

DIGITALIZAREA PROCESULUI DE PROIECTARE AL ANTENELOR MULTIFRECVENȚĂ RFID ȘI EVALUAREA EXPUNERII UMANE LA RADIAȚIILE EMISE DE ACESTEA

Raport intermediar 2

Director: S.I. dr. ing. Constantinescu Claudia Alana

Membrii: Asist. dr. ing. Andreica Sergiu Iulian, Asist. dr. ing. Rapolti Laszlo

Obiectivul general al acestui proiect este *digitalizarea procesului de optimizare al antenelor pasive și active utilizate în sisteme RFID prin modelare numerică și testare experimentală*. În vederea atingerii acest obiectiv, s-au propus un număr de 6 obiective specifice care vor fi atinse pe parcursul acestui contract și anume: **Obiectiv 1:** Modelarea numerică, analiza și optimizarea antenelor RFID care funcționează la frecvențe joase (structuri inductive); **Obiectiv 2:** Realizarea practică și testarea experimentală a antenelor RFID de frecvență joasă; **Obiectiv 3:** Modelarea numerică, analiza și optimizarea antenelor RFID care funcționează la frecvențe înalte (structuri radiante); **Obiectiv 4:** Realizarea practică și testarea experimentală a antenelor RFID care funcționează la frecvențe înalte (structuri radiante); **Obiectiv 5:** Testarea influenței factorilor ambientali asupra performanțelor antenelor RFID; **Obiectiv 6:** Evaluarea expunerii umane în proximitatea antenelor RFID funcționând la frecvențe înalte.

Conform Diagramei Gantt prezentată în propunerea de proiect, pe parcursul acestei etape s-a finalizat Obiectivul 1 (partea de machine learning) și Obiectivul 2. Activitățile sunt prezentate în cele ce urmează.

1. Optimizarea structurii prin modelare numerică (variația dimensiunii, formei, materialului dielectricului) și machine learning

În cadrul primului obiectiv stabilit în cadrul proiectului de față s-a considerat optimizarea structurilor și cu ajutorul machine learning. Astfel s-a creat un model pentru predicția câștigului antenelor RFID utilizând datele exportate din cadrul programului de modelare numerică Ansys HFSS. Astfel, după reprezentarea câștigului pentru structurile analizate, graficele se vor exporta sub formă de fișier .csv. Aceste fișiere conțin 4 coloane după cum se poate observa în Figura 1 a) (frecvența, unghiurile Phi și Theta, câștigul). Primul pas este introducerea unor coloane care să conțină dimensiunile geometrice ale structurilor cu ajutorul Matlab, astfel că aceste fișiere să conțină informațiile prezente în Figura 1 b).

Următorul pas este concatenarea tuturor acestor fișiere pentru a putea fi mai ușor prelucrate, în acest scop utilizându-se codul din Figura 2.

	A	B	C	D		A	B	C	D	E	F	G	H
1	Freq [GHz]	Phi [deg]	Theta [deg]	GainTotal []	1	Freq_GHz_Phi_deg_	Theta_deg	GainTotal_Dext	N	s	w		
2	0.01356	-180	0	4.97E-13	2	0.01356	-180	0	4.49E-12	19	9	0.2	0.3
3	0.01356	-180	2	5.59E-12	3	0.01356	-180	2	6.15E-12	19	9	0.2	0.3
4	0.01356	-180	4	1.66E-11	4	0.01356	-180	4	1.15E-11	19	9	0.2	0.3
5	0.01356	-180	6	3.35E-11	5	0.01356	-180	6	2.04E-11	19	9	0.2	0.3
6	0.01356	-180	8	5.62E-11	6	0.01356	-180	8	3.30E-11	19	9	0.2	0.3

a)

b)

Figura 1. Fișierele .csv generate: a) la exportarea graficului câștigului; b) după introducerea dimensiunilor geometrice.

Din meniul de APPS se va alege din submeniul **Machine Learning and Deep Learning** opțiunea de **Regression Learner**. La deschiderea noii ferestre se va alege **New Session -> From Workspace**. După ce datele au fost importate în Regression Learner se vor alege variabilele pentru modelul nostru (Figura 3):

- la Predictor variables (Features): se vor selecta coloanele care descriu structurile
- la Response variable (Target): se va selecta coloana care reprezintă rezultatul dorit, în cazul nostru Gain.

```
>> % Specifică folderul unde sunt stocate fișierele CSV
folderPath = 'E:\gain matlab';
% Obține o listă cu toate fișierele CSV din folder
fileList = dir(fullfile(folderPath, '*.csv'));
% Inițializează un tabel gol pentru a stoca datele combinate
fisiercombinat = table();
>> % Parcurge fiecare fișier și adaugă datele în tabel
for i = 1:length(fileList)
    filePath = fullfile(fileList(i).folder, fileList(i).name);
    tempData = readtable(filePath); % Citește fișierul curent
    fisiercombinat = [fisiercombinat; tempData]; % Combină datele
end
```

Figura 2. Codul folosit în MATLAB pentru concatenarea tuturor fișierelor pentru utilizarea machine learning.

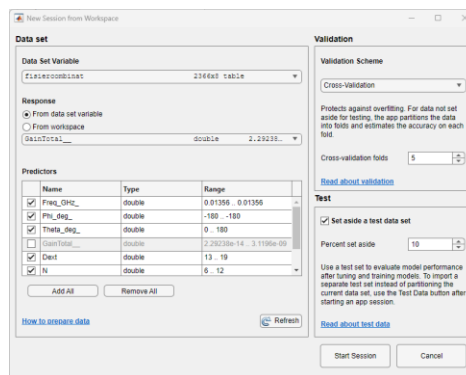


Figura 3. Setările din MATLAB înainte de antrenarea modelului.

Următorul pas este antrenarea și compararea modelelor. În Regression Learner, există o listă de algoritmi disponibili, cum ar fi: Linear Regression, Support Vector Machines (SVM), Regression Trees, Ensemble Models (Random Forest, Boosting) dintre care s-au ales cei prezentați în Figura 4 și se va antrena modelul prin apăsarea butonului Train All. După ce antrenarea este completă se vor putea observa metricele de performanță pentru fiecare model, și se va alege cel mai bun model pe baza acestor valori (Figura 4), astfel modelul ales a fost Fine Tree pentru care rezultatele se pot observa în Figura 5. În acest moment nu ne mai rămâne decât s-a exportăm modelul pentru utilizarea pentru alte seturi de date în spațiul de lucru MATLAB.

2. Realizarea practică și testarea experimentală a antenelor RFID de frecvență joasă

În cadrul acestui obiectiv livrabilul principal este un stand automatizat și robotizat de testare a influenței poziției antenei active față de cea pasivă. Astfel, cu ajutorul acestui stand și a aparatelor de măsurare se va testa influența poziției și a formei antenelor RFID construite în urma modelărilor numerice efectuate în cadrul obiectivului 1.

Pentru a facilita manevrabilitatea standului și având în vedere faptul că funcționarea acestor antene este influențată de prezența corpului uman în apropierea lor, a fost concepută și implementată o aplicație mobilă care permite un control eficient și sigur pe durata procesului de testare. Nu în ultimul rând s-a creat o bază de date cu rezultatele obținute în urma măsurărilor care transpune eficiența antenelor realizate practic, luând în considerare distanța și unghiul la care acestea sunt poziționate una față de cealaltă.

2.1. Construirea standului automatizat de testare a poziției antenelor din sistemele RFID

Pentru îndeplinirea acestui obiectiv, s-a considerat utilizarea unei plăci de dezvoltare Raspberry Pi Pico. Acest tip de placă este accesibilă, oferind în același timp o flexibilitate remarcabilă. Este echipată cu o interfață wireless de 2,4 GHz și include următoarele caracteristici cheie: un microcontroler RP2040 cu 2MB memorie flash, port micro-USB, interfață wireless, PCB cu 40 de pini de dimensiuni reduse 21 mm x 51 mm x 1 mm.

Pe lângă această componentă de bază, în cadrul standului este nevoie de două motoare pas cu pas și anume 28BYJ-48 și NEMA17. Motorul 28BYJ-48 este un motor de mici dimensiuni 28 x 19 mm alimentat la 5 V căruia i se poate foarte ușor controla viteza și direcția, potrivit pentru controlul facil al poziționării uneia dintre antenele RFID care se va poziționa pe tija acestuia cu ajutorul unui suport construit special pentru ea cu ajutorul unei imprimante 3D. Cu ajutorul acestui motor se va putea modifica unghiul dintre cele două antene.

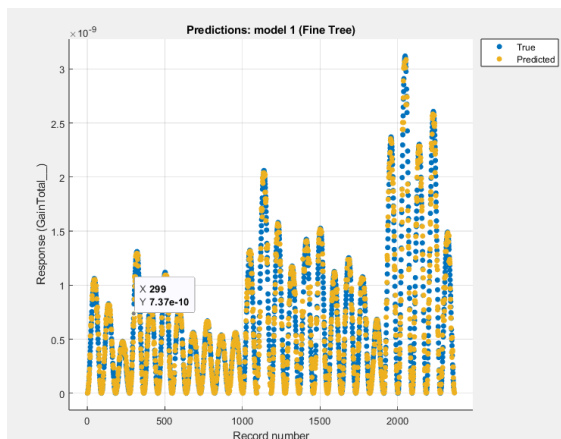
Models		
Sort by	Model Number	
1	Tree	RMSE (Validation): 8.4966e-11
Last change: Fine Tree		
2	Linear Regression	RMSE (Validation): 5.3538e-10
Last change: Linear		
4	Tree	RMSE (Validation): 1.2534e-10
Last change: Medium Tree		
5	Tree	RMSE (Validation): 2.0289e-10
Last change: Coarse Tree		
6	Linear Regression	RMSE (Validation): 5.3199e-10
Last change: Interactions Linear		

a)

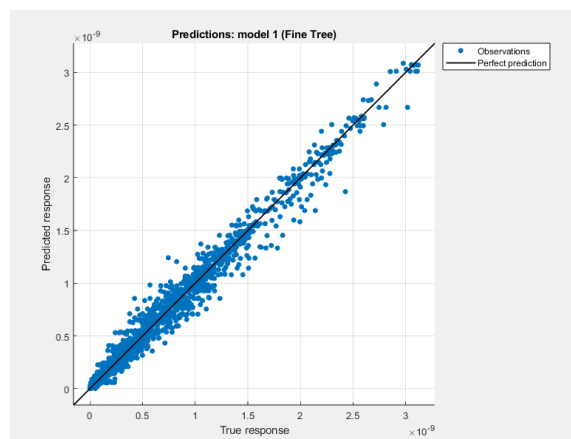
Summary	
Model 1: Tree	
Status: Trained	
Training Results	
RMSE (Validation)	8.4966e-11
R-Squared (Validation)	0.98
MSE (Validation)	7.2193e-21
MAE (Validation)	5.3606e-11
Prediction speed	~39000 obs/sec
Training time	5.2341 sec
Model size (Compact)	~87 kB
Model Hyperparameters	
Feature Selection: 7/7 individual features selected	
PCA: Disabled	
Optimizer: Not applicable	

b)

Figura 4. Modelele alese pentru regression Learner: a) modelele alese și b) rezultatele pentru cel mai bun dintre ele.



a) graficul de răspuns



b) validare predicție vs valori reale

Figura 5. Rezultatele obținute pentru modelul optim de antrenare.

Cel de al doilea motor NEMA 17 este un motor cu un cuplu mai mare recomandat pentru proiecte de automatizare și/sau robotică. Acesta are rolul de a modifica distanța dintre cele două antene RFID. Acest motor este utilizat în combinație cu TMC2209 care este un circuit integrat de control pentru motoare pas cu pas bipolare, cunoscut pentru operarea ultra-silențioasă. Motorul ajută la mutarea suportului pe care este poziționată una dintre antene de-a lungul unor șine plasate într-un suport creat cu ajutorul imprimantei 3D cu ajutorul unei curele poziționată la capete pe fulii. Pentru că ne-am dorit ca ansamblul să se oprească la capetele standului s-a introdus de asemenea un switch de limită pentru ca acest circuit să poată detecta capetele.

Pentru controlul cu telefonul al acestui ansamblu s-a adăugat și un modul Bluetooth HC-05. Modulul este folosit pentru a comunica între două microcontrolere precum Arduino sau pentru a comunica cu orice dispozitiv cu funcționalitate Bluetooth, cum ar fi un telefon sau un laptop.

Toate aceste componente pot fi observate în Figura 6, iar schema electronică a standului de testare se poate observa în Figura 7.

Ansamblul final este reprezentat în Figura 8. Se poate observa că o parte din acesta a fost creat cu ajutorul imprimantei 3D, componentele putând fi observate ca design și în Figura 9. Suportul pentru antenă dispune de un design special pentru ca structura fragilă datorită dimensiunilor sale mici să fie protejată și bine fixată pe motorul pas cu pas.

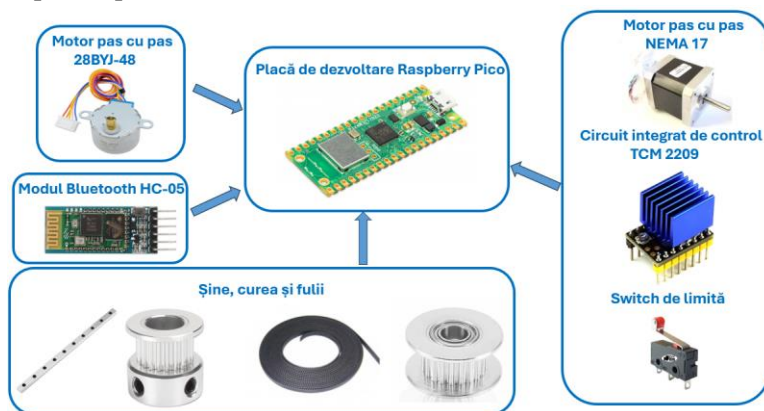


Figura 6. Componentele standului de testare pentru antenele RFID

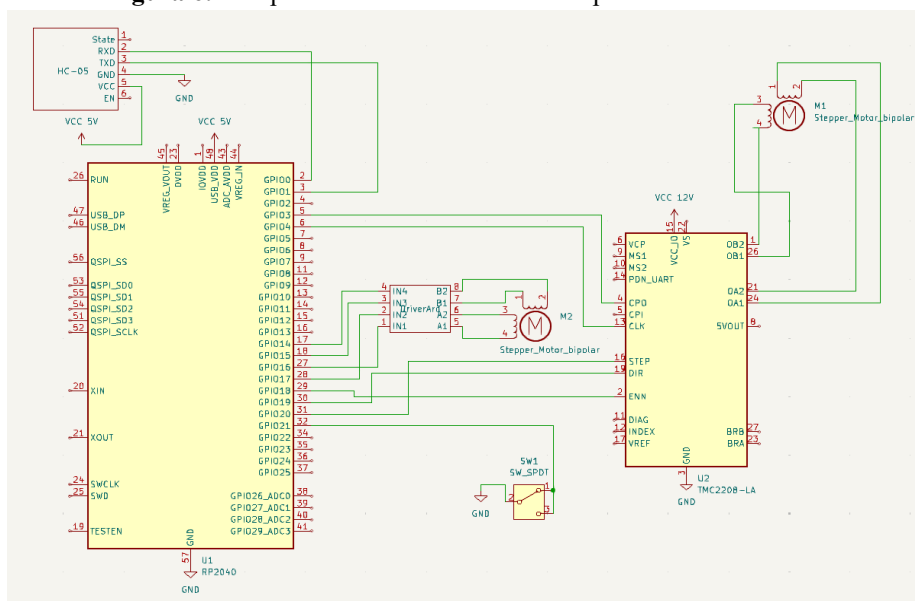


Figura 7. Schema electronică a standului de testare

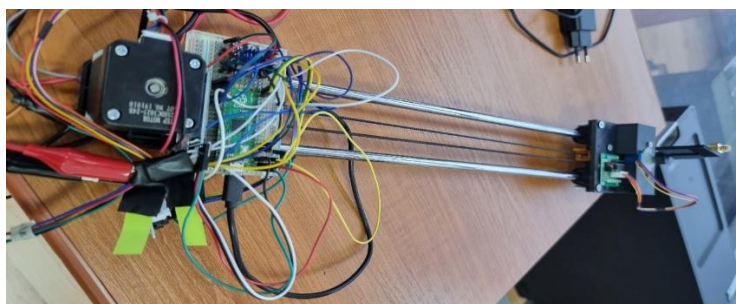
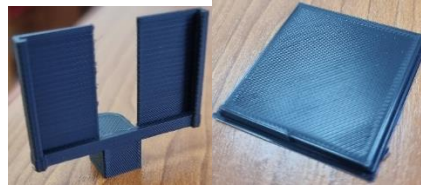
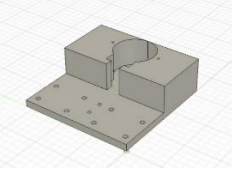


Figura 8. Standul de testare creat pentru evaluarea funcționării antenelor RFID



a) crearea suportului pentru motor



b) crearea suportului pentru antenele RFID

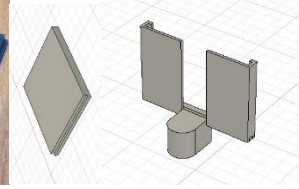
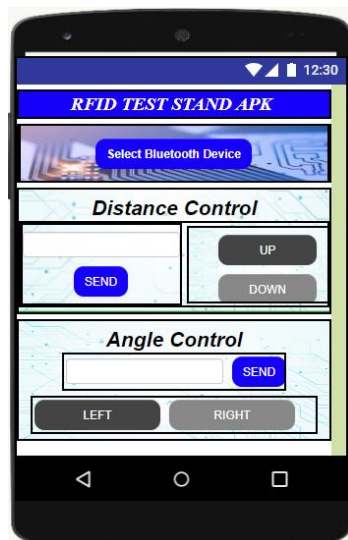


Figura 9. Designul componentelor construite cu ajutorul imprimantei 3D

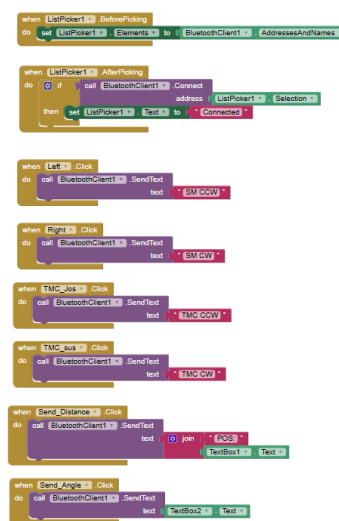
2.2. Crearea unei aplicații pentru controlul la distanță a standului de testare

MIT App Inventor este un mediu de programare intuitiv și vizual, care a fost prima dată inițiat de Google, iar în anul 2012 a fost preluat de MIT (Massachusetts Institute Of Technology), parte a MIT Center for Mobile Learning. Cu ajutorul acestui mediu, putem realiza aplicații complexe într-un timp scurt, folosindu-ne de instrumentul bazat pe blocuri, ce este vizibil mai ușor de folosit în comparație cu programele de programare concurente. Interfața MIT App Inventor include doi editori principali: editorul de design și editorul de blocuri.

Pentru controlul de la distanță a standului de testare s-a creat aplicația cu interfața ce se poate observa în Figura 10 a). Din această interfață putem să conectăm aplicația la modulul Bluetooth prin apăsarea butonului **Select Bluetooth Device**. Există două secțiuni ale acestei interfețe care controlează cele două motoare. Astfel, în secțiunea **Distance Control** se poate controla distanța dintre cele 2 antene supuse testului cu un pas predefinit apăsând butoanele de **up** și **down**. De asemenea se poate trece și direct la o distanță dorită între antene scriindu-se această distanță în mm în căsuța din stânga și apăsând butonul de **send**. În cazul în care se dorește modificarea unghiului antenei plasate deasupra motorului pas cu pas 28BYJ-48 se va trece la cea de a doua secțiune și anume **Angle Control** unde butoanele de left și right fac să se rotească antena cu un pas predefinit. Dacă se dorește o modificare precisă la o anumită poziție, aceasta se poate scrie direct în căsuța din stânga, după care se apasă butonul **send**. În Figura 10 b) se poate observa editorul de blocuri cu codul care a fost creat pentru aceasta aplicație.



a)



b)

Figura 10. Designul interfeței mobile pentru controlul standului de măsurare proiectat și implementat

2.3. Determinarea influenței distanței și a poziționării antenelor asupra comunicației dintre acestea

În cadrul raportului anterior s-au analizat structuri planare din punct de vedere al eficienței lor din prisma parametrilor S, a câștigului lor și a elementelor de circuit necesare a fi adăugate pentru ca acestea

să rezoneze la frecvența de 13.56 MHz. Cu toate acestea, din cauza dimensiunilor mici ale structurilor, au apărut anumite limitări ale aparatelor utilizate pentru realizarea lor practică, deci s-a considerat verificarea veridicității rezultatelor pe structuri dintre cele analizate dar cu dimensiuni geometrice s (distanța dintre spire) și w (lățimea spirei) mai mari de 0.2 mm.

În acest context, în cadrul acestui studiu s-au considerat structurile similare, cu aceleași dimensiuni pentru diametru exterior (De), distanță dintre spire (s) și lățimea a spirei (w) având același număr de înfășurări, variind între 7 și 9. Dimensiunile structurilor modelate sunt prezentate în cadrul Tabelului 1. Toate structurile au fost realizate folosind plotterul LPKF ProtoMat S103 (Figura 11), prin importarea geometriei proiectate în modulul ANSYS High Frequency Software Simulator (HFSS) în software-ul dedicat plotter-ului, LPKF Circuit Pro.

Tabel 1. Dimensiunile structurilor considerate pentru a fi modelate.

De	N	s	W
17	7	0.2	0.3
19	6	0.2	0.3
19	7	0.2	0.3
19	7	0.2	0.4
19	9	0.2	0.3



Figura 11. Linia de producție pentru PCB-uri LPKF

S-au construit astfel patru seturi a câte cinci structuri planare, considerând astfel formele bobinei modelate anterior și anume circular, pătrat, hexagonal și octagonal după cum se poate observa în Figura 12.

S-au adăugat apoi terminale structurilor create practic și s-a măsurat valoarea inductivității acestora cu ajutorul unui RLC meter.

În Tabelul 2 s-au prezentat spre exemplificare măsurarea valorilor inductivităților pentru câte o structură realizată pentru fiecare formă geometrică analizată, alături de valorile obținute pe cale analitică și prin modelare numerică pentru structurile cu diametrul exterior de 19 mm, 7 înfășurări, lățimea înfășurării de 0.4 mm și distanța dintre înfășurări de 0.2 mm. Se poate observa că valorile sunt similare, diferențele mai mari între valorile obținute prin măsurători datorându-se prezenței unor fire mai lungi la terminalele circuitului

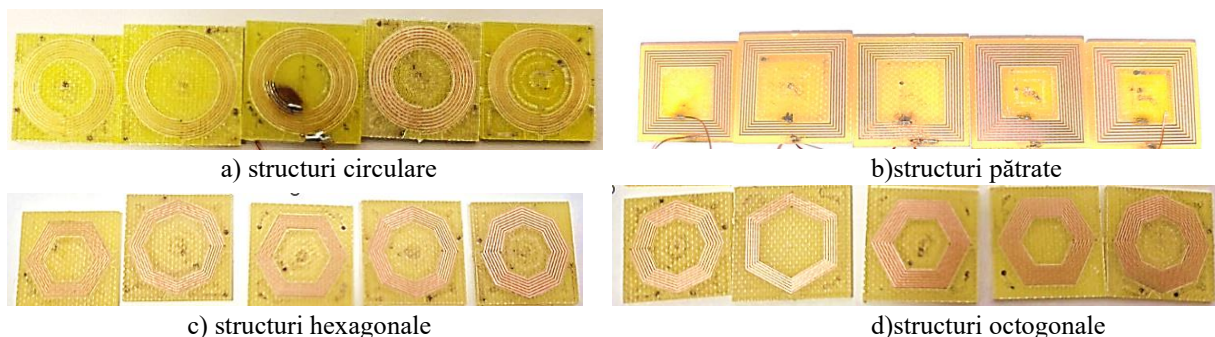


Figura 12. Structurile realizate practic pentru a fi analizate.

Tabel 2. Compararea rezultatelor obținute prin metode analitice, numerice și experimentale pentru inductivitatea bobinelor

Structura analizată	L modelat [μH]	L calculat [μH]	L măsurat [μH]
Circulară	0.96408	1.069225	1.16
Pătrată	1.21366	1.24	1.348
Hexagonală	0.91003	1.069225	0.948
Octogonală	0.9435	1.069225	1.074

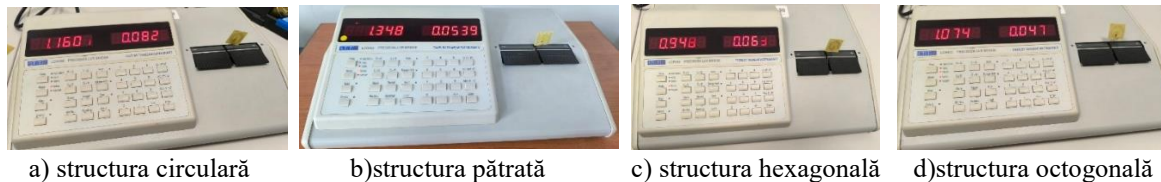


Figura 13. Măsurarea inductivității structurilor cu RLC metrul.

Pentru obținerea frecvenței de rezonanță s-a adăugat în paralel cu structurile o rezistență de 50 Ω și capacitățile necesare ale căror valori alături de cele calculate și cele obținute prin modelare numerică se regăsesc în Tabelul 3. Structurile cu elementele de circuit conectate se pot observa în Figura 14 împreună cu una dintre măsurătorile realizate pentru a determina frecvența de rezonanță, iar rezultatele obținute cu ajutorul Vector Network Analyzer Rohde&Schwarz ZNL-20 sunt prezentate în Figura 15. Valorile calculate pentru capacitatea necesară pentru ca circuitul să rezoneze la 13.56 MHz au fost mai mari atunci când au fost obținute prin modelare numerică, din cauza dimensiunilor terminalelor circuitului modelate în programul Ansys. Totuși, deoarece condensatoarele aveau valori specifice, a fost posibilă o aproximare a acestei valori prin calcul analitic sau modelare numerică.

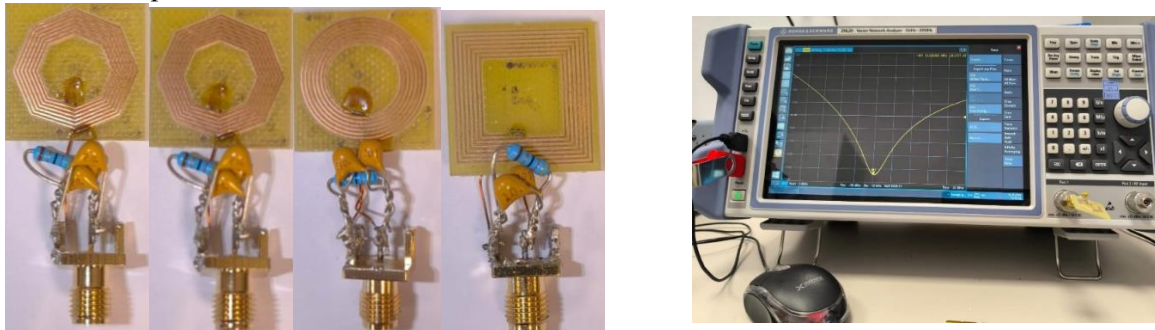


Figura 14. Structuri cu elementele de circuit inserate în paralel pentru a atinge frecvența de rezonanță dorită.

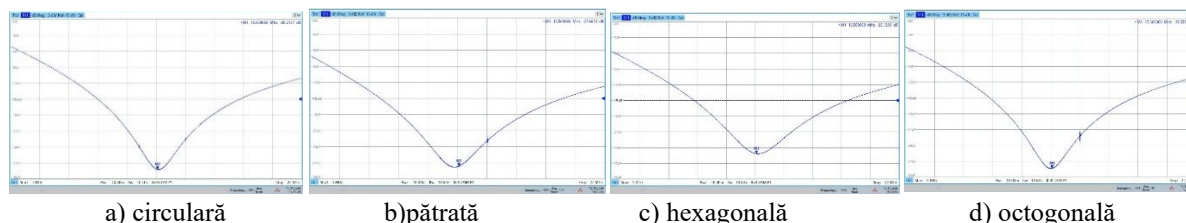


Figura 15. Frecvența de rezonanță obținută pentru structurile analizate: a) circulară, b) pătrată, c) hexagonală, d) octogonală.

Tabel 3. Compararea rezultatelor obținute prin metode analitice, numerice și experimentale pentru capacitatea necesară bobinelor pentru a atinge rezonanța la 13.56 MHz

Structura analizată	C modelat [pF]	C calculat [pF]	C măsurat [pF]
Circulară	160	128.84	131 pF
Pătrată	120	111.5	111 pF
Hexagonală	160	128.13	141 pF
Octogonală	161	128.84	141 pF

În cadrul standului de testare s-au utilizat două bobine, una fiind considerată ca emițător iar cealaltă ca receptor. Emițătorul a fost conectat la un generator de semnal tip Keysight seria N5171B care funcționează în domeniul de frecvență 9 kHz – 6GHz, care a fost setat la frecvența de interes de 13.56 MHz și amplitudinea de 20dBmW. Bobina receptoare poziționată pe standul automatizat de testare capabil să îi modifice poziția și unghiul a fost conectată la rândul ei la un analizor spectral Siglent SVA 1015X cu domeniul de frecvență 9 kHz – 1.5 GHz la care s-a monitorizat puterea receptată de acesta. Noua configurație în care s-au efectuat măsurătorile se poate observa în Figura 16. De asemenea este de precizat că aceste teste s-au efectuat în cadrul unei camere anecoice, oferind astfel o izolare a standului de posibilele interferențe.



a) Standul de testare utilizat



b) Generatorul de semnal și analizorul spectral

Figura 16. Standul de testare utilizat pentru caracterizarea funcționării antenelor RFID

În primul caz analizat s-a considerat ca emițător bobina pătrată de diametru exterior 19 mm cu 7 înfășurări având distanța dintre spire $s = 0.2$ mm iar grosimea spirei $w = 0.4$ mm. S-a variat distanța dintre spire cu un pas de 0.5 cm timp de 9 pași considerând pe rând ca receptor bobine circulare, hexagonale și octogonale având aceleași dimensiuni. S-a putut observa scăderea emisiilor dinspre emițător spre receptor odată cu creșterea distanței dintre acestea (Figura 17 a)). Cea mai bună dintre aceste combinații a fost între bobinele de formă pătrată și circulară. De asemenea s-a considerat modificarea unghiului dintre antene de la 0 grade la 90 de grade cu un pas de 10 grade pentru toate cele 3 combinații și s-a observat din nou ca acea combinație pătrat circular este cea mai bună dintre cele analizate în majoritatea cazurilor. Interesant de observat este că în cazul combinației pătrat octogonal valorile sunt mai bune pentru unghiuri între 60 și 80 de grade.

Cunoscând faptul că bobinele pătrate sunt cele mai bune când vine vorba de emisii, s-a verificat ce se întâmplă dacă analizăm combinații între structuri de formă pătrată. Astfel s-a considerat aceeași structură ca și în cazul anterior ca fiind emițătorul și celelalte structuri pătrate ca fiind receptorii. Se poate observa că structura cu diametru exterior 19 mm, 9 înfășurări și $d=0.2$ mm, $w=0.3$ mm este cea mai bună, ea

recepționând un semnal cu amplitudine mai mare chiar și la distanțe mai mari. Când se va modifica unghiul dintre bobine, amplitudinea va scădea odată cu mărirea unghiului.

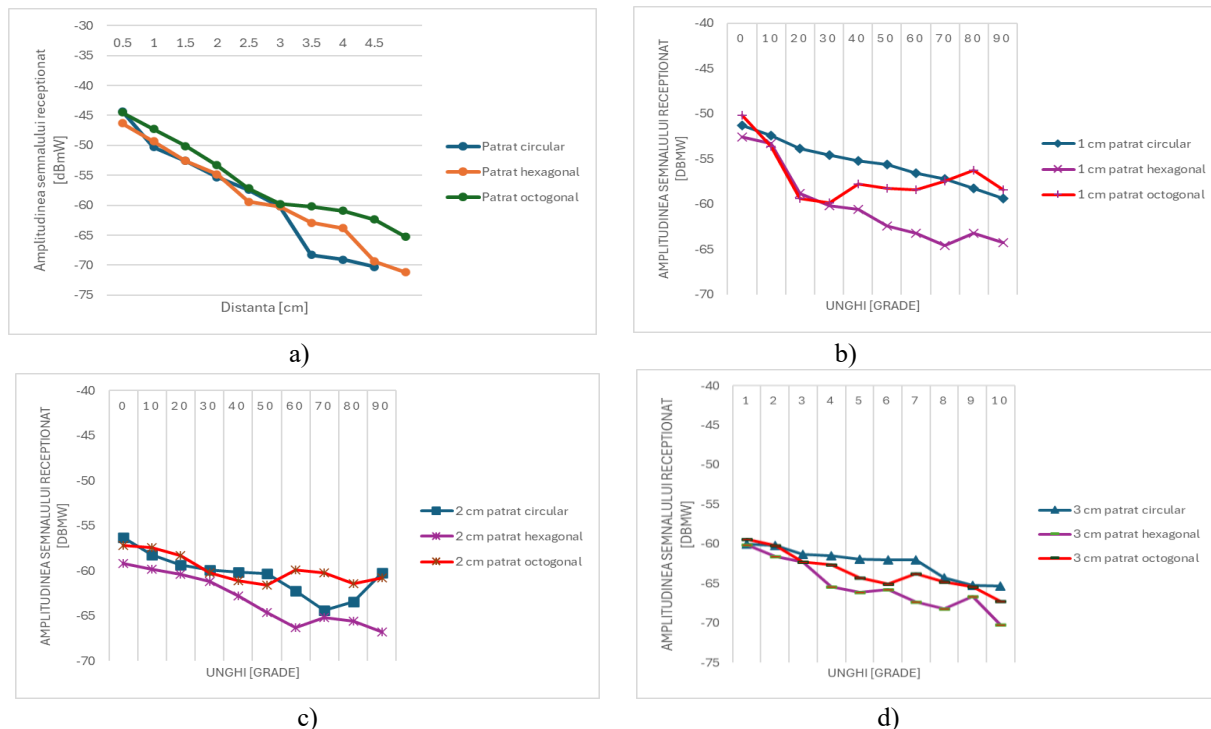


Figura 17. Modificarea amplitudinii semnalului odată cu modificarea poziției bobinelor cu forme diferite una față de cealaltă: a) la modificarea distanței dintre acestea, b) modificarea unghiului când bobinele sunt la 1 cm distanță, c) modificarea unghiului când bobinele sunt la 2 cm distanță, d) modificarea unghiului când bobinele sunt la 3 cm distanță.

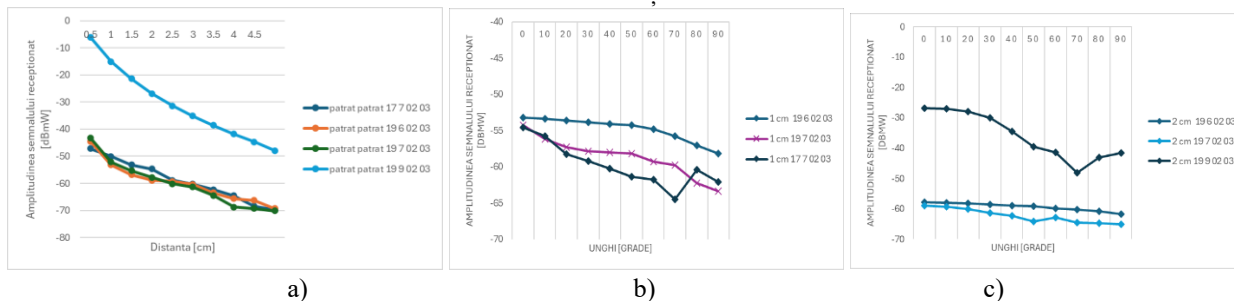


Figura 18. Modificarea amplitudinii semnalului odată cu modificarea poziției bobinelor patrute una față de cealaltă: a) la modificarea distanței dintre acestea, b) modificarea unghiului când bobinele sunt la 1 cm distanță, c) modificarea unghiului când bobinele sunt la 2 cm distanță.

Ultimul dintre studiile întreprinse până la ora actuală a fost cel unde s-a considerat că emițătorul este chiar această bobină pătrată cu diametru exterior de 19 mm și un număr de 9 înfășurări care s-a dovedit a fi cea mai bună. Ca și receptori au fost considerate bobinele de forme diferite având ca și parametrii constructivi diametru exterior de 19 mm, 7 înfășurări, $s=0.2$ mm și $w=0.3$ mm. În figura 19 se poate observa că o combinație pătrat-pătrat e pe departe cea mai bună când vine vorba de mărirea distanței dintre bobine. De asemenea se poate observa acest lucru și când se modifică unghiul dintre emițător și receptor. Apare și în acest caz o îmbunătățire a amplitudinii semnalului receptat (deși mai slab decât la 0 grade) a bobinelor octogonale care recepționează mai bine la unghiuri între 60 și 90 de grade decât orice altă formă luată în considerare.

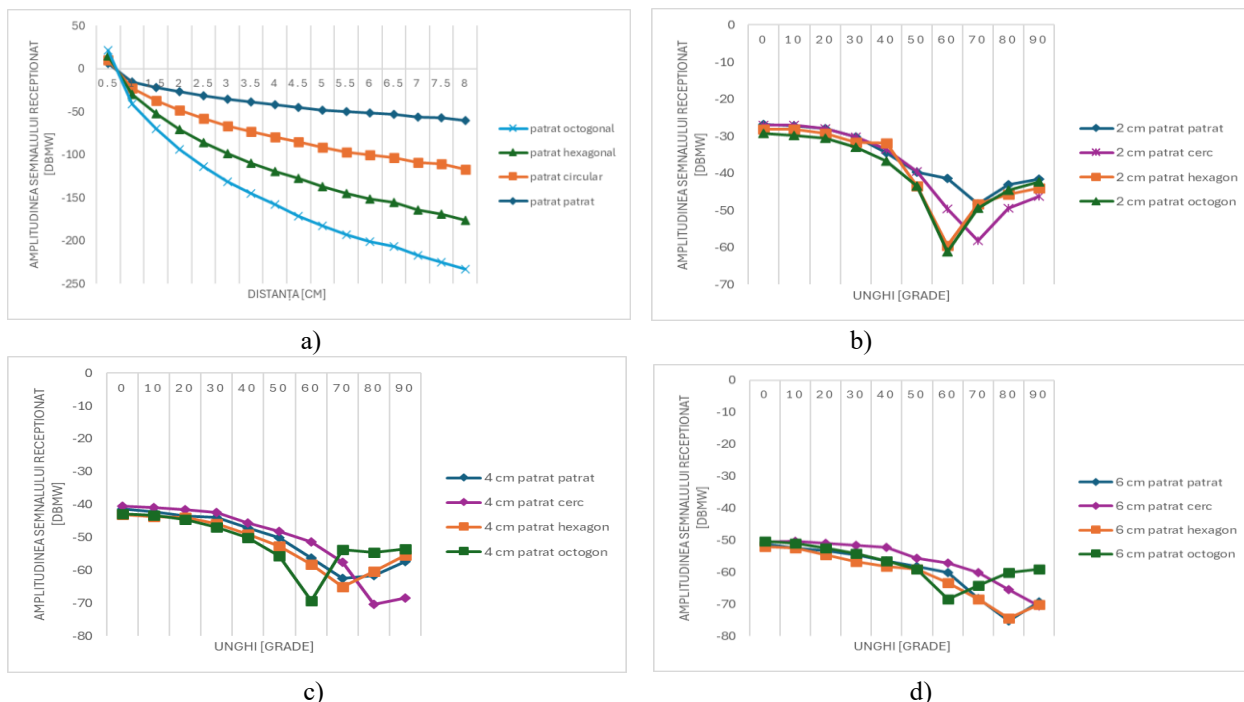


Figura 19. Modificarea amplitudinii semnalului odată cu modificarea poziției bobinelor patrate una față de cealaltă: a) la modificarea distanței dintre acestea, b) modificarea unghiului când bobinele sunt la 2 cm distanță, c) modificarea unghiului când bobinele sunt la 4 cm distanță, d) modificarea unghiului când bobinele sunt la 6 cm.

Livrabile

În cadrul acestui proiect au fost elaborate două articole științifice. Primul articol a fost prezentat în cadrul conferinței „Meditech”, desfășurată la Cluj-Napoca în perioada 30 septembrie – 2 octombrie. Lucrările conferinței vor fi incluse într-un volum indexat pe platformele SpringerLink și Scopus, asigurând astfel o vizibilitate semnificativă în domeniile medical și ingineresc. De asemenea, un alt articol a fost acceptat și publicat în jurnalul *Applied Sciences*, MDPI, un jurnal Q1 cu un factor de impact de 2.5.

Concluzii

În cadrul acestui raport s-a creat un model machine learning care determină câștigul unei structuri pe baza dimensiunilor sale geometrice. Înainte de măsurarea influenței distanței și unghiului dintre antenele RFID, s-au validat rezultatele obținute pe cale analitică și numerică atunci când vine vorba de valorile obținute pentru inductivitatea structurilor și capacitatea necesară pentru ca acestea să atingă frecvența de rezonanță dorită prin măsurarea acestor valori cu aparatura disponibilă în laborator. De asemenea s-a creat un stand de testare pentru antenele RFID capabil să controleze cu o precizie ridicată distanța și unghiul dintre antene pentru a determina influența acestora asupra interacțiunii dintre receptor și emițător. Pentru un mai bun rezultat al măsurătorilor s-a creat o aplicație mobilă pentru controlul de la distanță a standului de testare pentru a evita influența prezenței corpului uman în proximitatea antenelor. S-au realizat măsurători pentru determinarea influenței distanței și unghiului dintre antene pentru mai multe combinații ca formă și caracteristici geometrice și s-a determinat că dintre toate formele considerate cea pătrată este cea mai bună ca emițător/receptor. De asemenea s-a observat că amplitudinea semnalului scade odată cu creșterea distanței dintre bobine după cum era de așteptat. O a treia concluzie este că apare o îmbunătățire a amplitudinii semnalului receptat (deși mai slab decât la 0 grade) a bobinelor octogonale care recepționează mai bine la unghiuri între 60 și 90 de grade decât orice altă formă luată în considerare.