεντρώνεται στις ηλεκτρικές δομικές ιδιότητες για την κίνηση ηλεκτρονίων. Ενώ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση είναι μία σημαντική λειτουργική παράμετρος, είναι τα μικροδομικά χαρακτηριστικά των γραμμών που καθορίζουν την ειδική αντίσταση. Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση μιας μεταλλικής γραμμής προσδιορίζεται με τη μέτρηση της αντίστασης. Η ειδική αντίσταση μετά μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστό το εμβαδό της διατομής και το μήκος της γραμμής. Η ειδική αντίσταση εκφράζεται για τις τρισδιάστατες τεχνολογίες όπως στον παρακάτω πίνακα.

Metal	Particle size (nm)	Solvent	Conc. (wt%)	Curing	Print method	Width (μm)	Thickness (nm)	ρ ($\Omega \text{ cm}$)	Ref
Ag	N/A	NH_4OH , formic acid	22	15 min at 90°C	DIW	5	—	1.6×10^{-8}	[21]
Ag/CNT	—	Alcohol-based	—	30 min at 350°C	AJP	13.5	700	2.8×10^{-6}	[44]
Ag	5–7	Alpha-terpineol	10	$100\text{--}300^\circ\text{C}$	JP	80	100	3×10^{-6}	[80]
Ag	10–50	Water-DEG	25	$150\text{--}260^\circ\text{C}$	JP	130	532	1.6×10^{-5}	[81]
Ag	1–10	Toluene	30–35	300°C	JP	120	1000	3.5×10^{-5}	[82]
Au	2–4	Toluene	30	$300\text{--}400^\circ\text{C}$ (laser)	JP	20	50	1.4×10^{-5}	[83]
Au	2–4	Toluene	30–35	200–500 mW (laser)	JP	123	250	4.5×10^{-6}	[84]
Au	2–5	Toluene	30	200–1000 mW (laser)	JP	17	20–200	1.4×10^{-5}	[85]
Au	5–20	Toluene	30	300°C	JP	1000	600	1×10^{-5}	[86]

Πίνακας 4 - 5: Ειδική αντίσταση – Υλικά κατασκευής – χαρακτηριστικά εκτυπωμένων στοιχείων τηλεπικοινωνίας

4.1 Διηλεκτρικά υλικά

Τα διηλεκτρικά υλικά αποτελούνται από μόρια που συνίστανται από θετικά και αρνητικά φορτία (ιόντα, πυρήνες, ηλεκτρόνια). Εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στα φορτία και δημιουργεί ηλεκτρικά δίπολα, δηλαδή δύο ίσα και αντίθετα σημειακά φορτία σε απόσταση d σχηματίζουν ένα δίπολο.

Η τρέχουσα έρευνα προσανατολίζεται σε μεθόδους εξώθησης υψηλών διηλεκτρικών νημάτων τεχνολογίας τρισδιάστατης τεχνολογίας μέσω μίας στιβαρής και επαναλαμβανόμενης μεθόδου που επιτρέπει την εκτύπωση υποστρωμάτων – επιπέδων από εκτυπωτές 3D, με δεδομένη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς. Αυτό θα υποστηρίξει την προσπάθεια των μηχανικών περί επιτυχίας για την κατασκευή διηλεκτρικών σταθερών για υποστρώματα AM που μπορούν να χρησιμοποιήσουν στα μοντέλα τους όταν σχεδιάζουν εξαρτήματα ραδιοσυχνοτήτων.

Επιπρόσθετα κρίσιμη πρόκληση αποτελεί η χρήση μίας τεχνικής η οποία να υποστηρίξει τη σύντηξη αγωγίμων μελανιών εκτύπωσης σε ένα υπόστρωμα εργασίας του εκτυπωτή τρισδιάστατης τεχνολογίας, χωρίς να διακυβεύεται η ακεραιότητα του διηλεκτρικού υποστρώματος – επιπέδου. Τελευταία πρόκληση αποτελεί η παραγωγή μίας πλήρως ενσωματωμένης κεραίας AM, που θα εμπεριέχει επίπεδο γείωσης, συνδέσμους – connectors RF, τροφοδοσία, πολλαπλά διηλεκτρικά υποστρώματα και κενά ανάμεσα στα υποστρώματα με πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες.

Ενδεχομένως, τα σύνθετα υλικά παρασκευάζονται με τεχνικές ανάμειξης, όπως η διάλυση σφαιριδίων πολυμερούς ακρυλονιτριλίου – βουταδιενίου – στυρενίου (Acrylonitrile Butadiene styrene – ABS) με τη χρήση ακετόνης. Το πολυμερές ABS είναι

Θερμοπλαστικό και η θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού του είναι περίπου 105 °C, χωρίς να έχει πραγματικό σημείο τήξης γιατί είναι άμορφο. Οι αναλογίες μπορεί να ποικίλουν από 15% έως 35% ακρυλονιτρίλιο, 5% έως 30% βουταδιένιο και 40% έως 60% στυρόλιο. Το αποτέλεσμα είναι μια μακριά αλυσίδα πολυβουταδιενίου που διασταυρώνεται με μικρότερες αλυσίδες πολύ (στυρόλιο – συν - ακρυλονιτρίλιο). Οι ομάδες νιτρίλιου από γειτονικές αλυσίδες, όντας πολικές, έλκονται μεταξύ τους και συνδέουν τις αλυσίδες μεταξύ τους, καθιστώντας το ABS ισχυρότερο από το καθαρό πολυστυρένιο. Το ακρυλονιτρίλιο συμβάλλει επίσης στη χημική αντίσταση, την αντοχή στην κόπωση, τη σκληρότητα και την ακαμψία, ενώ αυξάνει τη θερμοκρασία εκτροπής της θερμότητας. Το στυρένιο δίνει στο πλαστικό μια γυαλιστερή, αδιαπέραστη επιφάνεια, καθώς και σκληρότητα, ακαμψία και βελτιωμένη ευκολία επεξεργασίας. Το πολυβουταδιένιο, μια ελαστική ουσία, παρέχει σκληρότητα και ολκιμότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες, με το κόστος της αντοχής στη θερμότητα και της ακαμψίας. Για την πλειονότητα των εφαρμογών, το ABS μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταξύ -20 και 80 °C, καθώς οι μηχανικές του ιδιότητες ποικίλλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία. Οι ιδιότητες δημιουργούνται με σκλήρυνση από καουτσούκ, όπου τα λεπτά σωματίδια ελαστομερούς κατανέμονται σε όλη την άκαμπτη μήτρα.

Εν συνέχεια, οι αναμικτήρες με τα ABS σφαιρίδια, προσθέτουν πλαστικοποιητές και επιφανειοδραστικές ουσίες σε μικρές συγκεντρώσεις, με αυτά τα πρόσθετα να είναι απαραίτητα, καθώς ο πλαστικοποιητής δρα ως λιπαντικό μεταξύ των μοριακών αλυσίδων του πολυμερούς, επιτρέποντας ευελιξία ακόμη και με φόρτωση κεραμικών σκονών. Είναι κρίσιμο να υπάρχει συγκεκριμένη δόση πλαστικοποιητή και όχι υπερβολική, καθώς έτσι θα επηρεάσει αρνητικά καθιστώντας το υπερβολικά ελαστικό. Η προσθήκη κεραμικών νανοσωματιδίων υψηλής διηλεκτρικής απόδοσης σε κλάσματα όγκου μεταξύ 15 και 30% στα μείγματα, και επιτρέπει σε αυτά να

ομογενοποιηθούν εντός του πολυμερούς. Καθώς αυξάνεται το φορτίο των κεραμικών εγκλεισμάτων, τόσο αυξάνεται και το ιξώδες του υλικού. Οι σχεδιαστές εκτυπώσεων τρισδιάστατης τεχνολογίας πρέπει να προσέχουν, καθώς τα παχύρευστα υλικά είναι επιρρεπή σε ελαττώματα εκτύπωσης, όπως κενά.

Δεδομένου ότι το FDM βασίζεται στην εξώθηση πολυμερούς ενώ το SLA και το DLP βασίζονται στη στερεοποίηση της ρητίνης, ο σχηματισμός των πρόδρομων ουσιών παρέχει διαφορετικές ιδιότητες υλικού. Για εφαρμογές Ραδιοσυχνοτήτων (RF), ένα χαμηλό $\tan\delta$ είναι ιδανικό, καθώς και είτε πολύ υψηλό είτε πολύ χαμηλό ϵ . Και οι δύο αυτές ιδιότητες συσχετίζονται με τη μοριακή δομή με πολικότητα ή διπολικές ροπές. Εφόσον ϵ είναι η τάση του υλικού να πολώνεται σε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο και η εφαιπόμενη απώλεια ελαχιστοποιείται από το πόσο γρήγορα χαλαρώνει το πολυμερές στην ισορροπία μετά την απενεργοποίηση του ηλεκτρικού πεδίου, τότε όσο πιο συμμετρικό και μικρότερο μήκος αλυσίδας είναι ένα πολυμερές, δηλαδή κυκλική πολυολεφίνη, τόσο μικρότερη είναι η ϵ και η $\tan\delta$ της. Το υψηλό ϵ μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας τη βάση πολυμερούς μήτρας και ρυθμίζοντας την ποσότητα των πρόσθετων παραγόντων ώστε να είναι εντός της επιθυμητής περιοχής ϵ .

Λόγω της ευκολίας εκτύπωσης των διηλεκτρικών σε σύγκριση με αγωγίμα υλικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η καταλληλότερη για την κατασκευή διηλεκτρικών κεραιών, όπως οι κεραίες Φακού (Gradient Index Lens Antennas) και κεραίες διηλεκτρικού συντονιστή (Dielectric Resonator Antennas – DRA). Οι φακοί έχουν αποδειχθεί ότι χρησιμοποιούν σχεδόν όλες τις κοινές μεθοδολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από τα μικροκύματα έως τις ζώνες κυμάτων mm και έως το THz. Οι κεραίες φακών είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για ζώνες συχνοτήτων 5G κυμάτων mm, καθώς παράγουν κατευθυντική ακτινοβολία, δεν

είναι φυσικά μεγάλες λόγω του μικρού μήκους κύματος που μπορούν επίσης να κατευθύνουν τη δέσμη, ενώ το μήκος κύματος δεν είναι τόσο μικρό ώστε να ξεπερνά την ανάλυση τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing) με τεχνική FDM. Ο φακός Luneburg για παράδειγμα, είναι ένας πολυεστιακός φακός ικανός να συγκεντρώνει ένα επίπεδο κύμα που εμποδίζει σε οποιαδήποτε επιφάνεια σε ένα σημείο στην αντίθετη επιφάνεια του φακού, απαιτεί διαπερατότητα 2 στο κέντρο και 1 στα περίφωτα του φακού. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρει μία απλή λύση για εύκολη κατασκευή, προσδίδοντας διάφορες γεωμετρικές τροποποιήσεις στον φακό Luneburg. Διάφοροι φακοί είναι:

1. Ο φακός Gutman
2. Τον συμπιεσμένο φακό Luneburg
3. Τον επίπεδο φακό Luneburg

Χρησιμοποιώντας τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, δημιουργούνται οι διαφορετικοί φακοί με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους, κυρίως για κατευθυνόμενες ακτίνες που είναι απαραίτητες για 5G δίκτυα με χρήση χιλιοστών (mm – waves) και μελλοντικές συνδέσεις επικοινωνίας THz. Οι κεραίες ακολουθούν κατασκευαστικές μεθοδεύσεις που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά όπως στοιχεία κεραίας, μπαλώματα, αισθητήρες κυματοδηγών και κόρνες, με τον φακό να έχει ιδιαίτερο ρόλο και να κατευθύνει τη δέσμη της κεραίας.

Οι κεραίες φακών σε συχνότητες THz αποτελούν βασικό στοιχείο στα συστήματα επικοινωνίας THz, καθώς πρόκειται για συσκευές ευρείας ζώνης και δημιουργούν κατευθυντήριες δέσμες που απαιτούνται από το μικρό μήκος κύματος και την υψηλή απώλεια διάδοσης. Με τη χρήση τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης

δημιουργήθηκαν με την τεχνική μικροστερεολιθογραφίας (micro - SLA), η οποία επιτυγχάνει υψηλή ανάλυση, δημιουργήθηκαν φακοί περίθλασης στα 0,625 THz με χαμηλό κόστος.

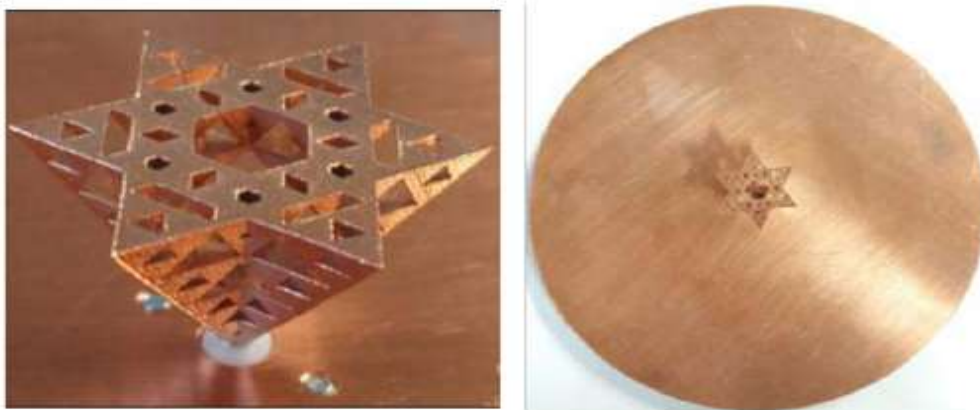
Material	Print method	Characterization frequency range	$\tan \delta$	ε
COP w/ 30% TiO ₂ [18]	FDM (then 1100°C)	17 GHz	0.0014	4.56
PC-ABS	FDM	1 MHz–1 GHz	0.0076–0.0055	2.74–2.77
Polycarbonate	FDM	1 MHz–11 GHz	0.0076–0.0066	2.74–2.59
ABS-M30	FDM	1 MHz–11 GHz	0.0069–0.0098	2.63–2.60
Ultem 9085™ [18]	FDM	N/A	0.0040	3.00
DMX-SL 100	SLA	8.2 GHz–11 GHz	0.0115–0.0130	2.97–3.09
Prototherm 12120, thermal-cured	SLA	1 MHz–11 GHz	0.0171–0.0170	3.45–2.71
NanoForm	SLA	1 MHz–11 GHz	0.0131–0.0286	3.75–2.88
Prototherm 12120, UV-cured	SLA	1 MHz–11 GHz	0.0148–0.0368	3.68–2.93

Πίνακας 6: Είδη υλικών – μέθοδοι εκτυπώσεων – χαρακτηριστικά κατά την παρασκευή στοιχείων

4.2 Αγώγιμα υλικά

Είναι δυνατόν να υπάρξουν αγώγιμα υλικά τα οποία να δημιουργηθούν προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για εκτύπωση και κατασκευή μιας αγώγιμης διαδρομής εντός ενός κυκλώματος ραδιοσυχνοτήτων, το οποίο αποτελείται από ρητίνες, όντας διηλεκτρικό που λειτουργεί ως δομικό και χωρητικό μέσο για εξαρτήματα ραδιοσυχνοτήτων. Οι διεργασίες πυροσυσσωμάτωσης διαδραματίζουν βασικό ρόλο στον σχηματισμό μικροδομής των γραμμών λεπτής μεμβράνης τυπωμένου μετάλλου, όπως επίσης οι συσχετίσεις στις ηλεκτρικές, μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των τυπωμένων γραμμών λεπτής μεμβράνης.

Οι περισσότερες παραδοσιακές δομές κεραίας απαιτούν ένα αγώγιμο στοιχείο προκειμένου να διασυνδέονται με τη θύρα εισόδου και να παρέχουν συντονισμό. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αγώγιμων υλικών για Η/Μ εφαρμογές παραμένει ένα δύσβατο σημείο για ετερογενείς λόγους. Αγωγοί φτωχοί σε αγωγιμότητα, οι οποίοι είναι αποδεκτοί για τρισδιάστατα εκτυπωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, δεν είναι και απαραίτητα κατάλληλοι για εφαρμογές κεραίων, καθώς οι απώλειες επηρεάζουν σοβαρά την απόδοση της ακτινοβολίας. Ωστόσο, υπάρχουν και εμπορικά διαθέσιμα αγώγιμα νήματα τα οποία μπορεί να προσφέρουν κάποιες δυνατότητες, όπως το νήμα Multi3D ηλεκτροαγώγιμο με ειδική αντίσταση 0,006Ω. Για αμιγώς μεταλλικές κεραίες, οι ειδικοί μεταλλικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι μία εναλλακτική επιλογή. Αυτά μπορούν να εκτυπώσουν απευθείας τα μεταλλικά υλικά, όπως αλουμίνιο, χάλυβας, τιτάνιο και κοβάλτιο μέσω άμεσης πυροσυσσωμάτωσης με laser μετάλλων (DMLS).



Εικόνα 22: Κεραία μονόπολο τύπου Fractal, με χρήση μεταλλικής AM τεχνολογίας [6]

Για παράδειγμα, υπάρχει τρισδιάστατο εκτυπωμένο μονόπολο τύπου Fractal, που χρησιμοποιεί υλικά αγώγιμα τεχνικής AM, που έχει χαρακτηριστικά ακτινοβολίας υπερ – ευρείας ζώνης (ultra – wideband) και γεωμετρίες που θα ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας μεθόδους αφαιρετικής κατασκευής, δηλαδή από ένα μεγαλύτερο κομμάτι υλικού να περνάγαμε με την κατάλληλη επεξεργασία του στο επιθυμητό μικρότερο αποτέλεσμα. Η μεταλλική εκτύπωση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή κεραιών horn και κυματοδηγών στα 110 – 170 GHz, αν και η τραχύτητα της επιφάνειας και το ύψος του επιπέδου – στρώματος μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα σε μήκη κύματος υποχιλιοστών. Η μεταλλική εκτύπωση είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κατασκευή κεραιών χιλιοστόμετρων (mmWave) και THz, οι οποίες να απαιτούν περίπλοκες γεωμετρίες, τις οποίες οι παραδοσιακές τεχνικές δεν είναι σε θέση να επιτύχουν.

Για την εναλλακτική και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για την τρισδιάστατη εκτύπωση δύναται να εκτυπωθούν κατασκευές από εκτυπωτές τρισδιάστατης τεχνολογίας, χρησιμοποιώντας κανονικό νήμα ή ρητίνες και στη συνέχεια

επιστρώνονται τα διάφορα εξαρτήματα με αγωγίμα υλικά. Αυτό επιτρέπει στα περίπλοκα και λεπτομερή τρισδιάστατα σχήματα που σχετίζονται με τις τεχνικές κατασκευής πρόσθετων να ενσωματωθούν στις τεχνολογίες κεραιών, έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος υλικού από τις καθαρές μεταλλικές κεραίες και έχει επίσης άλλα πλεονεκτήματα όσον αφορά το βάρος. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές τεχνικές επίστρωσης για τη δημιουργία εξαρτημάτων ως αγωγίμα, και αυτά είναι:

1. Jet Metal Processing (JMT) – είναι δυνατόν να επιτύχει απόδοση συγκρίσιμη με τις κεραίες PEC στα 10 GHz και 30 GHz.
2. Επίστρωση με ψεκασμό αερολύματος με χρήση αγωγίμων χρωμάτων χαλκού
3. Επίστρωση με ψεκασμό αερολύματος με χρήση αγωγίμων χρωμάτων νικελίου
4. Βαφή με πινέλο με αγωγίμη βαφή ασημιού ηλεκτρολύματος

Επίσης τυπώθηκαν παραβολικοί καθρέφτες – κεραίες 3D επικαλυμμένοι με μέταλλο, ότι έχουν επίσης αποδειχθεί με τραχύτητα επιφάνειας κλίμακας νανομέτρων για εφαρμογές THz. Οι τεχνικές επιμετάλλωσης χαμηλού κόστους προσφέρουν σαφώς δυνατότητες για μαζική παραγωγή τρισδιάστατων εκτυπωμένων κεραιών χαμηλού κόστους για επικοινωνίες 5G, κυμάτων mm και THz.

Είναι βασικό στο σχεδιασμό και στην επιλογή υλικών για κατασκευές τρισδιάστατης εκτύπωσης να γνωρίζει καλά ο μηχανικός τις ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά και τις τιμές όλων των παραμέτρων, όπως και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των εκτυπωτών. Σύμφωνα με το άρθρο [7] των F. Pizzaro, R. Salazar, R. Rajo – Iglesias, M. Rodriguez, S. Fingerhuth, υπάρχουν πολλές επιλογές που δίνονται στους εμπορικούς εκτυπωτές για τη χρήση ρυθμίσεων και αγωγίμων νημάτων. Επιλέχθηκε το 1.75 χιλιοστών αγωγίμο νήμα με ειδική αντίσταση 0.006 Ωcm, ένα από

τα μεγαλύτερα μεγέθη στο εμπόριο. Προτεινόμενη τιμή θερμοκρασίας εκτύπωσης είναι ανάμεσα στα 140 και 160 βαθμούς C, και η ταχύτητα του εκτυπωτή ανάμεσα στα 14 και 45 mm/s.

Παρακάτω αποκαλύπτεται ένας πίνακας με κάποια αγώγιμα υλικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως νήματα για την τεχνολογία δημιουργίας εξαρτημάτων Ραδιοσυχνοτήτων (RF) από εκτυπωτές τρισδιάστατης προοπτικής. Αναλόγως των υλικών δίνεται και η αγωγιμότητα μετρούμενη σε Siemens, αλλά και η ειδική αντίσταση που έχει το καθένα, μετά την απόθεση από το ακροφύσιο.

3D Printing via Conductive Deposition		
material	resistivity ($\Omega \cdot m$)	conductivity (S/cm)
copper	1.678×10^{-8} (293 K)	5.959×10^5
gold	2.214×10^{-8} (293 K)	4.516×10^5
aluminum	2.650×10^{-8} (293 K)	3.773×10^5
mercury	96.1×10^{-8} (298 K)	1.04×10^4

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά αγώγιμων υλικών

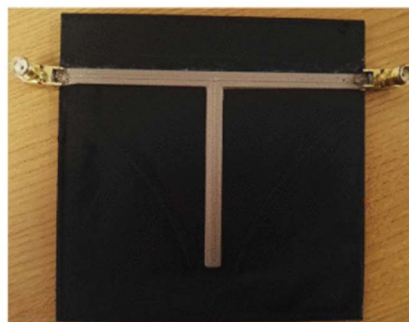
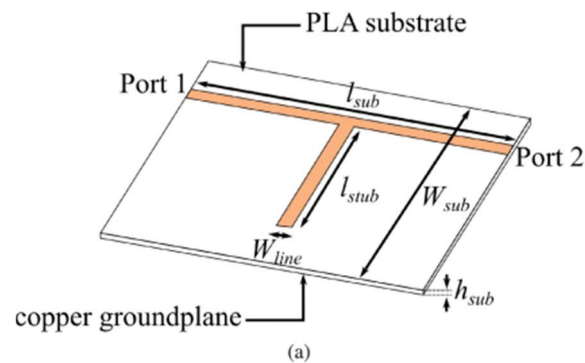
Δίνεται παράδειγμα, ο χαρακτηρισμός του αγώγιμου νήματος θα γίνει χρησιμοποιώντας μία τυπική μικροταινιακή γραμμή μεταφοράς (standard microstrip transmission line). Υπάρχει η ανάγκη για ένα επίπεδο – υπόστρωμα που να συγκρατεί το οποιοδήποτε αγώγιμο νήμα. Για το παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε το PLA 1,75 mm, όπως παρουσιάζεται και προηγουμένως. Η σχετική διαπερατότητά του, αφού θα χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα, χαρακτηρίζεται ως ϵ_r . Αποτελείται το παράδειγμα από ένα ανοιχτό αντηχείο μικροταινίας τετάρτου μήκους κύματος για την εκτίμηση διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{eff} του υποστρώματος αυτήν τη φορά, χρησιμοποιώντας

κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης του αντηχείου (Q – factor). Αρχικά υπολογίζεται το ε_{eff} χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{n \cdot c}{4 \cdot f_0 \cdot l_{stub}} \right)^2, n = 1, 3, 5 \dots (1)$$

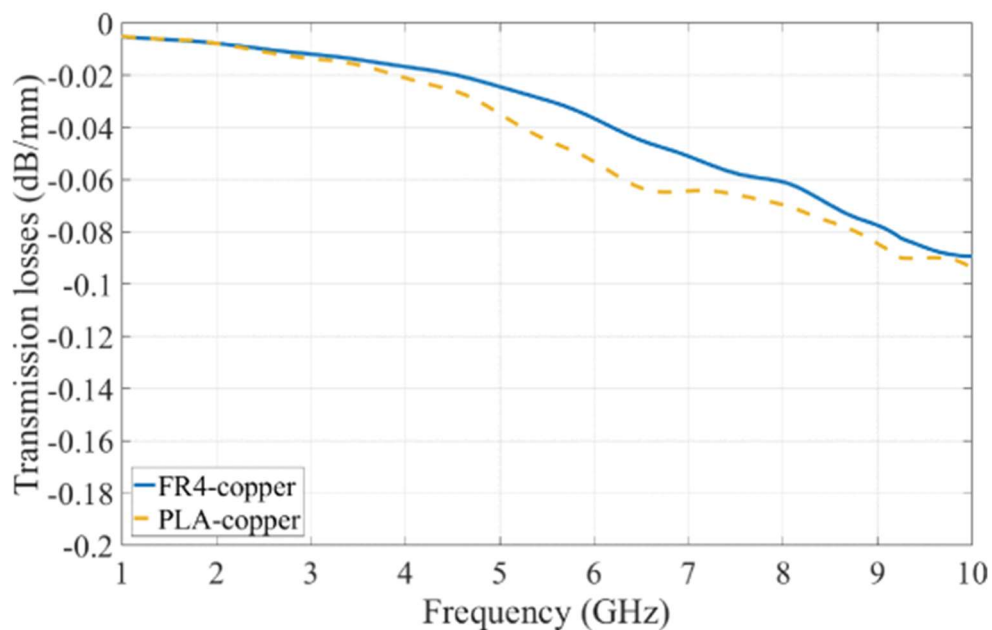
όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο, l_{stub} είναι το μήκος του στελέχους, και f_0 είναι η κεντρική συχνότητα του συντονιστή. Με τη χρήση κλασικών εξισώσεων σχεδιασμού μικροταινιών, μπορούμε να πάρουμε και τη σχετική διαπερατότητα ε_r .

Παρακάτω διακρίνεται κατασκευασμένη κεραία patch από εκτυπωτή τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα συμπεριλαμβάνοντας τη διάταξη του συντονιστή, την κάτοψη της κατασκευασμένης συσκευής, με τις διαστάσεις του εξαρτήματος να είναι $h_{sub}=1.7$ mm, $l_{sub} = W_{sub} = 100$ mm, $W_{line} = 4.5$ mm and $l_{stub}=58.5$ mm. Επιπρόσθετα δημιουργείται για την αποτελεσματική διαπερατότητα μιας δομής που διαθέτει το PLA και το αγωγίμο νήμα, ένας συντονιστής επίσης με αγωγίμο νήμα, προσδίδοντας ύψος στη γραμμή μικρολωρίδας περί του 1mm.



Εικόνα 23: Κεραία patch από εκτυπωτή τρισδιάστατης τεχνολογίας [7]

Για να εκτυπωθεί το αγωγίμο νήμα, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί ο 3D εκτυπωτής με τις συγκεκριμένες παραμέτρους για τη σωστή εναπόθεση.



Σχήμα 7: Σύγκριση παραδοσιακής μεθόδου παραγωγής – τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης [7]

Οι απώλειες μετάδοσης της γραμμής μεταφοράς αναφοράς μέσω του PLA και μία τυπικής γραμμής μικροταινιών χαραγμένη στο FR – 4, μετά από μετρήσεις.

4.3 Μεταϋλικά Τεχνολογίας Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Τα μεταϋλικά (metamaterials) είναι τεχνητά σχεδιασμένες περιοδικές δομές που μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν ιδιότητες που δεν βρίσκονται σε φυσικά απαντώμενα υλικά. Τα ηλεκτρομαγνητικά μεταϋλικά έχουν αποδειχθεί με στοιχεία αρνητικού δείκτη διάθλασης για εφαρμογές όπως η απόκρυψη. Τα μεταϋλικά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε πιο πρακτικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ασύρματης επικοινωνίας. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για περαιτέρω καινοτομία σε αυτόν τον τομέα, καθώς επιτρέπει τον συνδυασμό πολλαπλών υλικών σε πολύπλοκες δομές που θα δώσουν μια βέλτιστη απόκριση υλικού. Για παράδειγμα, ένα διηλεκτρικό μεταϋλικό σκακιέρας με ανισότροπες ιδιότητες εκτυπώθηκε τρισδιάστατα, χρησιμοποιώντας δύο διηλεκτρικά νημάτια υψηλής αντίθεσης. Οι συγγραφείς σε άλλη εφαρμογή 3D εκτύπωσαν ένα ευζωνικό μεταλλικό μικροκυμάτων με προσαρμοσμένη διαπερατότητα χρησιμοποιώντας το ηλεκτροαγώγιμο νήμα.

Κεφάλαιο 5

Αξιολόγηση Τεχνολογιών Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στα Εξαρτήματα Τηλεπικοινωνιών

Προκειμένου να στηριχθούν περισσότερο τα όσα προαναφέραμε, στον τομέα των τυπωμένων εξαρτημάτων ραδιοσυχνοτήτων, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η επιστημονική δράση δημιουργεί πρωτότυπα με σχετικά μεγάλες ταχύτητες.

Επίσης, στην πρόσφατη βιβλιογραφία, αναφέρονται μία σειρά από τρισδιάστατα εξαρτήματα Ραδιοσυχνοτήτων (RF) που θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με τεχνικές ΑΜ. Αυτό θα ξεδίπλωνε τις ιδιότητές τους και θα μπορούσε να ανοίξει ιδιαίτερα ευρύ πεδίο τόσο σχεδιασμού νέων δομών, που να βασίζονται σ'αυτά, όσο και απλής ενσωμάτωσης τους σε ήδη υπάρχουσες δομές.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε στην τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι ότι δεν γνωρίζουμε αν και κατά πόσο τα υλικά που περιέχονται στα εξαρτήματα που θα εκτυπωθούν, θα διατηρούν ή όχι τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες που αναμφισβήτητα θα διέθεταν αν δεν είχε λάβει χώρα η εκτύπωση. Αυτή είναι και η μεγαλύτερη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί, να διερευνηθεί, να μελετηθεί και να δοθούν απαντήσεις για την αντιμετώπιση της. Με αυτό το πρίσμα λοιπόν, πρέπει να προχωρήσει μία διερεύνηση των ιδιοτήτων και των παραμέτρων καθώς τι προβλήματα και μεταβολές μπορεί να παρουσιαστούν σε αυτές.

Με δεδομένο ότι για εκτυπωμένα διηλεκτρικά, πολύ μεγάλο ρόλο θα παίξει τόσο η διάσταση του πόρου καθώς και το μέγεθος του κόκκου σε διάφορα υλικά εκτύπωσης και με επιπρόσθετο δεδομένο ότι μεγάλο ρόλο παίζουν και οι συνθήκες επεξεργασίας, θα πρέπει τόσο να βελτιώσουμε την τιμή της αγωγιμότητας όσο και να στρέψουμε την έρευνα σε μεθόδους και τεχνικές που θα μας επιτρέψουν να πετύχουμε αυτή την τιμή. Αυτό προφανώς θα επιτευχθεί με μία αλληλουχία πειραμάτων που θα στοχεύει στο να βελτιστοποιήσει τα υλικά όσον αφορά στις προηγούμενες παραμέτρους. Το τι ρόλο θα παίξει η μεταβολή των διαστάσεων στις μεταβολές των παραμέτρων αγωγιμότητας και διαπερατότητας θα είναι ένα σημαντικός τομέας στον οποίο θα πρέπει να δραστηριοποιηθεί η μηχανική των υλικών. Ο στόχος, πάντα, είναι να πετύχουμε, σε διηλεκτρικά που έχουν εκτυπωθεί, τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα ανά μονάδα μάζας.

Για τα πολυμερή σύνθετα υλικά βραχείας αλυσίδας, με την προϋπόθεση ότι μπορούν να εκτυπωθούν, γνωρίζουμε ότι διαθέτουν σχετικά μικρή τιμή διηλεκτρικής σταθεράς. Αν θέλουμε να κρατήσουμε τις απώλειες σε κάτω από 5% και παράλληλα τις τιμές της διαπερατότητας ώστε $\mu < 2,5$ είτε $\mu > 10$, ίσως ο τρόπος θα ήταν, μικρά πρόσθετα χαμηλών απωλειών με τα οποία θα συντονίζαμε την διαπερατότητά τους. Έτσι θα επιτυγχάναμε μείωση στην τελική απώλεια του εξαρτήματος RF.

Ο στόχος του να κατασκευαστούν λεπτά φιλμ υλικών με υψηλές μαγνητικές διαπερατότητες (μ) σε υψηλές συχνότητες δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί με τις παραδοσιακές τεχνικές.

Έχουμε όμως ορισμένες νέες εκτυπώσεις μαγνητικών υλικών, στοιχείων των συντονιζόμενων πυκνωτών, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως επαγωγείς

ή κυκλοφορητές, τα οποία και είναι αρκετά λεπτά και δίνουν ελπίδες γύρω από τη συμπεριφορά τους ως προς τη διαπερατότητα. Οι σύγχρονες, επίσης, εξελίξεις στο BST (Τιτανικό στρόντιο βάριο) μας αφήνουν αρκετά περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης.

Παρόλα αυτά οι τάσεις (voltages) για τη λειτουργία τους είναι ακόμα αρκετά υψηλές. Όλα δείχνουν, ότι μία δραστική μείωση της τάσης ενεργοποίησης πρέπει να επιτευχθεί. Αυτό θα μπορούσε να λυθεί, αν ο σχεδιασμός και η λειτουργία γίνονταν σε συνθήκες συντονισμού.

Αυτά αφορούν στα κύρια δομικά στοιχεία Ραδιοσυχνοτήτων (RF), συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων και των διηλεκτρικών. Εάν η Κατευθυνόμενη Γραφή (Direct Write -DW) πρόκειται να σχετιστεί με κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων, ίσως είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν διακόπτες, όπως MEMS ή άλλα υλικά αλλαγής φάσης που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως αναδιαμορφώσιμα ηλεκτρονικά για εφαρμογές συστοιχίας φασικής σύνθεσης.

Θα μας ενδιέφεραν κάποιες δομές τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες όμως να ενεργοποιούνται με έναν εξωτερικό μηχανισμό. Αυτές παίζουν μεγάλο ρόλο σε εφαρμογές στις οποίες είναι σημαντικό να σμικρυνθεί το μέγεθος. Θέλουμε δηλαδή, εξαρτήματα τα οποία να έχουν μικρό μέγεθος, όσον αφορά στην αποθήκευση, αλλά να ξεδιπλώνουν το πλήρες φάσμα των ιδιοτήτων τους καθώς και λειτουργικότητα κατά τη χρήση. Μερικές κεραίες που χρησιμοποιούν τετραδιάστατη εκτύπωση, έχουν ήδη παρουσιαστεί, και φαίνονται πολλά υποσχόμενες. Εδώ, θα μπορούσαμε να βελτιώσουμε τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των πειραμάτων.

Πολλά υπόσχονται, επίσης, στον τομέα της σύνθεσης νανοσωλήνων άνθρακα, τόσο ο αυτόνομος προγραμματισμός όσο και η μηχανική μάθηση. Στις εργασίες παραγωγής πλήρους κλίμακας μέσω ρομποτικής και ειδικά όταν έχουμε μετάβαση από κλίμακα σε κλίμακα της τάξεως των nm έως cm καθώς και στη συναρμολόγηση του τελικού προϊόντος, κρίνεται ως απαραίτητο να αυτοματοποιήσουμε τις σχετικές διαδικασίες.

Η συνεργασία με τη βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών, θα μπορούσε να αυξήσει την ταχύτητα παραγωγής αν είχαμε μία αλλαγή στις μεταβλητές που σήμερα ισχύουν και που, ως τώρα, δεν επιτρέπουν κάτι τέτοιο.

Τέλος, η ανάπτυξη υλικών μελανιών και ρητινών, με προσαρμοσμένες έτσι τις ιδιότητές τους ώστε να μπορούν πάνω τους να εφαρμοστούν ραδιοσυχνότητες, είναι ένας τομέας που θα μπορούσε να αναπτυχθεί πολύ.

Η τελική παραγωγή τόσο κεραιών όσο και εξαρτημάτων ραδιοσυχνοτήτων υψηλής απόδοσης δεν μπορεί, και δεν πρέπει, να είναι αντικείμενο μιάς μόνο επιστημονικής κατεύθυνσης αλλά προϊόν συντονισμένης επιστημονικής δράσης και συνεργασίας. Μ' αυτόν μόνο τον τρόπο, το τελικό προϊόν θα μπορούσε να διακριθεί σε στιβαρότητα, αξιοπιστία και λειτουργικότητα.

Αυτές είναι οι κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η παραγωγή και εκτύπωση τόσο των AM όσο και DW για κεραιές και εξαρτήματα ραδιοσυχνοτήτων RF. Επιζητούμε τη μείωση των απωλειών στις ιδιότητες των υλικών, κατά τις διαδικασίες, οι οποίες απώλειες, σήμερα, δεν μας επιτρέπουν την ακόμη ευρύτερη χρήση.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Με τη διαφαινόμενη ανάπτυξη των τεχνολογιών 6G, που ήδη μελετάται, νέοι δρόμοι ανοίγονται. Η έρευνα έχει υποχρέωση να στραφεί προς τις νέες αυτές κατευθύνσεις μιας και η νέα τεχνολογία που ξεπερνά το 5G θα φέρει χαμηλότερο κόστος αλλά και έμφαση στη λεπτομέρεια των κατασκευών. Υπάρχει μεγάλο διεθνές ενδιαφέρον για το τι επαναστατικές βελτιώσεις θα φέρει τόσο στη μελέτη όσο και στον πειραματισμό που θα αφορά στο να παραχθούν μεγαλύτερα ή πιο μικρά εξαρτήματα κεραιοσυστημάτων.

Όλα δείχνουν ότι η Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling - FDM) και η Στερεολιθογραφία (Stereolithography – SLA) θα επιταχύνουν κατά πολύ την εξειδικευμένη κατασκευή, και μάλιστα με χαμηλότερο κόστος, νέων προσθέτων κεραιών για ασύρματα δίκτυα. Μπορούμε να φανταστούμε και πόσο θα μπορούν να βελτιωθούν οι φωτονικοί εκτυπωτές νανοκλίμακας (κλίμακα 10^{-9} m) όπως και η μεταλλική 3D εκτύπωση. Εκτιμάται ότι η τεχνολογία παραγωγής-κατασκευής προσθέτων θα απογειωθεί όσο τα συστήματα επικοινωνιών βαδίζουν προς όλο και πιο υψηλές συχνότητες. Αυτό, γίνεται εύκολα αντιληπτό, θα έχει και το αντίστοιχο αντίκτυπο στην εξειδικευμένη βιομηχανία.

Βιβλιογραφία (Αγγλική γλώσσα)

- [1] Muhammad Zeeshan Asghar, Shafique Ahmed Memon and Jyri Hamalainen, 2022. "Evolution of Wireless Communication to 6G: Potential Applications and Research Directions" 14(10):6356, CC BY 4.0. <http://dx.doi.org/10.3390/su14106356>
- [2] Nokia Company, 2019. «5G use cases and requirements» https://www.ramonmillan.com/documentos/bibliografia/5GUseCases_Nokia.pdf
- [3] Peter Butovitsch, David Astely, Anders Furuskar, Bengt Goransson, Brigid Hogan, Jens Karlsson and Elin Larsson, 2021. "Advanced antenna systems for 5G networks" *Ericsson Company*, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>
- [4] Eva S. Rosker, Ravi Sandhu, Jimmy Hester, Mark S. Goorsky and Jesse Tice, 2018. "Printable Materials for the Realization of High-Performance RF Components: Challenges and Opportunities" *International Journal of Antennas and Propagation*, vol.2018, Article ID 9359528, 19 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/9359528>
- [5] Irene O. Saracho-Pantoja, José R. Montejó-Garai, Jorge A. Ruiz-Cruz and Jesús M. Rebollar, 2018. "Additive Manufacturing of 3D Printed Microwave Passive Components" DOI: 10.5772/intechopen.74275, <https://www.intechopen.com/chapters/59538>
- [6] Harry Giddens and Yang Hao, 2020. "An Overview of 3D Printed Antennas for 5G Communications and Beyond" *IEEE Future Networks Tech Focus*, Vol. 4, issue 1, November 2020, Queen Mary University of London, <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/november-2020/an-overview-of-3d-printed-antennas-for-5g-communications-and-beyond>
- [7] Francisco Pizarro, Rolando Salazar, Eva Rajo – Iglesias, Mauricio Rodriguez and Sebastian Fingerhuth, 2019. "Parametric Study of 3D Additive Printing Parameters Using Conductive Filaments of Microwave Topologies" CC BY 4.0, *IEEE Access* 7:1-1, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932912>
- [8] Anutusha Dogra, Rakesh Kumar Jha and Shubha Jain, 2020. "A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies" *IEEE Access* PP(99):1-1, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031234>
- [9] Jonathan Rodriguez, 2015. "Fundamentals of 5G Mobile Networks" *Wiley publications*, 336 pages, ISBN: 978-1-118-86752-5

- [10] Patrick Marsch, Omer Bulakci, Olav Queseth, Mauro Boldi, 2018. "5G System Design: Architectural and Functional Considerations and Long Term Research" *Wiley publications*, 608 pages, ISBN: 978-1-119-42512-0
- [11] Biljana Badic, Christian Drewes, Ingolf Karls and Markus Mueck, 2016. "Rolling out 5G: use cases, applications, and technology solutions" *Apress Media LLC*, New York, 134 pages, <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1506-7>
- [12] Jyrki T.J. Penttinen, 2019. "5G Explained: Security and Deployment of Advanced Communications" *Wiley publications*, 328 pages, ISBN: 978-1-119-27568-8
- [13] Najmul Hassan, Kok – Lim Alvin Yau, Celimuge Wu, 2019. "Edge Computing in 5G: A Review" *Topic: Mobile Edge Computing and Mobile Cloud Computing: Addressing Heterogeneity and Energy Issues of Compute and Network Resources*, pp. 127276 – 127289, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938534>
- [14] Gregory Mitchell and David Turowski, 2020. "Additive Manufacturing for Antenna Applications" <https://doi.org/10.5772/intechopen.92363>
- [15] Leonardo Hernandez, Yuxiao He, Amanpreet Kaur, John Papapolymerou and Premjeet Chahal, 2017. "Low-loss RF filter through a combination of additive manufacturing and thin-film process" *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp 114-116, <https://doi.org/10.1109/RWS.2017.7885961>
- [16] Ma Hanqing, Wang Dong, Shi Junfeng and Tian Jiang, 2016. "A wideband 45 degree polarized electrical scanning antenna array manufactured by 3D printing with metals" *CIE International Conference on Radar (RADAR)*, Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an China, <https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059418>
- [17] Chietera Francesco Paolo, Riccardo Colella and Luca Catarinucci, 2021. "Dielectric Resonators Antennas Potential Unleashed by 3D Printing Technology: A Practical Application in the IoT Framework" *Electronics 11*, no 1:64, <https://doi.org/10.3390/electronics11010064>
- [18] Frédéric Bongard, Martin Gimersky, Stephen Doherty, Xavier Aubry and Mikaël Krummen, 2017. "3D – printed Ka – band Waveguide Array Antenna for Mobile SATCOM Applications" *Viasat Antenna Systems SA*, Lausanne, Switzerland, Corpus ID 21083418 <https://doi.org/10.23919/EUCAP.2017.7928705>
- [19] Helena Diogo, Ramos Amelia, Varum Tiago and Matos Joao, 2021. "The Use of 3D Printing Technology for Manufacturing Metal Antennas in the 5G/IoT Context" *Sensors*; 21(10):3321. <https://doi.org/10.3390/s21103321>

[20] Gregory Kiesel, Philip Bowden, Kevin Cook, Matt Habib, Jeramy Marsh, David Reid, Cameron Phillips and Brad Baker, 2017. "Practical 3D Printing of Antennas and RF Electronics" Georgia Tech Research Institute, Corpus ID 54587511. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1041830.pdf>

[21] Min Liang, Junqiang Wu, Xiaoju Yu and Hao Xin, 2016. "3D printing technology for RF and THz antennas." *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 536 – 537. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7821190>

[22] Corey Shemelya, Michael Zemba, Min Liang, David Espalin, Craig Kief, Hao Xin, Ryan Wicker and Eric MacDonald, 2015. "3D printing multi – functionality: Embedded RF antennas and components" *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2015*, Article ID 7228805, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7228805/authors#authors>

Βιβλιογραφία (Ελληνική γλώσσα)

[1] Αλέξανδρος Καλτσής Μεταπτυχιακή Διατριβή «Τρισδιάστατη εκτύπωση & στρατιωτικές εφαρμογές» Πολυτεχνείο Κρήτης – Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων, 2017