

بکارگیری میدان الکترومغناطیسی در ارزیابی غیر مخرب فلزات فرو مغناطیسی

سیدحسین (حسام الدین) صادقی

استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

اخیراً، روش جدیدی برای کشف و اندازه گیری شکافهای سطحی در فلزات فرومغناطیسی ارائه کرده ایم. در این روش ابتدا توسط یک جفت سیم یا شکل U یا یک سیم بیج مربعی شکل حامل جریان متناوب با فرکانس مناسب، جریان های گردابی در سطح فلز مورد آزمایش بوجود می آوریم. سپس با استفاده از یک سنسور مغناطیسی که در نزدیکی سطح فلز و در جهت مناسبی قرار داده شده است، تغییرات در میدان القایی اندازه گیری و آنالیز می شود. در این مقاله، کارآیی روش مذکور با ارائه سیگنالهای تئوریک و عملی خروجی سنسور مغناطیسی به هنگام بازرسی شکافهای طولی ناشی از خستگی در یک بلوک فلزی از جنس آهن نرم، مورد ارزیابی قرار می گیرد. نشان خواهیم داد در محل شکاف، مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی دارای جهش بوده که از آن می توان در تشخیص و اندازه گیری شکاف استفاده نمود. ضمناً فرآیند اندازه گیری شکاف ساده بوده و نیازی به کالیبراسیون دستگاه نمی باشد.

Non-Destructive Evaluation of Ferrous Metals Using an Electromagnetic Field

S. H. H. Sadeghi

Assist. Prof. of Electrical Eng. Dept.
Amirkabir University of Technology

Abstract:

Recently, we have developed a new technique for detection and sizing of surface-breaking cracks in ferrous metal. In this technique, eddy-currents are produced at the surface of the specimen by a pair of U-shaped wires or a rectangular coil carrying an ac current of sufficiently high frequency. The perturbations due to a crack in the induced surface field is then analyzed using a properly oriented magnetic field sensor, placed at a close proximity of the metal surface. In this article, the performance of the technique is evaluated by presenting the theoretical and experimental output signals of the sensor when scanning long fatigue cracks in a mild steel block. It is shown that at the edges of a crack, a discontinuity in the tangential component of the surface magnetic field is produced by which the crack can be detected and sized. Also, the sizing process is simple and is performed without resorting to any calibration procedure.

قوت مربوط به خود برخوردارند، لذا شناخت موارد استعمال هر یک از روشهای مذکور جهت استفاده صحیح از امکانات موجود ضروری می باشد.

روشهای الکترومغناطیسی به طور گسترده در آزمونهای غیر مخرب سازه های فلزی بکار می روند. در این روشها، هدف برقراری یک میدان الکترومغناطیسی در فلز مورد آزمایش و سپس اندازه گیری تغییرات در میدان ناشی از وجود عیوب احتمالی می باشد که معمولاً توسط یک سنسور (sensor) مناسب انجام می گیرد. روشهای جریان گردابی [۲] (Eddy Current) و اختلاف پتانسیل [۳] (Potential Difference) از جمله روشهای معمول در بررسی غیر مخرب الکترومغناطیسی می باشند. در روش جریان گردابی ابتدا توسط یک سیم پیچ حامل جریان متناوب با توجه به قوانین فاراژه و اهم، جریانهای القایی موسوم به جریانهای گردابی در فلز بوجود می آیند، سپس چنانچه فلز مورد نظر دارای عیب باشد، توزیع جریانهای گردابی تغییر کرده و باعث تغییرات در امپدانس سیم پیچ جریان می شود. لذا با اندازه گیری و مطالعه تغییرات امپدانس سیم پیچ می توان عیب مربوطه را تشخیص و اندازه آن را تعیین نمود. یکی از مشکلات موجود در روش جریان گردابی، نیاز به کالیبره کردن دستگاه مربوطه و همین طور نمونه های استاندارد برای تعبیر سیگنالهای دریافتی به هنگام کار می باشد. شایان ذکر است نمونه های استاندارد دارای عیوب با ابعاد مشخص هستند تا بتوان با مطالعه سیگنالهای خروجی دستگاه در کشف و اندازه گیری این عیوب، دستگاه مورد نظر را ارزیابی نمود. نتایج حاصل از این مطالعات به عنوان راهنما در شرایط واقعی کار که ابعاد عیب مشخص نیست بکار گرفته خواهند شد، لذا برای استفاده صحیح از یک دستگاه جریان گردابی، وجود اپراتور متخصص و با تجربه کافی برای تعبیر سیگنالهای دریافتی نقش مهمی را ایفا می کند.

مشکلات ذکر شده بالا، در روش اختلاف پتانسیل وجود ندارند. در این روش، فلز مورد نظر ابتدا به یک منبع جریان دائم یا متناوب با فرکانس مناسب وصل می شود، سپس تغییرات در اختلاف پتانسیل الکتریکی در نقاط مختلف سطح فلز توسط یک پروب تماسی (Contacting Probe) متشکل از دو هادی اندازه گیری بررسی خواهد گردید. می توان نشان داد در صورت وجود یک شکاف سطحی (Sur-face-Breaking Crack) در فلز، سیگنال دریافتی در خروجی پروب دارای یک جهش ناگهانی خواهد بود. با اندازه گیری

آزمونهای غیر مخرب (Nondestructive Testing) مجموعه روشهایی هستند که برای بازرسی قطعات و مواد حصول اطمینان از عدم وجود عیوب ساختاری در آنها بکار می روند. نحوه انجام این آزمونها به گونه ای است که خللی در ساختار فیزیکی قطعه تحت آزمایش بوجود نمی آید. آزمونهای غیر مخرب از نیازهای اولیه صنایع بوده و نقش پایه ای و کلیدی در بسیاری از صنایع کوچک و بزرگ ایفا می کنند.

کاربرد آزمونهای غیر مخرب تنها به بازرسی قطعات تولیدی محدود نمی شود، بلکه برای تست واحدهای مختلف هر مجتمع صنعتی به هنگام کار نیز الزامی است. گسترش کاربرد این آزمونها به حدی است که از کوچکترین کارگاه ریخته گری تا بزرگترین مراکز صنعتی نظیر نیروگاه های برق، تأسیسات نفتی، پتروشیمی و فولادسازی و بسیاری از واحدهای سرویس دهنده نظیر شرکت های هواپیمایی، راه آهن، کشتیرانی و غیره را در بر می گیرد.

امروزه نیاز به آزمونهای غیرمخرب به علت مطرح شدن مفاهیم نوین کنترل کیفی (Quality Control) و کیفیت اطمینان (Quality Assurance) در صنایع، ابعاد تازه ای گرفته است. این نیاز نه تنها به لحاظ اقتصادی در جهت کاهش مخارج و قیمت تمام شده یک قطعه مهم می باشد، بلکه به جهت جلوگیری از خطرات بالقوه از بکارگیری سازه های عیب دار نقش اساسی را ایفا می نماید. در این باره می توان به اهمیت تشخیص شکافهای ریز غیرقابل رویت در ژنراتور یک نیروگاه هسته ای و وقوع حوادث ناگوار و جبران ناپذیر ناشی از آن اشاره نمود.

اساساً نمی توان مرز مشخصی در پیدایش روشهای گوناگون آزمون غیرمخرب تعیین نمود. به عنوان مثال، روش بسیار ساده بازبینی چشمی (Visual Inspection) و روش بسیار پیچیده نویز بارکها وزن (Barkhausen Noise) هر دو از روشهای آزمون غیر مخرب محسوب می گردند. معهداً آن دسته از روشهایی که به طور معمول در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند را می توان به ۵ گروه بزرگ تقسیم نمود [۱]. این گروه ها عبارتند از روشهای مایعات نفوذی (Liquid Penetrant)، شار مغناطیسی نشستی (Magnetic Flux Leak)، اولتراسوند (Ultrasonic Radiography)، رادیوگرافی (Radiography)، الکترومغناطیسی (Electromagnetic). به طور کلی، این روشها از یک سری نقاط ضعف و یک سری نقاط

مقدار این جهش نه تنها می توان وجود شکاف مربوطه بلکه عمق و طول آن را بدون احتیاج به کالیبره کردن دستگاه یا بلوکهای استاندارد تعیین نمود.

علی رغم سادگی تعبیر سیگنالهای دریافتی در روش اختلاف پتانسیل، نیاز به برقراری یک اتصال کامل الکتریکی بین دو هادی اندازه گیر و سطح فلز باعث مشکلاتی در عمل خواهد شد. به عنوان مثال اگر چنانچه سطح فلز با عایق (مانند رنگ) پوشیده باشد، این روش قابل استفاده نخواهد بود. برای همین منظور قبل از بکارگیری این روش، سطح فلز بایستی کاملاً از لحاظ الکتریکی تمیز شده باشد. نکته قابل توجه دیگر، نحوه برقراری جریان الکتریکی در فلز می باشد که معمولاً با اتصال مستقیم به منبع جریان انجام می گیرد. در حقیقت به علت پیدایش جرقه های الکتریکی ناشی از اتصال کابل های جریان با فلز در عمل، ممکن است باعث حوادثی از قبیل ایجاد انفجار در بازبینی لوله های گاز و نفت شود. ضمناً وجود کابل های جریان، که در نزدیکی قطعه تحت آزمایش قرار دارند، ممکن است باعث تغییرات در میدان الکترومغناطیسی در سطح فلز شود که بالطبع نتایج اندازه گیری را دچار خطا خواهد کرد.

اخیراً یک روش جدید غیر مخرب که براساس میدانهای الکترومغناطیسی عمل می کند پیشنهاد کرده ایم که برای پیدا کردن و اندازه گیری شکافهای سطحی در فلزات فرومغناطیسی بکار می رود. اصول این روش جدید، که شباهتهایی با روش جریان گردابی دارد، براساس اندازه گیری میدان مغناطیسی در سطح فلز در اطراف شکاف توسط یک پروب غیر تماسی می باشد.

پروپ مربوطه از یک القاء کننده میدان مغناطیسی و یک سنسور مغناطیسی تشکیل می شود. نقش القاء کننده، بوجود آوردن میدان مغناطیسی اولیه در سطح فلز می باشد که توسط تعدادی سیم موازی باشکل U یا یک سیم پیچ مستطیل شکل حامل جریان متناوب با فرکانس مناسب انجام می گیرد. در صورت وجود شکاف در فلز، توزیع میدان مغناطیسی تغییر کرده و این تغییرات توسط یک سنسور مغناطیسی اندازه گیری می شود.

در این مقاله، ابتدا به صورت تئوریک، سیگنالهای خروجی پروب فوق را که توسط یک نرم افزار کامپیوتری شبیه سازی شده اند، مورد بررسی قرار خواهیم داد. آنگاه با ارائه سیگنالهای مربوطه در عمل، صحت سیگنالهای تئوری

را مورد مطالعه قرار داده و اهمیت کاربردی این تکنیک نوین را در ارزیابی غیرمخرب (Nondestructive Evaluation) سازه های فلزی بحث خواهیم نمود.

۲- تئوری

شکل (۱) به صورت شماتیک یک القاء کننده (In-ducer) با شکل U را نشان می دهد که از یک جفت سیم حامل جریان متناوب تشکیل شده است. سیمهای حامل جریان در اطراف خود و از جمله در یک بلوک فلزی که در زیر آنها قرار دارد یک میدان مغناطیسی متناوب تولید می کند. به علت تغییرات میدان مغناطیسی با زمان، با توجه به قوانین فاراده و اهم، جریانهای گردابی در فلز ایجاد می شود. فرض می کنیم ضریب نفوذ مغناطیسی بلوک فلزی بسیار بزرگتر از یک می باشد، اگر چه مقدار مطلق آن مهم نیست. قسمتهای افقی سیمهای حامل جریان با یکدیگر موازی فرض شده و در فاصله h از سطح فلز قرار گرفته اند. برای هر یک از سیمها نصف طول قسمت افقی a ، طول قسمتهای عمودی l و فاصله افقی دو سیم b در نظر گرفته شده اند. یک سنسور مغناطیسی (مثلاً یک سیم پیچ یا یک هد مغناطیسی Magnetic Head) که در فاصله D_s از مرکز القاء کننده (نقطه 01) قرار گرفته، مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی را اندازه می گیرد. از آنجا که ما به تغییرات میدان مغناطیسی در سطح فلز توجه داریم، سنسور مزبور در نزدیکی سطح فلز قرار گرفته است. فرکانس جریان عبوری در سیمها به اندازه کافی بزرگ فرض می شود تا به علت اثر پوستی (Skin Effect)، جریانهای گردابی به وجود آمده در فلز تنها در سطح آن جریان خواهند داشت. در عمل، سنسور و القاء کننده به طور مکانیکی به یکدیگر متصل بوده و با هم به عنوان یک پروب مستقل جهت بررسی شکافها در فلز تحت آزمایش مورد استفاده قرار می گیرند.

برای مطالعه تئوریک سیگنالهای خروجی سنسور در بازبینی فلزات با شکافهای طویل و کمان دایره ای، مدل های ریاضی مناسب بوجود آمده اند که خواننده را برای آگاهی جزئیات تئوری به مقالات مربوطه رجوع می دهیم [۵ و ۴]. در این مقاله، تنها به ارائه سیگنالهای مربوط به شکافهای طویل اکتفا می کنیم. در این رابطه فرض شده است که مشخصات القاء کننده با توجه به شکل (۱) عبارت است از $a=24\text{ mm}$ ، $b=5\text{ mm}$ ، $l=62\text{ mm}$ ، $h=15\text{ mm}$. ضمناً ولتاژ خروجی سنسور در کلیه شبیه سازی های این بخش، نسبت به ولتاژ

خروجی سنسور در وضعیت $Ds=0$ نرمالیزه شده است.

ابتدا اثر فاصله سنسور نسبت به القاء کننده (Ds) را بر روی سیگنالهای خروجی مورد بررسی قرار می دهیم. برای این منظور فرض می کنیم Ds مقادیر 0، 10، 20، 40 میلی متر را داشته باشد. شکل (۲) سیگنالهای خروجی سنسور را برای این حالات وقتی عمق شکاف $d=4$ mm است، نشان می دهد. با مطالعه این شکل متوجه می شویم که در محل شکاف یک بریدگی (جهش ناگهانی) در سیگنال خروجی وجود دارد که به وضوح وجود شکاف را نشان می دهد. از طرف دیگر، با قرار دادن سنسور در نقاط مختلف، مقدار این بریدگی تغییر می کند. در حقیقت با افزایش Ds ، مقدار بریدگی ابتدا از صفر ($Ds=0$ ، شکل ۲ الف) رو به افزایش یافته ($Ds=20$ mm، شکل ۲ ج) و آن گاه دوباره کاهش می یابد ($Ds=40$ mm، شکل ۲ د). با توجه به این که نصف طول قسمت افقی القا کننده $a=24$ mm می باشد، نتیجه می گیریم که اگر بریدگی در سیگنال را وسیله پیدا کردن شکاف قرار دهیم، بهترین جا برای سنسور در زیر القا کننده و در محلی است که سیمهای حامل جریان خم می شوند. ضمناً دقت بیشتر در شکل (۲) نشان می دهد که با افزایش Ds شیب سیگنال در نزدیکی شکاف دائماً رو به کاهش است. بخصوص وقتی سنسور در مرکز القا کننده ($Ds=0$) قرار دارد، علی رغم نبودن بریدگی در سیگنال، بیشترین شیب در سیگنال مشاهده می شود. قابل توجه است که تغییرات در شیب سیگنال نیز به نوبه خود می تواند محکی برای پیدا کردن شکاف باشد.

بررسی سیگنالهای خروجی سنسور که در بالا ارائه شد نشانگر آن بوده است که وجود شکاف با مشاهده بریدگی در سیگنال به وضوح قابل تشخیص است. اما به جهت اهمیت اندازه گیری ابعاد شکافها، بایستی دید که آیا مقدار بریدگی در سیگنال رابطه ای با اندازه شکاف (در حالت شکاف طویل فقط عمق آن مطرح است) دارد. شکل (۳) سیگنالهای خروجی را برای القاء کننده مشخص شده بالا وقتی سنسور در فاصله $Ds=27$ mm نسبت به آن قرار دارد را نشان می دهد. در این شبیه سازی ها فرض کرده ایم که عمق شکافها $d=1, 4, 6, 10$ mm می باشد. مطالعه شکل (۳) نشان می دهد که با افزایش عمق شکاف، مقدار بریدگی در سیگنال هم افزایش می یابد. بدین ترتیب در روش جدید نه تنها محل شکاف بلکه اندازه آن هم نیز قابل تشخیص است. برای اندازه گیری سیستماتیک شکافها در فلزات با

روش پیشنهادی، یک سری منحنی های تئوریک به دست آمده اند که توسط آنها می توان با داشتن مقدار بریدگی عمق شکاف مربوطه را تعیین نمود. برای آن که احتیاج به کالیبره کردن دستگاه اندازه گیری نداشته باشیم، به جای مقدار مطلق دامنه بریدگی یعنی $V_2 - V_1$ اندازه سیگنال درست قبل از شکاف و بعد از شکاف هستند که در شکل (۲) نشان داده شده اند، از مقدار نسبی دامنه بریدگی (R) استفاده می شود. مقدار نسبی بریدگی (R) به صورت زیر تعریف می شود:

$$R = (V_2 - V_1) / V_1 \times 100$$

به عنوان مثال منحنی تغییرات R برحسب عمق شکاف برای مقادیر مختلف Ds در شکل (۴) رسم شده است. بایستی توجه شود که منحنی های ترسیمی برای القاء کننده با ابعاد مشخص شده در ابتدای این بخش به دست آمده اند.

۳- آزمایشات عملی

برای تأیید صحت سیگنالهای پیش بینی شده توسط تئوری، آزمایشات متعددی انجام گرفت. در این آزمایشات، ابتدا یک پروب مخصوص ساخته شد که سنسور و القا کننده U شکل را در برداشت (شکل ۵). سپس تحت کنترل کامپیوتر با استفاده از یک میز XY ، به طور اتوماتیک، سطح یک بلوک فلزی ساخته شده از آهن نرم (Mild Steel) مورد بازبینی قرار گرفت. بلوک فلزی شامل چهار شکاف طویل به عمقهای 1 mm، 2 mm، 3 mm، 4 mm بوده که در عرض بلوک به فواصل مساوی 50 mm از یکدیگر با ماشین ابزار تراشیده شده بودند. در آزمایشات انجام شده از یک هد مغناطیسی به عنوان سنسور استفاده گردید و جریان عبوری در سیمهای القاء کننده توسط یک منبع جریان با فرکانس 1/6 KHz تأمین می شد. لازم به ذکر است که در این فرکانس لایه پوستی جریان دارای ضخامت 0/3 mm در آهن نرم می باشد که نسبت به ابعاد شکافهای مورد آزمایش خیلی کوچکتر است؛ همان طور که در قسمت تئوری اشاره شد، کوچک بودن لایه پوستی جریان نسبت به ابعاد شکاف از شروط اولیه این روش نوین است.

سیگنال شکاف که به صورت مدولاسیون دامنه (AM Modulation) در خروجی سنسور ظاهر می شود توسط یک مدار الکترونیکی ساخته شده برای این منظور [۶] آشکار گردید. برای نشان دادن سیگنال مربوطه از یک اسیلوسکوپ

۴- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله نشان دادیم که شکافهای سطحی در فلزات فرو مغناطیسی باعث تغییرات در میدان مغناطیسی بوجود آمده توسط یک القاء کننده با شکل U می شوند. با اندازه گیری میدان مغناطیسی در سطح فلز توسط یک سنسور مغناطیسی مشاهده شد که این تغییرات به صورت یک بریدگی (جهش ناگهانی) در میدان مغناطیسی ظاهر می گردد، به شرطی که سنسور در مرکز القاء کننده قرار نگیرد، ضمناً نشان دادیم با اندازه گیری مقدار نسبی بریدگی می توان علاوه بر محل، عمق یک شکاف سطحی را نیز تعیین نمود، بدون آن که احتیاجی به کالیبره کردن دستگاه اندازه گیری یا نیازی به بلوکهای استاندارد باشد. از طرف دیگر به علت غیر تماسی بودن سنسور، پوشش عایقی سطح قطعه تحت آزمایش کارآیی روش جدید را تحت الشعاع قرار نخواهد داد.

از نکات قابل ذکر در مورد این روش آزمون غیرمخرب، سادگی اندازه گیری ابعاد شکافهای سطحی در فلزات از روی سیگنال به دست آمده می باشد. این مسأله از اهمیت خاصی در تسریع زمان پیدا کردن شکافها و اندازه گیری آنها برخوردار بوده، بخصوص در مواردی که این عمل می بایستی بلادرنگ و در زمان واقعی (Real Time) انجام پذیرد.

دیجیتال استفاده شد. نتایج آزمایش همراه با سیگنالهای شبیه سازی شده با مدل ریاضی در شکل (۶) نشان داده شده اند. در این آزمایش، ابعاد القاء کننده همان مقادیری هستند که در قسمت تئوری آمده و سنسور در محل $D_s=27 \text{ mm}$ قرار گرفته بود. بررسی شکل (۶) به خوبی صحت مدل پیشنهادی را تأیید می کند، ضمناً برای آن که کاربرد عملی این روش نوین غیر مخرب را در اندازه گیری شکاف در فلزات نشان بدهیم، از منحنی های شکل (۴) استفاده کرده و عمق شکافهای بازبینی شده را محاسبه کردیم (جدول ۱). همان طور که در جدول (۱) مشاهده می شود، میزان خطای محاسبه عملاً بسیار ناچیز است.

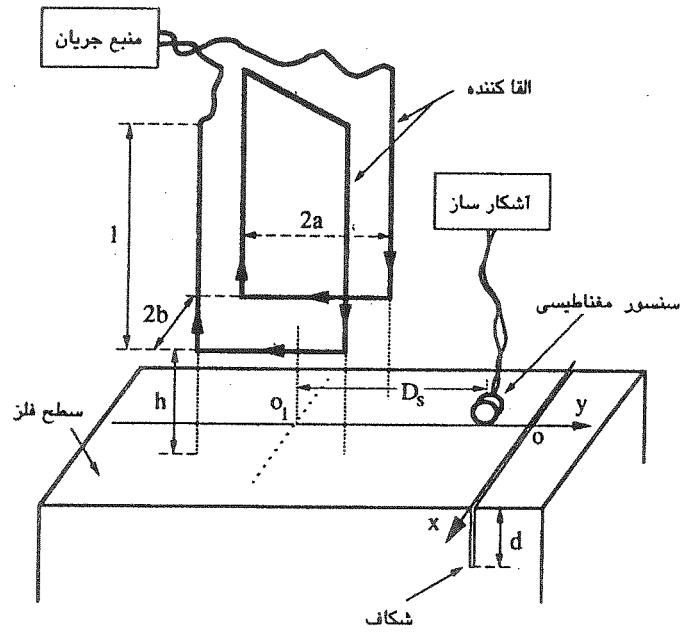
جدول (۱) مقایسه بین عمق اندازه گیری شده و عمق واقعی شکافهای

موجود در بلوک فلزی مورد آزمایش

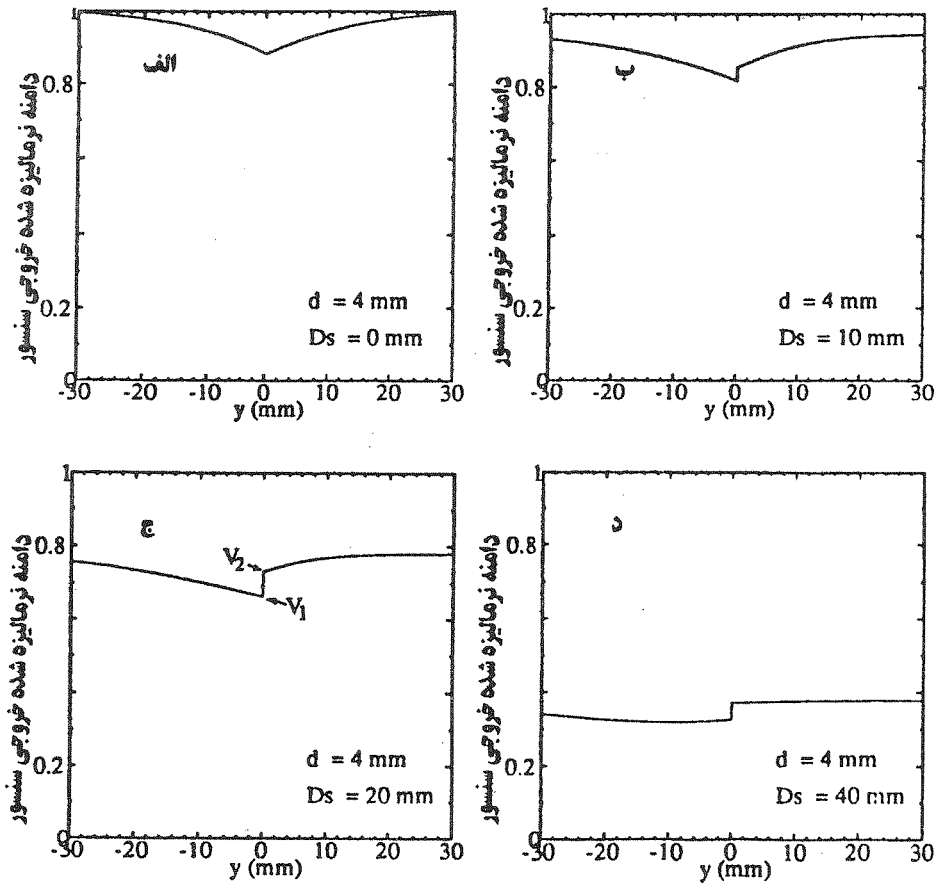
عمق واقعی (mm) d	عمق اندازه گیری شده (mm) dm	(dm-d) / d (%)
۱/۰۲	۱/۰۰	-۲/۰۰
۲/۰۱	۱/۹۳	-۴/۰۰
۳/۰۰	۲/۸۴	-۵/۳
۳/۹۶	۳/۵۰	۱۱/۶

منابع:

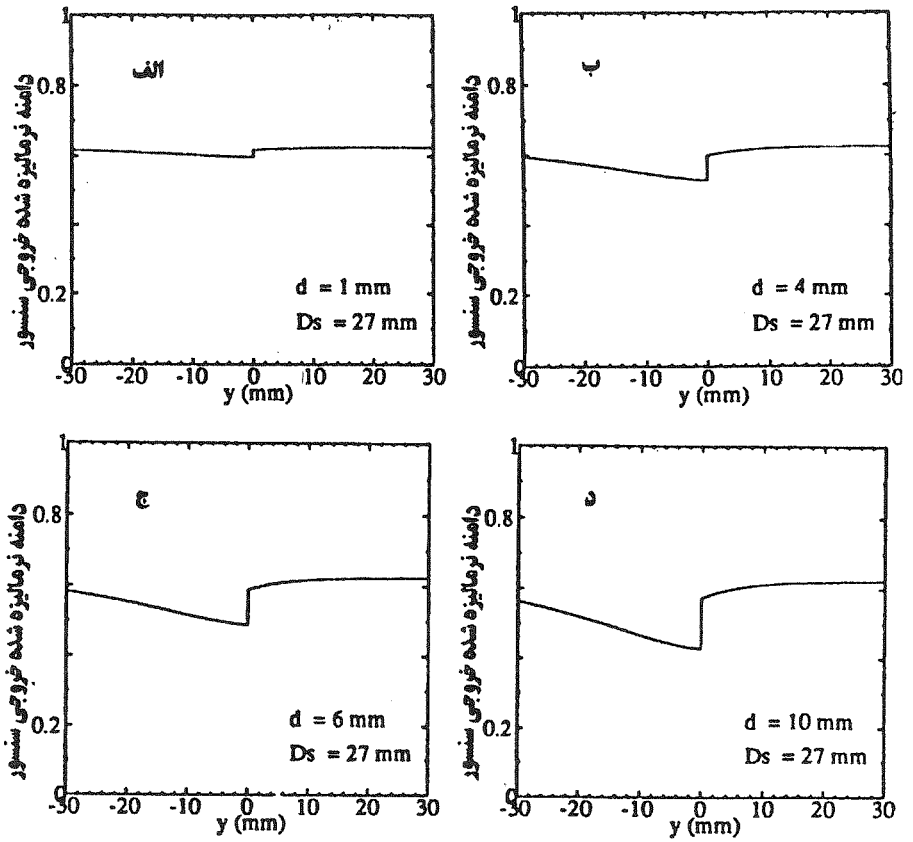
- [1]. R. Halmshaw, "Non-destructive Testing", "Edward Arnold (Publishers) Ltd, London, UK., 1987.
- [2]. V. S. Cecco and G. Can Drunen, "Recognizing the scope of eddy current testing," in: Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 8, R.S. Sharpe, Ed., Academic press, London, 1985, pp. 269-301.
- [3]. W. D. Dover, F. D. W. Charlesworth, K. A. Taylor, R., Collins and D. H. Michael, "A. C. field measurements-theory and practice," in: The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue, C. J. Beevers, Ed., Engineering Materials Advisory Services Ltd., Warley, 1980, pp. 222-260.
- [4]. S. H. H. Sadeghi and D. Mirshekar-Syahkal, "Surface potential distributions around long uniform cracks, induced by U-shaped current carrying wires, IEEE Transaction on Magnetics., Vol. 27, No. 1991, pp. 674-679.
- [5]. S. H. H. Sadeghi and D. Mirshekar-Syahkal, "Scattering of an induced field by fatigue cracks in ferromagnetic metals", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No. 2, 1992, pp. 1008-1016.
- [6]. d. Mirshekar-Syahkal and S. H. H. Sadeghi, "Study of the effect of frequency in crack depth measurement by the a. c. field technique," in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 7A, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds., New York: Plenum Press, 1988, pp. 181-189.



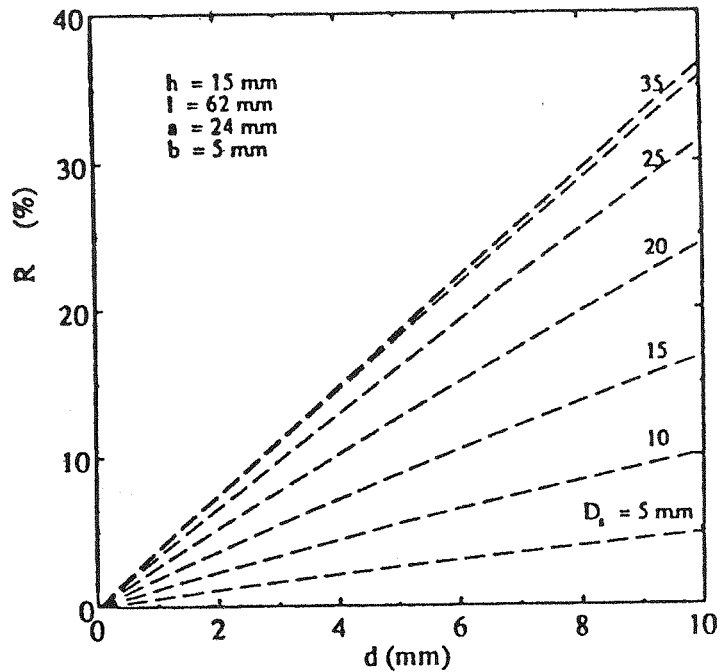
شکل (۱) نمای شماتیک يك القاء کننده با شکل U همراه با سنسور مربوطه برای اندازه گیری تغییرات مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی در سطح يك بلوك فلزی كه دارای يك شكاف طولی می باشد.



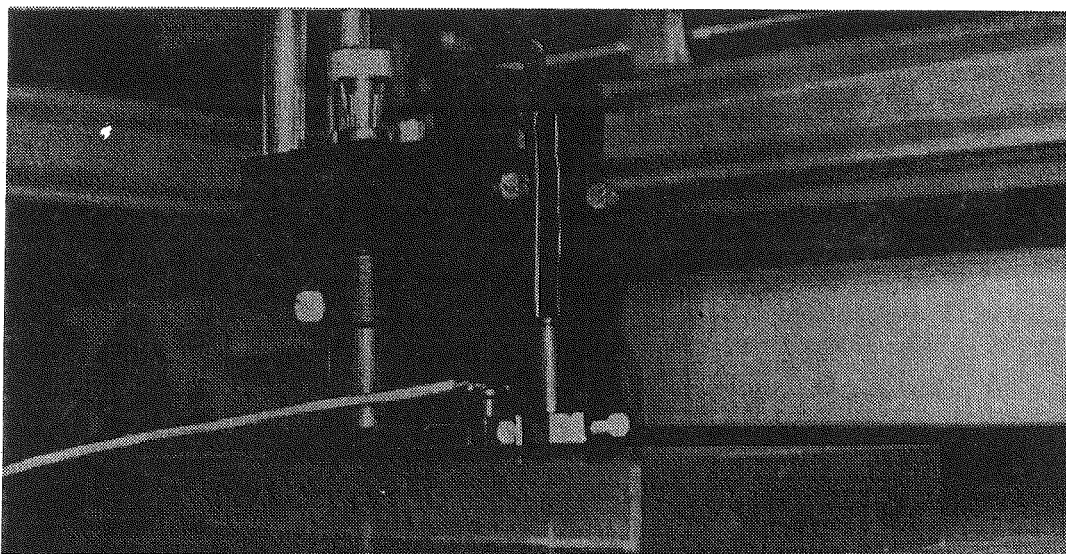
شکل (۲) تأثیر محل قرار دادن سنسور در پروب بر روی سیگنالهای خروجی پروب



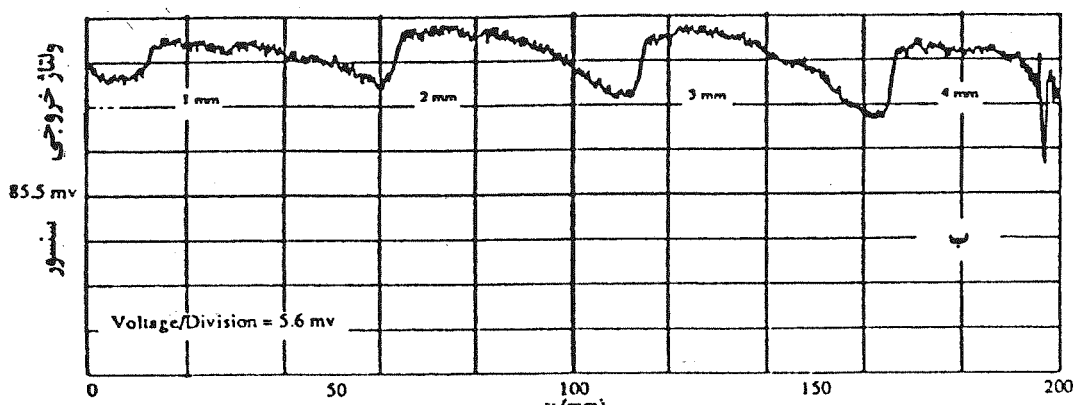
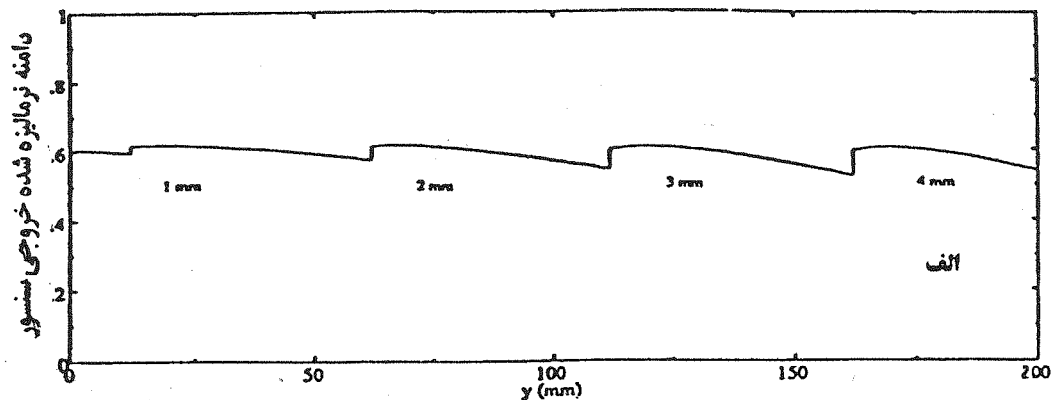
شکل (۳) تأثیر عمق شکاف بر روی سیگنالهای خروجی پروب



شکل (۴) تغییرات مقدار نسبی دایمه بریدگی سیگنال (R) بر حسب عمق شکاف برای محلهای مختلف سنسور



شکل (۵) پروپ ساخته شده به هنگام بازیابی یک بلوک فلزی



شکل (۶) سیگنالهای خروجی پروپ وقتی سطح یک بلوک فلزی (آهن نرم) شامل شکافهای طولی با عمقهای 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm بازیابی شده است، الف) تئوری، ب) در عملی