



بررسی قابلیت روش بردار ضرب داخلی در شناسایی عیوب عدم نفوذ کناره و عدم نفوذ ریشه در جوش شیاری

ستار محمدی اسفرجانی^۱، مهدی صالحی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف آباد، نجف آباد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف آباد، نجف آباد

* نجف آباد، صندوق پستی ۸۵۱۴۱۳۱۳۱ mehdi.salehi@pmc.iaun.ac

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۹ خرداد ۱۳۹۵

کلید واژگان:

شناسایی آسیب

بردار ضرب داخلی

توابع همبستگی متقابل

عدم نفوذ ریشه جوش

عدم ذوب کناره جوش

چکیده

اطمینان از صحت جوش و منطقه متأثر از حرارت یکی از اهداف بازرسی جوش است. بویژه اگر بازرسی با استفاده از روش‌های معمول آزمایش‌های غیر مخرب، با محدودیت مواجه باشد. در این مقاله، شناسایی آسیب‌های عدم نفوذ ریشه جوش و عدم ذوب کناره جوش، در قطعه جوشکاری شده، با روش جدید بردار ضرب داخلی به عنوان یک الگوریتم تشخیص آسیب بر اساس استفاده از توابع متقابل همبستگی بین پاسخ‌های ارتعاش تحت تحریک نویز سفید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این روش در پژوهش‌های پیشین تنها به صورت تجربی صورت پذیرفته بود. لذا در این بررسی، شناسایی آسیب به روش بردار ضرب داخلی با شبیه سازی و تحلیل به کمک روش المان محدود و انجام محاسبات در نرم افزار متلب انجام شد. برای اطمینان از اعتبار روش شبیه سازی، یک نمونه که در تحقیقات پیشین به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته بود، با این روش تحلیل شده و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردید. در این بررسی، دو قطعه از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ که با جوش شیاری یک طرفه، به هم متصل شده‌اند، در نرم افزار المان محدود شبیه‌سازی و تحلیل گردید. سپس در مدل ایجاد شده یک آسیب ایجاد و بار دیگر تحلیل تکرار شد. نتایج بدست آمده از قبل و بعد از ایجاد آسیب، در نرم افزار متلب با روش بردار ضرب داخلی محاسبه شد. بدین ترتیب توانایی و محدودیت‌های روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب‌های عدم نفوذ ریشه جوش و عدم ذوب کناره جوش، در قطعه جوشکاری شده مورد بررسی قرار گرفت.

Evaluation of the damage detection capability of inner product vector for LOP and LOSWF defects in a groove weld

Sattar Mohammadi Esfarjani, Mehdi Salehi*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

*P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, mehdi.salehi@pmc.iaun.ac

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 14 February 2016

Accepted 01 May 2016

Available Online 08 June 2016

Keywords:

Damage detection

Cross correlation functions

Inner product vector (IPV)

Lack of Root Penetration (LOP)

Lack of side-wall fusion (LOSWF)

ABSTRACT

Welding is one of the most popular methods of connection that is used across a variety of industries to join together materials. Nondestructive testing methods are commonly used to verify that welds are free of defects. Some limitations to common NDT techniques restrict their use. The new damage detection techniques are in demand. This paper presents a study on the new inspection method. The advantages of this method are cost and time effectiveness. This study was conducted to investigate the ability of Inner product vector (IPV) method to detect Lack of Root Penetration (LOP) and Lack of side-wall fusion (LOSWF) on 304 stainless steel beam. The IPV method was proposed as a damage detection algorithm which uses cross correlation functions between vibration responses under white noise excitation. The experimental method was the only method of previous research on the IPV method. This will be achieved by the use of finite element modeling combined with a modal dynamic analysis based vibration technique and MATLAB software is used to numerically implement the computational procedure. In this study, an ideal welding is intended and the effect of the heat-affected zone (HAZ) on the results is ignored. In order to verify the validity of the IPV method simulation, we referred to the results of previous experimental research. The results obtained from modeling are compared with experimental results which showed good agreement.

۱- مقدمه

است. بازرسی قطعات جوشکاری شده، به دو شیوه آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب انجام می‌گیرد. آزمایش‌های غیرمخرب بدلیل عدم تخریب و آسیب

جوش یکی از سریع ترین و پر مصرف ترین روش‌های اتصال می‌باشد. اطمینان از صحت جوش و منطقه متأثر از حرارت یکی از نیازهای اساسی در صنعت

¹ Nondestructive testing

² Non-destructive testing (NDT)

Please cite this article using:

S. Mohammadi Esfarjani, M. Salehi, Evaluation of the damage detection capability of inner product vector for LOP and LOSWF defects in a groove weld, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 7-16, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

دیدگی ساختار، امروزه به طور وسیعی کاربرد دارد. از جمله آزمایش‌های غیر مخرب می‌توان به آزمایش‌های فراصوت¹، رادیوگرافی²، تست مایع نافذ³، تست ذرات مغناطیس⁴، بازرسی چشمی⁵ و... اشاره کرد. وقت‌گیر بودن، هزینه بالا، دسترسی کامل به قطعه جوشکاری شده و... از جمله محدودیت‌هایی روش‌های معمول آزمایش‌های غیرمخرب می‌باشد. لذا به منظور کاهش استفاده از آزمایش‌های غیر مخرب، بررسی روش‌های نوین بازرسی از اولویت‌های پژوهشی صنایع امروزی است. روش‌های مبتنی بر ارتعاش، یکی از روش‌های نوین بازرسی ساختار است.

در سال‌های اخیر، بازرسی یک قطعه به منظور اطمینان از سلامت ساختار و شناسایی آسیب‌ها، با روش‌های مبتنی بر ارتعاش به طور قابل توجهی به دلایل مختلفی از جمله توانایی‌های بالقوه برای تشخیص آسیب بوسیله حسگرهایی که دور از محل آسیب قرار داده شده‌اند، مورد توجه قرار گرفته‌اند [2,1]. شناسایی آسیب با روش‌های مبتنی بر ارتعاش، براساس مقایسه تغییراتی (مانند پاسخ‌های فرکانسی) است که در یک ساختار آسیب دیده نسبت به یک ساختار سالم اتفاق می‌افتد. خصوصیات دینامیکی مختلف، از جمله مدل اشکال⁶ [3]، توابع پاسخ فرکانسی⁷ [4,5]، پاسخ‌های ارتعاشی دامنه زمان⁸ [6,7]، توابع انسجام⁹ [8,9]، توابع انتقال¹⁰ [10,11]، توابع همبستگی متقابل¹¹ [12,13]، از روش‌های تشخیص آسیب ساختار است که مورد استفاده قرار می‌گیرند.

توابع همبستگی متقابل یکی از روش‌هایی است که در یک دهه اخیر به آن پرداخته شده است. یانگ و همکاران [14]، به شناسایی آسیب در ساختار با استفاده از بردار تابع همبستگی متقابل پاسخ‌های ارتعاشی به صورت تجربی پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از بردار تابع همبستگی متقابل پاسخ‌های ارتعاشی قبل و بعد از ایجاد آسیب، توانستند آسیب و موقعیت آن در قطعه را شناسایی کنند. لی و لو [15]، روش تابع همبستگی متقابل خودکار¹² را برای شناسایی آسیب در ساختار با استفاده از پاسخ‌های شتاب تحت تحریک نویز سفید محیط پیشنهاد دادند. این روش پیشنهادی نسبت به روش‌های فرکانسی¹³ و حالت شکل بسیار حساستر می‌باشد. ژانگ و همکاران [16]، در پژوهشی به بررسی تجربی روش تابع همبستگی متقابل بدون استفاده از نقطه مرجع پرداختند و همچنین میزان توانایی تشخیص روش بردار ضرب داخلی¹⁴ را با روش تابع همبستگی متقابل خودکار مقایسه نمودند. در پژوهشی دیگر توسط ژانگ و همکاران [17]، تجزیه و تحلیل حساسیت شاخص تابع همبستگی متقابل خودکار به صورت تجربی در یک چهارچوب سازه دوازده طبقه بررسی شد و مشخص شد که نرمال‌شده تابع همبستگی متقابل خودکار قادر به شناسایی آسیب می‌باشد. دانگ در پژوهشی [18]، آسیب عدم چسبندگی¹⁵ در ساختار ماده مرکب لایه‌ای¹⁶ با استفاده از روش تابع همبستگی متقابل به صورت تحریک تصادفی را شناسایی کرد. آقای لی یانگ و همکاران [19]، به صورت تجربی به شناسایی آسیب در یک پنل

تقویت شده آلومینیومی که در صنایع هوایی کاربرد دارد، با استفاده از روش تابع همبستگی متقابل پرداختند. در تحقیق دیگری توسط همین پژوهشگران [20]، تأثیر نوع پاسخ و دامنه فرکانس تحریک بر روی توانایی روش تابع همبستگی متقابل برای شناسایی آسیب با استفاده از پاسخ‌های ارتعاشی در یک چهارچوب یک سازه هشت طبقه بررسی شد. در این دو پژوهش، روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب با استفاده از پاسخ‌های شتاب استفاده گردید. روش بردار ضرب داخلی یکی از روش‌هایی است که در دسته بندی توابع همبستگی متقابل قرار می‌گیرد. آقای لی یانگ و همکاران [22,21]، در دو پژوهش تجربی به بررسی روش بردار ضرب برای شناسایی آسیب در ساختار پرداختند. در تحقیق اول [21]، تئوری بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب پیشنهاد شد. در این تحقیق آسیب عدم چسبندگی¹⁷ در ماده مرکب لانه زنبوری¹⁸ به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه دوم توسط همین گروه محققان [22]، به بررسی روش بردار ضرب برای شناسایی آسیب در ساختار یک چهارچوب هشت طبقه با استفاده از شیوه فیلتر پاس عبوری¹⁹ پرداختند.

در این مقاله روش بردار ضرب داخلی که یک روش جدید و سریع شناسایی آسیب‌های ساختار است مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرد. در این روش، نتایج تحلیل مودال دینامیک²⁰ یک قطعه سالم با حالتی که در همان قطعه، عیب ایجاد شده است، با روش بردار ضرب داخلی به عنوان یک الگوریتم تشخیص آسیب که با استفاده از توابع متقابل همبستگی بین پاسخ‌های ارتعاش تحت تحریک نویز سفید²¹ و باند رمز عبور تحریک نویز سفید²²، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

این روش در پژوهش‌های پیشین تنها به صورت تجربی صورت پذیرفته بود. در این مطالعه، این روش در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی و تحلیل می‌گردد و آنگاه نتایج در نرم افزار متلب با روش بردار ضرب داخلی محاسبه می‌گردد. برای اطمینان از صحت روش شبیه‌سازی، آزمایش تجربی که قبلاً توسط آقای لی‌وانگ و همکاران [21]، صورت پذیرفته بود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورت نزدیک بودن نتایج روش شبیه سازی با نتایج آزمایش تجربی، روش شبیه‌سازی مورد تأیید قرار می‌گیرد. در روش‌های تجربی با محدودیت‌هایی از قبیل زمان و هزینه بالا، تعداد آزمایش محدود بر روی قطعه و... مواجهیم که با روش شبیه‌سازی ضمن نداشتن محدودیت‌های روش تجربی، امکان مطالعه دقیق‌تر وجود دارد. هدف اصلی از این مقاله، مطالعه دقیق‌تر بر روی توانایی تشخیص آسیب با روش بردار ضرب داخلی است. نمونه مورد بررسی یک قطعه جوشکاری شده از جنس فولاد زنگ نزن 304 است و عیب‌های انتخاب شده عدم نفوذ ریشه جوش²³ و عدم ذوب کناره جوش²⁴ می‌باشد. ادامه این مقاله شامل بخش‌های، (2) تعریف تئوری روش بردار ضرب داخلی (3) راستی آزمایی و اطمینان از صحت روش شبیه‌سازی (4) بازرسی قطعات جوشکاری شده با استفاده از روش تئوری بردار داخلی و (5) نتیجه گیری است.

2- تئوری

1-1- تعریف بردار داخلی

¹ Debonding damage
² Honeycomb sandwich composite beam
³ Low Pass Filter Technique
⁴ Analysis modal dynamic
⁵ White noise excitation
⁶ Band pass white noise excitation
⁷ Lack of Root Penetration (LOP)
⁸ Lack of Side Wall Fusion (LOF)

¹ Ultrasonic Testing
² Radiography Testing
³ Liquid Penetrant Testing
⁴ Magnetic Particle Testing
⁵ Visual Testing
⁶ Model Shapes
⁷ Frequency Response Functions
⁸ Time Domain Vibration Responses
⁹ Coherence Functions
¹⁰ Transmissibility Function
¹¹ Cross Correlation Functions
¹² Auto/cross-correlation function
¹³ Modal frequency
¹⁴ Inner product vector (IPV)
¹⁵ Delamination damage
¹⁶ Composite laminates

به طور مستقیم، بررسی و تأیید شده است که بردار ضرب داخلی سرعت و شتاب می‌تواند به صورت زیر نوشته شود: [22,21]

$$R_{IPV,j}^{vel} = \sum_{r=1}^n K_{j,r}^{vel} [\phi_{1r}, \phi_{2r}, \dots, \phi_{pr}]^T = \sum_{r=1}^n K_{j,r}^{vel} \phi_r \quad (8)$$

$$R_{IPV,j}^{acc} = \sum_{r=1}^n K_{j,r}^{acc} [\phi_{1r}, \phi_{2r}, \dots, \phi_{pr}]^T = \sum_{r=1}^n K_{j,r}^{acc} \phi_r \quad (9)$$

و محاسبه شده توسط:

$$R_{IPV,j}^{vel} = \frac{1}{N_s} [< \dot{x}_1, \dot{x}_j >, < \dot{x}_2, \dot{x}_j >, \dots, < \dot{x}_p, \dot{x}_j >]^T \quad (10)$$

$$R_{IPV,j}^{acc} = \frac{1}{N_s} [< \ddot{x}_1, \ddot{x}_j >, < \ddot{x}_2, \ddot{x}_j >, \dots, < \ddot{x}_p, \ddot{x}_j >]^T \quad (11)$$

$K_{j,r}^{vel}$ و $K_{j,r}^{acc}$ ضرایب وابسته به پارامترهای مودال r th ام و پاسخ اندازه‌گیری شده نقطه j و موقعیت‌های تحریک است. بالانویس vel یا acc به ترتیب نشان می‌دهد که مقدار به سرعت یا شتاب، مربوط می‌شود. به طور مشابه بردار ضرب داخلی تعریف شده توسط جابجایی، بردار ضرب داخلی تعریف شده توسط سرعت یا شتاب نیز ممکن است به عنوان یک بردار ویژگی آسیب برای تشخیص آسیب ساختار پذیرفته شود [22,21].

2-2- مشخص شدن آسیب با استفاده از بردار ضرب داخلی

در این روش فرض می‌شود که اندازه‌گیری نویز 1 دارای میانگین صفر، مستقل از پاسخ ارتعاش بدون اندازه‌گیری نویز است و 3 نقاط اندازه‌گیری‌های مختلف مستقل از یکدیگر هستند [22,21,19].

در اندازه‌گیری نویز سه فرض بالا به خوبی در عمل برآورده نمی‌شود، هر دو ضرب داخلی متقابل و نقطه ضرب داخلی با اندازه‌گیری نویز آلوده خواهد شد. بنابراین یک شاخص آسیب محلی از تفاوت بین بردار ضرب داخلی از ساختارهای سالم و آسیب دیده تعریف شده است که به منظور کاهش اثر نویز اندازه‌گیری استفاده شده است [19]، یعنی:

$$D_{IPV,j} = R_{IPV,j}^d - R_{IPV,j}^u \quad (12)$$

از آنجایی که $R_{IPV,j}^d$ و $R_{IPV,j}^u$ ضرایب نشان دهنده، عنصر i th ام، در بردار ضرب داخلی، ساختارهای سالم و آسیب می‌باشد. سپس، شاخص آسیب به عنوان $D_{IPV,j} = \{D_{IPV,1}, D_{IPV,2}, \dots, D_{IPV,N_m}\}$ تعریف شده است.

به منظور استفاده حداکثر از شاخص آسیب محلی برای موقعیت آسیب، سه شاخص آسیب‌های مختلف برای سه حالت متفاوت پیشنهاد شده است [21]: 1) شاخص آسیب D_{IPV} ، اختیار شده است هنگامی که تغییرات ناگهانی در D_{IPV} ، "تغییر ضربه" است. 2) شاخص آسیب D_{IPV} (یعنی مشتق مرتبه اول از D_{IPV}) اختیار شده است هنگامی که تغییرات ناگهانی در D_{IPV} ، در "تغییر گام" است. 3) شاخص آسیب D_{IPV} (یعنی مشتق مرتبه دوم از D_{IPV}) اختیار شده است هنگامی که تغییرات ناگهانی در D_{IPV} ، "تغییر ضربه ضعیف" است [22,21,19].

در روش شناسایی آسیب، لازم است یک آستانه برای طبقه‌بندی ساختار آسیب دیده و سالم انتخاب شود. در این مقاله، آستانه مورد استفاده در پژوهش‌های قبلی اختیار شده است [22,21,19]، یعنی

$$t_k = \mu_D + \alpha_C \sigma_D \quad (13)$$

$$t_l = \mu_D - \alpha_C \sigma_D$$

فرض کنید که معادلات ماتریس استاندارد حرکت به صورت زیر، داده شده باشد:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

که در آن M ماتریس جرم، $C = \alpha M + \beta K$ ماتریس میرایی، K ماتریس سختی، f یک بردار از توابع اجباری تصادفی و x بردار جابجایی است و همچنین حالت‌های طبیعی واقعی، فرض شده است [22,15].

اکنون اگر پاسخ‌های جابجایی نقاط اندازه‌گیری $1, 2, \dots, p$ را با $x_1, x_2, \dots, x_p$ مشخص نماییم؛ سپس با توجه به تابع همبستگی متقابل بین تمام ترکیب‌های پاسخ‌های جابجایی و تنظیم تاخیر زمان $T = 0$ ، ماتریس a با ابعاد $p \times p$ را می‌توان به صورت زیر دست آورد [21,19].

$$\begin{bmatrix} R_{x_1 x_1}(0) & R_{x_1 x_2}(0) & \dots & R_{x_1 x_p}(0) \\ R_{x_2 x_1}(0) & R_{x_2 x_2}(0) & \dots & R_{x_2 x_p}(0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{x_p x_1}(0) & R_{x_p x_2}(0) & \dots & R_{x_p x_p}(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

که $R_{x_1 x_1}(0)$ در آن نشان دهنده عملکرد همبستگی متقابل بین پاسخ جابه جایی x_i و x_j است. سپس بردار ضرب داخلی، توسط یک سطر (یا ستون) از ماتریس با ابعاد $p \times p$ تعریف می‌شود، که به شرح زیر است [22,21].

$$R_{IPV,j}^{dis} = [R_{x_1 x_j}(0), R_{x_2 x_j}(0), \dots, R_{x_p x_j}(0)]^T \quad (3)$$

که در آن بالانویس dis نشان می‌دهد که مقدار به جابه جایی مربوط می‌شود. بر اساس چگالی طیفی خودکار باند عبور نویز سفید بردار ضرب داخلی می‌تواند به صورت زیر نوشت [22,21].

$$R_{IPV,j}^{dis} = \sum_{r=1}^n K_{j,r}^{dis} [\phi_{1r}, \phi_{2r}, \dots, \phi_{pr}]^T = \sum_{r=1}^n K_{j,r}^{dis} \phi_r \quad (4)$$

و توسط معادله زیر محاسبه می‌شود،

$$R_{IPV,j}^{dis} = \frac{1}{N_s} [< x_1, x_j >, < x_2, x_j >, \dots, < x_p, x_j >]^T \quad (5)$$

جایی که $K_{j,r}^{dis}$ است، $\phi_r = [\phi_{1r}, \phi_{2r}, \dots, \phi_{pr}]^T$ شکل حالت r th ام، که در آن، ضریب وابسته به پارامترهای مودال و پاسخ اندازه‌گیری نقطه j و موقعیت‌های تحریک، $< x, y >$ ، بردار ضرب داخلی، دو بردار x و y است. N_s طول x یا y است. بنابراین، معادله (4) نشان می‌دهد که بردار ضرب داخلی، مجموع وزن‌دار از حالت اشکال، ساختار است، و عامل وزن، هر شکل حالت، تنها به پارامترهای مودال ساختار بستگی دارد. در همین حال، معادله (5) نشان می‌دهد که بردار ضرب داخلی می‌تواند به طور مستقیم توسط دامنه پاسخ‌های ارتعاشی زمان محاسبه شود همانطور که می‌دانیم، تغییر در پارامترهای فیزیکی یک ساختار می‌تواند منجر به تغییرات ناگهانی در برخی از پاسخ‌های ارتعاشی آن ساختار شود بر این اساس، بردار ضرب داخلی یک ساختار آسیب دیده نیز ممکن است تغییرات ناگهانی داشته باشد. بنابراین بردار ضرب داخلی ممکن است به عنوان یک بردار ویژگی آسیب، برای تشخیص آسیب ساختار پذیرفته شود.

مشابه معادله (3)، $R_{IPV,j}^{acc}$ و $R_{IPV,j}^{vel}$ بردار ضرب داخلی که توسط سرعت و شتاب ساخته شده است، به ترتیب، تعریف می‌شود:

$$R_{IPV,j}^{vel} = [R_{\dot{x}_1 \dot{x}_j}(0), R_{\dot{x}_2 \dot{x}_j}(0), \dots, R_{\dot{x}_p \dot{x}_j}(0)]^T \quad (6)$$

$$R_{IPV,j}^{acc} = [R_{\ddot{x}_1 \ddot{x}_j}(0), R_{\ddot{x}_2 \ddot{x}_j}(0), \dots, R_{\ddot{x}_p \ddot{x}_j}(0)]^T \quad (7)$$

¹ Impulse Change

² Step Change

³ Weak Impulse Change

⁴ Threshold

یک طرفه⁶ به هم متصل شده‌اند. جوش شیاری یک طرفه یکی از پرکاربردترین نوع اتصالات می‌باشد. این نوع جوش در خطوط لوله، مخازن ذخیره و تحت فشار و ... کاربرد دارد. اندازه برآمدگی⁷ و زاویه های اتصال⁸ دو قطعه مطابق با توصیه‌های استاندارد انجمن جوشکاری آمریکا⁹ استفاده شده است (شکل 4).

در این شبیه‌سازی، مدل ایجاد شده یک جوش ایده‌آل از نظر کیفیت و ابعاد، فرض شده است. یک جوش ایده‌آل خواص مکانیکی و شیمیایی نزدیک به فلز پایه¹⁰ دارد. در عمل، روش جوشکاری با الکتروغیرمصرفی تنگستن و گاز خنثی¹¹ بدلیل استفاده از الکتروغیر مصرفی¹² برای ایجاد اتصال و حرارت لازم برای جوشکاری و استفاده از فلز پرکننده¹³ که از جنس فلز پایه می‌باشد، امکان بوجود آمدن فلز جوشی با خواص تقریباً برابر با فلز پایه وجود دارد [24,23]. لذا، با توجه به اینکه نمونه مورد مطالعه در این مقاله، یک جوش ایده‌آل مد نظر قرار گرفته است، پس خواص قطعه جوشکاری شده در تمام ناحیه جوشکاری شده با فلز پایه، برابر در نظر گرفته شده است.

همچنین، در عمل می‌توان، عملیات حرارتی پیش از جوشکاری¹⁴ حرارت بین پاسی¹⁵ و شیوه جوشکاری¹⁶ را به گونه‌ای طراحی و اجرا کرد که اختلاف دمای فلز جوش و فلز پایه در حدی قرار گیرد تا وسعت منطقه متأثر از حرارت¹⁷ به حداقل برسد اما حذف کامل منطقه متأثر از حرارت اجتناب ناپذیر است. شایان ذکر است که اندازه و شکل دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت به نسبت دور شدن از فلز جوش متفاوت می‌باشد [29-25]. پس شبیه‌سازی این دانه‌ها توسط نرم افزار بسیار مشکل می‌باشد. در این بررسی با توجه به اینکه فرض شده است شرایط عملیات جوشکاری در حالت ایده‌آل قرار دارد و با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبیه‌سازی، منطقه متأثر از حرارت مدنظر قرار نگرفته است.

در این مقاله تلاش بر این بوده که شرایط روش شبیه‌سازی قطعه مورد مطالعه به گونه‌ای انتخاب گردد که با حذف یا به حداقل رساندن عوامل تأثیرگذار در تشکیل تنش پسماند¹⁸ بتوان بررسی تأثیر تنش پسماند را مدنظر قرار نداد. تنش پسماند به دلایل متفاوت شیمیایی و فیزیکی می‌تواند در قطعه جوشکاری شده بوجود آید. از جمله آنها می‌توان به تأثیر شرایط مرزی و شرایط جوشکاری (ضخامت قطعه، سرعت حرکت جوشکاری، پیش گرمایش قبل از جوشکاری و...) اشاره کرد [34-30]. با توجه به اینکه در این مطالعه، یک جوش ایده‌آل مدنظر قرار گرفته است، می‌توان از تأثیر شرایط جوشکاری در بوجود آمدن تنش پسماند صرف نظر کرد. ضمناً ضخامت قطعه جوشکاری شده در محدوده قابل قبول از نظر تأثیرگذاری بر تشکیل تنش پسماند قرار دارد [33]. شرایط مرزی در قطعه جوشکاری شده به گونه‌ای است که تأثیر بسیار ناچیزی بر تشکیل تنش پسماند دارد [35, 34]. فولاد ضد زنگ 304 دارای استحکام و مقاومت در برابر خوردگی بالایی است. در صورت رعایت برنامه صحیح جوشکاری بویژه در آماده‌سازی سطح، ترکیبات شیمیایی¹⁹ این نوع فولاد ضد زنگ تأثیری بر تشکیل تنش پسماند ندارد

جایی که μ_D و σ_D و به ترتیب ضرایب مقدار متوسط²⁰ و انحراف معیار²¹ D_{IPV} (یا $\bar{D}_{IPV}$ و یا D_{IPV}) می‌باشند، و α_C ضریب مربوط به یک فاصله اطمینان²² است. هنگامی که عناصر D_{IPV} (یا $\bar{D}_{IPV}$ و یا D_{IPV}) در منطقه بین آستانه پایین (t_l) و آستانه بالا (t_k) قرار می‌گیرد، ساختار سالم در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت، ساختار آسیب دیده است [22,21,19].

3- تأیید صحت روش شبیه سازی

برای اطمینان از صحت و اعتبار روش به کار گرفته شده در این مقاله، نتایج حاصل از تحقیق تجربی که توسط آقای لی‌وانگ و همکاران [21] با روش بردار ضرب داخلی انجام گرفته شده است، "شکل 1"، مورد استفاده قرار گرفت.

به این منظور ابتدا نمونه مورد بررسی در تحقیق تجربی با روش به کار گرفته شده در این مقاله، شبیه‌سازی، تحلیل و محاسبه گردید، سپس نتایج به دست آمده از روش مدل‌سازی با نتایج تحقیق تجربی مقایسه گردید. مشاهده گردید که نتایج روش شبیه‌سازی با نتایج آزمایش تجربی، بسیار نزدیک می‌باشند و آسیب به خوبی با روش شبیه‌سازی قابل شناسایی است.

4- تحلیل و نتایج یک مثال با بردار ضرب داخلی

4-1- شناسایی آسیب در ساختار با روش بردار ضرب داخلی

روش تحلیل بکار گرفته شده در این بررسی همانطور که در دیاگرام زیر "شکل 2" مشخص شده است، ابتدا مدل در نرم افزار المان محدود آباکوس²³ ایجاد می‌گردد، آنگاه مدل ایجاد شده مورد تحلیل مودال داینامیک قرار می‌گیرد و نتایج لازم که شامل جابجایی یا سرعت نقاط معینی می‌باشد، بدست می‌آید. سپس در مدل ایجاد شده، یک آسیب با ابعاد مشخصی ایجاد می‌شود و بار دیگر مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا نتایج مورد نیاز که شامل جابجایی یا سرعت همان نقاطی که قبلاً اندازه گرفته شده بود، بدست آید. در پایان نتایج بدست آمده از مدل سالم و آسیب دیده در نرم افزار متلب²⁴ با روش بردار ضرب داخلی محاسبه می‌گردد.

4-2- مشخصات قطعه مورد استفاده برای آزمایش

در این بررسی، دو قطعه از جنس فولاد زنگ نزن 304، با ابعاد $400 \times 40 \times 16$ به صورت اتصال شیاری یک طرفه "شکل 3" مدل‌سازی و با جوش شیاری

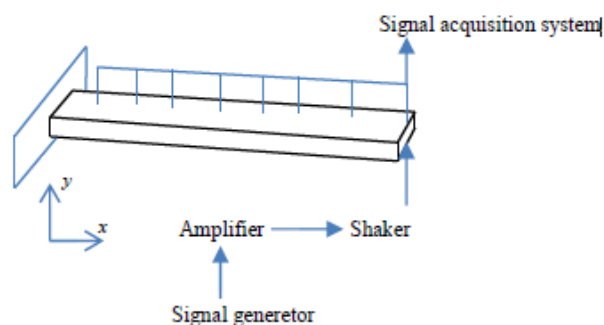


Fig.1 Experimental IPV test by Le Wang and et al [21]

شکل 1 آزمایش تجربی روش بردار ضرب داخلی توسط آقای لی‌وانگ و همکاران [21]

⁶ Single V groove weld

⁷ Face reinforcement

⁸ Bevel angel

⁹ AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code-Steel

¹⁰ Base metal

¹¹ Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) or Tungsten inert-gas (TIG) welding

¹² Non-consumable electrode

¹³ Filler metal

¹⁴ Preheat temperature before welding

¹⁵ Inter pass temperature in welding

¹⁶ Welding Technique

¹⁷ Heat-Affected Zone (HAZ)

¹⁸ Residual Stresses in Welded Elements

¹⁹ Chemical composition

¹ The mean value

² The standard deviation

³ Coefficient corresponding to a confidence interval (α_c) or Confidence Interval Factor (CIF)

⁴ ABAQUS finite element software

⁵ MATLAB software

[38-36].

3-4- تحلیل نمونه مورد بررسی قبل از ایجاد آسیب
در این مرحله با توجه به شماتیک روش بردار ضرب داخلی "شکل 5"، شرایط مرزی، نیروی اعمالی، مش بندی و نوع تحلیل، شبیه سازی می گردد. برای تعیین شرایط مرزی مطابق با شماتیک روش بردار ضرب داخلی "شکل 5"، قطعه از یک سمت هیچ گونه حرکت و چرخشی در هیچ جهتی ندارد. به عبارت دیگر $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$ در نظر گرفته می شود (شکل 6).

نیروی اعمالی لرزاننده به میزان یک نیوتن و در جهت مثبت محور y ها به نقطه میانی سمت آزاد قطعه وارد می گردد (شکل 7).

در این مطالعه، برای دسترسی به دانه بندی بهینه، تأثیر حساسیت دانه بندی بر روی نتایج بررسی شده است. در "قسمت 4-7"، فرآیند انتخاب مقدار بهینه برای دانه بندی آورده شده است. در این مقاله در تمامی مراحل از شیوه دانه بندی آزاد با عنصرهای چهار و شش ضلعی برای دانه بندی مدل استفاده شده است (شکل 8).

سرانجام مدل ایجاد شده مورد تحلیل مودال دینامیک قرار می گیرد. پس از پایان تحلیل، داده های لازم که شامل جابجایی و سرعت می باشد، در یک زمان مشخص از نتایج برای نقاط معینی استخراج می گردد. بدیهی است که هرچه تعداد نقاطی که از آنها اطلاعات جمع آوری می شود، بیشتر باشد، دقت روش شناسایی آسیب در تعیین حدود تقریبی موقعیت آسیب افزایش می یابد. در این پژوهش، جابجایی و سرعت 22 نقطه با فاصله یکسان بر روی سطح قطعه استخراج گردید (شکل 9).

4-4- ایجاد آسیب در قطعه مورد بررسی

در این مرحله، در همان مدل ایجاد شده، به طور جداگانه عیوب عدم نفوذ ریشه جوش و عدم ذوب کناره جوش در قطعه جوشکاری شده ایجاد گردید. عدم اتصال بین فلز جوش و فلز پایه یا بین پاس های جوش را عدم ذوب می گویند که در این مقاله عدم ذوب کناره جوش بررسی می گردد. عیب عدم ذوب کناره جوش بر روی فصل مشترک جوش و فلز پایه، ایجاد گردید (شکل 10).

عدم نفوذ کامل فلز جوش به ریشه اتصال باعث ایجاد یک منطقه نفوذ نکرده می شود. این منطقه که یک ناپوستگی محسوب می شود را عدم نفوذ ریشه جوش می گویند. عیب عدم نفوذ در ریشه با ابعاد $2 \times 1 \times 40$ در فاصله 199.5 میلی متری از تکیه گاه و در ریشه خط جوش قطعه ایجاد شد. (شکل 11).

4-5- تحلیل نمونه مورد بررسی پس از ایجاد آسیب

در این مرحله قطعه معیوب، دوباره به طور جداگانه برای هر عیب مورد تحلیل مودال دینامیک قرار گرفت. پس از پایان تحلیل، اطلاعات لازم در یک زمان مشخص، که شامل جابجایی و سرعت نقاط مورد نظر می باشد، برای استفاده در روش ضرب داخلی از نتایج استخراج گردید. زمان، تعداد و مکان نقاط اندازه گیری شده، مطابق با تحلیل قبل از ایجاد آسیب "شکل 9"، است. (شکل های 12 و 13)

همچنین با توجه به پژوهش های پیشین مشخص شده است که اعمال نیروهای ارتعاشی باعث تنش زدایی قطعه می شود. در این مطالعه، نیروی تحریک توسط لرزاننده تأمین می گردد لذا در صورت وجود تنش پسماند، امکان تنش زدایی ارتعاشی در حین اعمال نیرو به قطعه وجود دارد. [41-39]
پس از ایجاد مدل، اطلاعات مربوط به جنس قطعه، برای فولاد زنگ نزن 304، که شامل مدول الاستیسیته (مدل یانگ)، ضریب پواسیون و چگالی می باشد، از استاندارد موسسه فولاد و آهن آمریکا استخراج [42] و مقداردهی آن به مدل انجام می گیرد (جدول 1).

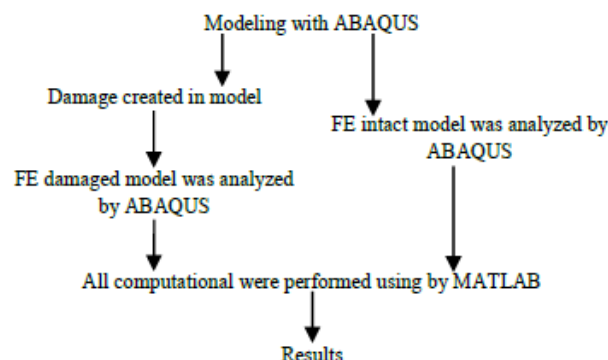


Fig. 2 Diagram of IPV techniques for damage detection in structure

شکل 2 دیاگرام شناسایی آسیب در ساختار با روش بردار ضرب داخلی

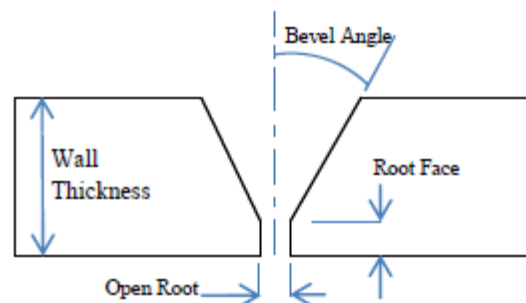


Fig. 3 Diagram single V groove weld joint

شکل 3 دیاگرام اتصال شیاری یک طرفه V شکل

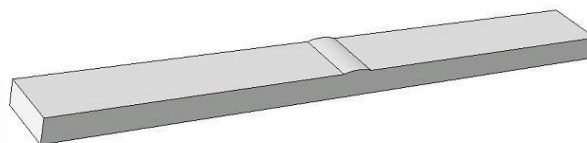


Fig. 4 A finite element model of beam was created using ABAQUS

شکل 4 مدل ایجاد شده در نرم افزار المان محدود آباکوس

جدول 1 اطلاعات مربوط به جنس برای فولاد زنگ نزن 304

Table 1 Material property for type 304 Stainless Steel (AISI)

چگالی	ضریب پواسیون	مدول الاستیسیته
ρ (g/cc)	ν	E (GPa)
8	0.29	200

⁸ Boundary condition

⁹ Actuation force

¹ Mesh

¹ Analysis Step

¹ Displacement

¹ Rotation

¹ Shaker

¹ Free meshing with triangular and tetrahedral elements

¹ Excitation force

² Shaker

³ Vibration stress relief

⁴ Modulus of Elasticity (Young's modulus)

⁵ Poisson's Ratio

⁶ Density

⁷ American Iron and Steel Institute (AISI)

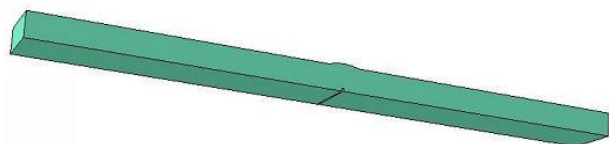


Fig. 11 LOP Damage created in model

شکل 11 ایجاد عیب عدم نفوذ ریشه جوش

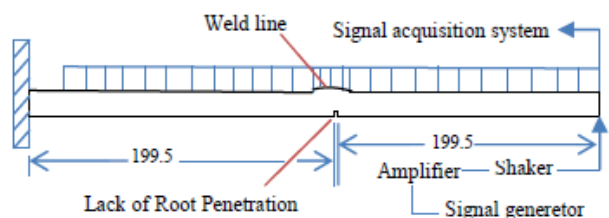


Fig. 12 The position of LOP damage and nodes that be measured on the damaged structure

شکل 12 موقعیت آسیب عدم نفوذ ریشه جوش و نقطه‌های اندازه‌گیری شده در قطعه

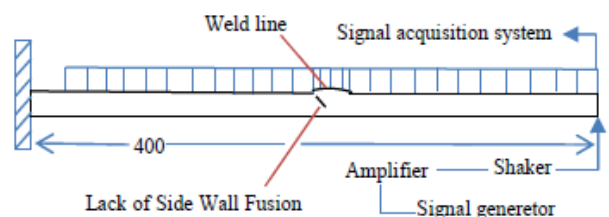


Fig. 13 The position of LOF damage and nodes that be measured on the damaged structure

شکل 13 موقعیت آسیب عدم دوز کناره جوش و نقطه‌های اندازه‌گیری شده در قطعه

جوش در "شکل‌های 14 و 15"، و با عیب عدم دوز کناره جوش در "شکل‌های 16 و 17" مشخص شده است. در روش شناسایی آسیب، لازم است یک آستانه برای طبقه بندی ساختار آسیب دیده و سالم انتخاب شود. برای تعیین آستانه پایین (t_l) و آستانه بالا (t_h)، با توجه به دو تحقیق قبلی [21,17] و شبیه سازی متعدد، مقدار 1.8 برای فاکتور فاصله اطمینان α_c برای فولاد زنگ نزن 304 تعیین گردید.

برای شناسایی آسیب در طول قطعه باید به موقعیت قرارگیری منحنی توجه کرد؛ نقاطی از منحنی که خارج از محدوده آستانه آسیب (t_l و t_h)، قرار می‌گیرند وجود آسیب را در قطعه مشخص می‌سازند [21,19]. همان طور که در "شکل‌های 14 و 15" به خوبی مشخص است، روش بردار ضرب داخلی توانایی تشخیص آسیب عدم نفوذ ریشه را دارد و با تقریب بسیار نزدیکی مکان قرارگیری آسیب عدم نفوذ ریشه را مشخص می‌سازد. همچنین با توجه به "شکل‌های 16 و 17"، مشخص گردید روش بردار ضرب داخلی وجود آسیب عدم دوز کناره جوش را تشخیص می‌دهد اما در تشخیص مکان تقریبی آسیب کارایی ندارد که می‌تواند به دلیل ماهیت شکل آسیب عدم دوز کناره جوش باشد. نتایج این بررسی نشان داد که روش بردار ضرب داخلی قادر به تشخیص نوع آسیب و عمق آسیب از سطح قطعه نمی‌باشد.

7-4- بررسی تأثیر حساسیت دانه‌بندی بر روی نتایج

برای رسیدن به یک دانه‌بندی بهینه، باید از تأثیر حساسیت دانه‌بندی¹ بر روی

¹ Mesh sensitivity

6-4- محاسبات و نتایج

در انتها، نتایج بدست آمده از قبل و بعد از ایجاد آسیب، که شامل جابجایی و سرعت نقاط مشخص در یک زمان معین می‌باشد، در نرم افزار متلب با روش بردار ضرب داخلی محاسبه می‌گردد. نتایج آزمایش با آسیب عدم نفوذ ریشه

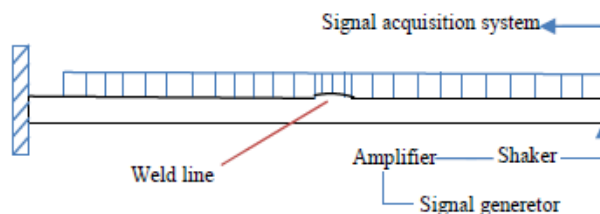


Fig. 5 IPV Techniques for Damage Detection in structure

شکل 5 شماتیک روش بردار ضرب داخلی

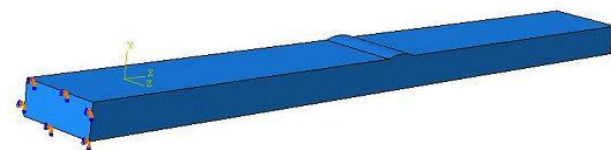


Fig. 6 Boundary condition in modal

شکل 6 اعمال شرایط مرزی بر روی مدل

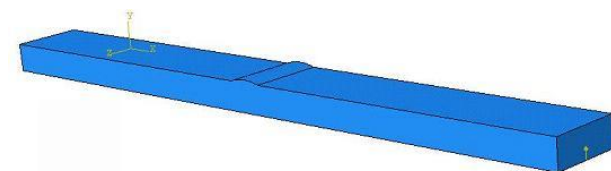


Fig. 7 Force excitation in structure

شکل 7 اعمال نیروی تحریک بر روی مدل



Fig. 8 Free meshing with linear tetrahedral and hexahedra elements

شکل 8 انتخاب مش آزاد با عنصرهای چهار و شش ضلعی برای دانه‌بندی مدل

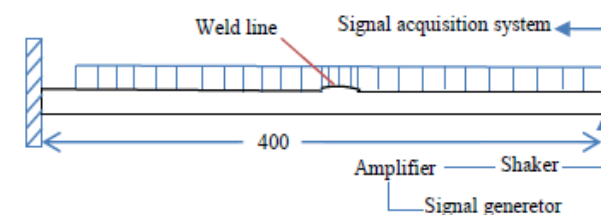


Fig. 9 Dimensions and the position of nodes that be measured on the intact structure

شکل 9 ابعاد قطعه مدل‌سازی شده و مکان نقاط اندازه‌گیری شده

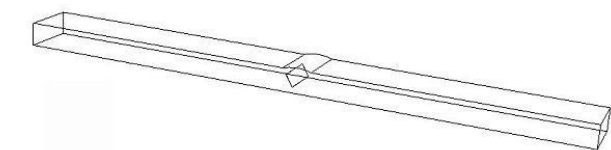


Fig. 10 LOF Damage created in model

شکل 10 ایجاد عیب عدم دوز کناره جوش در مدل ایجاد شده

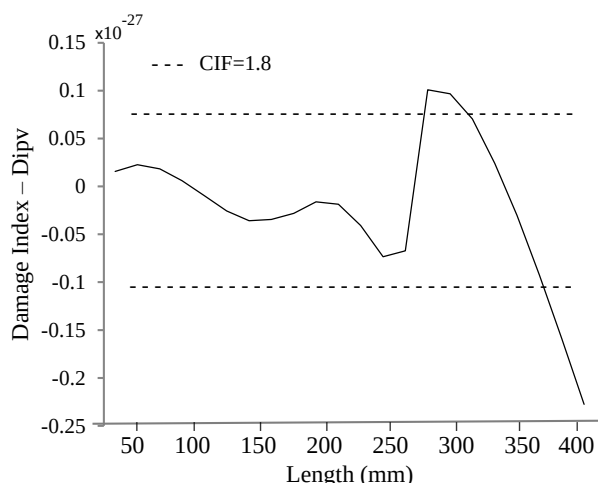


Fig.16 Obtain the standard deviation D_{IPV} from analysis displacement of nodes using IPV method for damaged model (LOF)

شکل 16 تحلیل داده‌های جابجایی با روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب عدم ذوب کناره جوش

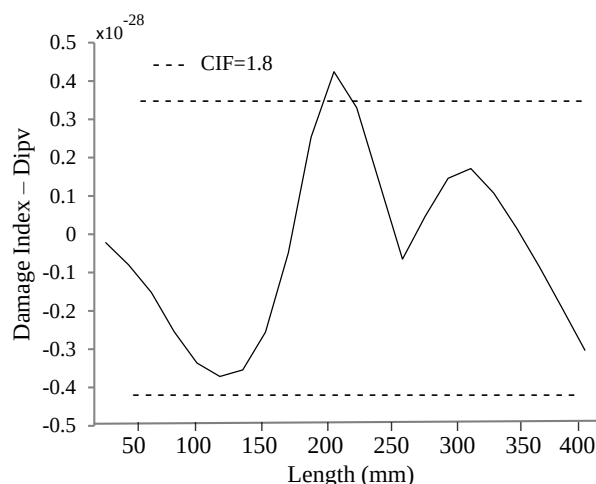


Fig. 14 Obtain the standard deviation D_{IPV} from analysis displacement of nodes using IPV method for damaged model (LOP)

شکل 14 تحلیل داده‌های جابجایی با روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب عدم نفوذ ریشه جوش

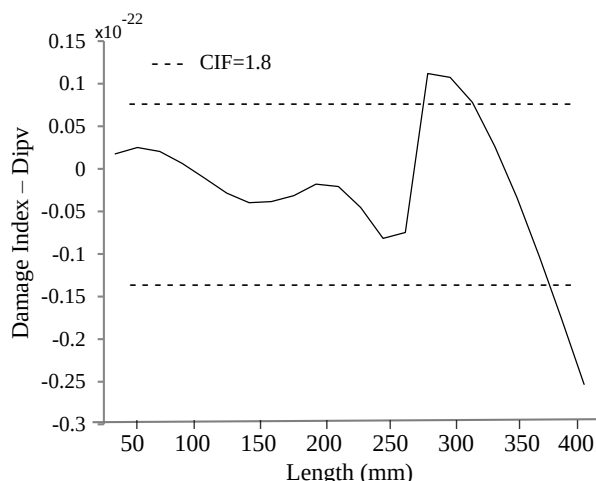
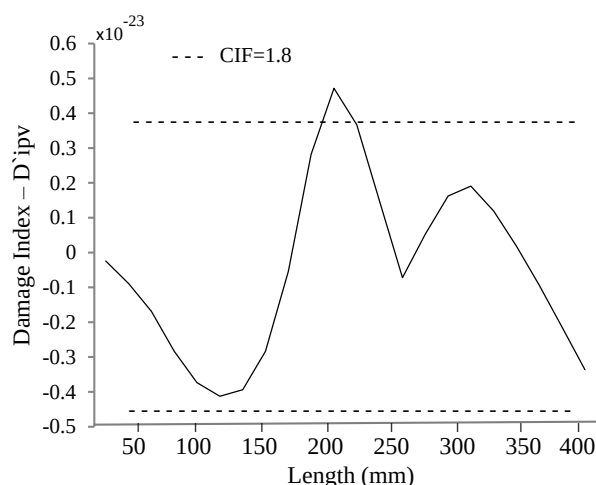


Fig. 17 Obtain the standard deviation D_{IPV} from analysis velocity of points using IPV method for damaged model (LOF)

شکل 17 تحلیل داده‌های سرعت با روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب عدم ذوب کناره جوش



15 Obtain the standard deviation D_{IPV} from analysis velocity of nodes using IPV method for damaged model (LOP)

شکل 15 تحلیل داده‌های سرعت با روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب عدم نفوذ ریشه جوش

متفاوت، مشخص شد که شیوه دانه‌بندی آزاد تنها انتخاب است. اما با این وجود محدودیت انتخاب شیوه در قطعات دارای هندسه پیچیده، باید از تأثیر شیوه‌های متفاوت دانه‌بندی بر روی اطلاعات بدست آمده از تحلیل در نرم افزار، که برای شناسایی آسیب در روش ضرب داخلی استفاده می‌شود، اطمینان حاصل کرد. به منظور بررسی این موضوع، در شبیه‌سازی قطعات دارای هندسه ساده مانند یک ستون، با آسیب شیاری سطحی، با استفاده از شیوه‌های متفاوت تحلیل انجام گرفت و مشخص گردید که اطلاعات مورد نیاز از تحلیل با شیوه‌های گوناگون، اختلاف بسیار ناچیزی دارند، و بر روی نتایج نهایی که برای تشخیص آسیب به کار می‌رود، تقریباً بی‌تأثیر است. همچنین در کوشش دیگر، مدل قطعه جوشکاری شده، قبل از ایجاد آسیب با شیوه دانه‌بندی آزاد و شیوه‌هایی که امکان استفاده از آنها بود مانند شیوه جاروب کردن^۱ تحلیل گردید. مقایسه مقادیر بدست آمده از جابجایی یک نقطه

نتایج مطالعه اطمینان کسب کرد، لذا لازم است، نوع، شکل و اندازه‌ای که برای دانه‌بندی انتخاب می‌شود، بررسی گردد. در تحلیل به کمک نرم افزارهای المان محدود هرچه شکل دانه‌بندی منظم‌تر باشد، نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید [43-46].

در این روش شناسایی آسیب، همانطور که در "شکل 2" آمده است، مدل ایجادشده قبل و بعد از ایجاد آسیب تحلیل می‌گردد. ایجاد آسیب در قطعه باعث تغییر و پیچیده‌تر شدن هندسه آن می‌شود. لذا انتخاب شیوه^۱ مش‌بندی، بویژه در مدل‌های دارای هندسه پیچیده با محدودیت‌های انتخاب مواجه است. شیوه انتخاب شده باید بتواند سه هندسه متفاوت از مدل یعنی، مدل سالم، مدل دارای آسیب عدم نفوذ ریشه جوش و مدل دارای آسیب عدم ذوب دیواره جوش را دانه‌بندی کند. در کوشش‌های انجام گرفته، با شیوه‌های

² Swept

¹ Technique

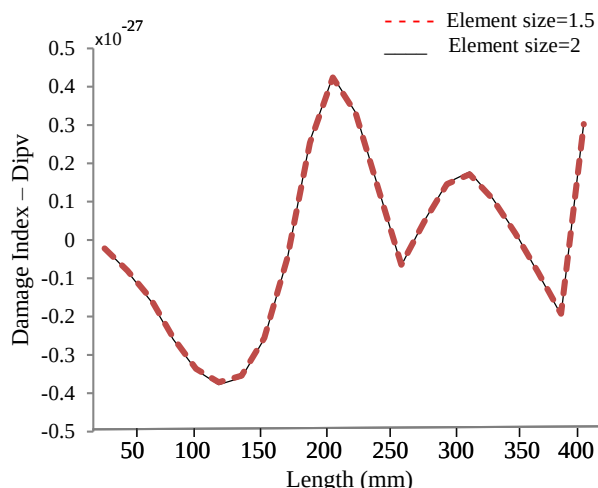


Fig. 19 Displacement data analysis in IPV method for LOP detection with two different sizes of mesh

شکل 19 تحلیل داده‌های جابجایی با روش بردار ضرب داخلی برای شناسایی آسیب عدم ذوب کناره جوش برای دو اندازه دانه بندی مختلف

جدول 2 نوع و تعداد عناصرها و تعداد گره‌های بکار برده شده در دانه‌بندی

Table 2 Elements of type, total number of nodes and elements that it used in meshing

وضعیت مدل	نوع المان	تعداد المان‌ها	تعداد گره‌ها
قبل از ایجاد آسیب	شش وجهی ^۴	43032	50050
بعد از ایجاد آسیب	چهار وجهی ^۵	272334	52220
عدم نفوذ ریشه			
بعد از ایجاد آسیب	چهار وجهی	267241	51340
عدم ذوب کناره			

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، روش بردار ضرب داخلی به عنوان یک الگوریتم شناسایی آسیب ارزیابی شد. در این روش با استفاده از توابع همبستگی متقابل بین پاسخ‌های ارتعاش تحت تحریک نویز سفید، شناسایی آسیب انجام می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش بردار ضرب داخلی می‌تواند موقعیت و طول تقریبی آسیب عدم نفوذ ریشه را مشخص سازد اما در تشخیص مکان تقریبی آسیب عدم ذوب کناره جوش کارایی ندارد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که روش بردار ضرب داخلی قادر به تشخیص نوع آسیب و عمق آسیب از سطح قطعه نمی‌باشد. تعیین نوع عیب مستلزم بکار بردن سایر روش‌های تست‌های غیرمخرب می‌باشد. اما با بکارگیری این روش، وجود آسیب‌های احتمالی در قطعه مشخص می‌گردد و نیاز به بررسی با آزمایش‌های غیرمخرب کاهش می‌یابد. لذا صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه و زمان به ویژه در تولید قطعه‌ها در تعداد زیاد به همراه خواهد شد.

6- فهرست علائم

C	ماتریس میرایی
CIF	فاکتور فاصله اطمینان
D_{IPV}	شاخص آسیب مربوط به جابجایی نقاط
$\bar{D}_{IPV}$	شاخص آسیب مربوط به سرعت نقاط

⁴ Linear hexahedral elements of type C3D8R

⁵ Linear tetrahedral elements of type C3D4

مشخص با شیوه‌های دانه‌بندی متفاوت نشان داد که مقدارهای بدست آمده تفاوت بسیار ناچیزی با هم دارند.

برای انتخاب بهینه اندازه دانه‌بندی، ابتدا با یک مقدار مشخص که برای اندازه دانه‌بندی تعیین می‌گردد، نمونه تحلیل می‌شود. آنگاه برای موقعیت مشخصی مقدار اطلاعات مورد نظر که در این مطالعه که مقادیر جابجایی یا سرعت است، یادداشت می‌شود. بهتر است این نقطه مشخص، یکی از نقاطی باشد که در تحلیل مسئله اطلاعات آن اخذ می‌گردد. اکنون بار دیگر اندازه دانه‌بندی را کاهش داده و مقدار بدست آمده را یادداشت می‌کنیم. این روند را برای تعداد بیشتری تحلیل انجام می‌دهیم. سپس، نموداری رسم می‌نماییم که خط افقی آن اندازه دانه‌بندی و خط قائم آن اطلاعات اخذ شده یعنی سرعت یا جابجایی یک نقطه مشخص است. در صورتی که به مقدار بهینه دانه بندی رسیده باشیم، در نقطه‌ای از نمودار شیب آن صفر می‌گردد. یعنی با کاهش اندازه دانه‌بندی، تغییری در اطلاعات اخذ شده در نقطه مشخص بوجود نمی‌آید. عدد متناظر با این نقطه بر روی محور افقی، سایز مناسب اندازه دانه‌بندی است. در صورت عدم وجود چنین نقطه‌ای در نمودار ترسیم شده، تحلیل و یادداشت برداری با سایزهای کوچکتر بیشتری را انجام می‌دهیم. مقدار سایز بدست آمده در این مقاله 2 است (شکل 18).

برای راستی آزمایی و اطمینان از روش انتخاب بهینه اندازه دانه‌بندی، برای شناسایی آسیب عدم نفوذ ریشه، دو نمودار تشخیص آسیب با دو دانه‌بندی متفاوت رسم شده است (شکل 19). همانطور که "شکل 19" مشخص است، نمودارهای رسم شده برای تشخیص آسیب برای دو اندازه دانه‌بندی 1.5 و 2 بسیار نزدیک به هم می‌باشند و تحلیل یکسانی از این دو نمودار برای تشخیص آسیب استنباط می‌شود. یعنی با کاهش بیشتر اندازه دانه‌بندی، نمودار تشخیص آسیب تغییر ناچیزی پیدا می‌کند، پس کاهش بیشتر اندازه دانه‌بندی در نتیجه‌گیری نهایی تشخیص آسیب بی‌تأثیر است. در جدول 2، نوع و تعداد عناصرها و تعداد گره‌های بکار برده شده در دانه‌بندی آمده است. دسترسی به اطلاعات دانه‌بندی بوسیله جعبه ابزار جستار آرد مدول دانه‌بندی امکان‌پذیر است.

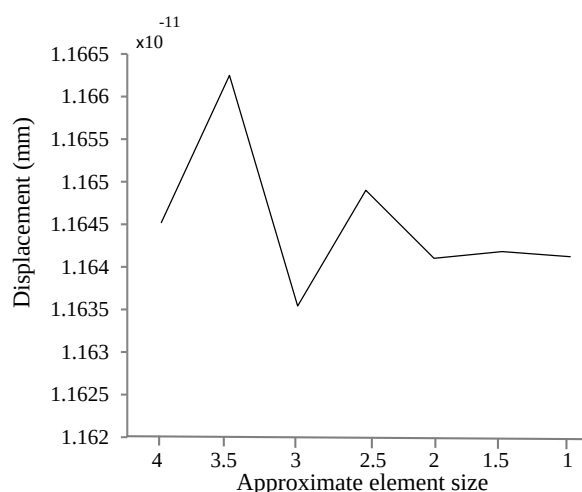


Fig. 18 Obtain optimal value for the mesh size

شکل 18 بدست آوردن مقدار بهینه برای اندازه دانه بندی

¹ Elements of type

² Query

³ Module

- [5] R. P. Bandara, T. H. Chan, D. P. Thambiratnam, Structural damage detection method using frequency response functions, *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, No. 4, pp. 418-429, 2014.
- [6] S. Sandesh, K. Shankar, Damage identification of a thin plate in the time-domain with substructuring-an application of inverse problem, *International Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 79-93, 2009.
- [7] T. Kuroiwa, H. Iemura, Vibration-based damage detection using time series analysis, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [8] H. C. Kim, M. G. Cho, J. Kim, J. Shim, Coherence technique for noise reduction in rotary compressor, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2073-2076, July 2012.
- [9] S. S. Wang, Q. W. Ren, P. Z. Qiao, Structural damage detection using local damage factor, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 12, No. 9, pp. 955-973, 2006.
- [10] X. Yi, D. Zhu, Y. Wang, J. Guo, Transmissibility-function-based structural damage detection with tetherless mobile sensors, *The 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Philadelphia, USA, July 11-15, 2010.
- [11] Z. Y. Lai, R. Perera, Transmissibility based damage assessment by intelligent algorithm, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, Porto, Portugal, 30 June - 2 July, 2014.
- [12] L. Fenga, X. Yib, D. Zhub, X. Xiea, Damage detection of metro tunnel structure through transmissibility function and cross correlation analysis using local excitation and measurement, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vols. 60-61, No. 4, pp. 59-74, 2015.
- [13] M. Zhang, R. Schmidt, A comparative study of the correlation function based structural damage detection methods under sinusoidal, *11th International Conference on Vibration Problems*, Lisbon, Portugal, pp. 9-12, 2013.
- [14] Z. C. Yang, Z. F. Yu, H. Sun, On the cross correlation function amplitude vector and its application to structural damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 7, pp. 2918-2932, 2007.
- [15] X. Y. Li, S. S. Law, Matrix of the covariance of covariance of acceleration responses for damage detection from ambient vibration measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, pp. 945-956, 2010.
- [16] M. Zhang, R. Schmidt, B. Markert, Structural damage detection methods based on the correlation functions, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, Porto, Portugal, 30 June-2 July, 2014.
- [17] M. Zhang, R. Schmidt, Sensitivity analysis of an auto-correlation-function-based damage index and its application in structural damage detection, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 26, pp. 7352-7363, 2014.
- [18] X. Dang, Statistic strategy of damage detection for composite structure using the correlation function amplitude vector, *Procedia Engineering*, Vol. 99, No. 185, pp. 1395-1406, 2015.
- [19] L. Wang, Z.C. Yang, T.P. Waters, Structural damage detection using cross correlation functions of vibration response, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 24, pp. 5070-5086, 2010.
- [20] L. Wang, Zh. Yang, Effect of response type and excitation frequency range on the structural damage detection method using correlation functions of vibration responses, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 4, pp. 645-653, 2013.
- [21] L. Wang, Z.C. Yang, T.P. Waters, M. Zhang, Theory of inner product vector and its application to multi-location damage detection, *9th International Conference on Damage Assessment of Structures*, Oxford, United Kingdom, 11-13 July, 2011.
- [22] L. Wang, Z. Yang, Structural damage detection using inner product vector and low pass filter technique, *Mechanics and Materials*, Vol. 204, No. 208, pp. 2942-2946, 2012.
- [23] N. Jeyaparakash, A. Haile, M. Arunprasad, The parameters and equipments used in TIG welding: A review, *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, Vol. 4, No. 2, pp. 11-20, 2015.
- [24] P. Dutta, Y. Joshi, C. Franche, Determination of gas tungsten arc welding efficiencies, *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 9, No. 2, pp. 80-89, 1994.
- [25] S. M. Adedayo, S. O. Momoh, Effect of initial elevated metal temperature on mechanical properties of an ARC-welded mild steel plate, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 3, No. 12, pp. 1224-1228, 2010.
- [26] H. A. Aglan, S. Ahmed, K. R. Prayakara, M. Fateh, Effect of preheating temperature on the mechanical and fracture properties of welded pearlitic rail steels, *Engineering*, Vol. 5, No. 11, pp. 837-843, 2013.
- [27] X. Yue, X. L. Feng, J. C. Lippold, Effect of welding parameters on the heat-affected zone hydrogen-induced cracking tendency of a blast-resistant steel, *Welding Journal*, Vol. 93, No. 3, pp. 98-105, 2014.
- [28] W. Pang, N. Ahmed, D. Dunne, Hardness and microstructural gradients in the heat affected zone of welded low-carbon quenched and tempered steels, *Australasian Welding Journal*, Vol. 56, No. 2, pp. 36-48, 2011.
- [29] S. D. Sharma, R. Saluja, K. M. Moed, A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on hardened steel, *International Journal of Technical Research and Applications*, Vol. 1, No. 2, pp. 05-07, 2013.
- [30] V. Karimnia, I. Sattari-Far, Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminum alloy series 5000, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 377-386, 2015. (In Persian)
- [31] I. F. Fanous, M. Y. Younan, A.S. Wifi, Study of the effect of boundary

D_{IPV}	شاخص آسیب مربوط به شتاب نقاط
E	مدول الاستیسیته (GPa)
f	بردار از توابع اجباری تصادفی
K	ماتریس سختی
M	ماتریس جرم
$R_{IPV,j}^u$	بردار ضرب داخلی، ساختار سالم
$R_{IPV,j}^d$	بردار ضرب داخلی ساختار آسیب دیده
t_h	آستانه بالا
t_l	آستانه پایین
v	ضریب پواسیون
x	بردار جابجایی
$\dot{x}$	بردار سرعت
$\ddot{x}$	بردار شتاب

علامه یونانی

α_c	فاکتور فاصله اطمینان
μ_D	ضرایب مقدار متوسط
ρ	چگالی (gcc^{-1})
σ_D	انحراف معیار

بالانویس ها

acc	شتاب
d	ساختار آسیب دیده
dis	جابجایی
u	ساختار سالم
vel	سرعت

زیرنویس ها

acc	شتاب
dis	جابجایی
H	بالا
l	پایین
vel	سرعت

7- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از آقای دکتر لی وانگ، استادیار محترم دانشکده هوانوردی، دانشگاه نورث وسترن پلی تکنیک چین، بابت راهنمایی ها و کمک هایشان، ابراز می دارند. همچنین از استاد های فرزانه و فرهیخته دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران، آقایان دکتر حمید احمدیان و دکتر محمود مهرداد شکریه، قدردانی مان را بابت رهنمودها و مساعدت هایشان اعلام می داریم.

8- مراجع

- [1] C.R. Farrar, K. Worden, An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 365, No. 1851, pp. 303-305, 2007.
- [2] D. Zhu, X. Yi, Y. Wang, Structural damage detection through cross correlation analysis of mobile sensing data, *5th World Conference on Structural Control and Monitoring (SWCSCM-10030)*, Tokyo, Japan, July 12-14, 2010.
- [3] N.M.M. Maia, J.M.M. Silva, E.A.M. Almas, Damage detection in structures; from mode shape of frequency response function methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 3, pp. 489-498, 2003.
- [4] M. Salehi, S. Ziaei-rad, M. Ghayour, M. A. Vazirizanjani, A structural damage detection technique based on measured frequency response functions, *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 3, No. 5, pp. 215 - 226, 2010.

- [40] M. Honarpisheh, V. Zandian, Investigation of residual stresses in stress-relieved samples by hea treatment and ultrasonic methods using hole-drilling method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 273-278, 2015. (In Persian فارسی)
- [41] X.C. Zhao, Y.D. Zhang, H.W. Zhang, Q. Wu, Simulation of vibration stress relief after welding based on FEM, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 21, No. 4, pp. 289-294, 2008.
- [42] G.W. Cullen, Y.P. Korkolis, Ductility of 304 stainless steel under pulsed uniaxial loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 50, No. 10, pp. 1621-1633, 2013.
- [43] M. Imani, A. Moazami Goudarzi, J. Mahdinejad, Assessing the influence of stent geometry and material properties on the outcome after coronary stenting using finite element method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 45-53, 2014. (In Persian فارسی)
- [44] A. Mohammadi Najafabadi, I. Sattarifar, M. Rezaeian Akbarzadeh, Calibration of weibull parameters of local approach to fracture by using experimental cleavage fracture data of three point bending specimens, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 412-418, 2015. (In Persian فارسی)
- [45] R. Beckera, B. Vexlerb, Mesh refinement and numerical sensitivity analysis for parameter calibration of partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 206, No. 1, pp. 95-110, 2005.
- [46] B. P. Baillargeon, S. S. Vel, J. S. Koplik, Utilizing ABAQUS to analyze the active vibration suppression of structural systems, *ABAQUS Users' Conference*, Boston, USA, May 25-27, 2004.
- conditions on residual stresses in welding using element birth and element movement techniques, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 125, No. 4, pp. 432-439, 2003.
- [32] A. M. Malik, E. M. Qureshi, N. Ullah Dar, I. Khan, Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, No. 12, pp. 1391-1401, 2008.
- [33] I. Sattarifar, M. R. Farahani, Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 11, pp. 723-731, 2009.
- [34] T. L. Teng, C. C. Lin, Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 12, pp. 857-864, 1998.
- [35] G. Fua, M. I. Lourencoa, M. Duanb, S. F. Estefen, Effect of boundary conditions on residual stress and distortion in T-joint welds, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 102, No. 10, pp. 121-135, 2014.
- [36] C-W. Kuo, C-M. Lin, G-H. Lai, Y-C. Chen, Characterization and mechanism of 304 stainless steel vibration welding, *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 9, pp. 2319-2323, 2007.
- [37] W. Zhang, J. Lu, K. Luo, Residual stress distribution and microstructure at a laser spot of AISI 304 stainless steel subjected to different laser shock peening impacts, *Metals*, Vol. 6, No. 1, pp. 50- 60, 2016.
- [38] S. Norouzi, H. Farhangi, Residual stress; the effect of pouring temperature and chemical composition, *Advanced Materials Research*, Vols. 264-265, No. 60, pp. 349-354, 2011.
- [39] I. Samardžić, T. Vuherer, D. Marić, P. Konjatić, Influence of vibrations on residual stresses distribution in welded joints, *Metalurgija*, Vol. 54, No. 3, pp. 527-530, 2015.