

مطالعه پارامتریک، شبیه‌سازی و ساخت آنتن میله‌ای فریت برای گیرنده‌های لورن

احسان احمدی^۱، سید حسین محسنی ارمکی^۲، مهدی فرتوک زاده^۳

۱ کارشناسی ارشد برق، مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲ دانشیار مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، mohseni@mut.ac.ir

۳ دکتری مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۳

چکیده

ویژگی مواد فریتی با ضریب نفوذ مغناطیسی بالا، تمرکز میدان مغناطیسی امواج رادیویی است. بدین لحاظ خاصیت مذکور مبنای آنتن میله فریتی یا آنتن دریافت کننده میدان مغناطیسی می‌باشد. در این مقاله مطالعات پارامتریک و شبیه‌سازی آنتن حلقوی فریتی برای گیرنده‌های لورن در فرکانس مرکزی ۱۰۰ کیلوهرتز و پهنای باند ۲۰ کیلوهرتز گزارش شده است. پارامترهای آنتن شامل بهره، الگوی تشعشعی و میزان گیرندگی مورد شبیه‌سازی و بحث واقع می‌شود. شبیه‌سازی در محیط نرم افزار CST انجام شده و چندین عامل موثر بر بهره آنتن شامل ضریب نفوذ مغناطیسی میله فریتی، تعداد دور و محل سیم پیچ مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات آنتن بهینه با استفاده از شبیه‌سازی بدست آمده و چند نمونه آنتن جهت صحت آزمایشی نتایج شبیه‌سازی ساخته شده است. در انتها با استفاده دو روش آزمون، تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری گزارش شده است.

کلیدواژه

آنتن میله فریتی، آنتن دریافت کننده میدان مغناطیسی، گیرنده‌های لورن

مقدمه

می‌کنند. در گذر زمان نسل‌های مختلفی از گیرنده‌های لورن عرضه شده‌اند که در نسل‌های ابتدایی از آنتن‌های میدان الکتریکی استفاده می‌شد. ولی به دلیل برتری‌های آنتن میدان مغناطیسی، آنتن میدان الکتریکی در نمونه‌های نوین گیرنده‌های لورن کنار گذاشته شد. مهمترین مشکل آنتن میدان الکتریکی که باعث عدم کارایی آن می‌شود، افت شدید عملکرد در شرایط نویز الکتریکی است. ریزش دانه‌های برف و یا قطرات باران باردار شده در جو روی آنتن، سبب ایجاد اختلاف پتانسیل بین نقاط ناپیوستگی و زنگ زده در بدنه وسیله نقلیه حامل گیرنده و آنتن لورن شده و نتیجه آن (پدیده آرک) و یا تخلیه بار الکتریکی در نقاط نوک تیز مثل نوک آنتن گیرنده (پدیده کرونا) است [iii و iv]. این شرایط موسوم به شرایط p-static می‌باشد که بیشتر در شرایط بد آب و هوایی اتفاق می‌افتد. در صورتیکه آنتن دریافت کننده میدان مغناطیسی از این گونه نویزهای الکتریکی در امان خواهد بود.

در این مقاله، هدف اصلی، طراحی، شبیه‌سازی و در نهایت ساخت آنتن میدان مغناطیسی می‌باشد. قسمت اصلی آنتن مذکور سیم-پیچ رسانا با تعداد دورهای مشخص برای جذب میدان مغناطیسی است. سیم‌پیچ به دور یک هسته از جنس فریت با ضریب نفوذپذیری بالا (نسبت به هسته هوایی) به منظور بهبود عملکرد در

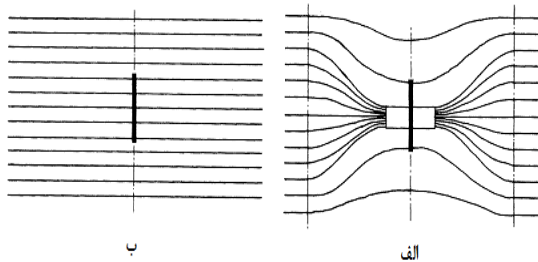
یکی از بهترین روشها جهت موقعیت یابی، استفاده از فرستنده‌های امواج رادیویی است. فرستنده‌های مذکور در مکان‌های ثابت زمین پایه یا فضا پایه قرار می‌گیرند. شناخته‌شده‌ترین روش موقعیت یابی فضا پایه، سامانه موقعیت یابی جهانی (GPS) است. کشورهای مختلف جهان در شرایط خاص و بحرانی با توجه به امکان ناکارآمدی سیستم موقعیت یابی ماهواره‌ای، از سامانه‌های زمینی به عنوان پشتیبان، استفاده می‌کنند [i]. سامانه‌های مذکور بر خلاف سامانه‌های ماهواره‌ای، از فرستنده‌های ثابت زمین پایه بهره‌برداری می‌نمایند، که یکی از معروف‌ترین آن‌ها، سامانه موقعیت یابی برد بالای لورن (LORAN¹) است. فرکانس کاری سامانه لورن ۱۰۰ کیلوهرتز بوده که در باند فرکانسی LF^۲ قرار دارد. به علاوه، پهنای باند سیستم لورن از ۹۰ تا ۱۱۰ کیلوهرتز می‌باشد [ii]. آنتن‌های گیرنده این سامانه به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: آنتن-های دریافت کننده میدان الکتریکی (E-field antenna) و آنتن‌های دریافت کننده میدان مغناطیسی (H-field antenna) که هر کدام بخشی از یک جبهه موج الکترومغناطیس را دریافت

1 Long Rang Navigation
2 Low Frequency

$$V_{ind(max)} = \mu_0 \mu_{rod} \omega N A_C H \quad (2)$$

در این رابطه μ_0 ضریب نفوذپذیری فضای آزاد، ω فرکانس زاویه‌ای، A_C مساحت حلقه و H شدت میدان مغناطیسی موجود است. همان طور که از رابطه (۲) مشخص است میزان ولتاژ القایی در خروجی رابطه مستقیم با ضریب نفوذپذیری نسبی موثر هسته دارد.

چگونگی تأثیر هسته فریتی در جذب میدان مغناطیسی در شکل ۳ نشان داده شده است [vi]. قسمت الف خطوط میدان در حضور هسته فریتی و قسمت ب خطوط میدان در عدم حضور هسته فریتی را نشان داده است. با توجه به بالاتر بودن ضریب نفوذپذیری نسبی فریت، خطوط میدان مغناطیسی به سمت هسته فریتی خم می‌شوند به این صورت خطوط بیشتری از داخل هسته عبور نموده و با یک شدت میدان و سطح مقطع ثابت، ولتاژ بیشتری در خروجی القا می‌گردد. در واقع سطح مقطع آنتن به صورت مجازی افزایش یافته است.



شکل ۳. مقایسه خطوط جریان مغناطیسی در حضور الف) آنتن حلقوی با هسته فریتی ب) آنتن حلقوی با هسته هوایی

در روابط (۱) و (۲)، μ_{rod} ضریب نفوذ پذیری نسبی مؤثر هسته را نشان می‌دهد که با رابطه (۳) به μ_r ، ضریب نفوذ پذیری نسبی هسته، ارتباط دارد [v].

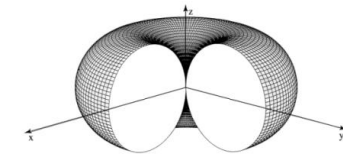
$$\mu_{rod} = \frac{\mu_r}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad (3)$$

در واقع مقدار μ_{rod} همواره از μ_r کمتر است و میزان اختلاف بین آن‌ها به عاملی به نام ضریب مغناطیس‌زدایی D ، در رابطه (۳) بستگی دارد. میزان این ضریب وابسته به عواملی چون هندسه هسته و نسبت طول به قطر هسته (برای هسته استوانه‌ای) می‌باشد [vi]. هر چه نسبت طول به قطر هسته بیشتر باشد، میزان D کمتر بوده و μ_{rod} افزایش می‌یابد در نتیجه میزان ولتاژ القایی نیز افزایش خواهد یافت. با این شرایط هر چه هسته باریک‌تر باشد به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر خواهد شد. در شکل ۴ میزان ضریب مغناطیس‌زدایی بر حسب نسبت طول به قطر هسته [۵] و در

دریافت میدان مغناطیسی، پیچیده شده است. پارامترهایی مثل تعداد دور سیم، طول، قطر و جنس هسته فریتی و... با توجه به تئوری‌ها، منحنی‌های تجربی موجود و همچنین شبیه‌سازی، بهینه شده و سپس آنتن‌ها ساخته و مورد آزمون قرار می‌گیرند.

تشریح آنتن میدان مغناطیسی

آنتن حلقوی، عمومی‌ترین آنتن میدان مغناطیسی می‌باشد که در واقع با توجه به فرکانس پایین مورد استفاده در سامانه موقعیت-یابی، ابعاد آن در مقایسه با طول موج، بسیار کوچک است. تحت این شرایط، حلقه کوچک نماینده دو قطبی مغناطیسی بوده که می‌تواند بخش مغناطیسی یک موج الکترومغناطیس را دریافت نماید. الگوی تشعشعی یک آنتن حلقوی کوچک در شکل ۱ نشان داده شده است (راستای z راستای محور حلقه است) که دارای دو صفر در راستای محور حلقه می‌باشد [v].



شکل ۱. الگوی تشعشعی یک آنتن حلقوی کوچک

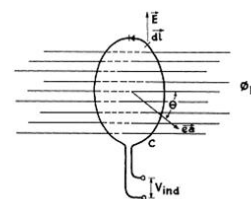
تأثیر هسته فریتی

مقاومت تشعشعی آنتن حلقوی با N دور سیم پیچ مطابق رابطه (۱) قابل بیان است. در این رابطه C محیط حلقه، λ طول موج و μ_{rod} ضریب نفوذپذیری نسبی مؤثر هسته می‌باشد [v].

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 (\mu_{rod})^2 N^2 \quad (1)$$

همان طور که از رابطه (۱) مشخص است با توجه به کوچک بودن محیط حلقه نسبت به طول موج، مقدار مقاومت تشعشعی بسیار ناچیز خواهد بود. به همین دلیل از این نوع آنتن‌ها، تنها در حالت گیرندگی استفاده می‌شود. مطابق رابطه مذکور، قرار دادن هسته فریتی به جای هسته هوایی باعث افزایش مقاومت تشعشعی آنتن خواهد شد.

رابطه (۲) ولتاژ القا شده بیشینه در دو سر سیم پیچ N دوری مطابق هندسه شکل (۲) را بیان می‌کند. بیشینه ولتاژ در حالتی رخ می‌دهد که خطوط میدان دقیقاً موازی با محور حلقه باشند [vi].

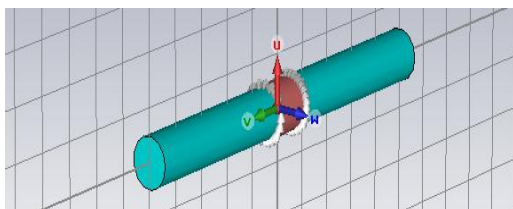


شکل ۲. حلقه رسانا در میدان مغناطیسی یکنواخت

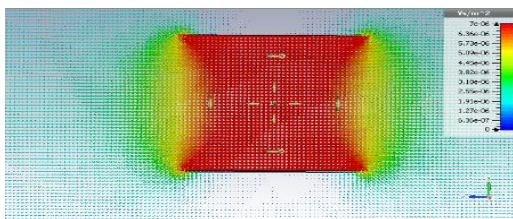
شده‌اند. برای شبیه‌سازی‌های روش دوم از محیط ریزموج^۴ نرم افزار و روش ممان استفاده شده است.

روش اول

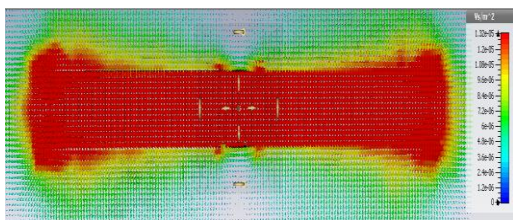
شکل ۶ هسته سیم‌پیچی شده‌ای را نشان می‌دهد که در معرض یک جبهه موج الکترومغناطیس با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز قرار گرفته است و همچنین در شکل ۷ مقایسه‌ای بین چگونگی حضور جبهه ۷ موج مغناطیسی در صورت وجود یا عدم وجود هسته فریتی ارائه شده است. لازم به ذکر است که این شکل لحظه‌ای از یک موج الکترومغناطیس با پلاریزاسیون خطی را به تصویر کشیده است که خطوط میدان مغناطیسی همواره موازی با محور هسته فریتی عبور می‌نمایند.



شکل ۶. نمایشی از هسته فریتی و سیم‌پیچ شبیه‌سازی شده در محیط CST EM Studio



الف

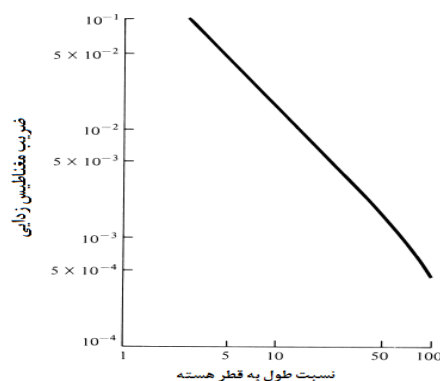


ب

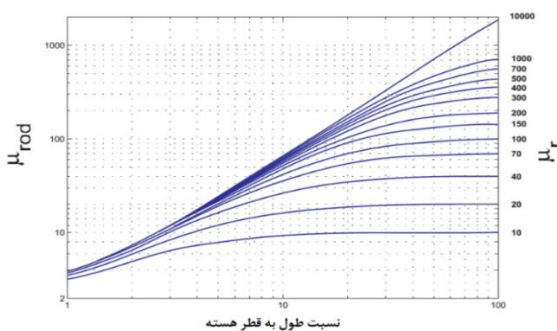
شکل ۷. نمای روبرو از حضور میدان مغناطیسی در صورت (الف) عدم وجود هسته فریتی و (ب) با وجود هسته فریتی

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود سیم‌پیچ با هسته فریتی (و میزان نفوذپذیری مشخص) میزان دریافت بسیار بالاتری را نسبت به سیم‌پیچ تنها از خود نشان داده است (در سیم‌پیچ تنها برای یک شدت میدان یکسان $B = 7 \times 10^{-6} \text{ Wb/m}^2$ و در سیم پیچ با هسته فریتی این مقدار به $B = 1.32 \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$ رسیده است)، نکته دیگر اینکه در دو سر هسته فریتی، خطوط میدان

شکل ۵ میزان μ_{rod} بر حسب نسبت طول به قطر هسته، برای چند مقدار μ_r ارائه شده است [viii].



شکل ۴. منحنی ضریب مغناطیس‌زدایی (D) برای یک هسته فریتی استوانه‌ای بر حسب نسبت طول به قطر هسته [۵]



شکل ۵. ضریب نفوذپذیری نسبی مؤثر (μ_{rod}) برای یک هسته فریتی استوانه‌ای بر حسب نسبت طول به قطر هسته [۸]

نکته قابل توجه در شکل ۵ این است که برای نسبت‌های منطقی و کاربردی (برای مثال نسبت طول به قطر ۱۰)، میزان μ_{rod} برای μ_r های بزرگ به مقدار ثابتی میل می‌کند و در واقع با افزایش ضریب نفوذپذیری نسبی، میزان μ_{rod} و به تبع آن ولتاژ القایی و مقاومت تشعشعی افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر رفتاری شبیه به اشباع در مقدار μ_{rod} به دلیل وجود ضریب مغناطیس‌زدایی خواهیم داشت.

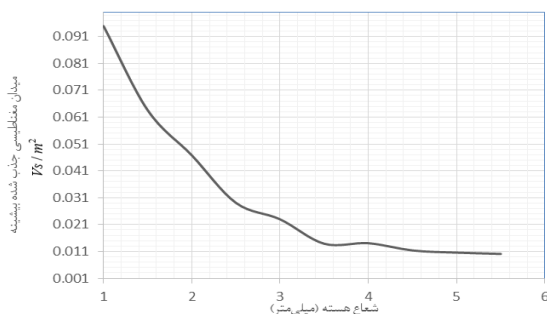
شبیه‌سازی

در این مقاله شبیه‌سازی‌ها با دو روش و در دو محیط از نرم افزار CST انجام پذیرفته است روش اول، روش میدان نزدیک است که در محیط EMS انجام شده است؛ در این روش هسته فریتی سیم-پیچی شده در معرض یک جبهه موج مغناطیسی یکنواخت قرار گرفته و میزان جذب میدان مغناطیسی با تغییر سایر پارامترها بررسی شده است. در روش دوم، شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی ویژگی‌های آنتن از قبیل بهره، پهنای باند و الگوی تشعشعی انجام

این نمودار را از دو جنبه می‌توان مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، جنبه اول اینکه با افزایش طول آنتن، طول مؤثر آنتن افزایش یافته و فاکتور آنتن که معکوس طول مؤثر آنتن می‌باشد، کاهش می‌یابد و این بدان معناست که میزان جذب آنتن باید با افزایش طول افزایش یابد. از طرفی با افزایش طول آنتن و ثابت ماندن قطر آن، نسبت طول به قطر هسته افزایش یافته و در نتیجه بیشینه جذب آنتن افزایش خواهد یافت. همانطور که در نتایج این مرحله مشاهده می‌شود این افزایش تا طول ۲۰ سانتی‌متر به صورت خطی ادامه می‌یابد.

تأثیر شعاع هسته بر میدان مغناطیسی جذب شده

همانطور که در بخش‌های قبلی عنوان شد، با کاهش قطر هسته فریتی شدت میدان مغناطیسی جذب شده و به تبع آن ولتاژ خروجی افزایش خواهد یافت. برای اثبات این موضوع هسته‌هایی با طول‌های متفاوت تحت تأثیر یک جبهه موج مغناطیسی قرار گرفته و بیشینه چگالی میدان مغناطیسی جذب شده در مرکز آن‌ها توسط شبیه‌سازی، اندازه‌گیری شده‌اند؛ نتایج این بخش در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نمودار میزان تغییرات چگالی میدان مغناطیسی بیشینه با تغییر در شعاع هسته

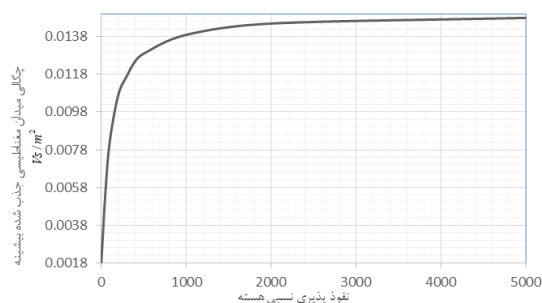
از اطلاعات فوق مشخص است که با کاهش شعاع هسته (طول ثابت) میزان بیشینه میدان مغناطیسی در مرکز هسته فریتی افزایش یافته است. اما نکته دیگر که در خصوص افزایش ضخامت هسته فریتی وجود دارد، سطح مقطع آنتن می‌باشد که با کاهش شعاع، کاهش می‌یابد؛ در واقع با کاهش شعاع هسته از طرفی شدت میدان مغناطیسی بیشینه درون هسته فریتی افزایش یافته اما با کم کردن سطح مقطع، حجم خطوط میدان مغناطیسی که از درون هسته فریتی عبور می‌کند کاهش می‌یابد و در اینجا موازنه‌ای بین این دو عامل وجود دارد.

با ثابت فرض کردن خطوط میدان در سطح مقطع هسته فریتی، اگر بر روی سطح مقطع هسته، انتگرال‌گیری گردد، آنگاه منحنی دیگری حاصل می‌شود که کل میدان مغناطیسی جذبی در هسته‌های مختلف را نشان می‌دهد و امکان مقایسه بهتری را فراهم می‌آورد. این منحنی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. موجهک و

مغناطیسی خود را برای عبور از درون فریت خم کرده‌اند که این موضوع در بخش قبلی به صورت تئوری مطرح شده بود.

تأثیر نفوذپذیری هسته بر میدان مغناطیسی جذب شده

در این گام تأثیر میزان نفوذپذیری هسته فریتی بر بیشینه چگالی میدان مغناطیسی جذب شده در مرکز هسته به دست خواهد آمد، برای این منظور آنتنی مطابق شکل ۶ شبیه‌سازی شده و با تغییر ضریب نفوذپذیری بین ۱ تا ۵۰۰۰ نمودار تغییرات چگالی میدان مغناطیسی بیشینه در مرکز آنتن به دست آمده است. این نمودار در شکل ۸ نشان داده شده است.

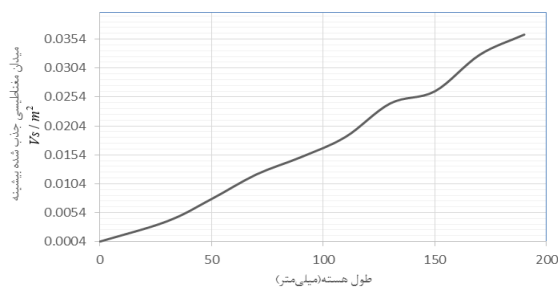


شکل ۸. نمودار میزان تغییرات چگالی میدان مغناطیسی بیشینه با تغییر در ضریب نفوذپذیری هسته (نسبت طول به قطر هسته برابر ۱۰ است)

نتیجه به دست آمده از این نمودار وجود ضریب مغناطیس‌زدایی را تأیید می‌کند. همانطور که قبلاً اشاره شد، این عامل باعث می‌شود ضریب نفوذپذیری نسبی مؤثر هسته (μ_{rod}) ، برای مقادیر بالای ضریب نفوذپذیری نسبی (μ_r) ، به مقدار ثابتی میل کند و به تبع روند تغییرات چگالی میدان جذب شده در مقادیر پایین ضریب نفوذپذیری سریع بوده و با افزایش ضریب نفوذپذیری نسبی، این روند کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابتی می‌رسد. ضریب مغناطیس‌زدایی و به تبع آن شیب نمودار، تابعی از نسبت طول به قطر هسته نیز خواهد بود.

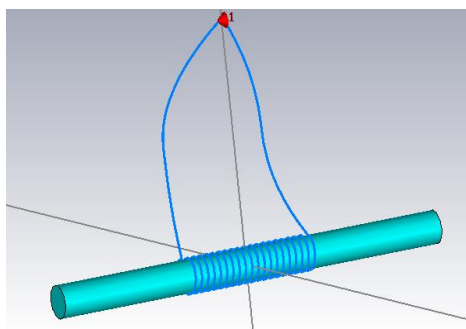
تأثیر طول هسته بر میدان مغناطیسی جذب شده

در این گام با استفاده از ۱۰ نمونه شبیه‌سازی دیگر، تأثیر تغییر طول هسته فریتی بر روی میزان جذب میدان مغناطیسی توسط هسته و آنتن میدان مغناطیسی بررسی خواهد شد. نتیجه این کار در شکل ۹ ارائه شده است.

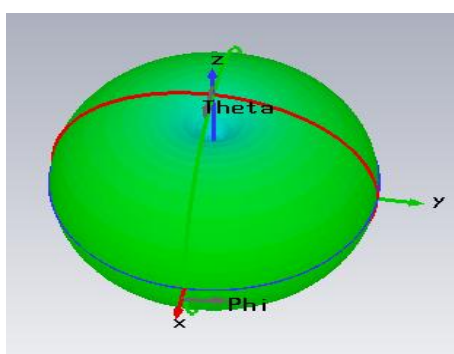


شکل ۹. نمودار میزان تغییرات میدان مغناطیسی بیشینه با تغییر در طول هسته

ایده آل‌ترین حالت پیگیری شده‌اند. شکل ۱۲ نمای کلی و شکل ۱۳ الگوی تشعشعی ایده آل از آنتن اولیه را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲. نمای کلی از آنتن شبیه‌سازی شده در فضای نرم افزار CST



شکل ۱۳. الگوی تشعشعی به دست آمده برای یک نمونه اولیه از آنتن

در شکل ۱۳ محور Z راستای محور هسته فریتی است که مطابق انتظار نقطه صفر الگوی تشعشعی در راستای همین محور قرار دارد و در راستای X و Y بیشینه الگوی تشعشعی واقع شده است. در واقع با چرخش در صفحه سمت، مقدار بهره ثابت مانده است.

تأثیر طول هسته فریتی بر پارامترهای تشعشعی آنتن

در بخش قبلی شبیه‌سازی، آنتن در معرض یک جبهه موج مغناطیسی قرار داده شده و تأثیر افزایش طول هسته فریتی بر روی میزان میدان مغناطیسی جذب شده در هسته فریتی مشاهده گردید. در این گام، نمودار میزان بهره بیشینه بر حسب طول هسته فریتی نمایش داده خواهد شد. این اطلاعات در شکل ۱۴ (الف) نشان داده شده است. به دلیل اینکه پهنای باند استاندارد سیستم لورن ۲۰ کیلوهرتز است، شبیه‌سازی‌ها علاوه بر فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، در فرکانس ۹۰ و ۱۱۰ کیلوهرتز نیز انجام شده است تا پایداری نتایج در کل پهنای باند مورد تأیید قرار گیرد. حاصل این شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های ۱۴ (ب) و ۱۴ (ج) نشان داده شده است. همچنین فاکتور مهم دیگر از ویژگی‌های تشعشعی، عامل پهنای باند آنتن می‌باشد که نمودار مربوط به تغییرات پهنای باند با تغییرات طول آنتن در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

تغییرات موجود در منحنی شکل مذکور به خاطر وجود دو عامل مخالف یکدیگر است.



شکل ۱۱. منحنی حاصل از حاصل ضرب مساحت در چگالی میدان بیشینه

روش دوم

در این بخش به شبیه‌سازی در محیط ریزموج از نرم افزار CST پرداخته شده است. هدف از این روش، به دست آوردن پارامترهای تشعشعی مثل بهره، الگوی تشعشعی و پهنای باند آنتن است. به دلیل پایین بودن فرکانس کاری، بسیاری از نرم‌افزارهای موجود قادر به شبیه‌سازی و محاسبه پارامترهای تشعشعی آنتن نیستند؛ به عنوان مثال در نرم افزار CST و در محیط ریزموج و در زیر مجموعه تحلیلگر حوزه فرکانس^۵ یا در نرم افزار شبیه‌سازی فرکانس بالای HFSS برای به دست آوردن الگوی تشعشعی آنتن باید فضایی به اندازه حداقل ربع طول موج در اطراف آنتن به عنوان جعبه تشعشعی در نظر گرفت که در فرکانس کاری ۱۰۰ کیلوهرتز، این میزان به ۷۵۰ متر می‌رسد. تحت این شرایط تعداد مش‌ها به اندازه‌ای زیاد می‌گردد که فرآیند شبیه‌سازی را غیر ممکن می‌سازد و با تغییر مش‌بندی در فضای اطراف و یا تغییر در اندازه جعبه تشعشعی اطراف آنتن، نتایج غیر قابل قبول و استناد خواهند شد.

در نرم افزار CST و در محیط ریزموج، بخشی به نام تحلیلگر معادله انتگرالی^۶ وجود دارد که مسئله را به روش ممان^۷ مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد که قادر به حل مشکلات اخیر می‌باشد و مش‌بندی نهایی را تا حد معقولی کاهش می‌دهد و با اجرای نرم افزار، الگوی تشعشعی قابل انتظار از تئوری‌های موجود، حاصل می‌شود. پایین بودن فرکانس کاری از یک سو و هندسه هسته از سوی دیگر باعث شده تا امپدانس تشعشعی این گونه آنتن‌ها بسیار پایین باشد در نتیجه باید انتظار بهره بسیار پایینی از خروجی شبیه‌سازی داشته باشیم. در این قسمت از شبیه‌سازی‌ها مانند بخش قبلی با تغییر پارامترهای مختلف آنتن در پی رسیدن به بهترین جواب‌ها هستیم. به دلیل پایین بودن بهره آنتن، نتایج به صورت مقایسه‌ای و نرمالیزه ارائه شده و جواب‌ها برای رسیدن به

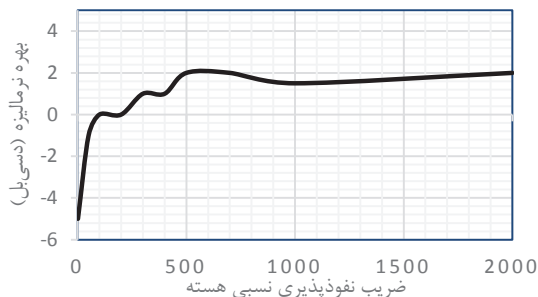
5 Frequency Domain Solver

6 Integral Equation

7 Method Of Moment (MOM)

تأثیر جنس هسته فریتی بر پارامترهای تشعشی آنتن

در این بخش با تغییر جنس هسته فریتی یا به عبارت دیگر با تغییر ضریب نفوذپذیری نسبی هسته، بهره آنتن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

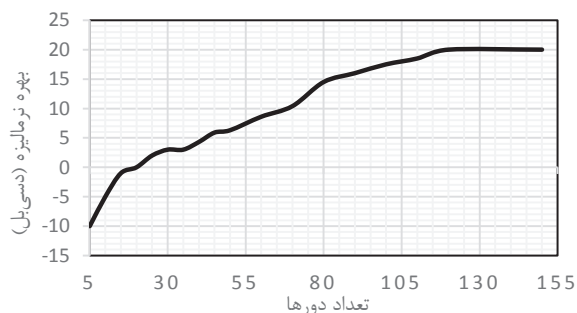


شکل ۱۶. نمودار تغییرات بهره با ضریب نفوذپذیری نسبی هسته در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز

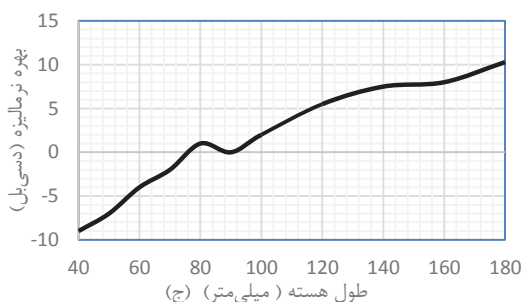
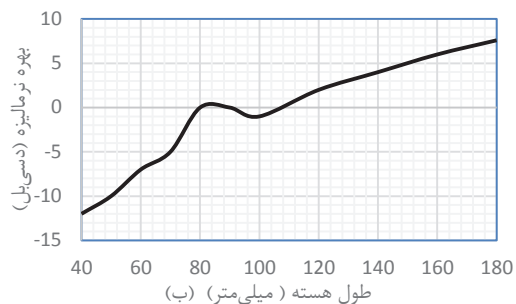
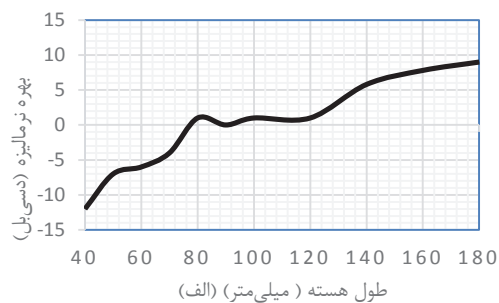
همانطور که در اطلاعات شکل ۱۶ مشخص است، برای مقادیر پایین ضریب نفوذپذیری نسبی، تغییرات با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد و با افزایش مقدار نفوذپذیری نسبی، از میزان شیب منحنی کاسته شده تا جایی که حدوداً برای مقادیر بیش از ۵۰۰، به میزان تقریباً ثابتی می‌رسد این مسئله در بخش‌های قبل، هم در تئوری و هم در شبیه‌سازی‌های گذشته به اثبات رسید. در نتیجه، از روش‌های مختلف این نکته مهم به اثبات رسیده است که با توجه به هندسه هسته فریتی، افزایش ضریب نفوذپذیری نسبی از حد خاصی، نمی‌تواند منجر به افزایش فاکتورهای مورد نظر شود.

تأثیر تعداد دورها بر پارامترهای تشعشی آنتن

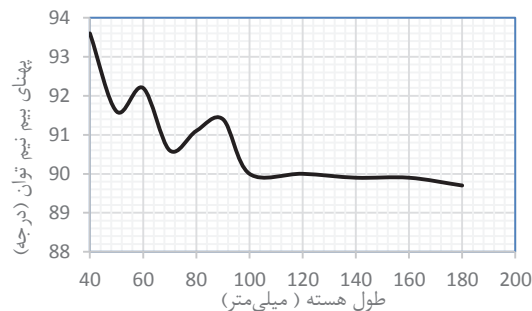
یکی از مؤثرترین راه‌ها برای بهبود مشخصات آنتن، چه از نظر گیرندگی و چه از نظر پارامترهای تشعشی، بحث تعداد دورهای سیم پیچی شده است. در این بخش، تأثیر این عامل بر روی بهره آنتن بررسی شده است. برای این منظور در تعداد دورهای مختلف، شبیه‌سازی انجام شده است که نتایج آن در ادامه بررسی می‌گردد. مطابق شبیه‌سازی‌های گذشته، بهره‌ها به یک اندازه اولیه، نرمالیزه شده‌اند.



شکل ۱۷. نمودار تغییرات بهره با تغییرات تعداد دورهای سیم‌پیچی در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز



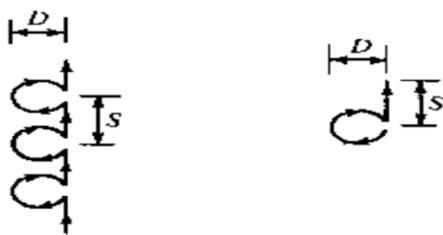
شکل ۱۴. نمودار تغییرات بهره با تغییرات طول آنتن در (الف) ۱۰۰ (ب) ۹۰ و (ج) ۱۱۰ کیلوهرتز بر حسب دسی‌بل



شکل ۱۵. نمودار تغییرات پهنای باند با تغییرات طول آنتن در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز

همان‌گونه که نتایج آزمایش نشان داده است با افزایش طول آنتن از ۴۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر، بهره آنتن به صورت خطی افزایش یافته است.

مقایسه منحنی‌های شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در کل پهنای باند مورد نیاز، ویژگی‌های خواسته شده ثابت باقی خواهند ماند. همچنین منحنی مربوط به پهنای باند آنتن نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، با افزایش بهره سیستم، پهنای باند باریک‌تر و متمرکزتری خواهیم داشت.

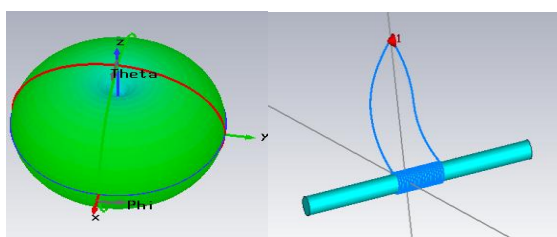


شکل ۱۹. تقسیم آنتن حلقوی کوچک، به دوقطبی الکتریکی و دوقطبی مغناطیسی کوچک

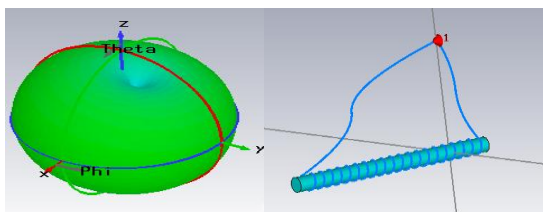
مقدار s همان گام سیم‌پیچی بوده و قسمت‌هایی از سیم‌پیچ که به شکل خط مستقیم نشان داده شده است در واقع نشان دهنده فاصله بین حلقه‌ها یا همان دوقطبی‌های الکتریکی است. پس در نتیجه با افزایش گام سیم‌پیچی تأثیر مخرب دوقطبی‌های الکتریکی مشهودتر خواهد شد و جابجایی الگوی تشعشعی انجام می‌گیرد.

۲- از طرف دیگر در شبیه‌سازی با افزایش طول کل سیم‌پیچی، حلقه‌ای که انتهای دو سر سیم‌پیچ را به پورت متصل می‌کند، بزرگتر می‌شود (این موضوع در شکل ۲۰ نشان داده شده است). این امر باعث می‌شود تا تأثیر این حلقه بیرونی بر روی الگوی تشعشعی افزایش یافته و از حالت اولیه خود خارج شود.

شکل ۲۰ تأییدی بر مطالب بالا را با استفاده از دو نمونه از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد در قسمت (الف) از این شکل دورها از انسجام بیشتری برخوردار هستند و الگوی تشعشعی دارای صفری در راستای محور حلقه می‌باشد اما همان‌گونه که در قسمت (ب) مشاهده می‌شود نقطه صفر از راستای محور شروع به حرکت نموده است.



(الف)



(ب)

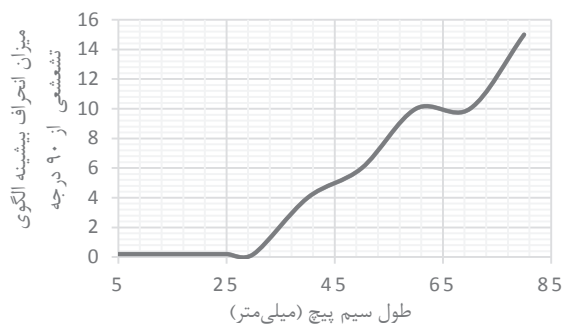
شکل ۲۰. بررسی تأثیر بزرگ شدن حلقه خارجی (بین پورت و سیم‌پیچی) بر روی الگوی تشعشعی آنتن

مانند بخش قبلی، شیب این منحنی نسبت به منحنی‌های قبلی بسیار بیشتر بوده یا به عبارت دیگر تعداد دورها تأثیر بیشتری بر روی بهره بیشینه آنتن دارند؛ بنابراین یکی از بهترین فاکتورها برای بهبود مشخصات تشعشعی آنتن، افزایش تعداد دورها است. در واقع با افزایش دورهای آنتن بدون احتیاج به افزایش ابعاد فیزیکی، می‌توان به سطح گیرندگی بالاتری دست پیدا کرد.

از طرف دیگر با دقت در منحنی شکل ۱۷ این نکته مشهود است که بهره آنتن تا مقدار خاصی با افزایش تعداد دورها افزایش می‌یابد و از آن پس به مقدار ثابتی می‌رسد که برای ابعاد کار ما، تقریباً برای مقدار ۱۵۰ دور، منحنی به یک مقدار ثابتی میل کرده است و حالتی شبیه به منحنی هیستریزس را به وجود آورده است.

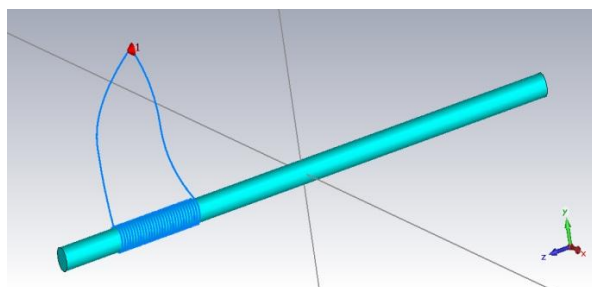
تأثیر گام سیم‌پیچی بر الگوی تشعشعی

در این قسمت به بررسی موضوع مهم انحراف میزان بیشینه پرتو با تغییر گام سیم‌پیچی پرداخته شده است. در واقع مشکلی که هنگام بالا بردن گام سیم‌پیچی با آن مواجه هستیم، تغییر در شکل کلی الگوی تشعشعی آنتن است و بیشینه پرتو به جای قرارگیری در $\theta=90^\circ$ درجه (صفحه سمت)، در مقداری غیر از این اتفاق می‌افتد و به تبع آن نقطه صفر الگو نیز در نقطه‌ای غیر از $\theta=0^\circ$ درجه اتفاق می‌افتد که در عمل چرخش الگوی تشعشعی را تولید می‌نماید. اطلاعات مربوط به انحراف این قسمت در نمودار شکل ۱۸ نشان داده شده است. همچنین در این تحلیل، دو موضوع دخیل هستند:

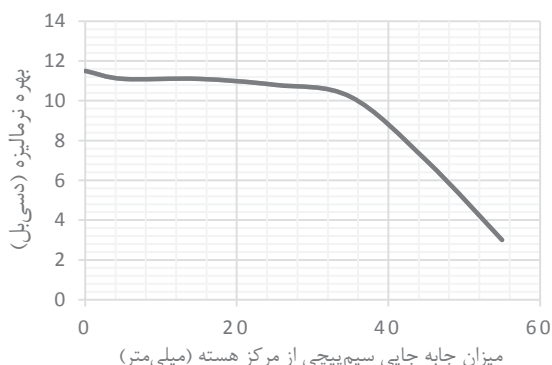


شکل ۱۸ نمودار میزان انحراف بیشینه الگوی تشعشعی از صفحه سمت، با تغییرات طول سیم‌پیچ

۱- به طور کلی آنتن حلقوی کوچک علاوه بر دو قطبی مغناطیسی کوچک (که قبلاً در مورد آن بحث شد) از دو قطبی الکتریکی کوچک نیز تشکیل شده است این موضوع در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در واقع فاصله طولی بین هر دو حلقه تشکیل یک دو قطبی الکتریکی کوچک را می‌دهد $[A^x]$.



شکل ۲۲. تغییر محل قرارگیری سیم‌پیچی در امتداد هسته



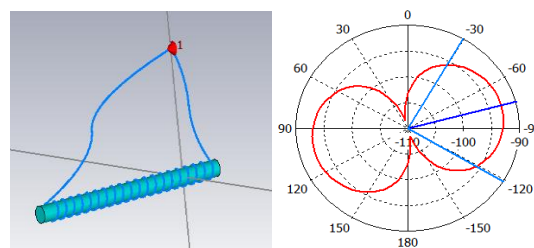
شکل ۲۳. نمودار تغییرات بهره با تغییر درمحل قرارگیری سیم‌پیچ در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز

با تغییر مکان قرار سیم‌پیچی از مرکز به سمت گوشه‌های هسته، مشخصات تشعشی و بهره آنتن به شکل قابل ملاحظه‌ای دچار مشکل خواهد شد. در واقع با این کار نظم خطوط عبوری از مرکز هسته و سیم‌پیچی بر هم خورده و تلفاتی ایجاد می‌گردد. در نتیجه بهترین مکان برای قرارگیری سیم‌پیچی همواره در مرکزی‌ترین نقطه هسته فریتی خواهد.

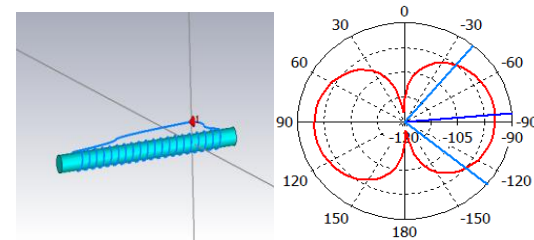
ساخت و آزمون آنتن‌ها

با توجه به پایین بودن فرکانس و بالا بودن طول موج، رسیدن به شرایط میدان دور^۸ در شرایط آزمایشگاهی امکان پذیر نیست و عملاً استفاده از آزمونهای معمول که در آزمایشگاه آنتن در فرکانس بالا انجام می‌پذیرد، میسر نمی‌شود. به دلیل مشکل ذکر شده، دو روش برای آزمون آنتن‌ها و منطبق با دو روش شبیه‌سازی بخش قبل، طراحی شده است. در روش اول که در محیط آزمایشگاه به انجام رسیده است، یکی از آنتن‌ها به عنوان فرستنده در نظر گرفته شده و به مولد سیگنال ۱۰۰ کیلوهرتز متصل شده است و آنتن‌های گیرنده در فاصله چند متری از آن قرار گرفته و میزان گیرندگی آنتن‌ها با یکدیگر به این طریق مقایسه شده است، در واقع این روش نوعی از شبیه‌سازی حالت واقعی است که آنتن در معرض میدان مغناطیسی حاصل از فرستنده قرار می‌گیرد. در روش دوم که روش واقعی و نهایی کار است، آنتن‌ها با

در شکل ۲۱ حلقه بیرونی کوچک شده و تأثیر این تغییر بر روی الگوی تشعشی کاملاً مشهود است و انحراف پرتو با کوچک‌سازی حلقه از ۱۵ به ۵ درجه رسیده است.



(الف)



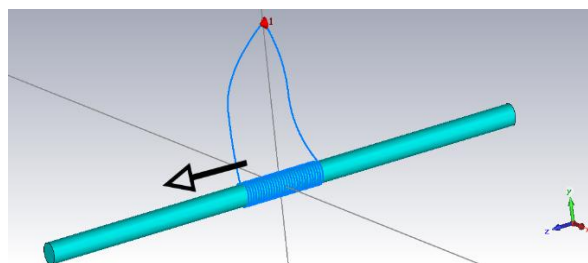
(ب)

شکل ۲۱. بررسی تأثیر کوچک‌سازی حلقه خارجی بر الگوی تشعشی (قسمت (ب) حلقه کوچک شده)

در عمل می‌توان دو سر سیم را که قرار است به تقویت کننده متصل شود به هم پیچاند یا کاملاً به برد بچسبانیم تا از ایجاد این حلقه جلوگیری شود.

تأثیر محل قرارگیری سیم‌پیچی بر پارامترهای تشعشی آنتن

محل قرارگیری سیم‌پیچی در امتداد هسته، می‌تواند بر روی پارامتر تشعشی آنتن تأثیر داشته باشد در این مرحله مطابق شکل ۲۲ سیم‌پیچ، از وسط آنتن به سمت گوشه‌های هسته فریتی حرکت داده شده و تغییرات مشاهده گردیده است. برای این منظور از یک هسته استاندارد ۱۸ سانتی‌متری با ۳۰ دور سیم‌پیچی استفاده شده است.



8 Far-field

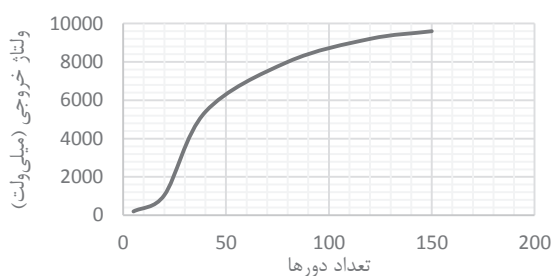
جدول ۳. ولتاژ شکل موج خروجی برای سه طول متفاوت آنتن

طول هسته آنتن (سانتی‌متر)	ولتاژ خروجی (میلی ولت)
۱۸	۱۷۵۰
۱۰	۱۰۵۰
۴,۵	۱۸۰

افزایش خطی ولتاژ خروجی با افزایش طول آنتن در اطلاعات جدول ۱ دیده می‌شود. قابل ذکر است که در این آزمون ولتاژ ورودی برای آزمایش ۵ ولت بوده و فاصله فرستنده و گیرنده ۲ متر است.

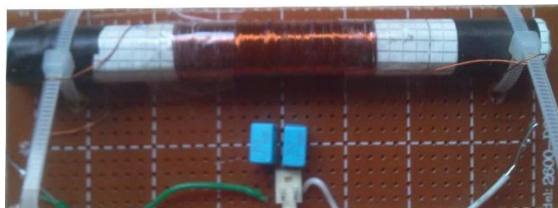
تأثیر تعداد دور سیم‌پیچی بر ولتاژ خروجی گیرنده

در این بخش سعی شده است با آزمایش بر روی آنتن‌هایی با تعداد دورهای متفاوت، مقایسه خوبی را در زمینه تأثیر تعداد دورها بر روی گیرندگی آنتن انجام دهیم. مقادیر مورد آزمایش از ۵ تا ۱۵۰ دور متغیر است. نتایج حاصل از این بخش به این صورت بوده است:

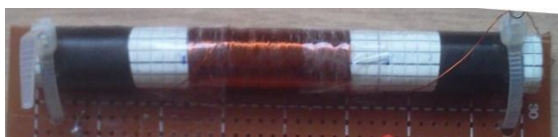


شکل ۲۶. نمودار تغییرات ولتاژ خروجی با تغییر تعداد دورهای سیم‌پیچی

چند نمونه از آنتن‌های آزمایش شده در این بخش در شکل ۲۷ نشان داده شده است.



(الف)

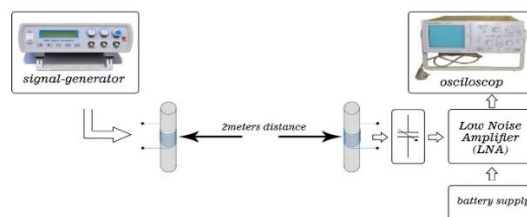


(ب)

فرستنده‌های لورن موجود در کشور خودمان و کشورهای همسایه مورد آزمون واقع شده‌اند تا به این طریق شرایط میدان دور با توجه به فاصله زیاد فرستنده‌ها، تامین گردد. در ادامه مراحل و روش‌های ذکر شده توضیح داده شده است.

روش اول: فرستنده و گیرنده در فاصله کم از یکدیگر

قبل از شروع به آزمون آنتن‌ها باید میزان اندوکتانس دقیق سیم‌پیچ‌ها محاسبه شده و با توجه به پهنای باند و فرکانس مرکزی، مدار تطبیق RLC برای هر آنتن تهیه شود؛ همچنین به یک تقویت کننده کم نویز جهت تقویت سیگنال دریافتی احتیاج است که با اتصال آنتن و مدار تنظیم ساخته شده به ورودی تقویت کننده امکان مشاهده سیگنال در دستگاه اسیلوسکوپ و مقایسه بین حالات مختلف آنتن‌ها میسر خواهد بود. شماتیکی از آزمایش اول در شکل ۲۴ نشان داده شده است.

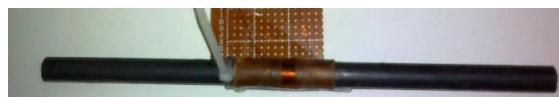


شکل ۲۴. شماتیک آزمایش روش اول

در ادامه این بخش با تغییر پارامترهای قبل که در شبیه‌سازی‌ها به آن پرداخته شد، صحت مطالب در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیر طول آنتن بر ولتاژ خروجی گیرنده

در گام اول از این مرحله آزمایش، با یک سیم‌پیچی ۲۰ دوری تأثیر، طول آنتن بر گیرندگی و ولتاژ خروجی بررسی می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۵. نمایی از سه آنتن تحت آزمایش با طول‌های (الف) ۱,۸، (ب) ۱۰ و (ج) ۴/۵ سانتی‌متر

9 Low Noise Amplifier (LNA)

جدول ۴. سیگنال به نویز آنتن برای سه طول مختلف هسته

سیگنال به نویز (دسی‌بل)	طول هسته (میلی متر)
-۵/۵۲	۴۵
۱/۱۸	۱۰۰
۳/۳	۱۸۰

همانگونه که از جدول ۲ مشخص است، برای هسته فریتی با طول بالاتر، میزان سیگنال به نویز بسیار بیشتر از آنتن با طول کوتاه‌تر است به طوری که آنتن با طول ۱۸ سانتی‌متر دارای ۸/۸ دسی‌بل سیگنال به نویز بیشتر نسبت به هسته‌ای با طول ۴/۵ سانتی‌متر است. البته یادآوری این نکته در اینجا لازم است که طول بالاتر آنتن، خود باعث جذب سیگنال الکتریکی بیشتر و در نهایت جذب نویز بیشتری نیز خواهد شد اما با توجه به اینکه میدان مغناطیسی جذب شده بالاتر خواهد بود در نتیجه میزان سیگنال به نویز نهایی مقدار بیشتری خواهد داشت.

برای تأثیر قطر سیم‌پیچ بر سیگنال به نویز خروجی، بر روی سه آنتن قسمت قبل، در این مرحله نیز برای همان سه آنتن در فضای آزاد و با سیگنال واقعی آزمایش انجام پذیرفته است که نتایج آن به این صورت بوده است.

جدول ۵. سیگنال به نویز آنتن برای سه قطر سیم مختلف

سیگنال به نویز (دسی‌بل)	قطر سیم (میلی متر)
۳/۵۲	۰/۲
۳/۰۱	۰/۴
۲/۰۹	۱

با توجه به اطلاعات جدول ۳، این نتیجه حاصل می‌شود که هرچه قطر سیم کمتر باشد با افزایش مقاومت تشعشعی آنتن، پارامترهای گیرندگی بهبود خواهد یافت.

در گام بعدی چند نمونه آنتن با تعداد دورهای مختلف، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور آنتن‌هایی با طول ۱۰ سانتی‌متر، قطر ۱ سانتی‌متر و با تعداد دورهای متفاوت از نظر میزان سیگنال به نویز دریافتی، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج مربوط به آزمونهای فوق در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۶. سیگنال به نویز آنتن برای تعداد دورهای مختلف

سیگنال به نویز با چرخش ۹۰ درجه	سیگنال به نویز (دسی‌بل)	تعداد دورها
-	۱/۱۸	۲۰
-	۷/۰۳	۸۰
۱/۶۴	۱۱/۵۸	۱۲۰
۲/۳۱	۱۲/۹۳	۱۵۰



(ج)

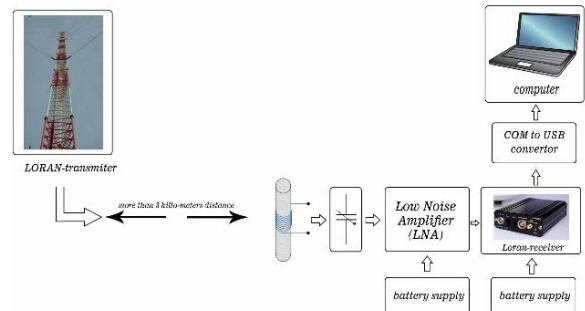
شکل ۲۷. تغییر در تعداد دورهای آنتن (الف) ۱۵۰ دور (ب) ۱۲۰ دور (ج) ۲۰ دور

با دقت در شکل ۲۶ این نکته مشخص است که همانند شبیه‌سازی‌ها تغییرات گیرندگی با افزایش تعداد دورها مخصوصاً در مقادیر پایین‌تر شدید اتفاق می‌افتد و با بیشتر شدن تعداد دورها شیب تغییرات کمتر می‌شود. در بخش قبل و در قسمت شبیه‌سازی برای این ابعاد از آنتن، تعداد دور ۱۵۰ به عنوان آستانه برای ثابت شدن شیب منحنی بهره به دست آمد و در اینجا و در محیط آزمایشگاهی نیز این نتیجه عیناً تکرار شده و همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود شیب منحنی برای ۱۵۰ دور بسیار کاهش یافته است.

روش دوم: فرستنده و گیرنده در فاصله دور از یکدیگر

آزمایش‌هایی که نتایج آن‌ها در این بخش ارائه شده است در شرایطی انجام پذیرفته‌اند که ۲ فرستنده در کشورهای همسایه و یک فرستنده در فاصله‌ای بیش از ۱۰ کیلومتر از محل آزمایش قرار داشته است. در این مرحله از آزمایش علاوه بر آنتن، مدار تنظیم و تقویت کننده از تجهیزات دیگری مثل دستگاه پردازشگر سیگنال لورن، کابل‌های واسط و نرم افزار کامپیوتری برای به دست آوردن میزان سیگنال به نویز استفاده شده است. نمای کلی از آزمایش طراحی شده در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

در گام اول سه خروجی برای سه هسته فریتی با طول‌های متفاوت ارائه شده است. نتایج نشان داده شده در جدول برای یک سیم‌پیچ با ۲۰ دور سیم‌پیچی بوده که دور سه هسته فریتی به ترتیب با طول‌های ۴/۵، ۱۰ و ۱۸ سانتی متر قرار گرفته است. این آزمایش، هم در شبیه‌سازی و هم در محیط آزمایشگاهی در بخش‌های قبلی به انجام رسیده است.



شکل ۲۸. نمای کلی از آزمایش روش دوم

مرجع‌ها

- [1]C.G. Bartone and M.J. Narins, "H-field Antenna Considerations for eLoran Aviation Applications", IEEE (2008) 810-823.
- [2]M. Iad, "Characterization of atmospheric and precipitation static in the long rang navigation band for aircraft", M.Sc. in Ohio University, 2004.
- [3]R. Lilley, "Comparative performance of E-field and H-field Loran-C antennas in P-static.
- [4]R.Lilley and R.Erikson, "FAA Tests E- and H field antennas to characterize improved Loran-C availability during P-static events", Institute of Navigation(ION) National Technical Conference, San Diego, 2005.
- [5]C. A. Balanis, "Antenna theory, analysis and design", third edition, John Wiley & Sons Inc.
- [6] H.J. Laurent and C.A.B. Carvalho, "Ferrite antenna for AM broadcast receivers", Bendix Radio Division The Bendix Corporation Baltimore 4, Maryland.
- [7]K.Ikrath, Ferrite rod antenna arrays for LORAN-C receiver, Research and development technical report ECOM- 3574 (1972).
- [8]W.J.Pelgrum, New potential of low-frequency radio navigation in the 21st century, PHD thesis 2006.
- [9]J.D.Kraus, Antennas, 2nd edition, Mc-GRAW_Hill, 1980.

همچنین با چرخاندن آنتن برای دو نمونه ۱۲۰ و ۱۵۰ دوری به میزان ۹۰ درجه، دوباره خروجی‌ها در جدول (۴) ثبت شده است. به دلیل اینکه موقعیت تقریبی آنتن فرستنده داخلی برای ما مشخص است می‌توانیم آنتن را به گونه‌ای بچرخانیم که نقطه صفر آنتن گیرنده در راستای آنتن فرستنده قرار گیرد تا عملکرد آنتن از این نقطه نظر نیز سنجیده شود. افت سیگنال به نوبت دریافتی با چرخش ۹۰ درجه، مشهود است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا انواع آنتن‌های گیرنده موجود، معرفی گردیده و نقاط ضعف و قدرت آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنتن‌های گیرنده به دو بخش کلی آنتن‌های دریافت کننده میدان الکتریکی (E-field) و آنتن‌های دریافت کننده میدان مغناطیسی (H-field) تقسیم‌بندی شدند که با توجه به مزیت‌های آنتن H-field، این نوع آنتن‌ها به عنوان هدف کار قرار گرفت و روابط حاکم بر آنتن‌های H-field با هسته فریتی ارائه شد.

در گام بعدی سعی شد تا شبیه‌سازی‌های صحیح و قابل اطمینانی از آنتن گیرنده در فرکانس پایین و در دو محیط از نرم افزار CST انجام پذیرد. با تغییر پارامترهایی مثل طول، جنس، شعاع هسته فریتی و طول و تعداد دورهای سیم‌پیچ آنتن و چند پارامتر دیگر، شبیه‌سازی‌ها انجام شده و مشخصات خروجی آنتن، با تغییر این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت، به این وسیله بهینه‌سازی برای داشتن بهترین بهره و بهترین جذب میدان مغناطیسی آنتن، بهترین پهنای بیم آنتن، انجام شد. لازم به ذکر است که این شبیه‌سازی‌ها (در فرکانس پایین) نمونه قبلی نداشته و برای اولین بار ارائه شده است.

در بخش آخر، به ساخت و آزمون آنتن به دو روش پرداخته شد؛ در روش اول، در محیط آزمایشگاه از یک آنتن به عنوان فرستنده استفاده شده و با اتصال سیگنال ۱۰۰ کیلوهرتز به آن، بقیه آنتن‌ها در فاصله اندک با فرستنده، تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفت به این ترتیب امکان مقایسه بین آنتن‌های مختلف در جذب میدان مغناطیسی و سیگنال ارسالی به وجود آمد و نتایج این مرحله نیز ارائه شد. در گام بعدی از این فصل و در حالت واقعی و عملی‌تر، با فعال شدن فرستنده لورن در فاصله بیش از ۱۰ کیلومتر از محل آزمایش، آنتن‌ها از لحاظ گیرندگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و نتایج خروجی از این مرحله توسط نرم‌افزار کامپیوتری و به صورت میزان سیگنال به نوبت خروجی به دست آمد.