



## بررسی تنش پسماند در نمونه‌های تنش‌زدایی شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک با بکارگیری روش سوراخکاری مرکزی

محمد هنرپیشه<sup>1\*</sup>، وحید زندیان<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب، جاسب  
\*کاشان، صندوق پستی 8731751167، honarpishe@kashanu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 14 مرداد 1393  
پذیرش: 23 شهریور 1393  
ارائه در سایت: 30 مهر 1393  
کلید واژگان:  
تنش پسماند  
تنش‌زدایی  
روش سوراخکاری مرکزی  
روش پراش اشعه ایکس

### چکیده

تنش پسماند تنشی خود متعادل است که بر اثر انجام عملیاتی خاص نظیر جوشکاری در جسم باقی می‌ماند. روش‌های مختلفی جهت کاهش تنش‌های پسماند در نمونه‌های جوشکاری شده وجود دارد. در این تحقیق پس از آماده سازی سه نمونه جوشکاری شده، یکی از نمونه‌ها با استفاده از روش حرارتی و نمونه دیگر به روش استفاده از ضربات اولتراسونیک تنش‌زدایی گردید. نمونه سوم نیز به عنوان نمونه‌ای که هیچ‌گونه عملیات تنش‌زدایی بر روی آن صورت نگرفته است، در نظر گرفته شد. جهت تعیین مقدار تنش پسماند هر یک از نمونه‌ها، از روش سوراخکاری مرکزی استفاده شد و مقدار تنش پسماند موجود در هر سه نمونه در ناحیه متأثر از حرارت جوش تعیین گردید. نتایج نشان داد که مقدار تنش‌های پسماند در روش تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک به مراتب کمتر از نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی و همچنین نمونه بدون انجام عملیات تنش‌زدایی می‌باشد. جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل، از روش پراش اشعه ایکس نیز استفاده گردید و نتایج این روش نشان داد که در نمونه تنش‌زدایی شده با ضربات اولتراسونیک در زاویه دو تتا پیکی حاصل نگردید در صورتیکه برای نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی در زاویه حدود 137 درجه شدت پیک، نشان از مقداری تنش پسماند در نمونه می‌باشد.

## Investigation of Residual Stresses in Stress-Relieved Samples by Heat Treatment and Ultrasonic Methods Using Hole-Drilling Method

Mohammad Honarpisheh<sup>1\*</sup>, Vahid Zandian<sup>2</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran  
2-Department of Mechanical Engineering, Jasp Branch Islamic Azad University, Jasp, Iran  
\*P.O.B. 8731751167 Kashan, Iran, honarpishe@kashanu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 August 2014  
Accepted 14 September 2014  
Available Online 22 October 2014

**Keywords:**  
Residual Stress  
Stress-Relieved  
Hole Drilling Method  
X-Ray Diffraction Method

### ABSTRACT

Residual stress is stress that remains in the body, such as some specific operations like welding, and is available when body is not under external loads. Different methods are available for residual stress relieved in any welded samples. In this research, samples one, two and three have been prepared and welded. Stress of samples one and two have been relieved using heat treatment method and ultrasonic method, respectively. Also, no operation has been taken on the sample three. For different amounts of residual stress of each sample, hole drilling method was used and amount of residual stress in welding heat affected area of each sample was determined. Results show that residual stress in ultrasonic method is less than heat treatment method. To validate the results the x-ray diffraction method was used and results of this method show that in the sample with ultrasonic stress, stress relief had no peak at  $2\theta$  angles, but for sample with heat treatment stress relief had a peak at  $137^\circ$ , which shows some residual stress.

### 1- مقدمه

تنش‌های پسماند تنش‌های خود متعادلی هستند که در قطعه در اثر فرآیندهای تولید نظیر جوشکاری، ریخته‌گری و غیره محبوس می‌گردند و می‌تواند تأثیر مثبت یا منفی بر روی عمر قطعات داشته باشند [1]. بسته به نوع و مقدار تنش باقی‌مانده، این تنش می‌تواند برای استحکام ساختار مفید و یا مضر باشد و از آنجا که نوع تنش معمولاً به راحتی قابل تشخیص نیست، بهتر است که هیچ تنش باقی‌مانده‌ای در ساختار باقی نماند و باید قبل از کاربری قطعه این تنش‌ها آزاد و یا در کل قطعه توزیع شوند که این فرآیند را

یکی از مباحث مهم در زمینه جوشکاری در سازه‌های مهندسی بحث کاهش تنش‌های پسماند در خطوط جوش و بهبود کیفی جوش است. تنش‌های پسماند باعث کاهش حد تحمل بار، عمر اتصالات جوشی و تغییر فرم‌هایی در سازه‌های جوشکاری شده می‌گردند.

تنش پسماند تنشی است که در جسم باقی‌مانده و در تعادل با محیط اطراف خود می‌باشد. بنابراین دانستن مقدار آن در طراحی بسیار مهم است.

Please cite this article using:

M. Honarpisheh, V. Zandian, Investigation of Residual Stresses in Stress-Relieved Samples by Heat Treatment and Ultrasonic Methods Using Hole-Drilling Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 273-278, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

837<sup>6</sup> برای نخستین بار در سال 1981 تعریف و ارایه گردد. این استاندارد یکی از مهم‌ترین مراجع موجود برای تعیین تنش پسماند است و در آن الزامات اندازه‌گیری تنش ارایه شده است [6].

اصول و مبانی پرش اشعه ایکس را اولد و همکارانش ارایه نمودند [7]. تحقیقات زیادی در زمینه تنش‌های پسماند بر روی نمونه‌های مختلف با استفاده از این روش صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیق آقای آلبرتینی و همکارانش در سال 1997 اشاره نمود. وی به اندازه‌گیری تنش پسماند بر روی صفحات جوشکاری شده از جنس آلومینیوم 2219 پرداخت [1].

در سال 2001 والکر و همکاران تنش‌های پسماند جوشی را با تنش‌گیری ارتعاشی کاهش داده و نشان دادند که در اثر تنش‌گیری ارتعاشی حداکثر به مقدار 30 درصد تنش‌های پسماند کاهش یافته است. در این تحقیق از فرکانس رزونانس 25 هرتز استفاده گردید [8].

استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک در فرکانس 17/8 برای تنش‌گیری توسط آوکی در سال 2005 ارائه گردید. این تحقیق با هدف اثبات کارایی ارتعاشات با فرکانس بالا، برای کاهش تنش‌های پسماند، در مرحله شکل‌گیری و در حین فرآیند جوشکاری انجام شد [9].

در سال 2012 شلوندی و همکاران به بررسی تجربی فرآیند اولتراسونیک بر روی قطعات فولادی با در نظر گرفتن اثر اندازه دانه‌ها پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که در نمونه‌های درشت دانه در حدود 46 درصد و در تسمه‌های ریز دانه در حدود 27 درصد از مقدار تنش‌های پسماند کاسته می‌شود. در پژوهش مذکور از بین پارامترهای بررسی شده، اندازه دانه بیشترین تأثیر و نیروی پیش‌بار کمترین تأثیر را در نرخ تنش‌گیری داشتند [10].

در مقاله حاضر تنش‌های پسماند در نمونه‌های تنش‌زدایی شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک بررسی و پس از آن به تحلیل نتایج نمونه‌های مذکور نسبت به نمونه بدون انجام عملیات تنش‌زدایی پرداخته شده است. جهت بررسی تنش‌های پسماند و اندازه‌گیری مقدار آن از روش سوراخکاری مرکزی استفاده شده است. ضمن اینکه جهت بررسی کیفی نتایج از روش پرش پرتو ایکس نیز استفاده گردید. که در ادامه به شرح آن پرداخته خواهد شد.

## 2- روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا دو نوار از جنس فولاد 1/0065 با ابعاد 150 × 750 میلی‌متر و ضخامت 4/6 میلی‌متر تهیه گردید. پس از آماده سازی شامل پخ زدن در محل خط جوش با زاویه حدود 45 درجه، با استفاده از گاز آرگن و الکتروود تنگستن<sup>7</sup> جوشکاری انجام گردید. بر اساس استاندارد ای‌اس‌ام<sup>8</sup> [11] خواص مکانیکی نوار استفاده شده پیش از فرآیند جوشکاری مطابق جدول 1 می‌باشد.

پس از آن، نوار جوشکاری شده به سه قسمت مساوی تقسیم و نوارهای برش خورده با نام نمونه‌های A، B و C نامگذاری شدند. نمونه A نمونه‌ای است که عملیات تنش‌زدایی به روش حرارتی بر روی آن انجام می‌گیرد. نمونه B نمونه‌ای است که عملیات تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک بر روی آن انجام و نمونه C به عنوان نمونه‌ای که هیچ گونه عملیاتی پس از

تنش‌گیری گویند. روش‌های مختلفی برای کاهش تنش‌های باقی‌مانده در قطعات مختلف وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تنش‌زدایی حرارتی و تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک<sup>1</sup> اشاره نمود.

بطور کلی تنش‌زدایی حرارتی فرآیندی است که در آن باید از دمای  $A_1$  در زمان حداقل  $t_1$  به دمای  $A_2$  رسیده و به مدت  $t_2$  در همان دمای  $A_2$  قطعه را نگهداری نمود و در زمان حداقل  $t_3$  به دمای  $A_1$  بازگشت. انتخاب روش اصولی فرآیند کنترلی کمک شایانی به اصولی طی شدن روند تنش‌گیری می‌کند [2].

روش استفاده از ضربات اولتراسونیک نیز روش نسبتاً نوینی جهت حذف تنش‌های پسماند کششی و تبدیل آن به تنش‌های فشاری در مناطق حساس به خستگی می‌باشد. همچنین مناطق تمرکز تنش و عیوب را در پاشنه جوش کاهش داده و استحکام خوردگی- خستگی و استحکام خستگی را افزایش می‌دهد. این روش برای اولین بار در اوایل دهه 70 میلادی در روسیه اختراع شد و مورد توجه بسیاری از مخترعین و صنعتگران قرار گرفت. طی این فرآیند، تنش‌ها از حالت کششی در سطح، حداکثر تا تنش تسلیم فلز به حالت فشاری تبدیل می‌شوند، که این موضوع در افزایش استحکام سازه جوشی بسیار موثر است [3].

تکنیک‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به روش سوراخکاری مرکزی<sup>2</sup>، روش پرش پرتو ایکس<sup>3</sup>، تفرق الکترون، تفرق نوترون، رهاسازی ترک اشاره نمود که هر کدام دارای مزایا، معایب و محدودیتهایی نیز می‌باشند [4].

در این پژوهش پس از تنش‌زدایی نمونه‌های جوشکاری شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک، جهت اندازه‌گیری و بررسی تنش‌های باقی‌مانده در آن‌ها از روش سوراخکاری مرکزی و جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل از روش پرش پرتو ایکس استفاده شده است.

در اوایل دهه 70، استانبلیکو روش یوآی‌تی<sup>4</sup> را پیشنهاد نمود که کاربردهای فراوانی در تولید و نگهداری سازه‌های جوشکاری شده داشت. این روش شامل سوزن لغزانی بود که در راستای محوری حرکت می‌کرد و باعث اعمال ضربه قوی اولتراسونیک به سطح مورد عمل و به دنبال آن یک تغییر شکل پلاستیک سنگین در قطعه بوجود می‌آمد. در اثر همین ضربه، موج تنشی در قطعه ظاهر می‌شد که در نهایت باعث بهینه‌سازی مواد در عمق قطعه‌کار می‌گردید. بعدها پروکوپنکو روشی پیشنهاد نمود که با تحریک پیوسته امواج اولتراسونیک کار می‌کرد و نتایج آن شبیه به حالت جرم کرومی میانی بود. در این حالت، ضربه میان مبدل اولتراسونیک و قطعه، زمانی در حدود 0/0001 الی 0/05 ثانیه اتفاق می‌افتاد [5].

در سال 2011 یوری کادریا به تأثیر تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک با استفاده از دستگاه یوپی<sup>5</sup> پرداخته و به طور موثر بهبود عمر خستگی در سازه‌های جوشکاری شده را مشاهده و بررسی نمود.

اندازه‌گیری تنش پسماند به کمک سوراخکاری برای اولین بار در سال 1934 توسط ماتار معرفی شد. در سال 1966 رندلر و ویگنس این روش را توسعه دادند و هندسه شکل استاندارد را برای روزت کرنش سنج پیشنهاد نمودند. توسعه روش سوراخکاری موجب شد که استاندارد ای‌اس‌تی‌ام-ای

1- Ultrasonic impact treatment (UIT)

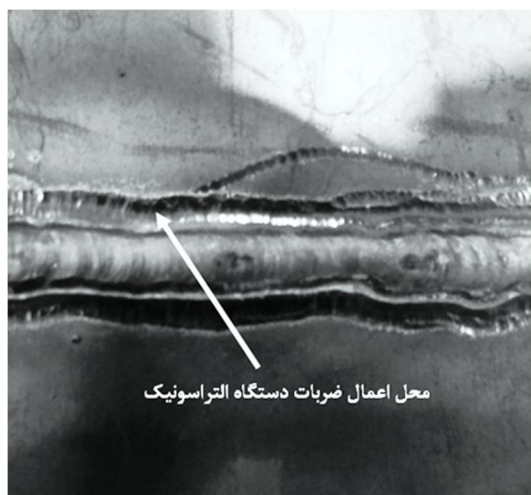
2- Hole drilling

3- X-ray diffraction method

4- UIT

5- UP

6- ASTM- E 837  
7- Tungsten inert gas  
8- ASM



شکل 2 عملیات تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک بر روی نمونه B

استفاده از روش سوراخکاری مرکزی مقدار تنش‌های پسماند موجود در نمونه A محاسبه و تعیین گردید.

روش سوراخکاری مرکزی از مهمترین روشهای اندازه‌گیری تنش پسماند به روش مکانیکی است که در این روش، مقدار تنش باقی‌مانده به وسیله اندازه‌گیری مقدار کرنش آزاد شده با استفاده از کرنش‌سنج‌های مکانیکی و الکترونیکی تعیین می‌گردد. در روش سوراخکاری مرکزی یک سوراخ کوچک در صفحه حاوی تنش ایجاد می‌شود. با ایجاد این سوراخ، تنش‌های باقی‌مانده در اطراف سوراخ آزاد شده و می‌توان با قرار دادن کرنش‌سنج در اطراف سوراخ، مقدار تنش آزاد شده را اندازه‌گیری نمود. در شکل 3 یکی از رایج‌ترین کرنش‌سنج‌ها در اندازه‌گیری تنش پسماند با نام اف‌آ‌راس 23-2<sup>3</sup> نشان داده شده است [13].

جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند موجود در سطح نمونه‌های A، B و C ابتدا کرنش‌سنج سه‌المانه بر روی نمونه مورد نظر و در ناحیه تحت تأثیر حرارت و نزدیک به خط جوش قرار داده شد. پس از اتصال سیم‌های رابط به دستگاه و قرار دادن دریل مربوطه در مرکز کرنش‌سنج و با آغاز عملیات سوراخکاری یک سوراخ با قطر مشخص و در مرکز کرنش‌سنج ایجاد می‌شود. در این حال مقدار کرنش‌های خوانده شده ناشی از آزاد شدن تنشها در حین سوراخ شدن را یادداشت کرده و در پایان برای هر سه نمونه، سه کرنش با نام  $\epsilon_1$ ،  $\epsilon_2$  و  $\epsilon_3$  به‌دست آمد که با قراردادن آن‌ها در روابط مرتبط و استخراج شده از استاندارد ای‌اس‌تی‌ام-837 مقدار تنش ماکزیمم، مینیمم و همچنین زاویه بین آنها به دست خواهد آمد.

شکل 4 محل قرارگیری کرنش‌سنج بر روی نمونه‌ی C را نشان می‌دهد. جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل، از روش استاندارد پراش اشعه ایکس که روشی غیرمخرب در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند می‌باشد، استفاده گردید. در این روش از تغییر در فاصله بین صفحات کریستالی به عنوان کرنش‌سنج استفاده می‌شود. رابطه اساسی در روش استاندارد پراش اشعه ایکس، قانون براگ است که مطابق فرمول 1 می‌باشد:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

که در رابطه‌ی 1،  $n=1$  مرتبه انعکاس،  $\lambda$  طول موج اشعه ایکس،  $d$  فاصله

جوشکاری بر روی آن انجام نگرفته است، انتخاب می‌گردد. فرآیند تنش‌زدایی بر روی نمونه A به این صورت انجام پذیرفت که نمونه تا دمای 600 درجه سانتی‌گراد با استفاده از دستگاه تنش‌زدایی حرارتی و با قرار دادن المنت‌های مربوطه به مدت دو ساعت گرم می‌شود. فرآیند نگهداری در دمای مشخص و در مدت زمان حدود یک ساعت و در نهایت فرآیند خنک‌کاری تا دمای محیط و از دمای 600 درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت [12]. شکل 1 منحنی تنش‌زدایی حرارتی بر روی نمونه‌ی A را نشان می‌دهد.

روش دیگری که جهت تنش‌زدایی نمونه‌ی B استفاده شد، عملیات تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک است که تنش‌های فشاری را در موضعی از جوش که ترک‌های خستگی مستعد به شکل‌گیری هستند ایجاد کرده و هندسه پاشنه جوش را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. طی این فرآیند تنش‌ها از حالت کششی در سطح، حداکثر تا تنش تسلیم فلز، به حالت فشاری تبدیل می‌شوند که این موضوع در افزایش استحکام سازه جوشی بسیار موثر است [3]. عملیات تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک بر روی نمونه B و با استفاده از دستگاه یوپی 500<sup>1</sup> صورت پذیرفت [5].

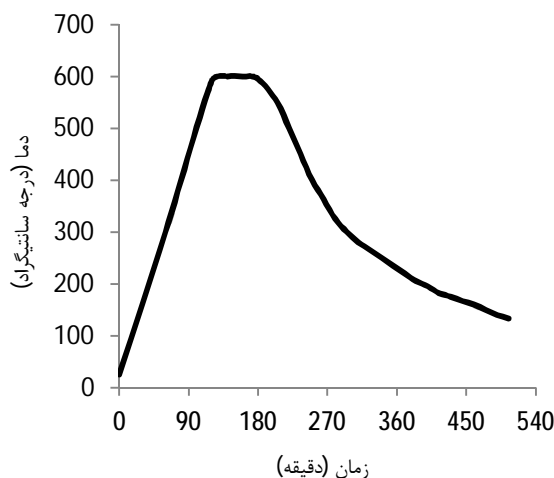
شکل 2 عملیات تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک بر روی نمونه B را نشان می‌دهد.

انتقال ضربات در این روش با فرکانس 27 کیلوهرتز بر روی نمونه B و در ناحیه متأثر از حرارت<sup>2</sup> که ناحیه‌ای است که ساختار و دانه‌بندی فلز پایه در اثر حرارت ناشی از جوشکاری تغییر یافته است صورت پذیرفت. این ناحیه به دلیل سرعت بالای سرد شدن، ساختار مارتنزیتی در آن تشکیل می‌گردد و بسیار مستعد ایجاد ترک در قطعه جوشکاری شده و به‌خصوص در ناحیه جوش می‌باشد.

پس از انجام عملیات تنش‌زدایی بر روی نمونه‌های A و B، ابتدا با

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد 1/0065 [11]

خواص	فولاد نورد سرد	فولاد نورد گرم
تنش تسلیم (MPa)	300	170
مدول الاستیک (GPa)	200	200
استحکام کششی (MPa)	330	280



شکل 1 منحنی تنش‌زدایی حرارتی بر روی نمونه A

1- UP-500  
2- Heat affect zone

جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی استفاده شده است.

### 3-1- نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی

پس از ثبت کرنش‌های خوانده شده از دستگاه سوراخکاری مرکزی و قرار دادن مقادیر به دست آمده در روابط مستخرج از استاندارد ای‌اس‌تی‌ام-ای 837، مقدار تنش‌های باقی‌مانده برای سه نمونه A، B و C شامل تنش‌های ماکزیمم، تنش مینیمم و زاویه  $\beta$  که زاویه بین دو تنش اصلی می‌باشد، به دست آمد. شکل 5 نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی را بر روی نمودار میله‌ای نشان می‌دهد.

همانطور که از نمودار میله‌ای و نتایج به دست آمده از روش سوراخکاری مرکزی در شکل 5 مشاهده می‌شود، مقدار تنش ماکزیمم در نمونه بدون انجام عملیات تنش‌زدایی یا نمونه C مقدار 135/2 مگاپاسکال به دست آمد. این مقدار برای نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی یا نمونه A برابر 61/58 مگاپاسکال می‌باشد که نشان از کاهش تنش‌های باقی‌مانده نمونه A در مقایسه با نمونه C دارد. همچنین نمونه B که عملیات تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک بر روی آن صورت گرفته است، دارای مقدار تنش باقی‌مانده کمتری معادل 37/87 مگاپاسکال می‌باشد که به مراتب کمتر از نمونه‌های A و C بوده و این نشان از برتری روش تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک در مقایسه با تنش‌زدایی به روش حرارتی است.

نتایج به دست آمده از نمونه B که مربوط به تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک می‌باشد، با مقاله آقای کادیوتیسو و همکارش کلیمن که افزایش استحکام خستگی بر روی اتصالات جوشکاری و تنش‌زدایی شده به همین روش و همچنین تبدیل تنش‌های پسماند کششی به فشاری در نمونه‌های تنش‌زدایی شده با روش مذکور نیز تطابق دارد [14].

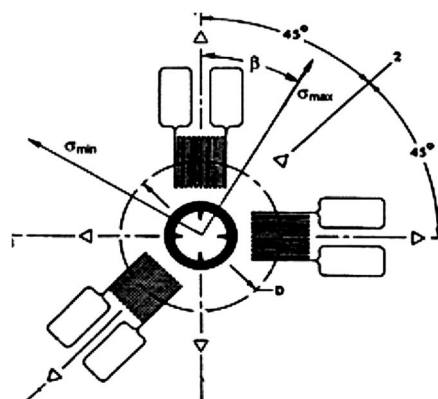
همچنین نتایج حاصل را می‌توان با مقاله آقای والکر و همکاران در کاهش 30 درصدی تنش‌های پسماند در اتصال جوشی با استفاده از عملیات تنش‌گیری ارتعاشی نیز تطابق داد [8].

### 3-2- نتایج حاصل از روش پراش پرتو ایکس

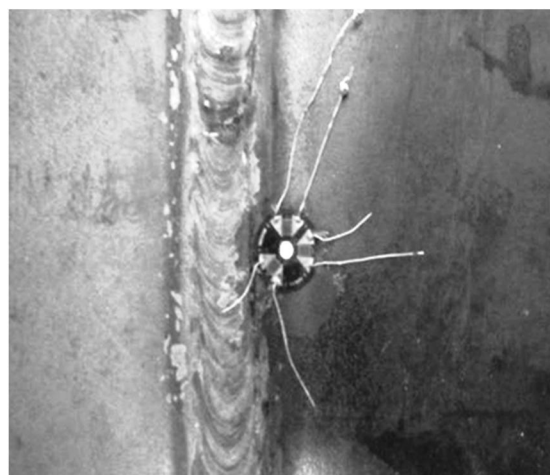
جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی از روش استاندارد پراش اشعه ایکس استفاده شد که نتایج آن برای نمونه A و B به ترتیب در شکل 6 و 7 نشان داده شده است. مطابق شکل 6 که مربوط به

جدول 2 مشخصات دستگاه ایکس‌آردی

مشخصات دستگاه	مقدار و واحد
طول موج پرتو $k\alpha_1$	1/540598 [A]
طول موج پرتو $k\alpha_2$	1/544426 [A]
زاویه شروع آنالیز $2\theta$	125 درجه
زاویه پایان آنالیز $2\theta$	150 درجه
اندازه هر مرحله $2\theta$	0/05 درجه
زمان هر مرحله	1 ثانیه
نحوه تابش پرتو ایکس	پیوسته
مشخصات ژنراتور	40A و 40V
آند تیوب	مس



شکل 3 کرنش‌سنج نوع A در اندازه‌گیری تنش پسماند [9]



شکل 4 محل قرارگیری کرنش‌سنج بر روی نمونه C

بین صفحات کریستالی و  $\theta$  زاویه انعکاس (زاویه براگ) می‌باشد. در این روش، اشعه‌های ایکس به سطح نمونه تابیده شده و اشعه‌های منعکس شده، در جایی که دارای بیشترین شدت می‌باشند، دریافت می‌گردد. در آنالیز تنش‌های پسماند از زاویه‌های انعکاس بالاتر از 120 درجه استفاده می‌شود که در این تحقیق زاویه انعکاس را 125 تا 150 درجه و جهت دقت بیشتر اندازه هر مرحله 0/05 درجه با زمان یک ثانیه برای هر مرحله انتخاب گردید. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و قرار دادن نمونه A در دستگاه ایکس‌آردی<sup>1</sup> ساخت شرکت فیلیپس، نموداری بر حسب شدت و زاویه  $2\theta$  به دست می‌آید که از روی پیک حاصل در زاویه  $2\theta$  و پهنای قله منحنی، می‌توان مقدار تنش پسماند هر یک از نمونه‌ها را بررسی نمود. مشخصات دستگاه ایکس‌آردی و شرایط آزمایش آن در جدول 2 ارائه شده است.

پس از آماده‌سازی هر یک از نمونه‌های A، B و قرار دادن آن در دستگاه ایکس‌آردی، می‌توان به بررسی مقدار پیک به دست آمده هر یک از نمونه‌ها در زاویه  $2\theta$  پرداخت.

### 3- بحث و بررسی نتایج

در این بخش ابتدا به بررسی نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی پرداخته و پس از آن نتایج به دست آمده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر می‌توان گفت از روش دوم

## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی مقدار تنش‌های پسماند موجود در نمونه‌های تنش‌زدایی شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که با توجه به نتایج حاصل، دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

1- انجام عملیات تنش‌زدایی به روش حرارتی بر روی نمونه جوشکاری شده، منجر به کاهش تنش‌های پسماند در نمونه تنش‌زدایی شده نسبت به نمونه تنش‌زدایی نشده گردید.

2- انجام عملیات تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک، منجر به کاهش تنش‌های پسماند بیشتر در مقایسه با روش تنش‌زدایی حرارتی گردید و این نشان از برتری این روش نسبت به روش تنش‌زدایی حرارتی می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از روش تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک، از روش مذکور می‌توان به عنوان جایگزینی برای روش تنش‌زدایی حرارتی به خصوص در محل‌هایی که امکان استفاده از المنت‌های دستگاه تنش‌زدایی وجود ندارد به سادگی و البته با مدت زمانی به مراتب کمتر از روش تنش‌زدایی حرارتی، استفاده نمود.

همچنین در روش تنش‌زدایی حرارتی جهت گرم کردن قطعه و رساندن المنت‌های دستگاه، به انرژی زیادی نیاز می‌باشد که در روش تنش‌زدایی با استفاده از ضربات اولتراسونیک این مهم حذف گردیده است. موارد مذکور را می‌توان از مزایای روش تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک نسبت به روش حرارتی نیز به حساب آورد.

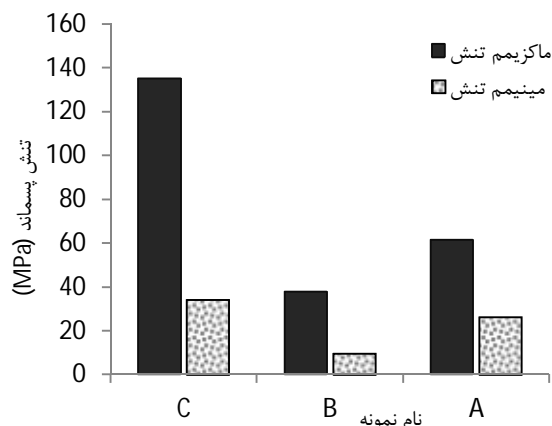
همچنین جهت اعتبار بخشی به نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی از روش استاندارد پراش اشعه ایکس استفاده شد که علاوه بر تأیید نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی، دستاوردهای زیر نیز به دست آمد:

1- در زاویه  $2\theta$  معادل  $137^\circ$  درجه بر روی نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی، پیکی به دست آمد که نشان از وجود مقداری تنش پسماند در نمونه تنش‌زدایی شده به روش مذکور می‌باشد.

2- در نمونه دوم که با استفاده از ضربات اولتراسونیک عملیات تنش‌زدایی بر روی آن انجام شده بود، به دلیل نزدیک شدن شدت پیک‌های ماکزیمم و مینیمم حاصل از روش استاندارد پراش اشعه ایکس به یکدیگر، پیکی حاصل نگردید و این نشان از کاهش تنش‌های پسماند در نمونه مذکور نسبت به نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی می‌باشد.

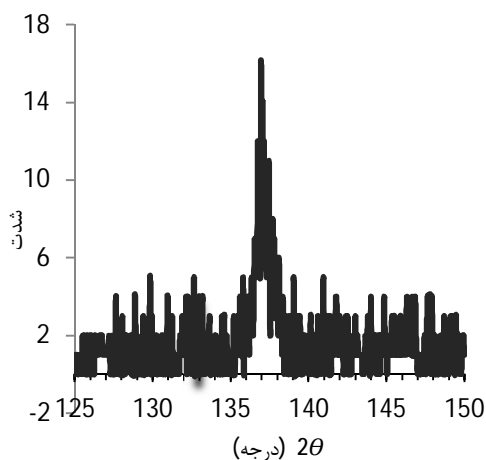
3- با بررسی نتایج حاصل از روش پراش پرتو ایکس بر روی نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی و مقایسه آن نسبت به نمونه تنش‌زدایی شده با استفاده از ضربات اولتراسونیک می‌توان چنین استنباط کرد که به دلیل یکسان بودن شدت قله‌ها در تمامی زوایا به غیر از زاویه  $137^\circ$  درجه در نمونه حرارتی، می‌توان از وجود تنش پسماند در نمونه مذکور اطمینان حاصل کرد. همچنین به دلیل اختلاف شدت پیکها و پراکندگی آنها در نمونه تنش‌زدایی شده با ضربات اولتراسونیک و به دلیل عدم وجود پیک با شدت زیاد و متمرکز در زاویه‌ای خاص، نمی‌توان به وجود تنش پسماند زیاد در نمونه تنش‌زدایی شده با استفاده از ضربات اولتراسونیک استناد کرد یا حداقل مقدار تنش پسماند در مقایسه با نمونه حرارتی کمتر می‌باشد.

4- با توجه به نتایج حاصل از روش استاندارد پراش اشعه ایکس و همچنین نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی، از روش پراش پرتو ایکس می‌توان جهت اعتبار بخشی به روش اندازه‌گیری تنش پسماند با

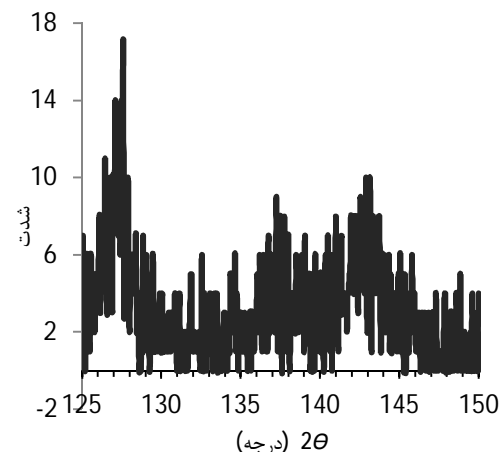


شکل 5 نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی بر روی نمودار میله‌ای

نتایج حاصل از روش استاندارد پراش اشعه ایکس بر روی نمونه A می‌باشد، در زاویه  $2\theta$  معادل  $137^\circ$  درجه پیکی حاصل گردید که نشان از وجود مقداری تنش پسماند در نمونه تنش‌زدایی شده به روش حرارتی می‌باشد در صورتیکه در نمونه B تنش‌زدایی شده با استفاده از ضربات اولتراسونیک که نمودار شدت و زاویه  $2\theta$  آن در شکل 7 نشان داده شده است، به دلیل نزدیکی ماکزیمم و مینیمم پیک‌های حاصل، در زوایای بین  $125^\circ$  تا  $150^\circ$  درجه، قله-ای حاصل نگردید و این نشان از کاهش تنش‌های پسماند در نمونه‌ی B نسبت به نمونه‌ی A و همچنین صحت نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی می‌باشد.



شکل 6 نتایج حاصل از روش استاندارد پراش اشعه ایکس بر روی نمونه A



شکل 7 نتایج حاصل از روش استاندارد پراش اشعه ایکس بر روی نمونه B

ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structure, See also URL <http://www.itlinc.com>.

- [4] N. S. Rosin, B.M. Dassistia, K. Y. Benyounisb and A. G. Olabib, *Methods of Measuring Residual Stresses in Components*.
- [5] *operational manual up-500*, product by ITL, See also URL <http://www.itlinc.com>.
- [6] M. Sedighi, M. Khandae, J. Jodake, Calibration Coefficients for Residual Stress Measurement in Incremental Hole Drilling Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-27, 2011. (In Persian)
- [7] J. H. Auld, G. B. Greenough, Residual Lattice Strains in Iron Single Crystals, *J. Acta Metallurgica*, Vol. 2, No. 2, pp. 209-213, 1954.
- [8] S. M. Munsif, A. J. Waddell, C. A. Walker, The Influence Of Vibratory Treatmenton The Fatigue Life Of Welds: A Comparison With Thermal Stress Relief, *International Journal Of Strain*, Vol. 37, pp. 141-149, 2001.
- [9] S. Hirai, Sh. Aoki, *Reduction Of Residual Stress By Ultrasonic Surface Vibration*, *Advances In Vibration Engineering*, Vol. 7, No.2, pp. 207-216, 2005.
- [10] M. Shalvandi, Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi, Experimental Evaluation Of Ultrasonic Stress Relieving On Steel Specimens Considering Grain Size Effect, *Modares Mechanical Engineering*, pp. 21-33, 2012. (In Persian)
- [11] *ASM Handbook*, Vol.1, Ohio, ASM international, 2004, p. 700.
- [12] *ASM Handbook*, Vol.4, Ohio, ASM international, 2004, p. 81.
- [13] ASTM E837-01, *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gauge Method*, American Society for Testing and Materials, WestConshohocken, 2001.
- [14] y. kudr, Myavtsev, J. Kleiman, increasing fatigue strength of welded joints by ultrasonic impact treatment, *iiw*. Document Xiii , 2338, 2010

استفاده از روش سوراخکاری مرکزی و صحت نتایج حاصل از آن روش استفاده نمود.

## 5- فهرست علائم

### علائم یونانی

زاویه بین تنش‌های اصلی	$\beta$
ماکزیمم تنش اصلی (MPa)	$\sigma_{max}$
مینیمم تنش اصلی (MPa)	$\sigma_{min}$
زاویه انعکاس (زاویه براگ)	$\theta$
کرنش‌های به دست آمده در روش سوراخکاری مرکزی	$\epsilon_1$ ، $\epsilon_2$ و $\epsilon_3$

## 6- مراجع

- [1] M. Sedighi, R. Nazemnezhad, Analysis of the effect of residual stress measurement method for determining the position of the peaks in the diffraction curve of standard X-ray diffraction method, *Air and Space Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 73-88. (In Persian)
- [2] M.A. Golozar, *Heat treatment of steels*, Isfahan University of Technology, No. 2, 2000. (In Persian)
- [3] Northern scientific & Technology Company. *Guide for application of*