

## تخمین شکل و ابعاد ترک‌های سطحی ساختارهای فلزی در روش آزمون جریان گردابی

تیمور حیدری<sup>۱</sup>، سید حسین (حسام الدین) صادقی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲. استاد، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* sadeghi@aut.ac.ir

### چکیده

آشکارسازی و اندازه‌گیری ترک‌های ناشی از خستگی در سطوح ساختارهای فلزی از کاربرد های مهم آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد. یکی از روش‌های غیرمخرب برای این منظور، روش جریان گردابی می‌باشد. در این روش با استفاده از یک سیم پیچ حامل جریان متناوب در سطح قطعه جریان گردابی ایجاد می‌گردد. وجود ترک باعث به هم خوردن توزیع این جریان و در نتیجه تغییر امپدانس سیم پیچ می‌گردد. تخمین شکل و ابعاد ترک از روی تغییرات امپدانس سیم پیچ که یک مساله معکوس نامیده می‌شود برای تخمین عمرقطعه و استفاده بهینه از آن مهم می‌باشد. در این مقاله، یک مدل معکوس سازی مبتنی بر شناسایی پدیده و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت جهت تشخیص شکل و عمق ترک‌ها از روی تغییرات امپدانس سیم پیچ ارائه می‌گردد. نتایج بدست آمده از تخمین شکل ترک‌ها از روی داده های اندازه‌گیری نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در تشخیص شکل و عمق ترک‌ها از دقت بالایی برخوردار

**واژگان کلیدی:** آزمون‌های غیرمخرب- جریان گردابی- بهینه سازی ازدحام جمعیت- معکوس سازی

### ۱- مقدمه

سطوح فلزات همیشه در اثر خوردگی و خستگی در معرض بروز ترک می‌باشند. از آنجایی که معمولاً مقدار تنش در روی سطح فلزات بیشتر از مقدار تنش در داخل آنها می‌باشد، ترک‌ها اغلب در روی سطح فلزات بوجود می‌آیند و داخل آن گسترش می‌یابند [1]. کشف و جلوگیری از رشد این ترک‌ها در مراحل اولیه ایجاد آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این منظور می‌توان از تکنیکهای آزمون غیر مخرب استفاده کرد. این تکنیکها بدون ایجاد خللی در ساختار فیزیکی و شیمیایی قطعه، آن را ارزیابی می‌کنند. تکنیکهای مختلفی برای آزمون غیر مخرب ارائه شده اند که هر کدام کاربردها، معایب و مزایای خود را دارد [2].

یکی از تکنیکهای مهم آزمون غیرمخرب برای بازرسی و ارزیابی سطوح ساختارهای فلزی روش جریان گردابی [3-4] است که با توجه به سادگی سیستم آزمون و ارزان و ایمن بودن آن کاربرد گسترده ای در صنعت دارد. در این روش فلز تحت بازرسی در مجاورت یک سیم پیچ حامل جریان متناوب قرار داده شده و بر اساس قانون فاراده و اهم جریانهای گردابی در بدنه فلز القا می‌گردد. جریانهای القایی در برخورد با ترک های موجود در قطعه در مقایسه

با حالت عدم وجود ترک دچار تغییراتی در مسیر حرکت خود می‌گردند که این به نوبه خود باعث ایجاد تغییراتی در چگونگی توزیع میدان مغناطیسی در اطراف قطعه و در نتیجه تغییر امپدانس سیم پیچ می‌گردد. با اندازه‌گیری تغییرات امپدانس سیم پیچ می‌توان محل و ابعاد ترک‌ها را تعیین نمود.

به تعیین شکل و اندازه ترک ها از روی سیگنالهای اندازه گیری (تغییرات امپدانس سیم پیچ) مسئله معکوس اطلاق می‌شود و حل آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. عمدتاً حل مسئله معکوس به صورت فرم بسته امکان پذیر نمی‌باشد و معمولاً برای معکوس سازی از دو دسته تکنیک مبتنی بر شناسایی پدیده و غیر مبتنی بر شناسایی پدیده استفاده می‌گردد.

تکنیکهای غیر مبتنی بر شناسایی پدیده، تکنیکهایی هستند که با استفاده از تکنیکهای پردازش سیگنال کار می‌کنند. دو روش معمول در این تکنیکها، استفاده از منحنی های معکوس سازی و شبکه های عصبی می‌باشند. در استفاده از منحنی های معکوس سازی ابتدا برای ترکهای مختلف سیگنالهای خروجی سنسور از طریق اندازه گیری یا شبیه سازی تهیه می‌گردند. سپس مشخصه ای از این سیگنالها نظیر پیک سیگنال بر حسب

نظر گرفته می شود و سپس با استفاده از حل مسئله مستقیم، سیگنال خروجی سنسور برای این ترک شبیه سازی می گردد. با تعریف یک کمیت خطا، خطای بین سیگنال شبیه سازی و سیگنال اندازه گیری محاسبه و بر اساس خطای بدست آمده، و با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی، شکل ترک بگونه ای تغییر داده می شود که در مرحله بعد خطا کمتر گردد. تغییر شکل ترک و محاسبه خطا آنقدر تکرار می شود که خطا به کمترین مقدار خود برسد و شکل ترک بدست آید [9-10]. با وجود کند بودن این روش نسبت به استفاده از منحنی های معکوس سازی و شبکه عصبی، در این روش می توان انواع مختلف شکل ترک را با دقت مناسبی تخمین زد.

در این مقاله یک مدل معکوس سازی مبتنی بر شناسایی پدیده و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت در روش جریان گردابی ارائه می گردد که قادر است شکل ترکهای موجود در سطح فلزات را از روی تغییرات امپدانس سیم پیچ القاگر به طور دقیق تخمین بزند.

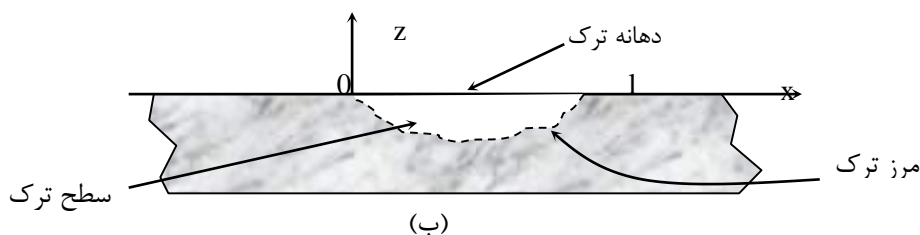
در بخش دوم این مقاله تئوری و شبیه سازی پاسخ القاگر در روش جریان گردابی توضیح داده می شود. سپس در بخش سوم، مدل معکوس سازی ارائه شده و نهایتاً در بخش چهارم با ارائه نتایج معکوس سازی حاصل از داده های اندازه گیری دقت مدل ارائه شده نشان داده می شود.

کمیتی از ترک نظیر عمق آن در یک منحنی رسم می شود. بعد از تهیه این منحنی می توان از آن برای آشکار سازی کمیت مورد نظر در ترک استفاده نمود. تهیه منحنی های معکوس سازی فقط برای ترکهای با شکل خاص و آنهم پارامترهای خاصی از آنها ( همانند عمق ترک در ترکهای طولی [5]) امکان پذیر می باشد و این در حالی است که در عمل ترکها شکل خاصی ندارند. بنابراین این روش در اکثر مواقع غیر قابل استفاده است. از طرف دیگر در روشهای مبتنی بر شبکه عصبی سیگنال خروجی سنسور به شبکه عصبی وارد شده و شبکه بر اساس آموزشی که دیده است، این سیگنال را به شکل ترک نگاشت میدهد [6-8]. روشهای معکوس سازی مبتنی بر شبکه های عصبی از سرعت و سادگی خوبی برخوردار هستند ولی تعمیم پذیری آنها نسبت به همه شکل های ترک اغلب امکانپذیر نیست.

در تکنیکهای مبتنی بر شناسایی پدیده که به آنها الگوریتمهای تکراری حل مسئله مستقیم نیز گفته می شود، به منظور یافتن شکل ترک از تکرار حل مسئله مستقیم استفاده می گردد. مسئله مستقیم به حالتی اطلاق می شود که در آن شکل و ابعاد ترک و سیم پیچ مشخص و امپدانس سیم پیچ (سیگنال اندازه گیری) مجهول می باشند. در تکنیکهای مبتنی بر تکرار حل مسئله مستقیم، ابتدا برای ترک یک یا چند شکل اولیه در



شکل ۱ الف



شکل (۱) الف - نمایش شماتیکی روش جریان گردابی در بازرسی یک قطعه ب - سطح مقطع ترک در صفحه  $xoz$

$E_i(r)$ 

$$= \mathbf{E}(r) - \int_{S_{crack}} \sigma \mathbf{E}(r') \cdot \mathbf{G}(r, r') ds(r') \quad (1)$$

که در آن  $E$  میدان الکتریکی کل،  $E_i$  میدان الکتریکی تابشی (میدان در محل ترک و در عدم حضور آن،  $\sigma$  رسانندگی فلز و  $G$  تابع گرین مسئله می‌باشد. با حل این معادله و مشخص شدن میدان الکتریکی در ناحیه ترک ( $E$ ) تغییرات امپدانس سیم پیچ از رابطه زیر بدست می‌آید:

 $\Delta Z$ 

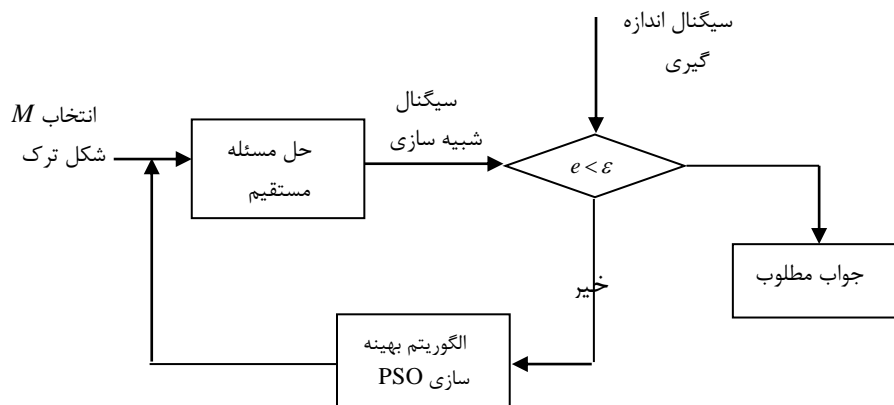
$$= -\frac{\sigma}{I^2} \int_{S_0} E_i(r) \cdot E(r) ds(r) \quad (2)$$

همانطور که از معادلات (۱) و (۲) مشخص است تغییرات امپدانس سیم پیچ، تابعی از شکل ترک ( $S_{crack}$ ) و همچنین شکل سیم پیچ القاگر و مشخصات الکتریکی قطعه ( $E_i$  و  $\sigma$ ) می‌باشد.

## ۲- تئوری و شبیه سازی پاسخ القاگر در روش

### جریان گردابی

در شکل (۱) نمایش شماتیکی روش جریان گردابی در بازرسی یک قطعه فلزی تخت نشان داده شده است. مطابق این شکل در سطح قطعه یک ترک بطول  $l$  و شکل دلخواه فرض شده است. دهانه ترک بسیار ریز بوده و فاصله بین سطوح آن لایه نازکی از هوا می‌باشد. محور  $x$  منطبق بر لبه ترک و محور  $y$  عمود بر آن می‌باشد. بوسیله یک سیم پیچ حامل جریان متناوب،  $I$ ، جریانات گردابی در سطح قطعه ایجاد می‌شود. فرکانس جریان عبوری از آن  $f$ ، به اندازه‌ای پایین است که بتوان از جریان جابجایی در بیرون فلز صرف‌نظر کرد. برای مسئله مستقیم مشخصات سیم پیچ و ترک معلوم، و تغییرات امپدانس سیم پیچ مجهول می‌باشند. برای حل این مسئله از روش مقاله [11] استفاده می‌گردد. در این روش برای ناحیه ترک معادله EFIE زیر فرض می‌شود:



شکل (۲) معکوس سازی مبتنی بر حل تکراری مسئله مستقیم و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت

جدول (۱) مشخصات القاگر، قطعه و ترک در دو آزمایش جریان گردابی [۱۱]

	Expt.1	Expt.2
<b>Coil parameters</b>		
Inner radius	6.15±0.05 mm	2.51±0.01mm
Outer radius	12.4±0.05 mm	7.38±0.01mm
length	6.15±0.1 mm	4.99±0.01mm
Lift-off	0.88 mm	0.30 ±0.01mm
Number of turns	3790	4000
Frequency	900 Hz	417 Hz
<b>Conductor</b>		
conductivity	30.6±0.02 MS/m	22.62±0.06 MS/m
thickness	12.22±0.02 mm	24 mm
<b>Flaw</b>		
shape	rectangular	semielliptical
length	12.6±0.02 mm	22.1±0.05 mm
depth	5.0±0.05 mm	8.61±0.05 mm
opening	0.28±0.01mm	0.33±0.01 mm

## ۳- مدل معکوس سازی

شبیه سازی تغییرات امپدانس سیم پیچ القاگر برای شکل ترکهای مختلف در بخش قبل ارائه گردید. اما در کاربردهای عملی مسئله مهم تعیین شکل ترک از روی تغییرات امپدانس (سیگنال اندازه گیری) می باشد. بر این اساس در این بخش یک مدل معکوس سازی ارائه می گردد که با دریافت تغییرات امپدانس اندازه گیری شده شکل ترک را تشخیص دهد.

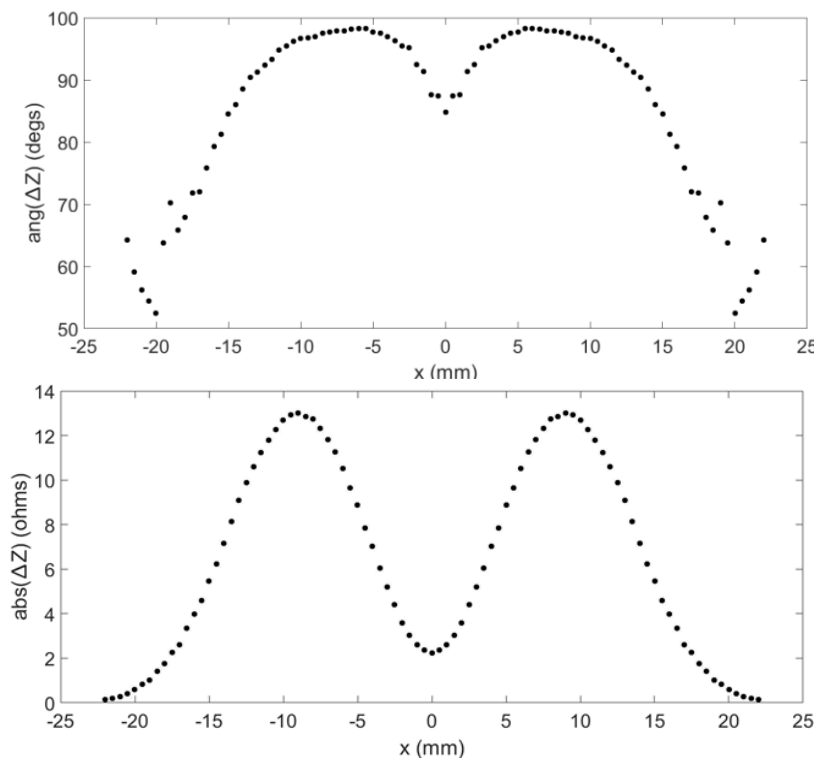
شکل (۲) بلوک دیاگرام مدل پیشنهادی را نشان می دهد. در این روش که بر حل تکراری مسئله مستقیم و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت [12-13] استوار است، ابتدا تعداد  $M$  شکل ترک اولیه فرض شده و با حل مسئله مستقیم برای هر کدام، امپدانس سیم پیچ برای آنها شبیه سازی می شود. سپس داده های شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری مقایسه شده و خطا برای هر شکل بدست می آید. اگر برای شکلی خطا کمتر از خطای تعیین شده باشد آن شکل بعنوان پروفایل ترک انتخاب می شود. در غیر اینصورت، شکلهای ترک بهینه شده و فرآیند تا حصول نتیجه قابل قبول تکرار می شود. در فرآیند معکوس سازی بالا، شکل هر ترک بصورت یک بردار  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n-1}, d_n\}$  در نظر گرفته می شود که در آن  $d_k$  نشان دهنده عمق ترک در طول  $x_k = \frac{(k-1)l}{n-1}$

از ترک می باشد. بهینه سازی شکل ترکها با الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت انجام می گردد و اساس کار به این صورت است که در هر مرحله هر شکل ترک خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین حالتی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین حالتی که در کل همسایگی اش وجود دارد، تنظیم می کند. برای بهینه سازی شکل ترک  $n+1$ ام در گام  $(n+1)$  معادلات مربوطه به صورت زیر خواهند بود:

$$V_{n+1} = wV_n + c_1 r_1 (p_{best,n} - D_n) + c_2 r_2 (g_{best,n} - D_n) \quad (3)$$

$$D_{n+1} = D_n + V_{n+1} \quad (4)$$

که در آن بردارهای  $D = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})$  و  $V = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$  به ترتیب شکل و نرخ همگرایی ترک نام می باشد. همچنین  $p_{best}$  و  $g_{best}$  به ترتیب برای بهترین حل ترک نام و بهترین حل در بین کل ترک ها می باشد. پارامتر  $w$  یک وزن اینرسی است که معمولاً در محدوده  $[0, 1]$  انتخاب می گردد.  $c_1$  و  $c_2$  ثابتهای شتاب می باشند که معمولاً ۲ انتخاب می شوند [13]. همچنین  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  اعداد تصادفی در محدوده  $[0, 1]$  هستند.



شکل (۳) پاسخ سیم پیچ القاگر برای آزمایش اول (الف) - دامنه تغییرات امپدانس سیم پیچ (ب) - فاز تغییرات امپدانس سیم پیچ

$$E_t = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 \left| 1 - \frac{f(k+1) + f(k)}{d(k+1) + d(k)} \right| \quad (5)$$

که در آن  $d(k)$  و  $f(k)$  به ترتیب عمق واقعی ترک و پاسخ مدل برای عمق عنصر  $k$ ام ترک می‌باشد. خطای کلی در تخمین ترک های شکل (۵) و (۶) به ترتیب ۲/۷ و ۸/۴ درصد می‌باشد که نشانگر دقت بالای مدل در تخمین شکل ترک ها می‌باشد.

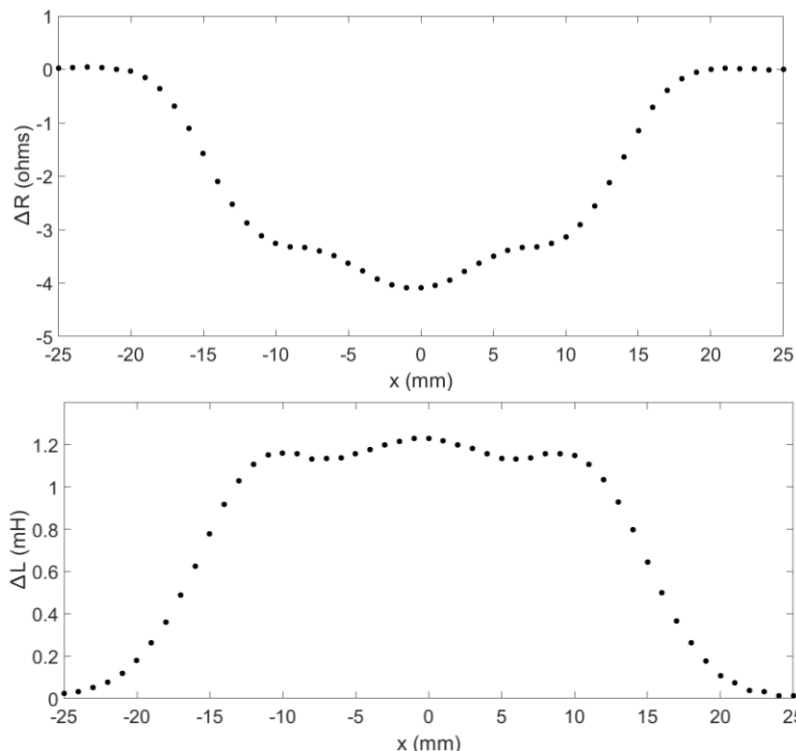
#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، جهت تشخیص شکل ترکهای ناشی از خستگی در سطوح قطعات فلزی یک مدل معکوس‌سازی در روش جریان گردابی ارائه گردید. مدل پیشنهادی مبتنی بر شناسایی پدیده می‌باشد که در آن از حل تکراری مسئله مستقیم و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت استفاده می‌گردد. نتایج بدست آمده از اعمال سیگنالهای اندازه گیری به مدل پیشنهادی نشان داد که مدل قادر است با دقت بالایی شکل ترکها را تشخیص دهد. اگرچه در این مقاله نتایج برای ترک های موجود در سطوح فلزات غیرمغناطیسی ارائه گردید اما مدل پیشنهادی قابل استفاده برای فلزات فرومغناطیسی نیز می‌باشد و تنها تفاوت در روش حل مسئله مستقیم خواهد بود.

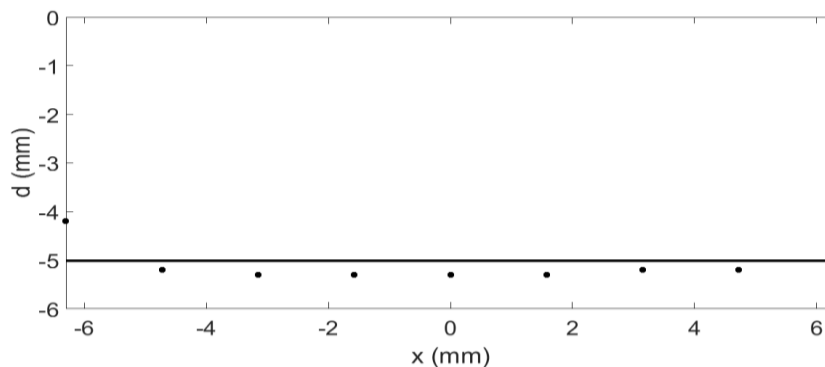
#### ۴- ارزیابی مدل با داده های اندازه گیری

برای ارزیابی مدل معکوس سازی ارائه شده از داده های اندازه [11] استفاده می‌گردد. اندازه گیری برای دو حالت مختلف انجام شده است. جدول (۱) مشخصات سیم پیچ الفاکر، قطعه تحت آزمون، و ترک را برای دو نشان می‌دهد. در هر آزمایش سیم پیچ در راستای دهانه آن حرکت کرده و تغییرات امپدانس آن اندازه گیری می‌گردد. شکل (۳) نتایج اندازه گیری تغییرات امپدانس را برای آزمایش اول در قالب دامنه و فاز نشان می‌دهد. نتایج اندازه گیری برای آزمایش دوم نیز بصورت تغییرات مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ در شکل (۴) آمده است که قابل تبدیل به فرم دامنه و فاز امپدانس می‌باشد.

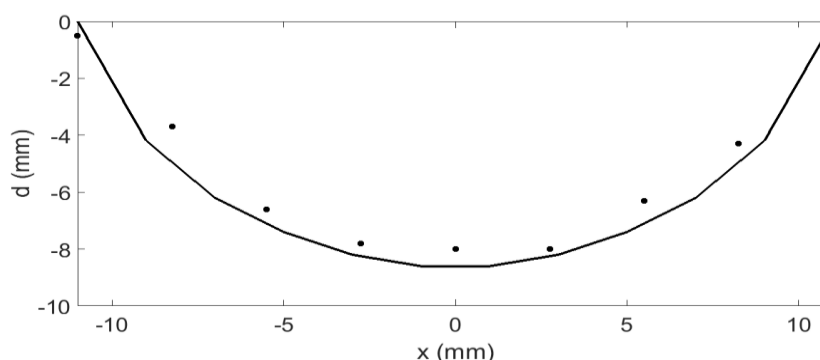
برای ارزیابی دقت مدل معکوس سازی، داده های اندازه گیری هر آزمایش به صورت دامنه و فاز وارد مدل می‌گردد. برای تخمین شکل ترک پروفایل آن بصورت یک بردار ۹ عنصری در نظر گرفته می‌شود که معرف عمق ترک در ۹ نقطه از طول ترک می‌باشد. ۱۰ شکل اولیه برای ترک در نظر گرفته شده و معکوس سازی انجام می‌شود. در شکلهای (۵) و (۶) پاسخ مدل معکوس‌سازی با شکل واقعی ترک، برای هر کدام از ترکها، نشان داده شده است. برای تعیین میزان خطای شبکه پارامتر خطای  $E_t$  بصورت زیر تعریف می‌گردد:



شکل (۴) پاسخ سیم پیچ الفاکر برای آزمایش دوم (الف) - تغییرات مقاومت الکتریکی سیم پیچ (ب) - تغییرات اندوکتانس سیم پیچ



شکل (۵) شکل واقعی (-) و پاسخ مدل معکوس سازی (...) برای آزمایش اول



شکل (۶) شکل واقعی (-) و پاسخ مدل معکوس سازی (...) برای آزمایش دوم

- Eddy Current Testing. IEEE International joint Conf. on Neural Networks, 6, 4033-4036.
9. Li, Y., Udpa, L., and Udpa, S. S. (2004). Three-Dimensional Defect Reconstruction from Eddy-Current NDE Signals Using a Genetic Local Search Algorithm. IEEE Trans. Magn., 40, 410-417.
  10. Badies, Z., Pavo, J., Komatsu, H., Kojima, S., Matsumoto, Y., and Aoki, K. (1998). Fast Flaw Reconstruction from 3D Eddy Current Data. IEEE Trans. Magn., 34, 2823-2828.
  11. Bowler, J.R. (1994). Eddy-current interaction with an ideal crack. J. Appl. Phys. 75, 8128-8137.
  12. Kennedy, J., and Eberhart, R.C. (1995). Particle swarm optimization", IEEE International Conference on Neural Networks, 4, (pp. 1942-1948), Perth, WA, Australia.
  13. Eberhart, R.C., and Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: Developments, applications and resources. IEEE Int. Conf. Evolutionary Computation, 1. Seoul, South Korea.

#### ۶- مراجع

1. R. I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, Wiley, New York, 2001.
2. Halmshaw, R. (1987). Non-Destructive Testing. Edward Arnold, 2th ed., London.
3. Burrows, M.L. (1964). Theory of eddy-current flaw detection. PH.D Dissertation University of Michigan.
4. Dodd, C. V. and Deeds, W.E. (1968). Analytical solutions to eddy-current prob-coil problems. J. Appl. Phys., 39, 2829-2838.
5. Mirshekar-Syahkal, D., Mostafavi, R.F. (1997). Analysis Technique for Interaction of High-Frequency Rhombic Inducer Field with Cracks in Metals. IEEE Trans. Magn, 33, 2291-2298.
6. Xiaoyun, S., Donghui, L., Kai2 G., Liweil, Z., Ran, Z., and Jianye, L. (2004). Neural Network with Adaptive Genetic Algorithm for Eddy Current Nondestructive Testing. In: IEEE Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. (pp. 2034-2037), Hangzhou, China.
7. Chady, T., Enkizono, M., Sikora, R. (2000). Neural Network Models of Eddy Current Multifrequency System for Nondestructive Testing. IEEE Trans. Magn., 36, 1724-1727.
8. Preda, G., Popa, R. C., Demachi, K., and Miya, K. (1999). Neural Network for Inverse Mapping in

## Detection and Sizing of Fatigue Cracks in Metallic Structures from Eddy Current Probe Signals

Teimour Heidari<sup>1</sup>, Seyed Hossein Hesamedin Sadeghi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> -Electromagnetics Laboratory, Department of Electrical Engineering,  
Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\*sadeghi@aut.ac.ir

### Abstract

The use of Eddy Current (EC) technique has proved to be a viable means for crack detection and sizing in metals. In this technique, a crack is evaluated from the observation of probe impedance changes due to the interaction between induced current in a metal and the crack. Since the growth of fatigue crack in metals is a stochastic process, the cracks do not have a constant predetermined shape. Detection and Sizing of the cracks from probe signals witch called inverse problem is important for predicting the life of the workpiece. In this paper, an inverse algorithm based on the particle swarm optimization (PSO) technique is proposed for predicting the crack depth profile from EC probe signals. The validity of the proposed algorithm is demonstrated by comparing the actual and reconstructed depth profiles from measurement EC probe signals.

**Keywords:** Nondestructive testing, Eddy current, Inverse algorithm, Particle swarm optimization