

## ارائه یک راهکار جدید بازرسی قطعات جوشکاری شده با استفاده از روش تئوری بردار داخلی (IPV)

ستار محمدی اسفرجانی<sup>۱</sup>، مهدی صالحی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، پست الکترونیکی: satar.iran@gmail.com

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، پست الکترونیکی: mehdi.salehi@pmc.iaun.ac

### چکیده

جوش یکی از سریع‌ترین و پر مصرف‌ترین روش‌های اتصال می‌باشد. اطمینان از صحت جوش و منطقه متأثر از حرارت یکی از مشکلات بازرسی است. بویژه اگر موقعیت قطعه جوشکاری شده به گونه ای باشد که برای استفاده از روش‌های معمول آزمایش‌های غیر مخرب، با محدودیت مواجه باشد. در این مقاله یک روش جدید و سریع بازرسی جوش معرفی می‌گردد که، می‌توان در کمترین زمان و با حداقل هزینه از سلامت منطقه جوشکاری شده و نواحی متأثر از حرارت، اطمینان حاصل کرد. و در صورت مشاهده هر گونه عیبی محدود و سبب تقریبی عیب مشخص می‌گردد.

در این مقاله برای شناسایی آسیب‌های مهمی از قبیل ترک، (Crack)، عدم نفوذ (Lack of Root Penetration) و عدم ذوب کناره جوش (Lack of Side Wall Fusion)، در قطعه جوشکاری شده، با روش بردار ضرب داخلی (IPV)، با شبیه‌سازی و تحلیل به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS)، انجام گردید، و آنگاه داده‌های که با تحلیل در نرم افزار آباکوس (ABAQUS) بدست آمده است، با کمک نرم افزار متلب، محاسبه گردید.

### واژه‌های کلیدی

بازرسی جوش، بردار ضرب داخلی (IPV)، شناسایی آسیب، توابع همبستگی متقابل (Cross Correlation Functions)، آنالیز مودال

### مقدمه

روش‌های معمول آزمایش‌های غیر مخرب دارای محدودیت‌هایی از قبیل: وقت گیر بودن، هزینه بالا، دسترسی کامل به قطعه جوشکاری شده، ... می‌باشد. در این مقاله یک روش جدید و سریع بازرسی معرفی می‌گردد که، می‌توان در کمترین زمان و با حداقل هزینه از سلامت منطقه جوشکاری شده، نواحی متأثر از حرارت و فلز پایه اطمینان حاصل کرد. و در صورت مشاهده هر گونه عیبی محدود و سبب تقریبی عیب مشخص می‌گردد.

روش‌های تشخیص آسیب ساختار که مبتنی بر ارتعاش است، در دهه‌های اخیر، به طور قابل توجهی به دلایل مختلفی از جمله

توانایی‌های بالقوه برای تشخیص آسیب بوسیله حسگرهای که دور از محل آسیب قرار داده شده‌اند، مورد توجه قرار گرفته‌اند [10]. خصوصیات دینامیکی مختلف، از جمله مدل اشکال (Model Shapes) [۲]، توابع پاسخ فرکانسی (Frequency Response Functions) [۳]، پاسخ‌های ارتعاشی دامنه زمان (Time Domain Vibration Responses)، توابع همبستگی متقابل (Cross Correlation Functions)، توابع انسجام (Functions Coherence) و توابع انتقاع (Transmissibility Function)، از روش‌های تشخیص آسیب ساختار است که مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۴، ۵، ۱۲]

نویسندگان این مقاله، با توجه به پژوهش‌های پیشین خود، و آزمایش تجربی که قبلاً توسط آقای لی وانگ و همکاران [۴]، صورت پذیرفته بود، از صحت، بردار ضرب داخلی (IPV)، برای شناسایی آسیب اطمینان حاصل نموده‌اند. و در این پژوهش کاربرد جدیدی برای این روش شناسایی آسیب معرفی می‌نمایند.

در این تحقیق، نتایج تحلیل مودال یک قطعه جوشکاری شده سالم با حالتی که در همان قطعه، عیب ایجاد شده است، با روش بردار ضرب داخلی (IPV)، به عنوان یک الگوریتم تشخیص آسیب که با استفاده از توابع متقابل همبستگی بین پاسخ‌های ارتعاش تحت تحریک نویز سفید و یا باند رمز عبور تحریک نویز سفید، مورد ارزیابی قرار گرفت.

### تعریف بردار داخلی (IPV)

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 است،  $C = \alpha M + \beta K$  ماتریس میرایی است،  $K$  ماتریس سختی است،  $f$  یک بردار از توابع اجباری (forcing functions) تصادفی است و  $x$  بردار جابجایی است. و حالت‌های طبیعی واقعی، فرض شده است. [6، 7، 13]

اکنون اگر پاسخ‌های جابجایی نقاط اندازه‌گیری  $1, 2, \dots, p$  را با  $x_1, x_2, \dots, x_p$  مشخص نمائیم. سپس با توجه به تابع همبستگی متقابل بین تمام ترکیبات پاسخ‌های جابجایی، و تنظیم

تاخیر زمانی  $T = 0$ ، ماتریس  $a$  با ابعاد  $p \times p$  را می توان به صورت زیر دست آورد. [8]

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

که  $R_{x_i x_j}(0)$  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 می شود، که به شرح زیر است [3,4]

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

که در آن بالانویس  $dis$  نشان می دهد که مقدار به جابه جایی مربوط می شود.

بر اساس چگالی طیفی خودکار باند عبور نویز سفید IPV می تواند به صورت زیر نوشت [3,5,9]

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

و توسط معده زیر محاسبه می شود،

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

جایی که  $\phi_r = [\phi_{1r}, \phi_{2r}, \dots, \phi_{pr}]^T$  شکل حالت  $rth$  است، که در آن، ضریب وابسته به پارامترهای مودال و پاسخ اندازه گیری نقطه  $j$  و موقعیت های تحریک،  $\langle x, y \rangle$ ، بردار ضرب داخلی، دو بردار  $x$  و  $y$  است.  $N_s$  طول  $x$  یا  $y$  است. بنابراین، معادله (4) نشان می دهد که IPV، مجموع وزن دار از حالت اشکال، ساختار است، و فاکتور وزن، هر شکل حالت، تنها به پارامترهای مودال ساختار بستگی دارد. در همین حال، معادله (5) نشان می دهد که IPV می تواند به طور مستقیم توسط دامنه پاسخ های ارتعاشی زمان محاسبه شود. همانطور که می دانیم، تغییر در پارامترهای فیزیکی محلی می تواند تغییرات ناگهانی در برخی از حالت اشکال شوند. بر این اساس، IPV یک ساختار آسیب دیده نیز ممکن است تغییرات ناگهانی داشته باشد. بنابراین، IPV ممکن است به عنوان یک بردار ویژگی آسیب، برای تشخیص آسیب ساختار پذیرفته شود.

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

$$R_{IPV,j}^{vel} = [R_{x_1 x_j}(\dot{0}), R_{x_2 x_j}(\dot{0}), \dots, R_{x_p x_j}(\dot{0})]^T \quad (6)$$

$$R_{IPV,j}^{acc} = [R_{x_1 x_j}(\ddot{0}), R_{x_2 x_j}(\ddot{0}), \dots, R_{x_p x_j}(\ddot{0})]^T \quad (7)$$

به طور مستقیم، بررسی و تأیید شده است که  $IPVs$ ، سرعت و شتاب می تواند به صورت زیر نوشته شود: [4,6]

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

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

و محاسبه شده توسط:

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

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

که در آن  $K_{j,r}^{vel}$  و  $K_{j,r}^{acc}$  ضرایب وابسته به پارامترهای مودال  $rth$  ام و پاسخ اندازه گیری نقطه  $j$  و موقعیت های تحریک، بالانویس  $vel$  یا  $acc$  نشان می دهد که مقدار به سرعت یا شتاب، به ترتیب مربوط می شود. به طور مشابه IPV تعریف شده توسط جابجایی، IPV تعریف شده توسط سرعت یا شتاب نیز، ممکن است به عنوان یک بردار ویژگی آسیب برای تشخیص آسیب ساختار پذیرفته شود. [6,4]

### مشخص شدن آسیب با استفاده از بردار ضرب داخلی

در این روش فرض می شود که اندازه گیری نویز (1) دارای میانگین صفر. (2) مستقل از پاسخ ارتعاش بدون اندازه گیری نویز است. و (3) نقاط اندازه گیری های مختلف مستقل از یکدیگر هستند. [2,6]

در اندازه گیری نویز سه فرض بالا به خوبی در عمل برآورده نمی شود، هر دو ضرب داخلی متقابل و نقطه ضرب داخلی با اندازه گیری نویز آلوده خواهد شد. بنابراین، یک شاخص آسیب محلی از تفاوت بین  $IPVs$  از ساختارهای سالم و آسیب دیده تعریف شده است، که به منظور کاهش اثر نویز اندازه گیری استفاده شده است [6]، یعنی:

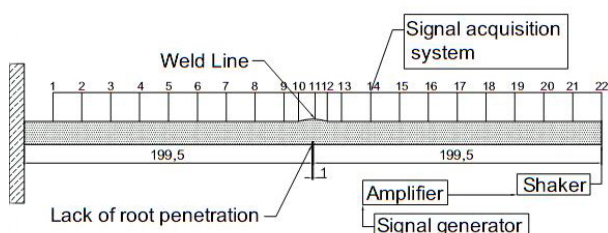
$$D_{IPV,i} = R_{IPV,i}^d - R_{IPV,i}^u \quad 11$$

از آنجایی که  $R_{IPV,i}^d$  و  $R_{IPV,i}^u$  ضرایب نشان دهنده، عنصر  $ith$  ام، در  $IPVs$ ، ساختارهای سالم و آسیب می باشد. سپس، شاخص خسارت ————— عنوان

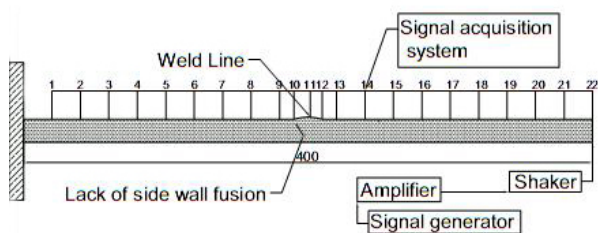
$D_{IPV} = \{D_{IPV,1}, D_{IPV,2}, \dots, D_{IPV,N_m}\}$  تعریف شده است.

به منظور استفاده حداکثر از شاخص آسیب محلی برای موقعیت آسیب، سه شاخص های مختلف برای سه حالت متفاوت

ریشه جوش (Lack of Root Penetration) ، با ابعاد  $2 \times 1 \times 40$  در فاصله ۱۹۹٫۵ میلی متری از تکیه گاه و در ریشه خط جوش قطعه ایجاد شد (شکل ۲). عیب عدم ذوب کناره جوش (Lack of Side Wall Fusion) ، بر روی فصل مشترک جوش و فلز پایه، ایجاد گردید (شکل ۳). در این مرحله قطعه معیوب، دوباره با روش آنالیز مودال، مورد تحلیل قرار گرفت. و اطلاعات لازم در یک زمان مشخص، که شامل جابجایی، سرعت نقاط مورد نظر می باشد، برای استفاده در روش ضرب داخلی (IPV) ، بدست آمد. و پس از محاسبه در نرم افزار متلب، نتایج آزمایش با آسیب عدم نفوذ ریشه جوش شکل های (۴ و ۵)، و با عیب عدم ذوب کناره جوش شکل های (۶ و ۷) حاصل شد.



شکل ۲ - ایجاد آسیب عدم نفوذ ریشه جوش در قطعه مدل سازی شده و مکان نقاط اندازه گیری شده



شکل ۳ - ایجاد آسیب عدم ذوب کناره جوش در قطعه مدل سازی شده و مکان نقاط اندازه گیری شده

برای تعیین آستانه  $t_h$  و  $t_l$  ، با توجه به دو تحقیق قبلی [4,6] و شبیه سازی متعدد، مقدار  $1,8$  برای فاکتور فاصله اطمینان  $\alpha_c$  بدست آمد.

پیشنهاد شده است [۶: ۱] شاخص آسیب  $D_{IPV}$  ، اختیار شده است هنگامی که تغییرات ناگهانی در  $D_{IPV}$  ، "تغییر ضربه" "Impulse Change" است. ۲) شاخص آسیب  $D'_{IPV}$  (یعنی مشتق مرتبه اول از  $D_{IPV}$ ) اختیار شده است هنگامی که تغییرات ناگهانی در  $D_{IPV}$  ، در "تغییر گام" "Step Change" است. ۳) شاخص آسیب  $D''_{IPV}$  (یعنی مشتق مرتبه دوم از  $D_{IPV}$ ) اختیار شده است هنگامی که تغییرات ناگهانی در  $D_{IPV}$  ، "تغییر ضربه ضعیف" "Weak Impulse Change" است. [۶،۴]

در روش شناسایی آسیب، لازم است یک، آستانه برای طبقه بندی ساختار آسیب دیده و سالم انتخاب شود. در این مقاله، آستانه مورد استفاده در پژوهش های قبلی اختیار شده است [۶]، یعنی

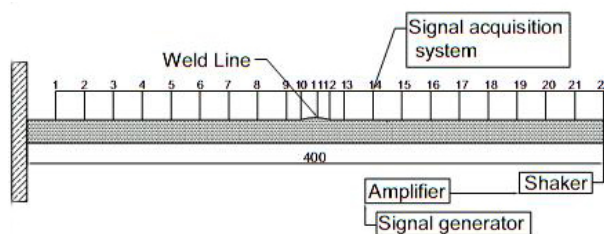
$$t_h = \mu_D + \alpha_c \sigma_D$$

$$t_l = \mu_D - \alpha_c \sigma_D \quad (12)$$

جایی که  $\mu_D$  و  $\sigma_D$  به ترتیب ضرایب مقدار متوسط و انحراف معیار  $D_{IPV}$  (یا  $D'_{IPV}$  یا  $D''_{IPV}$ )، می باشند، و  $\alpha_c$  ضریب مربوط به یک فاصله اطمینان است. هنگامی که عناصر  $D_{IPV}$  (یا  $D'_{IPV}$  یا  $D''_{IPV}$ )، در منطقه بین  $t_h$  و  $t_l$  ، قرار می گیرد، ساختار سالم در نظر گرفته می شود، در غیر این صورت، ساختار آسیب دیده است. [۶،۴]

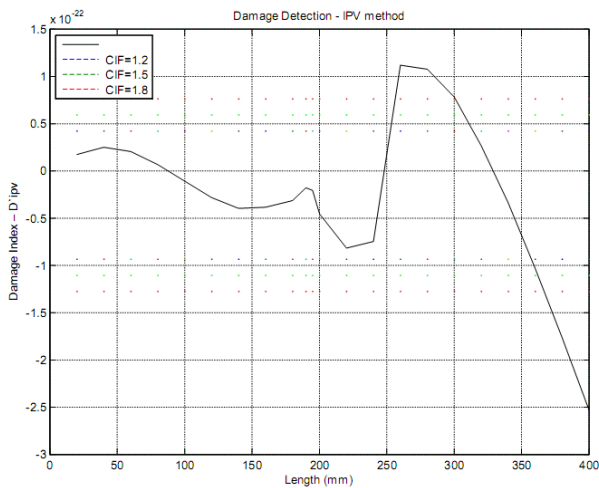
### تحلیل و نتایج یک مثال با بردار داخلی (IPV)

در این بررسی، به طور کلی، نتایج تحلیل دو قطعه از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ، با ابعاد  $40 \times 16 \times 40$  که با جوش شیری (Groove weld)، به هم متصل شده اند، قبل و بعد از ایجاد آسیب با هم مقایسه می شود. در این تحقیق سعی بر آن بوده است که، برآمدگی و زاویه های اتصال دو قطعه مطابق با شرایط واقعی و توصیه های استاندارد ASME-SEC IX ، استفاده گردد (شکل ۱). آنگاه قطعه با روش آنالیز مودال ، مورد تحلیل قرار گرفت. و اطلاعات لازم که شامل جابجایی، سرعت نقاط مورد نظر می باشد، برای استفاده در روش بردار ضرب داخلی (IPV) ، بدست آمد.



شکل ۱ - ابعاد قطعه مدل سازی شده و مکان نقاط اندازه گیری شده

در گام بعدی، در همان مدل قطعه ایجاد شده ، در مدل های جداگانه عیوب عدم نفوذ ریشه جوش ( Lack of Root Penetration) و عدم ذوب کناره جوش (Lack of Side Wall Fusion)، در قطعه جوشکاری شده ایجاد گردید. عیب عدم نفوذ در



شکل ۷ - تحلیل داده های سرعت با روش بردار ضرب داخلی (IPV) برای آسیب عدم ذوب کناره جوش

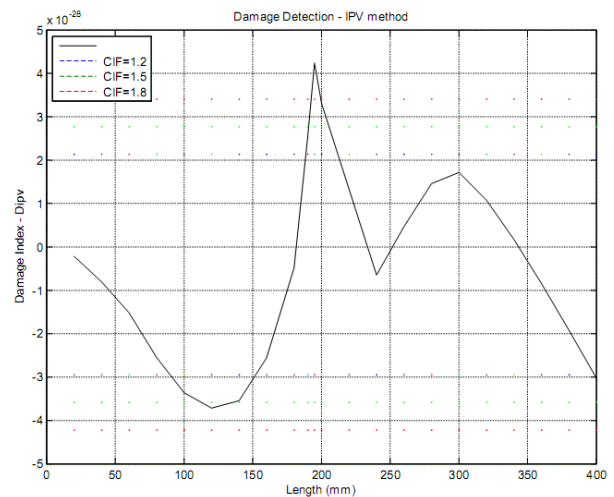
در این بررسی، مشخص شد که روش بردار ضرب داخلی (IPV) به خوبی موقعیت و طول تقریبی عیب را مشخص می سازد. همان طور که در شکل های (۴ و ۵ و ۶)، به خوبی مشخص است، نقاطی از منحنی که خارج از محدوده آستانه آسیب قرار می گیرند محدوده عیب را در قطعه مشخص مشخص می سازند.

#### نتیجه گیری و جمع بندی

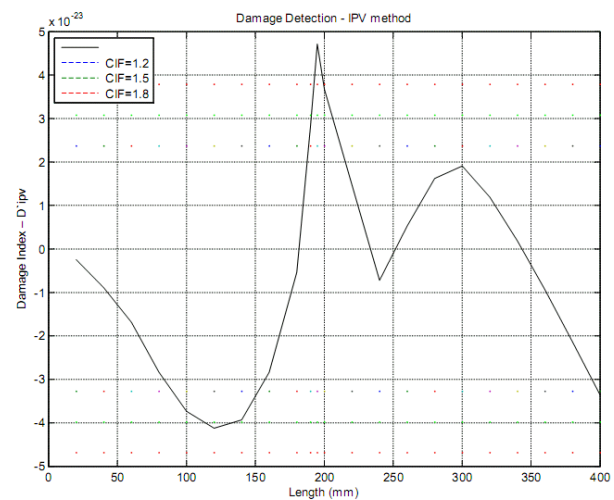
در این مقاله یک روش جدید و سریع بازرسی قطعات جوشکاری شده معرفی گردید که، می توان در کمترین زمان و هزینه از سلامت قطعه جوشکاری شده، اطمینان حاصل کرد. و در صورت مشاهده هر گونه عیبی محدوده و سایز تقریبی عیب مشخص می گردد.

#### مراجع

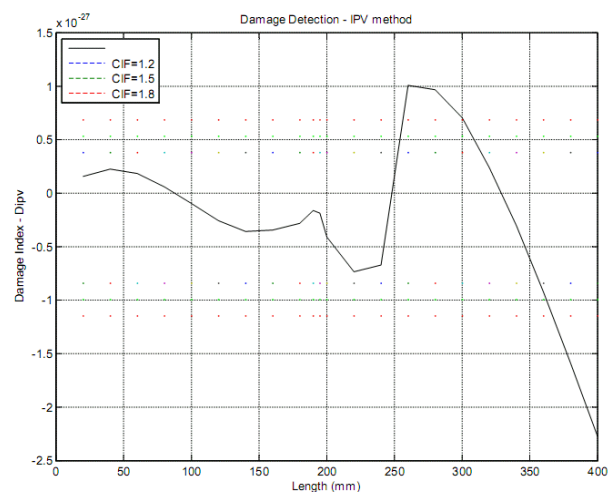
- [1] C.R. Farrar, K. Worden, 2007. "An introduction to structural health monitoring", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, pp. 303-305.
- [2] A. Alvandi, C. Cremona, 2006. "Assessment of vibration-based damage identification techniques", *Journal of Sound and Vibration*, 292, pp. 179-202
- [3] Maia N M M, Silva J M M and Almas E A M, 2003. "Damage Detection in structures; from mode shape of frequency response function methodes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(3), pp. 489-498
- [4] L. Wang, Z.C. Yang, T.P. Waters, et al, 2011. "Theory of inner product vector and its application to multi-location damage detection", *Journal of Physics: Conference Series*, 305, 012003.
- [5] L. Wang, Z.C. Yang, T.P. Waters, 2010. "Structural damage detection using cross correlation functions of vibration response", *Journal of Sound and Vibration*, 329, pp. 5070-5086.
- [6] Le Wang, Zhichun Yang, 2012. "Structural Damage Detection Using Inner Product Vector and Low Pass Filter Technique", *Mechanics and Materials*, Vols. 204-208 (2012) pp. 2942-2946.



شکل ۴ - تحلیل داده های جابجایی با روش بردار ضرب داخلی (IPV) برای آسیب عدم نفوذ ریشه جوش



شکل ۵ - تحلیل داده های سرعت با روش بردار ضرب داخلی (IPV) برای آسیب عدم نفوذ ریشه جوش



شکل ۶ - تحلیل داده های جابجایی با روش بردار ضرب داخلی (IPV) برای آسیب عدم ذوب کناره جوش

- on the correlation functions”, 9<sup>th</sup> *International Conference on Structural Dynamics*, pp. ۲۳۱۱
- [12] Xiaojuan Dang, 2015. “Statistic Strategy of Damage Detection for Composite Structure Using the Correlation Function Amplitude Vector”, *Procedia Engineering*, 99, pp. 1395 – 1406
- [13] Muyu Zhang, Rüdiger Schmidt, 2013. “A comparative study of the correlation function based structural damage detection methods under sinusoidal”, 11<sup>th</sup> *International Conference on Vibration Problems*, Lisbon, Portugal, pp. 9-12
- [14] Z.C Yang, Z.F. Yu, H. Sun, 2007. “On the cross correlation function amplitude vector and its application to structural damage detection”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, pp. 2918-2932.
- [15] Muyu Zhang, Rüdiger Schmidt, 2014. “Sensitivity analysis of an auto-correlation-function-based damage index and its application in structural damage detection”, *Journal of Sound and Vibration*, 333, pp. 7352–7363.
- [7] Z.C. Yang, L. Wang, H. Wang, et al, 2009. “Damage detection in composite structures using vibration response under stochastic excitation”, *Journal of Sound and Vibration*, 325, pp. 755-768.
- [8] Muyu Zhang n, Rüdiger Schmidt, 2014. "Sensitivity analysis of an auto-correlation-function-based damage index and its application in structural damage detection", *Journal of Sound and Vibration*, 333 ,pp. 7352–7363
- [9] Le Wang, Zhichun Yang, 2013. “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*, 332 pp. 645–653.
- [10] Dapeng Zhu, Xiaohua Yi, Yang Wang, Karim Sabra, 2009 " structural damage detection through cross correlation functions analysis of mobile sensing data”, 5<sup>th</sup> *World Conference on Structural Control and Monitoring* ,5WCSCM-10030 .
- [11] Muyu Zhang, Rüdiger Schmidt, Bernd Markert, 2014. “Structural damage detection methods based