

بررسی پارامترهای طراحی پروپ های جریان گردابی با هدف عیب‌یابی غلاف سوخت هسته‌ای

هاچم بچاری، ایوب^(۱) - رکرک، بهروز^(۲) - مینوچهر، عبدالحمید^(۱) - اله‌یاری‌زاده، قاسم^(۱)

۱- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه چرخه سوخت

۲- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

چکیده:

بازرسی های غیر مخرب در صنعت هسته‌ای به منظور ایمن سازی این صنعت از اهمیت بسزایی برخوردار است. آزمون جریان گردابی به عنوان یکی از آزمون‌های غیر مخرب در حال پیشرفت است که طراحی و ساخت تجهیزات آن در داخل کشور جهت توسعه این آزمون حائز اهمیت است. در این مقاله پارامترهای طراحی پروپ جریان گردابی با هدف عیب‌یابی غلاف سوخت هسته‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد سیگنال خروجی دستگاه جریان گردابی در حالت دیفرانسیلی از پارامترهای ضخامت کویل، طول کویل، شعاع کویل و فاصله بین دو کویل جریان گردابی تاثیر می‌پذیرد و مقاومت ظاهری کویل در حالت دیفرانسیلی تأثیری بر روی سیگنال سیگنال خروجی ندارد.

کلمات کلیدی: آزمون جریان گردابی، ایمنی هسته‌ای، غلاف سوخت هسته‌ای، نرم افزار CST STUDIO SUITE

مقدمه:

آزمون‌های غیر مخرب به طور گسترده‌ای برای ارزیابی خواص مواد، بدون آسیب به ماده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمون جریان گردابی یکی از رایج ترین آزمون‌های تست غیر مخرب می‌باشد. این روش می‌تواند برای بازرسی از مواد رسانا مانند مس، زیرکونیوم و فولاد مورد استفاده قرار گیرد [۱]. آزمون جریان گردابی از روش‌هایی است که قابلیت آشکار سازی ترک‌ها و خوردگی‌های داخلی لوله را دارد و به طور گسترده‌ای در بازرسی در حین ساخت و در هنگام نگهداری استفاده می‌شود. مدل سازی آزمون جریان گردابی موجب بهبود بازرسی می‌شود [۲]. استفاده از روش‌های مدل سازی موجب درک درست از پدیده فیزیکی که در عمل رخ می‌دهد و همچنین بهبود اثرات آن در نتایج بررسی می‌شود [۳]. این روش‌ها در طراحی پروپ‌های جدید و صحت‌سنجی^۱ های بازرسی [۴] و تایید صلاحیت آزمون‌های غیر مخرب برای پوشش عوامل گوناگون (ابعاد، مواد قطعات، خطاهای پروپ و غیره) کمک می‌کنند و موجب کاهش تعداد آزمون‌ها مورد نیاز برای بازرسی می‌شوند [۵]. مدلسازی پشتیبانی مناسبی برای تفسیر

^۱ Benchmark

سیگنال های تولید شده در بازرسی های پیچیده است [۶]. اولین دستگاه جریان گردابی با هدف بازرسی غیرمخرب در سال ۱۹۴۲ ساخته شد. در دهه ۱۹۵۰ با توجه به نیاز صنایع هواپیمائی و هسته‌ای تکنیک ساخت دستگاه ها متحول گردید. پیشرفت قابل توجه تکنولوژی ساخت دستگاه های جریان گردابی زمانی رخ داد که بازرسی مبدلهای حرارتی در نیروگاه ها با مشکل روبرو گردید و در پی آن ساخت دستگاه ها با نوآوری بیشتری همراه بود [۷-۹]. تحقیقات فراوانی در این زمینه صورت گرفته است، که از جمله آن می توان به تحقیقات تدودیلیس^۲ و همکاران که به مطالعه اثر لبه^۳ در مجاورت لبه یک بلوک فلزی [۱۰] و کسای^۴ و همکاران که با اشباع مغناطیسی اثرات میدان مغناطیسی پسماند را حذف کردند [۱۱]، اشاره کرد. در این میان بازرسی های غیرمخرب جهت ایمنی هسته‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه به بررسی پارامترهای طراحی پروپ جریان گردابی از قبیل ضخامت کوئل، طول کوئل، شعاع کوئل و فاصله بین دو کوئل برای غلاف سوخت هسته‌ای پرداخته شده است.

تئوری و مدل:

برای مدل سازی غلاف سوخت زیرکونیومی و جریان های گردابی از ماژول میدان مغناطیسی نرم افزار CST STUDIO SUITE [۱۲] استفاده شده است. ماژول میدان مغناطیسی نرم افزار CST برای مدل کردن از توزیع میدان مغناطیسی و جریان القا شده در یک ماده رسانا استفاده می کند. توزیع میدان مغناطیسی و جریان القا شده بر اساس قوانین الکترومغناطیسی و معادلات کلی ماکسول بدست می آید این معادلات به شرح زیر می باشند [۱۳].

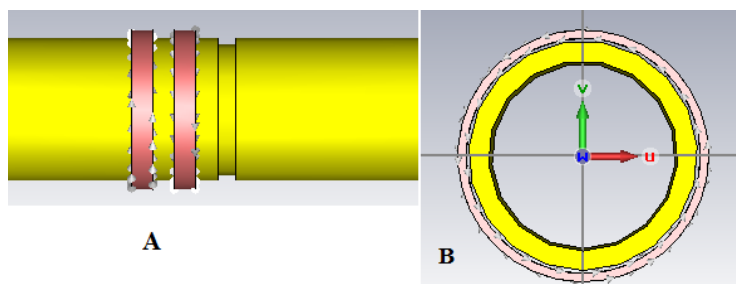
$$\text{رابطه ۱} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{و} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{و} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{و} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{j}$$

مدل سازی برای یک غلاف سوخت هسته‌ای و سیم پیچ محیطی انجام شده است. مشخصات غلاف در جدول ۱ ارائه شده است. هندسه کلی مدل به همراه پروپ جریان گردابی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

^۲ Theodoulidis

^۳ Edge effect

^۴ Kasai



شکل ۱: هندسه کلی مدل به همراه پروپ جریان گردابی

جدول ۱: مشخصات قطعه آزمون

ضریب رسانایی (S/m)	جنس لوله	قطر خارجی (mm)	قطر داخلی (mm)
$1,392 * E6 [14]$	Zircaloy-2	۱۲,۶	۱۰,۶

نتایج:

پارامترهای مختلفی در طراحی یک کویل جریان گردابی با هدف عیب یابی غلاف سوخت تاثیر دارند که می توان به موارد ضخامت سیم پیچ جریان گردابی، تعداد دور سیم پیچ، مقاومت ظاهری سیم پیچ، شعاع کویل جریان گردابی، طول کویل و فاصله بین دو سیم پیچ اشاره داشت. در این مطالعه به بررسی هر کدام از این پارامترها در عیب یابی یک ناپیوستگی ساختگی در غلاف سوخت پرداخته شده است.

۱. اثر ضخامت سیم پیچ

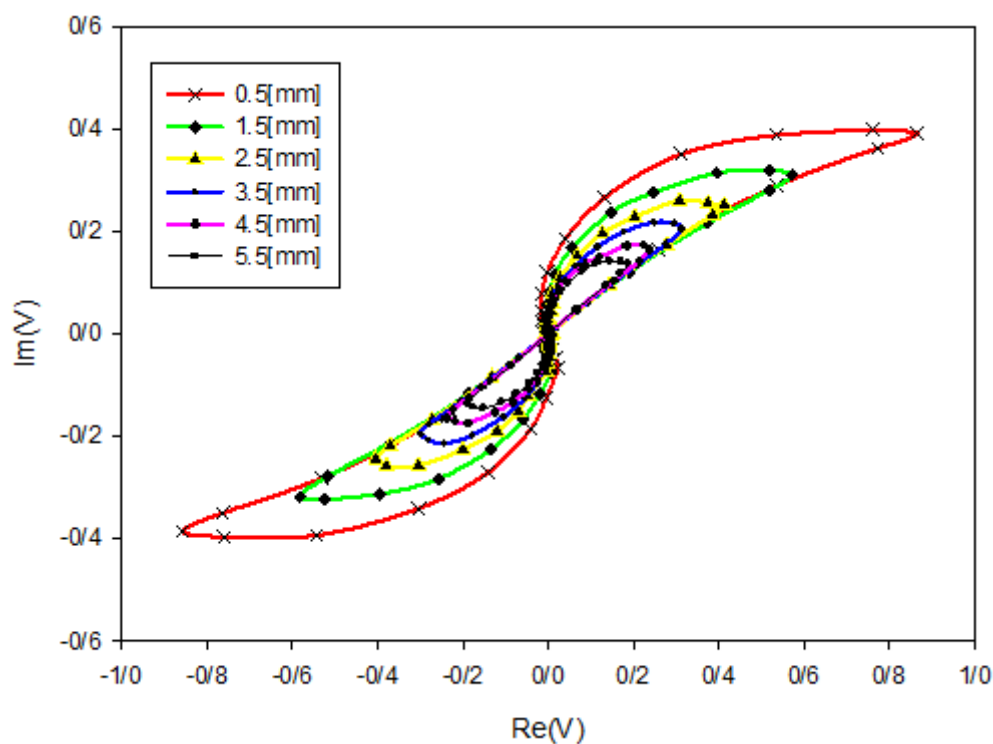
بر طبق نتایج بدست آمده از شبیه سازی های انجام شده کاهش ضخامت سیم پیچ سبب افزایش حساسیت کویل به ناپیوستگی های کوچک می شود، این اثر در شکل ۲ نشان داده شده است این نتایج با تغییر ضخامت کویل جریان گردابی از ۰,۵ میلیمتر تا ۵,۵ میلیمتر و ثابت نگاه داشتن پارامترهای دیگر بدست آمده است. در طراحی پروپ باید سعی شود که ضخامت سیم پیچ جریان حداقل باشد. این ضخامت از سطح مقطع سیم مورد استفاده تاثیر می پذیرد و بدان معناست که سطح مقطع سیم کوچکتر سبب ایجاد سیگنال مناسبتر می شود.

۲. اثر مقاومت ظاهری کویل

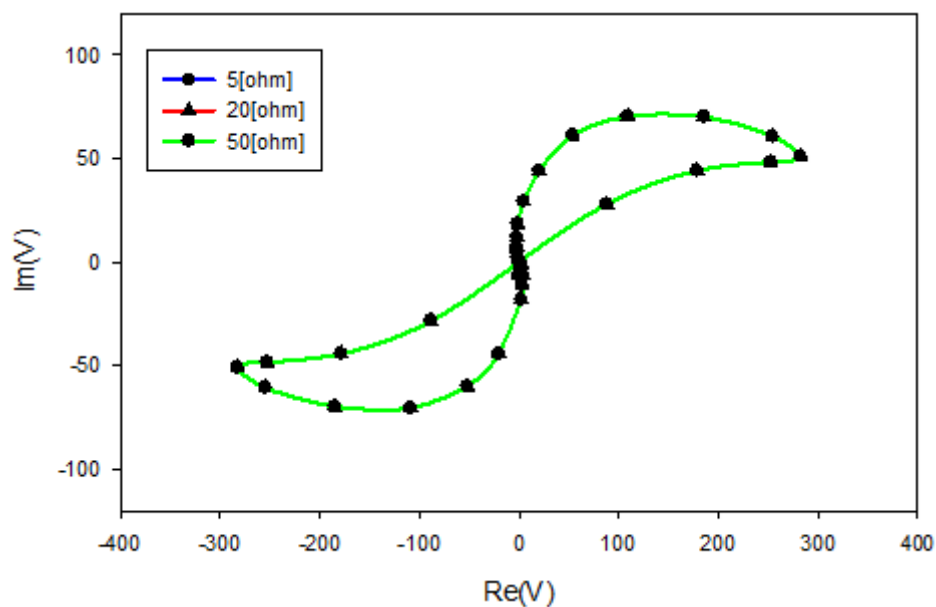
مقاومت ظاهری کویل نماینده ای از جنس سیم پیچ جریان گردابی است. بر طبق نتایج بدست آمده این مقاومت در کویل های مقایسه ای بی تاثیر است و کویل با هر مقاومتی نتایج یکسانی را به ما نمایش می دهد اما در حالت مطلق این وضعیت وجود ندارد و با تغییر این پارامتر نتایج دچار تغییر می شوند. به صورت کلی این مقاومت تنها در قسمت حقیقی امپدانس سیم پیچ تغییر ایجاد می کند و مقدار موهومی امپدانس با تغییر مقاومت ظاهری تغییرات محسوسی نمی کند. شکل ۳ نمونه ای از شبیه سازی های صورت گرفته را نمایش می دهد.

۳. اثر شعاع کویل جریان گردابی

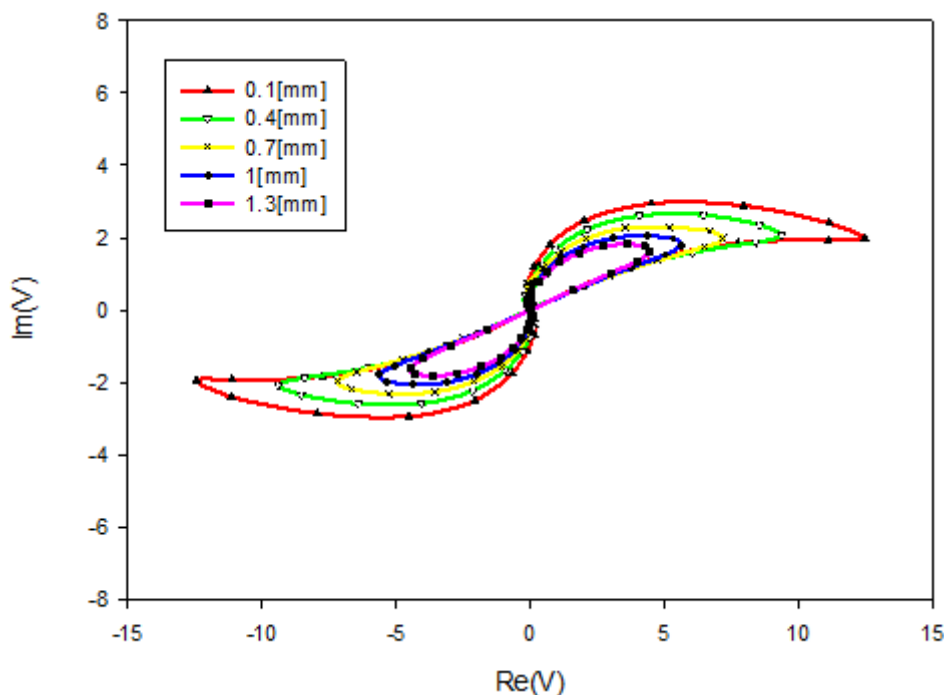
شعاع کویل جریان گردابی با توجه به شعاع لوله آزمون انتخاب می شود و سعی بر آن است که این شعاع با شعاع لوله آزمون مطابقت کند اما در بسیاری از بازرسی های تجربی این انطباق امکان ندارد در این مطالعه به بررسی این عدم ناهمگونی که اصطلاحاً به آن پدیده lift-off می گویند پرداخته می شود. در شبیه سازی های صورت گرفته فرض بر هم مرکز بودن لوله آزمون و کویل جریان گردابی قرار دارد. نتایج نشان می دهد انطباق قطر کویل و لوله آزمون سبب افزایش حساسیت دستگاه به عیوب لوله آزمون می شود. این پدیده سبب کاهش مقدار حقیقی سیگنال خروجی می شود که خود سبب کاهش نسبت مقدار حقیقی به موهومی سیگنال می شود. این نسبت در انتخاب فرکانس مناسب بازرسی حائز اهمیت است.



شکل ۲: اثر ضخامت سیم پیچ بر روی حساسیت کویل به ناپیوستگی‌ها



شکل ۳: تاثیر مقاومت ظاهری بر حساسیت کویل به ناپیوستگی‌ها



شکل ۴: اثر شعاع کویل جریان گردابی بر حساسیت کویل به ناپیوستگی‌ها

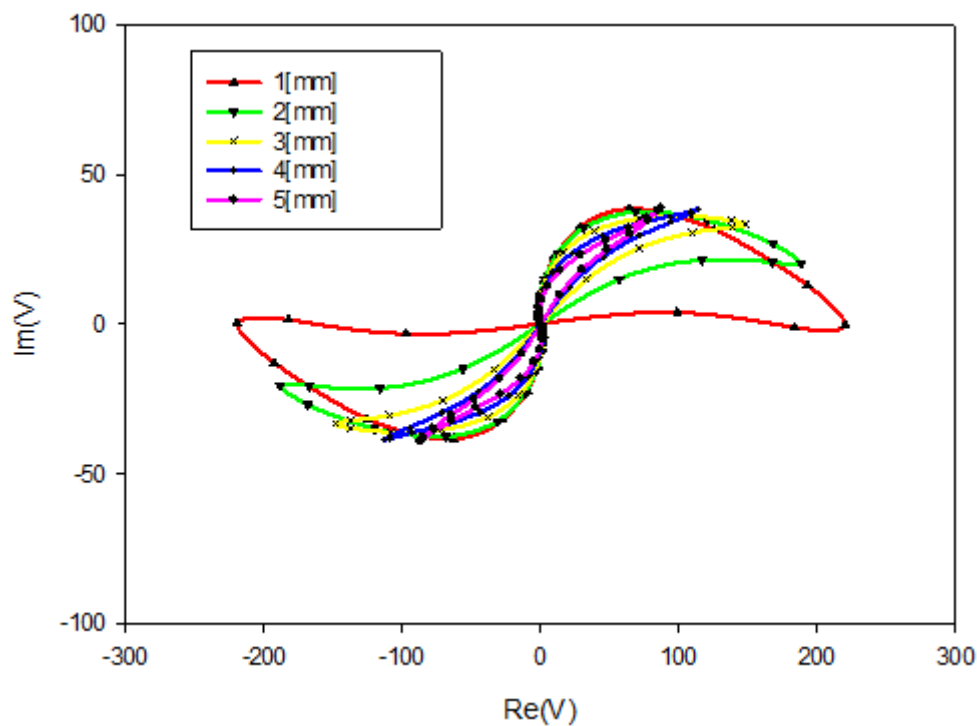
۴. اثر طول کویل

افزایش طول کویل باعث کاهش حساسیت سیستم می‌شود و عیوب ریز بر روی قطعه آزمون را مخفی نگه می‌دارد. با توجه به نتایج که در شکل ۵ ارائه شده است افزایش طول کویل باعث تغییر فاز سیگنال خروجی می‌شود و سیگنال از فاز صفر به سمت فاز نود درجه تغییر مکان می‌دهد این تغییر فاز نتایج برای تشخیص نوع عیب بسیار حائز اهمیت است، لذا طول کویل باید بنحوی انتخاب شود که اثرات تغییر فاز قابل مشاهده باشد و از سوی دیگر سیگنال حساسیت لازم را برای تشخیص عیوب کوچک نگه داشته باشد. در واقع حساسیت لازم موجب تشخیص عیوب داخلی از عیوب خارجی نیز خواهد شد.

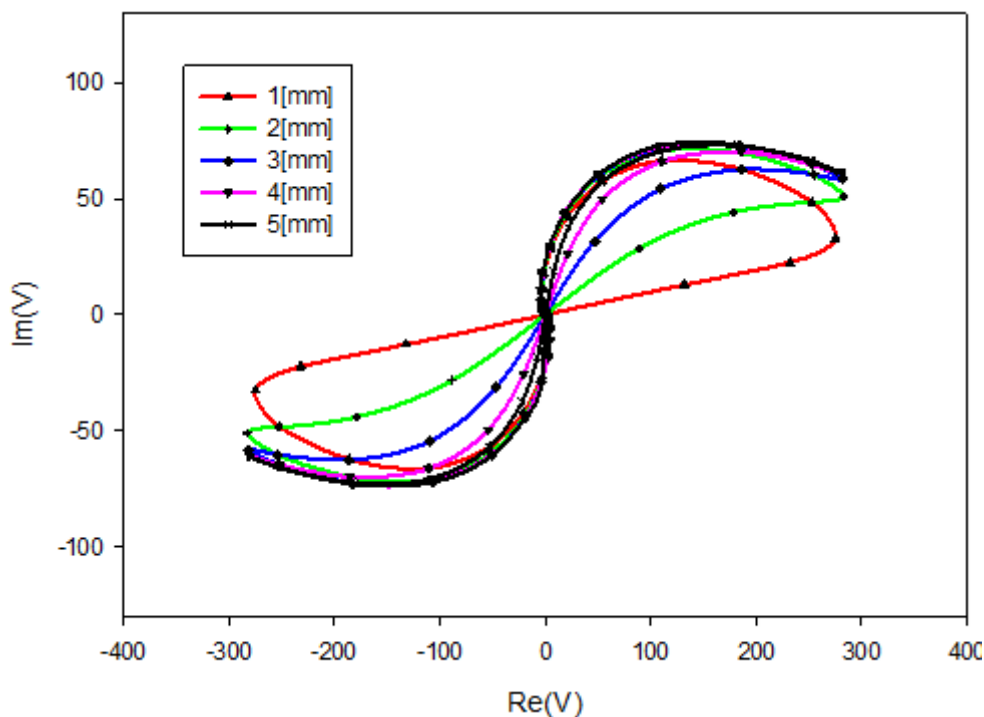
۵. اثر فاصله بین دو سیم پیچ

افزایش فاصله بین حلقه‌های کویل جریان گردابی سبب خطی شدن سیگنال به وجود آمده در دستگاه می‌شود. این افزایش فاصله، سبب می‌شود سیگنال از حالت مقایسه‌ای به دو سیگنال مطلق تبدیل شود که بر خلاف جهت هم قرار دارند. نتایج شبیه‌سازی برای فاصله‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد زمانی که فاصله کویل‌ها از یکدیگر به ۵ میلی‌متر برسد سیگنال‌های دو کویل مستقل از هم می‌شوند و مانند سیگنال مطلق

که از یک کویل گرفته می شود خواهند شد، با این تفاوت که نقطه شروع این سیگنال در مبدا مختصات است ولی سیگنال مطلق چنین خاصیتی ندارد.



شکل ۵: اثر طول کویل جریان گردابی



شکل ۶: اثر فاصله بین سیم پیچ های جریان گردابی

نتیجه گیری:

پارامترهای طراحی پروپ جریان گردابی از قبیل ضخامت سیم پیچ جریان گردابی، مقاومت ظاهری سیم پیچ، شعاع کویل جریان گردابی طول کویل و فاصله بین دو سیم پیچ برای غلاف سوخت هسته‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. از نتایج استنتاج می‌شود که ضخامت سیم پیچ کوچکتر سبب ایجاد سیگنال خروجی مناسبتر برای عیب یابی غلاف می‌شود، مقاومت ظاهری کویل در پروپ مقایسه ای تفاوتی ایجاد نمی‌کند، فاصله گرفتن پروپ موجب کاهش حساسیت و کاهش نسبت مقدار حقیقی به موهومی سیگنال خروجی می‌شود، و همچنین طول کویل و فاصله بین دو سیم پیچ برای عیب یابی غلاف مقادیر بهینه‌ای دارند که در حدود ۲ میلیمتر برآورد می‌شود.

منابع:

- ۱) Janousek, L., et al., *Multiprobe inspection for enhancing sizing ability in eddy current nondestructive testing*. IEEE Transactions on Magnetics, 2008. **44**(6): p. 1618-1621.
- ۲) Pichenot, G. and T. Sollier, *Eddy Current Modelling For Nondestructive Testing*. Journal of Nondestructive Testing, 2003. **8**(6): p. 1-5.

۳. de Barmon, B., G. Berthiau, and J. Juillard, *MESSINE: Models for Electromagnetic Simplified Simulation in Nondestructive Evaluation*. Electromagnetic non destructive evaluation (IV), vol, 2000. 1 :۶p. 50-7.
۴. Bisiaux, B., L. Maurice, and S. Paillard, *Comparison Of Two Eddy Current Simulation Methods In Steel Pipes*. 2013, ICNDE.
۵. Mayos, M., et al. *The use of modelling in support of the qualification of NDE application*. in *4 th International Conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components*. 2004.
۶. Fidahoussen, A., et al. *Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data*. in *Aip Conference Proceedings*. 2010.
۷. <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/intro/history/>
۸. Morozov, M., et al., *Numerical models of volumetric insulating cracks in eddy-current testing with experimental validation*. IEEE transactions on magnetics, 200 .۶ : (۵)۴۲ p. 1568-1576.
۹. Förster, F., *Sensitive eddy-current testing of tubes for defects on the inner and outer surfaces*. Non-Destructive Testing, 1974. 7(1): p. 28-36.
۱۰. Theodoulidis, T. and J.R. Bowler, *Interaction of an eddy-current coil with a right-angled conductive wedge*. IEEE Transactions on Magnetics, 2010. 46(4): p. 1034-1042.
۱۱. Kasai, N., et al., *Detection of carburization in ethylene pyrolysis furnace tubes by a C core probe with magnetization*. Journal of Nondestructive Evaluation, 2010 : (۳)۲۹ .p. 175-180.
۱۲. SUITE, C.S., *CST STUDIO SUITE User's Guide*, 2015, Editor.
۱۳. Biro, O. and K. Preis, *On the use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents*. IEEE Transactions on magnetics, 198 .۹ : (۴)۲۵ p. 3145-3159.
۱۴. par courant de Foucault, E., *EDDY CURRENT TESTING MANUAL ON EDDY CURRENT METHOD*. 1981.