مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 153-163

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تعیین عمق تَرَک در قطعات فلزی از طریق داده‌های حاصل از روش ACFM با استفاده از سیستم منطق فازی نوع-2

سعید احمدخواه مژدهی[1]، رضا حسن‌زاده پاک رضایی[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه گیلان، رشت

* گیلان، صندوق پستی 41635-3756 ، hasanzadehpak@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 فروردین 1396

پذیرش: 23 تیر 1396

ارائه در سایت: 18 مرداد 1396

کلید واژگان:

آزمون غیرمخرب

اندازه‌گیری میدان ناشی از جریان متناوب

مسئله معکوس

منطق فازی نوع-2

چکیده

تعیین شکل و عمق دقیق ناپیوستگی در قطعات فلزی پیش از رسیدن به مرز فروپاشی آن از جمله مسائل مهم در صنعت می‌باشد. روش‌های مبتنی بر منطق فازی به دلیل توانایی بالا در توصیف مسائل پیچیده با ماهیت تجربی، مانند آزمون های غیرمخرب، برای این منظور بکار رفته و نتایج قابل قبولی را بعضا ارائه می‌کنند. اما قوانین تجربی و همچنین داده‌های استخراج شده از روش آزمون‌های غیرمخرب عمدتا دارای عدم قطعیت بالایی بوده و لذا منجر به ناتوانی روش‌های فازی کلاسیک می‌گردد که مبتنی بر در نظر گرفتن درجات تعلق دقیق و استفاده از توابع تعلق نوع-1 می‌باشند. بنابراین قادر به تخمین دقیق عمق تَرَک ناشناخته نبوده و همچنین در محیط های نویزی عملکرد مطلوبی نخواهند داشت. از این رو در این مقاله از سیستم منطق فازی نوع-2، که قابلیت تخصیص عدم قطعیت به قوانین و توابع عضویت در آن وجود دارد، جهت حل مسئله معکوس تخمین مشخصه عمق تَرَک استفاده شده است. همچنین در تعیین عمق تَرَک سطحی در قطعات فلزی از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری میدان ناشی از جریان متناوب استفاده شده است. در ادامه، نتایج آزمایشگاهی روش پیشنهادی با جدیدترین روش های رایج در شرایط مختلف نویز و شکل های مختلف تَرَک مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج نشان دهنده برتری روش ارائه شده نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

Crack Depth Profiling in Metallic Structures through ACFM Data using Type-II Fuzzy Logic System

Saeed Ahmadkhah Mozhdehi, Reza Hasanzadeh Pakrezaie*

Department of Electrical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
* P.O.B. 41635-3756, Guilan, Iran, hasanzadehpak@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 April 2017
Accepted 14 July 2017
Available Online 09 August 2017

Keywords:
Non-destructive testing
alternating current field measurement
inverse problem
type-2 fuzzy logic system

ABSTRACT

One of the major issues in the industry is inhomogeneity depth profiling in the metallic structures before they reach the border of demolition. Fuzzy logic based methodologies, due to their ability to describe the complex issues with empirical nature such as non-destructive testing, are used for this purpose and usually provide acceptable results. But empirical rules and also extracted data from non-destructive testing methods mainly have high degree of uncertainty and therefore Classical fuzzy methods, which are based on exact membership grades and Type-I membership functions, are incapable of dealing with them. Therefore, they cannot deal with noisy environments and also do not represent a good performance for accurate depth estimation of unknown cracks. In this paper, to allocate uncertainty to rules and membership functions, the type-II fuzzy logic system is used to solve the inverse problem of crack profile depth estimation. Also, Alternating Current Field Measurement (ACFM) signals are used for sizing the depth of crack profile. Then, experimental results of the proposed method are compared to the other state of the art methods in the presence of different level of noise and different types of cracks. The results show the superiority of the proposed method to the other methods.

1- مقدمه

تغییرات اثر بارگذاری در طول زمان می‌تواند باعث شروع و گسترش تَرَک‌های ناشی از خستگی[1] شود. تحت این بارگذاری‌ها تَرَک‌های حاصله، از نظر اندازه شروع به رشد کردن می‌کنند، در صورت رسیدن به اندازه بحرانی، ناپایداری در قطعه ایجاد می‌شود، که سبب شکست جزئی و یا حتی فروپاشی ساختار داخلی در قطعات فلزی می‌شود [1]. از این رو تشخیص تَرَک‌ها در قطعاتی با ساختار فلزی یکی از مسائل کاربردی در صنعت محسوب می‌شود [2].

تَرَک‌های ناشی از خستگی اغلب از سطح فلز شروع می‌شوند، زیرا سطح فلز نسبت به داخل آن تحت تنش بیشتری قرار می‌گیرد[3]. از جمله تکنیک های پرکاربرد الکترومغناطیسی در آزمون‌های غیرمخرب که برای تشخیص و اندازه عمق تَرَک‌های سطحی در ساختارهای فلزی به کار می‌روند، می‌توان به آزمون جریان گردابی[2] [4] و اندازه‌گیری میدان ناشی از جریان متناوب[1] اشاره

[1] Fatigue Cracks

[2] Eddy Current Testing

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Ahmadkhah Mozhdehi, R. Hasanzadeh Pakrezaie, Crack Depth Profiling in Metallic Structures through ACFM Data using Type-II Fuzzy Logic System, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 153-163, 2017 (in Persian)

کرد [5]. در این تکنیک‌ها سطح فلز، به وسیله‌ی جریان‌های گردابی که از طریق سیم‌پیچ حامل جریان متناوب القا شده است، بازرسی می‌شود. در تکنیک جریان گردابی، تشخیص و اندازه عمق تَرَک، از بررسی تغییرات مقاومت ظاهری سیم پیچ القایی نتیجه می‌شود؛ این در حالی است که در روش ACFM از یک حسگر میدان مغناطیسی برای محاسبه تغییرات میدان مغناطیسی در سطح فلز استفاده می‌شود [6]. جداسازی القاگر از حسگر در روش ACFM علاوه بر کاهش اثر بالازدگی[2] و ساده کردن طراحی، مزایایی چون امکان بررسی محدوده وسیعی از توزیع میدان مغناطیسی تولید شده با شکل دلخواهی از القاگر را داراست، که این امر روش مذکور را موردی مناسب برای تشخیص تَرَک‌های سطحی خواهد کرد [7-10]. با وجود مزیت‌های زیادی که روش ACFM دارد، اما حساسیت پایین به تَرَک‌های بزرگ و دشواری در ایجاد میدان یکنواخت از معایب این روش می‌باشد [11].

تخمین و اندازه‌گیری عمق و شکل تَرَک‌های سطحی به وسیله میدان حاصله از آن، در آزمون های غیر مخرب از جمله ACFM نیازمند حل مسئله معکوس می‌باشد. راه‌حل‌های ارائه شده برای حل مسئله معکوس به دو شاخه پدیدارشناختی[3] و غیرپدیدارشناختی[4] تقسیم می‌شوند. در روش‌های پدیدار شناختی مانند آنچه در [13,12] ارائه شده است، برای حل مسئله معکوس از مدل پیشرو[5] و یک حدس اولیه از شکل عمق تَرَک استفاده می‌کنند. حدس اولیه در یک فرآیند تکراری به طور مداوم اصلاح می‌شود، تا خطای بین میدان حاصل شده از تَرَک و میدان حاصل شده از مدل از مقدار مشخصی کمتر شود. اگرچه که این روش می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه کند، اما به دلیل فرآیند تکراری در حل مسئله که زمان محاسباتی بالایی را تحمیل سیستم می‌کند، نمی‌تواند در کاربردهای بلادرنگ مطلوب واقع شود [14-16]. از سوی دیگر روش‌های غیرپدیدارشناختی که بر پایه پردازش سیگنال استوار هستند، اقدام به تخمین عمق تَرَک می‌کنند [18,17]. از جمله روش‌های پرکاربرد در این شاخه می‌توان به شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی اشاره کرد.

در روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی، هدف از حل مسئله معکوس، به‌دست آوردن ضرایب مجهول (وزن ها و بایاس های) تابع تبدیل، در مرحله‌ای به نام آموزش و با استفاده از حجم مناسبی از بانک داده خواهد بود، که منجر به یافتن نگاشتی از فضای ورودی (میدان ناشی از تَرَک) به فضای خروجی (عمق تَرَک)، خواهد شد [19-21]. اگرچه شبکه‌های عصبی بدلیل سرعت بالا برای کاربردهای بلادرنگ مناسب می‌باشند، اما شامل عیوبی از جمله وابستگی بالا به داده‌هایی که در مرحله آموزش استفاده شده‌اند و همچنین در زمانی که به‌علت نویز یا توزیع غیرخطی میدان، همبستگی ضعیفی بین سیگنال دریافت شده از شکل تَرَک و خود تَرَک وجود داشته باشد، در تخمین عمق تَرَک ناشناخته و خارج از محدوده بانک داده بسیار ضعیف عمل می‌کنند و نیازمند بانک داده‌ای با حجم بالا می‌باشند [2, 22]. از طرف دیگر به‌علت توانایی سیستم‌های فازی در توصیف مسائل پیچیده و فرموله کردن دانش بشری در مسائلی مانند تخمین عمق خرابی تَرَک‌ها که ماهیت تجربی دارند، قوانین فازی شرطی به شکل گسترده‌ای در زمینه روش‌های تشخیص خرابی به‌کار گرفته شده‌اند [24,23]. در روش‌های فازی، تجربیات یک فرد خبره از طریق منطق فازی در قالب‌های متغیرهای زبانی به منظور تخمین عمق و شکل تَرَک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در [24] روشی برای اندازه‌گیری محدوده‌ی وسیعی از تَرَک‌های شبه بیضوی[6] به‌وسیله‌ی تطبیق دادن آن‌ها به تعداد محدودی تَرَک از پیش تعیین شده ارائه شده است، در این روش سعی شده است که از خاصیت انطباق سیگنال‌های ACFM به صورت متغیرهای زبانی انقباض و انبساط در جریان آموزش استفاده شود.

در [25] دو روش برای یافتن نگاشتی از فضای ورودی، (میدان تَرَک) به فضای خروجی، (عمق تَرَک) پیشنهاد شده است. در این روش‌ها ابتدا نشان داده شده است که نگاشت بین داده‌های ACFM و شکل تَرَک با دقت مناسبی نگاشت سلبی[7] است، سپس در روش اول، با استفاده از الگوریتم تطابق فازی به یافتن پارامترهای مجهول موجود در نگاشت تعریف شده می‌پردازد. در روش دوم، با استفاده از تابع هدف Dave کارایی الگوریتم، در برابر داده‌های نویزی افزایش می‌یابد. در [26] با استفاده از سیستم مرتبه اول و دوم فازی علاوه بر تخمین عمق و شکل تَرَک‌ها، امکان اعلام بیشینه خطا برای کاهش دادن هزینه‌های محاسباتی نیز وجود دارد.

اگرچه تمامی روش‌های فازی مرور شده تاکنون در زمینه‌های کاربردی خود دقیق و قابل قبول هستند. اما از آن‌جایی که هدف، تشخیص عمق و شکل تَرَک‌های ناشناخته می‌باشد، بنابراین داده‌های آموزشی موجود در بانک داده لزوما ارتباط قطعی با شکل تَرَک ناشناخته ندارند. از طرف دیگر وجود نویز، همواره سبب کاهش قطعیت در داده‌ها می‌شود، لذا داده‌ها و به تبع آن قوانین فازی استخراج شده توسط این روش‌ها عدم قطعیت بالایی دارند. در نتیجه در روش‌های فازی موجود تخصیص توابع عضویت دقیق و با قطعیت حداکثر لزوما منجر به بهترین نتیجه نخواهد شد. در این مقاله کاستی‌های روش‌های موجود با استفاده از روش سیستم منطق فازی نوع-2[8]، که قابلیت تخصیص عدم قطعیت به قوانین و توابع عضویت در آن وجود دارد و می‌تواند مدل‌سازی دقیق‌تری از عدم قطعیت ارائه کند، می‌توان میزان تاثیرپذیری نتیجه حاصله به داده‌ها و قوانین را کنترل نمود و این انتظار وجود دارد که با استفاده از سیستم منطق فازی نوع-2 و در نظر گرفتن مجموعه‌های فازی نوع-2[9] به نتایجی به مراتب مطلوب‌تر از روش‌ها موجود دست یافت.

در ادامه مقاله، در بخش دوم به معرفی روش ACFM می‌پردازیم، در بخش سوم سیستم منطق فازی نوع-2 توضیح داده خواهد شد. در بخش چهارم به چگونگی شناسایی شکل و عمق تَرَک با استفاده از سیستم منطق فازی نوع-2 و ارزیابی آن می‌پردازیم. در بخش پنجم براساس سیستم طراحی شده، شبیه‌سازی‌ها انجام و نتایج به‌دست آمده در جداول و نمودارها گزارش می‌شود و نهایتا در بخش آخر نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

2- شمای کلی روش ACFM

"شکل 1" شمای کلی روش ACFM را نشان می‌دهد. در این مدل فرض می‌شود یک قطعه‌ی فلزی با ثابت هدایت σ و ثابت تراوایی μ، شامل یک تَرَک سطحی با شکل دلخواه به طول l و در راستای محور x می‌باشد. عمق تَرَک در راستای محور z عمود بر سطح فلز می‌باشد. همچنین برای ساده سازی بیشتر مسئله فرض می‌شود که دهانه تَرَک، g بسیار کوچکتر از عمق تَرَک، d و طول تَرَک است. میدان مغناطیسی به وسیله یک سیم پیچ حامل جریان متناوب با فرکانس مطلوب، f و دامنه‌ی I_m تولید می‌شود، در اثر حضور میدان، طبق

[1] Alternating Current Field Measurements (ACFM)
[2] Lift-off
[3] Phenomenological
[4] Non-phenomenological
[5] Forward model
[6] Semi-Elliptic
[7] Affine
[8] Type-2 Fuzzy Logic System (T2FLS)
[9] Type-2 Fuzzy Sets

قوانین الکترومغناطیسی، جریان گردابی شکل در سطح فلز ایجاد می‌شود که با میدان به وجود آورنده خود مخالفت می‌کند. میزان عمق نفوذ جریان گردابی در فلز با فرکانس القاگر، ثابت هدایت و ثابت تراوایی سطح رابطه عکس به صورت $\delta = 1/\sqrt{\pi f \sigma \mu}$ دارد که در مقایسه با عمق و طول تَرَک کوچکتر است. سیم لوله شامل چند دور سیم پیچ با مقطع مربعی و ابعاد w، t و L می‌باشد که با فاصله s از یکدیگر جدا شده اند. محور تقارن سیم لوله DD' در فاصله‌ی h موازی با سطح فلز قرار می‌گیرد. سنسور مغناطیسی یک سیم پیچ القائی است که به القاگر در راستای محور تقارنش CC' متصل می‌شود تا تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف تَرَک را که به دلیل تقابل جریان گردابی با تَرَک سطحی حاصل می‌شود، اندازه‌گیری کند [2]. به این ترتیب میدان ناشی از تَرَک در نقطه (x_s, y_s, z_s) بدست می‌آید.

از آنجا که در هوا، خارج از تَرَک و بالای سطح فلز، میدان مغناطیسی دیورژانس آزاد[1]، پیچش آزاد[2] و جریان هدایتی[3] برابر صفر است و در فرکانس های مورد نظر، جریان جابجایی[4] نیز صفر فرض می‌شود، میدان مغناطیسی H را می‌توان به شکل زیر از پتانسیل عددی مغناطیسی[5] ψ استخراج کرد

$$H = -\nabla\psi \tag{1}$$

می‌توان نشان داد که تبدیل فوریه دو بعدی پتانسیل عددی مغناطیسی به شکل زیر قابل محاسبه است [27].

$$\tilde{\tilde{\psi}}(\alpha,\beta,z) = \tilde{\tilde{\psi}}_i(\alpha,\beta,0)\mathrm{e}^{\gamma z} + \left(\frac{1-\frac{\mu_r}{k}\gamma}{1+\frac{\mu_r}{k}\gamma}\right)\tilde{\tilde{\psi}}_i(\alpha,\beta,0)\mathrm{e}^{-\gamma z} + \frac{\left(\frac{2\mu_r}{k}+g\right)}{\gamma\left(1+\frac{\mu_r}{k}\gamma\right)}\tilde{H}_z(\alpha,0)\mathrm{e}^{-\gamma z} \tag{2}$$

که در آن $\tilde{\tilde{\psi}}_i$ تبدیل فوریه دو بعدی تابع پتانسیل ناشی از میدان القاگر در غیاب فلز تحت بررسی، $\gamma = \sqrt{\alpha^2+\beta^2}$ ، $k = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_r\sigma}$ و در نهایت α و β به ترتیب متغیرهای تبدیل فوریه متناظر با x و y خواهد بود. در رابطه (2) $\tilde{\tilde{\psi}}_i$ کمیتی وابسته به القاگر و $\tilde{H}_z(\alpha,0)$ تبدیل فوریه یک بعدی جزء طبیعی میدان مغناطیسی در دهانه تَرَک است. $\tilde{H}_z(\alpha,0)$ از حل معادله لاپلاس و شرایط مرزی حاکم بر مسئله به دست می‌آید [27]. در ادامه با محاسبه $\tilde{\tilde{\psi}}_i(0)$ طبق [28] برای یک سیم‌پیچ مستطیلی با ابعاد مشخص شده در "شکل 1" می‌توان تبدیل فوریه دو بعدی پتانسیل عددی مغناطیسی را محاسبه کرد. برای به دست آوردن ψ از رابطه عکس تبدیل فوریه دو بعدی به شکل زیر می‌توان استفاده کرد.

$$\psi(x,y,z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\tilde{\tilde{\psi}}(\alpha,\beta,z)\mathrm{e}^{j(\alpha x+\beta y)}d\alpha d\beta \tag{3}$$

در نهایت به کمک روابط (1) و (3) میدان مغناطیسی H در همه نقاط بالای فلز قابل محاسبه خواهد بود.

3- سیستم منطق فازی نوع-2

مهمترین خاصیتی که سبب تمایز و برتری سیستم‌های منطق فازی به عنوان یک تقریب‌گر عمومی می‌شود، توانایی بالای این سیستم‌ها در توصیف و مدل کردن عدم دقت و عدم قطعیت، به وسیله اختصاص دادن هر نقطه به یک مجموعه فازی که مقداری در بازه‌ی [0,1] دارد، می‌باشد [29]. اما قوانین تجربی حاصل از روش آزمون‌های غیرمخرب عمدتا دارای عدم قطعیت بالایی

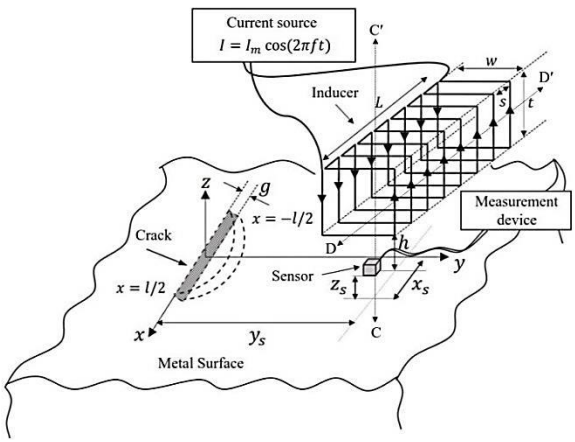

Fig. 1 Schematic diagram of the ACFM method [2]

شکل 1 دیاگرام روش ACFM [2]

می‌باشند، همچنین وجود نویز که یکی از منابع اصلی عدم قطعیت در این آزمون‌ها می‌باشد، ممکن است سبب شود تا داده‌های نویزی برای تنظیم پارامترهای سیستم فازی کلاسیک که آن را سیستم منطق فازی نوع-1[6] می‌نامیم، استفاده شود. از آن‌جایی که این عدم قطعیت‌ها در سیستم فازی کلاسیک نمی‌تواند به طور کامل مدل شود؛ این سیستم در تخمین دقیق عمق و شکل خرابی‌ها علیرغم نتایج مناسب [23-26] نمی‌تواند به حداکثر دقت خود برسد.

مفهوم مجموعه‌های فازی نوع-2 توسط زاده[7] در سال 1975 به عنوان تعمیمی از مفهوم یک مجموعه فازی معرفی شد [30]. از آن پس، برای تمایز بین مجموعه فازی و مجموعه‌های فازی نوع-2، به مجموعه‌های فازی قبلی، به طورمعمول مجموعه های فازی نوع-1[8] می‌گویند. سیستم‌های فازی نوع-1 که توابع عضویت آن‌ها مجموعه‌های فازی نوع-1 است، قادر به رسیدگی مستقیم به عدم قطعیت‌های موجود در قوانین نخواهند بود، زیرا توابع عضویت با درجه تعلق دقیق توانایی محدودی در کاهش اثر عدم قطعیت در قوانین فازی را دارند، اما سیستم های فازی نوع-2، که توابع عضویت مقدم[9] یا تالی[10] در آن‌ها مجموعه‌های فازی نوع-2 هستند، می‌توانند به چنین عدم قطعیت‌هایی رسیدگی کنند به این ترتیب، مجموعه‌های فازی نوع-2 در کاهش اثر عدم قطعیت در قوانین فازی بهتر عمل می‌کنند. علاوه بر کاهش اثر عدم قطعیت در قوانین فازی، به علت فازی بودن توابع عضویت در مجموعه‌های فازی نوع-2، امکان مدل کردن عدم قطعیت های زبانی و عدم قطعیت موجود در داده‌ها به نحو موثری بهبود پیدا کرده است.[31] در نتیجه سیستم‌های منطق فازی نوع-2 عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های منطق فازی نوع-1 در بسیاری از موارد دارند [32].

3-1- مقایسه بلوک دیاگرام سیستم‌های فازی نوع-1 و نوع-2

مشابه با یک سیستم فازی نوع-1، "شکل2"، یک سیستم فازی نوع-2 که در "شکل 3" نشان داده شده است شامل فازی ساز، قوانین، موتور استنتاج فازی و پردازنده خروجی است. تفاوت ساختاری مهم، وجود بلوک پردازش خروجی در سیستم منطق فازی نوع-2 به جای بلوک نافازی ساز در سیستم منطق

[1] Divergence-free
[2] Curl-free
[3] Conductive current
[4] Displacement current
[5] Scalar magnetic potential

[6] Type-1 Fuzzy Logic System (T1FLS)
[7] Zadeh
[8] Type-1 Fuzzy Logic Sets
[9] Antecedent
[10] Consequent

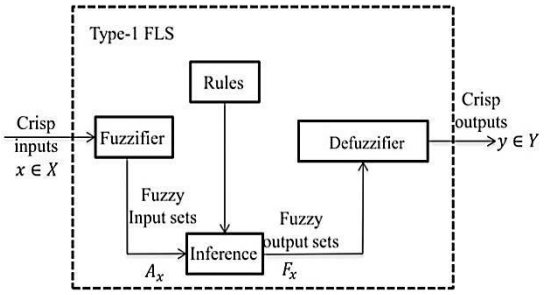

Fig. 2 Schematic diagram of Type-1 FLS

شکل 2 بلوک دیاگرام سیستم فازی نوع-1

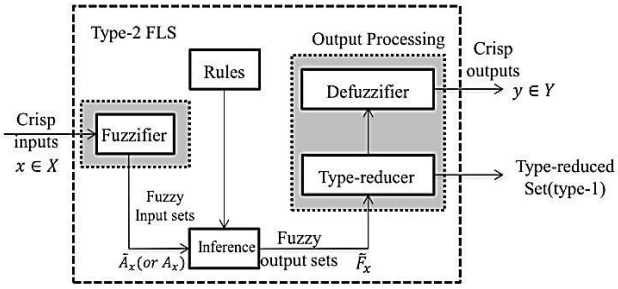

Fig. 3 Schematic diagram of Type-2 FLS

شکل 3 بلوک دیاگرام سیستم فازی نوع-2

فازی نوع-1 می‌باشد. این بلوک حاوی کاهنده نوع[1] و نافازی‌ساز است. کاهنده نوع عملیاتی است که مجموعه فازی نوع-2 را به مجموعه فازی نوع-1 تبدیل می‌کند. و پس از آن برای رسیدن به یک خروجی عددی، عملیات نافازی سازی روی مجموعه کاهش نوع یافته انجام می‌شود [31].

3-2- مجموعه‌های منطق فازی نوع-2

مجموعه فازی نوع-2، $\tilde{A}$ را به صورت رابطه (4) یا (5) نمایش می‌دهند.

$$\tilde{A} = \{((x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u)) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\},$$

$$0 \le \mu_{\tilde{A}}(x,u) \le 1 \tag{4}$$

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x,u) / (x,u) \quad J_x \subseteq [0,1] \tag{5}$$

در این روابط X مجموعه مرجع، x متغیر اولیه یا متغیر اصلی، $J_x \subseteq [0,1]$ مجموعه‌ای از درجات عضویت اولیه، u متغیر ثانویه و $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ درجه عضویت ثانویه است. هرگاه همه درجات عضویت ثانویه در یک مجموعه فازی نوع-2 برابر یک باشد، به آن، مجموعه منطق فازی نوع-2 بازه‌ای (IT2FLS)[2] می گویند. در غیر این صورت، به آن مجموعه فازی، مجموعه منطق فازی نوع-2 کلی[3] [33] گفته می‌شود.

تابع عضویت یک مجموعه فازی نوع-2، سه‌بعدی است [34]. برای داشتن تجسمی بهتر از آن کشیدن دامنه دو بعدی که به آن ردپای عدم قطعیت (FOU)[4] تابع عضویت نوع-2 می‌گویند، مفید واقع می‌شود. ردپای عدم قطعیت به‌وسیله یک تابع عضویت بالایی(UMF)[5] $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ و پایینی (LMF)[6] $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ محدود شده است. تابع عضویت بالا، زیر مجموعه‌ای است که شامل حداکثر درجه عضویت و تابع عضویت پایینی، زیر مجموعه‌ای است که شامل

[1] Type-reducer
[2] Interval Type-2 Fuzzy Logic Sets (IT2FLS)
[3] General Type-2 Fuzzy Logic Sets
[4] Footprint Of Uncertainty (FOU)
[5] Upper Membership Function (UMF)
[6] Lower Membership Function (LMF)

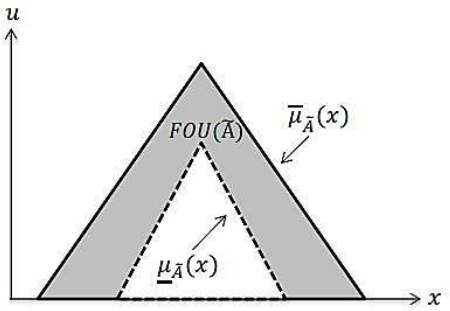

Fig. 4 Footprint Of Uncertainty for IT2FS $\tilde{A}$

شکل 4 ردپای عدم قطعیت برای مجموعه فازی نوع-2 بازه ای $\tilde{A}$

حداقل درجه عضویت از ردپای عدم قطعیت می‌باشد [31].

دامنه عضویت‌های اولیه J_x، از یک مجموعه فازی $\tilde{A}$، به وسیله ردپای عدم قطعیت، به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود.

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \tag{6}$$

FOU مجموعه فازی نوع-2 بازه‌ای $\tilde{A}$ به صورت شماتیک در "شکل 4" نشان داده شده است، که می‌تواند توسط حد بالا و پایین تابع عضویت آن به طور کامل شرح داده شود. این به منزله یک ساده‌سازی قابل توجه در مقایسه با زمانی است که مجموعه‌های فازی، مجموعه‌های فازی نوع-2 کلی می‌باشند، در این‌جا، تنها دو تابع عضویت فازی نوع-1 (حد بالا و پایین FOU) موردنیاز است تا به‌طور کامل مجموعه فازی نوع-2 بازه ای را توصیف کند. این ساده‌سازی، عملیات اجتماع و اشتراک را در موتور استنتاج فازی را ساده‌تر می‌کند. عملیات اجتماع و اشتراک بازه‌ای منحصرا روی FOU از مجموعه‌های فازی نوع-2 بازه‌ای کار می‌کنند، در نتیجه باعث از بین بردن بار محاسباتی‌ای که در ارتباط با پردازش مجموعه‌های فازی نوع-2 کلی وجود دارد، می‌شود [35].

4- شناسایی شکل و عمق تَرَک با استفاده از سیستم منطق فازی نوع-2 بازه‌ای

برای حل مسئله معکوس تخمین عمق و شکل تَرَک‌های سطحی، با استفاده از سیستم منطق فازی نوع-2 بازه‌ای، از یک سیستم یادگیری مشابه "شکل 5" بهره می‌بریم. در این شکل $H_{c,x_n}^k, n = 1,2,\dots N$ نمونه‌های سیگنال میدان ACFM تَرَک k ام $(k = 1,2,\dots,K)$ و z_n^k نیز نمونه‌های تَرَک متناظر هستند.

با توجه به سیستم چند ورودی- چند خروجی فرض می‌کنیم، سیستم منطق فازی نوع-2، دارای M قانون باشد، آنگاه قانون i ام آن را طبق رابطه (7) نمایش می‌دهیم.

قانون i ام: اگر H_{c,x_1}^k، $\tilde{F}_1^i$ و H_{c,x_2}^k، $\tilde{F}_2^i$ و ... و H_{c,x_p}^k، $\tilde{F}_p^i$ باشد، آنگاه z_1^k، $\tilde{G}_1^i$ و z_2^k، $\tilde{G}_2^i$ و ... و z_p^k، $\tilde{G}_p^i$ است، که $(i = 1,\dots,M)$ می باشد.

(7)

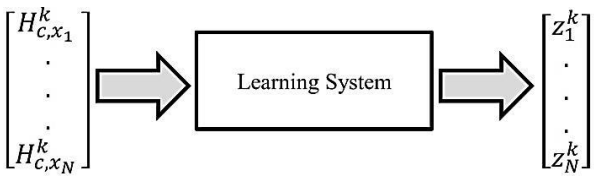

Fig. 5 Proposed learning system for solving inverse problem

شکل 5 سیستم یادگیری پیشنهادی برای حل مسئله معکوس

که $\tilde{G}_j^i$ و $\tilde{F}_j^i$ $(j = 1,2,\dots,p)$ به ترتیب مجموعه‌های j ام فازی نوع-2، مقدم و تالی از قانون i ام هستند. برای به‌دست آوردن یک مقدار خروجی عددی، از مجموعه فازی $\tilde{B}$، نتیجه خروجی سیستم منطق فازی نوع-2 بازه ای، ابتدا کاهش نوع و سپس نافازی‌سازی می‌شود. جهت کاهش نوع مجموعه فازی نوع-2 بازه‌ای $\tilde{B}$، از رابطه مرکز ثقل به صورت معادله (8) استفاده می‌گردد [36].

$$C_{\tilde{B}}^k = \int_{\theta_1 \epsilon J_{c_1^k}} \dots \int_{\theta_Z \epsilon J_{c_T^k}} 1 / \frac{\sum_{t=1}^{T} c_t^k \theta_t}{\sum_{z=1}^{Z} \theta_t} \tag{8}$$

که θ_t $(t = 1,\dots,T)$ مجموعه فازی نوع-1 جاساز شده در مجموعه فازی خروجی $\tilde{B}$ هستند. مرکز ثقل $C_{\tilde{B}}^k$ یک مجموعه بازه‌ای نوع-1 است، که می - تواند به طور کامل توسط نقاط پایانی چپ و راست خودش که به ترتیب c_l^k و c_r^k نام دارند، طبق روابط (9) و (10) محاسبه شود.

$$c_{lj}^k(\tilde{B}) = \frac{\sum_{t=1}^{L} c_t^k \bar{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k) + \sum_{i=L+1}^{T} c_t^k \underline{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k)}{\sum_{t=1}^{L} \bar{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k) + \sum_{t=L+1}^{T} \underline{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k)} \tag{9}$$

$$c_{rj}^k(\tilde{B}) = \frac{\sum_{t=1}^{R} c_t^k \underline{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k) + \sum_{i=R+1}^{T} c_t^k \bar{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k)}{\sum_{t=1}^{R} \underline{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k) + \sum_{t=R+1}^{T} \bar{\mu}_{\tilde{B}}(c_t^k)} \tag{10}$$

نقاط مهم L , R توسط الگوریتم کارنیک- مندل[1] بدست می‌آید [37]. با استفاده از مقادیر مرزی $C_{\tilde{B}}^k$ مقدار نهایی غیر فازی شده c_j^k به صورت رابطه (11) به دست می‌آید.

$$c_j^k = f(H_{cx_j}^k) = (c_{lj}^k + c_{rj}^k)/2 \tag{11}$$

4-1- الگوریتم تنظیم پارامترهای روش پیشنهادی

برای شناسایی شکل و عمق تَرَک‌های سطحی دلخواه، براساس زوج‌های ورودی-خروجی نشان داده شده در "شکل 5"، یک IT2FLS با خروجی (11) طوری طراحی می‌کنیم تا تابع خطا، $RMSD_k$ طبق رابطه (12) حداقل شود.

$$RMSD_k = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{n}(c_m^k - \hat{c}_m^k)^2}{\sum_{m=1}^{n}(c_m^k)^2}} \times 100 \tag{12}$$

شاخص جذر میانگین مربعات انحراف[2]، $RMSD_k$ برای بیان درصد اختلاف بین دو بردار به کار می‌رود [17]. که در آن $\hat{c}_m^k$ عمق تخمین زده شده و c_m^k عمق حقیقی تَرَک k ام و همچنین n تعداد نمونه‌های بکار رفته در نمایش شکل عمق تَرَک و میدان متناظر با آن خواهد بود. که در روش پیشنهادی، از $n = 21$ نمونه متوالی میدان ACFM حاصل از تَرَک استفاده می‌شود.

با توجه به K نمونه آموزشی پارامترهای طراحی را به‌روزرسانی می‌کنیم به طوری که تابع خطا به حداقل مقدار خود برسد. روش کلی برای انجام این کار به صورت زیر است.

1)مقداردهی اولیه تمامی پارامترها از جمله پارامترهای موجود در توابع عضویت مقدم و تالی (حد بالا و پایین توابع عضویت ورودی و خروجی را ثابت در نظر می‌گیریم)

2) تنظیم شمارنده‌ی نمونه داده آموزشی $k = 1$

3) اعمال $n \times 1$ ورودی H_{c,x_n}^k به IT2FLS و محاسبه درجه شلیک کلی برای هر قاعده و تعیین توابع عضویت فعال برای هر جز از H_{c,x_n}^k

4) محاسبه c_{lj}^k و c_{rj}^k برای هر جز از ورودی

5) محاسبه خروجی نهایی طبق رابطه (11)

6) تنظیم پارامترها در توابع عضویت فعال با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات[3] با توجه به تابع خطا

7) قرار دادن $k = k + 1$، اگر $k > K$ توقف کن. در غیر این‌صورت به مرحله 3 برو

از آن‌جایی که در عمل ایجاد تَرَکی به شکل و عمق دلخواه در قطعات فلزی بسیار مشکل خواهد بود و همچنین ثابت شده است که اشکال بیضوی چند کوهانه می‌توانند تخمین مناسبی برای شکل تَرَک باشند به این منظور از یک تابع تحلیلی که به صورت مجموعه‌ای از هارمونیک‌های سینوسی می‌باشد برای تولید تَرَک‌ها با اشکال مختلف استفاده می‌شود [38]. سپس برای هر تَرَک با استفاده از شبیه‌سازی مدل تئوری مطرح شده در [39,27] سیگنال خروجی پروب ACFM را بدست می‌آوریم. دو مثال از سیگنال ACFM حاصل از دو تَرَک متفاوت در "شکل 6" و تَرَک متناظر آن ها در "شکل 7" نشان داده شده است.

4-2- بررسی تغییرات حدود توابع عضویت بالا و پایین

پس از آموزش، و مشخص شدن مکان قرار گیری توابع عضویت برای بررسی تاثیر تغییرات حدهای بالا و پایین توابع عضویت و همچنین برای رسیدن به کمترین خطای ممکن، جداول 1 و 2 بدست می‌آیند. در جدول 1 تعداد تَرَک

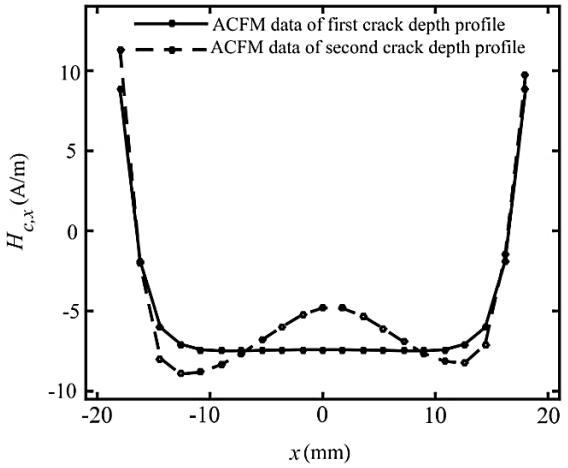

Fig. 6 Two different cracks of ACFM data

شکل 6 داده‌های ACFM دو تَرَک متفاوت

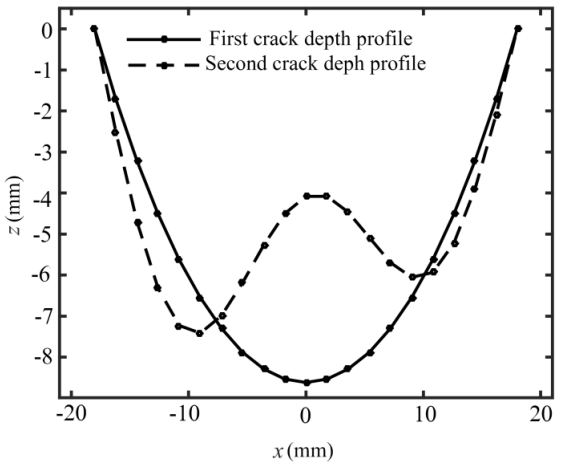

Fig.7 Their corresponding crack depth profiles

شکل 7 شکل عمق تَرَک های متناظر آن‌ها

[1] Karnik-Mendel Algorithm
[2] Root Mean Square Deviation
[3] Particle Swarm Optimization Algorithm

های استفاده شده 12 تَرَک می باشد، رنج تغییرات حد پایین توابع عضویت از 0.1 تا 0.9 با گام 0.1، و همچنین دو مقدار 0.01 و 0.99 می‌باشد. رنج تغییرات حد بالای توابع عضویت نیز به همین ترتیب و با این شرط که حد بالا نمی-تواند از حد پایین کمتر باشد در نظر گرفته شده است. در نتیجه کل حالات ممکن 3125 حالت می‌باشد که با توجه به کمترین خطا برای مقادیر مختلف حدود توابع عضویت، جدول 1 کامل شده است. پس از تکمیل شدن جدول، نتایج سطر ششم با داشتن کمترین خطا، پررنگ شده است.

در جدول 2 تعداد تَرَک‌های استفاده شده5 تَرَک می‌باشد. کل حالات بررسی شده مانند جدول1 می‌باشد. پس از تکمیل جدول، نتایج سطر آخر با داشتن کمترین خطا پررنگ شده است.

از بررسی جداول 1 و 2 با توجه به میانگین کمترین خطا *%RMSD* می‌توان به این نتیجه رسید که در حالتی که تعداد بیشتری تَرَک، با پروفایل های پیچیده و عمق‌های مختلف در بانک داده وجود دارد، به همان نسبت میزان عدم قطعیت بیشتری همراه داده‌ها و قوانین تجربی استفاده

جدول 1 ارزیابی تغییرات حدود توابع عضویت بالا و پایین زمانی که تعداد 12 داده در مرحله آموزش می‌باشد

Table 1 Evaluation of changes of UMF and LMF when the number of training data is 12

میانگین کمترین	خروجی		ورودی	
خطا *%RMSD*	UMF	LMF	UMF	LMF
0.90974	0.1	0.01	0.1	0.01
0.88732	0.2	0.1	0.2	0.1
0.88731	0.3	0.2	0.4	0.2
0.88727	0.5	0.3	0.6	0.3
0.88729	0.7	0.2	0.5	0.4
0.88725	0.7	0.5	0.9	0.5
0.88729	0.9	0.4	1	0.6
0.88729	0.9	0.4	1	0.7
0.88729	0.9	0.4	1	0.8
0.88729	0.9	0.4	1	0.9
0.88729	0.9	0.4	1	0.99

جدول 2 بررسی تغییرات حدود توابع عضویت بالا و پایین زمانی که تعداد 5 داده در مرحله آموزش می‌باشد

Table 2 Evaluation of changes of UMF and LMF when the number of training data is 5

میانگین کمترین	خروجی		ورودی	
خطا *%RMSD*	UMF	LMF	UMF	LMF
0.79797	0.1	0.01	0.1	0.01
0.74705	0.2	0.1	0.2	0.1
0.74470	0.3	0.2	0.3	0.2
0.74403	0.4	0.3	0.4	0.3
0.74375	0.5	0.4	0.5	0.4
0.74360	0.6	0.5	0.6	0.5
0.74350	0.6	0.5	0.7	0.6
0.74344	0.7	0.6	0.8	0.7
0.74340	0.8	0.7	0.9	0.8
0.74338	0.9	0.8	1	0.9
0.74327	1	0.9	1	0.99

شده در مرحله آموزش موجود است، در نتیجه IT2FLS سعی می‌کند برای رسیدن به بهترین عملکرد، عدم قطعیت بیشتری برای توابع عضویت ورودی و خروجی در نظر بگیرد. رفته رفته با کاهش تَرَک‌ها، همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، وقتی که از تعداد تَرَک‌ها با پروفایل‌های پیچیده کم می‌شود، به همان نسبت از میزان عدم قطعیت در داده‌ها و قوانین تجربی کاسته می‌شود، در نتیجه سیستم با یک عدم قطعیت کمتر سعی می‌کند به نتیجه دلخواه برسد. به این ترتیب از آنجایی که هدف ما تخمین شکل و عمق تَرَک ناشناخته می‌باشد، و این تَرَک لزوما دارای پروفایلی ساده و حتی مشابه با تَرَک‌هایی که در مرحله آموزش استفاده شده است، نخواهد بود. در نتیجه با توجه به اینکه در جدول 1 از تعداد بیشتری تَرَک با پروفایل پیچیده و با عمق‌های مختلف استفاده شده است، برای رسیدن به نتیجه بهتر در مواجهه با تَرَک ناشناخته و خارج از محدوده بانک داده، از سطری که در جدول 1پررنگ شده است برای تنظیم حد های بالا و پایین توابع عضویت ورودی و خروجی استفاده می‌کنیم.

5- نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در این مقاله، براساس پارامترهای راه‌اندازی روش ACFM که به صورت زیر است، گزارش می‌شود.

ابعاد القاگر یعنی L ، w و t به ترتیب برابر 10 mm ، 44 mm و 42mm می‌باشد و $s = 2.5$mm. القاگر در فاصله $h = 10$ mm در بالای سطح یک قطعه فلز آلومینیوم ($\mu_r = 1$ و $\sigma = 3.7 \times 10^7$S/m) قرار می‌گیرد و به‌وسیله یک منبع جریان متناوب با مشخصات، $I_m = 1$ A و $f =$ 20 kH تحریک می‌شود. سنسور به القاگر متصل است و میدان مغناطیسی، در حوالی یک تَرَک دلخواه را با دهانه‌ی $g = 0.2$ mm درموقعیت= y_s 0.5 mm و $z_s = 0.1$ mm اندازه گیری می‌کند.

5-1- پایگاه داده مورد استفاده برای انجام شبیه‌سازی‌ها

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و مقایسه آن با سایر روش‌ها از پایگاه داده‌ای مشابه با "شکل 8" داده‌های ACFM، که در "شکل 9"، تَرَک متناطرشان آمده است، استفاده می‌کنیم.

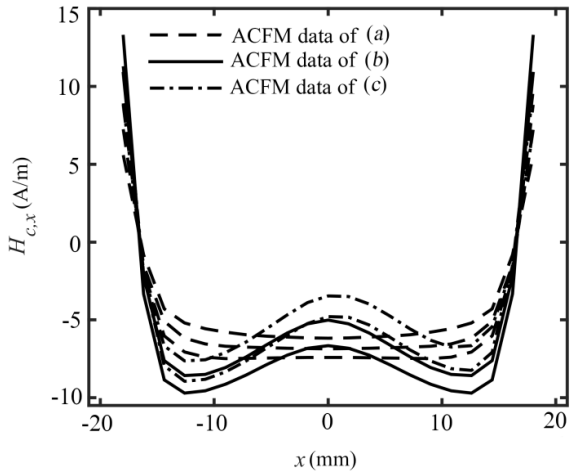

Fig. 8 Noiseless ACFM data, (a) single-hump crack depth profile, (b) symmetrical double-hump crack depth profile, (c) asymmetrical double-hump crack depth profile

شکل 8 داده های ACFM بدون نویز، (الف) پروفایل عمق ترک تک کوهانه، (ب) پروفایل عمق ترک دو کوهانه متقارن، (ج) پروفایل عمق ترک دوکوهانه نامتقارن

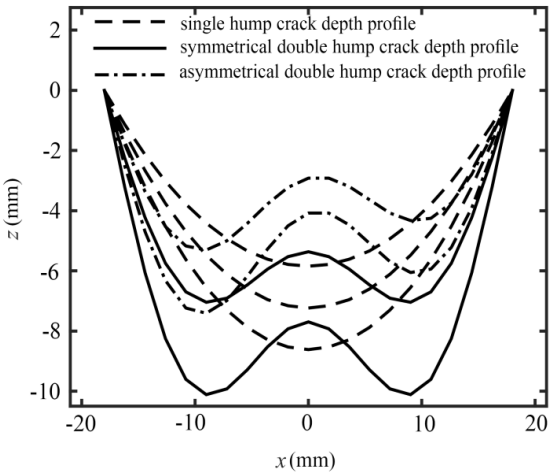

Fig. 9 Crack depth profiles of noiseless ACFM data

شکل9 شکل عمق تَرَک داده های ACFM بدون نویز

5-2- مقایسه دقت عددی روش پیشنهاد شده با دیگر روش ها

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی و سایر روش‌های موجود در حل مسئله معکوس، شبکه‌های عصبی [2] و روش فازی GFAA[1] و EFAA[2][24] درغیاب یک پایگاه داده حجیم و بهینه، ابتدا تعداد 12 داده آموزشی (شامل 4 تَرَک تک کوهانه، 4 تَرَک دوکوهانه متقارن و 4 تَرَک دوکوهانه نامتقارن) را در نظر می‌گیریم و سپس گام به گام تعداد داده ها را به 8 (شامل 3 تَرَک تک کوهانه، 3 تَرَک دو کوهانه متقارن و 2 تَرَک دو کوهانه نامتقارن) و در آخر به 5 (شامل 2 تَرَک تک کوهانه، دو تَرَک دو کوهانه متقارن و 1 تَرَک دو کوهانه نامتقارن) می‌رسانیم. هر چند می‌توان از تَرَک‌هایی با طول‌های مختلف در مرحله آموزش استفاده کرد اما به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در مواجهه با تَرَک‌هایی که از پایگاه داده مورد استفاده فاصله دارند، فقط از تَرَک‌هایی به طول 36 میلی‌متر در جریان آموزش استفاده می‌شود. پس از آموزش و در مرحله ارزیابی، از یک تَرَک دوکوهانه متقارن و یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن با عمقی خارج از پایگاه داده، استفاده می‌کنیم. به این منظور ابتدا خروجی شکل تَرَک‌ها را برای روش های مختلف در "شکل‌های 10 و 11" ارائه می‌کنیم و در گام بعد نتایج عددی حاصل شده را در جدول 3 گردآوری می‌کنیم. تعداد تَرَک‌های استفاده شده در مرحله آموزش برای "شکل‌های 10 و 11(الف-ب-ج)" به ترتیب 12، 8 و 5 در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که گفته شد، قوانین تجربی حاصل از روش آزمون‌های غیرمخرب اساسا دارای عدم قطعیت بالایی می‌باشند، به‌دلیل این‌که سیستم‌های فازی کلاسیک کنترلی روی عدم قطعیت قوانین حاصله ندارند نمی‌توانند با حداکثر دقت به تخمین عمق واقعی تَرَک بپردازند. همان‌طور که می‌توان دید نتایج روش پیشنهادی، به دلیل تخصیص عدم قطعیت به داده‌ها و قوانین در مقایسه با دیگر روش‌ها از برتری قابل ملاحظه‌ای برخوردار است و به نحو مطلوب‌تری عمل می‌کند. همان‌طور که مشخص است با کاهش داده‌ها در مرحله آموزش، دقت روش شبکه‌های عصبی کاهش محسوسی پیدا می‌کند، از این‌رو مشخص می‌شود که شبکه‌های عصبی برای اینکه بتوانند با دقت مطلوبی به تخمین عمق و شکل تَرَک بپردازند، نیازمند بانک داده‌ای حجیم می‌باشند. برای شکل تَرَک دوکوهانه متقارن زمانی که از تعدادی کافی، داده آموزشی استفاده شود، نتایج شبکه عصبی نزدیک به GFAA و EFAA است، اما با کاهش تعداد داده‌های آموزشی این اختلاف بیشتر می‌شود.

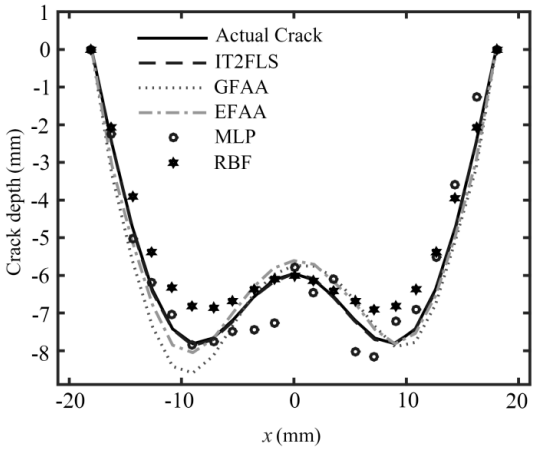

Fig. 10.(a) Depth estimated by different methods for a symmetrical double-hump crack with 12 training data

شکل 10 (الف) عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه متقارن با 12 داده آموزشی

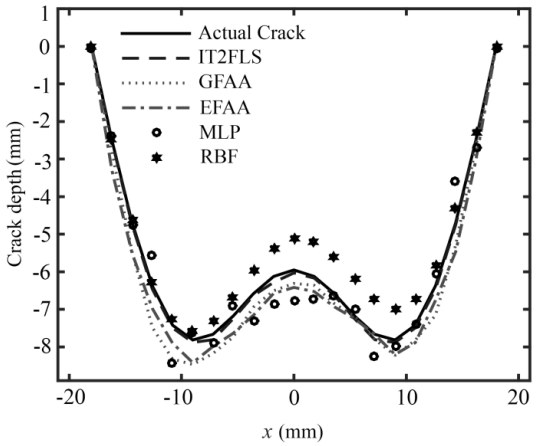

Fig. 10.(b) Depth estimated by different methods for a symmetrical double-hump crack with 8 training data

شکل 10 (ب) عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه متقارن با 8 داده آموزشی

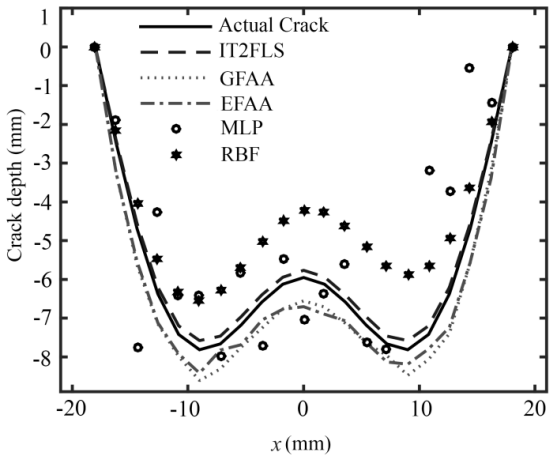

Fig. 10.(c) Depth estimated by different methods for a symmetrical double-hump crack with 5 training data

شکل 10 (ج) عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه متقارن با 5 داده آموزشی

[1] Generalized Fuzzy Alignment Algorithm (GFAA)
[2] Extended Fuzzy Alignment Algorithm (EFAA)

جدول 3 مقادیر *%RMSD* در تخمین عمق تَرَک پروفایل های نشان داده شده در شکل های 10 و 11

Table 3 *% RMSD* Values in the estimation of the crack depth profiles shown in fig. 10, 11

روش	شکل 10 (الف)	شکل 10 (ب)	شکل10 (ج)	شکل 11 (الف)	شکل 11 (ب)	شکل11 (ج)
IT2FLS	0.53	1.28	2.9	0.72	2.76	9.99
GFAA	8.73	8.42	10.75	8.77	12.01	14.21
EFAA	5.22	8	9.95	10.22	11.96	13.96
MLP	10.01	8.55	31.02	13.67	13.86	39.45
RBF	10.98	9.75	23.18	13.49	14.39	17.53

5-3- بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای تَرَکی با طول متفاوت از پایگاه داده و در شرایط نویزی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی و مقایسه آن در برابر دیگر روش‌ها در مواجهه با تَرَکی که از لحاظ طول با تَرَک های موجود در پایگاه داده متفاوت است، از یک تَرَک دو کوهانه نامتقارن به طول 45 میلی‌متر استفاده می‌کنیم. در "شکل 12" خروجی روش پیشنهادی و دیگر روش ها برای تَرَک مذکور آمده است. از سوی دیگر، سیگنالی که از خروجی حسگر دریافت می‌شود،

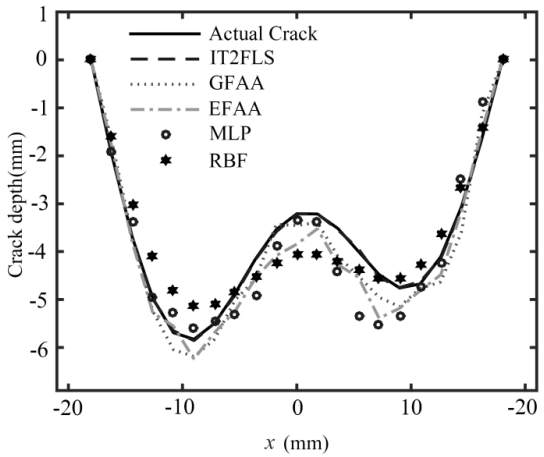

Fig. 11.(a) Depth estimated by different methods for an asymmetrical double-hump crack with 12 training data

شکل 11 (الف) عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن با 12 داده آموزشی

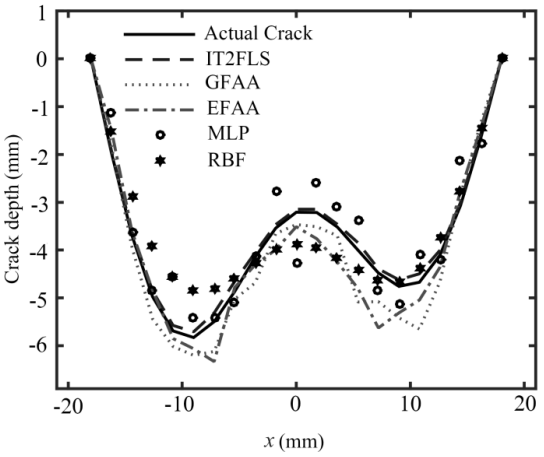

Fig. 11.(b) Depth estimated by different methods for an asymmetrical double-hump crack with 8 training data

شکل 11 (ب) عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن با 8 داده آموزشی

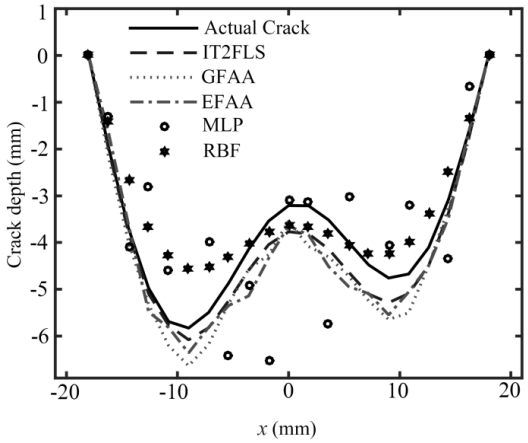

Fig. 11.(c) Depth estimated by different methods for an asymmetrical double-hump crack with 5 training data

شکل 11 (ج) عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن با 5 داده آموزشی

همواره علاوه بر اطلاعات اصلی شامل نویز نیز می‌باشد در نتیجه همواره نیاز است تا عملکرد سیستم در حضور نویز بررسی شود.

در روش ACFM، نویز به دلیل عوامل مختلفی از جمله لرزش دستگاه اندازه‌گیری، یکسان نبودن μ و σ در نقاط مختلف فلز و مشکل بالازدگی ایجاد می‌شود و عموما برای مدل کردن آن از نویز گوسی جمع‌شونده استفاده می‌شود [2]. بنابراین برای این‌که پایداری روش پیشنهادی را در محیط نویزی بررسی کنیم، از سیگنال ACFM تَرَک گفته شده استفاده می‌کنیم. برای بررسی بصری، خروجی روش پیشنهادی با نسبت سیگنال به نویز

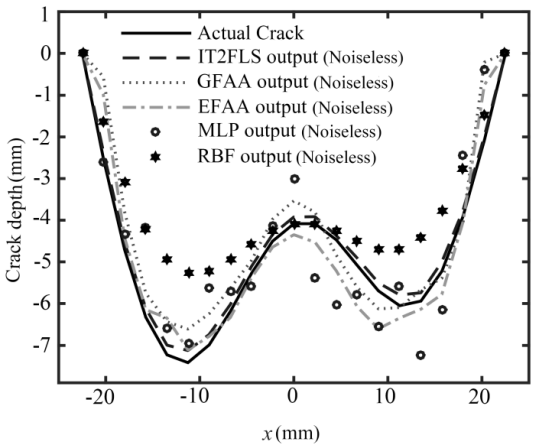

Fig. 12 Depth estimated by different methods for an asymmetrical double-hump crack with the length of 45 mm

شکل 12 عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن به طول 45 میلی‌متر

متفاوت در "شکل 13" و مقایسه آن با روش های دیگر در "شکل 14" نشان داده شده است. جهت بررسی عددی، نتایج در جدول 4 گزارش شده است.

بررسی مقادیر *RMSD* برای موارد نویزی در جدول 4 نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با شبکه‌های عصبی و دو روش GFAA و EFAA از پایداری بیشتری در حضور نویز برخوردار است.

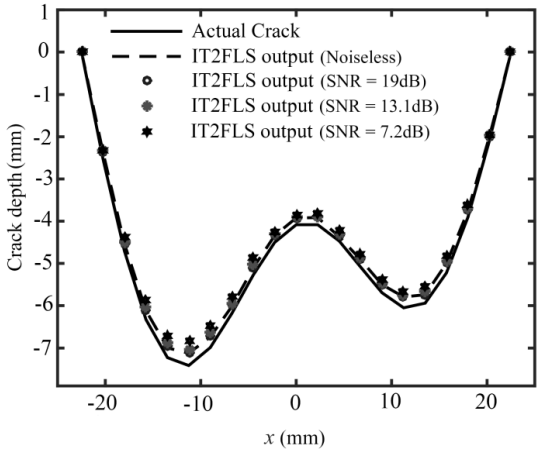

Fig.13 Depth estimated by proposed method for an asymmetrical double-hump crack with the length of 45 mm in the presence of noise

شکل 13 عمق تخمین زده شده توسط روش پیشنهادی برای یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن به طول 45 میلی‌متر در حضور نویز

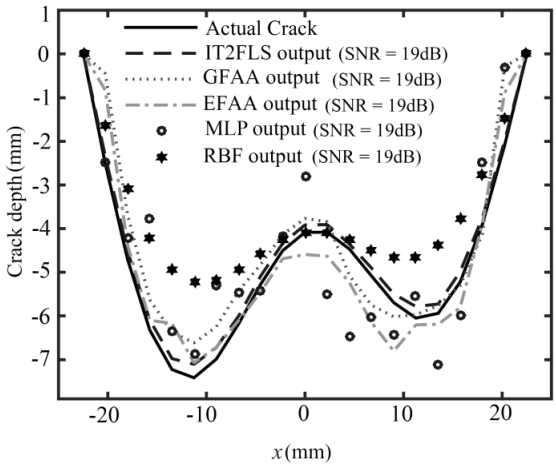

Fig.14 Depth estimated by different methods for an asymmetrical double-hump crack with the length of 45 mm

شکل 14 عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای یک تَرَک دوکوهانه نامتقارن به طول 45 میلی‌متر در حضور نویز

جدول 4 مقادیر *%RMSD* در تخمین عمق تَرَک دوکوهانه نامتقارن به طول 45 میلی‌متر در حضور نویز

Table 4 *%RMSD* Values in the estimation of the asymmetrical-hump crack depth with the length of 45 mm in the presence of noise

	SNR(dB)			
روش	∞	19	13.1	7.2
IT2FLS	3.6	3.82	4.78	6.88
GFAA	14.96	15.51	17.66	19.53
EFAA	12.36	13.41	14.33	17.13
MLP	20.24	22.66	24.51	28.51
RBF	24.39	24.56	26	26.81

5- 4- تخمین شکل تَرَک نامتعارف

به منظور مقایسه بیشتر عملکرد روش پیشنهادی، از آن برای بازسازی یک شکل تَرَک نامتعارف استفاده می‌کنیم. تَرَک نامتعارف تَرَکی است که سیگنال ACFM متناظر آن هیچ گونه شباهتی با داده‌های مورد استفاده برای آموزش ندارد. برای این منظور ابتدا تمامی روش‌ها با مجموعه‌ای از تَرَک‌ها شامل تَرَک‌های تک کوهانه، دوکوهانه متقارن و دوکوهانه نامتقارن آموزش داده می‌شوند و سپس سیگنال ACFM یک تَرَک سه کوهانه را به عنوان تَرَک ناشناخته در نظر می‌گیریم، تا خروجی مورد نظر را تخمین بزنند. "شکل 15" نتایج را برای این حالت نشان می‌دهد. مقادیر *RMSD* در جدول 5 گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی به دلیل مدل کردن بهتر عدم قطعیت برای داده‌ها و قوانین تجربی در مرحله آموزش نتیجه‌ای به مراتب بهتر نسبت به GFAA و EFAA و شبکه‌های عصبی از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت شبکه‌های عصبی به‌دلیل وابستگی بیش از حد به داده‌های مرحله آموزش، عملکرد ضعیفی در تخمین شکل و عمق تَرَک نامتعارف از خود نشان می‌دهند.

6- نتیجه گیری

در این مقاله، از یک سیستم منطق فازی نوع-2 برای شناسایی شکل و عمق تَرَک در قطعات فلزی با استفاده از داده‌های حاصل از روش ACFM استفاده شده است. سیستم منطق فازی نوع-2 به دلیل استفاده از مجموعه‌های فازی نوع-2 علاوه بر کاهش اثر عدم قطعیت در قوانین تجربی استخراج شده از روش آزمون‌های غیرمخرب، این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان به نحو

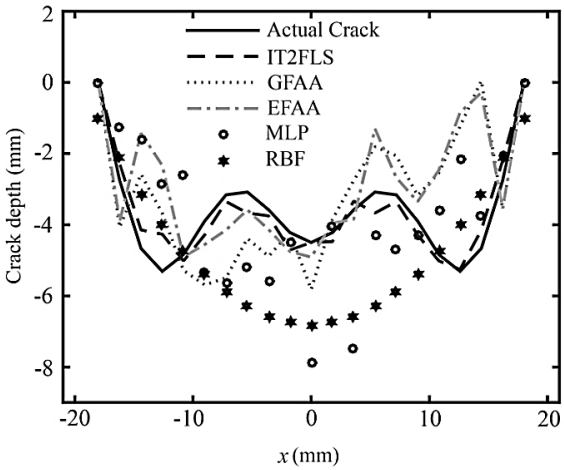

Fig.15 Depth estimated by different methods for anomaly triple-hump crack

شکل 15 عمق تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف برای تَرَک سه کوهانه نامتعارف

جدول 5 مقادیر *%RMSD* در تخمین عمق تَرَک سه کوهانه نامتعارف

Table 5 *%RMSD* Values in the estimation of the anomaly triple-hump crack depth

روش	*%RMSD*
IT2FLS	10.85
GFAA	47.89
EFAA	48.09
MLP	51.42
RBF	52.94

موثرتری عدم قطعیت‌های زبانی و عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها را که می‌تواند ناشی از نویز باشد، مدل کرد. در شرایط نویزی امکان تعیین دقیق درجات عضویت برای مجموعه‌های فازی وجود ندارد، در نتیجه استفاده از مجموعه‌های فازی نوع-2 این امکان را فراهم نمود تا با در نظر گرفتن حد بالا و پایین برای توابع عضویت بتوانیم پایداری سیستم را در مقابل نویز افزایش دهیم. استفاده از قوانین تجربی به همراه در نظر گرفتن عدم قطعیت برای آن‌ها سبب شد تا روش پیشنهادی در تعداد کمتر تَرَک موجود در پایگاه داده نسبت به روش‌های دیگر، شبکه‌های عصبی و دو روش GFAA و EFAA از برتری قابل ملاحظه‌ای برخوردار باشد. همچنین برای این‌که تعمیم‌پذیری مدل پیشنهادی بررسی شود، از میدان یک تَرَک سه کوهانه که در بانک داده آموزشی موجود نیست، استفاده شده، همان‌طور که از نتایج جدول 5 مشخص شد، روش پیشنهادی با خطایی به مراتب کمتر نسبت به سایر روش‌ها توانست شکل و عمق تَرَک نامتعارف (ناشناخته) را تخمین بزند. به طورکلی با تنظیم پارامترهای عدم قطعیت برای هرکدام از قوانین موجود در پایگاه داده، مدل پیشنهادی می‌تواند هر شکلی از تَرَک، که به عنوان تَرَک نامتعارف در نظر گرفته شود را با دقت مناسبی تخمین بزند.

نتایج مطلوب روش پیشنهادی در شرایط عدم قطعیت بالا نشان دهنده‌ی بازدهی بالاتر IT2FLS نسبت به روش‌های فازی کلاسیک می‌باشد. اما سیستم‌های فازی نوع-2 کلی به‌دلیل استفاده از مجموعه‌های فازی کلی می‌توانند عدم قطعیت‌های پیچیده‌تر را نیز مدل کنند، پس ظرفیت بیشتری نسبت به IT2FLS برای مقابله با عدم قطعیت‌ها دارند. اما همان‌طور که اشاره شد، پردازش مجموعه‌های فازی کلی زمان محاسباتی بالایی را نیاز دارند که این امر سبب می‌شود که در کاربردهای بلادرنگ مطلوب نباشند، بنابراین استفاده از روش‌هایی که می‌تواند پیچیدگی محاسباتی مربوط به پردازش مجموعه‌های فازی کلی را کاهش دهد، تا بتوان در کاربردهای بلادرنگ از جمله روش‌های آزمون غیرمخرب استفاده کرد موضوع تحقیق و مطالعات آینده خواهد بود

7- فهرست علایم

$\tilde{A}$	مجموعه منطق فازی نوع-2 بازه‌ای
$\tilde{B}$	مجموعه منطق فازی نوع-2 بازه‌ای خروجی
$C_{\tilde{B}}$	مرکز ثقل مجموعه فازی $\tilde{B}$
c_r	نقطه پایانی سمت راست مجموعه بازه‌ای $C_{\tilde{B}}$
c_l	نقطه پایانی سمت چپ مجموعه بازه‌ای $C_{\tilde{B}}$
c_m	عمق واقعی تَرَک
$\hat{c}_m$	عمق تخمین زده شده تَرَک
d	عمق تَرَک
f	فرکانس منبع جریان
g	دهانه تَرَک
H_{c,x_n}^k	نمونه n ام میدان از تَرَک k ام
I_m	دامنه سیگنال منبع جریان
J_x	مجموعه درجات عضویت اولیه
l	طول تَرَک
u	متغیر ثانویه
X	مجموعه مرجع
x	متغیر اولیه (اصلی)
z_n^k	نمونه عمق متناظر با H_{c,x_n}^k
(x_s, y_s, z_s)	مختصات محل نمونه برداری
$\mu_{\tilde{A}}(x,u)$	مجموعه درجات عضویت ثانویه
$\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$	تابع عضویت بالایی
$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$	تابع عضویت پایینی

علایم یونانی

δ	عمق نفوذ جریان گردابی
μ	ثابت تراوایی
σ	ثابت هدایت

8- مراجع

[1] H. A. Richard, M. Sander, *Fatigue Crack Growth*, pp. 27-30, Berlin, Springer, 2016.

[2] M. Ravan, S. H. H. Sadeghi, R. Moini, Neural network approach for determination of fatigue crack depth profile in a metal, using alternating current field measurement data, *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 32-38, 2008.

[3] D. H. Michael, A. M. Lewis, M. McIver, R. Collins, Thin-skin electromagnetic fields in the neighbourhood of surface-breaking cracks in metals, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 434, No. 1892, pp. 587-603, 1991.

[4] A. J. Zaman, C. G. Gardner, S. A. Long, Change in impedance of a single-turn coil due to a flaw in a conducting half space, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 3, No. 1, pp. 37-43, 1982.

[5] S. H. H. Sadeghi, D. Mirshekar-Syahkal, A new technique for sizing cracks in metals, utilizing an induced surface magnetic field, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pp. 593-600, Boston, MA: Springer US, 1990.

[6] A. Akbari-Khezri, S. H. H. Sadeghi, R. Moini, Field distribution around surface cracks in metallic cylindrical structures excited by high-frequency current-carrying coils of arbitrary shape, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, No. 2, pp. 1-10, 2015.

[7] T. Gaynor, D. Roberts, E. Homan, W. Dover, Reduction in fatigue failures through crack detection by alternating current field measurement, *SPE Drilling&Completion*, Vol. 12, No. 1, pp. 37-42, 1997.

[8] M. Lugg, Applications of AC field measurement techniques for the aircraft industry, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 62, No. 2, pp. 9-11, 1990.

[9] M. P. Papaelias, M. Lugg, C. Roberts, C. Davis, High-speed inspection of rails using ACFM techniques, *NDT&e International*, Vol. 42, No. 4, pp. 328-335, 2009.

[10] M. C. Lugg, D. Topp, M. Keynes, Recent developments and applications of the ACFM inspection method and ASCM stress measurement method, *Proceedings of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2006)*, Berlin, Sep, 2006.

[11] J. Zhou, R. Collins, D. Michael, Half-space induction by a rectangular coil with rounded corners: Local uniformity and ACFM, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 13A, No. 1, pp. 335-335, New York: Plenum, 1994.

[12] Y. Li, L. Udpa, S. S. Udpa, Three-dimensional defect reconstruction from eddy-current NDE signals using a genetic local search algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 2, pp. 410-417, 2004.

[13] J. Zhang, S. Xie, X. Wang, Y. Li, Z. Chen, Quantitative non-destructive testing of metallic foam based on direct current potential drop method, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp. 375-378, 2012.

[14] S. Bilicz, M. Lambert, S. Gyimothy, J. Pavo, Solution of inverse problems in nondestructive testing by a kriging-based surrogate model, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp. 495-498, 2012.

[15] R. Douvenot, M. Lambert, D. Lesselier, Adaptive metamodels for crack characterization in eddy-current testing, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 4, pp. 746-755, 2011.

[16] M. Ravan, R. K. Amineh, S. Koziel, N. K. Nikolova, J. P. Reilly, Sizing of 3-D arbitrary defects using magnetic flux leakage measurements, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, No. 4, pp. 1024-1033, 2010.

[17] R. K. Amineh, M. Ravan, S. H. Sadeghi, R. Moini, Removal of probe liftoff effects on crack detection and sizing in metals by the AC field measurement technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 8, pp. 2066-2073, 2008.

[18] Y. He, M. Pan, F. Luo, G. Tian, Reduction of lift-off effects in pulsed eddy current for defect classification, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 12, pp. 4753-4760, 2011.

[19] T. Chady, P. Lopato, Flaws identification using an approximation function and artificial neural networks, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 4, pp. 1769-1772, 2007.

[20] M. K. Smaïl, T. Hacib, L. Pichon, F. Loete, Detection and location of defects in wiring networks using time-domain reflectometry and neural networks, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1502-1505, 2011.

Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 262-275, 2012.

[30] L. A. Zadeh, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I, *Information Sciences*, Vol. 8, No. 3, pp. 199-249, 1975.

[31]Q. Liang, J. M. Mendel, Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 5, pp. 535-550, 2000.

[32]H. A. Hagras, A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 524-539, 2004.

[33]J. M. Mendel, General type-2 fuzzy logic systems made simple: a tutorial, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 22, No. 5, pp. 1162-1182, 2014.

[34]J. M. Mendel, Type-2 fuzzy sets and systems: An overview, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 2, No. 2, pp. 20-29, 2007.

[35]O. Linda, M. Manic, Uncertainty-robust design of interval type-2 fuzzy logic controller for delta parallel robot, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 7, No. 4, pp. 661-670, 2011.

[36] N. N. Karnik, J. M. Mendel, Centroid of a type-2 fuzzy set, *Information Sciences*, Vol. 132, No. 1, pp. 195-220, 2001.

[37]D. Wu, J. M. Mendel, Enhanced karnik--mendel algorithms, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 923-934, 2009.

[38] R. I. Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*, pp. 122-131, New York, NY, USA: Wiley, 2001.

[39] M. Ravan, S. Sadeghi, R. Moini, Field distributions around arbitrary shape surface cracks in metals, induced by high-frequency alternating-current-carrying wires of arbitrary shape, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 42, No. 9, pp. 2208-2214, 2006.

[21] M. Wrzuszczak, J. Wrzuszczak, Eddy current flaw detection with neural network applications, *Measurement*, Vol. 38, No. 2, pp. 132-136, 2005.

[22] P. Ramuhalli, L. Udpa, S. Udpa, Neural network algorithm for electromagnetic NDE signal inversion, *Proceedings of the 6th Conference on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2000)*, Budapest, IOS press, 2001

[23]H. P. Reza, A. Rezaie, S. Sadeghi, M. Moradi, M. Ahmadi, A density-based fuzzy clustering technique for non-destructive detection of defects in materials, *NDT & E International*, Vol. 40, No. 4, pp. 337-346, 2007.

[24] R. P. Hasanzadeh, S. Sadeghi, M. Ravan, A. Moghaddamjoo, R. Moini, A fuzzy alignment approach to sizing surface cracks by the AC field measurement technique, *NDT & E International*, Vol. 44, No. 1, pp. 75-83, 2011.

[25]A. Noroozi, R. P. R. Hasanzadeh, M. Ravan, A fuzzy learning approach for identification of arbitrary crack profiles using ACFM technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 9, pp. 5016-5027, 2013.

[26]D. Katoozian, R. P. R. Hassanzadeh, Identification of surface crack profile in metallic structures through ACFM data using first and second order fuzzy approximation, *Electronic Indusries*, Vol. 7, No. 4, pp. 19-34, 2016. (in Parsianفارسی)

[27]D. Mirshekar-Syahkal, R. F. Mostafavi, Analysis technique for interaction of high-frequency rhombic inducer field with cracks in metals, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 3, pp. 2291-2298, 1997.

[28] R. F. Mostafavi, D. Mirshekar-Syahkal, AC fields around short cracks in metals induced by rectangular coils, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 3, pp. 2001-2006, 1999.

[29] M. Manceur, N. Essounbouli, A. Hamzaoui, Second-order sliding fuzzy interval type-2 control for an uncertain system with real application, *IEEE*