

## بررسی اثر تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری بر رفتار دیوار برشی فولادی\*

مجید قلعهکی<sup>(۱)</sup>      فرزانه خالدی<sup>(۲)</sup>      هادی معین<sup>(۳)</sup>

**چکیده** دیوار برشی فولادی یک سیستم باربر جانبی نوین است که در آن ورق فولادی طی فرآیند جوشکاری سنگین توسط تسمه‌های واسط به قاب پیرامونی متصل می‌شود. معمولاً برای اتصال ورق‌های فولادی به قاب پیرامونی از جوش ذوبی استفاده می‌شود. این جوشکاری به دلیل افزایش موضعی دما تا حد دمای ذوب در محل اتصال و سپس سرد شدن سریع محل اتصال و توزیع نامتقارن دما و کرنش-های پلاستیک، باعث ایجاد تنش‌های پسماند در فلز جوش و فلز پایه می‌شود. این مسئله می‌تواند بر رفتار مکانیکی ورق و قاب پیرامونی تأثیرگذار باشد. در این مقاله جوشکاری ورق به اعضای محیطی به صورت دو بعدی و کوپل غیرمستقیم حرارتی- مکانیکی از طریق کد نویسی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و فلاکس حرارتی به صورت سطحی و دایره‌ای شکل اعمال شده است. اعمال فرآیند جوشکاری و مدل‌سازی تنش‌های پسماند در ورق‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه دارای اتصال گیردار نشان می‌دهد که میزان سختی، بار تسلیم، بار نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی در مدل دارای تنش پسماند نسبت به مدل بدون تنش پسماند به ترتیب ۱٪، ۱٫۳٪، ۱٫۲٪، ۱٪، ۱٫۷٪ و ۳٫۱٪ کاهش یافته است.

**واژگان کلیدی** دیوار برشی فولادی؛ جوشکاری؛ تنش پسماند.

## Effect of Welding Residual Stresses on Performance of Steel Plate Shear Wall

M.Gholhaki      F.khaledi      H.Moein

**Abstract** The effect of Welding residual stresses that was created in thin infill plate of steel plate shear wall system during constructional processes was studied in this research. Residual stresses in a welded structure is the result of the non-uniform expansion and contraction and plastic deformation of the weld and surrounding base metal due to heating and cooling cycle, during welding process, this issue could affected SPSW's behavior. In this research ABAQUS finite element software is utilized to simulation of welding process and steel plate shear wall behavior. Sequentially coupled thermo-elastic-plastic finite element computational procedure is developed to calculate temperature field and welding residual stresses in SPSW. The result shows that residual stresses created in infill plates of three story steel plate shear wall with rigid beam-column connection due to welding process makes yielding load, ultimate load, stiffness, ductility and energy absorption, decrease 1.4%, 1.26%, 7.6%, 7.3%, 3.4% respectively in model with residual stresses in comparison with model without residual stresses. Thus, the ignore of residual stresses effect due to welding in prospect of thin steel plate shear walls (SPSWs) behavior is negligible.

**Keywords** Steel plate shear wall; Welding residual stresses; welding processes.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۱/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۹/۲۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۲) کارشناس ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۳) دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه سایمون فریزر برنابی، بریتیش کلمبیا، کانادا.

## مقدمه

استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی با توجه به مزایای فراوانی که دارد در چند دهه اخیر مورد توجه طراحان و محققان قرار گرفته است. در این سیستم که به دو نوع با و بدون سخت‌کننده تقسیم می‌گردد، ورق‌های پرکننده طی فرآیند جوشکاری سنگینی به تیرها و ستون‌های پیرامونی متصل می‌شوند و چنانچه عملیات جوشکاری با تمهیدات ویژه‌ای انجام نشود، تنش‌های پسماند می‌تواند بر روی رفتار سیستم تأثیرگذار باشد. تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به علت اعمال حرارت موضعی، سرد شدن سریع ناحیه جوش شده، انقباض و انبساط‌های ناهمگن و کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در فلز جوش شده ایجاد شده و در بعضی مواقع تا حد تنش تسلیم افزایش می‌یابند. تنش‌های پسماند ایجاد شده در سازه جوش شده می‌تواند باعث افت عملکرد سازه شود و بنابراین آگاهی از مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند ضروری است.

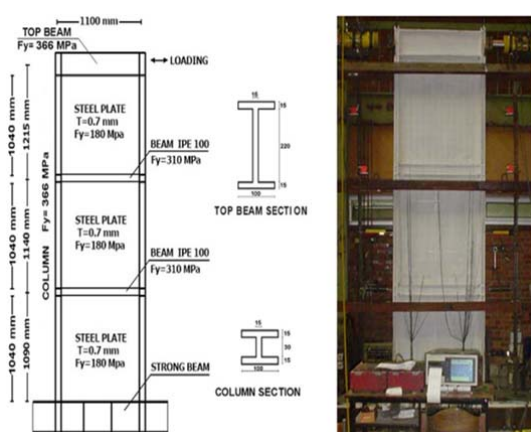
صبوری و رابرتز به مطالعه و بررسی ۱۲ پانل برشی کوچک مقیاس با ورق نازک تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. یکی از نتایج خوب این آزمایش‌ها بررسی اثر بازشوها بر سختی و مقاومت دیوار بود [1]. کاسس و الغالی سه نمونه دیوار برشی با مقیاس ۱/۳ را مورد آزمایش قرار دادند که در یکی از نمونه‌ها از اتصال جوشی و در دو نمونه دیگر از اتصال پیچی استفاده کردند و نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار داده شد، نتایج آزمایش نشان داد که به‌دلیل لغزش و جاری شدگی در پیچ‌ها، سختی دیوار با اتصال پیچی کمتر از سختی دیوار با اتصال جوشی است و جاری‌شدگی در ورق در حالت اتصال با پیچ در بار کمتری نسبت به اتصال جوشی رخ می‌دهد [2]. صبوری و قلهکی در سال (۲۰۰۷) دو نمونه دیوار برشی فولادی یک دهانه سه طبقه بدون سخت‌کننده را تحت آزمایش قرار داد.

یکی از نمونه‌ها دارای اتصال ساده و دیگری دارای اتصال گیردار بود. هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی اثر اتصال ساده و گیردار و بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی با استفاده از فولاد نرم در ورق دیوار بود. آزمایش‌ها نشان داد که شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بالا در دیوارهای برشی فولادی وجود دارد و نوع اتصال اثر زیادی بر روی سختی سیستم ندارد [۳].

اگرچه در بسیاری از نمونه‌های دیوار برشی فولادی ساخته شده، از اتصال جوشی استفاده شده است اما علی‌رغم نازک بودن ورق و وجود تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری سنگین، توجه ویژه‌ای به این مسئله نشده است. در طول ۴۰ سال گذشته، تلاش‌های زیادی برای استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته در تحلیل فرآیند جوشکاری صورت گرفته است، نتایج تحقیقات نشان می‌دهد با توجه به پیچیدگی‌های فراوان در فرآیند جوشکاری، آنالیزهای ریاضیاتی ساده برای این فرآیند پیچیده مناسب نیست. همچنین با انجام تست‌های آزمایشگاهی، به‌دست آوردن الگوی کاملی از توزیع تنش‌های پسماند در کل سازه جوشکاری شده امکان‌پذیر است و مقدار تنش‌ها تنها به‌صورت موضعی به‌دست می‌آید [4]. از این رو مدل‌سازی کامپیوتری و تحلیل عددی برای بررسی صحیح این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است و راه را برای تحلیل‌های دقیق‌تر هموار می‌کند. در این میان، روش اجزای محدود روش بسیار مناسبی برای شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری و پیش‌بینی توزیع دما، تنش‌های پسماند و سایر خروجی‌های فرآیند جوشکاری می‌باشد. یاجیانگ و جوان (۲۰۰۴) تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری فولادهای استحکام بالا را با استفاده از روش اجزای محدود به دست آوردند. در این تحقیق از یک مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای برای مدل‌سازی جوش سر به سر دو ورق استفاده شد. هم‌چنین به‌دلیل تقارن دو مدل تنها نصف اتصال مدل شده است.

مکانیکی صورت پذیرفت. در اطراف خط جوش از مش‌های با ابعاد کوچک‌تر استفاده شد و با فاصله گرفتن از خط جوش از مش‌های با ابعاد بزرگتر استفاده گردیده. منبع حرارتی و نحوه توزیع حرارت براساس مدل بیضی دوگانه گلداک در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که تغییرات حرارتی در ضخامت ناچیز است و تنش‌های پسماند در حوالی خط جوش به صورت کششی و در نواحی دورتر به صورت فشاری است [۸].

به منظور بررسی تنش‌های پسماند بر رفتار دیوار برشی فولادی، مدل آزمایشگاهی مطابق شکل (۱) [۳]، یکبار بدون در نظر گرفتن تنش‌های پسماند و یک بار با در نظر گرفتن تنش‌های پسماند مدل‌سازی شد و تحت بارگذاری مطابق دستورالعمل ATC-24 [9] قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی یک نمونه با مقیاس ۱/۳ و دارای اتصال تیر به ستون گیردار بود که توسط قلهکی مورد آزمایش قرار گرفت. در این نمونه ورق‌ها از نوع فولاد نرم، ستون‌ها از فولاد پرمقاومت و تیرهای میانی از نوع فولاد ساختمانی انتخاب شد که مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۱) آمده است. مدول الاستیسیته تمامی فولادها ۲۰۶ گیگاپاسگال و ضریب پواسون آنها ۰٫۳ در نظر گرفته شده است [۱۰].



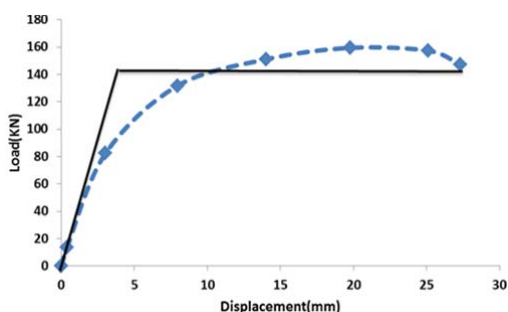
شکل ۱ نمونه آزمایشگاهی سه طبقه دیوار برشی فولادی

بارگذاری در این مدل به صورت توزیع مثلثی (دوزنقه-ای) و به طور یکنواخت روی گره‌های منطقه جوش اعمال شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق تحلیل همبند غیرمستقیم حرارتی-مکانیکی است [5]. چنگ و تنگ (۲۰۰۴) در تحقیقی مشترک تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری سر به سر یک پاسه دو ورق را با استفاده از تکنیک اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق دو ورق بلند با طول ۳۰۰ میلی‌متر، به عرض ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۵، ۸ و ۱۲ میلی‌متر بود. برای مدل‌سازی اجزای محدود آن‌ها از یک مدل دو-بعدی متقارن و روش همبند غیرمستقیم استفاده گردید. همچنین خواص مورد استفاده در آنالیزها وابسته به دما فرض شد. آنها با انجام این تحلیل نشان دادند که تنش‌های طولی با بزرگی برابر با تنش تسلیم فلز پایه و به صورت کششی در نواحی نزدیک خط جوش به وجود آمده و با فاصله گرفتن از مرکز خط جوش، این تنش‌ها به تنش فشاری تبدیل می‌شود [6]. سینگلاکیس و ملور (۱۹۹۹) از یک مدل دو بعدی متقارن برای مدل‌سازی جوشکاری سر به سر صفحات در روش اجزای محدود استفاده کردند. آنها برای مدل کردن منبع جوش در تحلیل از تابع پله‌ای تغییرات دمایی استفاده کردند. مرحله اول شامل افزایش خطی حرارت تا مقدار  $q$  (دمای قوس) تا زمان  $t_1$ ، مرحله دوم ثابت نگه داشتن تا زمان  $t_2$  و در مرحله سوم کاهش خطی حرارت تا زمان  $t_3$  بوده و مرحله چهارم شامل خنک شدن تا دمای محیط بود. تحلیل اجزای محدود به صورت همبند غیر-مستقیم صورت گرفت و نتایج به دست آمده هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت [7]. دنگ و مورااکاوا (۲۰۰۸) به مطالعه و بررسی اجزای محدود، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری لب به لب ورق‌های فولادی نازک پرداختند. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و به صورت همبند غیرمستقیم حرارتی-

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی در دیوار برشی فولادی

فولاد مصرفی	ضخامت (میلی متر)	تنش تسلیم (میلی متر)	تنش نهایی (میلی متر)
ورق پرکننده	۰/۰۷	۱۸۰	۳۰۱
ستون و تیر فوقانی	۱۵	۳۶۶	۵۴۹
بال تیر میانی	۵/۷	۳۰۹	۴۴۳
جان تیر میانی	۴/۱	۳۱۰	۴۴۹

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند. به‌منظور بررسی میزان سختی، مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی مدل اجزای محدود، نمودار پوش منحنی چرخه‌ای مدل ترسیم شد و بر روی آن، مدل دوخطی ایده‌آل بار-تغییر مکان مطابق شکل (۳) ترسیم گردید. بر این اساس، پارامترهای رفتاری دیوار برشی فولادی مذکور مطابق جدول (۲) محاسبه گردید.



شکل ۳ نمودار پوش و منحنی دوخطی بار-تغییر مکان نمونه بدون تنش پسماند

جدول ۲ پارامترهای رفتاری نمونه اجزای محدود بدون تنش پسماند

پارامتر	مقدار
سختی	۳۴ KN/m
مقاومت تسلیم	۱۴۳ KN
مقاومت نهایی	۱۵۸ KN
شکل‌پذیری	۶/۵۵
جذب انرژی	۱۸/۶۹ KN/m

مدل‌سازی نمونه به‌منظور اعمال بارهای حرارتی

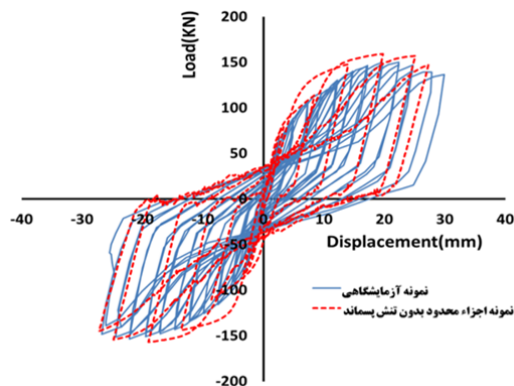
ناشی از جوشکاری

در گام دوم، مدل اجزای محدود با فرض وجود تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری ورق به قاب محیطی ساخته شد. در روش المان محدود دو رویکرد مشخص و مجزا برای انجام تحلیل‌های ترمودینامیکی و مدل‌سازی فرآیند جوشکاری وجود دارد:

۱- روش مستقیم (هم‌بند)

آنالیز مکانیکی مدل بدون اعمال تنش‌های پسماند

در مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار آباکوس از المان‌های شل استفاده شد و به‌منظور شروع عملکرد میدان کشش قطری، یک تغییر مکان اولیه به میزان ۲ میلی‌متر در وسط هریک از ورق‌ها اعمال گردید. بارگذاری جانبی مطابق شرایط آزمایشگاهی در بالای نمونه و با کنترل تغییر مکان صورت پذیرفت. در اولین مرحله مدل‌سازی، دیوار برشی فولادی سه‌طبقه بدون وجود تنش پسماند تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و نمودار بار-تغییر مکان تحت بارگذاری چرخه‌ای آن با نتایج نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل (۲)، مقایسه گردید.

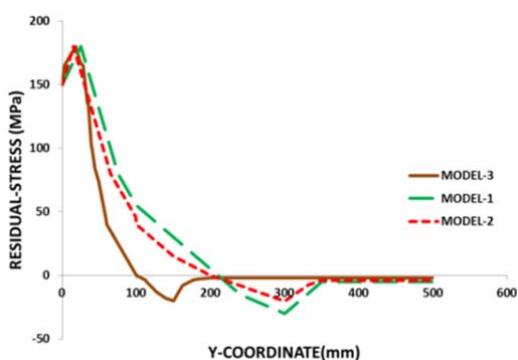


شکل ۲ مقایسه رفتار چرخه‌ای طبقه اول مدل آزمایشگاهی و اجزای محدود بدون در نظر گرفتن تنش‌های پسماند

فاصله از محل جوشکاری را در سه مدل نشان می‌دهد.

جدول ۳ مشخصات مش‌بندی‌های مدل

مدل	شکل المان	ابعاد مش	تعداد المان
۱	Structure Quad	۲۵ میلی متر	۹۶۹۶
۲	Structure Quad	۱۵ میلی متر	۲۷۳۹۶
۳	Tri & Structure Quad	۴ تا ۲۵ میلی متر	۹۷۳۵۴



شکل ۴ میزان توزیع تنش پسماند نسبت به فاصله در مدل‌های با مش‌بندی سه‌گانه

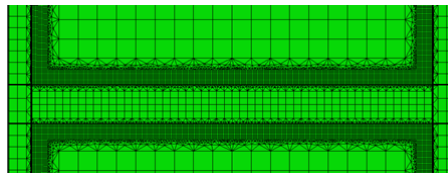
با توجه به تغییرات شدید حرارتی و هم‌چنین غیرخطی شدن هندسی ورق در نواحی نزدیک به خط جوش، باید در حوالی خط جوش (مطابق مدل ۳) از مش‌های با ابعاد ریزتر استفاده شود و با دور شدن از خط جوش و به‌منظور کاهش زمان آنالیزهای حرارتی و مکانیکی از مش‌های با ابعاد بزرگ‌تر (شکل ۵) استفاده گردد. براساس شکل (۴)، و با توجه به توزیع مناسب‌تر تنش‌های پسماند در مدل ۳، از این مدل مش‌بندی در آنالیزها استفاده شده است. در آنالیزهای حرارتی از المان‌های DS3 و DS4 و در آنالیزهای مکانیکی از المان‌های S3 و S4 برای مش‌بندی استفاده شده است.

۲- روش غیرمستقیم (غیرهم‌بند)

روش مستقیم فقط شامل یک تحلیل می‌باشد و در آن از المان‌هایی استفاده می‌شود که دارای درجات آزادی حرارتی و مکانیکی لازم هستند و در این نوع مدل‌سازی نیاز به دو تحلیل مجزای حرارتی و مکانیکی نیست، بلکه هم‌زمان هر دو تحلیل با هم انجام می‌شوند. در روش غیرمستقیم تحلیل در دو مرحله انجام می‌گیرد. در این روش ابتدا تحلیل حرارتی انجام می‌شود و سپس تغییرات حرارتی آنالیز اول به عنوان بار اعمالی در آنالیز دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر تحلیل دارای دو حوضه A و B باشد، برای فرآیندهایی که حل حوضه A بر روی حل حوضه B بی‌تأثیر است و دو حوضه مستقل از هم هستند، تحلیل غیرمستقیم مناسب است؛ زیرا این تحلیل انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش مستقیم دارد چرا که دو تحلیل می‌تواند به‌صورت مستقل از هم انجام شوند.

از آنجایی که فرآیند جوشکاری یک فرآیند حرارتی گذراست، استفاده از روش غیرهم‌بند مناسب‌تر می‌باشد.

در این مرحله فرآیند جوشکاری به‌صورت دو-بعدی و با استفاده از تکنیک غیرهم‌بند حرارتی-مکانیکی انجام گرفت. برای این منظور طی یک آنالیز حرارتی، نحوه توزیع حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری نسبت به زمان به دست آمد و سپس این تاریخچه تغییرات حرارتی، به عنوان بار حرارتی در آنالیز مکانیکی مدل استفاده گردید. به‌منظور تعیین بهترین مش‌بندی برای انجام آنالیزها، سه نوع مش‌بندی در نظر گرفته شد و پس از بررسی توزیع تنش‌های پسماند، نسبت به انتخاب بهترین مش‌بندی اقدام گردید. تعداد، ابعاد و نوع مش‌بندی‌ها به‌صورت جدول (۳)، بر روی نمونه اعمال گردید. در مدل ۳، مش‌بندی حول خط جوش بسیار ریز صورت پذیرفته و در دیگر قسمت‌ها از مش‌های با ابعاد بزرگ‌تر استفاده شده است. شکل (۴)، میزان توزیع تنش پسماند نسبت به



شکل ۵ نحوه‌ی مش‌بندی حوالی خط جوش و دیگر اعضای در مدل ۳

جدول ۴ مشخصات حرارتی و مکانیکی ورق بر حسب دما

مشخصات مصالح	دما								
	۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۶۰۰
مدول یانگ (گیگا پاسگال)	۲۰۶۰۰۰	۱۸۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
تنش تسلیم (مگاپاسگال)	۱۸۰	۱۵۰	۱۳۰	۸۰	۳۰	۱۲	۱۰	۱۰	۱۰
ضریب پواسون	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳۲	۰٫۳۳	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۳۸	۰٫۴
ضریب انتقال حرارت	۵۸	۵۵	۴۳	۳۵	۳۲	۳۲	۳۱	۳۵	۴۸
گرمای ویژه	۳۸۰	۳۲۰	۳۰۰	۵۰۰	۱۱۰۰	۴۰۰	۴۹۰	۵۴۰	۱۱۰۰
ضریب انبساط حرارتی	۱/۱۵	۱/۲	۱/۳	۱/۴۲	۱/۴۵	۱/۴۵	۱/۴۵	۱/۴۵	۱/۴۵
چگالی	۷۸۸۰	۷۸۸۰	۷۸۰۰	۷۷۶۰	۷۶۰۰	۷۵۲۰	۷۲۹۰	۷۳۰۰	۷۲۵۰

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z, t) = \rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

که در این معادله  $R_x, R_y, R_z$  نرخ شار حرارتی در واحد سطح،  $T(x, y, z, t)$  دمای کنونی (دما در هر لحظه)،  $Q(x, y, z, t)$  نرخ تولید حرارت اولیه،  $\rho$  چگالی،  $C$  گرمای ویژه، و  $t$  زمان است

شبیه‌سازی منبع حرارتی متحرک با اعمال شار حرارتی به صورت سطحی و دایره‌ای شکل و به طریق کدنویسی به زبان فرترن صورت گرفته است. منبع حرارتی به صورت کاملاً عمود نسبت به سطح ورق در نظر گرفته شده و مقدار شار حرارتی از رابطه (۱) محاسبه و بر مدل اعمال گردیده است [11,12]:

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r_b^2} e^{-3(r/r_b)^2} \quad (2)$$

هم‌چنین مشخصات حرارتی و مکانیکی مصالح ورق‌ها به صورت تابعی از دما مطابق جدول (۴)، به مدل معرفی گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، فولاد دچار کاهش مقاومت شده که این مسئله در تغییرات مدول الاستیسیته قابل مشاهده است. **آنالیز حرارتی.** انتقال حرارت به دو شکل قابل بررسی می‌باشد:

حالت پایدار

حالت گذرا (وابسته به زمان)

مسئله جوشکاری، یک فرآیند وابسته به زمان است، و لذا باید در بررسی حرارتی آن از معادله انتقال حرارت در حالت گذرا استفاده نمود.

هنگامی که یک حجم به وسیله صفحاتی در شش وجه یک المان در بر گرفته می‌شود، تعادل حرارتی با رابطه (۱) بیان می‌شود [6]

بالاتری برخوردار است. در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی به دست آمده از تحلیل حرارتی، به عنوان بارگذاری حرارتی به معادلات تحلیلی مکانیکی وارد می شود. تنش و کرنش حرارتی در هر مرحله زمانی محاسبه می گردد و حالت نهایی تنش پسماند با انباشته شدن تنش ها و کرنش های حرارتی ایجاد می شود. این کار به این صورت انجام می شود که در طول هر مرحله زمانی، با اعمال توزیع حرارت به دست آمده از تحلیل حرارتی، تنش های حرارتی محاسبه می شوند. این تنش ها به مقادیر محاسبه شده در مراحل قبل اضافه می شوند تا رفتار مکانیکی فرآیند جوشکاری را مرحله به مرحله شبیه سازی کنند. این رفتار وابسته به خواص مواد در دماهای مختلف می باشد [11].

رابطه (۶) [8] معادلات اصلی مربوط به تحلیل مکانیکی شامل معادلات تعادل و معادلات پایه ای می شود.

$$\sigma_{ij} + \rho b_i = 0 \quad (6)$$

که  $\sigma_{ij}$  تنسور تنش و  $b_i$  نیروی حجمی است. معادله دوم نشان دهنده متقارن بودن تانسور تنش است. شرایط مرزی، شامل اتلاف انرژی حرارتی به صورت تشعشع با هوای اطراف است. دمای اولیه برابر دمای محیط یعنی ۲۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است.

**آنالیز حرارتی و مکانیکی مدل آنالیز حرارتی شامل دو مرحله است که مرحله اول مرحله جوشکاری و نحوه گرم شدن و مرحله دوم شامل سرد شدن نمونه تا رسیدن به دمای محیط را شبیه سازی می کند. به منظور اتصال هر ورق به قاب پیرامونی، ۴ خط جوش لازم است و با توجه به وجود سه ورق، در مجموع ۱۲ پاس جوش وجود دارد و با در نظر گرفتن دو مرحله در هر پاس جوش، در نتیجه کل آنالیز حرارتی شامل ۲۴ مرحله است (شکل ۷). با مدل سازی نحوه اعمال شار حرارتی ناشی از جوشکاری، پاس های جوشکاری بر**

که در رابطه فوق  $Q$  مقدار انرژی تولید شده توسط منبع تولید انرژی است و بستگی به نوع جوشکاری دارد،  $r$  فاصله مرکز منبع حرارتی تا نقطه ای است که شار حرارتی به سطح اعمال می شود و  $r_b$  شعاع حوضچه جوش می باشد که مقدار آن ثابت و برابر ۵ میلی متر فرض شده است. مقدار  $Q$  در جوشکاری از نوع TIG از رابطه (۲) به دست می آید:

$$Q = \eta VI \quad (3)$$

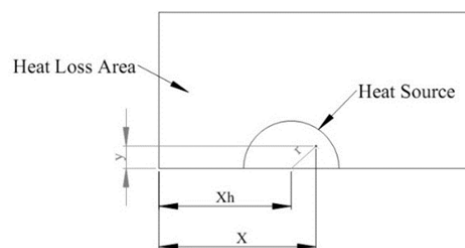
که در آن  $\eta$  ضریب بازدهی جوشکاری و برابر ۰.۷۰٪ است،  $I$  شدت جریان و  $V$  مقدار ولتاژ می باشد [4]. مقدار  $r$  در رابطه (۱) از رابطه (۳) به دست می آید:

$$r = \sqrt{(x - x_h)^2 + y^2} \quad (4)$$

که در آن  $x$ ،  $x_h$  و  $y$  در شکل (۶) [11] نشان داده شده و  $x_h$  از رابطه (۴) به دست می آید:

$$x_h = (t - t_0)V \quad (5)$$

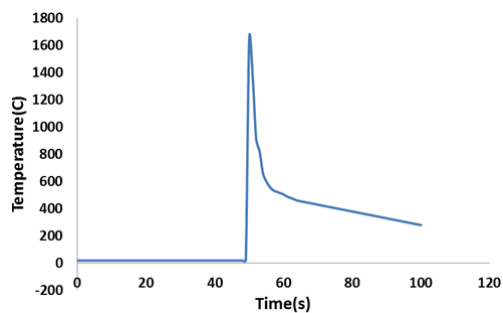
که در آن  $t_0$ ، مدت زمانی است که مرکز منبع حرارتی به اولین گره در راستای محور جوشکاری می رسد و با افزایش زمان جوشکاری  $t$  مقدار  $x_h$  افزایش می یابد و باعث حرکت منبع حرارتی می گردد. چنانچه مقدار  $r$  کمتر یا مساوی با مقدار  $rb$  باشد مقدار شار حرارتی از رابطه (۱)، اعمال می شود و در غیر این صورت مقدار آن صفر است.



شکل ۶: محدوده حوضچه جوش و ناحیه خارج از حوضچه جوش  
**آنالیز مکانیکی.** تحلیل مکانیکی فرآیند جوشکاری نسبت به تحلیل حرارتی از متغیرها و درجه غیرخطی

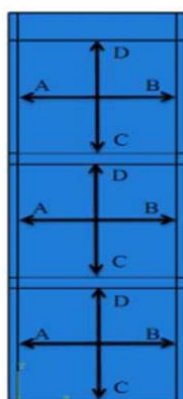
بررسی اثر تنش های پسماند حاصل از جوشکاری بر رفتار ...

۱۰۰ ثانیه می باشد. شکل (۹)، نمودار تغییرات دمایی وسط خط جوش نسبت به زمان از آغاز تا پایان فرآیند جوشکاری را نشان می دهد.



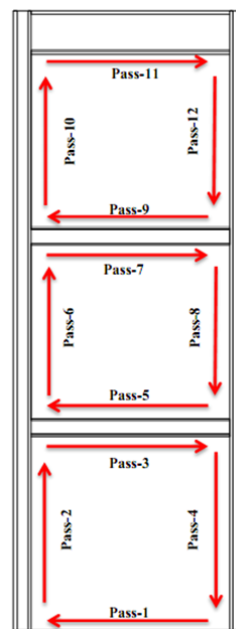
شکل ۹ تغییرات دما از آغاز تا پایان جوشکاری مرکز خط جوش

پس از اتمام فرآیند جوشکاری تمام ورق ها به قاب پیرامونی، تنش های پسماند در ورق ایجاد می شود که به منظور نمایش میزان آنها مقاطع عمود بر خط جوش مطابق شکل (۱۰)، ترسیم شده و در شکل (۱۱)، نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، تنش ها در نزدیکی خط جوش به صورت کششی و با دور شدن از آن کاهش می یابد و تبدیل به تنش فشاری می شود. حداکثر تنش کششی در بر خط جوش رخ داده و در آنجا ورق به حد تنش تسلیم خود رسیده است.

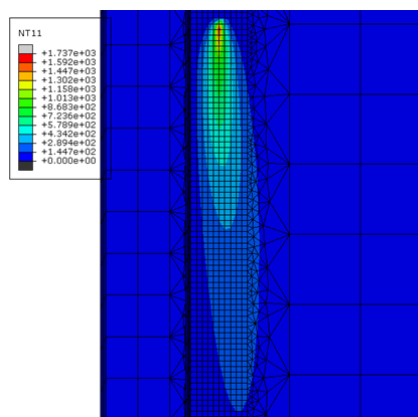


شکل ۱۰ مقاطع عمود بر خطوط جوش

روی مدل اعمال گردید. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود، توزیع حرارت هنگام جوشکاری به صورت دایره متحدالمرکز است که با دور شدن از مرکز جوش، دما کاهش می یابد و میزان آن در محل جوش برابر ۱۷۰۰ درجه سانتی گراد می باشد.



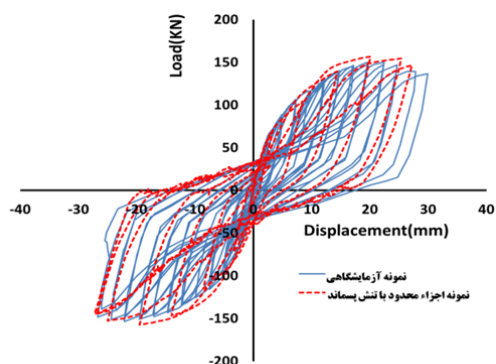
شکل ۷ نحوه جوشکاری ورق ها به قاب پیرامونی



شکل ۸ نحوه توزیع حرارت در هنگام جوشکاری

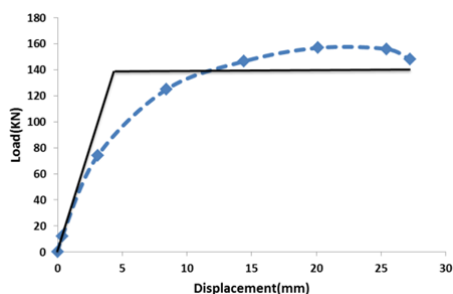
با توجه به فرض سرعت حرکت الکتروود بر روی ورق برابر ۱۰ میلی متر بر ثانیه و با توجه به طول هر خط جوش برابر ۱۰۰۰ میلی متر، زمان مورد نیاز برای هر پاس جوش





شکل ۱۲ مقایسه رفتار هیستریزس طبقه اول مدل اجزای محدود دارای تنش پسماند و مدل آزمایشگاهی

به منظور محاسبه پارامترهای رفتاری نمونه دارای تنش پسماند، منحنی پوش و منحنی دو خطی ایده آل طبقه اول در شکل (۱۳) ترسیم گردیده است.

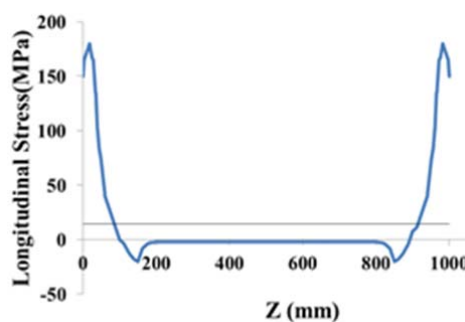


شکل ۱۳ منحنی پوش و دو خطی طبقه اول نمونه دارای تنش پسماند

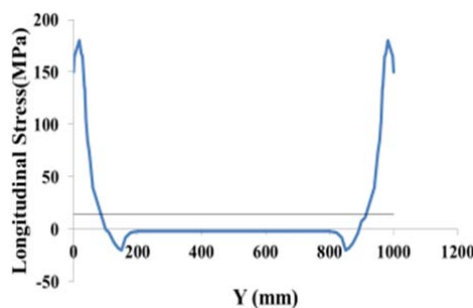
بر اساس شکل (۱۳)، میزان پارامترهای رفتاری نمونه دارای تنش پسماند مطابق جدول (۶)، می باشد.

جدول ۶ پارامترهای رفتاری نمونه اجزای محدود با تنش پسماند

پارامتر	مقدار
سختی	۳۱/۵ KN/m
مقاومت تسلیم	۱۴۱ KN
مقاومت نهایی	۱۵۶ KN
شکل پذیری	۶۰۵
جذب انرژی	۱۸۰۶ KN/m



الف) مقطع AB



ب) مقطع CD

شکل ۱۱ میزان تنش پسماند ورقها در امتداد عمود بر خط جوش

### آنالیز مکانیکی مدل دارای تنش پسماند

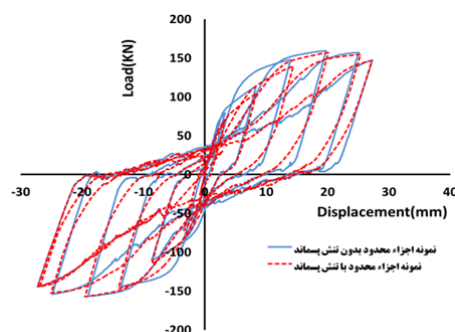
تنش های پسماند به دست آمده در مراحل قبل به صورت شرایط پیش فرض قبل از آنالیز بر مدل وارد شد و نمونه دارای تنش پسماند تحت بارگذاری جانبی چرخه ای مطابق دستورالعمل ATC-24 مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه رفتار مکانیکی مدل دارای تنش پسماند با رفتار آزمایشگاهی آن، در شکل (۱۲)، منحنی چرخه ای بار-تغییر مکان طبقه اول مدل ها ترسیم گردیده است. همان طور که مشاهده می شود، تطابق بین نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود با اعمال تنش پسماند به مراتب بیشتر از تطابق بین نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود بدون اعمال تنش پسماند شکل (۱۲)، است.

با مقایسه مقادیر پارامترهای رفتاری نمونه در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری که در جداول ۶ و ۲ خلاصه شده، مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری ورق به اعضاء محیطی باعث کاهش ۷/۱ درصدی میزان سختی، کاهش ۱/۴ درصدی میزان مقاومت تسلیم، کاهش ۱/۲۶ درصدی میزان مقاومت نهایی، کاهش ۷/۶ درصدی میزان شکل پذیری و کاهش ۳/۴ درصدی میزان جذب انرژی نسبت به مقادیر این پارامترها در مدل بدون اعمال تنش پسماند می‌باشد. اگرچه تأثیر اعمال تنش پسماند بر پارامترهای رفتاری دیوار برشی فولادی نظیر مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و جذب انرژی اندک است، اما تأثیر قابل اعتنایی بر میزان سختی و شکل پذیری دیوار برشی فولادی داشته است.

### مقایسه پارامترهای رفتاری مدل اجزای محدود در دو

#### حالت اعمال و عدم اعمال تنش‌های پسماند

به منظور مقایسه رفتار مدل در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، در شکل (۱۴) نمودار چرخه‌ای بار-تغییر مکان طبقه اول مدل در دو حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۴ مقایسه رفتار هیستریزس مدل در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش‌های پسماند

### مراجع

1. Sabouri-Ghomi, S., Roberts, T.M., "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shear Walls Including Shear and Bending Deformations", *Engineering Structures*, vol. 14, No.5, pp. 309-317, (1992).
2. Caccese, V. , Elgaaly, M., "Experimental Study of Thin Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Load", *J. of Str. Engrg., ASCE*, vol. 119, No. 2, pp. 573-587, (1993).
3. صبوری، سعید، قلعهکی، مجید، [«مطالعه آزمایشگاهی دو نمونه دیوار برشی شکل پذیر»] نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر/ سال نوزدهم، شماره ج-۶۸، (مهندسی عمران)، (بهار و تابستان ۱۳۸۷).
4. Masubuchi, k, "Analysis of Welded Structures, Residualstresses Distortion, and their Consequences", New York, Pergamon Press, (1980).
5. Yajiang, L., Jun, W., Maoai, C and Xiaoqin, S. " Finite Element Analysis of Residual Stress in Weld Zone of High Strength Steel", *Bull mater Sci*, Vol.27, No.2, pp.127-132, (2004).
6. chang, P,H., Teng, T., " Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints", *computational Materials Science*, Vol.29, pp.511-522, (2004).
7. Syngellakis, S., Mellor, B., "Finite Element Analysis of Residual Stresses in Butt Weld", Computational Engineering & Design Group, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton. SO17 1BJ, (1999).
8. D D, Hidekazu Murakawa, "Prediction of Welding Distortion and Residual Stress in a Thin Plate Butt-

- Welded Joint", *Computational Materials Science*, vol. 43, pp. 353-365, (2008).
9. ATC Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, Report 24, (1992).
۱۰. قلهکی، مجید، «بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر با ورق نازک و اثر نوع اتصال تیر به ستون در آنها»، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (۱۳۸۶).
11. Krutz, L. G. w., J. Segerlind, "Finite Element Analysis of Welded Structures", *Welding Journal*, vol. 57, pp. 211-216, (1987)
12. Friedman, E. "Thermo-mechanical Analysis of Welding Process Using the Finite Element Method", *Journal of pressure vessel Technology*, Trans. ASME, vol. 97, pp. 206-213, (1975).
۱۳. معین، هادی، «تحلیل المان محدود تنش پسماند در یک اتصال جوشی از جنس آلومینویم استحکام بالا»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۹).