

Probe Coil Design in Eddy Current Nondestructive Testing using Simulation Approach

Majid Ghazali¹ , Behrouz Rokrok¹ 

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran, Email: brokrok@aeoi.org.ir

Article Information:

Research Article

Received 22 July 2025

Revised 04 Oct. 2025

Accepted 05 Oct. 2025

Keywords:

Eddy current Testing,
Coil,
Inductance,
Impedance,
Finite Element Method.

ABSTRACT

Eddy current non-destructive inspection is used as an efficient inspection technique in various industries such as aerospace and power plants. Eddy current inspection employs the concept of electromagnetic induction and induces circulating currents (called eddy currents) in conductive materials; this form of non-destructive inspection technique is the only option in some industrial fields, such as in power plant applications or aeronautical applications, where no other non-destructive inspection methods or examination processes can provide comparable capabilities to achieve the objectives of the non-destructive inspection technique. Many tests for such applications are performed using existing and well-known eddy current probes for specific conditions that require specific sizes and frequencies for such an application to effectively enhance the ability to detect defects and discontinuities, especially when a specific requirement has been imposed that necessitates the design/fabrication of a new custom probe for its purpose. The selected probe also significantly affects the received signals and the test quality, and consequently the detection of defects and faults. The focus of the research in this paper is the optimal design of the coil in non-destructive eddy current testing with a focus on the analysis of the parameters affecting the coil performance, including the diameter and the number of turns in both radial and longitudinal directions. In order to perform the necessary analyses, a code has been designed in the MATLAB environment to ensure accurate inductance calculation and validation has also been carried out and verified using a reliable and valid work through FEM simulation in COMSOL software, which analyzes the magnetic field distribution and calculates the impedance and inductance of its coil. In this study, it is shown that increasing the coil layers in the vertical direction and increasing the number of coils turns has a significant correlation with the increase in impedance. Then, as expected, this also improves the signal performance and detection capability. To analyze and demonstrate the performance, the coil impedance diagram for inspecting a tube with a hole of 100 μm diameter in different coil configurations is simulated and the result is presented. In this research, we have provided efficient and reliable tools for calculating and simulating the design based on the FEM approach and algebraic solutions, and this can be a guide for the optimal design of eddy current coils in industry and other applications to be efficient in their purpose.

Cite this article: Ghazali, M. & Rokrok, B. (2025). Probe Coil Design in Eddy Current Nondestructive Testing using Simulation Approach. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 5 (1), 80-91.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.593246.1178>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

طراحی سیم پیچ پروب در آزمون غیرمخرب جریان گردابی با استفاده از رهیافت شبیه سازی

مجید غزالی^۱، بهروز رکرك^۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، تهران، ایران، رایانامه: brokrok@aeoi.org.ir

چکیده:

بازرسی غیرمخرب جریان گردابی، به عنوان یک تکنیک بازرسی کارآمد در صنایع مختلف مانند هوافضا و نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بازرسی جریان گردابی از مفهوم القای الکترومغناطیسی برای ایجاد جریان‌های گردشی (به نام جریان‌های گردابی) در مواد رسانا استفاده می‌شود. این شکل از تکنیک بازرسی غیرمخرب تنها گزینه در برخی از زمینه‌های صنعتی، مانند کاربردهای نیروگاهی یا کاربردهای هوانوردی است، جایی که هیچ روش بازرسی غیرمخرب یا فرایندهای بررسی دیگری نمی‌توانند قابلیت‌های قابل مقایسه‌ای را برای دستیابی به اهداف تکنیک بازرسی غیرمخرب ارائه دهند. بسیاری از آزمایش‌ها برای چنین کاربردهایی با استفاده از پروب‌های جریان گردابی موجود و شناخته‌شده برای شرایط خاص انجام می‌شوند که به اندازه‌ها و فرکانس‌های خاصی برای چنین کاربردی نیاز دارند تا به طور موثر قابلیت تشخیص نقص و ناپیوستگی را افزایش دهند، به خصوص هنگامی که یک الزام خاص اعمال شده باشد که طراحی/ساخت یک پروب سفارشی جدید را برای هدف خود ضروری می‌سازد. پروب انتخاب شده همچنین به طور قابل توجهی بر سیگنال‌های دریافتی و کیفیت آزمون تأثیر می‌گذارد و در نتیجه بر شناسایی نقص و عیب تأثیر می‌گذارد. تمرکز تحقیق در این مقاله، طراحی بهینه کوئل را در آزمایش‌های غیرمخرب جریان گردابی با تمرکز بر تجزیه و تحلیل پارامترهای مؤثر بر عملکرد کوئل، از جمله قطر و تعداد دور در هر دو جهت شعاعی و طولی، می‌باشد. به منظور انجام تحلیل‌های لازم، کدی در محیط MATLAB طراحی شده است تا محاسبه دقیق اندوکتانس تضمین شود و اعتبارسنجی با استفاده از یک کار معتبر و قابل اعتماد نیز از طریق شبیه‌سازی FEM در نرم‌افزار COMSOL انجام و بررسی شده است، که توزیع میدان مغناطیسی را تجزیه و تحلیل کرده و امیدانس و اندوکتانس سیم‌پیچ آن را محاسبه می‌کند. در این مطالعه نشان داده شده است که افزایش لایه‌های سیم‌پیچ در جهت عمودی و افزایش تعداد دور سیم‌پیچ‌ها همبستگی معنی‌داری با افزایش امیدانس دارد. سپس، همانطور که انتظار می‌رفت، این امر عملکرد سیگنال و قابلیت تشخیص را نیز بهبود می‌بخشد. برای تجزیه و تحلیل و نشان دادن عملکرد، نمودار امیدانس سیم‌پیچ برای بازرسی یک لوله با سوراخی با قطر ۱۰۰ میکرومتر در اشکال مختلف پیکربندی سیم‌پیچ شبیه‌سازی شده و نتیجه ارائه شده است. ما در این تحقیق ابزارهای کارآمد و قابل اعتمادی را برای محاسبه و شبیه‌سازی طراحی بر اساس رویکرد FEM و راه‌حل‌های جبری ارائه کرده‌ایم و این می‌تواند راهنمایی برای طراحی بهینه سیم‌پیچ جریان گردابی در صنعت و سایر کاربردها برای کارآمد بودن هدف آنها باشد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۴/۳۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۱۳

کلیدواژگان:

آزمون جریان گردابی،

سیم پیچ،

اندوکتانس،

امیدانس،

روش اجزاء محدود.

استناد: غزالی، مجید و رکرك، بهروز. (۱۴۰۴). طراحی سیم پیچ پروب در آزمون غیرمخرب جریان گردابی با استفاده از رهیافت شبیه سازی.

مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب، ۵ (۱)، ۸۰-۹۱.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.593246.1178>

۱- مقدمه

روش‌های آزمون غیرمخرب در شناسایی عیوب و ناپیوستگی‌ها و پیشگیری از آسیب در سازه‌های حساس در صنایع مهمی مانند هسته‌ای، نفت، برق و غیره از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند. یکی از مهم‌ترین روش‌ها، آزمایش جریان گردابی است که وظیفه بازرسی سازه‌هایی با هندسه‌های مختلف مانند صفحات یا لوله‌ها را برای شناسایی و تشخیص عیوب و ناپیوستگی‌ها یا تعیین ضخامت و شناسایی جنس مواد را بر عهده دارند. این روش از جمله رایج‌ترین روش‌ها برای بررسی مواد رسانای الکتریکی با سرعت بالا است. آزمون جریان گردابی (ECT) یک روش آزمون غیرمخرب مبتنی بر القای الکترومغناطیسی است که برای شناسایی عیوب و اندازه‌گیری ضخامت در مواد رسانا استفاده می‌شود. قلب این سیستم، سیم‌پیچ پروب است و بهینه‌سازی پارامترهای آن برای دستیابی به حداکثر حساسیت، وضوح و نفوذپذیری ضروری است. سیم‌پیچ‌های با قطر کوچک‌تر، وضوح فضایی بهتری برای شناسایی عیوب ریز ارائه می‌دهند، اما میدان مغناطیسی آنها نفوذ کمتری دارد. برعکس، سیم‌پیچ‌های با قطر بزرگ‌تر نفوذ بیشتر اما وضوح پایین‌تری دارند [۱]. افزایش تعداد دور سیم‌پیچ، اندوکتانس و میدان مغناطیسی سیم‌پیچ را افزایش می‌دهد که منجر به سیگنال خروجی قوی‌تر و نسبت سیگنال به نویز (SNR) بهتر می‌شود. با این حال، این افزایش می‌تواند باعث کاهش پهنای باند فرکانسی پروب شود [۲]. فرکانس کاری پروب پارامتری است که به شدت با عمق نفوذ مرتبط است (اثر پوست). فرکانس‌های بالاتر برای شناسایی عیوب سطحی و کوچک مناسب هستند، در حالی که فرکانس‌های پایین‌تر اجازه نفوذ به عمق بیشتر را برای شناسایی عیوب زیرسطحی می‌دهند. بهینه‌سازی فرکانس برای هدف بازرسی خاص، حیاتی است [۳]. طراحی سیم‌پیچ اغلب برقراری یک موازنه بین این پارامترهاست. در برخی مطالعات برای غلبه بر محدودیت‌های سیم‌پیچ‌های معمولی، از سیم‌پیچ‌های آرایه‌ای (Array Coils) استفاده می‌شود که ترکیبی از سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده هستند. این آرایه‌ها امکان پوشش سریع‌تر و شناسایی عیوب با جهت‌های مختلف را فراهم می‌کنند [۴]. علاوه بر این، استفاده از هسته‌های

فرومغناطیس (مانند فریت) در داخل سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی را متمرکز کرده و کارایی و حساسیت آن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۵]. امروزه، بهینه‌سازی این پارامترها به شدت بر پایه مدلسازی ریاضی و شبیه‌سازی‌های عددی، مانند روش المان محدود (FEM)، استوار است. این شبیه‌سازی‌ها به مهندسان اجازه می‌دهند تا پیش از ساخت نمونه فیزیکی، رفتار سیم‌پیچ را در شرایط مختلف تحلیل کرده و طراحی بهینه را با هزینه کمتری پیدا کنند [۶]. با پیشرفت فناوری، انتخاب پارامترهای سیم‌پیچ فراتر از تنظیمات ساده و به سمت طراحی‌های هوشمند و چندمنظوره حرکت کرده است. یک رویکرد نوین، استفاده از سیم‌پیچ‌های تفاضلی (Differential Coils) است. این پروب‌ها از دو سیم‌پیچ یکسان تشکیل شده‌اند که به صورت سری معکوس (opposition) بسته شده‌اند و نسبت به تغییرات ناگهانی در خواص ماده، مانند وجود ترک، بسیار حساس هستند، در حالی که تغییرات تدریجی مانند تغییرات دمایی یا تغییر ضخامت را خنثی می‌کنند [۷]. در بازرسی مواد کامپوزیت یا سازه‌های چندلایه مانند هواپیما، چالش اصلی تشخیص عیوب در لایه‌های عمیق‌تر است. در اینجا، از سیم‌پیچ‌های با فرکانس پایین و قطر بزرگ استفاده می‌شود تا عمق نفوذ لازم فراهم شود. همچنین، بهینه‌سازی شکل سیم‌پیچ، مانند طراحی پروب‌های مطلق (Absolute) یا هسته فریت، برای جداسازی بهتر سیگنال عیب از سیگنال پایه ماده ضروری است [۸]. ابزارهای بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی، مانند الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)، برای یافتن خودکار مجموعه پارامترهای بهینه (قطر، تعداد دور، فرکانس) برای یک کاربرد بازرسی خاص به کار گرفته می‌شوند. این الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن چندین هدف متضاد (مانند حداکثر کردن حساسیت و پهنای باند به طور همزمان)، یک طراحی بهینه چندمنظوره ارائه می‌دهند [۹]. مدلی مبتنی بر شناسایی پدیده و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام جمعیت برای تخمین هم‌زمان شکل و عمق ترک‌های خستگی در فلزات، با استفاده از داده‌های تغییرات امپدانس سیم‌پیچ در آزمون جریان گردابی، ارائه شده است که نتایج آن دقت بالایی در حل مسأله معکوس نشان می‌دهد [۱۰]. روش جریان گردابی فراتر از تشخیص صرف نقص، برای ارزیابی عددی انواع آسیب‌های ریزساختاری

(از جمله تغییرات کاربیدی، کاهش کروم زمینه، کربوره شدن، اکسیداسیون و ریزترک‌ها) در لوله‌های ریفرمر Nb40HP با عمرهای متفاوت به کار گرفته شده و با تأیید نتایج توسط میکروسکوپی نوری و الکترونی، شاخص‌های مناسبی برای ارتباط داده‌های جریان گردابی با تغییرات ریزساختاری ارائه گردیده است [۱۱]. پروب‌های میدان دور، تکنیک ویژه‌ای برای بازرسی لوله‌ها و میله‌ها است. در این روش، پارامترهای سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده که در فاصله مشخصی از هم قرار دارند، به گونه‌ای بهینه می‌شوند که میدان مغناطیسی مجبور شود دو بار از دیواره نمونه عبور کند. این طراحی، آن را برای شناسایی عیوب داخلی و خارجی با حساسیت تقریباً یکسان، ایده‌آل می‌سازد [۱۲]. استفاده از چاپ سه‌بعدی برای ساخت قالب‌های سیم‌پیچ با اشکال پیچیده یا استفاده از مواد رسانای انعطاف‌پذیر، مرزهای طراحی پروب را گسترش داده است. این فناوری‌ها امکان ساخت پروب‌های سفارشی شده برای سطوح با هندسه نامنظم را فراهم می‌کنند و عملکرد بازرسی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند [۱۳]. در نهایت، هدف از بهینه‌سازی، دستیابی به پروبی است که بتواند عیوب مورد نظر را با حداکثر قابلیت اطمینان و حداقل نویز در کمترین زمان ممکن تشخیص دهد. بیشتر پژوهش‌های پیشین به بررسی تأثیر مجزای هر پارامتر پرداخته‌اند و کمتر به بررسی هم‌زمان و متقابل پارامترها در یک چارچوب یکپارچه توجه شده است. به عنوان مثال، تأثیر افزایش تعداد دور در راستای شعاعی در مقایسه با راستای عرضی، با ثابت نگه داشتن تعداد دور کل، در هیچ مطالعه‌ای به صورت کمی مورد تحلیل قرار نگرفته است. اگرچه پژوهش‌هایی مانند از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای یافتن پارامترهای بهینه استفاده کرده‌اند، اما این رویکردها عموماً هزینه‌ی محاسباتی بالا داشته و نیازمند اجرای مکرر شبیه‌سازی‌های المان محدود هستند. در مقابل، پژوهش حاضر با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی-عددی دقیق و سریع در متلب، امکان بررسی هزاران ترکیب پارامتری را با هزینه‌ی محاسباتی ناچیز فراهم می‌آورد که خود گامی به‌سوی طراحی سریع و کم‌هزینه‌ی صنعتی محسوب می‌شود. در حالی که مراجع زیادی به بررسی پروب‌های خاص مانند آرایه‌ای، تفاضلی یا دارای هسته پرداخته‌اند، اما معیار کمی و اولویت‌بندی تأثیر هر یک از پارامترهای هندسی بر امپدانس

نهایی، در فضای طراحی محدود شده توسط ابعاد کوچک پروب، به صراحت ارائه نشده است. این در حالی است که در کاربردهای صنعتی واقعی، طراحان همواره با محدودیت‌های ابعادی مواجه‌اند و نیاز به راهنمایی دقیق در مورد اینکه کدام پارامتر بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی دارد، احساس می‌شود.

بر اساس نتایج ارائه شده، نوآوری علمی و دستاورد جدید پژوهش حاضر را میتوان به شرح ذیل بیان کرد:

۱. ارائه مدل محاسباتی دقیق و سریع در متلب با خطای کمتر از ۰.۱۴٪ نسبت به شبیه سازی المان محدود، که امکان تحلیل سریع و کم‌هزینه‌ی هزاران آرایش مختلف سیم‌پیچ را بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های زمان‌بر فراهم می‌کند؛ در حالی که پژوهش‌های پیشین عمدتاً به شبیه‌سازی‌های سنگین المان محدود یا روش‌های تجربی پرتکرار محدود بودند.

۲. ارائه رابطه‌ی کمی و اولویت‌بندی تأثیر پارامترها که نشان می‌دهد بهینه‌سازی آرایش شعاعی (افزایش لایه‌ها) تأثیر بسیار بیشتری (۳.۴٪ بهبود) نسبت به تغییر تعداد دور کل دارد و پیکربندی ۱۵ لایه شعاعی با ۲ دور اضافی به عنوان آرایش بهینه معرفی می‌شود؛ این اولویت‌بندی کمی در هیچ مطالعه‌ی پیشینی به این صراحت و با این دقت ارائه نشده است.

۳. برخلاف پژوهش‌های سنتی که فقط به بررسی تأثیر مجزای قطر یا تعداد دور می‌پرداختند، این تحقیق برای نخستین بار تأثیر هم‌زمان و متقابل قطر، عرض و توزیع لایه‌ها را در قالب یک مدل تحلیلی-عددی یکپارچه ارائه کرده و نشان می‌دهد که کاهش عرض سیم‌پیچ به ۱.۶ میلی‌متر و افزایش قطر به ۱۳.۴ میلی‌متر، به طور هم‌افزاینده سیگنال را تقویت می‌کند.

۲- محاسبه اندوکتانس و میدان الکترومغناطیسی

سیم پیچ

بررسی نقش پارامترهای مختلف شامل قطر داخلی و

رابطه (۵) می باشد [۱].

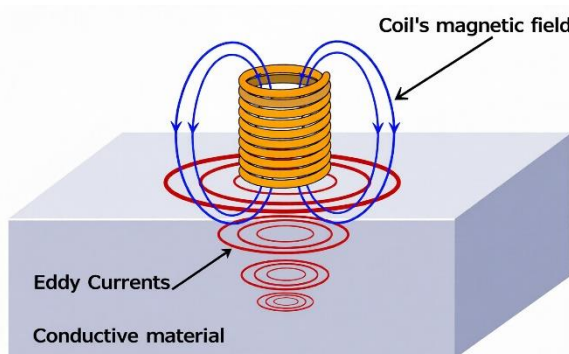
$$J(z) = J_{0,max} * e^{-\frac{z}{\delta}} * \cos(\omega t + \alpha_0 - \frac{z}{\delta}) \quad (5)$$

که در آن $J_{0,max}$ بیشینه چگالی شار روی سطح قطعه ، z ضخامت لوله ، δ عمق نفوذ ، t زمان و α_0 فاز هستند. قابل ذکر است که عمق نفوذ باتوجه به ابعاد عیب سوراخ موجود روی نمونه یعنی برابر ضخامت یا قطر عیب سوراخ در نظر گرفته می شود.

به منظور یافتن مقادیر امپدانس با مقادیر متفاوتی از پارامتر های سیم پیچ، برنامه ای در نرم افزار متلب بدین منظور توسعه داده شد.

۳- شبیه سازی اجزاء محدود

شبیه سازی اجزای محدود (FEM) یک روش عددی قدرتمند است که برای تحلیل و پیش بینی رفتار سیم پیچ در آزمون جریان گردابی در محیطی مجازی و با دقت بالا به کار می رود. این فناوری، سنگ بنای طراحی مدرن و بهینه سازی پروب ها محسوب می شود. نحوه تشکیل جریان گردابی در عمق ماده رسانا مورد آزمون در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) تصویر شماتیک چگونگی ایجاد جریان گردابی ناشی از

سیم پیچ [۱۶]

شبیه سازی اجزای محدود این توانایی را دارد که تمام پدیده های الکترومغناطیسی مرتبط، از جمله چگالی شار میدان مغناطیسی، توزیع جریان گردابی در نمونه و ... را به طور کامل شبیه سازی کند. این امر درک عمیقی از بهرهمکنش پروب با ماده تحت آزمون فراهم می کند. جهت مقایسه نتایج حاصل از برنامه متلب با نتایج شبیه سازی، یک سیم پیچ چند

خارجی سیم پیچ، طول سیم پیچ، تعداد دور کل سیم پیچ، تعداد دور سیم پیچ در راستای شعاعی و عرضی، قطر سیم و فرکانس تحریک حائز اهمیت است. این پارامتر ها نقش تعیین کننده ای در مقدار اندوکتانس بدست آمده از سیم پیچ حین آزمون جریان گردابی دارند. اندوکتانس در سیم پیچ به کمک رابطه (۱) بدست می آید [۱۴].

$$L = K \frac{\mu_0 N^2 A_{coil}}{h} \quad \text{و} \quad X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (1)$$

که A_{coil} مساحت موثر سیم پیچ ، N تعداد دور سیم پیچ ، μ_0 ضریب نفوذپذیری فضای آزاد ، h عرض سیم پیچ ، K ضریب ناگائوگا ، f فرکانس تحریک و L اندوکتانس می باشد. مقدار راکتانس سیم پیچ به کمک رابطه (۲) بدست می آید.

$$R = \rho \frac{l_{wire}}{A_{wire}} \quad (2)$$

که A_{wire} مساحت موثر سیم و l_{wire} طول کل سیم است. مقدار امپدانس سیم پیچ در رابطه (۳) ذکر شده است.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L)^2} \quad (3)$$

در اینجا اندوکتانس (L)، متغیر طراحی بوده اما امپدانس (Z)، تابع هدف بهینه سازی است. به عبارت دیگر، طراح با تغییر پارامترهای هندسی (تعداد دور، قطر، طول) ابتدا اندوکتانس را محاسبه کرده و سپس با در نظر گرفتن مقاومت اهمی و فرکانس، امپدانس نهایی را به دست می آورد. بنابراین، اندوکتانس یک پارامتر میلنی و امپدانس یک شاخص کارایی نهایی محسوب می شود. مقدار میدان الکترومغناطیسی القا شده در مرکز سیم پیچ حول محور z نیز مطابق رابطه (۴) است [۱۵].

$$B(z) = \frac{\mu_0 N i}{2h(r_2 - r_1)} (A) * \ln\left(\frac{r_2 + \sqrt{A^2 + r_2^2}}{r_1 + \sqrt{A^2 + r_1^2}}\right) + B * \ln\left(\frac{r_2 + \sqrt{B^2 + r_2^2}}{r_1 + \sqrt{B^2 + r_1^2}}\right) \quad (4)$$

که در آن i جریان (آمپر) ، $A = \frac{h}{2} - z$ و $B = \frac{h}{2}$ ، r_1 و r_2 به ترتیب شعاعی بیرونی و درونی سیم پیچ هستند. مقدار چگالی شار القا شده در مرکز سیم پیچ مطابق

لایه استوانه‌ای در نرم افزار کامسول مدل‌سازی شد.

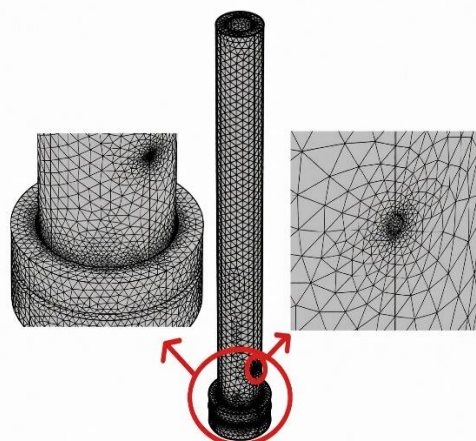
۳-۱- مطالعه مش

به منظور افزایش قابلیت تکرار پذیری مطالعه نوع و اندازه مش، شرایط مرزی، معیار همگرایی مش، ابعاد دامنه محاسباتی و خواص مواد مورد استفاده در ادامه بررسی می‌شود. نوع مش به کارگرفته شده Free Tetrahedral و شرایط و اندازه مش استفاده شده در جدول ۱ زیر آمده است.

جدول (۱) مقادیر پارامترهای مش استفاده شده

نام پارامتر مش	مقدار
Maximum element size	0.006 m
Minimum element size	6e-5 m
Maximum element growth rate	1.3
Curvature factor	0.2
Resolution of narrow regions	1

معیار همگرایی مش به کمک بررسی تغییرات مقدار اندوکتانس سیم پیچ در ۱۰ سایز مش متفاوت (مینیمم سایز : ۰.۰۰۱ الی ۰.۰۱ متر و ماکزیمم سایز : ۵۰ الی ۳۰۰ میکرومتر) صورت گرفت. نتایج بیانگر این بودند که تغییرات مقدار اندوکتانس در اندازه مش (مینیمم سایز : ۰.۰۰۶ متر و ماکزیمم سایز : ۶۰ میکرومتر) به صفر میل کرده و مش دچار همگرایی شده است. شرایط مرزی لوله کاملاً فیکس شده بوده و تنها پراب سیم پیچ از روی آن عبور داده شده است. شماتیک مربوط به نحوه مش زنی در شکل ۲ ذکر شده است.



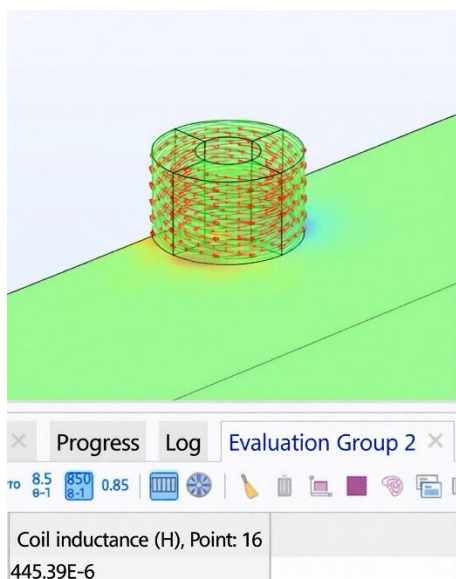
شکل (۲) شماتیک مربوط به مش Free Tetrahedral

دامنه محاسباتی اثرات جریان گردابی روی لوله به طول

۸ سانتی متر صورت گرفته است. جنس لوله مورد استفاده تیتانیوم با خواص فیزیکی و الکترومغناطیسی به شرح ذیل است: چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$ ۴۵۱۰)، مدول یانگ (GPa ۱۰۵)، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (1.00008)، نفوذپذیری الکتریکی نسبی (1) و رسانایی الکتریکی ($\frac{S}{m}$ 2.3×10^6). نیز جنس سیم پیچ مورد استفاده مس با خواص فیزیکی و الکترومغناطیسی به شرح ذیل است: چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$ ۷۷۶۴)، مدول یانگ (GPa ۱۱۰)، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (1.0000)، نفوذپذیری الکتریکی نسبی (1) و رسانایی الکتریکی ($\frac{S}{m}$ 5.998×10^7).

۳-۲- اعتبارسنجی

جهت ایجاد اطمینان از صحت نتایج کد متلب، مقایسه‌ای بین مقدار اندوکتانس یک سیم پیچ در مطالعه [۱] و نتیجه محاسبه اندوکتانس سیم پیچ مشابه با برنامه کامسول صورت گرفته است.



شکل (۳) سیم پیچ شبیه سازی شده طبق پارامترهای مطالعه فاراگ و همکاران

همانطور که از شکل ۳ مشخص است مقدار اندوکتانس $445.39 \mu H$ است. مقایسه نتایج در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲) مقایسه مقادیر اندوکتانس بدست آمده از برنامه متلب و مطالعه

اندوکتانس سیم پیچ	پارامتر های سیم پیچ	مطالعه
۴۴۴.۹۴۲ میکرو هانری	قطر داخلی: ۷ mm ، قطر خارجی: ۱۶ mm ، طول سیم پیچ: ۹.۴۳۵ mm ، تعداد دور کل سیم پیچ: ۱۶۴ ، قطر سیم: ۰.۴۵ mm و فرکانس تحریک: ۲۸ kHz	فاراگ و همکاران [۱۷]
۴۴۴.۹۴۲ میکرو هانری	قطر داخلی: ۷ mm ، قطر خارجی: ۱۶ mm ، طول سیم پیچ: ۹.۴۳۵ mm ، تعداد دور کل سیم پیچ: ۱۶۴ ، قطر سیم: ۰.۴۵ mm و فرکانس تحریک: ۲۸ kHz	مطالعه کنونی به کمک متلب
۴۴۵.۳۹ میکرو هانری	قطر داخلی: ۷ mm ، قطر خارجی: ۱۶ mm ، طول سیم پیچ: ۹.۴۳۵ mm ، تعداد دور کل سیم پیچ: ۱۶۴ ، قطر سیم: ۰.۴۵ mm و فرکانس تحریک: ۲۸ kHz	مطالعه کنونی به کمک کامسول

ضریب ناگاتوکا ۰.۶۴۳۹، شعاع داخلی سیم پیچ ۵.۲ میلی متر و شعاع خارجی سیم پیچ حداکثر ۶.۷ میلی متر و تعداد دور کل بررسی شده ۱۰۵ الی ۱۵۲ دور می باشد.

به منظور یافتن مقدار بهینه تعداد دور، نمودار تغییرات امپدانس، میدان الکترومغناطیسی و چگالی شار بر حسب تغییرات تعداد دور در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ و ۵ مشخص شده است تعداد دور ۱۵۲ نقطه تلاقی نمودار امپدانس با میدان الکترومغناطیسی و چگالی شار می باشد که بیانگر تعداد دور کل بهینه است.

قابل ذکر است که افزایش تعداد دور موجب افزایش چگالی شار، میدان الکترومغناطیسی و امپدانس می شود اما این افزایش تا رسیدن به حد اشباع (حدوداً ۲۰۰۰ دور) ادامه خواهد داشت و بعد از آن با افزایش تعداد دور مقادیر چگالی شار، میدان الکترومغناطیسی و امپدانس ثابت خواهد ماند. اما عملاً ساخت سیم پیچی با تعداد دور کل ۲۰۰۰ با توجه به ابعاد کوچک پروب غیر منطقی و غیر عملیاتی است.

جدول ۳ به کمک برنامه متلب بدست آمده و بیانگر این واقعیت است که طبق چینش های ۱ الی ۴، در صورت ثابت ماندن تعداد دور در راستای عرضی و افزایش تعداد دور در راستای شعاعی امپدانس افزایش خواهد یافت. مقایسه سیم پیچ های ۴ الی ۶ نشانگر این هست که اضافه کردن حتی ۱ یا ۲ رشته سیم می تواند تاثیر قابل توجهی در افزایش امپدانس بگذارد. طبق چینش های ۷ الی ۱۰ در صورت ثابت ماندن تعداد دور در راستای شعاعی و افزایش تعداد دور در راستای عرضی امپدانس افزایش خواهد یافت. طبق چینش ۱۱ الی ۱۵، اگر تعداد دور کل ثابت و برابر ۱۵۲ باشد و تعداد دور در راستای عرضی افزایش اما تعداد دور در راستای شعاعی کاهش یابد امپدانس روند کاهشی خواهد داشت. نیز مقایسه چینش ۶ و ۱۴ نشان دهنده این است که با تعداد دور کل ثابت، سیم پیچی امپدانس بیشتری تولید می کند که در راستای شعاعی تعداد دور بیشتری داشته باشد. در نهایت می توان نتیجه گرفت با افزایش تعداد دور سیم پیچ از ۱۰۵ به ۱۵۲ دور، مقدار امپدانس از ۸۱.۳۰۱ کیلو اهم به ۱۷۰.۳۸ کیلو اهم رسید که نشان دهنده رشد ۱۱۰ درصدی در کارایی سیم پیچ است. این افزایش چشمگیر، نقش حیاتی تعداد دور کل را در تعیین عملکرد نهایی پروب به وضوح نشان می دهد. در بین

نتیجه بدست آمده از برنامه متلب نشانگر دقت بسیار بالا در محاسبه مقدار لندوکتانس است. نیز نتیجه نرم افزار کامسول نسبت به مقدار ۴۴۴.۹۴۲ μH بدست آمده از مطالعه فاراگ و همکاران [۱۷] و برنامه متلب اختلاف کمی دارد که نشانگر صحت نتیجه شبیه سازی نیز است.

۴- بهینه سازی تعداد دور کل

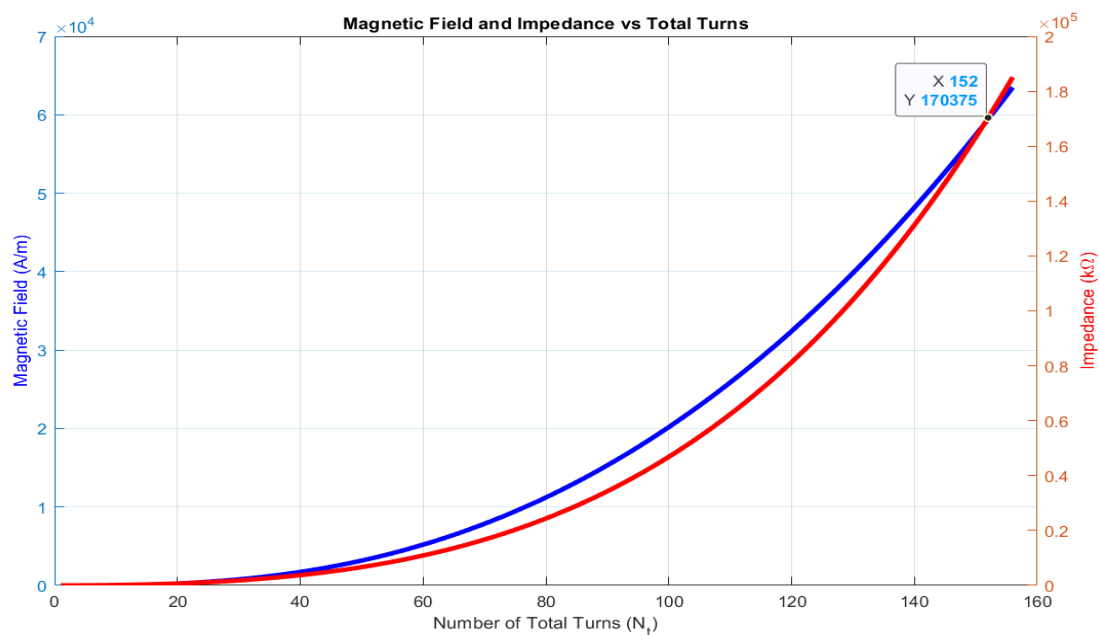
هدف اصلی از بهینه سازی هندسه سیم پیچ، تمرکز میدان مغناطیسی و حداکثر کردن امپدانس متقابل با عیب است. انتخاب بین افزایش تعداد دور در راستای شعاعی (سیم پیچ با قطر بزرگ) یا عرضی (سیم پیچ با ارتفاع زیاد) تأثیر مستقیمی بر مشخصات میدان و در نتیجه قدرت و حساسیت سیگنال دارد. در ادامه نتایج امپدانس سیم پیچ برای حالت های متفاوتی از تعداد دور کل با هم مقایسه شده اند. مقادیر ثابت و پارامترهای طراحی سیم پیچ به شرح زیر می باشد: تراوایی خلأ (μ_0) برابر است با $10^{-7} \times \pi$ ۴ هانری بر متر، مقاومت ویژه سیم مسی (ρ) برابر $10^{-8} \times 1.68$ اهم بر متر، قطر سیم ۰.۱ میلی متر، فرکانس کاری ۱۴.۰۹ مگاهرتز برای قطعه تیتانیوم، عرض سیم پیچ حداقل ۱ و حداکثر ۱.۶ میلی متر،

شد و خروجی امپدانس سیم پیچ دیفرانسیلی برای بخش موهومی و حقیقی آن مطابق شکل ۹ رسم گردید. همانطور که در شکل ۹ مشخص است افزایش تعداد دور سیم پیچ موجب افزایش دامنه (قدرت) سیگنال در لوله دارای سوراخ شده است. از جمله عوامل موثر دیگر روی امپدانس سیم پیچ، قطر بیرونی سیم پیچ می باشد که رابطه ی مستقیمی با تعداد دور در سیم پیچ دارد.

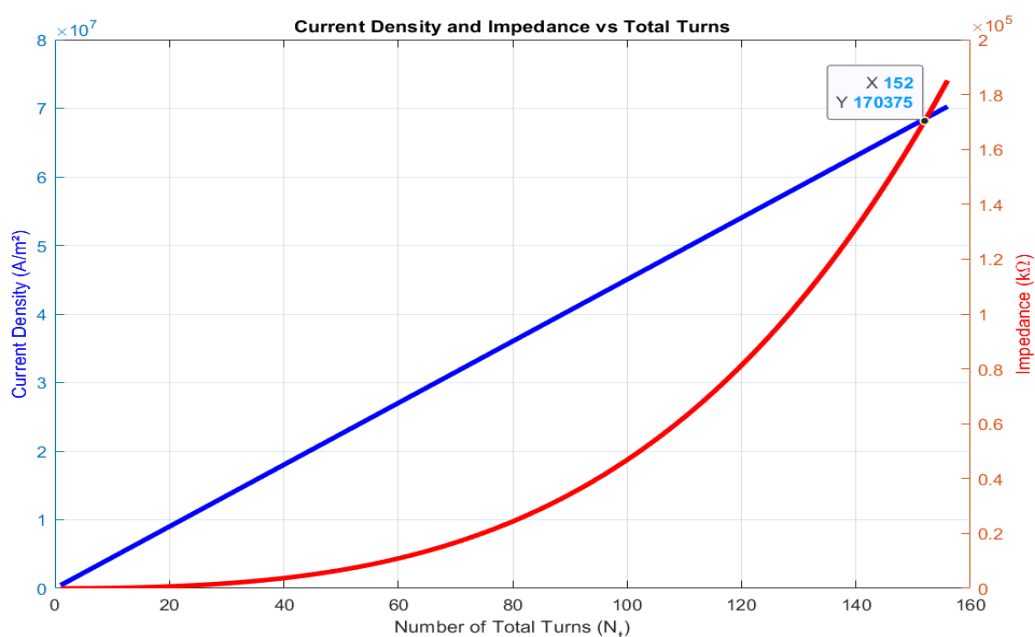
چینش‌های ارائه شده چینش شماره ۶ بهینه‌ترین چینش با بیشترین امپدانس می‌باشد. با استفاده از نرم افزار تهیه شده در این پژوهش می‌توان در طراحی پروب آزمون جریان گردابی و زمانی که طراح محدودیت‌های ابعاد کوئل را تعیین می‌کند، امپدانس متناظر چینش‌های مختلف سیم پیچ را بررسی و مناسب‌ترین چیدمان را انتخاب نمود. جهت اعتبار سنجی نتایج جدول ۳، مقادیر امپدانس چند نوع سیم پیچ شامل شماره‌های ۵ و ۶ به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ذکر شده‌اند.

مقادیر بدست آمده برای امپدانس در شکل‌های ۵ و ۶ (به ترتیب ۱۶۷۹۰۰ و ۱۷۰۵۲۰) بیانگر خطای ۰.۱۴٪ و ۰.۰۸٪ در امپدانس نسبت به نتایج جدول ۳ (چینش ۶ و ۷) بدست آمده از کد متلب می‌باشد که نشانگر نزدیکی قابل توجه نتایج متلب و کامسول می‌باشد.

جهت نمایش تاثیر تعداد دور سیم پیچ در آزمایش جریان گردابی، سیم پیچ دیفرانسیلی از روی یک لوله معیوب (دارای عیب سوراخ با قطر ۱۰۰ میکرومتر) مطابق شکل ۸ عبور داده



شکل ۴) تاثیر افزایش تعداد دور کل روی امپدانس و میدان الکترومغناطیسی



شکل ۵) تاثیر افزایش تعداد دور کل روی امپدانس و چگالی شار

جدول ۳) مقایسه مقادیر امپدانس بدست آمده از برنامه متلب

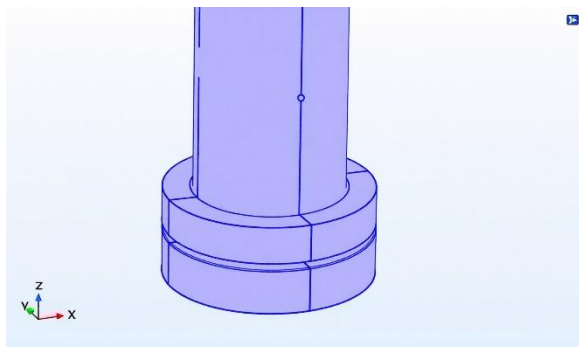
Arrangement	Radial Turns	Vertical Turns	Additional Turns	Total Turns	Impedance_Ohms
1	12	10	0	120	100902.82
2	13	10	0	130	120471.20
3	14	10	0	140	142116.63
4	15	10	0	150	165920.96
5	15	10	1	151	168140.61
6	15	10	2	152	170375.02
7	15	7	0	105	81301.27
8	15	8	0	120	106189.41
9	15	9	0	135	134395.98
10	15	10	0	150	165920.96
11	13	11	9	152	164696.25
12	12	12	8	152	161892.96
13	11	13	9	152	159113.73
14	10	15	2	152	156358.57
15	9	16	8	152	153627.47

از سیم پیچ برابر است با $\Phi = B \times A_{coil}$ ، حلقه های خارجی سیم پیچ سهم بیشتری در افزایش شار پیوندی و در نتیجه اندوکتانس کل دارند. این در حالی است که افزایش دور در راستای عرضی (افزایش ارتفاع)، گرچه تعداد دور کل را افزایش می دهد اما مساحت مؤثر را تغییری نمی دهد و در

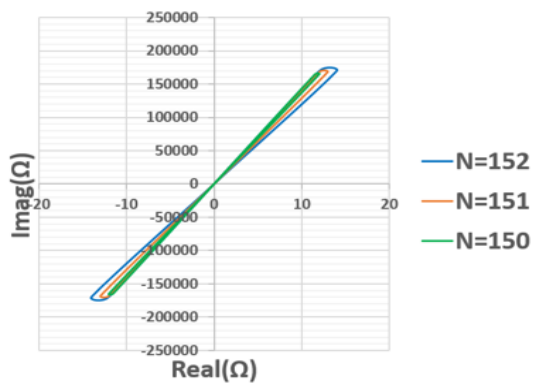
دلیل فیزیکی برتری آرایش شعاعی بر عرضی را می توان در رابطه (۱): $L \propto N^2$ و وابستگی اندوکتانس به مساحت مؤثر (A_{coil}) جستجو کرد. با افزایش تعداد دور در راستای شعاعی، شعاع بیرونی سیم پیچ افزایش یافته و به تبع آن، مساحت مؤثر سیم پیچ بزرگ تر می شود. از آنجا که شار مغناطیسی عبوری

نتیجه سهم کمتری در افزایش اندوکتانس دارد. این توجیه فیزیکی، دلیل اصلی ۳.۴٪ بهبود عملکرد در اثر بهینه‌سازی

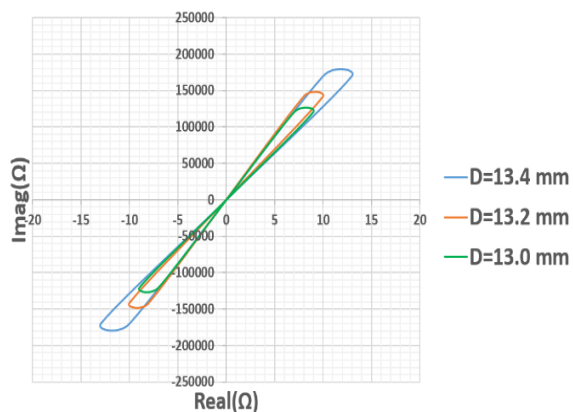
آرایش شعاعی را روشن می‌سازد.



شکل ۸) شماتیک مدل لوله دارای سوراخ و سیم پیچ دیفرانسیلی

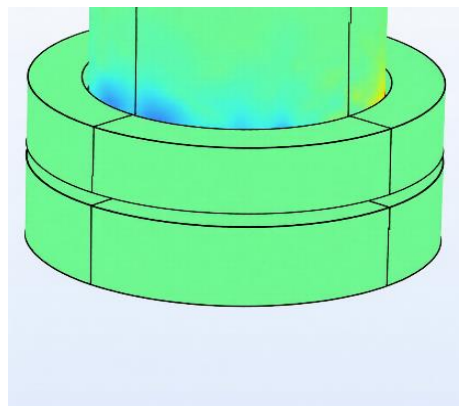


شکل ۹) سیم پیچ شبیه سازی شده طبق پارامترهای سیم پیچ شماره ۶



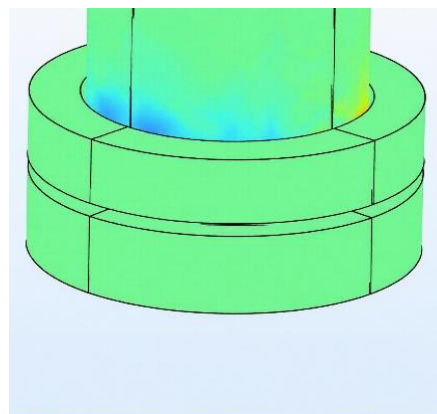
شکل ۱۰) نمودار امپدانس سیم پیچ در هنگام عبور از لوله دارای سوراخ با قطر ۱۰۰ میکرومتر با سه قطر بیرونی متفاوت

مطابق با شکل ۱۰، افزایش قطر سیم پیچ از مقدار ۱۳ الی ۱۳.۴ میلی متر موجب تقویت سیگنال امپدانس شده است.



Progress	Log	Evaluation Group 1
sen	P.5 E-1	285
freq. (MHz)	Coil impedance (Ω), Point: 5	
14.090	167.90E3	

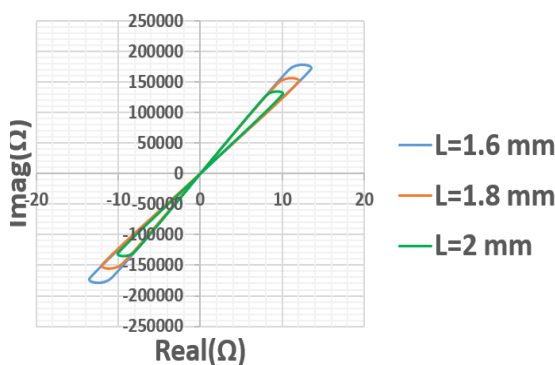
شکل ۶) سیم پیچ شبیه سازی شده طبق پارامترهای سیم پیچ شماره ۵



Progress	Log	Evaluation Group 1
erle	E.5 E-1	085
freq.(MHz)	Coil impedance (Ω), Point: 5	
14.090	170.52E3	

شکل ۷) سیم پیچ شبیه سازی شده طبق پارامترهای سیم پیچ شماره ۶

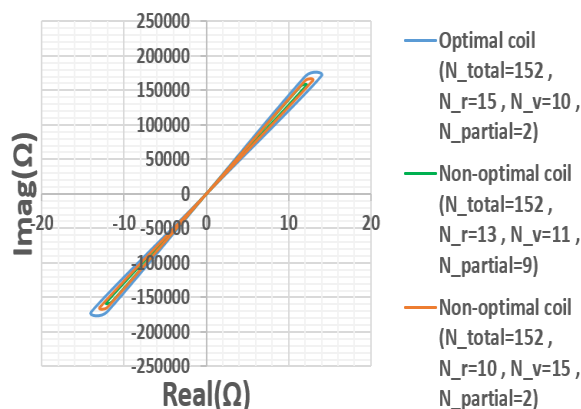
است. با توسعه یک مدل محاسباتی دقیق در نرم افزار متلب و تأیید آن با شبیه سازی المان محدود، روابط کمی بین پارامترهای هندسی سیم پیچ و عملکرد الکترومغناطیسی آن مشخص گردید. یافته های تحقیق نشان می دهد چگونه می توان با تنظیم هدفمند توزیع دورهای سیم پیچ، به مشخصات مطلوب در شناسایی عیوب دست یافت. این پژوهش نخستین مدل تحلیلی-عددی یکپارچه برای تحلیل هم زمان تأثیر قطر، عرض، و تعداد دور در راستای شعاعی و عرضی بر امپدانس، درک علمی از نقش هر پارامتر را در طراحی سیم پیچ عمیق تر ساخته و با کشف اولویت بندی کمی (۳.۴٪) بهبود با بهینه سازی آرایش شعاعی در مقابل افزایش صرف تعداد دور کل، یک قاعده ی طراحی عملی برای مواجهه با محدودیت های ابعادی در اختیار مهندسان قرار می دهد. پیکربندی بهینه ی معرفی شده (۱۵ لایه شعاعی + ۲ دور اضافی) با ارائه ی حداکثر امپدانس ممکن (۱۷۰.۳۸ کیلو اهم)، به عنوان آرایش مرجع برای دستیابی به بالاترین حساسیت در شناسایی عیوب میکرومتری مانند سوراخ ۱۰۰ میکرومتر قابل استفاده است. ابزار طراحی سریع و کم هزینه ی ارائه شده با خطای کمتر از ۰.۱۴٪ نسبت به شبیه سازی المان محدود، امکان تحلیل هزاران آرایش مختلف را بدون نیاز به شبیه سازی های سنگین عددی یا آزمون های تجربی پرهزینه فراهم می کند و با قابلیت تعمیر پذیری به مواد مختلف (با تغییر خواص الکترومغناطیسی) و کاربردهای متنوع در صنایع هوایی، نیروگاهی، پتروشیمی و خودروسازی، یک ابزار طراحی عمومی و قابل اعتماد محسوب می شود. کاهش عرض سیم پیچ به ۱.۶ میلی متر و افزایش قطر به ۱۳.۴ میلی متر به عنوان یک راهنمای طراحی تکمیلی، امکان تقویت هم افزاینده ی سیگنال خروجی را فراهم می آورد که برای کاربردهای نیازمند نسبت سیگنال به نویز بالا، حیاتی است. در نهایت، این پژوهش با ترسیم افق های جدید برای بهینه سازی چندهدفه با در نظر گرفتن هم زمان شاخص هایی نظیر نسبت سیگنال به نویز، قدرت تفکیک فضایی و عمق نفوذ، و همچنین امکان ترکیب مدل با الگوریتم های هوش مصنوعی برای یافتن خودکار آرایش بهینه، مسیر روشنی برای توسعه ی نسل بعدی پروب های جریان گردابی با کارایی فوق العاده ترسیم می کند.



شکل ۱۱) نمودار امپدانس سیم پیچ در هنگام عبور از لوله دارای سوراخ با قطر ۱۰۰ میکرومتر با سه عرض متفاوت

همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است کاهش عرض سیم پیچ با توجه به ثابت بودن تعداد دور سیم پیچ موجب افزایش قطر بیرونی سیم پیچ و متعاقباً افزایش امپدانس شده است که به نوبه خود باعث افزایش حساسیت تشخیص عیوب می شود.

شکل ۱۲ نیز نحوه تغییرات امپدانس را برای سه نوع سیم پیچ دیفرانسیلی با تعداد دور کل ۱۵۲ و سه چینش متفاوت (یک عدد بهینه و دو عدد غیر بهینه) به تصویر کشیده است. همانطور که مشخص است قوی ترین سیگنال امپدانس مربوط به سیم پیچ بهینه با تعداد دور کل ۱۵۲ و تعداد دور در راستای شعاعی و عرضی ۱۵ و ۱۰ به اضافه ۲ دور اضافی می باشد.



شکل ۱۲) نمودار امپدانس سیم پیچ در هنگام عبور از لوله دارای سوراخ با قطر ۱۰۰ میکرومتر با سه چینش متفاوت

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به ارائه یک راهکار سیستماتیک برای طراحی بهینه سیم پیچ در آزمون جریان گردابی پرداخته

- Steam Reformer Tubes Using Eddy Current Testing. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (1). (in Persian)
- [12] Wang, G., Li, Y., Xiao, Q., & Jing, G. (2022). Pulsed Remote Field Eddy Current Method for Identifying the Defect Location of Ferromagnetic Pipes. *2022 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 5244–5249.
- [13] Marchand, B., Decitre, J.-M., Sergeeva-Chollet, N., & Skarlatos, A. (2013). Development of Flexible Array Eddy Current Probes for Complex Geometries and Inspection of Magnetic Parts Using Magnetic Sensors. *AIP Conference Proceedings*, 1511, 488–493.
- [14] Wan, L., Khilnani, A. D., Wu, X., Liu, X., et al. (2023). Optimal Design of Single-Layer and Multi-Layer Air-Core Inductors Considering Uncertainty Factors. *IEEE Access*, 11, 134460–134472.
- [15] Basharat, M., Ding, M., Cai, H., Li, Y., & Fang, J. (2017). Design and Analysis of Multilayer Solenoid Coil for Faraday Modulator. *MATEC Web of Conferences*, 114, 04004.
- [16] Matvieieva, N., et al. (2018). Determination of Indication Depths at High Frequency Eddy Current Testing of CFRP. *Proceedings of the 10th International Symposium on NDT in Aerospace*.
- [17] Farag, H. E., Toyserkani, E., & Khamesee, M. B. (2022). Non-Destructive Testing Using Eddy Current Sensors for Defect Detection in Additively Manufactured Titanium and Stainless-Steel Parts. *Sensors*, 22 (14), 5440.
- ۶- تعارض منافع
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.
- ۷- منابع
- [1] García-Martín, J., Gómez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*, 11 (3), 2525–2565.
- [2] Sophian, A., Tian, G. Y., & Taylor, D. (2017). Electromagnetic and Eddy Current NDT: A Review. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59 (2), 61–69.
- [3] Chady, T., & Sikora, R. (2003). Optimization of Eddy-Current Sensor for Multifrequency Systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39 (3), 1313–1316.
- [4] Machado, M. A. (2024). Eddy Currents Probe Design for NDT Applications: A Review. *Sensors*, 24 (17), 5819.
- [5] Zhang, Q., Zheng, J., Wu, S., Wang, Y., Li, L., & Wang, H. (2025). Research on Eddy Current Probes for Sensitivity Improvement in Fatigue Crack Detection of Aluminum Materials. *Sensors*, 25 (19), 6100.
- [6] Harzallah, S., Chabaat, M., & Belgacem, F. (2015). Eddy Current Modeling by Finite Element Method for Evaluation of Mechanical Properties of the Structure Cracked in Absolute Probe. *AIP Conference Proceedings*, 1637. <https://doi.org/10.1063/1.4907308>
- [7] Angani, C. S., Park, D. G., Kim, C. G., Leela, P., Kollu, P., & Cheong, Y. M. (2010). The Pulsed Eddy Current Differential Probe to Detect a Thickness Variation in an Insulated Stainless Steel. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 29 (4), 248–252.
- [8] Trung, L. Q., Khuong, N. D., Dung, T. T. H., Kasai, N., Kiet, T. M. T., Sekino, K., & Fukuda, H. (2025). Flexible Eddy Current Array Measurement System for Crack Detection in Weld Zones of Steel Structures. *Communications Engineering*, 4 (1), 132.
- [9] Dolapchiev, I., Brandisky, K., & Ivanov, P. (2008). Eddy Current Testing Probe Optimization Using a Parallel Genetic Algorithm. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 5 (1), 39–48.
- [10] Heidari, T., & Sadeghi, S. H. H. (2018). Estimation of the Shape and Dimensions of Surface Cracks in Metallic Structures Using the Eddy Current Testing Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 2 (2), 42–48. (in Persian)
- [11] Alsharifi, R., Abbasi, M., & Shamgholi, M. (2024). Evaluation of the Type and Severity of Damage in