



بررسی عددی و تجربی تأثیر تعداد لایه‌ها بر تنش‌های پسماند در فرآیند روکشدهی

ایمان معصومی دهقی، علیرضا فلاحی آرزودار^{*}، ایرج ستاری فر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ آبان ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۲ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۳ فروردین ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۳ مرداد ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

تنش پسماند
روکش دهی
اجزا محدود
روش سوراخ‌کاری

چکیده: تنش‌های پسماند جوشی یکی از مهم‌ترین مسائل در ایمنی و اطمینان سازه‌های حساس مانند اجزای راکتورهای هسته‌ای می‌باشند. سطح داخلی مخازنی که از فولاد کربنی ساخته شده‌اند، به منظور جلوگیری از خوردگی ناشی از محیط خورنده به‌وسیله لایه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی روکش دهی می‌شود. در این پژوهش یک صفحه فولادی از جنس فولاد کم‌کربن فریتی ۸۵۱۶ گرید ۷۰ به‌وسیله روش جوشکاری الکترو دستی، روکش دهی می‌شود. سپس این فرآیند مورد تحلیل اجزا محدود در نرم افزار آباکوس قرار گرفته و تنش‌های پسماند حاصل بررسی می‌گردد. به منظور صحت‌گذاری بر نتایج، از روش سوراخ‌کاری برای تعیین تنش‌های پسماند استفاده شده است. در نهایت تنش‌های پسماند در نمونه‌هایی که به صورت دو لایه و سه لایه روکش دهی شده‌اند، بررسی می‌شوند. با در نظرگیری منابع خطا در انجام آزمایش، نتایج دارای انطباق نسبتاً مناسبی می‌باشند. نتایج حاکی از آن است که بیشترین مقدار تنش‌های پسماند در قسمت روکش، به صورت کششی و در حد تنش تسلیم لایه روکش و فلز پایه است. همچنین با افزایش تعداد لایه در راستای ضخامت لایه روکش و صفحه فولادی، تنش‌های پسماند کاهش می‌یابند. این در حالی است که در سطح لایه روکش تنش‌ها تغییرات ناچیزی دارند و روی صفحه فولادی در مرز بین لایه روکش و صفحه، تنش‌های پسماند با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابند.

۱- مقدمه

مخازن و نازل‌های اصلی راکتورهای هسته‌ای از فولاد فریتی ساخته شده‌اند. سطح داخلی این قسمت از راکتورهای هسته‌ای به دلیل تماس با محیط خورنده، تحت تأثیر خوردگی قرار می‌گیرند. به منظور جلوگیری از این پدیده و آثار مخرب بعد از آن و با توجه به حساسیت بالا و نیاز به ایمنی و اطمینان بالا برای این سازه‌ها، سطح داخلی آن‌ها به‌وسیله فولاد زنگ نزن آستنیتی روکش دهی^۱ می‌شود. یکی از مسائل مهم و حیاتی، وجود تنش‌های پسماند ناشی از روکش دهی می‌باشد. همچنین به منظور تعدیل این تنش‌ها از عملیات حرارتی بعد از جوشکاری^۲ استفاده می‌شود. اگرچه تحقیقات نشان داده است که حتی بعد از عملیات حرارتی، تنش‌های پسماند در لایه روکش باقی می‌ماند [۱]، تحقیقات مختلفی به صورت عددی و تجربی در ارزیابی تنش‌های پسماند روکش دهی انجام شده است. سیگل و براند [۲] به منظور بررسی تنش‌های ایجاد شده در صفحات روکش دهی شده، از روش اجزا محدود استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روکش دهی باعث ایجاد تنش‌های کششی در لایه روکش و تنش‌های فشاری در فلز پایه نزدیک لایه روکش می‌شود. اوگاوا و همکاران [۳] به بررسی اجزا محدود و تجربی تنش‌های پسماند روکش دهی به همراه عملیات حرارتی بعد از آن، نزدیک لایه روکش پرداختند. پروهیت و بالیگار [۴] با بررسی تنش‌های پسماند

حاصل از روکش دهی فولاد فریتی به‌وسیله فولاد زنگ نزن آستنیتی از طریق روش اجزا محدود تأثیر ضخامت روکش را بر تنش‌های پسماند بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هرچه ضخامت لایه روکش افزایش پیدا کند، تنش‌های پسماند نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین تأثیر جنس‌های مختلف برای لایه روکش را بررسی کردند و نشان دادند هرچه ضریب انبساط حرارتی لایه روکش بالاتر باشد، تنش‌های پسماند بالاتری ایجاد می‌شود. ریپیکی و همکاران [۵] تأثیر کاهش ضخامت فلز پایه روکش شده و لایه روکش را به‌وسیله ماشین‌کاری بر تغییرات تنش‌های پسماند بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش ضخامت فلز پایه از طریق ماشین‌کاری نمونه اولیه، باعث کاهش تنش‌های کششی در لایه روکش می‌شود. این در حالی است که نتایج آن‌ها بیانگر این بود که در صورت ماشین‌کاری لایه روکش، تنش‌های پسماند افزایش پیدا می‌کنند. جیمز و همکاران [۶] به بررسی تنش‌های پسماند روکش دهی به وسیله دو روش سوراخ‌کاری عمیق و پراش نوترونی^۳ پرداختند. اندازه‌گیری‌های آن‌ها حاکی از اختلاف بین نتایج این دو روش است؛ به طوری که نتایج نشان داد که روش پراش نوترونی، مقادیر بالاتری برای قله تنش‌های کششی نشان می‌دهد. این در حالی است که روش سوراخ‌کاری عمیق دارای خطای سیستماتیک بیشتری است. جیانگ و همکاران [۷] تأثیر حرارت ورودی، تعداد لایه‌ها بر تنش‌های پسماند روکش و همچنین تغییر شکل‌های ایجاد شده را بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که حرارت ورودی و تعداد لایه‌ها در توزیع تنش‌های پسماند تأثیر ندارند؛ در

1 Cladding
2 Post Weld Heat Treatment(PWHT)

هندسه اجزا مورد روکش دهی، ضخامت لایه روکش، خواص فلز پایه، روکش، شرایط حرارتی و فشار قبل و بعد از روکش دهی وابسته است. هدف از این تحقیق، بررسی تنش‌های پسماند حاصل از فرآیند روکش دهی به روش جوشکاری الکترو دستی در یک فولاد کربنی و همچنین تأثیر تعداد لایه‌ها بر مقدار و توزیع تنش‌های پسماند به کمک روش‌های تجربی و اجزا محدود است.

۲- تعریف مسأله

در این پژوهش فرآیند روکش دهی دو نمونه صفحه فولادی به طول ۲۱۰ میلی‌متر، عرض ۱۹۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۵ میلی‌متر از جنس A۵۱۶ گرید ۷۰ که در ساخت مخازن تحت فشار کاربرد گسترده صنعتی دارد، از طریق شبیه‌سازی اجزا محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. روکش دهی به صورت دولایه و سه لایه به ضخامت ۵/۵ میلی‌متر به وسیله الکترودهای روکش دار ۳۰۹L برای لایه اول و ۳۰۸L برای لایه دوم و سوم به روش جوشکاری با الکترو دستی انجام شده است. سپس نتایج مربوط به تاریخچه حرارتی و همچنین توزیع تنش‌های پسماند در قسمت‌های مختلف صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت با هم مقایسه می‌شوند. شکل ۱ هندسه مسأله و جهت جوشکاری را نشان می‌دهد. به منظور صحت‌گذاری در نتایج اجزا محدود، فعالیت تجربی صورت گرفته است. به این صورت که صفحات فولادی، مورد روکش دهی واقع شده و سپس مقادیر تنش‌های پسماند در نقاطی مشخص، به وسیله روش سوراخ‌کاری^۱ تعیین می‌شود و با نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزا محدود مقایسه می‌گردد.

عرض پاس‌های اول و دوم در نمونه دولایه و عرض پاس اول در نمونه سه لایه ۱۳/۵ میلی‌متر و عرض پاس‌های دوم و سوم در نمونه سه لایه ۶/۵ میلی‌متر است.

۳- مدل‌سازی اجزا محدود

به منظور مدل‌سازی فرآیند روکش دهی، از شبیه‌سازی اجزا محدود به وسیله یک تحلیل غیرمستقیم حرارتی- مکانیکی استفاده شده است. به این منظور ابتدا مدل‌سازی حرارتی با توجه به مدل حرارتی در نظر گرفته شده و خواص مواد و پارامترها و شرایط جوشکاری انجام شده؛ سپس برای تحلیل مکانیکی از نتایج مدل حرارتی به عنوان بار ورودی استفاده می‌شود. برای اعمال شار حرارتی از طریق حرکت منبع حرارتی در راستای جوشکاری، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. هر کدام از این مدل‌ها می‌توانند کاربرد متفاوت و در عین حال استفاده متفاوت داشته باشند. در این پژوهش از مدل پاولیک [۹] که در آن منبع حرارتی به صورت دیسک دایره‌ای با توزیع گوسی شار حرارتی بر روی قطعه کار اعمال می‌شود، استفاده می‌گردد. مطابق با دیدگاه پاولیک و همکاران، حرارت قوس جوشکاری در هر زمان مشخص است و فرض می‌شود که به صورت تابع متقارن شعاعی مثلاً به صورت یک

حالی که بر روی مقدار تنش‌های پسماند و همچنین تغییر شکل‌های جوشی اثر به‌سزایی دارند. آن‌ها نشان دادند که افزایش حرارت ورودی باعث کاهش تنش‌های عرضی می‌شود؛ ولی روی تنش‌های طولی اثر ندارند. همچنین افزایش تعداد لایه‌ها موجب کاهش تنش‌های پسماند خواهد شد. روکش دهی فلزات به روش جوشکاری می‌تواند به وسیله فرآیندهای مختلف جوشکاری انجام شود. روش‌های متداول و معمول برای روکش دهی شامل جوشکاری زیرپودری و الکترواسلگ^۱ با سیم‌جوش‌های نواری^۲ شکل است. از این روش برای روکش دهی جداره داخلی مخازن تحت فشار راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود. به منظور روکش دهی مناطق موضعی راکتورهای هسته‌ای از قبیل نازل اصلی راکتور، از روش‌های دستی برای روکش دهی استفاده می‌شود. متداول‌ترین روش روکش دهی در این مناطق، روکش دهی به وسیله جوشکاری الکترو دستی است. به منظور دسترسی به ضخامت مورد نظر برای لایه روکش، می‌توان از دو یا چند لایه استفاده کرد.

فولادهای زنگ نزن مورد استفاده در روکش دهی، فولادهایی از نوع زنگ نزن آستنیتی می‌باشند. متداول‌ترین این فولادها نوع ۳۰۸ (۳۰۸L) و یا ۳۰۹ (۳۰۹L) است که برای روکش دهی روی فولاد فریتی استفاده می‌شوند. این نوع فولادها شامل مقادیر زیادی از عناصر کروم و نیکل و مقدار بسیار کمی کربن می‌باشند. خواص فلز جوش در لایه روکش به وسیله تعیین ترکیب شیمیایی ایجاد شده در اثر رسوب فلز جوش در این ناحیه مشخص می‌شود. با توجه به اعمال جوشکاری روی یک فولاد کربنی به وسیله الکترودهایی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی، ترکیب فلز جوش رسوبی با ترکیب شیمیایی الکترو جوشکاری برابر نخواهد بود. به این معنی که در اثر تشکیل کاربید کروم و به دنبال آن کم شدن کروم در فلز جوش، می‌توان با به‌کارگیری مواد مناسب در روکش دهی از این پدیده جلوگیری کرد [۸]. در اثر اختلاف قابل توجه در ضریب انبساط حرارتی بین لایه روکش آستنیتی و فولاد پایه فریتی، تنش‌های حرارتی در لایه روکش و زیرلایه ایجاد می‌شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که حتی بعد از آزادسازی تنش‌ها طی فرآیند عملیات حرارتی، تنش‌های پسماند در لایه روکش و ناحیه متأثر از حرارت^۳، در حد تسلیم باقی می‌مانند. در طی فرآیند عملیات حرارتی، تنش‌های پسماند آزاد می‌شوند. این در حالی است که بعد از عملیات حرارتی به سبب اختلاف در ضریب انبساط حرارتی فلز پایه و لایه روکش، تنش‌های پسماند دوباره به وجود می‌آیند. توسعه این تنش‌ها بعد از عملیات حرارتی، به شرایط عملیات حرارتی نیز وابسته است [۲]. تنش‌های پسماند روکش دهی، وابسته به دما هستند؛ به طوری که با افزایش دما کاهش می‌یابند؛ برای مثال در دمای کارکرد راکتورهای هسته‌ای (حدود ۳۰۰°C) تنش‌های پسماند ناشی از روکش دهی قابل چشم‌پوشی هستند. این به سبب آزاد شدن بیشتر این تنش‌ها در دمای کاری راکتورهای هسته‌ای است [۸]. همچنین مقدار و توزیع تنش‌های پسماند به تاریخچه دمایی در طول فرآیند روکش دهی،

- 1 Electro slag Welding
- 2 Strip Filler
- 3 Heat Affect Zone(HAZ)

نگرفتن تشعشع در تحلیل حرارتی کمتر از ۳ درصد است [۱۱].

$$h = \begin{cases} 0.0668T & \left(\frac{W}{m^2}\right) & 0 < T < 500^\circ C \\ 0.231T - 82.1 & \left(\frac{W}{m^2}\right) & 500^\circ C < T \end{cases} \quad (5)$$

h ضریب انتقال حرارت و T دما می‌باشد.

ترکیب شیمیایی صفحه فولادی از طریق آزمایش کوانتومتری به دست آمده است. ترکیب شیمیایی صفحه فولادی و الکترودهای مورد استفاده در لایه‌های اول تا سوم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقایسه ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده.

Table 1. Comparison of the chemical composition of the used materials

عنصر	فولاد پایه	لایه اول	لایه دوم و سوم
کربن	۰/۱۴۸	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳
کروم	-	۲۳	۱۹/۵
نیکل	-	۱۳	۱۰
سیلیسیم	۰/۱۸۹	۰/۵	۰/۷
گوگرد	۰/۰۱۸	۰/۰۳	۰/۰۳
فسفر	۰/۰۱۱	۰/۰۴	۰/۰۴
منگنز	۱/۳۳۷	۰/۱	۰/۹

در جدول ۲ خواص مکانیکی صفحه فولادی که از طریق آزمون کشش به دست آمده، نشان داده شده است. همچنین در جداول ۳ تا ۶ به ترتیب خواص فیزیکی و مکانیکی وابسته به دما برای مواد به کار رفته نشان داده شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی صفحه فولادی حاصل از آزمایش کشش.

Table 2. Mechanical properties of steel plate obtained from tensile test

جنس	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۸۵۱۶ گرید ۷۰	۲۹۱	۴۴۱/۵

شکل ۲ مدل اجزا محدود مورد بررسی را نشان می‌دهد. به منظور افزایش دقت انجام تحلیل، از آنالیز حساسیت مش استفاده شده است. به این منظور با تعداد اجزای مختلف، تحلیل انجام شده است و زمانی که تغییرات پارامتر مورد نظر که در اینجا حداکثر دمای حوضچه جوش می‌باشد، اندک باشد، تعداد اجزای نظیر آن تحلیل به عنوان جزء بهینه انتخاب می‌شود. در اینجا بیشترین دما به عنوان پارامتر تعیین‌کننده مطابق پیشنهاد مرجع [۱۳]، [۱۴] استفاده شده است. در واقع بیشترین تعداد اجزایی که در آن تغییرات پارامتر مورد نظر اندک باشد به عنوان مش بهینه انتخاب می‌شود.

شکل ۳ نتایج آنالیز حساسیت مش را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز حساسیت مش نشان می‌دهد که از تعداد ۲۰۰۰۰ جزء به بعد تغییرات دمایی ناچیز است، برای همین به منظور کاهش زمان تحلیل و همچنین افزایش دقت

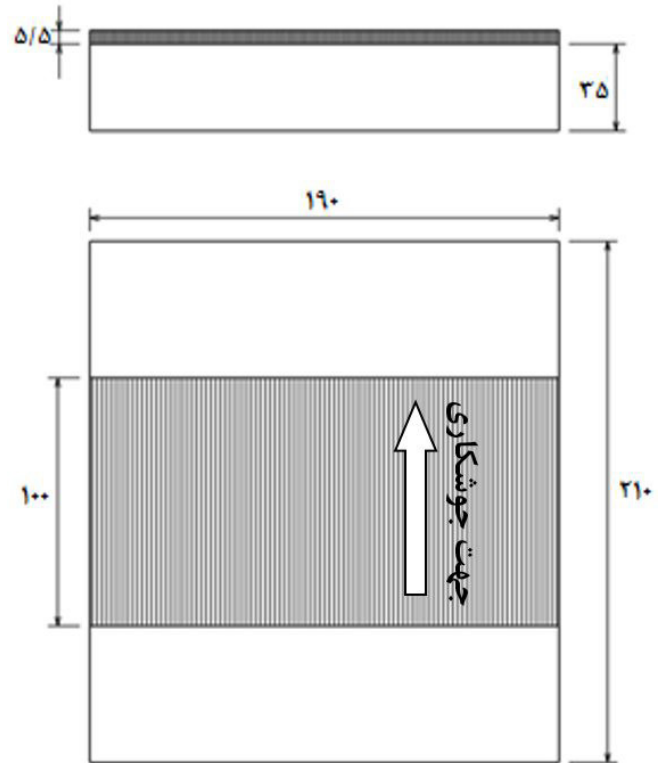


Fig. 1. Geometric Model Case Study

شکل ۱: مدل هندسی مورد بررسی.

دایره است. اگر r فاصله مرکز منبع حرارتی که بر محور الکتروود منطبق است، باشد مقدار شار حرارتی q مطابق با رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$q(r) = q_0 e^{-cr^2} \quad (1)$$

c و q_0 ثابت‌های تعیین شده به وسیله مقدار و توزیع حرارت ورودی هستند. پارامتر حرارت ورودی Q و \bar{r} (پارامتر طول) به وسیله رابطه (۲) معرفی می‌شوند.

$$Q = 2\pi \int_0^{\infty} q(r) dr \quad (2)$$

$$q(\bar{r}) = 0.05q_0 \quad (3)$$

در نهایت:

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left[-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2\right] \quad (4)$$

\bar{r} معرف ناحیه‌ای است که در آن ۹۵ درصد شار حرارتی اعمال شده است. اتلاف حرارتی به صورت تشعشع در دماهای بالا و در مجاورت جوش و به صورت همرفت در دماهای پایین‌تر لحاظ می‌شود. معادله (۵) معروف به مدل بریسکتاد ارائه شده است [۱۰]. در این معادله شرایط اتلاف حرارتی به صورت همرفتی و تشعشع از تمام سطوح وابسته به دما توسط ضریب انتقال حرارت h تعریف می‌شود. اگرچه بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که خطای در نظر

جدول ۶: خواص مکانیکی وابسته به دما برای فولاد زنگ نزن ۳۰۸L و ۳۰۹L [۱].

Table 6. Mechanical properties of 308L and 309L stainless steel temperature dependent

دما (°C)	مدول الاستیک (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب انبساط حرارتی (10 ⁻⁵ /°C)
۰	۱۹۸	۳۵۰	۱/۵
۳۰۰	۱۷۵	۳۰۰	۱/۷۵
۶۰۰	۱۳۰	۲۹۵	۱/۸۵
۷۵۰	۱۰۰	۲۵۰	۱/۹
۹۰۰	۵۰	۲۰۰	۱/۹۵
۱۲۰۰	۴۵	۷۰	۲

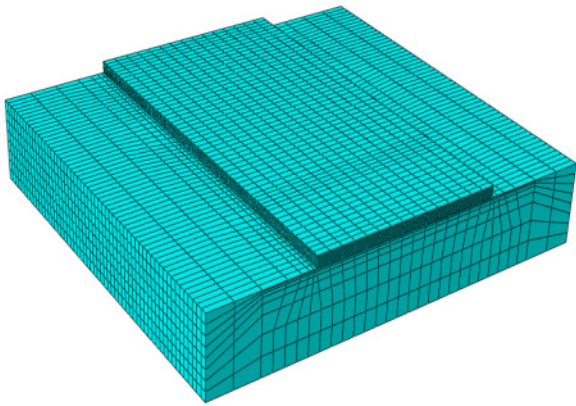


Fig. 2. Finite Element Model of Cladded Example

شکل ۲: مدل اجزا محدود نمونه روکش دهی.

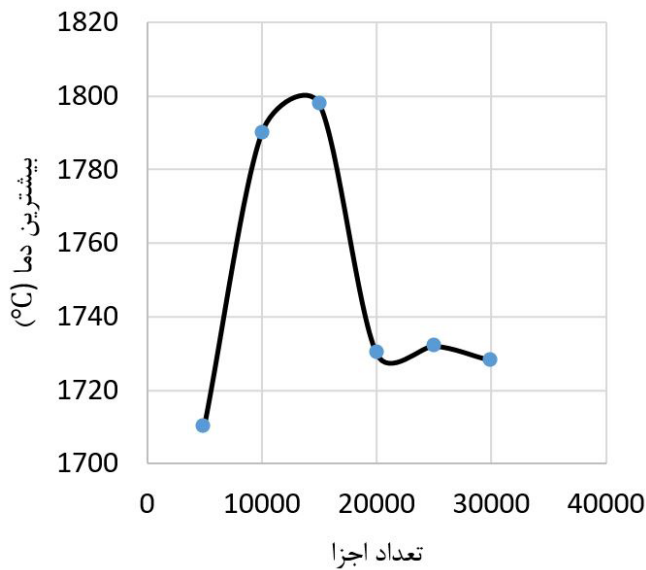


Fig. 3. Mesh Sensitivity Analysis Results

شکل ۳: نتایج آنالیز حساسیت مش.

محاسبات، این تعداد جزء برای مدل اجزا محدود در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: خواص فیزیکی و حرارتی وابسته به دما برای فولاد A516 GR70 [۱۲].

Table 3. Thermal and Physical properties of A516 GR70 steel temperature dependent

دما (°C)	ضریب هدایت حرارتی (W/m°C)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg°C)	چگالی (kg/m ³)
۰	۵۰	۴۴۷/۲۱	۷۸۵۰
۳۰۰	۴۵/۴	۵۶۲/۸	۷۷۸۰
۶۰۰	۳۵/۸	۷۹۳/۴۵	۷۷۰۰
۹۰۰	۲۷/۹	۶۰۴/۵	۷۵۹۰
۱۲۰۰	۳۵	۶۵۱/۵۵	۷۵۵۰
۱۵۰۰	۴۰	۷۸۰	۷۵۰۰

جدول ۴: خواص فیزیکی و حرارتی وابسته به دما برای فولاد زنگ نزن ۳۰۸L و ۳۰۹L [۱].

Table 4. Thermal and Physical properties of 308L and 309L Stainless-steel temperature dependent

دما (°C)	ضریب هدایت حرارتی (W/m°C)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg°C)	چگالی (kg/m ³)
۰	۱۵	۴۴۷/۲۱	۷۸۵۰
۳۰۰	۱۹	۵۶۲/۸	۷۷۸۰
۶۰۰	۲۲/۵	۵۹۰	۷۶۰۰
۹۰۰	۲۷/۹	۵۹۷	۷۴۵۰
۱۲۰۰	۳۰	۶۰۰	۷۳۰۰
۱۵۰۰	۳۲/۵	۶۰۲	۷۲۰۰

جدول ۵: خواص مکانیکی وابسته به دما برای فولاد A516 GR70 [۱۲].

Table 5. Mechanical properties of A516 GR70 steel temperature dependent

دما (°C)	مدول الاستیک (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب انبساط حرارتی (10 ⁻⁵ /°C)
۲۲	۲۱۳	۲۸۱	۰/۲۶
۱۴۸	۲۰۵/۸	۲۲۷	۰/۲۸
۳۷۱	۱۸۶	۲۱۷	۰/۶
۶۰۰	۱۶۷/۵	۲۰۷	۰/۷۵
۸۰۰	۱۱۷/۲	۵۵	۱/۱
۱۵۰۰	۱/۴	۳	۱/۵

طول و عرض لایه روکش نسبت به ضخامت آن، شرایط تنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است.

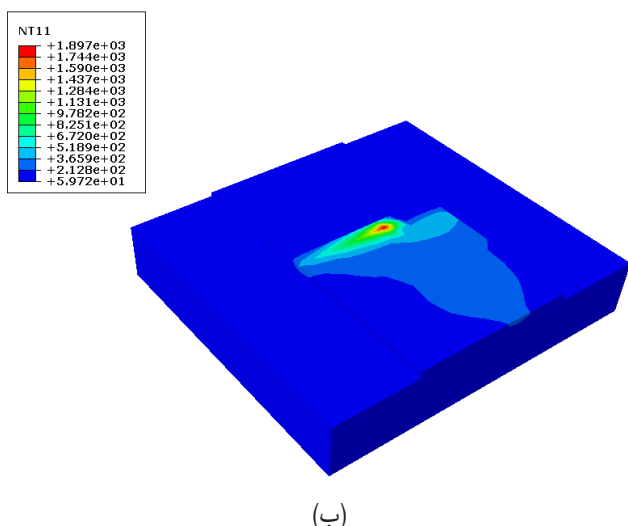
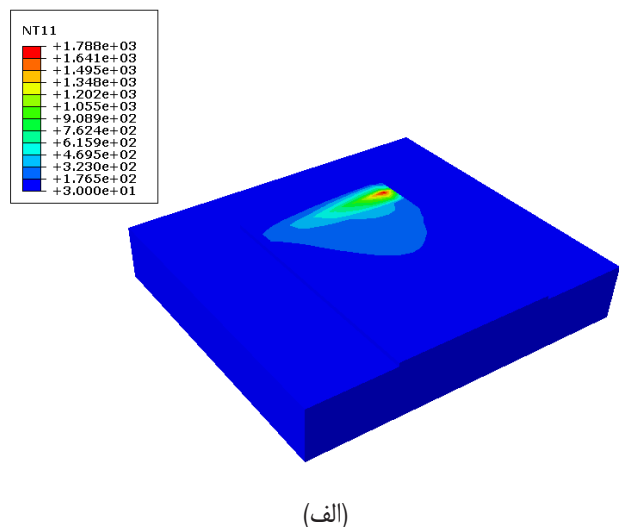


Fig. 4. Thermal analysis (temperature in °C): a) Two-layer sample b) Three-layer sample.

شکل ۴: تحلیل حرارتی (دما بر حسب °C)
الف) نمونه دو لایه ب) نمونه سه لایه.

شکل ۷ و ۸ نتایج مربوط به مقایسه توزیع تنش‌های پسماند در راستای ضخامت لایه روکش در حالت‌های دو لایه و سه لایه را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها موجب کاهش تنش‌های پسماند طولی و عرضی در عمق لایه روکش می‌شود. این نتایج با توجه تأثیر حرارتی هر لایه بر لایه‌های قبلی خود و به دنبال آن آزادسازی تنش‌های پسماند، مورد انتظار است. همچنین از شکل‌ها پیداست که تأثیرات حرارتی بر آزادسازی تنش‌های پسماند در عمق بیشتر خواهد بود؛ به طوری که در سطح مشترک لایه روکش و فلز پایه بیشترین تفاوت در تنش‌های پسماند حاصل می‌شود. همچنین تأثیر تعداد لایه‌ها بر آزادسازی تنش‌های پسماند عرضی نسبت به تنش‌های پسماند طولی بیشتر است. لازم به ذکر است که

برای روکش‌دهی از روش جوشکاری الکتروود دستی استفاده شده است. به این منظور از الکتروودهایی به قطر ۴ میلی‌متر برای روکش‌دهی لایه‌ها استفاده می‌شود. شرایط جوشکاری در جدول ۷ و ۸ نشان داده شده است. ضخامت کل لایه روکش در هر دو نمونه حدوداً ۵/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. این انتخاب براساس ضخامت لایه روکش نازل راکتور هسته‌ای ۱۰۰۰ مگاواتی است [۱۵].

جدول ۷: پارامترهای جوشکاری نمونه دو لایه.

Table 7. Two-layer sample welding parameters

لایه اول (ER309L)	لایه دوم (ER308L)	
۱۵۰	۱۵۰	جریان جوشکاری (A)
۲۵ - ۲۷	۲۵ - ۲۷	ولتاژ (V)
۳/۵	۳	سرعت جوشکاری (mm/s)
۱۴	۱۴	تعداد پاس
۳	۲/۵	سرعت جوشکاری (mm/s)

جدول ۸: پارامترهای جوشکاری نمونه سه لایه.

Table 8. Three-layer sample welding parameters

لایه اول (ER309L)	لایه دوم و سوم (ER308L)	
۱۵۰	۱۰۰	جریان جوشکاری (A)
۲۵ - ۲۷	۲۲ - ۲۵	ولتاژ (V)
۳/۵	۴/۵	سرعت جوشکاری (mm/s)
۲۸	۲۸	تعداد پاس
۲/۵	۱/۵	سرعت جوشکاری (mm/s)

تحلیل حرارتی از طریق اعمال منبع حرارتی از مدل فریمن به کمک زیربرنامه DFLUX^۱ در محیط فرترن و به منظور اعمال شرایط اتلاف حرارتی، از رابطه بریکستاد استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی مواد پرکننده در شبیه‌سازی روش تولد و مرگ اجزا به کار برده شده است. به این صورت که ابتدا کلیه اجزای خط جوش غیرفعال و در اصطلاح در حالت مرگ قرار می‌گیرند و سپس با رسیدن منبع حرارتی به آن‌ها فعال و در اصطلاح متولد می‌شوند. شکل ۴ تحلیل حرارتی نمونه‌های دو لایه و سه لایه را نشان می‌دهد. شکل ۵ تاریخچه حرارتی از سطح روکش به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و به عمق ۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد. در تحلیل مکانیکی برای اعمال شرایط مرزی و به منظور حصول بیشترین تنش‌های پسماند، سطح زیرین نمونه و همچنین طرفین آن با خال جوش مهار شده است. در شکل ۶ محل و شرایط مهار ناشی از اعمال خال جوش بر روی مدل اجزا محدود نشان داده شده است. همچنین به منظور تحلیل تنش‌های پسماند و به دلیل زیاد بودن

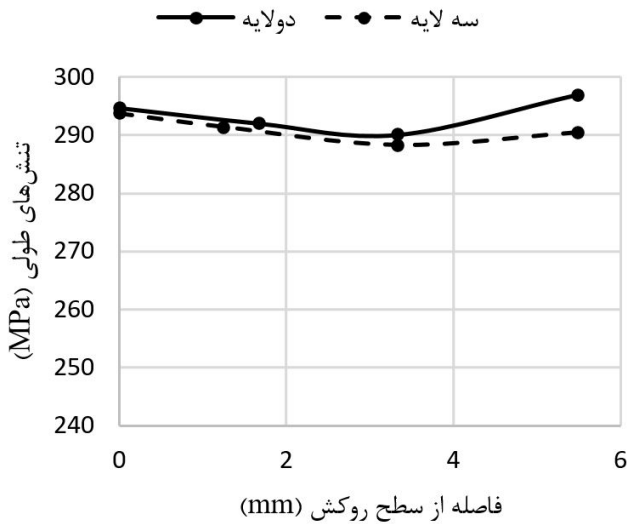


Fig. 7. Comparison of longitudinal stresses along the thickness of the Clad layer.

شکل ۷: مقایسه تنش‌های طولی در راستای ضخامت لایه روکش.

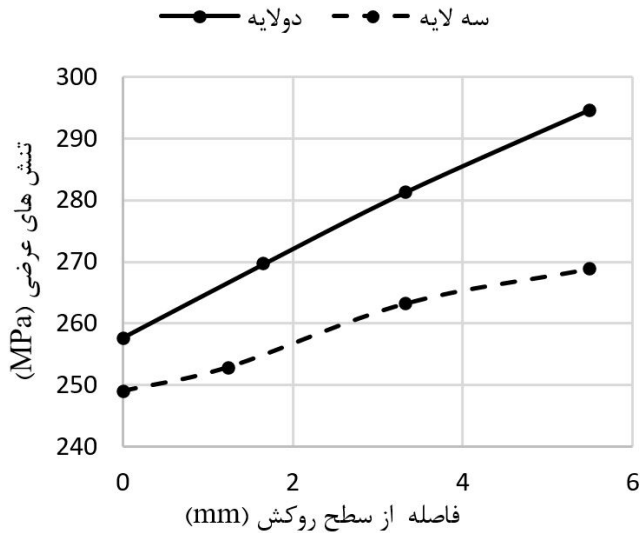


Fig. 8. Comparison of transverse stresses along the thickness of the Clad layer.

شکل ۸: مقایسه تنش‌های عرضی در راستای ضخامت لایه روکش.

نسبت به ضخامت آن خیلی بیشتر است، برای همین تنش‌های پسماند طولی و عرضی به هم نزدیک هستند. در لبه‌های لایه روکش هرچه به سمت وسط لایه نزدیک شویم، تنش‌های پسماند افزایش پیدا می‌کنند؛ به طوری که بعد از ۱۵ میلی‌متر تنش‌های پسماند به مقدار تقریباً ثابتی در وسط لایه روکش می‌رسند. کم بودن تنش‌های پسماند طولی در لبه لایه روکش، به سبب وجود سطوح آزاد در این ناحیه و در نتیجه کم شدن تنش‌های پسماند است. همچنین بالا بودن تنش در مرز بین لایه روکش و صفحه به دلیل وارد شدن تنش‌های کششی ناشی از انقباض لایه روکش بعد از جوشکاری است. بالا بودن تنش‌های عرضی در لبه‌های لایه روکش، به دلیل تأثیر انقباضی بیشتر در جهت عرضی لایه روکش است. همچنین شکل‌های ۱۱ و ۱۲ توزیع تنش‌های پسماند طولی و عرضی در مدل اجزا محدود را نشان می‌دهند.

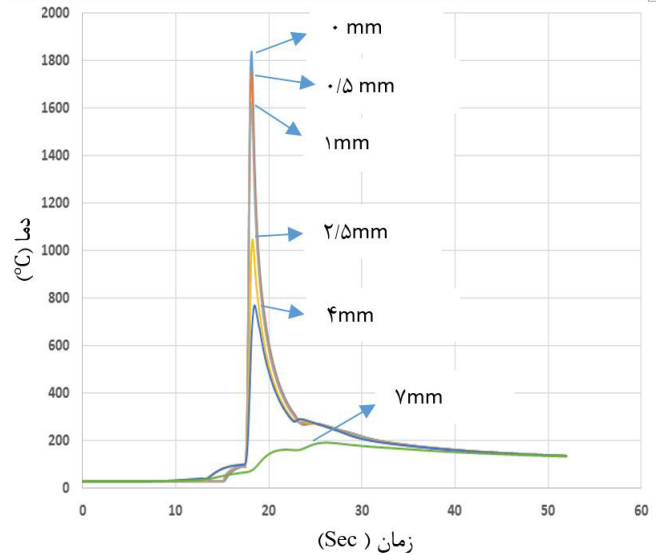


Fig. 5. Thermal history at different intervals relative to the surface of the Clad (thickness of the layer is 2.5 mm).

شکل ۵: تاریخچه حرارتی در فواصل مختلف نسبت به سطح روکش ضخامت لایه ۲/۵mm است.

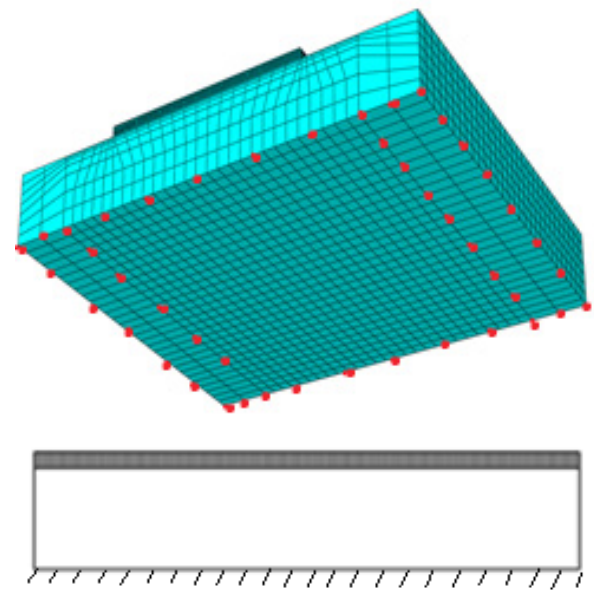


Fig. 6. Boundary conditions applied to the model in accordance with the location of the Tack welds.

شکل ۶: شرایط مرزی اعمال شده بر مدل مطابق با محل خال جوش ها.

تأثیر تعداد لایه‌ها بر تنش‌های پسماند طولی بعد از سه میلی‌متر از سطح لایه روکش بیشتر خواهد بود. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه توزیع تنش‌های پسماند طولی و عرضی در راستای عرضی صفحه و لایه روکش (راستای جوشکاری) را نشان می‌دهند. انتخاب این مسیر و موقعیت برای اندازه‌گیری با توجه به مختصات اندازه‌گیری در روش تجربی است. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات تنش‌های پسماند طولی و عرضی در سطح لایه روکش ناچیز است؛ ولی در محل تماس لایه روکش و صفحه فولادی، روی صفحه فولادی، تنش‌های پسماند در نمونه سه لایه بیشتر است. از آنجا که طول و عرض لایه روکش

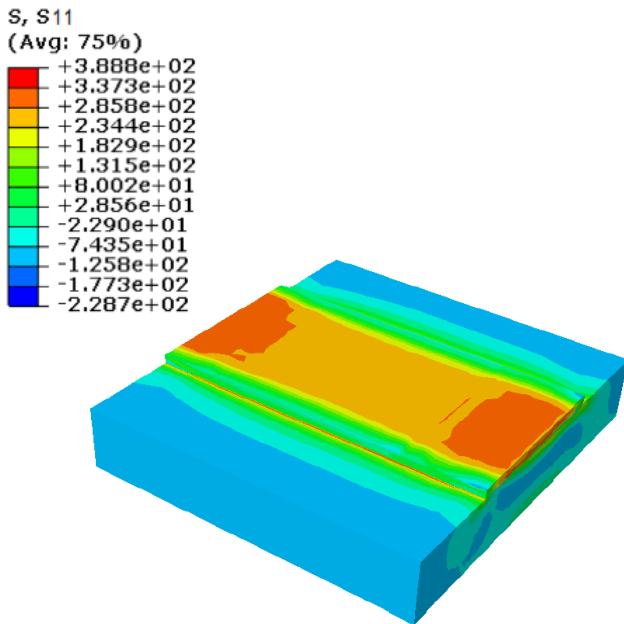


Fig. 11. Distribution of longitudinal residual stresses (MPa).

شکل ۱۱: توزیع تنش‌های پسماند طولی (MPa).

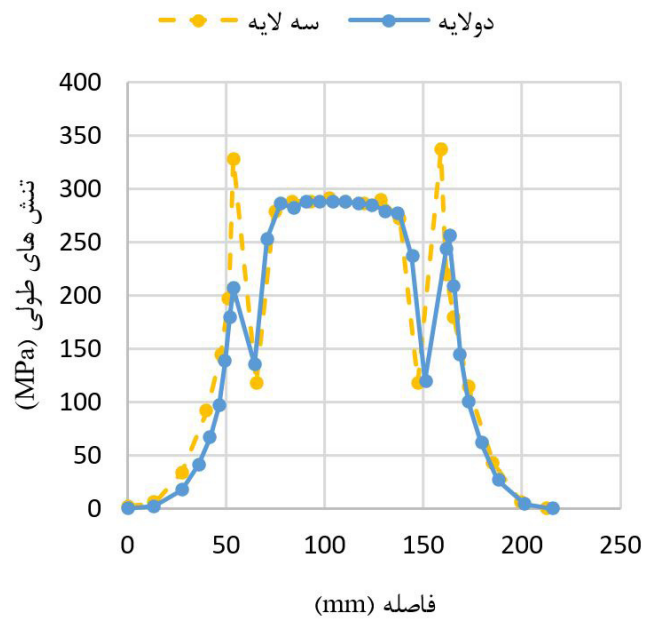


Fig. 9. Comparison of longitudinal residual stresses.

شکل ۹: مقایسه تنش‌های پسماند طولی.

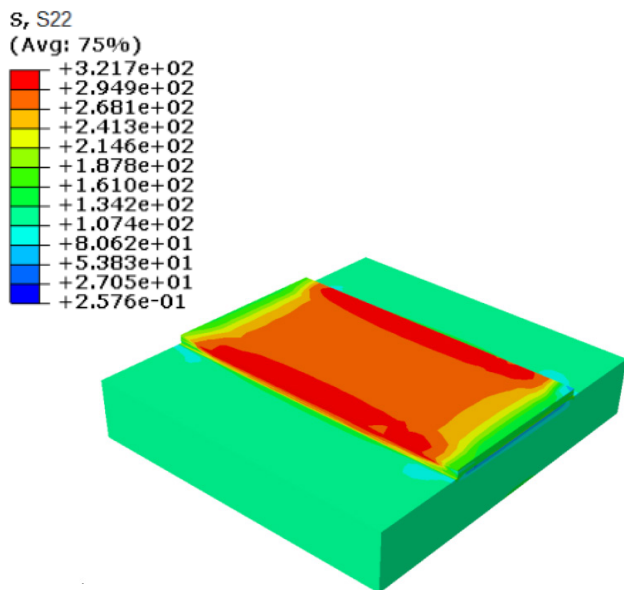


Fig. 12. Distribution of transverse residual stresses (MPa).

شکل ۱۲: توزیع تنش‌های پسماند عرضی (MPa).

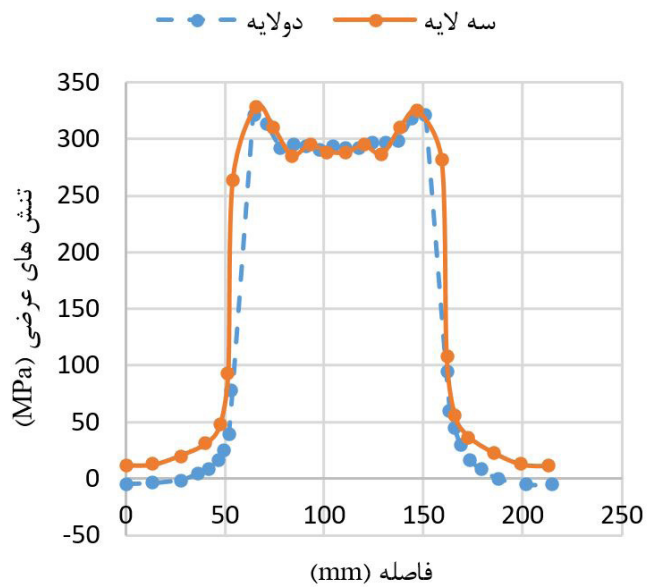


Fig. 10. Comparison of transverse residual stresses

شکل ۱۰: مقایسه تنش‌های پسماند عرضی.

برای اعمال شرایط مرزی روی نمونه، هر چهار طرف به وسیلهٔ خال جوش مقید شده‌اند. ضمن این که سطح پایینی نمونه نیز با قرار گرفتن روی محل جوشکاری مقید شده است. با توجه به اعمال روش جوشکاری الکتروود دستی و وجود خطای جوشکار، سعی شده است که جوشکاری تا حد ممکن به صورت یکنواخت و با سرعت برابر انجام شود تا از خطای جوشکار کم کند. نکته حائز اهمیت دمای بین لایه‌ها می‌باشد. بعد از پایان هر لایه به مدت ۱۵ دقیقه در عملیات توقف ایجاد شده است تا دمای بین لایه‌ها به

مشاهده می‌شود که در قسمت‌های مختلف لایه روکش، تنش‌های پسماند می‌توانند متفاوت باشند.

۴- انجام فرآیند روکش‌دهی

به منظور صحه‌گذاری بر نتایج اجزا محدود، نمونه فولادی مورد نظر مورد روکش‌دهی قرار گرفته است. پارامترهای جوشکاری در قسمت قبل ارائه شده است. همچنین سرعت جوشکاری نیز با تقسیم طول جوشکاری بر زمان جوشکاری که از طریق زمان سنج به دست آمده است، تعیین می‌شود.



Fig. 14. How to apply strain gauges on the sample.

شکل ۱۴: نحوه قرارگیری کرنش سنج‌ها بر روی نمونه.



Fig. 13. Cladded specimens.

شکل ۱۳: نمونه‌های روکش‌دهی شده.

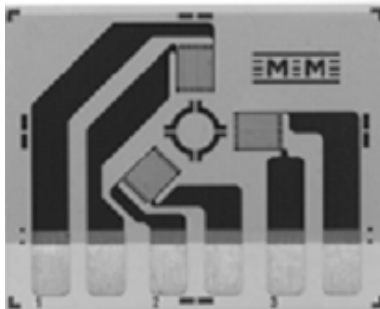


Fig. 15. Strain gauge used in the test.

شکل ۱۵: کرنش سنج مورد استفاده در آزمایش.



Fig. 16. How to test to measure residual stresses.

شکل ۱۶: نحوه انجام آزمایش برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند.

حدود 120°C برسد. تعیین این دما از طریق شبیه‌سازی اجزا محدود ممکن می‌باشد. شکل ۱۳ نمونه روکش‌دهی شده را نشان می‌دهد.

پس از انجام جوشکاری و رسیدن دمای نمونه به دمای محیط، اقدام به اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش سوراخ‌کاری شده است. عملیات سوراخ‌کاری طبق استاندارد ASTM E837 صورت گرفته و کرنش‌های آزاد شده اندازه‌گیری می‌شوند. در این استاندارد فرض بر این است که تنش‌های پسماند در ضخامت ۲ میلی‌متر از سطح اندازه‌گیری، یکنواخت باشد. در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود در نقاطی روی سطح نمونه با مقادیر به دست آمده از آزمایش سوراخ‌کاری مقایسه می‌شوند و فرض می‌شود که تنش‌های پسماند در عمق ۲ میلی‌متر از سطح اندازه‌گیری، یکنواخت باشد؛ بنابراین هدف، اعتبارسنجی به نتایج اجزا محدود است و براساس آن می‌توان مقادیر تنش‌های پسماند در عمق نمونه را در مدل اجزا محدود بررسی کرد. در دو نقطه متفاوت روی سطح نمونه، کرنش‌سنج‌ها نصب شده و کرنش‌های آزاد شده به دست آمده و از آن تنش‌های پسماند محاسبه شده‌اند. شکل ۱۴ محل نصب کرنش‌سنج‌ها، شکل ۱۵ نوع کرنش‌سنج مورد استفاده و شکل ۱۶ آزمایش سوراخ‌کاری را نشان می‌دهد. تعیین این نقاط براساس نتایج شبیه‌سازی، عدم اندازه‌گیری در سطوح آزاد نمونه و سادگی در اندازه‌گیری است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش سوراخ‌کاری، در هر دو نمونه و در موقعیت یکسان انجام شده است. همان‌گونه که پیداست در دو موقعیت مختلف، کرنش‌سنج‌ها نصب و تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده‌اند. موقعیت شماره ۱ روی لایه روکش و موقعیت شماره ۲ کناره روکش است.

۵- بحث و نتایج

به منظور مقایسه نتایج اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند با مقادیر محاسبه شده از طریق اجزا محدود، نقاط مورد نظر در این دو روش مقایسه

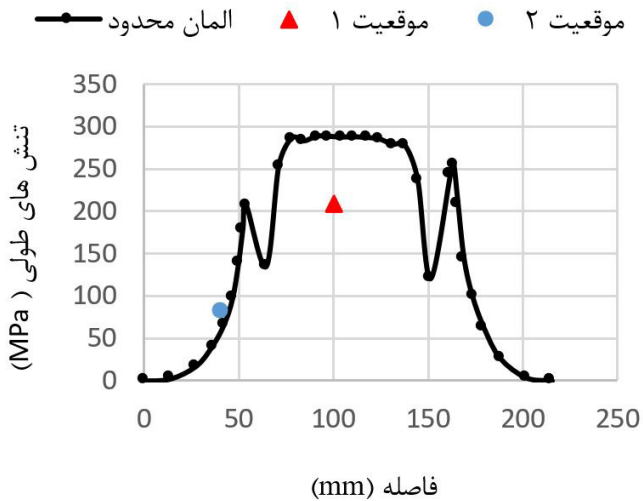


Fig. 19. Comparison of experimental longitudinal stresses and finite element finite element 3 Layer.

شکل ۱۹: مقایسه تنش‌های طولی تجربی و اجزا محدود نمونه سه لایه.

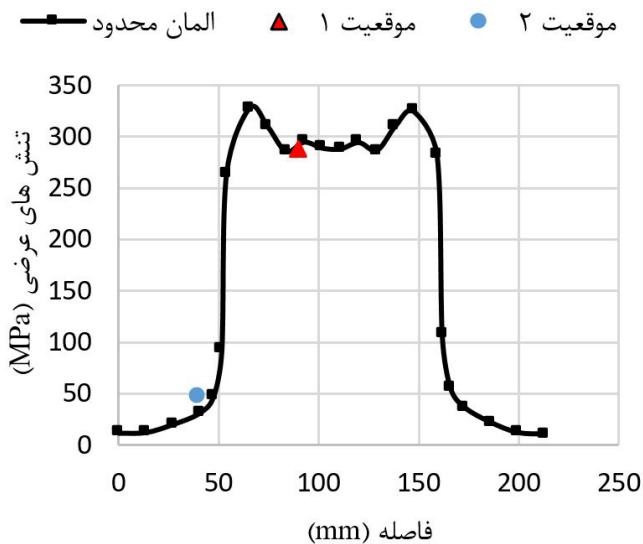


Fig. 20. Comparison of experimental transverse stresses and finite element of a three-layer sample.

شکل ۲۰: مقایسه تنش‌های عرضی تجربی و اجزا محدود نمونه سه لایه.

لبه‌های آزاد باشند بعد از اتمام فرآیند جوشکاری و به سبب انقباض ناشی از خنک شدن جوش تنش‌های ایجاد شده کمتر از مناطقی است که تحت قید بیشتر است؛ برای مثال به دلیل آزاد بودن لبه‌های لایه روکش، تنش‌های پسماند در جهت انقباض، کمتر از سایر نقاط است. به طوری که از لبه آزاد لایه روکش هرچه به سمت وسط لایه روکش نزدیک شویم، به دلیل قوی‌تر شدن شرایط قیدی، تنش‌های پسماند افزایش پیدا می‌کنند و به مقدار تقریباً ثابتی روی لایه روکش می‌رسند. در واقع بعد از ۱۵ میلی‌متر که تنش‌های پسماند از لبه لایه روکش افزایش پیدا کرده‌اند، به مقدار تقریباً ثابتی در سطح میانی لایه روکش می‌رسند. از طرفی بعد از جمع‌شدگی لایه روکش و به سبب بیشتر بودن ضریب انبساط حرارتی و میل بیشتر به جمع‌شدگی در لایه روکش، تنش‌های انقباضی در محل تماس صفحه فولادی و لایه روکش

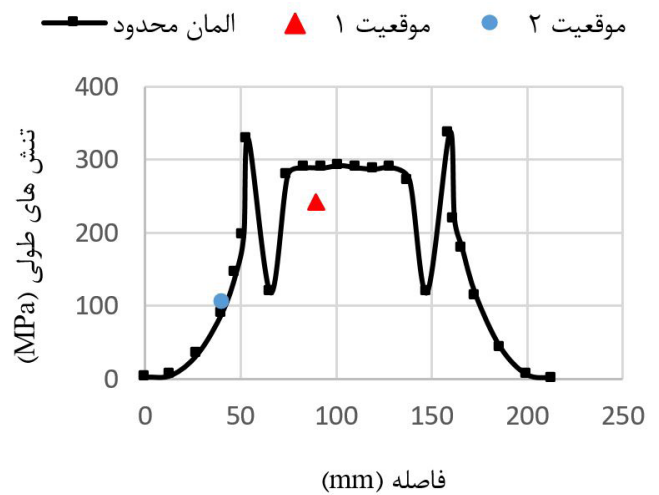


Fig. 17. Comparison of experimental longitudinal stresses and finite element of a two-layer sample.

شکل ۱۷: مقایسه تنش‌های طولی تجربی و اجزا محدود نمونه دو لایه.

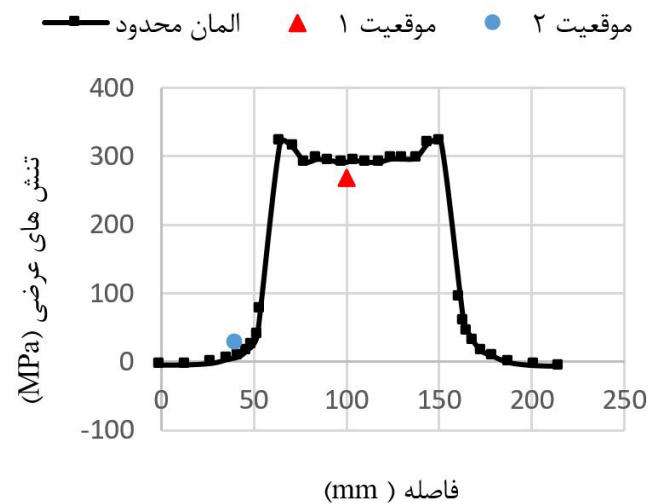


Fig. 18. Comparison of empirical transverse stresses and finite element of a two-layer sample.

شکل ۱۸: مقایسه تنش‌های عرضی تجربی و اجزا محدود نمونه دو لایه.

شده‌اند. با بررسی و مقایسه مقادیر به دست آمده از نتایج نمونه‌های دولایه و سه لایه و اجزا محدود، به تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج پی برده می‌شود. شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ مقایسه نتایج اجزا محدود و تجربی در نقاط مورد بررسی را نشان می‌دهند. مقادیر تنش در نمونه سه لایه نسبت به نمونه دو لایه در آزمایش تجربی افزایش جزئی از خود نشان می‌دهد. همچنین در مرز بین لایه روکش و صفحه فولادی نیز افزایش تعداد لایه‌ها موجب افزایش تنش‌های طولی می‌شود؛ ولی بر تنش‌های عرضی تأثیر ندارد. لازم به توضیح است این نتایج مربوط به اندازه‌گیری‌های سطحی می‌باشد و شرایط تنش در ضخامت نمونه می‌تواند متفاوت باشد. در مدل‌های اجزا محدود در نواحی مختلف، مقادیر تنش‌های پسماند می‌تواند متفاوت باشد. با توجه به این که توزیع و مقدار تنش‌های پسماند به شرایط مرزی و همچنین نحوه قیدگذاری روی نمونه وابسته است، برای همین در مناطقی که نزدیک

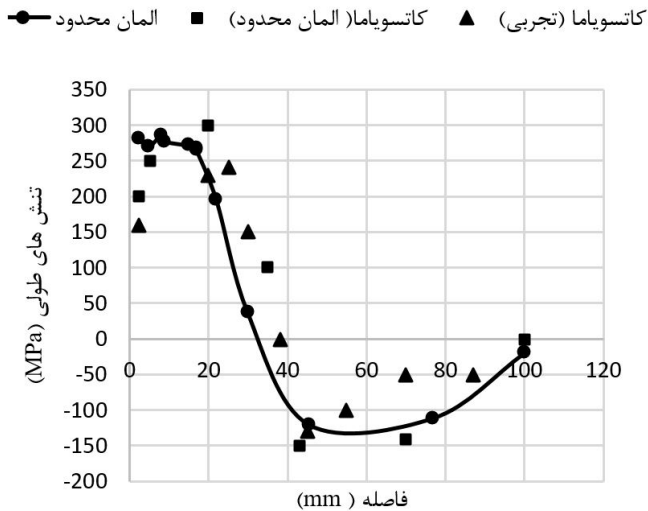


Fig. 21. Comparison of longitudinal stresses along the thickness of the clad layer and the plate in the Katsuyama model and finite element model developed.

شکل ۲۱: مقایسه تنش های طولی در راستای ضخامت لایه روکش و صفحه در مدل کاتسویاما و مدل اجزا محدود توسعه داده شده.

- در سطح روکش، با افزایش تعداد لایه‌ها تنش‌های پسماند تغییرات ناچیزی دارند. نتایج تجربی نیز حاکی از افزایش تنش‌ها در نمونه سه لایه است. البته این افزایش در منطقه میانی روکش ناچیز است و بیشتر شامل منطقه مرزی فلز پایه و لایه روکش است. این در حالی است که در راستای ضخامت روکش، هرچه تعداد لایه‌ها بیشتر شود، تنش‌های پسماند کمتر خواهد شد که به دلیل تاثیر حرارتی لایه‌ها بر روی هم و آزادسازی تنش‌های پسماند است.
- زیاد بودن طول و عرض لایه روکش نسبت به ضخامت آن موجب می‌شود که تنش‌های طولی و عرضی به هم نزدیک باشند.
- در راستای ضخامت هرچه به عمق لایه روکش نزدیک شویم، تنش‌های پسماند طولی افزایش پیدا می‌کنند. این به دلیل قوی‌تر شدن شرایط قیدی لایه روکش می‌باشد.
- مقادیر تنش‌های پسماند در مناطق مختلف لایه روکش می‌تواند متفاوت باشد؛ به طوری که تنش‌های پسماند در جهت انقباض، در لبه‌های لایه روکش کمتر و در محل تماس لایه روکش و صفحه فولادی و همچنین سطح میانی لایه روکش، بیشتر است. این به دلیل وجود لبه‌های آزاد در لایه روکش و کم شدن تنش‌های پسماند در جهت انقباضی است.

منابع

[1] J.Katsuyama, H.Nishikawa1, M.Udagawa, M. Nakamura, K., Onizawa, Assessment of Residual Stress Due to Overlay-Welded Cladding and Structural Integrity of a Reactor Pressure Vessel, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 135(23) (2013).

وارد می‌شود که باعث بالارفتن تنش‌های پسماند طولی در این ناحیه می‌شود. در حالتی که روکش‌دهی به صورت سه لایه انجام می‌گردد، حتی این تنش‌ها از تنش‌های ایجاد شده در سطح میانی لایه روکش بالاتر است. این به دلیل تأثیر بیشتر تنش‌های انقباضی ناشی از بالاتر بودن ضریب انبساط حرارتی لایه روکش نسبت به صفحه فولادی، در روکش‌دهی سه لایه است. لازم به ذکر است که این نتایج در مورد جهت انقباض صادق است. در واقع تنش‌های وابسته به جهت انقباض از این رفتار برخوردار می‌باشند. تنش‌های پسماند سطح لایه روکش، نسبت به تعداد لایه‌ها، تغییرات چندانی از خود نشان نمی‌دهد. این در حالی است که در راستای ضخامت به دلیل آزاد شدن تنش‌ها با افزایش تعداد لایه‌ها، تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر حاصل از آزمایش تجربی با نتایج اجزا محدود به جز در مواردی، از انطباق خوبی برخوردار است. اگرچه در مواردی اختلاف نسبتاً بالایی ایجاد شده است که به دلیل عواملی همچون خطای جوشکاری، خطای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، تفاوت در خواص وارد شده در نرم‌افزار با خواص واقعی مورد استفاده و همچنین خطا در تعیین دمای بین پاس است. به منظور صحت‌گذاری بهتر بر نتایج تحقیق، از نتایج پژوهش کاتسویاما و همکاران استفاده شده است. آن‌ها نمونه‌ای به ابعاد ۵۰۰ میلی‌متر در ۵۰۰ میلی‌متر در ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر از جنس فولاد A523 را به وسیله الکترودی از جنس زنگ نزن ۳۰۹ به ضخامت ۵ میلی‌متر و در یک لایه روکش‌دهی کردند. روش روکش‌دهی، روش زیرپودری با سیم‌جوش نواری با جریان ۱۲۵۳ آمپر، ولتاژ ۲۷/۸ ولت و سرعت ۳/۸ میلی‌متر بر ثانیه است. مدل‌سازی اجزا محدود با توجه به پارامترهای جوشکاری ارائه شده در این پژوهش انجام شده است. آن‌ها برای اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند از روش مقطع‌زنی^۱ استفاده کردند. شکل ۲۱ مقایسه نتایج اجزا محدود و تجربی کاتسویاما و همکاران با مدل اجزا محدود توسعه داده شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج به دست آمده از تحلیل اجزا محدود انجام شده و نتایج کاتسویاما و همکاران می‌باشد. وجود اختلاف در برخی نواحی بین نتایج به عواملی همچون اختلاف در خواص مواد، اختلاف در نرم‌افزار و یا مدل حرارتی مورد استفاده و همچنین نحوه جزءبندی و تعداد آن‌ها است. همان‌گونه که پیداست، تنش‌ها در لایه روکش به صورت کششی است و در صفحه فولادی به صورت فشاری تغییر می‌کنند. همچنین با افزایش فاصله از سطح روکش به دلیل قوی‌تر شدن شرایط قیدی روی لایه روکش، تنش‌های پسماند افزایش پیدا می‌کنند.

۶- نتیجه‌گیری

از مقایسه نتایج مربوط به تنش‌های پسماند نمونه‌های دولایه و سه لایه می‌توان نتیجه گرفت که:

- تغییرات تنش‌های پسماند بر حسب تعداد لایه‌های روکش، بسته به موقعیت اندازه‌گیری می‌تواند متفاوت باشد.

- [9] I.F. Z.Fanous, Dr. Maher,Y.A.Younan, Dr. Abdalla S, *3D Finite Element Modeling Of TheWelding Process Using Element Birth And Element Movement Technique*, 22 (2003)..
- [10] M.Mashayekhi, h.Hedayati, Effect of Welding Sequence and Hydro test Process on Welding Residual Stresses in Stainless Steel SUS304 Pipes, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 22(2011)17-33.
- [11] K.Samadi, Investigating the residual stresses in High strength aluminum pressure vessel and Extracting relationships based on geometric parameters, Master Thesis, *Amirkabir university of technology*,1390.
- [12] E. Michael, Evaluation Of Reactor Pressure Vessel Nozzle To Hot Leg Piping Bimetallic Weld Joint Integrity For The V.C Summer Nuclear Power Plant, *NuclearRegulatoryCommissionWashington*, 2002.
- [13] M.Qureshi, E.M. Ullahdar, N.Khan, I. Malik, Analysis of circumferentially arc welded thin walled cylinders to investigate the residual stress fields, *Thin Walled Structures*, (2008) 1391-1401.
- [14] V.Karimnia, *Investigating the magnitude and distribution of residual stresses in peripheral welding stresses in High strength aluminum pressure vessel and Extracting relationships based on geometric parameters, parameters*, Master Thesis , Amirkabir university of technology,1391
- [15] AP1000 Design Control Document,Reactor Coolant System and Connected Systems, *Revision 18*(2007).
- [2] M. Brand, J. Hohe, D. Siegele, Numerical Investigation On The Residual Stress Field In a Cladded Plate Due To the Cladding Process,*Welding In the World*, 56(2012).
- [3] R. Kume, H.Okabayashi, M. Amano, Mechanism of Underclad Cracking-Combined Effects of Residual Strain and Heat-Affected Zone Ductility, *J. Eng. Mater. Technol*, 98 (1976)348-356.
- [4] GK.Prouhet, K.Baligar, Cladding Process Simulation And Residual Stress Estimation Using Finite Element Coupled Field Analysis, *International Journal of Engineering Research & Technology* , 1(8) (2012).
- [5] E.F.Rybicki, J.R.ShadleY, A.S.Sandhu, Experimental and Computational Residual Stress Evaluation of a Weld Clad Plate and Machined Test Specimens, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 110(297) 1988.
- [6] M.N.Jamesa,M.Newby,P.Doubell,D.G.Hattingh,K. Serasli,D.J.Smith,Weld residual stresses near the bimetallic interface in clad RPV steel: A comparison between deep-hole drilling and neutron diffraction data,*Nuclear Engineering and Design, Nuclear Engineering and Design* 274 (2014) 56-65.
- [7] W.C. Jiang, B.Y. Wang, J.M.Gong, S.T.Tu,Finite element analysis of the effect of welding heat input and layer numberon residual stress in repair welds for a stainless steel clad plate, *Materials and Design* 32 (2011) 2851-2857
- [8] I. Sattari-Far, M.Andersson,Cladding Effects on Structural Integrity of Nuclear Components, *SKI Report*, 23(2006).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

E. Masoumi Dehaghi, A. Fallahi Arezoodar, I. Sattarifar, Numerical and Experimental Investigation of Layer Number Effect on Residual Stresses in Cladding Process, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(4) (2018) 839-850.
DOI: 10.22060/mej.2016.728



