

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده علوم، گروه فیزیک

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش حالت جامد

محاسبه و بررسی جریان‌های گردابی ناشی از پروب دارای هسته‌ی I شکل واقع شده در

بالای صفحه‌ی رسانای چند لایه‌ای دارای نقص زیرسطحی هم محور با پروب

استاد راهنما:

دکتر محمود جعفری

نگارش:

مونا رجبعلی

زمستان ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

در کمال افتخار و امانت تقدیم به

پدر و مادر عزیزم....

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهنشان به شجاعت می کراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر حفصی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ کلمی

در این عرصه دریغ ننمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و همچنین زحمات استاد گرامی و فرزانه، جناب آقای

دکتر میانی را ارج می‌نم که با صبر و حوصله بسیار مراد مسیر این رساله هدایت فرمودند.

چکیده

بازرسی غیرمخرب به صورت گسترده در بخش‌های حساس صنعت به منظور آشکارسازی نواقص و ترک‌های سطحی و زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این پایان‌نامه روشی را با نام بسط ویژه توابع روی نواحی قطع شده (TREE Method) توصیف می‌کند که با استفاده از آن می‌توان پتانسیل برداری مغناطیسی را برای سیم‌پیچی با تقارن محوری و دارای هسته‌ی I شکل با سطح مقطع مستطیل شکل، واقع شده در فضای بالای صفحه‌ی رسانای چندلایه‌ای دارای نقص استوانه‌ای زیرسطحی هم محور با سیم‌پیچ محاسبه کرد.

با اعمال شرط مرزی دیریکله‌ی همگن روی بیرونی‌ترین مرز مسئله، پاسخ‌ها بر حسب پتانسیل برداری که شامل ویژه‌توابع بدست آمده از حل معادلات ویژه‌مقداری می‌باشد، فرمول‌بندی می‌شوند. ضرایب بسط، از طریق حل دستگاه ماتریسی که با اعمال شرایط حاکم بر فصل مشترک‌ها بدست آمده، قابل تعیین می‌باشند. نهایتاً، عبارت چگالی جریان گردابی، چگالی شار مغناطیسی و مقاومت ظاهری در نواحی مختلف، به صورت "شکل بسته" بدست می‌آیند.

در ابتدا، مسئله برای یک سیم‌پیچ رشته‌ای تک‌حلقه و سپس با استفاده از اصل برهم‌نهی برای یک سیم‌پیچ دارای سطح مقطع مستطیلی حل می‌شود. بررسی‌ها را با مسئله‌ی سیم‌پیچ بدون هسته آغاز کرده، سپس به منظور افزایش چگالی جریان القایی، هسته‌ی فریت را اضافه خواهیم کرد.

نتایج بدست آمده از این محاسبات در توافق بسیار خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بسته‌ی نرم افزاری COMSOL، که بر اساس روش المان محدود عمل می‌کند، می‌باشند.

کلید واژه: جریان گردابی، بسط ویژه توابع روی نواحی قطع شده، نقص زیرسطحی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
و	فهرست جدول‌ها
ز	فهرست شکل‌ها
۵	فصل ۱- فیزیک جریان‌های گردابی
۵	۱-۱- تاریخچه
۷	۲-۱- آشنایی با جریان گردابی
۷	۳-۱- اصول فیزیکی جریان گردابی
۱۰	فصل ۲- آشنایی با آزمون‌های غیرمخرب و کاربرد جریان گردابی در این آزمون‌ها
۱۰	۱-۲- مقدمه‌ای بر آزمون غیرمخرب
۱۲	۲-۲- انواع روش‌های آزمون غیرمخرب
۱۴	۳-۲- تست اپتیکی و بصری
۱۴	۱-۳-۲- اصل تئوری تست بصری
۱۵	۲-۳-۲- کاربردهای تست بصری
۱۵	۳-۳-۲- مزایای تست بصری
۱۵	۴-۳-۲- محدودیت‌های تست بصری
۱۵	۴-۲- تست نافذ
۱۶	۱-۴-۲- مواد مورد استفاده در تست نافذ
۱۸	۲-۴-۲- روند تست نافذ
۲۰	۳-۴-۲- کاربرد تست نافذ
۲۱	۴-۴-۲- مزایای تست نافذ
۲۱	۵-۴-۲- محدودیت‌های تست نافذ
۲۲	۵-۲- آزمون ذرات مغناطیسی
۲۲	۱-۵-۲- اصول و تئوری آزمون ذرات مغناطیسی
۲۴	۲-۵-۲- روند آزمون ذرات مغناطیسی
۲۴	۱-۲-۵-۲- تکنیک‌های مغناطیده کردن
۲۶	۳-۵-۲- کاربرد آزمون ذرات مغناطیسی

۲۶.....	مزایای آزمون ذرات مغناطیسی.....	۴-۵-۲
۲۷.....	محدودیت‌های آزمون ذرات مغناطیسی.....	۵-۵-۲
۲۷.....	آزمون فراصوتی.....	۶-۲
۲۸.....	روند آزمون فراصوتی.....	۱-۶-۲
۲۹.....	کاربردهای آزمون فراصوتی.....	۲-۶-۲
۳۰.....	مزایای آزمون فراصوتی.....	۳-۶-۲
۳۰.....	محدودیت‌های آزمون فراصوتی.....	۴-۶-۲
۳۱.....	آزمون رادیوگرافی.....	۷-۲
۳۱.....	اصول آزمون رادیوگرافی.....	۱-۷-۲
۳۲.....	روند آزمون رادیوگرافی.....	۲-۷-۲
۳۳.....	کاربرد آزمون رادیوگرافی.....	۳-۷-۲
۳۴.....	مزایای آزمون رادیوگرافی.....	۴-۷-۲
۳۴.....	محدودیت‌های آزمون رادیوگرافی.....	۵-۷-۲
۳۴.....	آزمون جریان گردابی.....	۸-۲
۳۴.....	روند آزمون جریان گردابی.....	۱-۸-۲
۳۵.....	خصوصیات جریان گردابی.....	۲-۸-۲
۳۷.....	عوامل موثر بر جریان گردابی.....	۳-۸-۲
۳۷.....	رابطه جریان گردابی و عمق نفوذ.....	۱-۳-۸-۲
۳۸.....	رابطه جریان گردابی و رسانایی.....	۲-۳-۸-۲
۳۹.....	رابطه جریان گردابی و نفوذپذیری.....	۳-۳-۸-۲
۳۹.....	رابطه جریان گردابی و بسامد.....	۴-۳-۸-۲
۴۰.....	رابطه جریان‌های گردابی و فاصله سیم‌پیچ از ماده.....	۵-۳-۸-۲
۴۰.....	رابطه جریان‌های گردابی و ولتاژ سیم‌پیچ آزمون.....	۶-۳-۸-۲
۴۰.....	تجهیزات مورد نیاز در آزمون جریان گردابی.....	۴-۸-۲
۴۱.....	کاربرد آزمون جریان گردابی.....	۵-۸-۲
۴۲.....	مزایای آزمون جریان گردابی نسبت به آزمون‌های دیگر.....	۶-۸-۲
۴۳.....	مزایای آزمون جریان گردابی.....	۷-۸-۲
۴۳.....	محدودیت‌های آزمون جریان گردابی.....	۸-۸-۲
۴۴.....	فصل ۳ - بررسی یک مسئله‌ی ساده شامل سیم‌پیچ حلقه‌ای بالای رسانای نیم بی‌نهایت.....	
۴۴.....	مدل‌سازی جریان گردابی.....	۱-۳
۴۶.....	صورت کلی مسائل جریان گردابی.....	۲-۳

- ۳-۳- تحلیل ریاضی پتانسیل برداری و معادلات حاکم بر آن در مسائل جریان گردابی ۴۸
- ۳-۴- حل تحلیلی مسئله‌ی جریان گردابی سیم‌پیچ مجزا ۵۱
- ۳-۴-۱- صورت مسئله و روش حل کلی آن ۵۲
- ۳-۴-۲- حل بخش مربوط به سیم‌پیچ رشته‌ای ۵۳
- ۳-۴-۳- تعمیم پاسخ‌ها به مسئله‌ی سیم‌پیچ با سطح مقطع مستطیل ۵۵
- ۳-۵- حل تحلیلی مسئله‌ی سیم‌پیچ حلقه‌ای واقع در بالای رسانای بی‌نهایت ۵۸
- ۳-۵-۱- صورت مسئله و روند کلی حل ۵۸
- ۳-۵-۲- حل بخش مربوط به سیم‌پیچ رشته‌ای ۵۹
- ۳-۵-۳- تعمیم پاسخ‌ها به مسئله‌ی سیم‌پیچ با سطح مقطع مستطیل ۶۳

فصل ۴- آشنایی با روش TREE ۶۷

- ۴-۱- مقدمه ۶۷
- ۴-۲- مسئله‌ی حضور یک سیم‌پیچ واقع در بالای صفحه‌ی رسانای دارای نقص ۶۷
- ۴-۲-۱- صورت مسئله ۶۷
- ۴-۲-۲- بررسی ناکارآمد بودن روش انتگرالی در حل مسائل شامل مرزهای عمودی ۶۸
- ۴-۳- معرفی روش بسط ویژه توابع روی فضای کوتاه شده در مسائل تقارن محوری ۷۳
- ۴-۴- بررسی یک مثال ساده با استفاده از روش TREE ۷۵

فصل ۵- حل تحلیلی مسئله‌ی جریان گردابی القایی درون یک صفحه‌ی رسانای دارای نقص ۸۲

- ۵-۱- مقدمه ۸۲
- ۵-۲- صورت مسئله ۸۳
- ۵-۳- سیم‌پیچ رشته‌ای تک حلقه ۸۴
- ۵-۴- سیم‌پیچ با سطح مقطع مستطیل ۹۱
- ۵-۵- شبیه‌سازی و رسم نمودارهای مقایسه‌ای ۹۳
- ۵-۵-۱- انتخاب مقدار مناسب N_s و h ۹۳
- ۵-۵-۲- نمودارهای مقایسه‌ای و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ۹۴

فصل ۶- بهینه‌سازی پروب مسئله‌ی جریان گردابی با استفاده از هسته‌ی فریت I شکل ۱۰۰

- ۶-۱- استفاده از پروب‌های دارای هسته‌ی فریت ۱۰۰
- ۶-۲- بررسی تحلیلی مسئله‌ی سیم‌پیچ دارای هسته‌ی فریت I شکل بالای نیم‌فضای رسانای دارای نقص زیرسطحی ۱۰۲
- ۶-۲-۱- مقدمه ۱۰۲

- ۱۰۲..... صورت مسئله و روند کلی حل آن.....۲-۲-۶
- ۱۰۴..... سیم‌پیچ رشته‌ای تک حلقه و تعمیم آن به حالت سطح مقطع مستطیلی.....۳-۲-۶

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ عوامل مؤثر در آزمون جریان گردابی	۳۷
جدول ۱-۳ چگونگی برآورده شدن شرایط مرزی و حل معادلات دیفرانسیلی جزئی در روشهای مختلف	۴۵
جدول ۱-۵ پارامترهای استفاده شده در محاسبات	۹۵

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۱ مراحل القای جریان گردابی درون یک رسانا
۲۰	شکل ۱-۲ نمایی از مراحل آزمون نافذ
۲۳	شکل ۲-۲ نمایی از تشکیل آهنرباهای جدید ناشی از ترک
۲۵	شکل ۳-۲ نمایی از بازرسی با استفاده از ذرات مغناطیسی
۲۹	شکل ۴-۲ نمایی از آشکارسازی نقص توسط آزمون فراصوتی
۳۳	شکل ۵-۲ نمایی کلی از آشکارسازی نقص توسط آزمون رادیوگرافی
۳۶	شکل ۶-۲ ناپیوستگی‌ها در الگوی شار جریان گردابی
۴۶	شکل ۱-۳ صورت کلی یک مسئله‌ی جریان گردابی
۴۸	شکل ۲-۳ نمودار صفحه‌ای مقاومت ظاهری
۵۲	شکل ۳-۳ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ مجزای رشته‌ای تک حلقه
۵۵	شکل ۴-۳ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ مجزا با سطح مقطع مستطیل
۵۹	شکل ۵-۳ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ رشته‌ای تک حلقه بالای رسانای چندلایه‌ای
۶۴	شکل ۶-۳ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ با سطح مقطع مستطیلی بالای رسانای چندلایه‌ای
۶۷	شکل ۱-۴ نمای تقارن محوری دوبعدی از یک مسئله‌ی عمومی نقص استوانه‌ای واقع در یک رسانای چند لایه‌ای
۶۸	شکل ۲-۴ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ رشته‌ای تک حلقه بالای رسانای دارای نقص
۷۵	شکل ۳-۴ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ رشته‌ای تک حلقه بالای رسانایی که قطع ناحیه در $r > h$ صورت گرفته است
۷۹	شکل ۴-۴ نمای تقارن محوری دوبعدی سیم‌پیچ دارای سطح مقطع مستطیلی بالای رسانایی که قطع ناحیه در $r > h$ صورت گرفته است
۸۳	شکل ۱-۵ نمای کلی از آزمون جریان گردابی
۸۴	شکل ۲-۵ نمای دوبعدی سیم‌پیچ تابع دلتا بالای صفحه‌ی رسانای دارای نقص زیرسطحی
۹۲	شکل ۳-۵ نمای دوبعدی سیم‌پیچ با سطح مقطع مستطیل
۹۶	شکل ۴-۵ نمودار پربندی توزیع چگالی جریان گردابی القایی بالای صفحه‌ی آلومینیومی دارای نقص

شکل ۵-۵ نمودار تغییرات چگالی جریان گردابی در ارتفاع $z = -0.5\text{mm}$ درون رسانا برحسب فاصله از مبدأ.....	۹۷
شکل ۶-۵ نمودار تغییرات مؤلفه‌ی مماسی چگالی شار مغناطیسی در ارتفاع $z = -0.5\text{mm}$ درون رسانا برحسب فاصله از مبدأ.....	۹۸
شکل ۷-۵ نمودار تغییرات مؤلفه‌ی عمودی چگالی شار مغناطیسی در ارتفاع $z = -0.5\text{mm}$ درون رسانا برحسب فاصله از مبدأ.....	۹۸
شکل ۸-۵ نمودار صفحه‌ای تغییرات مقاومت ظاهری با افزایش بسامد.....	۹۹
شکل ۱-۶ نمای دوبعدی سیم‌پیچ دارای هسته‌ی I شکل تابع دلتا بالای صفحه‌ی رسانای دارای نقص زیرسطحی.....	۱۰۳
شکل ۲-۶ مقایسه‌ی توزیع جریان گردابی حاصل از دو روش TREE و شبیه‌سازی.....	۱۱۱
شکل ۳-۶ نمودار پربندی توزیع چگالی جریان گردابی القایی برای سیم‌پیچ بدون هسته.....	۱۱۲
شکل ۴-۶ نمودار پربندی توزیع چگالی جریان گردابی القایی برای سیم‌پیچ دارای هسته I شکل.....	۱۱۲
شکل ۵-۶ نمودار مقایسه‌ی میزان چگالی جریان گردابی القا شده در دو حالت سیم‌پیچ بدون هسته و سیم‌پیچ دارای هسته‌ی I شکل.....	۱۱۳

مقدمه

در این پایان‌نامه حل تحلیلی و مدل‌سازی مسائل مربوط به یکی از روش‌های آزمون غیرمخرب^۱ بررسی خواهد شد. آزمون غیرمخرب به معنای استفاده از تکنیک‌های غیرتهاجمی به منظور بررسی بی‌عیب و نقص بودن یک ماده، ساختار و یا اندازه‌گیری کمی برخی از ویژگی‌های یک ماده، بدون تأثیرگذاری بر کارکرد آتی آن ماده می‌باشد.

هر قطعه هنگام تولید (تست مواد و قطعات اولیه) پس از گذراندن تمامی مراحل تولید و با در نظر گرفتن زمانی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیازمند کنترل و بررسی کیفی می‌باشد، تا در صورت بروز هرگونه عیب و نقص، از چرخه‌ی تولید و یا مصرف کنار گذاشته شود.

به عنوان مثال، قطعات مختلف یک هواپیما مانند بدنه، دماغه، بال‌ها و ... به دلیل حساسیت بالایی که دارند نیازمند بازرسی مداوم در مراحل تولید و مصرف می‌باشند. واضح است اگر تمامی تست‌ها و کنترل‌ها از مراحل ابتدایی ساخت تا مراحل تکمیل هواپیما به درستی صورت نگیرد، می‌تواند آثار مخرب جانی و مالی بالایی داشته باشد. همین مسئله در مورد خطوط زیرزمینی، مخازن تحت فشار نفت و گاز، خطوط لوله صنعتی، ساختارهای بتنی، کابل‌های تحت کشش و هر صنعت دیگری صادق است و کاربرد دارد.

در واقع اگر بخواهیم آزمون‌های غیرمخرب را در یک جمله خلاصه کنیم می‌توان گفت، این آزمون‌ها مجموعه روش‌هایی هستند که متخصصین را در دستیابی به یک محصول ایمن و قابل اطمینان یاری می‌کند.

آزمون‌های غیرمخرب چندین دهه است که در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. اشعه ایکس در سال ۱۸۹۵ میلادی توسط پرفسور ویلیام کونراد رونگن^۲ استاد دانشگاه ورزبرگ آلمان^۳ ابداع و مورد استفاده قرار گرفت. کمی بعد از این کشف، وی اولین عکس رادیویی صنعتی را زمانی که از یک سری وزنه داخل جعبه عکس‌برداری می‌کرد، ارائه داد [۱].

^۱Nondestructive Testing

^۲Prof. Wilhelm Conrad Rengen (1845-1923)

^۳Wuerburg University

دیگر روش‌های بازرسی همانند روش فراصوتی^۱ و جریان گردابی^۲ با پیشرفت سریع علم به سرعت گسترش و رواج پیدا کرد. همچنین در فضای جنگ جهانی موارد استفاده امنیتی و نظامی این آزمون‌ها نیز کاربرد بسیاری پیدا کرد.

در روزهای آغازین، هدف اصلی این آزمون، تنها یافتن نقص‌های موجود در قطعات مهم و کاربردی بود که با طول عمر معین و از پیش تعیین شده ساخته می‌شدند و همچنین نیازمند این بودند که در طول دوران استفاده بدون نقص باقی بمانند.

سیر تکاملی این آزمون با عواملی چون نگرانی در مورد امنیت سیستم‌ها، کاهش فاکتورهای امنیتی، گسترش موارد جدیدتر و تلاش برای بالا بردن کیفیت مواد و قطعات مرتبط می‌باشد.

آزمون‌های غیرمخرب زمینه‌ی بسیار وسیع میان‌رشته‌ای^۳ است و با توجه به آنچه گفته شد کاربرد وسیعی در برآورد عمر مفید ماشین‌آلات و تجهیزات کارخانه‌ای و نیز بازرسی ساختارهای فلزی همچون بازرسی لوله‌ها، خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز، مولدهای بخار، توربین‌ها و ساختارهای بتنی دارند.

در این پایان‌نامه، روش به‌کاربرده شده، آزمون جریان گردابی^۴ می‌باشد که در آن همچون تمامی روش‌های دیگر آزمون غیرمخرب، انرژی معینی به قطعات اعمال می‌شود، سپس برهم کنش میان انرژی و قطعه توسط حسگرهای آشکارساز نمایش داده می‌شود که داده‌های استخراج شده از آن‌ها حاوی پاسخ‌های مورد نظر متخصصین می‌باشد.

در این روش انرژی، میدان مغناطیسی متغیر با زمان می‌باشد ماده‌ی مورد بررسی نیز می‌بایست یک ماده‌ی رسانا باشد. مطابق اصل القای الکترومغناطیسی، جریان متناوب درون رسانا القا خواهد شد که جریان خود به تنهایی می‌تواند میدان مغناطیسی متغیر ثانویه‌ای به وجود آورد. در واقع هدف اصلی انجام این آزمون، آشکارسازی همین میدان مغناطیسی است زیرا حاوی اطلاعاتی راجع به خصوصیات الکترومغناطیسی و ابعادی قطعه‌ی مورد بازرسی و مهم‌تر از آن، حضور یا عدم حضور نقص در آن می‌باشد [۲].

¹Ultrasonic

²Eddy Current

³Interdisciplinary

⁴Eddy Current Testing

اولین کاربرد رسمی جریان گردابی توسط دیوید هوگز^۱ در سال ۱۸۷۹ میلادی به منظور آزمون طبقه بندی مواد انجام شد [۳]. بررسی‌هایی برای پیکربندی حضور سیم‌پیچ بالای نیم‌فضای رسانا و سیم‌پیچی که میله‌ی نامتناهی را احاطه کرده، با فرض سیم‌پیچ به صورت دو قطبی مغناطیسی نیز انجام شده است [۴]، [۵] و [۶]. همچنین توزیع جریان گردابی در فلزات برای سیم‌پیچ نامتناهی در مرجع [۱] ارائه گردید. وایدلیچ^۲ و رنکن^۳ برای اولین بار به بررسی امیدانس سیم‌پیچ با استفاده از روش تصویربرداری پرداختند و نتایج تئوری آن‌ها برای محدوده‌ی فرکانس‌های نسبتاً بالا، خوب بود [۷]. تحلیل انتگرالی سیم‌پیچ دارای هسته‌ی فریت c شکل با فرض جفت‌شدگی شار میدان و رسانا و تطابق نتایج با اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است [۸]. در مدل معروف Dodd and Deeds [۹] که در سال ۱۹۶۸ انتشار یافت، دو مسئله‌ی تقارن محوری جریان گردابی برای پیکربندی شامل سیم‌پیچ دایره‌ای با سطح مقطع مستطیلی به همراه سیم‌پیچی که میله‌ی رسانای استوانه‌ای نامتناهی را احاطه کرده بود، در نظر گرفته شده است. در این بررسی نظریه‌ای برای محاسبه‌ی پتانسیل برداری مغناطیسی سیم‌پیچ معرفی شده و راه حل مورد استفاده به صورت انتگرال‌هایی در قالب توابع بسل می‌باشد. همچنین در بررسی انجام شده توسط پروب داهله^۴ [۱۰]، برهم‌کنش میان نقص در رسانا و توزیع جریان گردابی با استفاده از یک جفت جریان دایره‌ای مدل‌سازی شده است.

در این پایان‌نامه، مدل‌سازی مسائل مربوط به جریان گردابی، با استفاده از یک روش شبه تحلیلی^۵ به صورت ویژه‌توابع روی فضای کوتاه شده^۶ (TREE Method) صورت گرفته است. بررسی و آشکارسازی نقایص زیرسطحی موجود در قطعات رسانا و بهینه‌سازی این آشکارسازی با به کارگیری هسته‌ی "I" شکل در پروب^۷ آزمون، از اهداف اصلی نگارش این پایان‌نامه می‌باشد.

در این پایان‌نامه ابتدا در مورد فیزیک جریان‌های گردابی و تاریخچه‌ی مربوط به این پدیده، مطالبی آورده شده است.

¹D.E. Hughes

² Waidelich

³ Renken

⁴ Dahle-Probe

⁵ Quasi-Analytical

⁶ Truncated Region Eigenfunction Expansion Method

⁷ Probe

در فصل دوم آزمون‌های غیرمخرب و چندین روش متداول انجام این گونه آزمون‌ها معرفی شده‌اند. در انتهای همین فصل، کاربرد پدیده‌ی جریان گردابی در انجام این گونه بازرسی‌ها شرح داده شده است.

در فصل سوم، مسائل تقارن محوری موجود در حوزه‌ی جریان گردابی را مدل‌سازی کرده و با توجه به مورد نیاز بودن پتانسیل برداری در حل مسائل، استخراج معادله‌ی حاکم بر پتانسیل برداری را با استفاده از روابط الکترومغناطیسی خواهیم داشت و آن را پایه‌ی حل تمامی مسائل خود قرار می‌دهیم. در ابتدا مسئله‌ی مربوط به یک سیم‌پیچ مجزا و دور از هر گونه رسانایی را مورد بررسی قرار داده، سپس به حل مسئله‌ی سیم‌پیچ دارای جریان متغیر سینوسی واقع در بالای نیم فضای رسانای بدون نقص می‌پردازیم.

از آنجائیکه هدف اصلی این پایان‌نامه تحلیل مسائل شامل مرزهای عمودی است، در فصل چهارم ابتدا به طرح مسئله‌ی سیم‌پیچ حامل جریان واقع در بالای صفحه‌ی رسانای دارای نقص پرداخته و ناکارآمد بودن روش انتگرالی که در فصل قبل به کار گرفته شده بود را برای حل چنین مسائلی به اثبات می‌رسانیم. سپس به معرفی روش شبه تحلیلی بسط ویژه توابع روی نواحی قطع شده پرداخته و مثالی را که در فصل سوم با روش انتگرالی حل کردیم، مجدداً با این روش مورد بررسی قرار خواهیم داد.

در فصل پنجم مسئله‌ی حضور سیم‌پیچ بدون هسته‌ی واقع در بالای صفحه‌ی چند لایه‌ای رسانای دارای نقص زیرسطحی را با روش بسط ویژه توابع حل کرده و به محاسبه‌ی پارامترهای موردنظر از قبیل چگالی جریان گردابی القایی، مؤلفه‌های چگالی شار مغناطیسی و مقاومت ظاهری می‌پردازیم. در انتها نمودار پاسخ‌های حاصل از محاسبات تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی عددی این مسئله در نرم‌افزار COMSOL را با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد.

در فصل ششم، به منظور افزایش چگالی جریان القایی، همان مثال فصل چهارم را با اضافه کردن یک هسته‌ی فریت مجدداً بررسی کرده و به مقایسه‌ی چگالی جریان القا شده در این حالت و حالت سیم‌پیچ بدون هسته خواهیم پرداخت.

فصل ۱ - فیزیک جریان‌های گردابی

۱-۱- تاریخچه

آزمون جریان گردابی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های آزمون غیرمخرب است. چند دهه‌ی آخر قرن بیستم بود که روش جریان گردابی پتانسیل واقعی خود را در عرصه‌ی آزمون‌های غیرمخرب در معرض نمایش قرار داد. از آنجایی که قابل حمل و نقل بودن تجهیزات آزمون فراصوتی از سال ۱۹۶۰ تطبیق-پذیری قابل توجهی را در اختیار افراد قرار داد، به همین دلیل آزمون جریان گردابی علیرغم اینکه در مقایسه با آزمون فراصوتی جابه‌جاپذیری قابل توجهی را داشت، در سال ۱۹۸۰ مورد توجه قرار گرفت. دلیل دیگر این مسئله آشنا نبودن متخصصین آزمون‌های غیرمخرب با روش جریان گردابی تا پیش از این بود.

توسعه‌ی روش جریان گردابی بر پایه‌ی کشف‌هایی که در درباره‌ی ارتباط بین الکتریسیته و مغناطیس در اوایل قرن نوزدهم شد، بنا نهاده شده است. در سال ۱۸۲۰، اصول مغناطیسی مرتبط با این روش در حین آزمایشی که در واقع همان آزمون جریان گردابی بود، کشف شد. هانس کریستین اورستد^۱ دانمارکی، به طور ناگهانی پدیده‌ی الکترومغناطیس را کشف کرد. در واقع او کشف کرد که جریان الکتریکی که درون یک رسانا جریان می‌یابد، باعث بوجود آمدن یک میدان مغناطیسی پیرامون رسانا می‌گردد. او در حالی این اصل را کشف کرد که طی آزمایشی قصد داشت نشان دهد جریان گذرا از یک سیم، باعث افزایش دمای آن می‌گردد. در همین حین اورستد متوجه شد زمانی که جریان از سیم عبور می‌کرد سوزن قطب‌نمای مغناطیسی‌اش در راستای عمود بر سیم منحرف می‌شود.

پدیده‌ی الکترومغناطیس در واقع همان اصلی است که سیم‌پیچ‌های جریان گردابی آن را بوجود می‌آورند. در سال ۱۸۳۱ مایکل فارادی^۲ بریتانیایی و تقریباً همزمان با او جوزف هنری^۳ نیز این اصل را کشف کرد. اصلی که بیان می‌کند زمانیکه میدان مغناطیسی متغیر سیم‌پیچی در نزدیکی رسانای آزمون قرار می‌گیرد، ولتاژ القا شده در رسانا، جریانی را درون آن القا می‌کند که به دلیل گردابی شکل بودنش، نام

¹ Hans Christian Oersted

² Michael Faraday

³ Josef Henry

جریان گردابی را بر آن نهادند. سه سال بعد، هاینریش لنز^۱ قانون لنز^۲ را بیان نمود. این قانون مبنی بر این است که این جریان گردابی میدان ثانویه‌ای را در جهت تضعیف میدان اولیه‌ای که موجب به وجود آمدن آن شده بود، تولید می‌کند. بنابراین می‌توان تئوری که سلسله رویدادهای اتفاق افتاده در آزمون جریان گردابی را بیان می‌کنند، بر اساس یافته‌های اورستد، فارادی، هنری و لنز توصیف کرد. اما وجود خود جریان‌های گردابی تا سال ۱۸۶۴ توسط جیمز ماکسول^۳ کشف نشد.

در اواخر سال ۱۹۴۰، دکتر فورستر^۴ موسسه‌ای را برای توسعه و بازاریابی عملی ابزارآلات آزمون جریان گردابی بنا کرد و موجب پیشرفت و توسعه‌ی این تکنیک شد. دو کمک عمده‌ای که فورستر در این زمینه کرد عبارتند از گسترش استفاده از نمایش نمودار مقاومت ظاهری^۵ که در برقراری ارتباط میان اطلاعات آزمون و یافته‌های حاصل از قوانین مشابه، برای اپراتور مفید بوده و به او کمک می‌کند تا همان عملیات را برای شرایط متفاوت دیگری تکرار نماید و دیگری چند بسامدی کردن آزمون است که با توجه به این مهم، استفاده از سیم‌پیچ آزمون در بسامدهای مختلف، به غلبه بر آنچه پیش‌تر محدودیت اصلی این روش محسوب می‌شد، کمک خواهد کرد، چرا که قبلاً تنها یک سیگنال نمایش داده می‌شد که تفسیر آن بسیار مشکل بود.

بنابراین آزمون بسامد چندگانه می‌تواند آزمون جریان گردابی را برای عملکرد عادی متغیرهای ناسازگاری مانند حساسیت و نفوذ، بهینه‌سازی نماید. همچنین گسترش ابزارهای جریان گردابی مبتنی بر ریزپردازنده‌ها از اواسط دهه‌ی ۸۰ میلادی به واسطه‌ی افزایش قابلیت ضبط و ارائه‌ی ماهرانه‌ی تحلیل سیگنال، موجب بهبود کارایی این روش شده و به سیگنال‌هایی با بسامد چندگانه اجازه‌ی در هم‌آمیختگی خودکار را داده است [۱۱].

¹ Heinrich Lenz

² Lenz's Law

³ James Maxwell

⁴ Friedrich Foerster

⁵ Impedance Plane display

۱-۲- آشنایی با جریان گردابی

نظریه‌ی کلی جریان گردابی بر پایه‌ی اصول الکتریسته، مغناطیس و خصوصاً اصول القای جریان متغیر بنا نهاده شده است. همانطور که اشاره شد، الکترومغناطیس پدیده‌ای است که در آن عبور الکترون‌ها درون یک رسانا موجب به وجود آمدن میدان مغناطیسی پیرامون آن رسانا می‌شود. این میدان را می‌توان توسط پیچیدن یک سیم‌پیچ^۱ به دور یک رسانا تولید کرد. سیم‌پیچی که به عنوان یک آهنربای الکتریکی^۲ در نظر گرفته می‌شود، سولنوئید^۳ نامیده می‌شود که میدان مغناطیسی را درون سیم‌پیچ ایجاد می‌کند.

اگر به این سیم‌پیچ جریان متناوب اعمال شود، میدان الکترومغناطیسی ایجاد شده نیز متناوب خواهد شد و سیم‌پیچ، پدیده‌ای را نشان می‌دهد که ضریب خودالقای^۴ سیم‌پیچ (L) نام دارد و توانایی یک رسانا برای القای ولتاژ درون خود یا همسایگی‌اش، زمانی که جریان تغییر می‌کند را نشان می‌دهد [۱۲].

۱-۳- اصول فیزیکی جریان گردابی

اگر بخواهیم روند القا را بررسی کنیم می‌توان آن را به شرح زیر بیان کرد:

یک مولد جریان متناوب (AC)، ولتاژ متناوب را درون سیم‌پیچ القا می‌کند. یک بخش این ولتاژ V_r است که ولتاژ مقاومتی^۵ نامیده می‌شود که در واقع معرف نیروی لازم برای حرکت دادن جریان در مقابله با مقاومت سیم‌ها می‌باشد. این ولتاژ سبب بوجود آمدن جریان اصلی I_p درون سیم‌پیچ می‌گردد. جریان متناوب میدان مغناطیسی متغیر و یا به عبارتی صحیح‌تر، شار اولیه‌ی ϕ_p را درون سیم‌پیچ به وجود می‌آورد که با جریان و ولتاژ هم‌فاز است. از آنجاییکه سیم‌پیچ درون میدانی واقع شده که تغییر شار تأثیرش را روی سیم‌پیچ اعمال می‌کند، طبق قانون فارادی، القای الکترومغناطیسی درون سیم‌پیچ صورت گرفته و ϕ_p ولتاژ دیگری را القا می‌کند که ولتاژ بازگشتی^۶ V_L یا ولتاژ القایی^۷ نام دارد که به اندازه‌ی ۹۰ درجه با جریان سیم‌پیچ اختلاف فاز دارد و همین اختلاف فاز باعث می‌شود که تغییراتی در خلاف تغییرات جریان

¹ Coil

² Electromagnet

³ Solenoid

⁴ Inductance

⁵ Resistance Voltage

⁶ Back Voltage

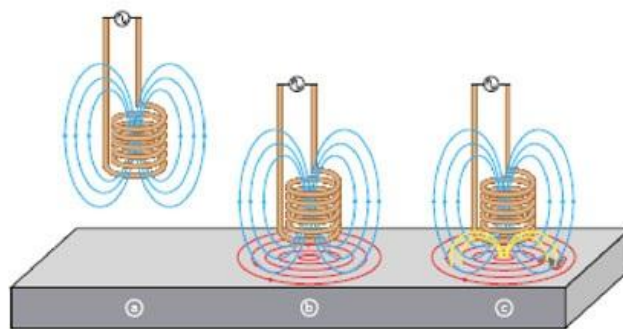
⁷ Induced Voltage

اعمال شود. این مقاومت در برابر جریان AC را مقاومت ظاهری القایی X_L می نامیم که در مقابل تغییر جریان ایستادگی می کند.

$$X_L = 2\pi fL \quad (1-1)$$

$$L = \mu_r \frac{N^2 \times A}{l} \times 1.26 \times 10^{-6} \quad (2-1)$$

که در عبارت بالا X_L مقاومت ظاهری القایی، f بسامد جریان اصلی، L ضریب خودالقای سیم پیچ، μ_r نفوذپذیری نسبی هسته ی سیم پیچ، N تعداد دورهای سیم، A سطح مقطع و l طول سیم پیچ است. لازم به ذکر است که 1.26×10^{-6} میزان نفوذپذیری هوا می باشد. قراردادن جریان ثانویه ای در نزدیکی جریان اصلی، موجب رخ دادن القای متقابل خواهد شد. ϕ_p ولتاژ ثانویه ای را که V_s نامیده می شود را القا خواهد کرد که 180° درجه با ϕ_p اختلاف فاز دارد. V_s موجب به وجود آمدن جریان هم فاز با خودش، I_s می شود. در یک آزمون جریان گردابی حقیقی، قطعه ی مورد آزمون همان محلی است که I_s به شکل جریان های گردابی در آن بوجود می آیند. در این مرحله مجدداً با توجه به قوانین الکترومغناطیسی، شار ثانویه ای به نام ϕ_s توسط جریان I_s و با فازی که با توجه به فاز I_s تعیین می گردد، ایجاد می شود که در واقع هدف از انجام آزمون جریان گردابی بررسی و تحلیل این شار و البته متغیرهای بدست آمده از آن می باشد [۱۱].



شکل ۱-۱ مراحل القای جریان گردابی درون یک رسانا

پدیده ی جریان گردابی و تمامی پدیده های الکترومغناطیسی مانند آن توسط قوانین ماکسول قابل توضیح هستند. سه معادله از این معادلات که مربوط به جریان گردابی هستند عبارتند از :