ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάπτυξη μετρητικής διάταξης διαγράμματος ακτινοβολίας Μικροταινιακών Κεραιών»

“Design and development of a radiation pattern measurement device for Microstrip Antennas”

Αντώνιος Καράλης

ΤΛ20258

Επιβλέπων: Δρ. Ανάργυρος Μπακλέζος

Επικ. Καθηγητής ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Χανιά, Ιούλιος 2026

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάπτυξη μετρητικής διάταξης διαγράμματος ακτινοβολίας Μικροταινιακών Κεραιών»

“Design and development of a radiation pattern measurement device for Microstrip Antennas”

Αντώνιος Καράλης

ΤΛ20258

Επιβλέπων: Δρ. Ανάργυρος Μπακλέζος

Επικ. Καθηγητής ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Ιουλίου 2026.

(Υπογραφή)	*(Υπογραφή)*	*(Υπογραφή)*
.....	.....	.....
Δρ. Ανάργυρος Μπακλέζος	Δρ. Χρήστος Νικολόπουλος	Δρ. Ιωάννης Βαρδιάμπασης
Επίκουρος Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής	Καθηγητής Α’ Βαθμίδας
ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.	ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.	ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Χανιά, Ιούλιος 2026

Copyright ©Αντώνιος Καράλης, 2026.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

(Υπογραφή)

…….

Αντώνιος Καράλης

Ηλεκτρονικός Μηχανικός ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάπτυξη μετρητικής διάταξης διαγράμματος ακτινοβολίας Μικροταινιακών Κεραιών»

“ Design and development of a radiation pattern measurement device for Microstrip Antennas”

ΤΛ20258

Αντώνιος Καράλης

Επιβλέπων: Δρ. Ανάργυρος Μπακλέζος

Επικ. Καθηγητής ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Χανιά, Ιούλιος 2026

Αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία στην οικογένειά μου, για την αμέριστη αγάπη, την αδιάκοπη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε κάθε βήμα της πορείας μου.

Πρόλογος

Για την παρούσα διπλωματική εργασία η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της φοίτησής μου στο Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστήμιου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Ανάργυρο Μπακλέζο για την αποδοχή, την επίβλεψη της, καθώς επίσης και την άρτια καθοδήγηση του στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου οι οποίοι με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια μένοντας δίπλα μου και ενθαρρύνοντας με να πετύχω τους στόχους μου , τόσο των σπουδών μου όσο και της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου, με ενθάρρυναν και πίστεψαν στις δυνατότητές μου, συμβάλλοντας με τον δικό τους τρόπο στην ολοκλήρωση αυτού του σημαντικού στόχου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στους φίλους μου και στους κοντινούς μου ανθρώπους, οι οποίοι με στήριξαν ψυχολογικά στις δύσκολες στιγμές και συνέβαλαν στη διατήρηση της ισορροπίας κατά τη διάρκεια της απαιτητικής αυτής διαδικασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου προς το διδακτικό προσωπικό του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, οι οποίοι μου μετέδωσαν τις γνώσεις της επιστήμης των ηλεκτρονικών και συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση της επιστημονικής και επαγγελματικής μου σκέψης ως μηχανικός .

Χανιά, Ιούλιος 2026

Αντώνιος Καράλης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη, τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας μετρητικής διάταξης για την πειραματική καταγραφή του διαγράμματος ακτινοβολίας κεραιών με έμφαση στις τύπου μικροταινιακές .

Ως προς τη δομή, αρχικά παρουσιάζεται η ιστορία των κεραιών, οι βασικές εφαρμογές τους καθώς και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Στη συνέχεια, αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μικροταινιακών κεραιών, οι παράμετροι ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική τους αξιολόγηση, καθώς και η σημασία του διαγράμματος ακτινοβολίας για τον χαρακτηρισμό της κατευθυντικότητας και της απόδοσής τους.

Έπειτα γίνεται αναφορά στο Vector Network Analyzer συνοδευόμενη από χρήσιμες τεχνικές πληροφορίες για τη λειτουργία του. Παράλληλα, παρουσιάζονται αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της διάταξης, η διαδικασία συναρμολόγησης, τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα. Τέλος γίνεται λεπτομερής επεξήγηση κάθε γραμμής κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Arduino και Python

Η αυτοματοποιημένη περιστροφική διάταξη που αναπτύχθηκε επιτρέπει την σταθερή και με ακρίβεια περιστροφή της κεραίας καθώς και τη λήψη μετρήσεων ακτινοβολίας στο χώρο σε πλήρη κύκλο 360°, με δυνατότητα ελάχιστης γωνίας περιστροφής 0,2°. Η διάταξη συνεργάζεται με διανυσματικό αναλυτή δικτύου (VNA- Cobalt series C4420 της *Copper Mountain*),για τη λήψη σήματος από τη μικροταινιακή κεραία και τη δημιουργία διαγράμματος ακτινοβολίας. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε υλοποιεί την επικοινωνία Arduino–υπολογιστή–VNA, αυτοματοποιεί τη διαδικασία λήψης , οργανώνει τα δεδομένα και τα αποθηκεύει για περαιτέρω ανάλυση. Επειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα αντίστοιχα πολικά διαγράμματα και η αξιολόγηση της ακτινοβολιακής συμπεριφοράς των πειραματικών μετρήσεων

Επιπλέον, περιλαμβάνεται επιπρόσθετος κώδικας για τη μέτρηση της απόδοσης της κεραίας ως προς τη συχνότητα, χωρίς τη χρήση της περιστροφικής διάταξης. Μετά την εκτέλεση του, παράγεται το αντίστοιχο διάγραμμα, ενώ τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχείο μορφής CSV

Λέξεις Κλειδιά: Arduino Uno, Βηματικό μοτέρ, Τρισδιάστατη εκτύπωση, Μικροταινιακές κεραίες, Διάγραμμα ακτινοβολίας, Μετρητική διάταξη, Διανυσματικός αναλυτής δικτύου Κατευθυντικότητα, Κέρδος κεραίας.

Abstract

This diploma thesis focuses on the study, design, and implementation of an automated measurement system for the experimental acquisition of antenna radiation patterns, with emphasis on microstrip antennas.

The thesis begins with an overview of the historical development of antennas, their fundamental applications, as well as the advantages and limitations of microstrip antenna technology. Subsequently, the basic operating principles of microstrip antennas are analyzed, along with the key radiation parameters used for their quantitative evaluation. Particular emphasis is placed on the radiation pattern as a critical tool for assessing antenna directivity and performance.

A detailed description of the Vector Network Analyzer (VNA) is provided, including essential technical information regarding its operation. Furthermore, the materials used for the construction of the measurement setup are presented, along with the assembly procedure and the experimental methodology. The developed system consists of an automated rotational platform capable of precise and stable antenna positioning, enabling full 360° measurements with a minimum angular resolution of 0.2°.

The measurement setup is integrated with a Vector Network Analyzer (VNA – Cobalt Series C4420, Copper Mountain Technologies) to acquire signal data from the microstrip antenna and generate the corresponding radiation patterns. Custom software developed in Arduino and Python enables seamless communication between the hardware components, automates the data acquisition process, and ensures efficient data organization and storage for further analysis.

The experimental results are presented in the form of polar diagrams, followed by a comprehensive evaluation of the antenna radiation characteristics. Additionally, a supplementary measurement procedure is implemented to evaluate antenna performance as a function of frequency, without the use of the rotational system. The corresponding results are visualized graphically and stored in CSV format for further processing.

Keywords: Arduino Uno, Stepper Motor, 3D Printing, Microstrip Antennas, Radiation Pattern, Measurement Setup, Vector Network Analyzer (VNA), Directivity, Telecommunications, Antenna Performance, Antenna Gain.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή 1

1.1 Ιστορική Εξέλιξη 2

1.2 Ιστορική εξέλιξη μικροταινιακής κεραίας 4

2 Βασικά χαρακτηριστικά Κεραίας 7

2.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας 8

3 Κεραία Τύπου Μικροταινίας 11

3.1 Εφαρμογές 13

3.2 Μειονεκτήματα 14

3.3 Πλεονεκτήματα 14

4 Λειτουργική ανάλυση μετρητικής διάταξης 1

4.1 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου 1

4.1.1 Copper Mountain Technologies VNA C4420 3

4.2 Εξαρτήματα και Υλικά 3

4.3 Συναρμολόγηση μετρητικής διάταξης 8

5 Μετρητική Διάταξη 15

5.1 Ανάλυση λειτουργίας Python κώδικα 18

5.2 Σχολιασμός κώδικα Python 21

5.3 Ανάλυση λειτουργίας Arduino κώδικα 25

5.4 Σχολιασμός Arduino κώδικα 27

5.5 Ανάλυση λειτουργίας Python κώδικα μέτρησης $S33$ 28

5.6 Σχολιασμός κώδικα Python μέτρησης $S33$ 30

5.7 Σχολιασμός κώδικα Python μέτρησης $S44$ 33

6 Μετρήσεις και Συμπεράσματα 35

6.1 Αποτελέσματα $S33$ 35

6.2 Αποτελέσματα $S34$ 40

7 Βιβλιογραφία 47

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 49

Π.1 Κώδικας Python 49

Π.2 Κώδικας Arduino 52

Π.3 ΚΩΔΙΚΑΣ PYTHON S33_MEASUREMENT 53

Π.4 ΚΩΔΙΚΑΣ PYTHON S44 MEASUREMENT 55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 Εισαγωγή

Στην απλούστερη μορφή της μια κεραία (antenna) είναι μια μεταλλική διάταξη (συνήθως υπό μορφή ράβδου ή σύρματος),κατάλληλη για την εκπομπή και λήψη ραδιοκυμάτων. Η κεραία είναι βασικό στοιχείο των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, καθώς έχει τον κρίσιμο ρόλο να μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα και αντίστροφα [1].

Επιπρόσθετα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να κατευθύνει την ενέργεια ακτινοβολίας σε ορισμένες κατευθύνσεις και να την ελαχιστοποιεί σε κάποιες άλλες. Επομένως, η κεραία δε πρέπει να λειτουργεί μόνο σαν λήπτης σήματος αλλά και σαν κατευθυντική διάταξη ώστε να μπορεί να καλύπτει τις απαιτήσεις οποιαδήποτε εφαρμογής. Για να το καταφέρει αυτό η κεραία διαμορφώνεται αναλόγως. Μπορεί να έχει μορφή φακού, αγώγιμου σύρματος, ανοίγματος, λωρίδας, ανακλαστήρα , διάταξης συνδεδεμένων στοιχείων(στοιχειοκεραία), κ.λπ. [1][2]

Εάν δεν υπήρχε η κεραία, η μετάδοση ή η λήψη σήματος στον ελεύθερο χώρο θα ήταν αδύνατη. Από τις πρώτες εφαρμογές της ραδιοφωνίας μέχρι και τα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things-IoT), οι κεραίες κατέχουν πρωταγωνιστικό ρόλο σε κάθε τμήμα τεχνολογίας που κάνει χρήση της μετάδοσης πληροφορίας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.[1][3]

Η μελέτη των κεραιών βασίζεται και διαθέτει ένα μεγάλο φάσμα θεμάτων, από τη θεωρία ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και τις εξισώσεις του Maxwell, μέχρι τη σχεδίαση, την υλοποίηση και τη μέτρηση των χαρακτηριστικών τους. Για τις επιδόσεις μιας κεραίας χρησιμοποιείται το διάγραμμα ακτινοβολίας, το οποίο απεικονίζει τη χωρική κατανομή της ισχύος ή του ηλεκτρικού πεδίου που εκπέμπεται ή λαμβάνεται από την κεραία.[1]

Ορισμένοι τύποι κεραιών που χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών στις ασύρματες επικοινωνίες είναι οι κεραίες σύρματος, οι κεραίες ανοίγματος, οι στοιχειοκεραίες, οι κεραίες ανακλαστήρα, οι φακοειδής κεραίες καθώς και οι κεραίες μικροταινίας. [2]

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, μελετάται η τεχνολογία των κεραιών με έμφαση στην πρακτική πλευρά της μέτρησης των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας και συγκεκριμένα, αναπτύσσεται μετρητική διάταξη για την πειραματική καταγραφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μικροταινιακών κεραιών. Η εργασία στοχεύει να γεφυρώσει τη θεωρητική γνώση με την εφαρμογή, μέσω της κατασκευής και αξιολόγησης ενός λειτουργικού συστήματος μέτρησης.

1.1 Ιστορική Εξέλιξη

Η ιστορία των κεραιών ξεκινά όταν ο James Clerk Maxwell, συνδύασε τις θεωρίες του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού και θεμελιώνοντας διεθνώς τη σχέση τους μέσω ενός συστήματος πολύ σημαντικών εξισώσεων, γνωστές σε όλο το κόσμο και ως *εξισώσεις Maxwell (σε διαφορική μορφή) :*

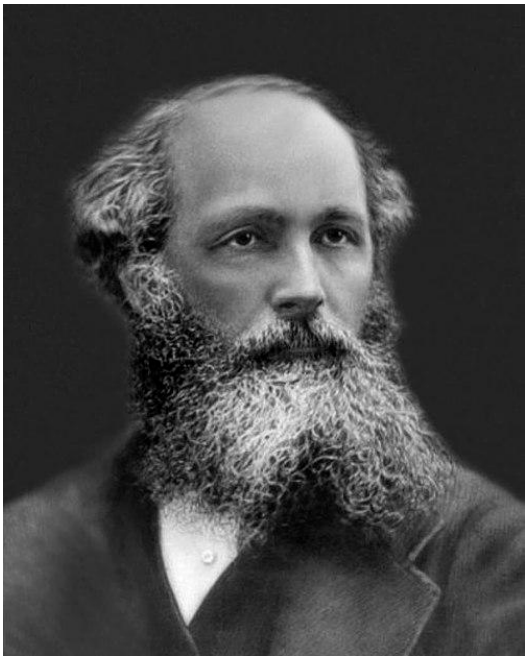
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \text{ (Νόμος Gauss, ηλεκτρικό πεδίο)}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Νόμος Gauss, μαγνητικό πεδίο)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (Νόμος επαγωγής του Faraday)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \text{ (Νόμος Ampere-Maxwell)}$$

Το σημαντικό αυτό έργο πάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό ολοκληρώθηκε και δημοσιεύτηκε το 1873 . Ο Maxwell απέρριψε το «σίγουρο» της τότε εποχής και απέδειξε στους πάντες ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο και ότι τόσο το φως όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσω κυματικών διαταραχών της ίδιας ταχύτητας.[1]



Εικόνα 1 - James Clark Maxwell [4]

Μετά από 13 χρόνια, ο καθηγητής Heinrich Rudolph Hertz στο εργαστήριο του παρουσίασε το πρώτο ασύρματο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα όπου μπόρεσε να παράγει σπινθήρα σε μήκος κύματος περίπου 4 m στο διάκενο ενός δίπολου εκπομπής λ/2, ο οποίος μπόρεσε και ανιχνεύθηκε ως σπινθήρας στο διάκενο σε ένα κοντινό βρόχο. Για να γίνει εκπομπή σήματος σε μεγαλύτερη απόσταση πέρασαν 15 χρόνια, στο μακρινό 1901 όπου Guglielmo Marconi πραγματοποίησε την

πρώτη στα χρονικά διατλαντική εκπομπή συνδέοντας το Poldhu(νότια Μ. Βρετανία) με την πρωτεύουσα St.John's της καναδικής επαρχίας Newfoundland. Για την εκπομπή του σήματος χρησιμοποιήθηκε μια κεραία αποτελούμενη από 50 κατακόρυφα σύρματα που είχαν την μορφή βεντάλιας και είχαν γειωθεί στο έδαφος μέσω ενός πομπού σπινθήρα. Τα σύρματα ήταν στηριγμένα οριζόντια με συρμάτινο ικρίωμα προσδεμένο σε δύο ξύλινους στύλους ύψους 60 m. Για τη λήψη του σήματος χρησιμοποιήθηκε μια κεραία λήψης όπου αποτελούνταν από ένα τεντωμένο σύρμα 200 m, στερεωμένο σε μία διάταξη που έμοιαζε με με χαρταετό. Το γεγονός αυτό σηματοδότησε την έναρξη της εποχής των κεραιών.[1][5]



Εικόνα 2 - Heinrich Rudolf Hertz [6]



Εικόνα 3 - Guglielmo Marconi [7]

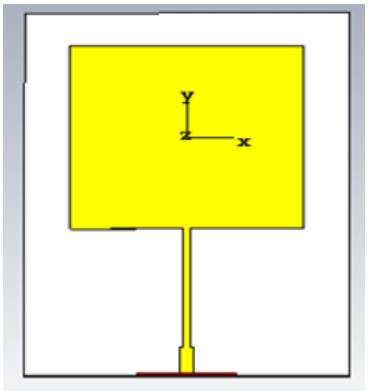
Από το 1901 έως και τη δεκαετία του 1940, η τεχνολογία των κεραιών είχε εστιάσει εξ΄ ολοκλήρου σε συρμάτινα στοιχεία ακτινοβολίας και σε συχνότητες έως UHF(Ultra High Frequency). Ο Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος οδήγησε στην έναρξη της ταχείας ανάπτυξης της τεχνολογίας και την παρουσίαση νέων στοιχείων ακτινοβολίας (ανοίγματα κυματοδηγών, χοάνες και ανακλαστήρες). Ένας παράγοντας που συνέβαλε στην εξέλιξη της τεχνολογίας των κεραιών ήταν η εφεύρεση των μικροκυματικών πηγών (όπως οι klystron και magnetron) με συχνότητες άνω του 1 GHz.[1]

Ακριβώς όπως ο Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος σηματοδότησε την έναρξη μιας νέας εποχής για τις κεραίες, παρόμοια επιρροή είχαν και οι εξελίξεις στην αρχιτεκτονική και την τεχνολογία των υπολογιστών . Από το 1960 έως τη δεκαετία του 1990 είχε σημαντικότατη εξέλιξη της τεχνολογίας των σύγχρονων κεραιών και αυτή η ταυτόχρονη πρόοδος συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Η ανάπτυξη ποικίλων αριθμητικών μεθόδων κατά τη δεκαετία του 1960 κατέστησαν εφικτή την επαρκή ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων πολύπλοκων κεραιών [1]

Στο παρελθόν η σχεδίαση των κεραιών δεν θεωρούνταν τόσο σημαντικό τμήμα στη σχεδίαση ενός ολοκληρωμένου συστήματος, σε σχέση με σήμερα όπου κατέχει κυρίαρχο ρόλο. Στη πραγματικότητα, η σχεδίαση και η επίδοση της κεραίας καθορίζει την επιτυχία πολλών συστημάτων. Επιπλέον, ενώ παλαιότερα η τεχνολογία των κεραιών ήταν ένα στην πραγματικότητα ένα πείραμα στο οποία που δε μπορούσε να γίνει πρόβλεψη για την επιτυχία ή το λάθος, σήμερα είναι μία πραγματική εφαρμοσμένη επιστήμη. Οι μέθοδοι ανάλυσης και σχεδίασης έχουν αναπτυχθεί σε βαθμό που να επιτρέπουν τη θεωρητική πρόβλεψη της επίδοσης μιας κεραίας με πολύ μεγάλη ακρίβεια, δημιουργώντας ένα αίσθημα εμπιστοσύνης και ασφάλειας. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα, μετά από την αρχική σχεδίαση κατασκευάζεται απευθείας το πρωτότυπο της κεραίας, χωρίς ενδιάμεσο έλεγχο.[1]

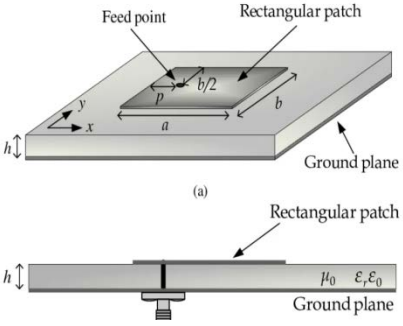
1.2 Ιστορική εξέλιξη μικροταινιακής κεραίας

Κατά τη δεκαετία του 1970 πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα βασικά βήματα στον χώρο των μικροταινιακών κεραιών, με την ανάπτυξη δύο θεμελιωδών τεχνικών τροφοδότησης το Edge-fed patch, όπου η τροφοδοσία γίνεται από το άκρο της κεραίας, και το Probe-fed patch, όπου χρησιμοποιείται ένας ειδικός συνδετήρας (probe) που τροφοδοτεί απευθείας το patch.[2][8][9]



Εικόνα 4 - Edge-fed patch [10]

]

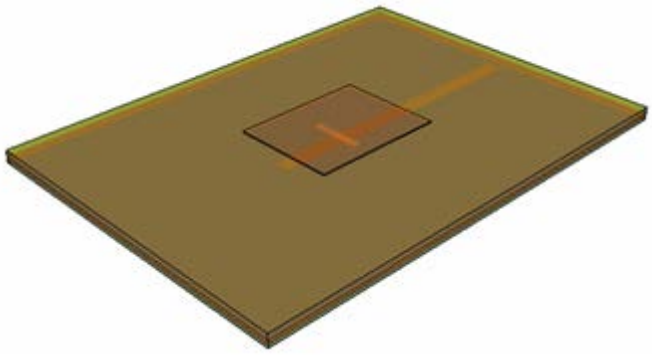


Εικόνα 5 - Probe-fed patch [11]

Αυτές οι τεχνικές αποτέλεσαν τη βάση της τεχνολογίας των μικροταινιακών κεραιών, επιλύοντας αρχικά προβλήματα ενεργοποίησης και προσαρμογής. Στη συνέχεια, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στον πειραματισμό με διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα πέρα από τα κλασικά ορθογώνια και κυκλικά, επιδιώκοντας την κατασκευή πιο συμπαγών και αποδοτικών σχεδιάσεων.[2][9]

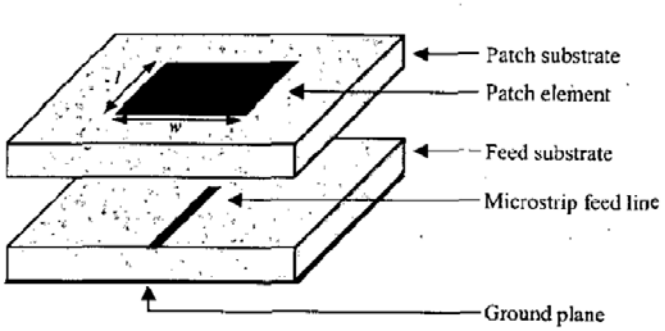
Κατά τη δεκαετία του 1980, η έρευνα γνώρισε σημαντική ώθηση κυρίως μέσω βιομηχανιών αμυντικών συστημάτων, οι οποίες προέβαλαν τη χρησιμότητα των μικροταινιακών κεραιών σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές. Την περίοδο αυτή προσδιορίστηκαν με μεγάλη ακρίβεια διάφορα χαρακτηριστικά όπως ο συντονιστικός χαρακτήρας και η σύνθετη αντίσταση των κεραιών, οδηγώντας σε βελτίωση της απόδοσής τους. Διαπιστώθηκε ότι η λειτουργία τους βασίζεται σε φαινόμενα συντονισμού, και ότι η επαγωγική συμπεριφορά τους έπρεπε να εξισορροπείται με χωρητικά φαινόμενα για να επιτευχθεί βέλτιστη ακτινοβολία.[2]

Παράλληλα, δημιουργήθηκαν δύο νέες τεχνικές τροφοδοσίας: η aperture-coupled (μέσω ανοίγματος) και η proximity-coupled (μέσω ζεύξης). Οι μέθοδοι αυτές οδήγησαν σε αύξηση της απόκρισης της κεραίας και σε διεύρυνση του εύρους συχνοτήτων λειτουργίας. Η ανάπτυξη στους υπολογιστές της εποχής επέτρεψε την προσομοίωση μέσω ολοκληρωτικών εξισώσεων, γεγονός που βελτίωσε σημαντικά την ακρίβεια στον υπολογισμό κρίσιμων παραμέτρων, όπως η σύνθετη αντίσταση και η απολαβή.[12][13]



Εικόνα 6 - aperture coupled patch [14]

Τη δεκαετία του 1990, οι μικροταινιακές κεραίες είχαν πλέον σταθεροποιηθεί τεχνολογικά και εντάχθηκαν σε κοινά-καθημερινά προϊόντα , κυρίως στον χώρο των κινητών επικοινωνιών. Μετά από αυτό το βήμα, την κατεύθυνση της έρευνας την καθόριζε η αγορά και ο κόσμος . Η βελτίωση της υπολογιστικής ισχύος οδήγησε στη δημιουργία ακριβέστερων μοντέλων προσομοίωσης, βασισμένων στις τεχνικές των Ολοκληρωτικών Εξισώσεων, οι οποίες επέτρεψαν όχι μόνο τη μελέτη της ακτινοβολίας της κεραίας, αλλά και την ανάλυση της αλληλεπίδρασής της με τον υπόλοιπο περιβάλλοντα χώρο.



Εικόνα 7 - proximity coupled patch [15]

Την ίδια περίοδο αναπτύχθηκαν τεχνικές αύξησης του εύρους ζώνης λειτουργίας, επιτυγχάνοντας βελτιώσεις έως και 67%, ενώ διερευνήθηκαν και τρόποι μείωσης των ανεπιθύμητων κυμάτων που επηρέαζαν την αποδοτικότητα της ακτινοβολίας.[2]

Κατά τη δεκαετία του 2000, η έρευνα επικεντρώθηκε σε περαιτέρω βελτίωση του εύρους ζώνης, στην ενίσχυση των επιδόσεων και στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Το κυριότερο επίτευγμα της περιόδου αυτής ήταν ότι πλέον είχαν διευκρινιστεί πλήρως η λειτουργίες των μικροταινιακών κεραιών, γεγονός που επέτρεψε τον ακριβή σχεδιασμό και την αποδοτική προσομοίωση τους σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών υψηλών επιδόσεων.[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 Βασικά χαρακτηριστικά Κεραίας

Για την αξιολόγηση και την περιγραφή μιας κεραίας, ανεξαρτήτως τύπου, χρησιμοποιείται ένα πλήθος χαρακτηριστικών παραμέτρων που αποτυπώνουν τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις της. Το διάγραμμα ακτινοβολίας ή αλλιώς διάγραμμα κεραίας, αποτελεί τη γραφική απεικόνιση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων.[8]

Οι ιδιότητες που μπορούν να οριστούν περιλαμβάνουν την ένταση ακτινοβολίας, την πυκνότητα ροής ισχύος, την ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, την κατευθυντικότητα, καθώς και την πόλωση. Από όλες αυτές, η πιο ενδιαφέρουσα και ουσιαστική ιδιότητα θεωρείται η χωρική κατανομή της ακτινοβολούμενης ενέργειας, η οποία μπορεί να αποδοθεί σε δισδιάστατη (2D) ή τρισδιάστατη (3D) μορφή, ανάλογα με τη θέση του παρατηρητή επί τροχιάς ή επιφάνειας σταθερής ακτίνας γύρω από την κεραία.[1][2]

$$U = r^2 W_{rad}$$

Όπου:

U= ένταση ακτινοβολίας (W/ μονάδα στερεάς γωνίας)

W_{rad} = πυκνότητα ακτινοβολίας (W/ m2)

$$W = E\ x\ H$$

Όπου:

W= στιγμιαίο διάνυσμα Poynting (W/m2)

E= στιγμιαία ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

H = στιγμιαία ένταση του μαγνητικού πεδίου (A/m)

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

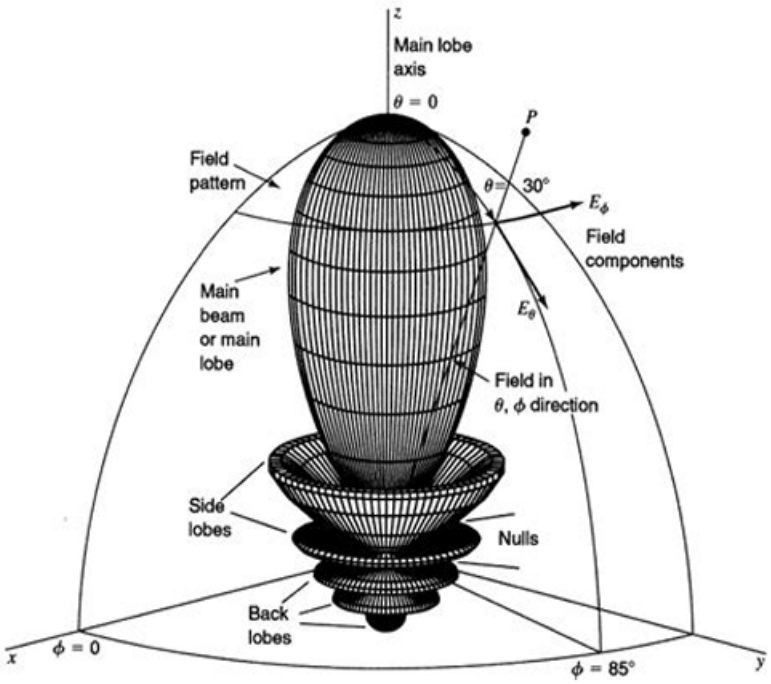
Όπου:

D= κατευθυντικότητα

U= ένταση ακτινοβολίας

U_0= ένταση ακτινοβολίας ισοτροπικής πηγής

P_{rad}= συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς



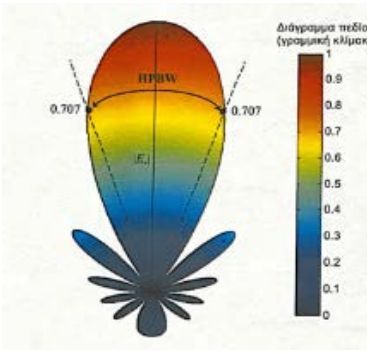
Εικόνα 8 - 3D αναπαράσταση διαγράμματος ακτινοβολίας [2]

Συχνά, τα διαγράμματα πεδίου και ισχύος υφίστανται κανονικοποίηση ως προς τη μέγιστη τιμή τους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κανονικοποιημένων διαγραμμάτων, τα οποία διευκολύνουν τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών κεραιών ή διαμορφώσεων. Επιπλέον, το διάγραμμα ισχύος αποδίδεται συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα, και πιο συγκεκριμένα σε decibel (dB). Η χρήση λογαριθμικής κλίμακας είναι ιδιαίτερα προτιμητέα, καθώς επιτρέπει την αναλυτικότερη απεικόνιση περιοχών του διαγράμματος με χαμηλές τιμές ισχύος, γνωστών και ως δευτερεύοντες λοβοί, οι οποίοι συχνά παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την ακτινοβολιακή συμπεριφορά της κεραίας.[2]

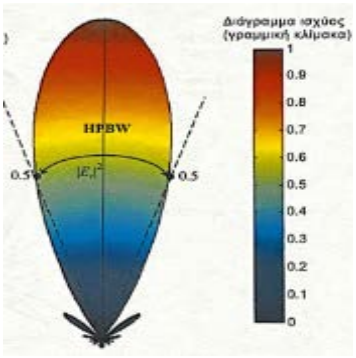
2.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Για την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο μια κεραία ακτινοβολεί ενέργεια στο χώρο, χρησιμοποιούνται διάφορα είδη διαγραμμάτων που απεικονίζουν διαφορετικές φυσικές ποσότητες. Το διάγραμμα πεδίου (field pattern) σε γραμμική κλίμακα δείχνει το μέγεθος του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τη γωνιακή κατεύθυνση, αποτυπώνοντας έτσι πώς κατανέμεται η ένταση του πεδίου γύρω από την κεραία. Αντίστοιχα, το διάγραμμα ισχύος (power pattern) σε γραμμική κλίμακα παρουσιάζει το τετράγωνο της έντασης του πεδίου, το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ακτινοβολούμενη ισχύ, προσφέροντας έτσι μια πιο αντικειμενική εικόνα της ενεργειακής κατανομής. Επιπλέον, το διάγραμμα ισχύος σε λογαριθμική κλίμακα (dB) εκφράζει την ένταση του πεδίου σε decibel ως συνάρτηση της γωνίας. Η λογαριθμική μορφή επιτρέπει την πιο

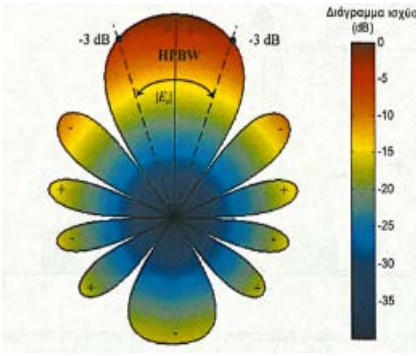
ξεκάθαρη απεικόνιση περιοχών χαμηλής ακτινοβολίας, όπως των δευτερευόντων λοβών, και για αυτόν το λόγο αποτελεί την πιο συνηθισμένη μέθοδο παρουσίασης των ακτινοβολιακών χαρακτηριστικών.[1]



Εικόνα 9 - Διάγραμμα πεδίου (σε γραμμική κλίμακα)[1]



Εικόνα 10 - Διάγραμμα ισχύος (σε γραμμική κλίμακα)[1]



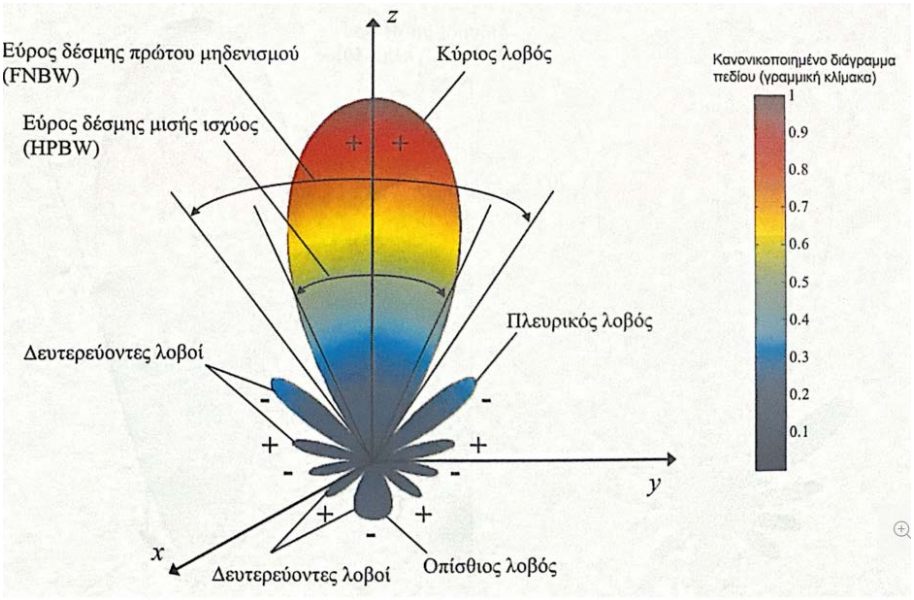
Εικόνα 11 - Διάγραμμα ισχύος (σε dB)[1]

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους λοβούς, οι οποίοι αντιστοιχούν στις περιοχές του χώρου όπου η ένταση της ακτινοβολίας εμφανίζει τοπικά μέγιστες τιμές. Οι λοβοί αυτοί διακρίνονται σε κύριους (ή μέγιστους), δευτερεύοντες, πλευρικούς και οπίσθιους.[1]

Ένας λοβός ακτινοβολίας ορίζεται ως *«το τμήμα του διαγράμματος ακτινοβολίας που οριοθετείται από περιοχές σχετικά μικρής έντασης ακτινοβολίας»*. Με άλλα λόγια, κάθε λοβός αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη κατεύθυνση εκπομπής της κεραίας, όπου η ακτινοβολούμενη ισχύς είναι υψηλότερη σε σχέση με τις γύρω περιοχές. Αν και ορισμένοι λοβοί έχουν μεγαλύτερη ένταση από άλλους, όλοι θεωρούνται λοβοί ακτινοβολίας.[1]

Ο κύριος λοβός (main lobe) ορίζεται ως *«ο λοβός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας»*. Σε ορισμένες κατηγορίες κεραιών, όπως οι κεραίες διαχωρισμένης δέσμης (split-beam antennas), ενδέχεται να υπάρχουν περισσότεροι του ενός κύριοι λοβοί.[1]

Κάθε άλλος λοβός, εκτός από τον κύριο, χαρακτηρίζεται ως δευτερεύων λοβός (side lobe). Ειδικότερα, ως πλευρικός λοβός ορίζεται *«ένας λοβός ακτινοβολίας προσανατολισμένος σε διεύθυνση διαφορετική από την επιθυμητή»*, ενώ ως οπίσθιος λοβός (back lobe) *«ο λοβός του οποίου ο άξονας σχηματίζει γωνία 180° ως προς τη διεύθυνση του κύριου λοβού»*. Συνήθως, ο οπίσθιος λοβός αποτελεί δευτερεύοντα λοβό που εκτείνεται στο αντίθετο ημισφαίριο από εκείνο του κύριου.[1]



Εικόνα 12 - Διάγραμμα κατανόησης με θέμα: Λοβοί ακτινοβολίας και εύρος δέσμης [1]

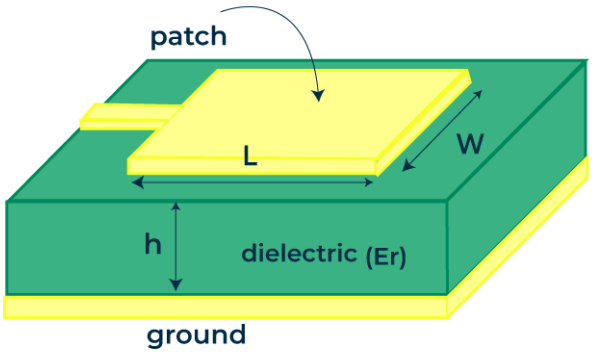
Σε γενικές γραμμές, οι δευτερεύοντες λοβοί αναπαριστούν την ακτινοβολία που διαχέεται προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις, μειώνοντας την απόδοση και την κατευθυντικότητα της κεραίας. Για τον λόγο αυτό, κατά τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των κεραιών, καταβάλλεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης της έντασης των δευτερευόντων λοβών.[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 Κεραία Τύπου Μικροταινίας

Οι μικροταινιακές κεραίες (microstrip antennas) ξεκίνησαν την ανοδική-επιτυχημένη ανάπτυξή τους τη δεκαετία του 1970, πορεία που συνεχίζεται έως και σήμερα. Στη βασική τους μορφή, μία μικροταινιακή κεραία αποτελείται από ένα ακτινοβολούν στοιχείο (patch) τοποθετημένο στη μία πλευρά ενός διηλεκτρικού υποστρώματος, ενώ στην απέναντι πλευρά βρίσκεται ένα επίπεδο γείωσης. Το patch είναι κατασκευασμένο από αγώγιμο υλικό, συνήθως χαλκό ή χρυσό, και μπορεί να λάβει διάφορα γεωμετρικά σχήματα. Οι πιο συχνές μορφές είναι τετράγωνες, ορθογώνιες, κυκλικές ή λωρίδες (διπολικά patch), λόγω της απλότητας στην ανάλυση και κατασκευή τους αλλά και των ελκυστικών ακτινοβολιακών χαρακτηριστικών που προσφέρουν. Τόσο το patch όσο και οι γραμμές τροφοδοσίας τυπώνονται πάνω στο διηλεκτρικό υπόστρωμα, γεγονός που επιτρέπει στις κεραίες αυτές να εντάσσονται στα τυπωμένα κυκλώματα και να αξιοποιούν τεχνολογίες μικροηλεκτρονικής για την ανάπτυξη και τη λειτουργία τους. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι οι όροι microstrip και patch αν και αναφέρονται θεμελιωδώς σε διαφορετικά χαρακτηριστικά της ίδιας δομής κεραίας έχουν καταλήξει να χρησιμοποιούνται εκφράζοντας ακριβώς το ίδιο πράγμα, τη μικροταινιακή κεραία.[1]

Οι μικροταινιακές κεραίες θεωρούνται ιδιαίτερα γνωστές, διαχειρίσιμες και εύκολα προσαρμόσιμες ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, το μικρό μέγεθος, η χαμηλή τιμή κόστους κατασκευής, καθώς και η δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ολοκληρωμένα συστήματα.[16]



Εικόνα 13 - Κεραία μικροταινίας [17]

Η εξέλιξή τους οφείλεται σε πολυάριθμες ερευνητικές προσπάθειες και πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από πανεπιστημιακά ιδρύματα και ερευνητικούς οργανισμούς τηλεπικοινωνιών ανά τον κόσμο. Μεταξύ των σημαντικότερων φορέων ξεχωρίζουν το Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης (MIT), το Πολυτεχνείο της Ζυρίχης (ETH), η Αεροπορική Βάση Hanscom, το Τμήμα Αεροδιαστήματος των Bell Labs, καθώς και το Πανεπιστήμιο του Birmingham.[1]

Από τεχνικής άποψης η κεραία δεν ακτινοβολεί από την επιφανεια της αλλα από τις δυο ανοιχτες άκρες της, οι οποίες λειτουργούν ως δύο παραλληλες σχισμές εκπομπής. Τα πεδία στις σχισμές είναι συμφασικά, παράγοντας γραμμικά πολωμένη ακτινοβολία μεεγάλου γωνιακού εύρους που καλύπτει σχεδόν ολο το ημισφαίριο. Η προσεγγιστική κατευθυντικότητα της κεραίας δίνεται απο τη σχέση:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx 4\ (\eta\ 6dBi)$$

Όπου:

D= Κατευθυντικότητα

Ω_A= Στερεά γωνία δέσμης

Η γεωμετρία της κεραίας καθορίζει άμεσα τη συμπεριφορά της. Το φυσικό μήκος L του patch ελέγχει τη συχνότητα συντονισμού και υπολογίζεται προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$L \approx 0{,}49\lambda_0/\sqrt{\varepsilon_r}$$

Όπου:

λ_0= μήκος κύματος του σήματος

ε_r=σχετική διηλεκτρική σταθερά

Το πλάτος W του patch επηρεάζει την αντίσταση ακτινοβολίας Rr, , η οποία εκφράζει την ισχύ που μετατρέπεται σε ελεύθερο κύμα και δίνεται από το μοντέλο των Jackson και Alexopolus ως:

$$R_r = 90\left(\frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1}\right)(\frac{L}{W})^2$$

Όπου:

R_r= αντίσταση ακτινοβολίας

ε_r=σχετική διηλεκτρική σταθερά

L= μήκος του patch

W=πλάτος του patch

Η αντίσταση αυτή, σε συνδυασμό με την ενεργό επιφάνεια:

$$A_C = \frac{D\lambda_0^2}{4\pi} = \frac{\lambda_0^2}{\pi}$$

καθορίζει το ενεργό ύψος της κεραίας μέσω της σχέσης :

$$h_e = \sqrt{2R_r A_e / Z_0}$$

Όπου:

h_c= ενεργό ύψος

R_r= αντίσταση ακτινοβολίας

A_e= ενεργός επιφάνεια

Z_0=εγγενής εμπέδηση κενού χώρου

Το κύριο μειονέκτημα των κεραιών patch είναι το στενό εύρος ζώνης συχνοτήτων, στο οποίο μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά. Το εύρος αυτό υπολογίζεται ως ποσοστό από τον εμπειρικό τύπο:

$$Εύρος\ ζώνης\ συχνοτήτων\ λειτουργίας = 3.77\left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r^2}\right)\left(\frac{W}{L}\right)(\frac{t}{\lambda_0})$$

Από αυτή τη μαθηματική σχέση γίνεται σαφές ότι το εύρος ζώνης αυξάνεται γραμμικά με τη χρήση ενός πιο παχέως υποστρώματος(μεγαλύτερο πάχος t) ή με την αύξηση του πλάτους W. [2]

3.1 Εφαρμογές

Έπειτα από πολλές δεκαετίες έρευνας και σημαντικών επενδύσεων στον τομέα των κεραιών, η κεραία έχει πλέον αποκτήσει ευρεία χρήση σε πολλα είδη τεχνολογικών εφαρμογών, εξαιτίας της συνεχής προόδου στη μικροηλεκτρονική, στα υλικά και στις τεχνικές σχεδίασης.

Στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας, οι κεραίες χρησιμοποιούνται εκτενώς σε συσκευές χρηστών και σταθμούς βάσης, υποστηρίζοντας την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε σύγχρονα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Παράλληλα, κατέχουν κρίσιμο ρόλο στα συστήματα δορυφορικού προσδιορισμού θέσης, όπως το Global Positioning System (GPS), επιτρέποντας ακριβή γεωεντοπισμό σε εφαρμογές πλοήγησης, μεταφορών και γεωπληροφορικής. Επιπλέον, αποτελούν βασικό στοιχείο των δορυφορικών επικοινωνιών, καθώς και της τεχνολογίας ραντάρ, όπου χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό αντικειμένων, την παρακολούθηση στόχων και την αποφυγή συγκρούσεων σε αεροπορικά και ναυτιλιακά συστήματα.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν οι μικροταινιακές κεραίες, οι οποίες λόγω του μικρού μεγέθους, του χαμηλού κόστους κατασκευής, της επίπεδης μορφής και της ευκολίας ενσωμάτωσης σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, έχουν καθιερωθεί σε πλήθος σύγχρονων εφαρμογών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ευρέως σε φορητές συσκευές (smartphones, tablets), σε συστήματα ασύρματης

επικοινωνίας μικρής εμβέλειας και σε δίκτυα IoT (Internet of Things). Επιπλέον, βρίσκουν εφαρμογή σε ιατρικές εφαρμογές, όπως εμφυτεύσιμες ή φορητές συσκευές παρακολούθησης βιοσημάτων.

Παράλληλα, οι μικροταινιακές κεραίες χρησιμοποιούνται σε σύγχρονες τεχνολογίες όπως τα δίκτυα 5G, όπου απαιτούνται συμπαγείς και αποδοτικές κεραίες. καθώς και σε συστήματα radar μικρής εμβέλειας, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην αυτόνομη οδήγηση και στα προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού.[16][18][19]

3.2 Μειονεκτήματα

Οι μικροταινιακές κεραίες παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς που είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς. Ένας βασικός περιορισμός είναι το σχετικά περιορισμένο εύρος ζώνης λειτουργίας, το οποίο καθιστά δύσκολη τη χρήση τους σε εφαρμογές που απαιτούν ευρυζωνική απόκριση. Επιπλέον, για τη λειτουργία σε χαμηλότερες συχνότητες απαιτείται αύξηση των γεωμετρικών διαστάσεων της κεραίας, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο και περιορίζει το πλεονέκτημα της συμπαγούς κατασκευής.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η περιορισμένη δυνατότητα διαχείρισης ισχύος. Λόγω της λεπτής δομής τους δεν μπορούν να αντέξουν υψηλά επίπεδα ισχύος χωρίς την εμφάνιση θερμικών απωλειών ή φαινομένων υπερθέρμανσης, τα οποία ενδέχεται να επηρεάσουν την απόδοσή τους ή ακόμη και να προκαλέσουν καταστροφή του υλικού.

Τέλος , παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και οι μηχανικές καταπονήσεις μπορούν να επηρεάσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες ,με αποτέλεσμα μεταβολές στη συχνότητα και στη συνολική απόδοση της κεραίας[2][16][18][19]

3.3 Πλεονεκτήματα

Ιδιαίτερα σημαντικά είναι και τα πλεονεκτήματα των μικροταινιακών κεραιών, τα οποία τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για ποικίλες εφαρμογές. Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους είναι το μικρό μέγεθος και το χαμηλό βάρος, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή τους σε φορητές και συμπαγείς ηλεκτρονικές συσκευές

Επιπλέον, η κατασκευή τους είναι σχετικά απλή και οικονομική, καθώς υλοποιούνται πάνω σε υποστρώματα τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους παραγωγής, της πολυπλοκότητας κατασκευής καθώς [και συναρμολόγησης, καθιστώντας τις ιδανικές για μαζική παραγωγή. Πολύ σημαντική είναι η δυνατότητα να μπορεί να σχεδιαστεί η κεραία σε διαφορετικά σχήματα με αποτέλεσμα να καταφέρνει να απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Τέλος, οι μικροταινιακές κεραίες είναι κατάλληλες για χρήση σε διατάξεις πολλαπλών στοιχείων γεγονός που επιτρέπει τη βελτίωση της κατευθυντικότητας και του κέρδους. Η δυνατότητα αυτή, σε συνδυασμό με τη χαμηλή κατανάλωση και το μικρό τους προφίλ, τις καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές σε εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών, όπως τα δίκτυα 5G και τα συστήματα έξυπνων συσκευών[2][16][18] [19]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Λειτουργική ανάλυση μετρητικής διάταξης

Η παρούσα διπλωματική σχετίζεται με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μετρήσεων το οποίο έχει σκοπό τη δημιουργία διαγράμματος ακτινοβολίας σε υπολογιστικο-γραφικό περιβάλλον. Η κατασκευή συνδυάζει τη γλώσσα Python, έναν μικροελεγκτή Arduino και έναν Vector Network Analyzer(VNA).

Η Python λειτουργεί ως κεντρικό σύστημα ελέγχου, υπεύθυνο για την επικοινωνία με τον VNA, για τη λήψη μετρήσεων όσο και την αποστολή εντολών κίνησης προς το Arduino. Το Arduino έχοντας ξεχωριστό κώδικα, εξατομικευμένο για τις απαιτήσεις του συστήματος, ελέγχει τους βηματικούς κινητήρες της μηχανικής διάταξης, εκτελώντας εντολές που λαμβάνει από την Python. Ο VNA πραγματοποιεί τις μετρήσεις της κεραίας σε κάθε προκαθορισμένη θέση, με τα αποτελέσματα να συλλέγονται και να επεξεργάζονται από την Python.

Με αυτόν τον συνδυασμό επιτυγχάνεται ακριβής, επαναλήψιμη και πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία μέτρησης.

4.1 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου

Ο Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyzer-VNA) είναι ένα βασικό όργανο για μετρήσεις σημάτων RF και μικροκυμάτων. Η κύρια λειτουργία του είναι να εκπέμπει βαθμονομημένα σήματα διεγέρσεως στη συσκευή υπό δοκιμή και να μετράει την απόκριση μέσω δέκτη. Η μέτρηση γίνεται ως διανυσματική απόκριση που περιλαμβάνει τόσο πλάτος όσο και φάση του σήματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το πώς η συσκευή επιδρά στο σήμα σε όλο το φάσμα συχνοτήτων.[20]

Ένας VNA (Vector Network Analyzer) μπορεί να πραγματοποιήσει διάφορες μετρήσεις που έχουν σχέση με τη μετάδοση και την ανάκλαση σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Στο τομέα της μετάδοσης, ο VNA μπορεί να μετρήσει τον συντελεστή μετάδοσης(Transmission Coefficient), ο οποίος δείχνει πόσο σήμα μπορεί και περνάει από την είσοδο και την έξοδο του συστήματος.

$$S_{ij} = \frac{b_i}{a_j}$$

Σε dB:

$$S_{ij}(dB) = 20log_{10}|S_{ij}|$$

Όπου:

S_{ij}= Συντελεστής Μετάδοσης

b_i=μεταδιδόμενο κύμα σε θύρα i

a_j= προσπίπτον κύμα στη θύρα j

Μπορεί να προσδιορίσει την απώλεια σήματος κατά την μετάδοση(Insertion Loss), καθώς και την ενίσχυση(Gain),δηλαδή την αύξηση ισχύος του σήματος που οφείλεται συνήθως σε στοιχεία του .



Εικόνα 14 - Vector Network Analyzer Copper Mountain technologies Cobalt Series 4420 [21]

Στον τομέα της ανάκλασης (Reflection), ο VNA επιτρέπει τη μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης(Reflection Coefficient), που δείχνει το ποσοστό του σήματος που επιστρέφει στην πηγή λόγω ατελειών.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Όπου:

Γ= συντελεστής ανάκλασης

Z_L= εμπέδηση της κεραίας

Z_0= εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς

του Return Loss (RL), που εκφράζει σε dB την ανακλώμενη ισχύ λόγω κακής προσαρμογής(mismatch) φορτίου, καθώς και του Λόγου στάσιμου κύματος (Standing Wave Ratio (SWR)) που δείχνει πόσο καλά είναι προσαρμοσμένο το φορτίο και αν υπάρχουν κύματα στάσιμης μορφής

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Επιπλέον, ένας VNA (Vector Network Analyzer) χρησιμοποιείται για μετρήσεις εμπέδησης, επιτρέποντας την εκτίμηση της εμπέδησης μιας συσκευής ή μιας γραμμής μεταφοράς, κάτι που είναι κρίσιμο για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος. Ακόμα το VNA μπορεί να μετρήσει τις S-παράμετρους (Scattering parameters), όπως το S11, S12, S21, S22, οι οποίες περιγράφουν πλήρως πώς μια συσκευή επηρεάζει τα εισερχόμενα και εξερχόμενα σήματα.[20]

Ποικίλες εφαρμογές έχει ο VNA στο κλάδο της ηλεκτρονικής και των τηλεπικοινωνιών. Χρησιμοποιείται για τη μελέτη κεραιών και γραμμών μεταφοράς, για έλεγχο φίλτρων και ενισχυτών καθώς και για ανάλυση μικροταινιακών κυκλωμάτων προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες για την απόδοση, τη συμβατότητα και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων.

4.1.1 Copper Mountain Technologies VNA C4420

Ο διανυσματικός αναλυτής δικτύου (VNA) C4420 της *Copper Mountain Technologies* που χρησιμοποιείται στη παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα υψηλής απόδοσης όργανο μέτρησης παραμέτρων S (Scattering parameters), σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Ο C4420 ανήκει στη σειρά Cobalt και σχεδιάστηκε για να καλύψει απαιτητικές εφαρμογές μέτρησης RF και μικροκυματικών κυκλωμάτων, σε ερευνητικό και σε παραγωγικό επίπεδο. Παρέχει υψηλή ακρίβεια, μεγάλο εύρος μέτρησης και δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης.[21]

Πιο συγκεκριμένα είναι αναλυτής τεσσάρων θυρών (θύρες τύπου NMD 3,5 mm αρσενικοί) και διαθέτει συμβατότητα με επεκτάσεις συχνότητας CobaltFx (4-ports), γεγονός που επιτρέπει μετρήσεις ακόμη και σε mmWave ζώνες. Σημαντικό του πλεονέκτημα σε σχέση με άλλους αναλυτές της αγοράς είναι το μεγάλο εύρος λειτουργίας, που κυμαίνεται από 100 kHz έως 20 GHz, με ακρίβεια πλήρους εύρους συχνότητας $\pm 2 \cdot 10^{-6}$. Η ανάλυση της συχνότητας είναι 1 Hz, παρέχοντας υψηλή λεπτομέρεια, και με δυνατότητα να μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις από 2 έως 500 001 σημεία .[21]

Επιπλέον, ο C4420 προσφέρει μεγάλο δυναμικό εύρος μέτρησης, που φτάνει περίπου 133 dB έως 135 dB, επιτρέποντας έτσι την ανίχνευση πολύ ασθενών σημάτων και παράλληλα τη διατήρηση αξιοπιστίας σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Ο θόρυβος εισόδου είναι πολύ χαμηλός,σύμφωνα με το κατασκευαστή στα 100 kHz έως 1 MHz είναι στα −110 dBm/Hz και στα −133 dBm/Hz μεταξύ 1 MHz έως 20 GHz (όσο πιο χαμηλή (πιο αρνητική) είναι η τιμή, τόσο καλύτερη ικανότητα μέτρησης πολύ ασθενών σημάτων έχει ο VNA), εξασφαλίζοντας καθαρές .Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης με εξωτερικό πρόγραμμα υπολογιστή μέσω διεπαφών όπως SCPI, Python, MATLAB και LabVIEW επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο, αυτοματοποίηση και επεξεργασία των μετρήσεων σε περιβάλλον προγραμματισμού. Αυτή η δυνατότητα διευκολύνει τη δημιουργία αυτοματοποιημένων πειραματικών πρωτοκόλλων και ενσωμάτωση του VNA σε σύνθετες μετρητικές ρυθμίσεις, όπως αυτή της παρούσα διπλωματική εργασίας.[21]

4.2 Εξαρτήματα και Υλικά

Για την επιτυχή υλοποίηση της μετρητικής διάταξης είναι απαραίτητη η συγκέντρωση μιας σειράς εξειδικευμένων εξαρτημάτων και υλικών. Τα υλικά αυτά έχουν κρίσιμο ρόλο ως προς τη σταθερότητα του συστήματος καθώς και για τον ηλεκτρονικό έλεγχο της κίνησης.

Primary Specifications

Impedance	50 Ohm
Test port connector	NMD 3.5 mm, male
Number of test ports	4
Direct access	No
Frequency extender compatible	CobaltFx (4 ports)
Frequency range	100 kHz to 20.0 GHz
Full frequency accuracy	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
Frequency resolution	1 Hz
Number of measurement points	2 to 500,001
Measurement bandwidths (with 1/1.5/2/3/5/7 steps)	1 Hz to 2 MHz
Dynamic range²	
100 kHz to 1 MHz	110 dB
1 MHz to 20 GHz	133 dB (135 dB typ.)

Uncorrected System Performance

100 kHz to 1 MHz	
Directivity	10 dB
Source match	10 dB
Load match	10 dB
1 MHz to 10 GHz	
Directivity	20 dB
Source match	15 dB
Load match	15 dB
10 GHz to 20 GHz	
Directivity	15 dB
Source match	15 dB
Load match	15 dB

Test Port Input

Noise floor	
100 kHz to 1 MHz	-110 dBm/Hz
1 MHz to 20 GHz	-133 dBm/Hz
Damage level	+26 dBm
Damage DC voltage	35 V

System & Power

Operating system	Windows 7 and above
CPU frequency	1.5 GHz
RAM	1 GB
Interface	USB 2.0
Connector type	USB B
Power supply	100-253 V, 50/60 Hz
Power consumption	270 W

Dimensions

Length	600 mm
Width	440 mm
Height	140 mm
Weight	22 kg (776 oz)

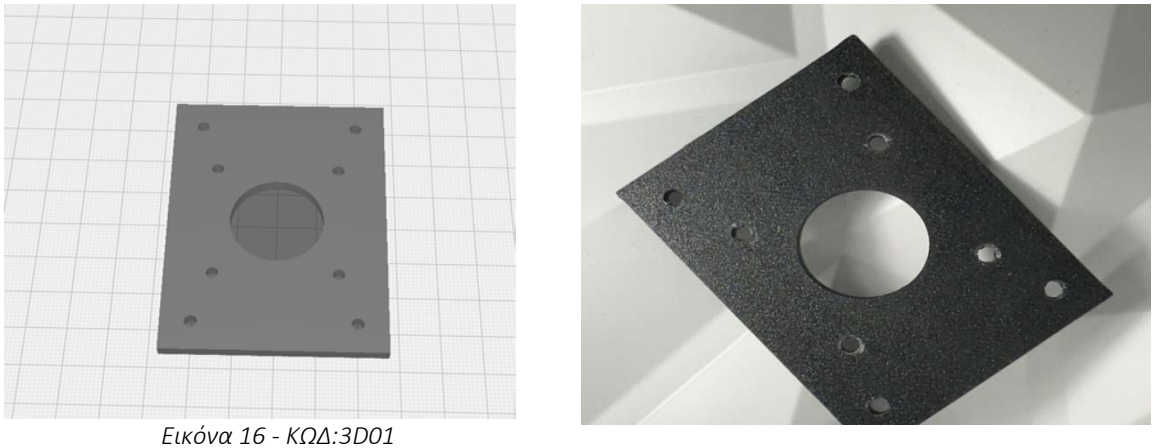
Εικόνα 15 - Χαρακτηριστικά VNA C4420

Τα αναγκαία υλικά για την υλοποίηση της διάταξης περιλαμβάνουν τον σκελετό στήριξης το κύριο μηχανισμό κίνησης, τα στοιχεία μετάδοσης κίνησης καθώς και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά συστήματα για την διασύνδεση και τον προγραμματισμό. Αναλυτικότερα ο πλήρης κατάλογος των εξαρτημάτων και των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

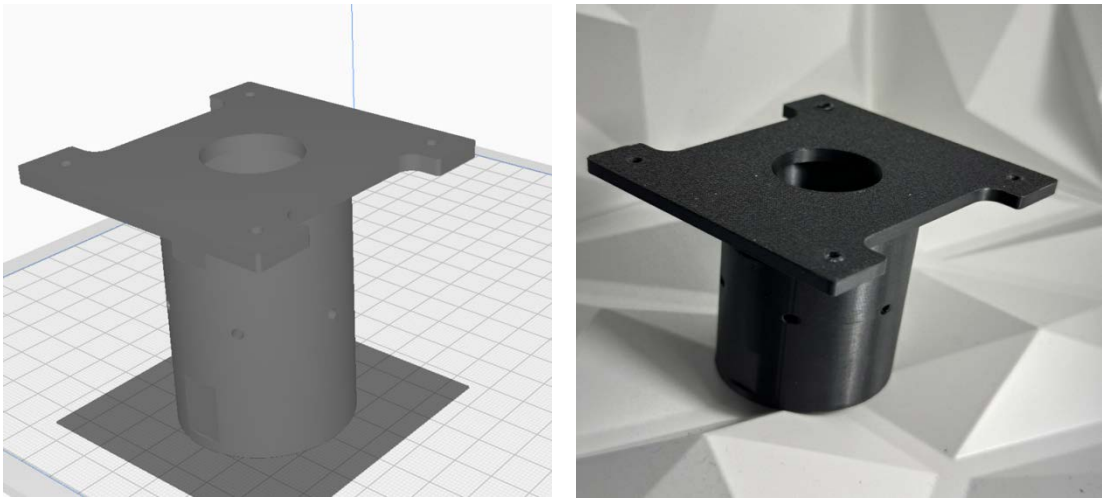
Πίνακας 1 - Κατάλογος Υλικών Κατασκευής

Α/Α	**Περιγραφή Υλικού/Εξαρτήματος**	**Ποσότητα**
1	Βηματικός κινητήρας 4.8kg.cm(200 steps/rev) 42BYGHW804	1
2	Timing Pulley Alluminum GT2 6mm-20T	1
3	OpenBeam - 15x15mm 210mm black anodized OpenBeam	4
4	Timing Belt GT2 – 450mm	1
5	A4988 Stepper Motor Driver	1
6	Arduino Uno	1
7	CNC shield V3	1
8	Βίδα M3*8	12
9	Βίδα M3*10	4
10	Βίδα M3*16	4
11	Παξιμάδι M3	20

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν 9 διαφορετικά κομμάτια. Το filament που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου PLA+ μαύρου χρώματος προσφέροντας τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 16 - ΚΩΔ:3D01

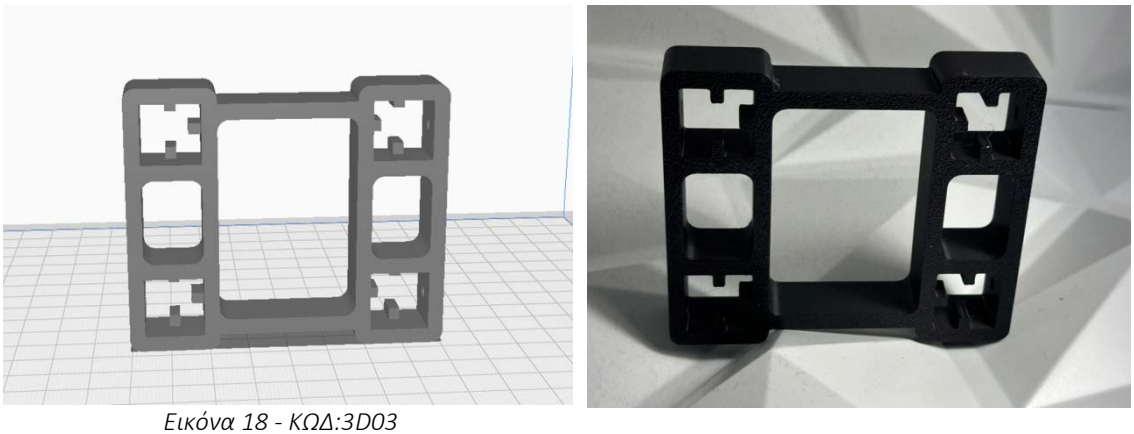


Εικόνα 17 - ΚΩΔ:3D02

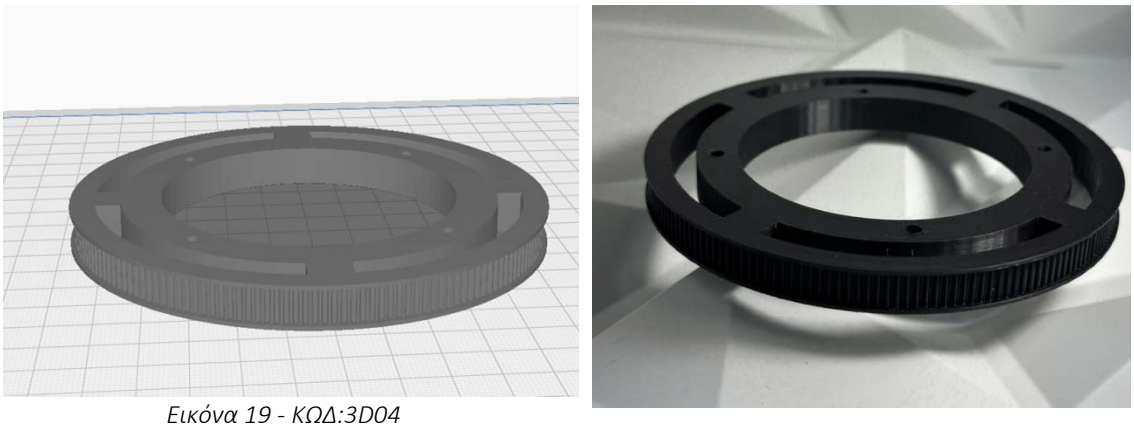
Στην εικόνα 15 (ΚΩΔ: 3D01) απεικονίζεται το πλακίδιο στήριξης του βηματικού κινητήρα, όπου αποτελείται από μια κεντρική οπή για τη διέλευση του άξονα του μοτέρ, 4 εσωτερικές τρύπες που προορίζονται για τη στερέωση του μοτέρ και 4 εξωτερικές που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη του ίδιου του πλακιδίου στους μεταλλικούς οδηγούς με βίδες και παξιμάδια. Από δίπλα στην εικόνα 16 (ΚΩΔ: 3D02) προβάλλεται η βάση στήριξης του ρουλεμάν και γραναζιού. Διαθέτει 5 οπές στην πάνω επιφάνεια του. Η κεντρική οπή όπου είναι και η μεγαλύτερη χρησιμοποιείται για τη διαπέραση του καλωδίου της κεραίας και τη διευκόλυνση εγκατάστασης του custom ρουλεμαν. Οι 4 ακριανές έχουν σκοπό την ίδια την τοποθέτηση του κομματιού πάνω στους μεταλλικούς άξονες ,με τον ίδιο τρόπο όπως και με το κομμάτι 3D01.

Στην εικόνα 17 (ΚΩΔ: 3D03) απεικονίζεται το αρχικό σχέδιο και το αποτέλεσμα της εκτύπωσης για τη βάση στήριξης των 4 μεταλλικών οδηγών. Χρειάστηκαν 2 όμοια αντίτυπα για την υλοποίηση του project. Η βάση διαθέτει 4 τρύπες, όπου περνάνε οι άξονες και σε κάθε μία από αυτές υπάρχει μια τρύπα που εξασφαλίζει την ασφάλιση και σταθεροποίηση τους ,με χρήση βίδας και παξιμαδιού.

Στην εικόνα 18 (ΚΩΔ: 3D04) είναι ένα γρανάζι που αποτελείται από 180 δόντια στη περίμετρο του και 4 οπές στη κεντρική δακτύλιο για την διέλευση βιδών.

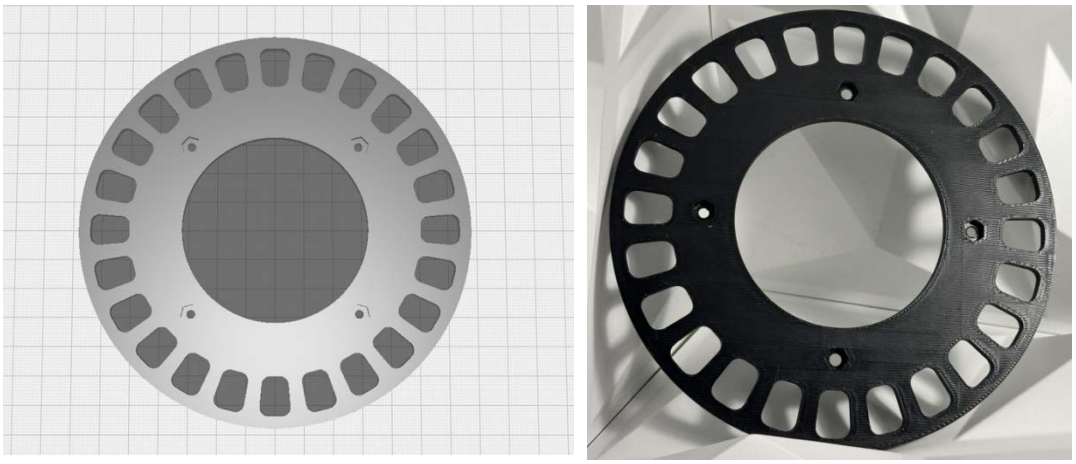


Εικόνα 18 - ΚΩΔ:3D03

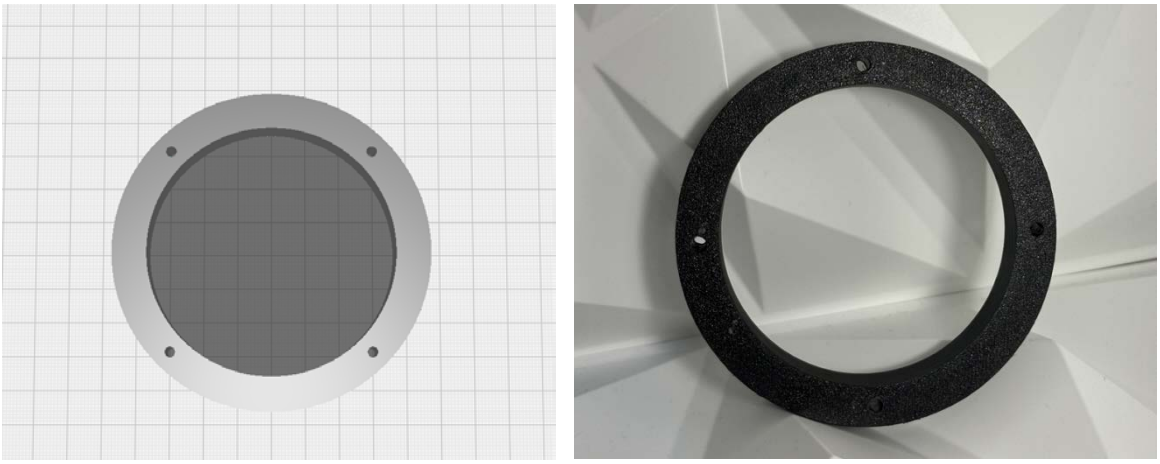


Εικόνα 19 - ΚΩΔ:3D04

Στην εικόνα 19 (ΚΩΔ: 3D05) απεικονίζεται το πάνω κομμάτι του γραναζιού, όπου αποτελείται από 4 εξάγωνες τρύπες για την εισαγωγή παξιμαδιών. Από κάτω στην εικόνα 20 (ΚΩΔ: 3D06) βρίσκεται ένας αποστάτης που τοποθετείται ανάμεσα στο 3D05 και στο 3D04

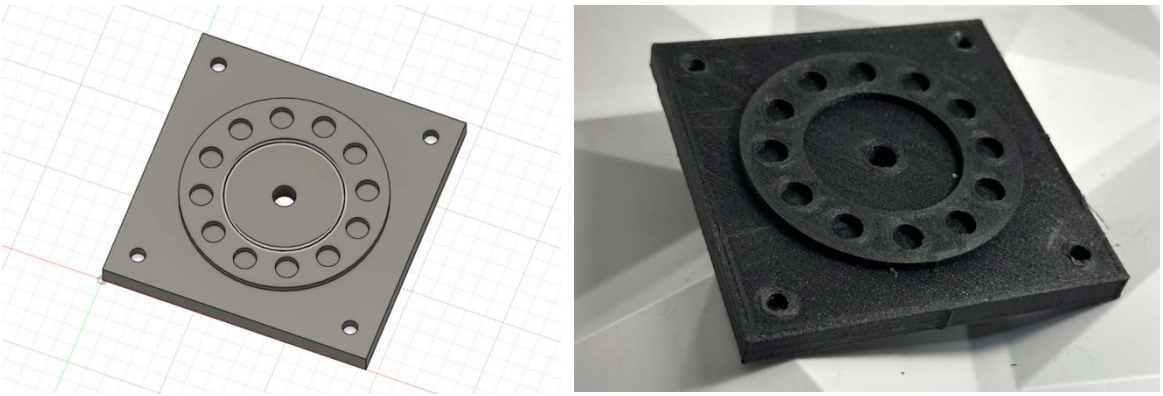


Εικόνα 20 - ΚΩΔ:3D05

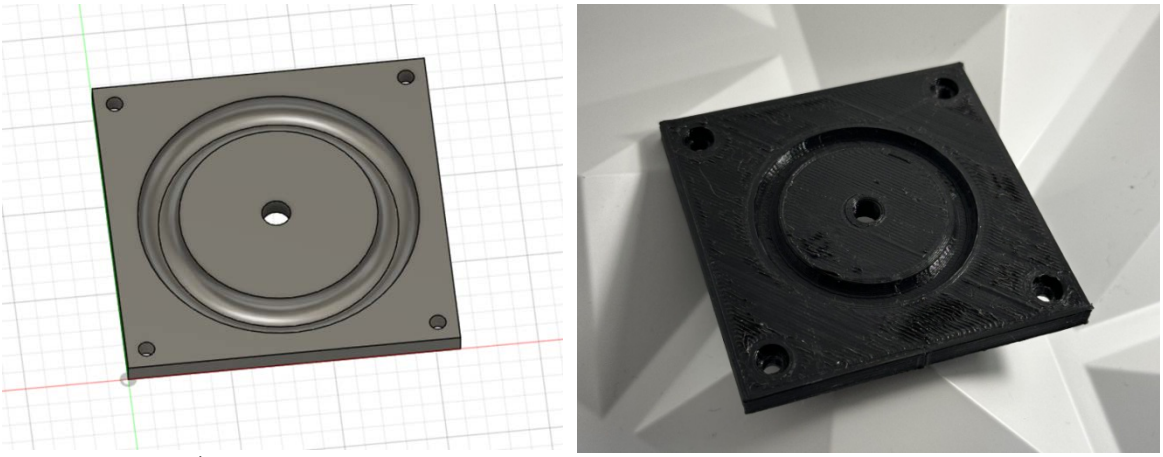


Εικόνα 21 - ΚΩΔ:3D06

Για την υλοποίηση του project χρειάστηκε να σχεδιαστεί ένα custom ρουλεμάν αποτελούμενο από 2 κύρια μέρη .Στην εικόνα 21 (ΚΩΔ :3D07)το εξάρτημα διαθέτει δακτυλιοειδή διαμόρφωση με δώδεκα κυκλικές εσοχές, στις οποίες τοποθετούνται οι μεταλλικές μπίλιες, καθώς και μία κεντρική οπή που χρησιμοποιείται για την ένωση και τη στήριξη του άνω και του κάτω μέρους του ρουλεμάν. Επιπλέον, φέρει τέσσερις περιμετρικές οπές, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η στερέωσή του στη βάση 3D02. Στην εικόνα 22 (ΚΩΔ: 3D08) βρίσκεται το επάνω μέρος που και αυτό με τη σειρά του διαθέτει μια κεντρική τρύπα και μια εσοχή μορφής δακτυλιδιού ώστε να μπαίνουν οι μεταλλικές μπίλιες μέσα Τέλος διαθέτει 4 τρύπες στις γωνίες για τη μετέπειτα στερέωση των υπολοίπων εξαρτημάτων.

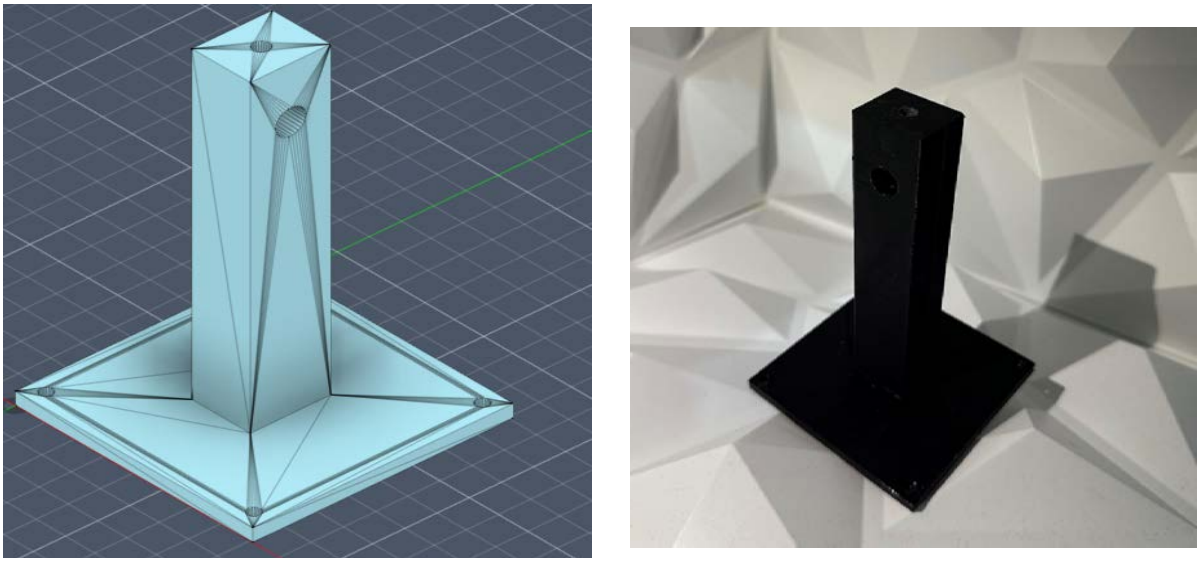


Εικόνα 22 - ΚΩΔ:3D07



Εικόνα 23 - ΚΩΔ:3D08

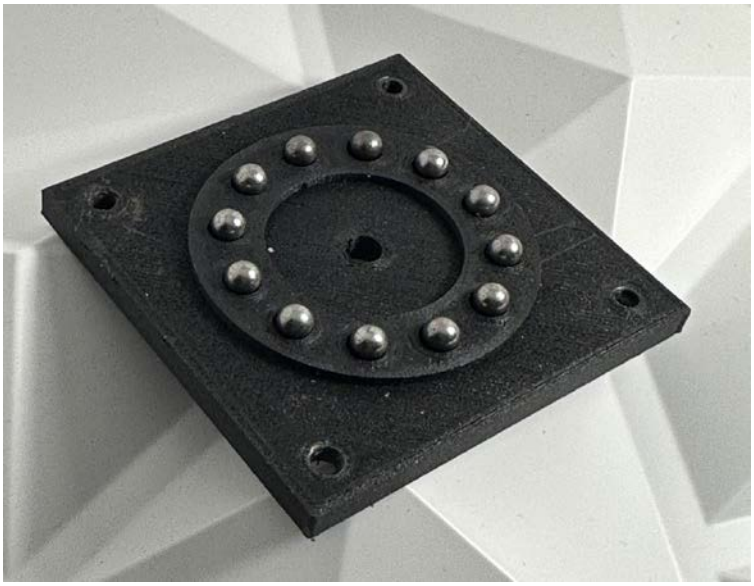
Για την στερέωση της μικροταινιακής κεραίας στη μετρητική διάταξη σχεδιάστηκε μια βάση της μορφής όπως στην εικόνα 23 (ΚΩΔ3D09), αποτελούμενη απο 4 οπές στις γωνίες της τάξεως των 3 mm, μια διαμπερές των 9mm στην εμπρόσθια πλευρά καθώς και μια κάθετη τρύπα 5mm στη κορυφή της βάσης με σπείρωμα για M5 βίδα.



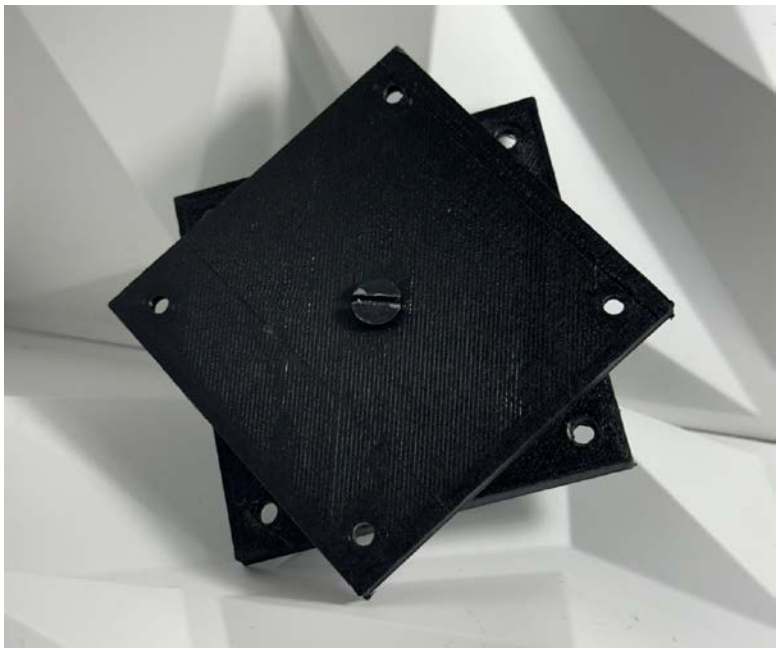
Εικόνα 24 - ΚΩΔ:3D09

4.3 Συναρμολόγηση μετρητικής διάταξης

Αρχικά για τη συναρμολόγηση του custom ρουλεμάν , οι μεταλλικές μπίλιες τοποθετούνται στις αντίστοιχες εσοχές του κάτω μέρους (3D07) του ρουλεμάν, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 24. Στη συνέχεια, το επάνω μέρος (3D08) του ρουλεμάν τοποθετείται στη σωστή θέση και τα δύο τμήματα ενοποιούνται μέσω βίδας M5*30 και παξιμαδιού M5, εξασφαλίζοντας τη σταθερή συγκράτηση και την ομαλή λειτουργία του ρουλεμάν

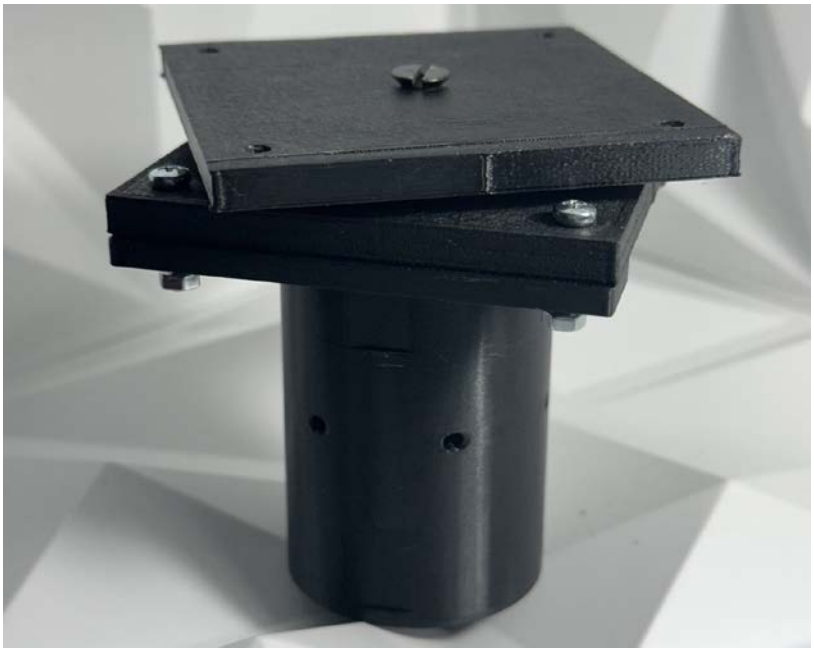


Εικόνα 25 - Βάση αυτοσχέδιου ρουλεμάν



Εικόνα 26 - Ολοκληρωμένη μορφή αυτοσχέδιου ρουλεμάν

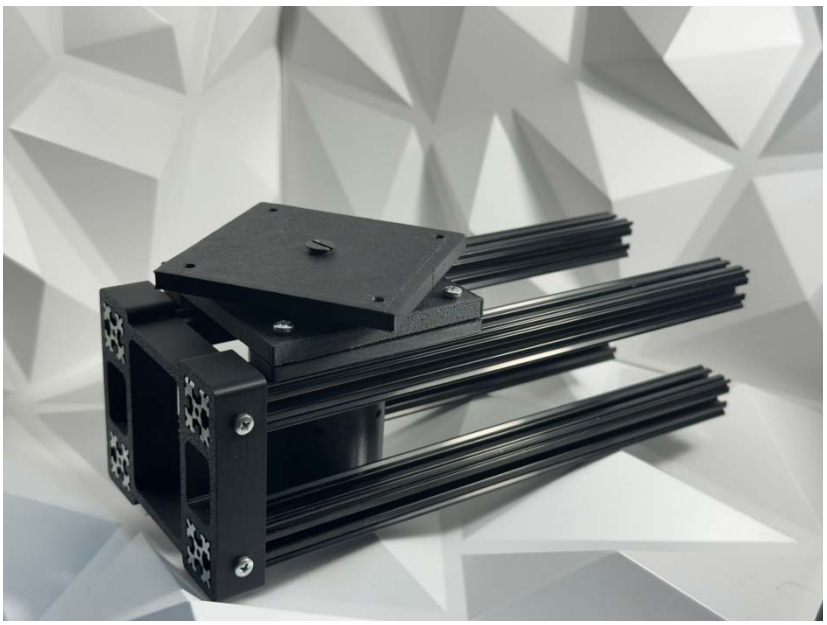
Στη συνέχεια, το ρουλεμάν στερεώνεται στη βάση 3D02 με τη χρήση βιδών M3*10 και παξιμαδιών M3. Έπειτα το τερματικό πλακίδιο 3D03 τοποθετείται στο άκρο των μεταλλικών οδηγών και στερεώνεται ελαφρά με βίδα M3*8 και αντίστοιχο παξιμάδι, με το παξιμάδι να βρίσκεται εντός του οδηγού. Ακολούθως, τα παξιμάδια του εξαρτήματος 3D02 διέρχονται προσεκτικά μέσα από τους οδηγούς. Εφόσον απαιτηθεί, οι βίδες χαλαρώνονται προσωρινά ώστε να διευκολυνθεί η σωστή ευθυγράμμιση και συναρμολόγηση των εξαρτημάτων.



Εικόνα 27 - Περιστρεφόμενη βάση στήριξης γραναζιών

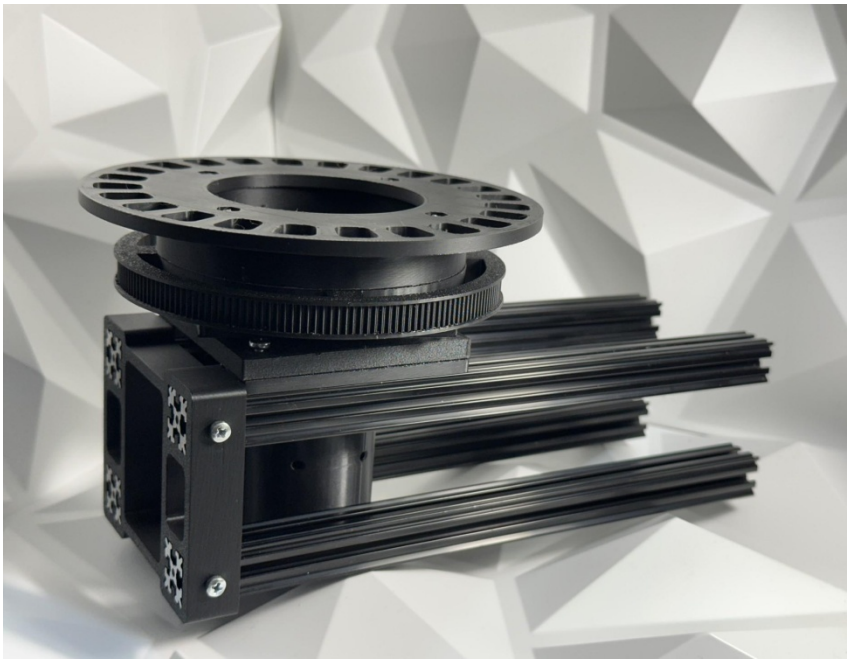


Εικόνα 28 - Τοποθέτηση τερματικού στους μεταλλικούς οδηγούς



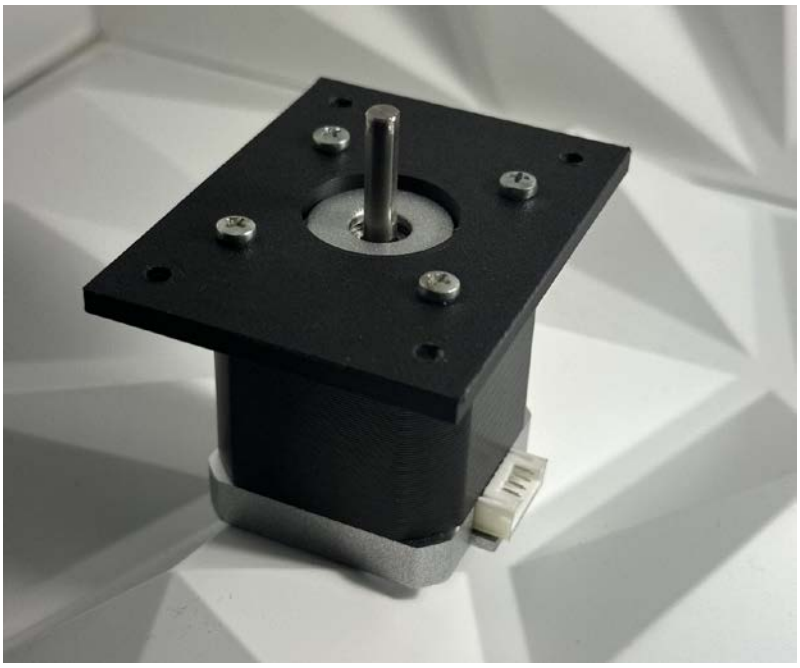
Εικόνα 29 - Τοποθέτηση περιστρεφόμενης βάσης στο σκελετό

Στην επάνω πλευρά του ρουλεμάν 3D08 στερεώνονται διαδοχικά με παξιμάδια M3 και βίδες M3*16 τα εξαρτήματα 3D04, 3D06 και τέλος το 3D05, όπως απεικονίζεται στην αντίστοιχη εικόνα εξασφαλίζοντας τη σωστή ευθυγράμμιση και σταθερή συναρμογή όλων των τμημάτων

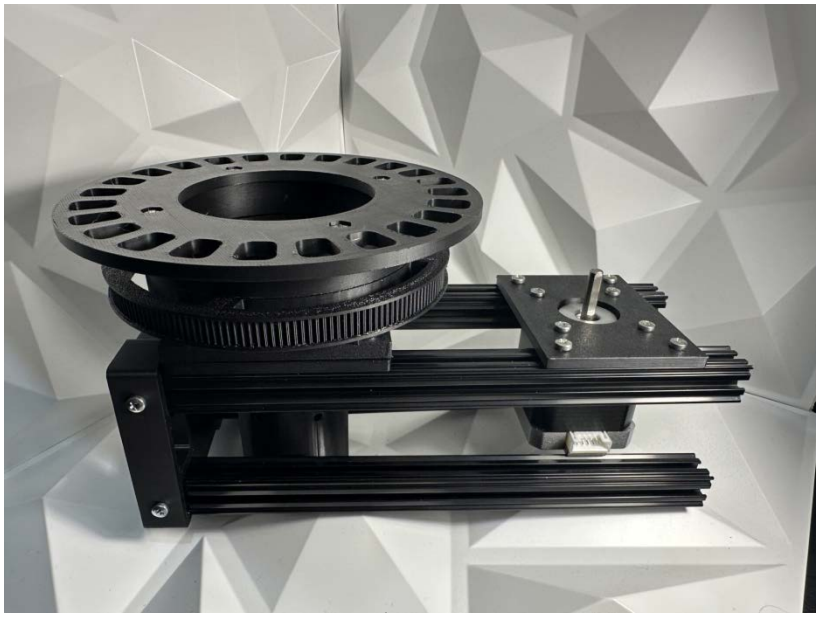


Εικόνα 30 - Τοποθέτηση γραναζιού στη περιστρεφόμενη βάση

Τοποθετείται το πλακίδιο 3D01 μαζί με τον βηματικό κινητήρα (stepper motor) και στερεώνεται με τη χρήση τεσσάρων βιδών M3×8. Στη συνέχεια, το σύνολο τοποθετείται στους μεταλλικούς οδηγούς, με τα παξιμάδια να βρίσκονται εντός των οδηγών, χρησιμοποιώντας άλλες τέσσερις βίδες M3×8 και αντίστοιχα παξιμάδια M3

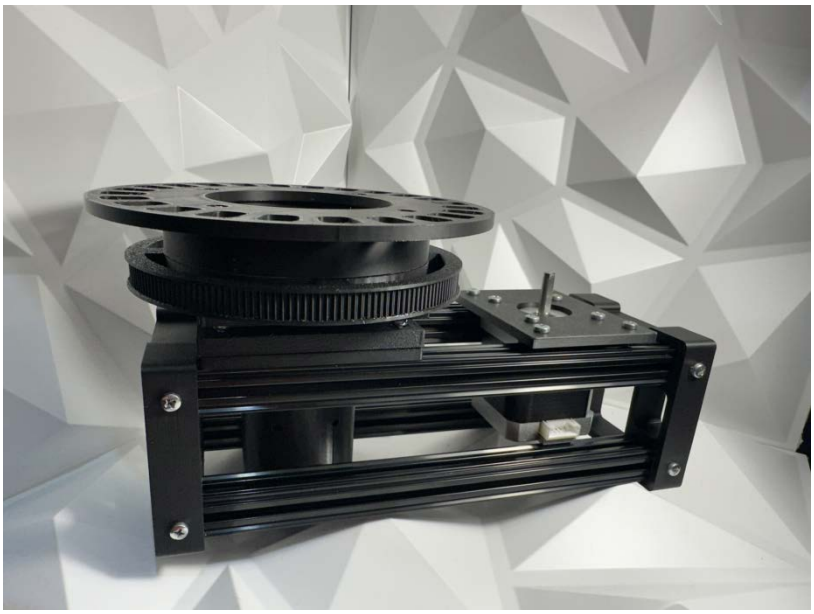


Εικόνα 31 - Τοποθέτηση πλακιδίου στο βηματικό μοτέρ

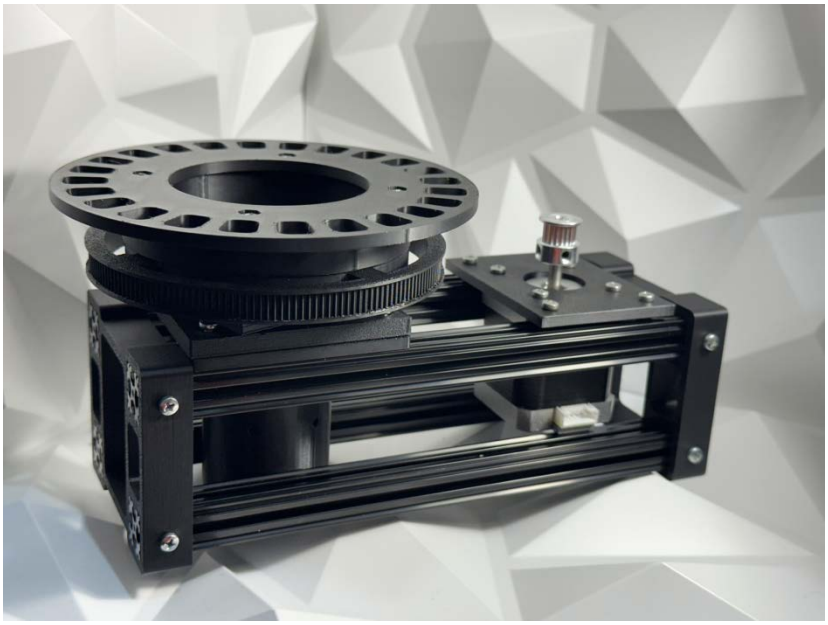


Εικόνα 32 - Τοποθέτηση βηματικού μοτέρ στο σκελετό

Το τερματικό δεύτερο πλακίδιο 3D03 τοποθετείται στο άκρο των μεταλλικών οδηγών και στερεώνεται ελαφρά με βίδα M3×8 και το αντίστοιχο παξιμάδι, με το παξιμάδι να βρίσκεται εντός του οδηγού. Μετά το γρανάζι τοποθετείται στον άξονα του βηματικού μοτέρ, φροντίζοντας να ευθυγραμμιστεί με το γρανάζι 3D04, ώστε να διασφαλίζεται η σωστή μετάδοση κίνησης και η ακριβής λειτουργία του μηχανισμού.



Εικόνα 33 - Τοποθέτηση 2ου τερματικού στο σκελετό



Εικόνα 34 - Τοποθέτηση μικρού γραναζιού στον άξονα του μοτέρ

Τέλος το λουρί τοποθετείται στα δύο γρανάζια όπως στη φωτογραφία, φροντίζοντας να είναι τεντωμένο αλλά χωρίς να προκαλεί υπερβολική καταπόνηση στους άξονες, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του μηχανισμού.

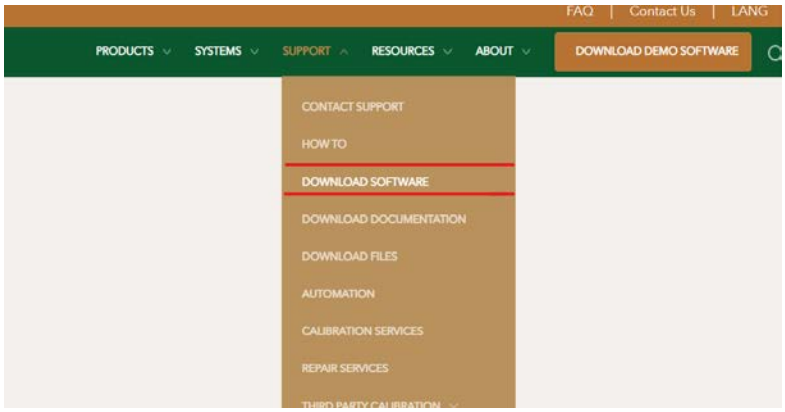


Εικόνα 35 - Τοποθέτηση και τέντωμα ιμάντα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Μετρητική Διάταξη

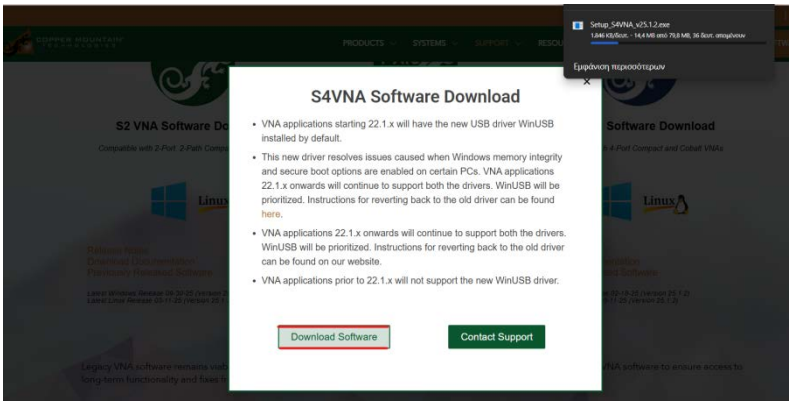
Για την αναγνώριση του οργάνου (Copper Mountain Technologies VNA C4420) από τον υπολογιστή απαραίτητη είναι η εγκατάσταση του δωρεάν VNA λογισμικού, όπου διατίθεται στην επίσημη ιστοσελίδα της Copper Mountain Technologies.



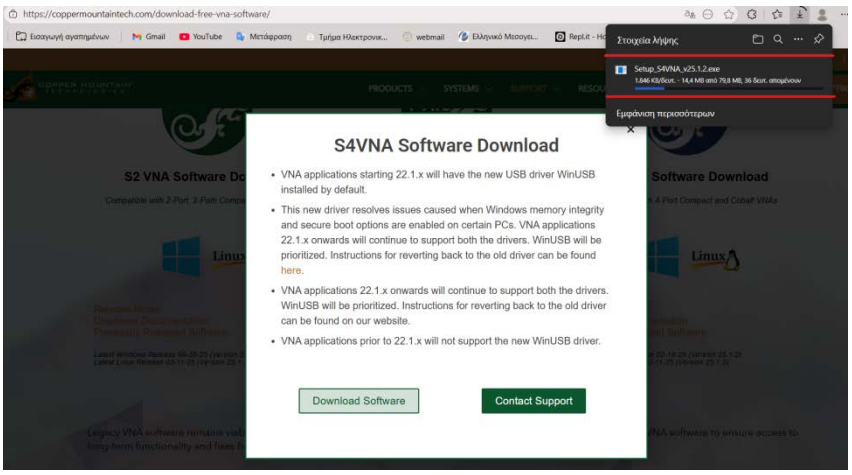
Εικόνα 36 - Ιστοσελίδα εγκατάστασης προγράμματος



Εικόνα 37 - Επιλογή κατάλληλου προγράμματος

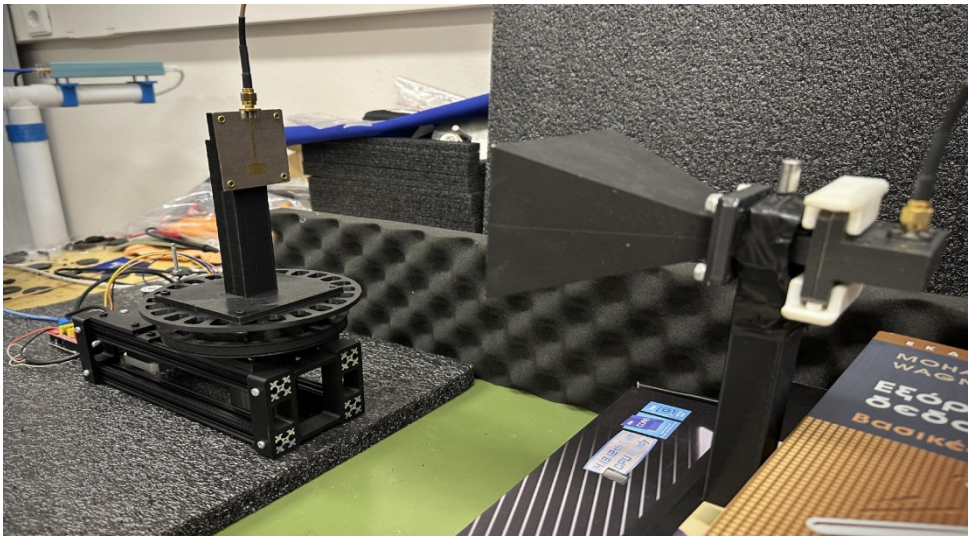


Εικόνα 38 - Λήψη λογισμικού



Εικόνα 39 - Λήψη λογισμικού

Έπειτα ακολουθεί η σωστή σύνδεση των 2 κεραιών με ειδικά καλώδια στο port 3 και port 4 αντίστοιχα. Σημαντικό είναι οι κεραίες να είναι στην ευθεία και στο ίδιο ύψος αναμεταξύ τους καθώς αυτό είναι και το σημείο εκκίνησης του διαγράμματος, χωρίς αντικείμενα να παρεμβάλλονται και να επηρεάζουν το εκάστοτε σήμα



Εικόνα 40 - Μετρητική διάταξη έτοιμη για μέτρηση

Η διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων ξεκινά με την ενεργοποίηση του VNA και του ηλεκτρονικού υπολογιστή όπου θα τρέξει το πρόγραμμα . Ακολουθεί η τροφοδοσία της κατασκευής στην αντίστοιχη είσοδο του CNC Shield V3 της τάξεως των 12V DC, ώστε να τεθεί σε λειτουργία. Έπειτα, το Arduino για τη σύνδεση με τον υπολογιστή χρησιμοποεί καλώδιο USB σε USB τύπου B. Ενώ για την επικοινωνία του VNA με τον υπολογιστή χρησιμοποιείται καλώδιο τύπου USB σε USB.

Στη συνέχεια, με χρήση κατάλληλου code editor πραγματοποιείται το άνοιγμα του αρχείου Python (S34_TURNTABLE.py) στον υπολογιστή, όπου απαιτείται η συμπλήρωση των παραμέτρων σύνδεσης μεταξύ των προγραμμάτων, όπως η θύρα COM και το baud rate.

```python
import serial
import time
import pyvisa
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import csv

# ..............................ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-ARDUINO.....................................................
arduino = serial.Serial('COM3',115200)    # άλλαξε το COM αν χρειάζεται
time.sleep(2)

# ..............................ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-VNA.....................................................
rm = pyvisa.ResourceManager()

vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')

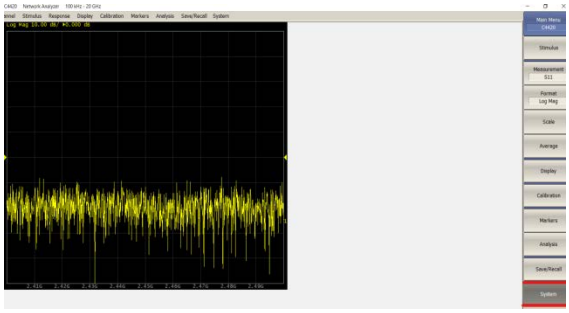
vna.read_termination = '\n'
vna.write_termination = '\n'
vna.timeout = 10000

print(vna.query("*IDN?"))
print("VNA connection ✓")

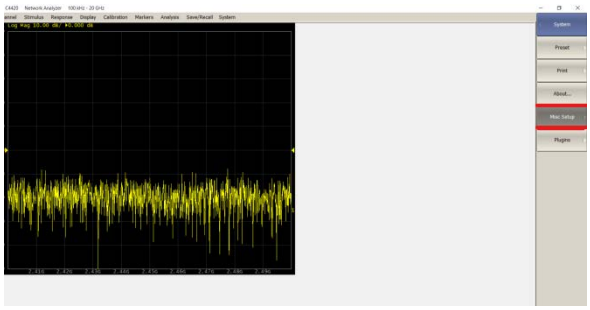
```

Εικόνα 41 - Περιβάλλον προγράμματος python-παράμετροι arduino

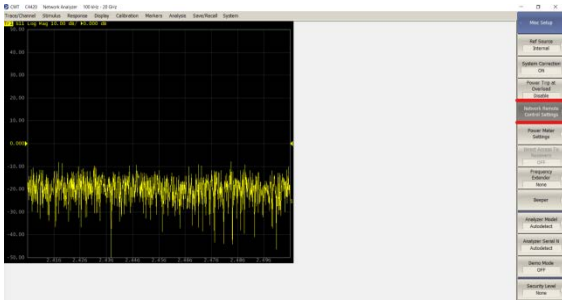
Έπειτα, πραγματοποιείται η εκκίνηση του λογισμικού S4VNA το οποίο είναι εγκατεστημένο ηδη στο σύστημα, ωστε να μπορει να επικοινωνεί υπολογιστής και VNA. Μέσα από το περιβάλλον του S4VNA πρέπει να ενεργοποιηθεί ο socket server και το socket port να αντιστοιχεί με αυτό του python κώδικα.



Εικόνα 42 - Γραφικό περιβάλλον προγράμματος VNA



Εικόνα 43 - Ρύθμιση προγράμματος VNA



Εικόνα 44 - Αλλαγή ρυθμίσεων επικοινωνίας VNA



Εικόνα 45 - Παράμετροι επικοινωνίας VNA

```python
import serial
import time
import pyvisa
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import csv

# ..............................ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-ARDUINO.....................................................
arduino = serial.Serial('COM3',115200)   # άλλαξε το COM αν χρειάζεται
time.sleep(2)

# ..............................ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-VNA.....................................................
rm = pyvisa.ResourceManager()

vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')

vna.read_termination = '\n'
vna.write_termination = '\n'
vna.timeout = 10000

print(vna.query("*IDN?"))
print("VNA connection √")
```

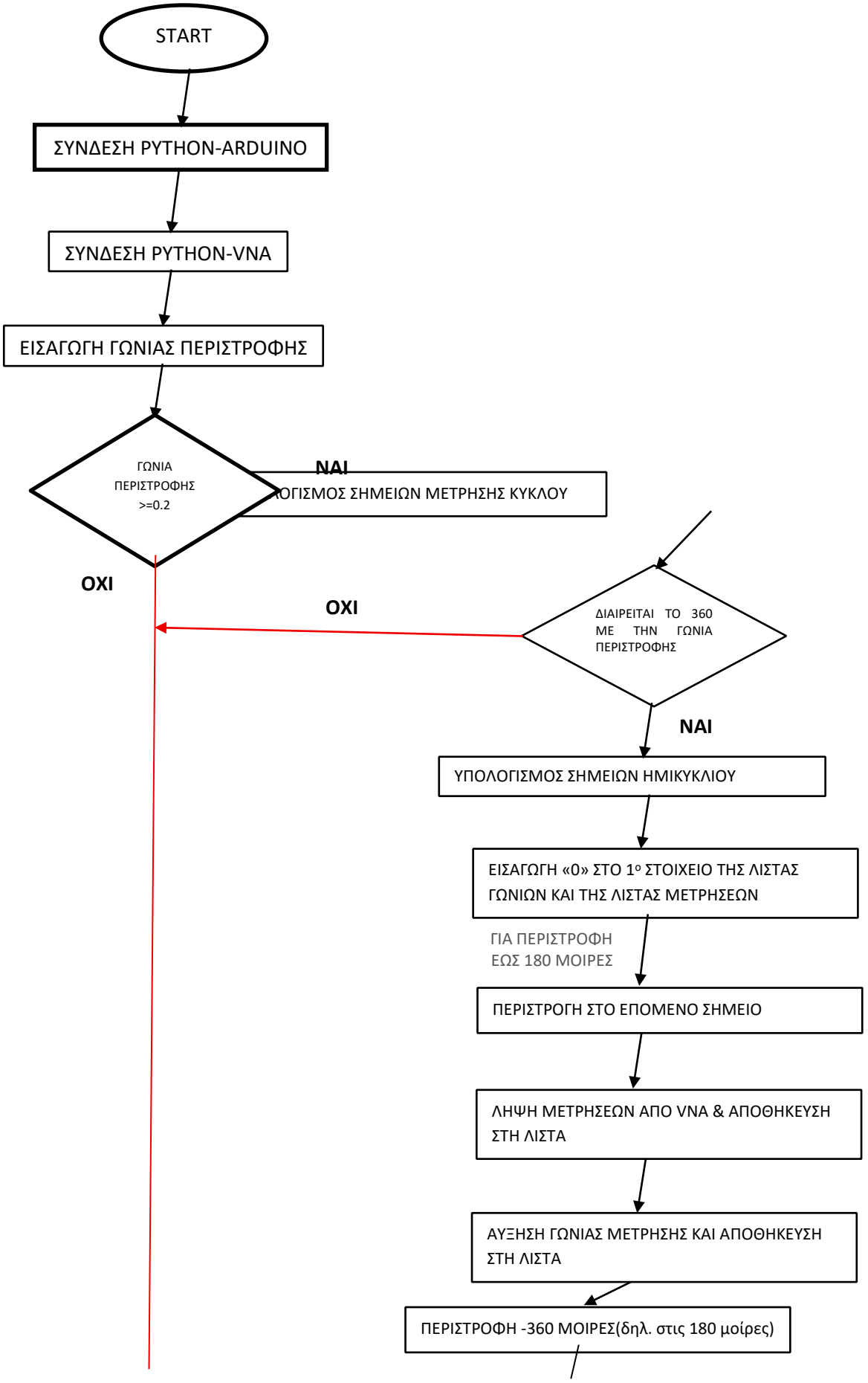
Εικόνα 46 - Περιβάλλον προγράμματος Python-παράμετροι VNA

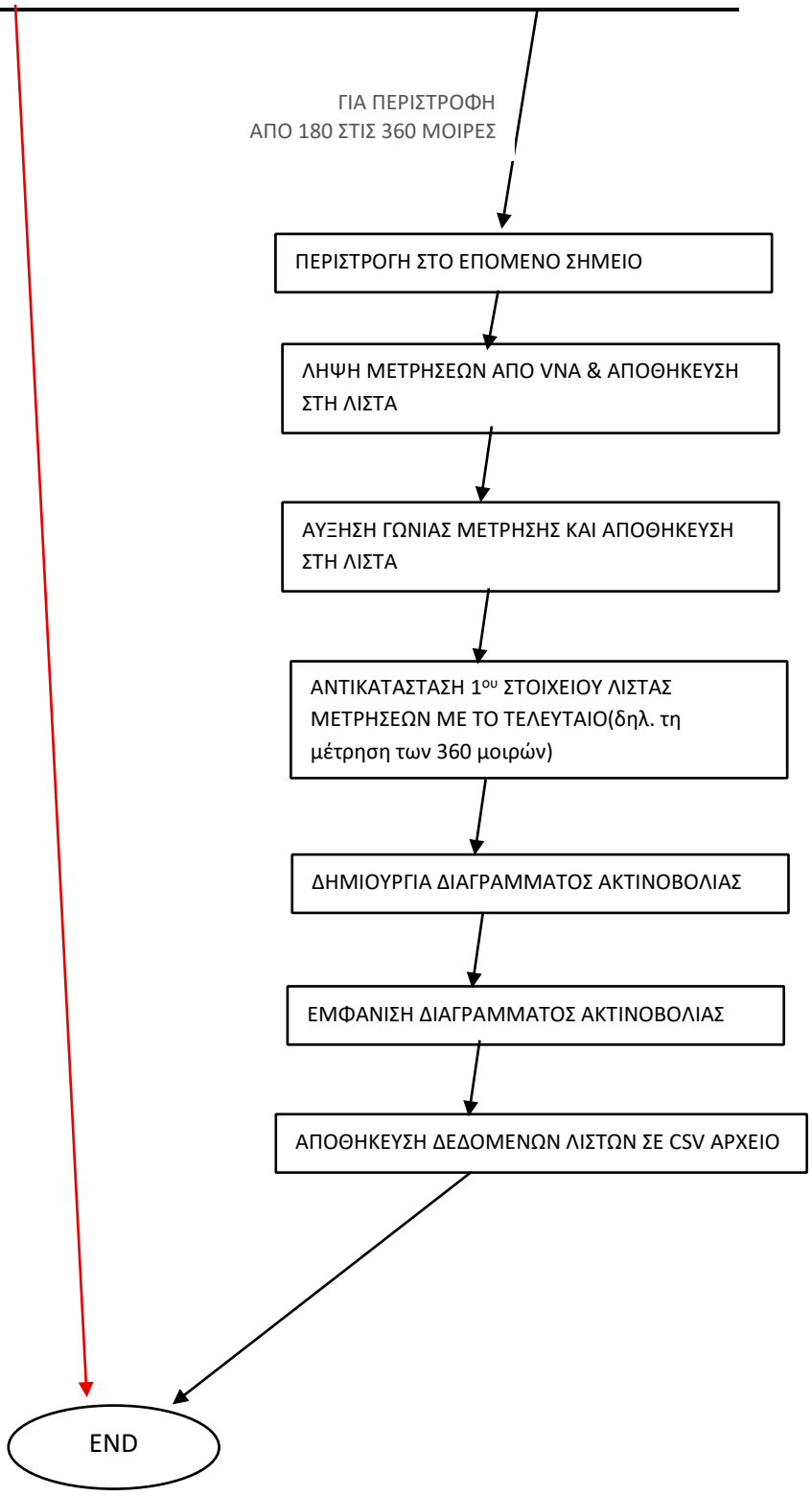
Μετά την ολοκλήρωση των απαραίτητων ρυθμίσεων, ακολουθεί η φόρτωση (upload) του κώδικα στο Arduino μέσω του κατάλληλου περιβάλλοντος ανάπτυξης και εκτελείται ο Python κώδικας, οδηγώντας στην έναρξη της διαδικασίας μέτρησης και στη συλλογή των δεδομένων.

5.1 Ανάλυση λειτουργίας Python κώδικα

Για την ομαλή εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων, σχεδιάστηκε ένας εξειδικευμένος αλγόριθμος σε περιβάλλον Python , η δομή του οποίου αποτυπώνεται στο παρακάτω block diagram . Η ροή των διεργασιών μπορεί να χωριστεί σε τρείς κύριες φάσεις.

Η πρώτη περιλαμβάνει τη σύνδεση των περιφερειακών συσκευών και την εισαγωγή των παραμέτρων της μέτρησης(γωνία περιστροφής). Στη δεύτερη φάση ο αλγόριθμος ελέγχει αν η γωνία είναι εντός των επιτρεπτών ορίων(>=0.2 μοιρών) και αν διαιρεί ακριβώς το κύκλο. Στη συνέχεια δίνει εντολές κίνησης και συλλέγει τα δεδομένα από το vna σε κάθε σημείο στάσης. Το τρίτο στάδιο είναι αυτό της επεξεργασίας όπου μετά την περιστροφή των 360 μοιρών πραγματοποιείται η οπτικοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας και η τελική αποθήκευση των μετρήσεων σε εξωτερικό αρχείο.


START
ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-ARDUINO
ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-VNA
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ
ΓΩΝΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ >=0.2
ΝΑΙ
ΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ
ΟΧΙ
ΟΧΙ
ΔΙΑΙΡΕΙΤΑΙ ΤΟ 360 ΜΕ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ
ΝΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΗΜΙΚΥΚΛΙΟΥ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ «0» ΣΤΟ 1ο ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΛΙΣΤΑΣ ΓΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΛΙΣΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
ΓΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΕΩΣ 180 ΜΟΙΡΕΣ
ΠΕΡΙΣΤΡΟΓΗ ΣΤΟ ΕΠΟΜΕΝΟ ΣΗΜΕΙΟ
ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ VNA & ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΗ ΛΙΣΤΑ
ΑΥΞΗΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΗ ΛΙΣΤΑ
ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ -360 ΜΟΙΡΕΣ(δηλ. στις 180 μοίρες)


ΓΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ
ΑΠΟ 180 ΣΤΙΣ 360 ΜΟΙΡΕΣ
ΠΕΡΙΣΤΡΟΓΗ ΣΤΟ ΕΠΟΜΕΝΟ ΣΗΜΕΙΟ
ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ VNA & ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΗ ΛΙΣΤΑ
ΑΥΞΗΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΗ ΛΙΣΤΑ
ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ 1ου ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΛΙΣΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ(δηλ. τη μέτρηση των 360 μοιρών)
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ
ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΛΙΣΤΩΝ ΣΕ CSV ΑΡΧΕΙΟ
END

5.2 Σχολιασμός κώδικα Python

```
import serial    // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για σειριακή επικοινωνία
import time    // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για να παρέχει καθυστερήσεις, για συγχρονισμό
import pyvisa    // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για επικοινωνία με το VNA
import numpy as np    // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για μαθηματικές πράξεις, μετατροπή σε ακτίνια
import matplotlib.pyplot as plt  // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για δημιουργία γραφημάτων
import csv    // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για αποθήκευση δεδομένων σε αρχείο CSV

arduino = serial.Serial('COM3',115200)  // Δημιουργεί σειριακή σύνδεση με το Arduino στη θύρα COM3 με baud rate 115200.
time.sleep(2)  // Αναμονή 2 δευτερολέπτων για σταθεροποίηση της σύνδεσης.

rm = pyvisa.ResourceManager() // Δημιουργεί διαχειριστή επικοινωνίας VISA
vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')    // Συνδέεται με το VNA μέσω TCP/IP (localhost, port 5025)
vna.read_termination = '\n'    // Ορίζει χαρακτήρα τερματισμού για σωστή ανάγνωση
vna.write_termination = '\n'    // Ορίζει χαρακτήρα τερματισμού για σωστή γραφή
vna.timeout = 10000    // Ορίζει timeout 10 δευτερολέπτων
print(vna.query("*IDN?"))    // Ζητά-εμφανίζει τα στοιχεία του VNA για επιβεβαίωση σύνδεσης
print("VNA connected") // Εμφανίζει μήνυμα επιτυχούς σύνδεσης

STEP_DELAY = 0.1    // Ορίζει την καθυστέρηση μεταξύ των βημάτων περιστροφής
s34_list = []    // Δημιουργεί λίστα για αποθήκευση μετρήσεων και γωνιών.
measure_angle = []    // Δημιουργεί λίστα για αποθήκευση γωνιών.
p = 0  // Ορίζεται μεταβλητή για υπολογισμό γωνιών.
ANGLE = 0    // Ορίζεται μεταβλητή για υπολογισμό γωνιών.

def rotate(direction):  // Ορισμός συνάρτησης για περιστροφή μετρητικής διάταξης
commands = {1: "1\r", -1: "2\r"} // Αντιστοιχία κατεύθυνσης με εντολές Arduino
if direction not in commands:  //Ελέγχει αν η τιμή της μεταβλητής direction δεν υπάρχει στο λεξικό commands
print("Invalid command")    //Εμφανίζει μήνυμα σφάλματος στον χρήστη ότι η εντολή δεν είναι έγκυρη
arduino.write(commands[direction].encode())  // Αποστολή εντολής στο Arduino.
```

```
// Περιμένει μέχρι το Arduino να στείλει επιβεβαίωση "done".
while True:
if arduino.in_waiting:
msg = arduino.readline().decode().strip()
if msg == "done":
break

time.sleep(STEP_DELAY)          // καθυστέρηση διάρκειας όσο η μεταβλητή STEP_DELAY, πριν το επόμενο βήμα.

def measure_s34():      // Ορισμός συνάρτησης για λήψη μετρήσεων S34
vna.write("CALC1:PAR1:DEF S34")         // Ορίζει την παράμετρο S34
vna.write("CALC1:FORM MLOG")            // Ορίζει λογαριθμική μορφή (dB)
vna.write("INIT:CONT OFF")              // Απενεργοποιεί συνεχείς μετρήσεις
vna.write("INIT")                       // Ξεκινά νέα μέτρηση
vna.query("*OPC?")                      // Περιμένει να ολοκληρωθεί η μέτρηση
data = vna.query("CALC1:DATA:FDAT?") // Παίρνει δεδομένα από το VNA
value = float(data.split(",")[0])       // Παίρνει την πρώτη τιμή και τη μετατρέπει σε float
return value            // Επιστρέφει τη μέτρηση

print("ΑΝ ΕΙΝΑΙ ΔΕΚΑΔΙΚΟΣ ΝΑ ΕΧΕΙ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ π.χ 0.2")      // Εμφανίζει οδηγίες για το χρήστη
ANGLE = float(input("Δωσε ανα ποσες μοιρες μετρηση: "))      // Ζητάει από το χρήστη ανά πόσες μοίρες να γίνεται η μέτρηση και  το αποθηκεύει στη μεταβλητή ANGLE
if ANGLE >= 0.2:        // Ελέγχει αν οι μοίρες που έδωσε ο χρήστης είναι άνω του ελάχιστου ορίου της κατασκευής
CIRCLE_STEP = 360 / ANGLE       // Υπολογίζει πλήθος βημάτων
if CIRCLE_STEP.is_integer():    // Ελέγχει αν το νούμερο που έδωσε ο χρήστης διαιρεί ακριβώς το 360, ώστε μπορεί να κάνει ακριβώς 360 μοίρες περιστροφή
CIRCLE_STEP = int(CIRCLE_STEP)          // Μετατρέπει την τιμή του CIRCLE_STEP από δεκαδικό σε ακέραιο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επαναλήψεις.

HALF_STEP = CIRCLE_STEP // 2  // Υπολογίζει τα βήματα του ημικύκλιου
print("Σημεία ημικυκλίου:", HALF_STEP)          // Εμφανίζει πόσα σημεία/μετρήσεις θα ληφθούν για το ημικύκλιο.
```

```
measure_angle.append(0)        // Αποθηκεύει την αρχική γωνία (0°) στη λίστα των γωνιών
s34_list.append(0)        // Ορίζει τη πρώτη τιμή ως 0 στη λίστα των μετρήσεων  S34 ,για τη γωνία 0°

for i in range(HALF_STEP):        //Επανάληψη για 0 έως 180 μοίρες
rotate(1)        // καλεί τη συνάρτηση rotate() και ζητάει δεξιόστροφη περιστροφή
value = measure_s34()  // καλεί τη συνάρτηση measure_s34() και αποθηκεύει το αποτέλεσμα στο value
s34_list.append(value)  // Αποθηκεύει το περιεχόμενο του value στη λίστα s34_list
p = p + ANGLE   // Αυξάνει τη μεταβλητή p κατά το βήμα γωνίας ANGLE
measure_angle.append(p)        // Αποθηκεύει το περιεχόμενο του p στη λίστα measure_angle

rotate(-1)        // καλεί τη συνάρτηση rotate() και ζητάει αριστερόστροφη περιστροφή -360 μοιρών

for i in range(HALF_STEP):        //Επανάληψη για 180 έως 360 μοίρες
rotate(1)        // καλεί τη συνάρτηση rotate() και ζητάει δεξιόστροφη περιστροφή
value = measure_s34()  // καλεί τη συνάρτηση measure_s34() και αποθηκεύει το αποτέλεσμα στο value
s34_list.append(value)  // Αποθηκεύει το περιεχόμενο του value στη λίστα s34_list
p = p + ANGLE   // Αυξάνει τη μεταβλητή p κατά το βήμα γωνίας ANGLE
measure_angle.append(p)        // Αποθηκεύει το περιεχόμενο του p στη λίστα measure_angle

print("THE END")        //Εμφανίζει μήνυμα ότι ολοκληρώθηκε η διαδικασία των μετρήσεων
print("S34 measurements:")        //Εμφανίζει μήνυμα πριν την εκτύπωση των μετρήσεων S34
s34_list[0] = s34_list[-1]        //Αντικαθιστά την πρώτη τιμή της λίστας s34_list με την τελευταία τιμή, ώστε το διάγραμμα να είναι «κλειστό»
print(s34_list)        //Εκτυπώνει όλες τις τιμές των μετρήσεων S34
measure_angle[0]        // Θέτει την τελευταία μέτρηση στη γωνία 0 μοιρών
print(measure_angle)        //Εκτυπώνει όλες τις γωνίες στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις
theta = np.radians(measure_angle)        //Μετατρέπει τις γωνίες από μοίρες σε ακτίνια, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πολικό διάγραμμα

fig = plt.figure()        //Δημιουργείται το «παράθυρο» του γραφήματος.
ax = fig.add_subplot(111, projection='polar')        //Προσθέτει ένα υποδιάγραμμα στο figure και το ορίζει ως πολικό σύστημα συντεταγμένων (polar plot).
ax.plot(theta, s34_list, marker='o')        //Σχεδιάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας σε πολικές
```

```
συντεταγμένες χρησιμοποιώντας τις γωνίες theta και τις τιμές της s34_list
ax.set_title("Radiation Pattern ")          //Ορίζει τον τίτλο του γραφήματος
max_value = max(s34_list)        //Υπολογίζει τη μέγιστη τιμή από τη λίστα s34_list
min_value = min(s34_list)        //Υπολογίζει τη ελάχιστη τιμή από τη λίστα s34_list
ax.set_ylim(min_value, max_value)       //Ορίζει τα όρια του άξονα
plt.show()       //Εμφανίζει το γράφημα στην οθόνη


//Αν η περιστροφή δεν «κλείνει κύκλο» τέλεια, το πρόγραμμα σταματά και εμφανίζει σφάλμα
else:
print("ΝΑ ΔΙΑΙΡΕΙΤΑΙ ΜΕ ΤΟ 360 ΧΩΡΙΣ ΥΠΟΛΟΙΠΟ")

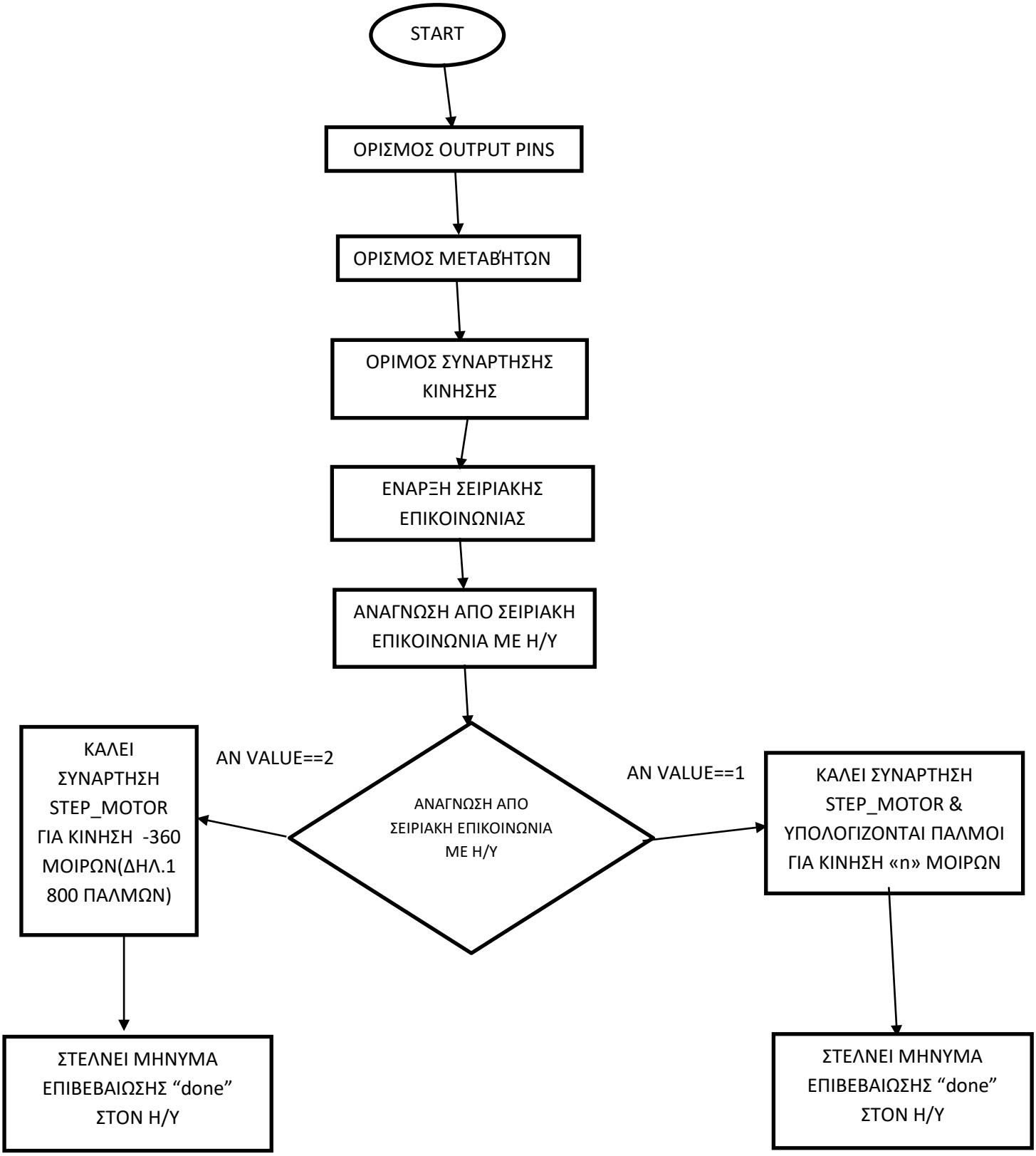
//όταν το ANGLE είναι μικρότερο από 0.2 το πρόγραμμα σταματά και εμφανίζει σφάλμα
else:
print("Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΧΕΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ 0.2 ΜΟΙΡΕΣ")


with open("csv_s34_measure.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file1:    //δημιουργεί αρχείο με όνομα csv_s34_measure.csv για εγγραφή ("w" = write)
writer = csv.writer(file1, delimiter=';')    // Δημιουργεί έναν "writer" για να γράφει δεδομένα στο CSV και ορίζει ως διαχωριστή το ;
writer.writerow(["s34_list", "measure_angle"])   //Γράφει την πρώτη γραμμή, τα ονόματα των στηλών
for s34, angle in zip(s34_list, measure_angle):    //Η zip παίρνει ένα στοιχείο από κάθε λίστα κάθε φορά (ζευγάρια τιμών)
writer.writerow([f"{s34:.3f}", angle])      //Γράφει κάθε ζευγάρι τιμών σε μια γραμμή του αρχείου. Τις τιμές της s34 τις διαμορφώνει με 3 δεκαδικά ψηφία
```

5.3 Ανάλυση λειτουργίας Arduino κώδικα

Το σύστημα ελέγχου κίνησης βασίζεται στον μικροελεγκτή Arduino, ο οποίος αναλαμβάνει τη μετατροπή των ψηφιακών εντολών που λαμβάνονται από το Python κώδικα σε φυσική κίνηση. Στο κώδικα διακρίνονται 3 σημαντικά στάδια.

Στο πρώτο μέρος ορίζονται τα output pins για τα σήματα step και direction toy driver ,ενώ ιδιαίτερη σημασία έχει η έναρξη σειριακής επικοινωνίας με τον Η/Υ. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η λήψη και η επεξεργασία των εντολών , το οποίο μένει σε κατάσταση αναμονής έως ότου λάβει μια τιμή. Στη περίπτωση όπου η τιμή είναι 1 ο μικροελεγκτής υπολογίζει τον απαιτούμενο αριθμό παλμών για τη προκαθορισμένη γωνία., ενώ στη περίπτωση που ισούται με 2 εκτελείται η αριστερόστροφη στροφή 360 μοιρών που ισούται με 1800 παλμούς. Στο 3^{ο} στάδιο γίνεται γ αποστολή του μηνύματος ‘done’ στο python κώδικα ενημερώνοντας ότι βρίσκεται στη σωστή θέση και μπορεί να συνεχίσει τη ροή του.


START
ΟΡΙΣΜΟΣ OUTPUT PINS
ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΗΤΩΝ
ΟΡΙΜΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΕΝΑΡΞΗ ΣΕΙΡΙΑΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΑΠΟ ΣΕΙΡΙΑΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ Η/Υ
ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΑΠΟ ΣΕΙΡΙΑΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ Η/Υ
AN VALUE==2
ΚΑΛΕΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ STEP_MOTOR ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ -360 ΜΟΙΡΩΝ(ΔΗΛ.1 800 ΠΑΛΜΩΝ)
ΣΤΕΛΝΕΙ ΜΗΝΥΜΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ “done” ΣΤΟΝ Η/Υ
AN VALUE==1
ΚΑΛΕΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ STEP_MOTOR & ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΠΑΛΜΟΙ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ «n» ΜΟΙΡΩΝ
ΣΤΕΛΝΕΙ ΜΗΝΥΜΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ “done” ΣΤΟΝ Η/Υ

5.4 Σχολιασμός Arduino κώδικα

```
//Ορίζονται τα output pins
#define STEP_PIN 2        // στέλνει παλμούς στον stepper motor
#define DIR_PIN 5         // καθορίζει κατεύθυνση περιστροφής
#define ENABLE_PIN 8      // ενεργοποιεί/απενεργοποιεί τον driver του κινητήρα
#define MIN_ANGLE 5       // Ορίζει μια σταθερά που συνδέει μοίρες με βήματα κινητήρα(0.2 ελάχιστη μοίρα stepper motor)
float angle = 2;  //Ορίζει γωνία περιστροφής σε μοίρες

void stepMotor(long steps, bool dir)      //Συνάρτηση που κινεί τον κινητήρα, όπου steps=ποσα βηματα θα κάνει & dir=κατεύθυνση (HIGH/LOW)
digitalWrite(DIR_PIN, dir);         // Θέτει την κατεύθυνση περιστροφής

for (long i = 0; i < steps; i++)       // Επαναλαμβάνει την κίνηση για κάθε βήμα
        // Δημιουργεί παλμό στον driver
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);    //ενεργοποίηση βήματος
        delayMicroseconds(800);          //καθυστέρηση 800ms
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);     // ολοκλήρωση βήματος
        delayMicroseconds(800);          //καθυστέρηση 800ms

void setup()      //Συνάρτηση αρχικοποιήσης, εκτελείται μια φορά
Serial.begin(115200);    //Ξεκινά σειριακή επικοινωνία με τον υπολογιστή
pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);   //Ορίζει το pin ως έξοδο
 pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);   //Ορίζει το pin ως έξοδο
 pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);        //Ορίζει το pin ως έξοδο
digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);          //Ενεργοποιεί τον driver του κινητήρα

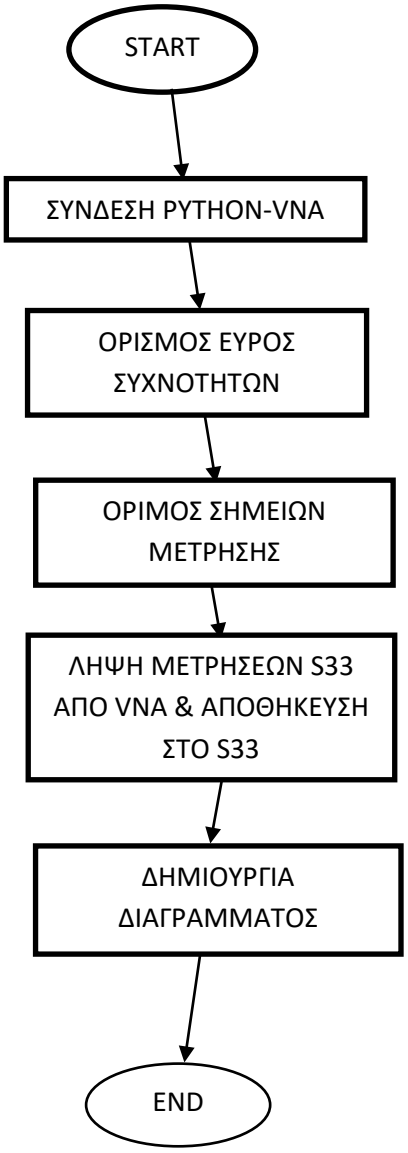
void loop()       //Κύρια συνάρτηση που επαναλαμβάνεται
if (Serial.available())      //Ελέγχει αν έχει σταλεί δεδομένο από τον υπολογιστή
float value = Serial.parseFloat();          //Διαβάζει τον αριθμό που έστειλε η Python
if (value == 1)             //Αν εντολή είναι 1
stepMotor(MIN_ANGLE * angle, HIGH);          //Ο κινητήρας κινείται προς τη θετική κατεύθυνση (βήματα = MIN_ANGLE × angle)
Serial.println("done");             //Στέλνει μήνυμα στην Python ότι ολοκληρώθηκε
```

```
else if (value == 2)        //Αν εντολή είναι 2
stepMotor(1800, LOW);       //Κινεί τον κινητήρα πίσω (αριστερόστροφα) για 1800 βήματα
Serial.println("done");      // Στέλνει μήνυμα στην Python ότι ολοκληρώθηκε
```

5.5 Ανάλυση λειτουργίας Python κώδικα μέτρησης S_{33}

Για τη μέτρηση της παραμέτρου S_{33} & S_{44} αντίστοιχα ακολουθήθηκε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία λήψης δεδομένων με τη βοήθεια του VNA η οποία ελέγχεται μέσω κώδικα Python. Η δομή του αποτελείται από τρία στάδια.

Στο πρώτο αποκαθίσταται η σύνδεση μεταξύ Η/Υ και Vector Network Analyzer. Έπειτα ορίζεται το εύρος συχνοτήτων στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η σάρωση καθώς και αριθμό σημείων μέτρησης, παράμετροι που καθορίζουν τη διακριτική ικανότητα . Στο δεύτερο στάδιο το λογισμικό δίνει εντολή για τη λήψη των μετρήσεων της παραμέτρου S_{33} και S_{44} αντίστοιχα. Στο τελευταίο στάδιο τα δεδομένα συλλέγονται και αποθηκεύονται για επιπλέον επεξεργασία. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων επιτρέποντας την άμεση αξιολόγηση από το χρήστη.


START
ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-VNA
ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
ΟΡΙΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ S33 ΑΠΟ VNA & ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΟ S33
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
END

5.6 Σχολιασμός κώδικα Python μέτρησης S_{33}

```
import serial      // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για σειριακή επικοινωνία
import time        // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για να παρέχει καθυστερήσεις, για συγχρονισμό
import pyvisa      // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για επικοινωνία με το VNA
import numpy as np      // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για μαθηματικές πράξεις
import matplotlib.pyplot as plt   // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για δημιουργία γραφημάτων
import csv         // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για αποθήκευση δεδομένων σε αρχείο CSV


rm = pyvisa.ResourceManager()            //Δημιουργεί διαχειριστή επικοινωνίας VISA
vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')      //Συνδέεται με το VNA μέσω TCP/IP (localhost, port 5025)
vna.read_termination = '\n'       // Ορίζει χαρακτήρα τερματισμού για σωστή ανάγνωση
vna.write_termination = '\n'      // Ορίζει χαρακτήρα τερματισμού για σωστή γραφή
vna.timeout = 10000      // Ορίζει timeout 10 δευτερολέπτων


print(vna.query("*IDN?"))         // Ζητά-εμφανίζει τα στοιχεία του VNA για επιβεβαίωση σύνδεσης
print("VNA connected") // Εμφανίζει μήνυμα επιτυχούς σύνδεσης


f_start = 5e9     // Ορίζει συχνότητα εκκίνησης
f_stop = 15e9     //Ορίζει συχνότητα τελική
points = 201      //Ορίζει αριθμό σημείων-μετρήσεων


def s33_measure(vna, f_start, f_stop, points):            // Ορίζει συνάρτηση για μέτρηση S33
vna.write(f'SENS:FREQ:STAR {f_start}')            //Στέλνει στο VNA τη αρχική συχνότητα
vna.write(f'SENS:FREQ:STOP {f_stop}')             //Στέλνει στο VNA τη τελική συχνότητα
vna.write(f'SENS:FREQ:POIN {points}')             //Στέλνει στο VNA τον αριθμό σημείων μέτρησης

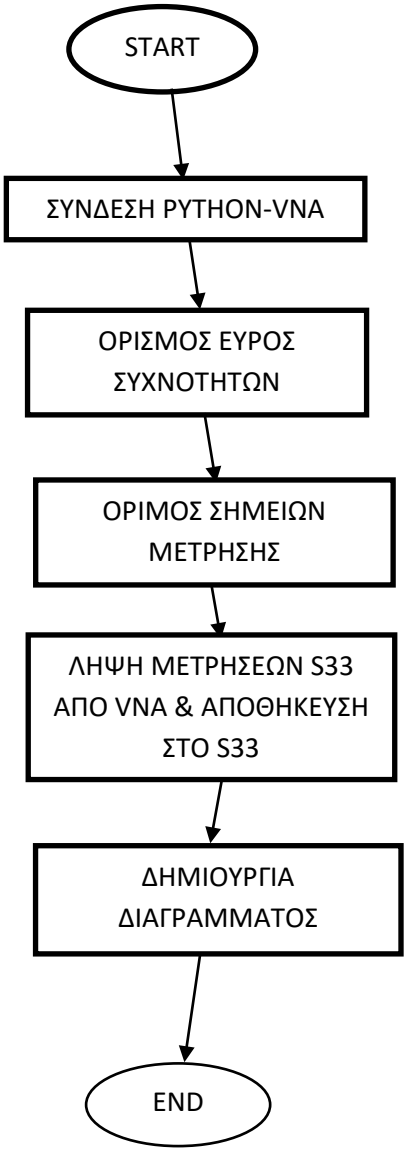

vna.write("CALC1:PAR1:DEF S33")          //Ορίζει στο VNA το τύπο μέτρησης S33
vna.write("CALC1:PAR1:SEL")              // Επιλέγει το S33 ως ενεργή παράμετρο
vna.write("CALC1:FORM MLOG")             // Ορίζει μορφή σε Db
vna.write('TRIG:SING')             // Εκτελεί single sweep μέτρηση
vna.query("*OPC?")                 // Περιμένει να ολοκληρωθεί η μέτρηση
```

```
data_s33 = vna.query("CALC1:DATA:FDAT?")      // Παίρνει όλα τα δεδομένα από το VNA
data_s33 = data_s33.split(',')                // Χωρίζει τη λίστα δεδομένων
data_s33 = data_s33[::2]                      // Κρατά μόνο τις τιμές S33
data_s33 = [float(x) for x in data_s33]       // Μετατρέπει τα δεδομένα σε αριθμούς float
return(data_s33)                              // Επιστρέφει τη λίστα με τις μετρήσεις S33

s33 = s33_measure(vna, f_start, f_stop, points)  // Καλεί τη συνάρτηση και αποθηκεύει τα δεδομένα στο s33
print(s33)                                    // Εκτυπώνει τις τιμές S33

freqs = np.linspace(f_start, f_stop, points)  //Δημιουργεί πίνακα συχνοτήτων
freqs = freqs / 1e9                           //Μετατρέπει Hz  σε GHz
plt.plot(freqs, s33)                          //Δημιουργεί γράφημα s33 μετρήσεων-συχνοτήτων
plt.xlabel("frequency")                       //Ονομάζει x άξονα
plt.ylabel("s33 dB")                          //Ονομάζει y άξονα
plt.title("s33 diagram")                      //Ορίζει τίτλο γραφήματος
plt.show(block=True)                          //Εμφανίζει το γράφημα και σταματά την εκτέλεση μέχρι να κλείσει
x = int(input("ΓΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΑΤΑ 1"))       //Ζητά από τον χρήστη αν θέλει αποθήκευση(αν θέλει παταει 1)
if x == 1:                                    //Αν x=1 ,δηλαδή αποθήκευση
with open("csv_freq_s33.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file2:   //Δημιουργεί αρχείο CSV
writer = csv.writer(file2, delimiter=';')     //Δημιουργεί έναν "writer" για να γράφει δεδομένα στο CSV και ορίζει ως διαχωριστή το ;
writer.writerow(["freqs", "s33"])             // Γράφει την πρώτη γραμμή, τα ονόματα των στηλών
for f, s33_val in zip(freqs, s33):            //Η zip παίρνει ένα στοιχείο από κάθε λίστα κάθε φορά (ζευγάρια τιμών)
writer.writerow([f, f"{s33_val:.3f}"])        //Γράφει δεδομένα με 3 δεκαδικά
print("SAVED")                                //Εμφανίζει επιβεβαίωση αποθήκευσης

//Εμφανίζει μήνυμα αν δεν επιλεχθεί αποθήκευση
else:
   print("ΔΕΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΗΚΕ")
```


START
ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-VNA
ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
ΟΡΙΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ S33 ΑΠΟ VNA & ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΤΟ S33
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
END

5.7 Σχολιασμός κώδικα Python μέτρησης S_{44}

```
import serial      // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για σειριακή επικοινωνία
import time        // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για να παρέχει καθυστερήσεις, για συγχρονισμό
import pyvisa      // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για επικοινωνία με το VNA
import numpy as np      // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για μαθηματικές πράξεις
import matplotlib.pyplot as plt   // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη  για δημιουργία γραφημάτων
import csv         // Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη για αποθήκευση δεδομένων σε αρχείο CSV


rm = pyvisa.ResourceManager()          //Δημιουργεί διαχειριστή επικοινωνίας VISA
vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')      //Συνδέεται με το VNA μέσω TCP/IP (localhost, port 5025)
vna.read_termination = '\n'       // Ορίζει χαρακτήρα τερματισμού για σωστή ανάγνωση
vna.write_termination = '\n'      // Ορίζει χαρακτήρα τερματισμού για σωστή γραφή
vna.timeout = 10000     // Ορίζει timeout 10 δευτερολέπτων


print(vna.query("*IDN?"))         // Ζητά-εμφανίζει τα στοιχεία του VNA για επιβεβαίωση σύνδεσης
print("VNA connected") // Εμφανίζει μήνυμα επιτυχούς σύνδεσης


f_start = 5e9     // Ορίζει συχνότητα εκκίνησης
f_stop = 15e9     //Ορίζει συχνότητα τελική
points = 201      //Ορίζει αριθμό σημείων-μετρήσεων


def s33_measure(vna, f_start, f_stop, points):          // Ορίζει συνάρτηση για μέτρηση S44
vna.write(f'SENS:FREQ:STAR {f_start}')          //Στέλνει στο VNA τη αρχική συχνότητα
vna.write(f'SENS:FREQ:STOP {f_stop}')           //Στέλνει στο VNA τη τελική συχνότητα
vna.write(f'SENS:FREQ:POIN {points}')           //Στέλνει στο VNA τον αριθμό σημείων μέτρησης


vna.write("CALC1:PAR1:DEF S44")         //Ορίζει στο VNA το τύπο μέτρησης S44
vna.write("CALC1:PAR1:SEL")             // Επιλέγει το S33 ως ενεργή παράμετρο
vna.write("CALC1:FORM MLOG")            // Ορίζει μορφή σε Db
vna.write('TRIG:SING')          // Εκτελεί single sweep μέτρηση
vna.query("*OPC?")              // Περιμένει να ολοκληρωθεί η μέτρηση
```

```
data_s33 = vna.query("CALC1:DATA:FDAT?")      // Παίρνει όλα τα δεδομένα από το VNA
data_s33 = data_s44.split(',')                // Χωρίζει τη λίστα δεδομένων
data_s33 = data_s44[::2]                      // Κρατά μόνο τις τιμές S44
data_s33 = [float(x) for x in data_s44]       // Μετατρέπει τα δεδομένα σε αριθμούς float
return(data_s44)                              // Επιστρέφει τη λίστα με τις μετρήσεις S44

s44 = s44_measure(vna, f_start, f_stop, points)  // Καλεί τη συνάρτηση και αποθηκεύει τα δεδομένα στο s44
print(s44)                                    // Εκτυπώνει τις τιμές S44

freqs = np.linspace(f_start, f_stop, points)  //Δημιουργεί πίνακα συχνοτήτων
freqs = freqs / 1e9                           //Μετατρέπει Hz  σε GHz
plt.plot(freqs, s44)                          //Δημιουργεί γράφημα s33 μετρήσεων-συχνοτήτων
plt.xlabel("frequency")                       //Ονομάζει x άξονα
plt.ylabel("s44 dB")                          //Ονομάζει y άξονα
plt.title("s44 diagram")                      //Ορίζει τίτλο γραφήματος
plt.show(block=True)                          //Εμφανίζει το γράφημα και σταματά την εκτέλεση μέχρι να κλείσει
x = int(input("ΓΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΑΤΑ 1"))       //Ζητά από τον χρήστη αν θέλει αποθήκευση(αν θέλει παταει 1)
if x == 1:                                    //Αν x=1 ,δηλαδή αποθήκευση
with open("csv_freq_s44.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file2:   //Δημιουργεί αρχείο CSV
writer = csv.writer(file2, delimiter=';')     //Δημιουργεί έναν "writer" για να γράφει δεδομένα στο CSV και ορίζει ως διαχωριστή το ;
writer.writerow(["freqs", "s44"])             // Γράφει την πρώτη γραμμή, τα ονόματα των στηλών
for f, s33_val in zip(freqs, s44):            //Η zip παίρνει ένα στοιχείο από κάθε λίστα κάθε φορά (ζευγάρια τιμών)
writer.writerow([f, f"{s44_val:.3f}"])        //Γράφει δεδομένα με 3 δεκαδικά
print("SAVED")                                //Εμφανίζει επιβεβαίωση αποθήκευσης

//Εμφανίζει μήνυμα αν δεν επιλεχθεί αποθήκευση
else:
   print("ΔΕΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΗΚΕ")
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 Μετρήσεις και Συμπεράσματα

Αφού ολοκληρώθηκε η διαμόρφωση της μετρητικής διάταξης και εξασφαλίστηκε η κατάλληλη προετοιμασία για τη λήψη μετρήσεων, ξεκίνησαν οι μετρήσεις της κεραίας.

6.1 Αποτελέσματα S_{33}

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης S_{33}. Από τα χαρακτηριστικά της κεραίας αναμένεται να ελαχιστοποιείται γύρω στα $10\,GHz$. Μέσω του VNA, χωρίς περιστροφή της μετρητικής διάταξης, λήφθηκαν 201 τιμές S_{33} σε εύρος συχνοτήτων από τα $5\,GHz$ έως τα $15\,GHz$.Γραφικά τα αποτελέσματα αναπαρίστανται στην επόμενη εικόνα. Από το γράφημα φαίνεται ότι το ελάχιστο παρουσιάζεται αρκετά ψηλότερα από τα $10\,GHz$ (περίπου στα $12.6\,GHz$)αλλά και ότι υπάρχει αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης που παρουσιάζει $S_{33} < -10dB$ στο οποίο προσαρμόζει καλά στο καλώδιο. Αυτό αντιβαίνει με τα θεωρητικά αναμενόμενα χαρακτηριστικά της κεραίας μιας και οι μικροταινιακές κεραίες εν γένει παρουσιάζουν καλή προσαρμογή (σταθερή εμπέδηση εισόδου) σε πολύ στενό εύρος ζώνης ($3-4\%$) και είναι κάτι θα πρέπει να διερευνηθεί σε μελλοντικές μετρήσεις. Η διαφωνία αποδόθηκε στην βαθμονόμηση του οργάνου (VNA) αλλά δεν διερευνήθηκε παραπάνω στην παρούσα μιας και στο επόμενο βήμα (μέτρηση S_{34}) η επιλογή για την χρήση των κανονικοποιημένων τιμών σε μία συγκεκριμένη συχνότητα αφαιρεί οποιαδήποτε πρόβλημα μπορεί να εισάγει η τυχόν εσφαλμένη βαθμονόμηση.

Πίνακας 2 –Αποτελέσματα Μέτρησης S_{33} (Insertion Loss)

Συχνότητα (GHz)	$S33$ (dB)
5	-11.16
5.05	-10.907
5.1	-10.914
5.15	-7.944
5.2	-12.38
5.25	-9.452
5.3	-10.689
5.35	-11.939
5.4	-8.012
5.45	-10.622
5.5	-7.284
5.55	-8.7
5.6	-11.01
5.65	-8.005
5.7	-11.497

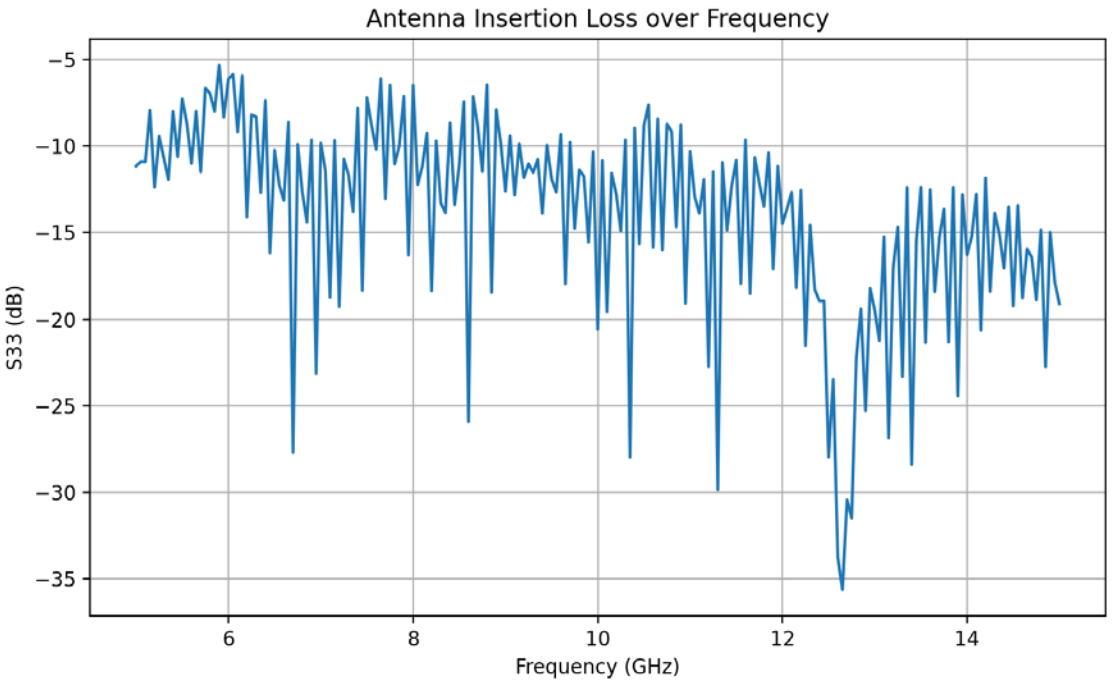
5.75	-6.635
5.8	-6.976
5.85	-7.993
5.9	-5.319
5.95	-8.329
6	-6.138
6.05	-5.865
6.1	-9.196
6.15	-5.94
6.2	-14.107
6.25	-8.187
6.3	-8.31
6.35	-12.695
6.4	-7.362
6.45	-16.176
6.5	-10.244
6.55	-12.24
6.6	-13.151
6.65	-8.626
6.7	-27.71
6.75	-9.894
6.8	-12.677
6.85	-14.397
6.9	-9.651
6.95	-23.16
7	-9.838
7.05	-11.413
7.1	-18.746
7.15	-9.674
7.2	-19.299
7.25	-10.758
7.3	-11.658
7.35	-13.805
7.4	-7.797
7.45	-18.344
7.5	-7.204
7.55	-8.822
7.6	-10.198
7.65	-6.116
7.7	-13.05
7.75	-6.485
7.8	-11.044
7.85	-10.006
7.9	-7.126
7.95	-16.301
8	-6.5

8.05	-12.234
8.1	-11.167
8.15	-9.254
8.2	-18.366
8.25	-9.707
8.3	-13.295
8.35	-13.868
8.4	-8.669
8.45	-13.386
8.5	-11.077
8.55	-7.433
8.6	-25.929
8.65	-7.141
8.7	-8.872
8.75	-11.479
8.8	-6.47
8.85	-18.463
8.9	-7.91
8.95	-9.868
9	-12.602
9.05	-9.423
9.1	-12.837
9.15	-9.876
9.2	-11.84
9.25	-11.023
9.3	-11.53
9.35	-10.781
9.4	-13.898
9.45	-9.954
9.5	-11.905
9.55	-12.66
9.6	-9.334
9.65	-17.958
9.7	-9.787
9.75	-14.76
9.8	-11.368
9.85	-11.768
9.9	-15.562
9.95	-10.328
10	-20.59
10.05	-10.846
10.1	-19.591
10.15	-11.576
10.2	-12.766
10.25	-14.912
10.3	-9.65

10.35	-27.981
10.4	-8.96
10.45	-15.67
10.5	-8.812
10.55	-7.636
10.6	-15.848
10.65	-8.415
10.7	-16.017
10.75	-8.732
10.8	-9.166
10.85	-14.678
10.9	-8.761
10.95	-19.096
11	-10.298
11.05	-12.926
11.1	-13.895
11.15	-11.943
11.2	-22.762
11.25	-11.484
11.3	-29.861
11.35	-10.939
11.4	-14.879
11.45	-12.315
11.5	-10.822
11.55	-17.947
11.6	-9.647
11.65	-18.536
11.7	-10.656
11.75	-12.155
11.8	-13.501
11.85	-10.38
11.9	-17.112
11.95	-11.165
12	-14.48
12.05	-13.628
12.1	-12.67
12.15	-18.199
12.2	-12.553
12.25	-21.527
12.3	-14.551
12.35	-18.283
12.4	-18.951
12.45	-18.947
12.5	-27.972
12.55	-23.473
12.6	-33.766

12.65	-35.633
12.7	-30.436
12.75	-31.491
12.8	-22.255
12.85	-19.422
12.9	-25.297
12.95	-18.214
13	-19.497
13.05	-21.252
13.1	-15.239
13.15	-26.852
13.2	-17.039
13.25	-14.689
13.3	-23.318
13.35	-12.391
13.4	-28.399
13.45	-15.513
13.5	-12.377
13.55	-21.363
13.6	-12.526
13.65	-18.411
13.7	-15.281
13.75	-13.647
13.8	-21.329
13.85	-12.387
13.9	-24.437
13.95	-12.801
14	-16.278
14.05	-15.239
14.1	-12.779
14.15	-20.654
14.2	-11.858
14.25	-18.398
14.3	-13.882
14.35	-15.093
14.4	-17.062
14.45	-13.513
14.5	-19.249
14.55	-13.427
14.6	-18.776
14.65	-15.945
14.7	-16.419
14.75	-18.895
14.8	-14.836
14.85	-22.768
14.9	-14.985

14.95	-17.864
15	-19.12

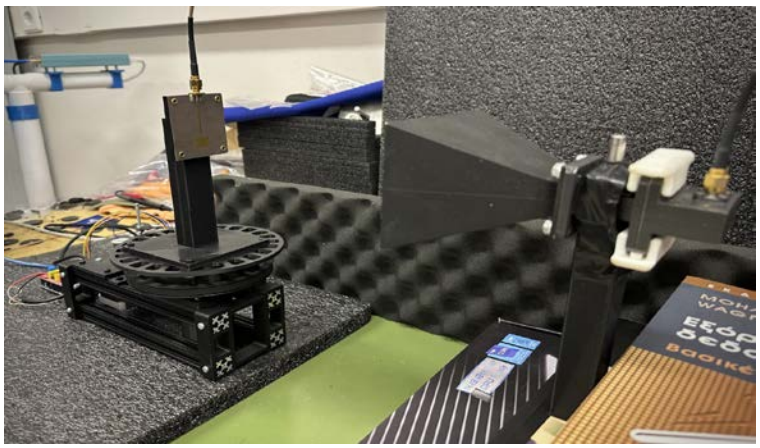


Εικόνα 47 – Συντελεστής Ανάκλασης ($S33$) σε σχέση με τη συχνότητα

6.2 Αποτελέσματα S_{34}

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εκκίνηση του προγράμματος με σκοπό τη μέτρηση της παραμέτρου S_{34}, με περιστροφή της κεραίας με γωνιακή ανάλυση (βήμα) 2°. Η συχνότητα μέτρησης επιλέχθηκε να είναι τα $10\ GHz$ μιας και είναι η θεωρητική τιμή συχνότητας συντονισμού της κεραίας, δηλαδή η συχνότητα στην οποία ακτινοβολεί βέλτιστα και ταυτόχρονα με βάση την προηγούμενη μέτρηση διαπιστώθηκε ότι το $S_{33} \cong -20dB$, άρα προσαρμόζει εξαιρετικά στο καλώδιο.

Για τη διεξαγωγή της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο κεραίες, οι οποίες λειτούργησαν ως πομπός και δέκτης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ως πομπός χρησιμοποιήθηκε κεραία μικροταινιακού τύπου, ενώ ως δέκτης κεραία τύπου χοάνης. Οι δύο κεραίες τοποθετήθηκαν η μια απέναντι από την άλλη, διατηρώντας το ίδιο ύψος, στην βέλτιστη ευθυγράμμιση μεταξύ τους ώστε να εξασφαλιστούν συνθήκες αξιόπιστης μετάδοσης του σήματος.



Εικόνα 48 - Τοποθέτηση κεραιών πριν τη λήψη μέτρησης

Η μετάδοση του σήματος μεταξύ των 2 κεραιών εκφράζεται μεσω της παραμέτρου σκέδασης S_{34}, η οποία καταγράφεται για κάθε γωνιακή θέση της μικροταινιακής κεραίας κατά την περιστροφή της. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος ως συνάρτηση της γωνίας.

Στη συνέχεια, οι τιμές της παραμέτρου S_{34} κανονικοποιούνται, αφαιρώντας από κάθε μέτρηση τη μέγιστη τιμή που καταγράφηκε. Έτσι η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στα 0 dB, ενώ όλες οι υπόλοιπες εκφράζονται ως σχετικές τιμές προς αυτήν. Η κανονικοποίηση χρησιμοποιείται ώστε να εξαλειφθεί η τυχόν επίδραση παραγόντων όπως οι απώλειες καλωδίων, η απόσταση μεταξύ των κεραιών, σφάματα βαθμονόησης κ.τ.λ. Μετά την κανονικοποιήση, τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση του διαγράμματος ακτινοβολίας της μικροταινιακής κεραίας, το οποίο αποτυπώνει τη σχετική κατανομή της ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής.

Πίνακας 3 – Κανονικοποιημένα Αποτελέσματα Μέτρησης S_{34} (Διάγραμμα Ακτινοβολίας)

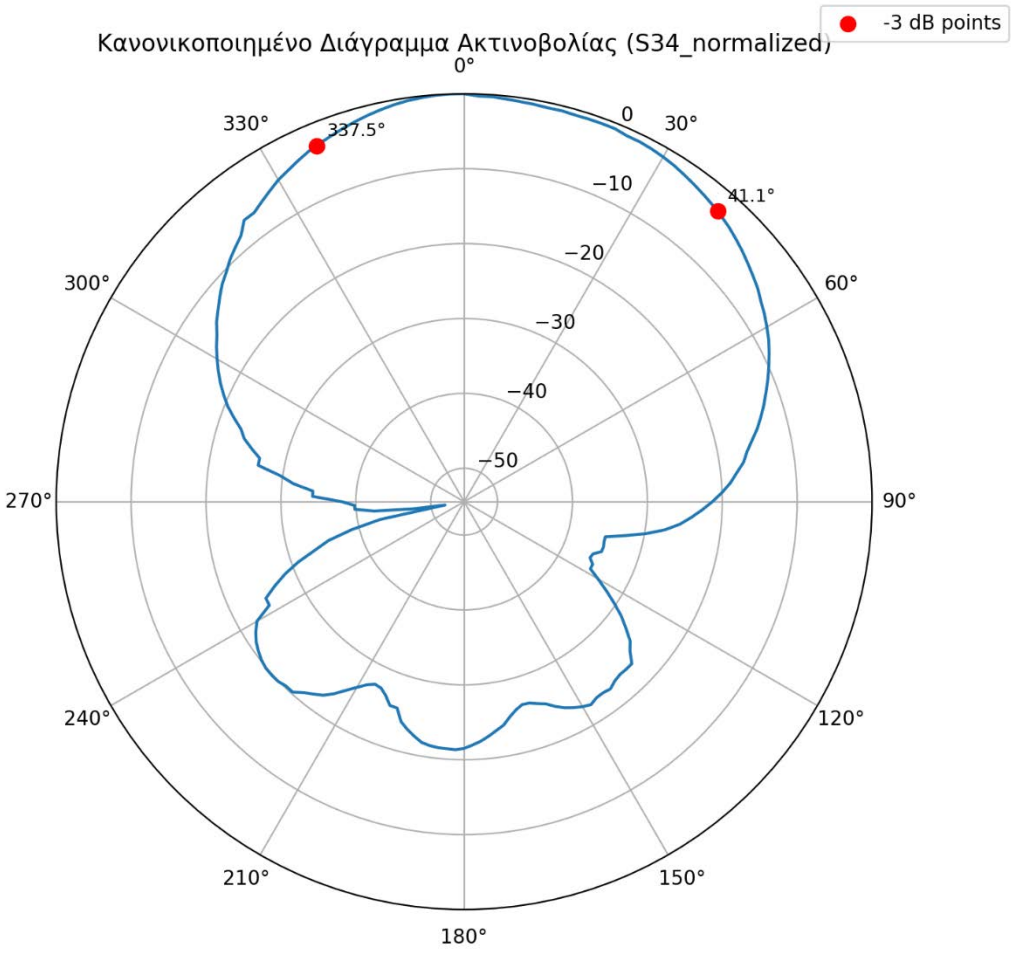
Γωνία (°)	Κανονικοποιημένο S_{34} (dB)
0	0.000
2	-0.271
4	-0.272
6	-0.409
8	-0.525
10	-0.598
12	-0.707
14	-0.664
16	-0.759
18	-0.737
20	-0.735
22	-0.742
24	-0.998
26	-0.998
28	-1.130
30	-1.319
32	-1.546

34	-1.857
36	-2.169
38	-2.484
40	-2.805
42	-3.160
44	-3.540
46	-4.006
48	-4.480
50	-5.004
52	-5.516
54	-6.012
56	-6.664
58	-7.186
60	-7.799
62	-8.404
64	-9.154
66	-9.929
68	-10.720
70	-11.563
72	-12.365
74	-13.232
76	-14.123
78	-15.175
80	-16.117
82	-16.798
84	-17.879
86	-18.840
88	-20.025
90	-21.308
92	-22.678
94	-24.075
96	-25.516
98	-27.403
100	-29.832
102	-32.620
104	-35.033
106	-35.033
108	-34.895
110	-34.945
112	-35.883
114	-36.056
116	-35.370
118	-35.370
120	-33.821
122	-32.117
124	-30.354

126	-28.554
128	-27.063
130	-25.528
132	-24.672
134	-23.331
136	-23.331
138	-23.388
140	-23.187
142	-22.735
144	-22.909
146	-22.870
148	-22.504
150	-22.846
152	-23.312
154	-23.842
156	-24.521
158	-25.341
160	-25.760
162	-26.181
164	-26.285
166	-25.815
168	-25.085
170	-24.152
172	-23.590
174	-22.979
176	-22.405
178	-21.951
180	-21.513
182	-21.327
184	-21.394
186	-21.422
188	-21.563
190	-21.809
192	-22.442
194	-23.118
196	-23.901
198	-25.490
200	-25.490
202	-26.526
204	-27.204
206	-27.334
208	-26.763
210	-25.830
212	-24.764
214	-23.544
216	-22.504

218	-21.850
220	-21.173
222	-20.232
224	-20.232
226	-19.919
228	-19.869
230	-19.889
232	-20.120
234	-20.513
236	-20.964
238	-21.652
240	-22.517
242	-25.007
244	-25.007
246	-26.792
248	-28.676
250	-30.900
252	-33.545
254	-35.615
256	-38.970
258	-42.979
260	-51.865
262	-47.633
264	-42.378
266	-39.831
268	-39.831
270	-38.107
272	-34.214
274	-34.214
276	-31.537
278	-29.713
280	-26.547
282	-26.547
284	-25.226
286	-23.917
288	-23.137
290	-21.770
292	-20.406
294	-19.301
296	-18.249
298	-17.288
300	-16.384
302	-15.476
304	-14.655
306	-13.611
308	-12.775

310	-11.879
312	-11.008
314	-10.330
316	-9.477
318	-8.798
320	-8.102
322	-6.764
324	-6.764
326	-6.149
328	-5.514
330	-4.854
332	-4.378
334	-3.828
336	-3.308
338	-2.892
340	-2.497
342	-2.069
344	-1.671
346	-1.293
348	-0.954
350	-0.644
352	-0.391
354	-0.219
356	-0.067
358	-0.003



Εικόνα 49 – Κανονικοποιημένο Διάγραμμα ακτινοβολίας μικροταινιακής κεραίας

Το αποτέλεσμα, έπειτα από την μέτρηση, εν γένει συμφωνεί με τη θεωρητική αναμενόμενη συμπεριφορά. Στο διάγραμμα ακτινοβολίας απεικονίζονται όλοι οι λοβοί με το κύριο λοβό να παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση στις 0^o. Η παρατηρούμενη ελαφριά ασυμμετρία του κυρίου λοβού γύρω από τις 0^o οφείλεται σε ανακλάσεις στον περιβάλλον χώρο της μέτρησης. Επίσης παρατηρείται οπίσθιος λοβός γύρω από τις 180 μοίρες ο οποίος επίσης οφείλεται σε ανακλάσεις. Στο διάγραμμα σημειώνονται επίσης οι γωνίες $-3dB$ με εύρος λοβού 63.62°, σαφώς διευρυμένο λόγω των ανακλάσεων.

7 Βιβλιογραφία

[1] Constantine A. Balanis, ”Antenna theory, Analysis and design 4th Edition”, ISBN 978-1-118-64206-

[2] John D.Kraus – Ronald J.Marhefka, “ANTENNAS for All Applications, 3rd Edition”, ISBN 978-0-071-23201-2

[3] X. Zhang, M. Lin, X. Zhang and Y. Li, "The Design of Microstrip Array Antenna and Its Optimization by a Memetic Method," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96434-96443, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929557,

[4] James-Clerk-Maxwell-1831-1879 - James Clerk Maxwell - Wikipedia

[5] J. Blanchard, "Hertz, the discoverer of electric waves," in *The Bell System Technical Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 326-337, July 1938, doi: 10.1002/j.1538-7305.1938.tb00783.x.

[6] HEINRICH HERTZ - Heinrich Hertz - Wikipedia

[7] Guglielmo Marconi - Guglielmo Marconi - Wikipedia

[8] K. Mydhili, P. Parvathi and K. Prasanthi, "DESIGN AND SIMULATION OF EDGE FED MICROSTRIP PATCH ANTENNA ARRAY," *2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), 2018 2nd International Conference on*, Palladam, India, 2018, pp. 356-360, doi: 10.1109/I-SMAC.2018.8653698,

[9] M. Tariqul Islam, N. Misran, M. N. Shakib and B. Yatim, "Analysis of L-probe fed slotted microstrip patch antenna," *2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Guangzhou, China, 2008, pp. 380-383, doi: 10.1109/ICCS.2008.4737209,

[10] K. Mydhili, P. Parvathi and K. Prasanthi, "DESIGN AND SIMULATION OF EDGE FED MICROSTRIP PATCH ANTENNA ARRAY," 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), 2018 2nd International Conference on, Palladam, India, 2018, pp. 356-360, doi: 10.1109/I-SMAC.2018.8653698

[11] D. C. Nascimento and J. C. da S. Lacava, "Probe-Fed Linearly-Polarized Electrically-Equivalent Microstrip Antennas on FR4 Substrates," Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, vol. 13, no. 1, pp. 55-66, June 2014, doi: 10.1590/S2179-10742014000100005.

[12] J. -I. Oh, H. Cho, J. -H. Lee, S. H. Han, C. Lee and J. -W. Yu, "Cavity PCB Process-Based Ka-Band Phased Array With Offset-Fed Aperture Coupled Patch Antenna," *2022 52nd European Microwave Conference (EuMC)*, Milan, Italy, 2022, pp. 684-687, doi: 10.23919/EuMC54642.2022.9924420,

[13] H. Chen and S. -Y. Chen, "A Polarization-Agile Stub-Loaded Square Patch Antenna with Proximity Coupled Feed," *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Boston, MA, USA, 2018, pp. 859-860, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609448,

[14] M. Civerolo and D. Arakaki, "Aperture coupled patch antenna design methods," 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, WA, USA, 2011, pp. 876-879, doi: 10.1109/APS.2011.5996415,

[15] W. S. T. Rowe and R. B. Waterhouse, "Investigation of proximity coupled antenna structures," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)*, Columbus, OH, USA, 2003, pp. 904-907 vol.2, doi: 10.1109/APS.2003.1219381,

[16] R. Chopra and G. Kumar, "Series-Fed Binomial Microstrip Arrays for Extremely Low Sidelobe Level," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 4275-4279, June 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2908108.

[17] Microstrip Patch Antenna - GeeksforGeeks

[18] X. Zhang, M. Lin, X. Zhang and Y. Li, "The Design of Microstrip Array Antenna and Its Optimization by a Memetic Method," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96434-96443, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929557.

[19] Microstrip Antenna: Types, Uses, Advantages & Disadvantages

[20] Chang Zhu and Naichang Yuan, "Antenna array measurement using multiport VNA," *2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, Suzhou, China, 2005, pp. 3 pp.-, doi: 10.1109/APMC.2005.1606706,

[21] Cobalt-20-GHz-Data-Sheet.pdf

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Κώδικας Python

```
import serial
import time
import pyvisa
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import csv

# ..............................ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-ARDUINO.....................................
arduino = serial.Serial('COM3',115200)   # άλλαξε το COM αν χρειάζεται
time.sleep(2)

# ..............................ΣΥΝΔΕΣΗ PYTHON-VNA.....................................
rm = pyvisa.ResourceManager()

vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')

vna.read_termination = '\n'
vna.write_termination = '\n'
vna.timeout = 10000

print(vna.query("*IDN?"))
print("VNA connected")

#-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
STEP_DELAY = 0.1
s34_list = []
measure_angle = []
p = 0
ANGLE = 0

#-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
def rotate(direction):

   commands = {
      1: "1\r",
      -1: "2\r"
   }

   if direction not in commands:
      print("Invalid command")
      return

   arduino.write(commands[direction].encode())

   while True:
      if arduino.in_waiting:
```

```
            msg = arduino.readline().decode().strip()
            if msg == "done":
                break

    time.sleep(STEP_DELAY)

#-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
def measure_s34():#vna):


    vna.write("CALC1:PAR1:DEF S34")
    vna.write("CALC1:FORM MLOG")




    vna.write("INIT:CONT OFF")
    vna.write("INIT")
    vna.query("*OPC?")

    data = vna.query("CALC1:DATA:FDAT?")

    value = float(data.split(",")[0])

    return value

#-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
print("ΑΝ ΕΙΝΑΙ ΔΕΚΑΔΙΚΟΣ ΝΑ ΕΧΕΙ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ π.χ 0.2")
ANGLE = float(input("Δωσε ανα ποσες μοιρες μετρηση: "))

if ANGLE >= 0.2:

    CIRCLE_STEP = 360 / ANGLE

    if CIRCLE_STEP.is_integer():

        CIRCLE_STEP = int(CIRCLE_STEP)
        HALF_STEP = CIRCLE_STEP // 2

        print("Σημεία ημικυκλίου:", HALF_STEP)
        measure_angle.append(0)
        s34_list.append(0)

        #---------------------------------------- ΠΡΩΤΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΕΩΣ 180 ΜΟΙΡΕΣ ------------------------------
-

        for i in range(HALF_STEP):

            rotate(1)

            value = measure_s34()#vna)
            s34_list.append(value)
```

```
        p = p + ANGLE
        measure_angle.append(p)



    # ------------------------------------ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ -360 ΜΟΙΡΕΣ ------------------------------------

    rotate(-1)

    # ---------------------------------------- ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΕΩΣ 180 ΜΟΙΡΕΣ -------------------------

    for i in range(HALF_STEP):

        rotate(1)

        value = measure_s34()#vna)
        s34_list.append(value)

        p = p + ANGLE
        measure_angle.append(p)



#-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
-

    print("THE END")
    print("S34 measurements:")
    s34_list[0]=s34_list[-1]
    print(s34_list)
    measure_angle[0]
    print(measure_angle)

    # μετατροπή γωνιών σε radians
    theta = np.radians(measure_angle)

#-----------------------------------------------δημιουργία polar plot-----------------------------------------------
    fig = plt.figure()
    ax = fig.add_subplot(111, projection='polar')

#----------------------------------------σχεδίαση radiation pattern-----------------------------------------
    ax.plot(theta, s34_list, marker='o')

    ax.set_title("Radiation Pattern ")

#-----------------------------------------όρια dB (προαιρετικά)-----------------------------------------
    max_value = max(s34_list)
    min_value = min(s34_list)
    ax.set_ylim(min_value, max_value)

    plt.show()
#-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

```
    else:
        print("ΝΑ ΔΙΑΙΡΕΙΤΑΙ ΜΕ ΤΟ 360 ΧΩΡΙΣ ΥΠΟΛΟΙΠΟ")

else:
    print("Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΧΕΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ 0.2 ΜΟΙΡΕΣ")


# CSV 1: s34_list και measure_angle
with open("csv_s34_measure.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file1:
    writer = csv.writer(file1, delimiter=';')  # διαχωριστής ;
    writer.writerow(["s34_list", "measure_angle"])
    for s34, angle in zip(s34_list, measure_angle):
        writer.writerow([f"{s34:.3f}", angle])
```

Π.2 Κώδικας Arduino

```
#define STEP_PIN 2
#define DIR_PIN 5
#define ENABLE_PIN 8

#define MIN_ANGLE 5 //

float angle = 2;   // EISAGOGI MOIPES METRISIS

void stepMotor(long steps, bool dir) {

  digitalWrite(DIR_PIN, dir);

  for (long i = 0; i < steps; i++) {
    digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(800);
    digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(800);
  }
}

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);

  digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);
}
```

```
void loop() {

 if (Serial.available()) {

   float value = Serial.parseFloat();   // διαβάζει αριθμό

   if (value == 1) {                 // cmd 1 +ANGLE MOIPES
    stepMotor(MIN_ANGLE * angle, HIGH);
    Serial.println("done");
   }

   else if (value == 2) {             // cmd 2 -360 MOIPES
    stepMotor(1800, LOW);
    Serial.println("done");
   }


 }
}
```

Π.3 ΚΩΔΙΚΑΣ PYTHON S33_MEASUREMENT

```
import serial
import time
import pyvisa
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import csv

rm = pyvisa.ResourceManager()

vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')

vna.read_termination = '\n'
vna.write_termination = '\n'
vna.timeout = 10000

print(vna.query("*IDN?"))
print("VNA connection ✓")

f_start=5e9
f_stop=15e9
points=201


def s33_measure(vna, f_start, f_stop, points):
   vna.write(f'SENS:FREQ:STAR {f_start}')
```

```
    vna.write(f'SENS:FREQ:STOP {f_stop}')
    vna.write(f'SENS:FREQ:POIN {points}')
    vna.write("CALC1:PAR1:DEF S33")
    vna.write("CALC1:PAR1:SEL")
    vna.write("CALC1:FORM MLOG")
    vna.write('TRIG:SING')
    vna.query("*OPC?")

    data_s33 = vna.query("CALC1:DATA:FDAT?")
    data_s33 = data_s33.split(',')

    data_s33=data_s33[::2]
    data_s33=[float(x) for x in data_s33]

    return(data_s33)

s33=s33_measure(vna, f_start,f_stop, points)

print(s33)

freqs=np.linspace(f_start, f_stop, points)
freqs=freqs/1e9
plt.plot(freqs,s33)
plt.xlabel("frequency")
plt.ylabel("s33 dB")
plt.title("s33 diagram")
plt.grid()
plt.show(block=True)




x=int(input("ΓΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΑΤΑ 1"))
if x== 1:
    with open("csv_freq_s33.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file2:
        writer = csv.writer(file2, delimiter=';')  # διαχωριστής ;
        writer.writerow(["freqs", "s33"])
        for f, s33_val in zip(freqs, s33):
            writer.writerow([f, f"{s33_val:.3f}"])
    print("SAVED")
else:
    print("ΔΕΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΗΚΕ")
```

Π.4 ΚΩΔΙΚΑΣ PYTHON S44 MEASUREMENT

```
import serial
import time
import pyvisa
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import csv

rm = pyvisa.ResourceManager()

vna = rm.open_resource('TCPIP0::127.0.0.1::5025::SOCKET')

vna.read_termination = '\n'
vna.write_termination = '\n'
vna.timeout = 10000

print(vna.query("*IDN?"))
print("VNA connection ✓")

f_start=5e9
f_stop=25e9
points=201

def s44_measure(vna, f_start, f_stop, points):

   vna.write(f'SENS:FREQ:STAR {f_start}')
   vna.write(f'SENS:FREQ:STOP {f_stop}')
   vna.write(f'SENS:FREQ:POIN {points}')

   vna.write("CALC1:PAR1:DEF S44")
   vna.write("CALC1:PAR1:SEL")
   vna.write("CALC1:FORM MLOG")
   vna.write('TRIG:SING')
   vna.query("*OPC?")

   data_s44 = vna.query("CALC1:DATA:FDAT?")
   data_s44 = data_s44.split(',')

   data_s44=data_s44[::2]
   data_s44=[float(x) for x in data_s44]

   return(data_s44)



s44=s44_measure(vna, f_start,f_stop, points)
print(s44)

freqs=np.linspace(f_start, f_stop, points)
freqs=freqs/1e9
```

```
plt.plot(freqs,s44)
plt.xlabel("frequency")
plt.ylabel("s44 dB")
plt.title("s44 diagram")
plt.grid()
plt.show(block=True)
x=int(input("ΓΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΑΤΑ 1"))
if x== 1:

   with open("csv_freq_s44.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file2:
      writer = csv.writer(file2, delimiter=';')  # διαχωριστής ;
      writer.writerow(["freqs", "s44"])
      for f, s44_val in zip(freqs, s44):
         writer.writerow([f, f"{s44_val:.3f}"])
   print("SAVED")
else:
   print("ΔΕΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΗΚΕ")
```