

آنتروپی تولیدی مبنایی برای پیش‌بینی کمانش ناشی از جوشکاری در پوسته‌های نازک

سیما ضیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه یاسوج

خسرو جعفرپور (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دربی ۲ - ۲۹، شماری ۲، ص. ۶۳-۵۷

در این پژوهش روشی برای پیش‌بینی امکان کمانش ناشی از جوشکاری پوسته‌های نازک بر مبنای آنتروپی تولیدی به دست آمده است. در این روش با بهره‌گیری از تحلیل حرارتی سه‌بعدی و گذر، کل آنتروپی تولیدی در فرایند جوشکاری تعیین می‌شود و با استفاده از تحلیل سه‌بعدی مقادیر ویژه کمانش، میزان آنتروپی لازم برای شکل‌گیری اولین مد کمانش قطعه کار محاسبه می‌شود. با مقایسه‌ی این دو آنتروپی می‌توان احتمال کمانش قطعه کار را بررسی کرد. درستی پیش‌بینی براساس تحلیل سه‌بعدی اجزاء محدود جوش (حرارتی - مکانیکی) - که خود توسط نتایج آزمایشگاهی تأیید شده - بررسی و تأیید شده است. زمان لازم برای اجرای روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های تحلیلی موجود کم‌تر است، زیرا در این روش تحلیل مکانیکی جوش حذف شده است.

واژگان کلیدی: کمانش ناشی از جوشکاری، آنتروپی تولیدی، پوسته‌های نازک، تحلیل حرارتی سه‌بعدی، تحلیل مقادیر ویژه.

مقدمه

استفاده از فرایند جوشکاری در ساخت سازه‌های بزرگ در مقایسه با سایر روش‌های اتصال مکانیکی، به لحاظ عملکرد اصلاح‌شده‌ی سازه، صرفه‌جویی در وزن و هزینه، و طراحی انعطاف‌پذیرتر مرجع است. این در حالی است که تنش‌های جوشکاری و تغییر شکل‌های ناشی از این فرایند همچون کمانش، خمش و تغییرات زاویه اثرات مختلف و غالباً نامطلوبی بر عملکرد سازه دارند.^[۱]

امروزه با توجه به هدف‌گیری جدید در طراحی به‌منظور کاهش وزن، سازه‌های بزرگ از برش‌های نازک ولی مستحکم ساخته می‌شوند. این مسئله مشکل کمانش را طی ساخت و بارگذاری این نوع سازه‌ها افزایش می‌دهد.^[۱] از آنجا که کمانش منجر به از دست رفتن پیوستگی سازه، کنترل ابعادی و افزایش هزینه‌ی ساخت می‌شود، حذف این پدیده طی جوشکاری و نیز تحلیل رفتار سازه‌ی دچار کمانش طی بارگذاری از اهمیت خاصی برخوردار است. کاهش حرارت ورودی طی جوشکاری یا اصلاح شکل و ابعاد سازه (مانند کاهش فاصله‌ی مقاوم سازه‌ها یا افزایش ضخامت برش) می‌تواند احتمال کمانش را کاهش داده یا آن را حذف کند؛ اگرچه در بعضی موارد به دلیل قیود طراحی امکان چنین کاری نیست و صرفاً باید به دنبال روشی مناسب برای کنترل عامل تولید کمانش در روند جوشکاری، یعنی تنش‌های پسماند فشاری بود. اما قبل از آن، دستیابی به یک روش پیش‌بینی‌کننده‌ی قابل اعتماد که بتواند در یک بازه زمانی مقرون به‌صرفه احتمال کمانش سازه‌های نازک تحت جوشکاری را پیش‌بینی کند حائز اهمیت است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۸/۷، اصلاحیه ۱۳۹۱/۸/۲۷، پذیرش ۱۳۹۱/۹/۲۰

ziaee@mail.yu.ac.ir
kjaafarme@shirazu.ac.ir

تاکنون تحقیقات وسیعی پیرامون ماهیت کمانش و چگونگی پیش‌بینی آن صورت گرفته است.^[۲-۴] در یکی از این تحقیق‌ها بر مبنای تغییر شکل بزرگ کشسانی اجزاء محدود و به‌کارگیری پراکنش کرنش ذاتی، کمانش در ورق‌های نازک تحت جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است.^[۴] محققین با ترکیب روش ترموالاستوپلاستیک اجزاء محدود و تغییر شکل بزرگ کشسان اجزاء محدود بر مبنای نظریه‌ی کرنش ذاتی، و روش المان تداخلی کمانش ناشی از جوشکاری را پیش‌بینی کرده‌اند.^[۵] آنها قابلیت بهره‌گیری از این روش را در پیش‌بینی تغییر شکل‌های جوشکاری در مقاطع بزرگ نازک تحت جوشکاری نشان داده‌اند. از سوی دیگر بر مبنای تلفیق «تحلیل غیر مزدوج دوبعدی فرایند جوشکاری» و «تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی مقادیر ویژه کمانش»، روشی برای پیش‌بینی کمانش در اتصالات T پیشنهاد شده است.^[۶,۷] در یکی از مطالعات انجام شده نشان داده شد که دامنه‌ی تغییر شکل و مد کمانش در سازه‌های نازک تحت جوشکاری تابع مش‌بندی مدل است.^[۸] برای این منظور یک زیرساختار محاسباتی برای مدل‌سازی کمانش ناشی از جوشکاری قوسی با گاز محافظ ارائه شد. تأثیر حرارت ورودی، فرایند جوشکاری، ترتیب جوشکاری، ضخامت ورق و فاصله‌ی بین تقویت‌کننده‌ها بر تمایل به کمانش ناشی از جوشکاری سازه‌های جداره‌نازک ورقی مورد بررسی قرار گرفته،^[۵] و نیز تأثیر قیود مکانیکی و ضخامت بر کمانش پوسته‌های نازک تحت جوشکاری بررسی شده است.^[۹] مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که ترکیب‌بندی مناسبی از قیود مکانیکی و ضخامت به حذف کمانش کلی پوسته‌ی تحت جوشکاری می‌انجامد. در این مطالعات نشان داده شد که ترکیب غیر مزدوج تحلیل سه‌بعدی حرارتی و مکانیکی جوشکاری می‌تواند روش قابل اعتمادی برای

باید توجه داشت که برای محاسبه‌ی دقیق شار گرما در یک قطعه‌ی تحت جوشکاری باید اثر شکل و اندازه‌ی منبع حرارتی را در نظر گرفت. در این پژوهش به دلیل کوچک بودن ابعاد منطقه‌ی مذاب (حوضچه‌ی مذاب)، منبع حرارتی به صورت حوضچه‌ی مذاب جوش همسان‌دما (ایزوترمال) با دمای ذوب فلز مدل شده است. حرارت اعمال شده به قطعه کار از طریق هدایت به سایر نقاط قطعه کار منتقل می‌شود؛ دو شرط مرزی همرفتی و تشعشع عامل هدر رفتن حرارت از قطعات جوشکاری‌شونده هستند. در این کار زمان جوشکاری با تقسیم سرعت جوشکاری بر طول خط جوش محاسبه شده است. همچنین خواص حرارتی وابسته به دمای ماده‌ی تحت جوشکاری (Al۱۰۰) در مدل‌سازی استفاده شده است.^[۹]

تولید آنتروپی ناشی از جوشکاری

بر اساس قانون دوم ترمودینامیک می‌توان نرخ آنتروپی تولیدی در واحد حجم را برای یک حجم کنترل کوچک نوشت:^[۱۱]

$$\dot{S}_{gen} = \rho \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \left(\frac{q}{T} \right) \quad (4)$$

که در آن q معرف شار حرارتی و s معرف آنتروپی ویژه در واحد حجم است. از سوی دیگر در پدیده‌ی انتقال حرارت می‌توان شار حرارتی را مطابق رابطه‌ی ۵ تخمین زد:^[۱]

$$q = -k \nabla T \quad (5)$$

با جایگزین کردن معادله‌ی ۵ در معادله‌ی ۴ خواهیم داشت:

$$\dot{S}_{gen} = \rho \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \left(\frac{-k \nabla T}{T} \right) \quad (6)$$

از سوی دیگر مقدار آنتروپی یک جسم جامد را می‌توان چنین نوشت:^[۱۱]

$$ds = c \frac{dT}{T} \quad (7)$$

حال با بهره‌گیری از معادلات ۳، ۶ و ۷ می‌توان نرخ آنتروپی در واحد حجم را تعیین کرد:^[۱۱]

$$\dot{S}_{gen} = \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 \quad (8)$$

بدین ترتیب کل آنتروپی تولیدی محاسبه می‌شود:

$$S_{gen} = \int_t \int_V \frac{k}{T^2} (\nabla T)^2 dV dt \quad (9)$$

t زمان و V حجم است.

برای یافتن کل آنتروپی تولیدی ناشی از جوشکاری ابتدا پراکندگی دمایی قطعه کار در هر گام زمانی بر اساس تحلیل گذرای حرارتی جوش $(T(x, y, z))$ تعیین می‌شود؛ سپس نرخ آنتروپی تولیدی در آن گام زمانی محاسبه می‌شود:

$$\dot{S}_{gen}^m = \int_V \frac{k}{(T(x, y, z))^2} (\nabla T(x, y, z))^2 dV \quad (10)$$

در معادله‌ی ۱۰، T نشان‌گر پراکندگی دمایی قطعه کار در گام زمانی m ؛ V معرف حجم کل قطعه کار؛ k ضریب هدایت حرارت؛ t زمان؛ x, y, z معرف موقعیت مکانی T در قطعه کار؛ و $\dot{S}_{gen}^m$ نرخ آنتروپی تولیدی در گام زمانی m است. در نهایت می‌توان کل آنتروپی تولیدی را مطابق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه کرد:

$$S_{gen} = \int_t \dot{S}_{gen}^m dt \quad (11)$$

پیش‌بینی زمان کمانش و رفتار پوسته قبل و بعد از کمانش باشد. تأثیر ابعاد پوسته و ترتیب‌های جوشکاری نیز بر زمان رخداد کمانش و رفتار بعد از کمانش پوسته‌های تحت جوشکاری بررسی شده است.^[۱۰] با استفاده از آنتروپی کل تولیدشده طی فرایند جوشکاری برای مقایسه‌ی کثی بیشترین تنش‌های پسماند جوشکاری،^[۱۱] تأثیر سرعت جوشکاری، حرارت ورودی، ترتیب جوشکاری و پیش‌گرم‌سازی بر میزان آنتروپی کل تولیدی، و در نتیجه بر بیشترین تنش پسماند جوشکاری مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه‌ی یادشده نشان می‌دهد که با افزایش آنتروپی تولیدی، بیشترین تنش پسماند جوشکاری نیز افزایش می‌یابد.

در این پژوهش روشی برای پیش‌بینی امکان کمانش پوسته‌های نازک تحت جوشکاری بر مبنای آنتروپی تولیدی در جوشکاری، و مقایسه‌ی آن با آنتروپی بحرانی به دست آمده است. در این روش با بهره‌گیری از تحلیل حرارتی سه بعدی و گذرا، کل آنتروپی تولیدی در فرایند جوشکاری تعیین می‌شود؛ همچنین بر اساس سازوکار تعیین کمانش با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه میزان آنتروپی لازم برای شکل‌گیری اولین مد کمانش قطعه کار محاسبه می‌شود. با مقایسه‌ی این دو آنتروپی می‌توان احتمال کمانش قطعه کار را بررسی کرد. زمان لازم برای اجرای روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های تحلیلی موجود برای پیش‌بینی کمانش قطعات جوش‌شونده کم‌تر است، زیرا در این روش تحلیل مکانیکی جوش حذف شده است.

مدل حرارتی جوش

جوش یک فرایند مزدوج ترمومکانیک است و مدل ریاضی آن شامل دو معادله‌ی تعادلی اصلی حرارتی و مکانیکی است؛ یعنی بقاء انرژی داخلی و بقاء گشتاور همراه با شرایط اولیه و شرایط مرزی است.^[۱۲] فرایند جوشکاری با اعمال تحلیل‌های جداگانه‌ی حرارتی و مکانیکی ساده می‌شود؛ این شبیه‌سازی مخصوصاً از نظر محاسباتی به صرفه است. از نقطه نظر فیزیکی، فرض می‌شود تغییرات بیان مکانیکی منجر به تغییرات بیان حرارتی نمی‌شود. این بدان معناست که تغییر در تنش و کرنش منجر به تغییر دما نمی‌شود، اگر چه تغییر حرارتی منجر به تغییرات مکانیکی می‌شود. بدین ترتیب محاسبه‌ی تاریخچه‌ی دمایی طی جوشکاری و سردشدن متعاقب آن ابتدا کامل می‌شود و سپس برای تعیین تنش‌های پسماند، این میدان حرارتی به مدل مکانیکی اعمال می‌شود.^[۱۰، ۹، ۷، ۶، ۳] معادله‌ی بنیادی هدایت حرارت عبارت است از:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی، c حرارت مخصوص، k ضریب هدایت حرارت و $\dot{Q}$ نرخ تغییر دما ناشی از تولید حرارت در واحد حجم است. چنانچه ضریب هدایت حرارت صرفاً تابعی از دما باشد، می‌توان معادله‌ی ۱ را چنین نوشت:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} + k \nabla^2 T + \frac{\partial k}{\partial T} (\Delta T)^2 \quad (2)$$

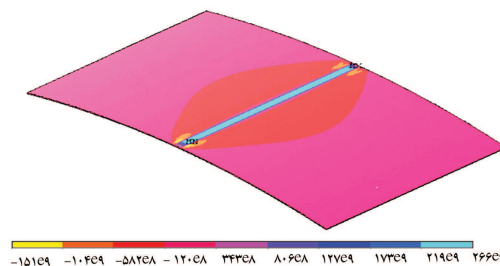
و اگر هیچ منبع حرارتی موجود نباشد، معادله‌ی ۲ ساده می‌شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \frac{\partial k}{\partial T} (\Delta T)^2 \quad (3)$$

برای تحلیل حرارتی قطعه‌ی تحت جوشکاری معمولاً از معادله‌ی ۳ در کنار شرایط اولیه و شرایط مرزی استفاده می‌شود.^[۱۱، ۱۲] در این پژوهش نیز به منظور کاهش عملیات محاسباتی از مدل جفت‌نشده‌ی ترمومکانیک استفاده شده است.

شرایط مرزی یک سرگیردار انجام شده است. در جدول ۱ پارامترهای جوشکاری ارائه شده است.

در شکل ۲ الف تصویری از قطعه کار، با توجه به شرایط مرزی آن قبل از آغاز جوشکاری، نشان داده شده است. به منظور در کنار هم نگه داشتن قطعات هنگام جوشکاری از یک سری خال جوش استفاده شده است (شکل ۲ ب). در شکل به وضوح دیده می شود که با آغاز جوشکاری و حرکت مشعل به سوی لبه ی گیردار، انحنای پوسته ها افزایش یافته و یک تغییر شکل زاویه یی در لبه های آزاد قطعه کار



شکل ۱. تقریب زنی پراکنش تنش پسماند طولی با استفاده از ایجاد اختلاف دما بین منطقه جوش و سایر مناطق.

تحلیل مقادیر ویژه سه بعدی

براساس تحقیقات پیشین، بهره گیری از پراکنش تنش های طولی جوشکاری (پسماند و/یا گذرا) در تحلیل سه بعدی مقادیر ویژه کماتش، می تواند مبنایی برای پیش بینی امکان کماتش سازه های نازک تحت جوشکاری باشد. [۱۱ و ۷، ۶] به منظور تقریب زنی پراکنش تنش های پسماند طولی جوشکاری می توان از پراکندگی دما در قطعه کار بهره جست، به گونه یی که کرنش های منفی طولی در منطقه ی جوش ایجاد شوند. بدین ترتیب منطقه ی جوش تحت تنش های مثبت طولی و منطقه ی کناری آن تحت تنش های منفی طولی قرار می گیرند (شکل ۱). بدین منظور می توان از اعمال دمایی کم تر از دمای محیط به منطقه ی جوش استفاده کرد.

در این پژوهش پراکندگی دمایی که تنش های طولی حاصل از آن منجر به تولید کم ترین مقدار ویژه (مقدار ویژه ۱) در تحلیل سه بعدی مقادیر ویژه ی کماتش شود، مطلوب است. کل آنتروپی تولید شده بر اثر این اختلاف دما محاسبه شده که در این کار با عنوان «آنتروپی بحرانی (S_{crit})» از آن یاد می شود. مقایسه ی آنتروپی کل تولیدی حاصل از فرایند جوشکاری که از تحلیل سه بعدی اجزاء محدود حاصل شده (S_W) با آنتروپی بحرانی می تواند معیاری برای تعیین امکان کماتش پوسته ی نازک تحت جوشکاری لب به لب در اختیار بگذارد.

اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی فوق در پوسته های تحت جوشکاری، از مدل سه بعدی ترمومکانیکی جوش که قابلیت پاسخ گویی آن توسط آزمایش تأیید شده، بهره گیری شده است. در این مدل به منظور افزایش دقت پیش بینی تغییر شکل جوشکاری، رفتار غیرخطی ماده (با اعمال مدل آناند [۱۳ و ۱۲]) و رفتار غیرخطی هندسی (با استفاده از تحلیل تغییر شکل بزرگ) در محاسبات در نظر گرفته شده است.

اعتبارسنجی مدل غیر مزدوج سه بعدی ترمومکانیک

جوش

برای تأیید قابلیت مدل جوش در پیش بینی تغییر شکل پوسته های جوشکاری شده، آزمونی ترتیب داده شده که در آن اتصال لب به لب تک پاسه ی پوسته استوانه یی به ابعاد $250 \times 50 \times 1.5$ (ضخامت $\times$ اندازه کمان $\times$ طول) و قطر 200 میلی متر بررسی شده است؛ شکل نهایی حاصل از مدل جوشکاری نیز با نتایج آزمایشگاهی در شکل های ۲ تا ۵ مقایسه شده است. این جوشکاری به روش TIG دستی و تحت



الف) شرایط مرزی قطعات جوش شونده؛



ب) خال جوش های زده شده برای جلوگیری از جدا شدن لبه های قطعات به هنگام جوشکاری؛

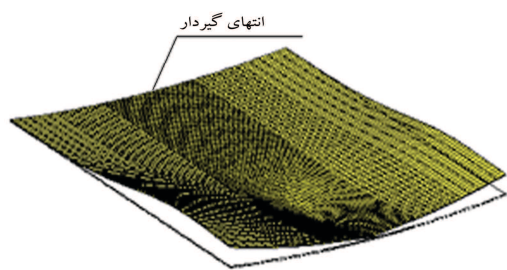


ج) چگونگی قرارگیری قطعات در کنار یکدیگر بعد از خال جوش ها و قبل از آغاز جوشکاری.

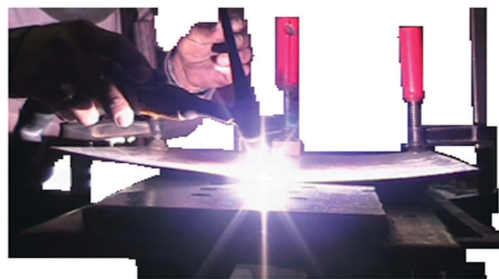
شکل ۲. شرایط مرزی و پیش آماده سازی پوسته ها برای جوشکاری.

جدول ۱. پارامترهای جوشکاری استفاده شده.

۸-۱۰	ولتاژ
۹۰	آمپر
۲۵۴ mm/min	سرعت جوشکاری

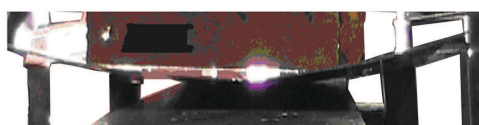


ب) نمای مدل اجزاء محدود که به خوبی معرف تغییر شکل زاویه‌ی پوسته‌ها با آغاز جوشکاری می‌باشد.



الف) تغییر شکل قطعات تحت جوشکاری با آغاز جوشکاری؛

شکل ۳. تغییر شکل زاویه‌ی لبه‌های آزاد قطعات جوش‌شونده با آغاز جوشکاری (مقایسه‌ی بین نتایج تحلیل اجزاء محدود و آزمایش).



ب) نمای روبرویی قطعات جوش شده در لحظات پایانی جوشکاری؛



الف) بلند شدن قطعه تحت جوشکاری با دور شدن مشعل جوشکاری از نقطه آغاز؛



ج) نمای روبرویی مدل اجزاء محدود که به وضوح بلند شدن قطعه کار را از روی سطح زیرین نشان می‌دهد.

شکل ۴. بلند شدن پوسته‌های به هم جوش شده از روی سطح زیرین به سبب جوشکاری (مقایسه‌ی بین نتایج تحلیل اجزاء محدود و آزمایش).

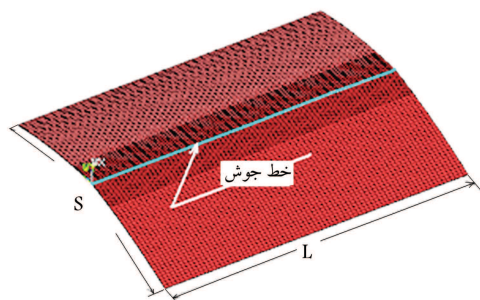


ب) نمای روبرویی مدل اجزاء محدود پوسته‌های جوش شده که به وضوح تغییر انحناء پوسته‌ها را بعد از اتمام جوشکاری نشان می‌دهد.



الف) تغییر شکل پوسته‌های جوش شده بعد از اتمام جوشکاری و قبل از باز شدن قیود مکانیکی؛

شکل ۵. شکل تغییر یافته پوسته‌های جوش شده قبل از باز شدن قیود مکانیکی (مقایسه‌ی بین نتایج تحلیل اجزاء محدود و آزمایش).



شکل ۶. شکل پوسته‌ی مورد مطالعه با شعاع داخلی ۱۰۰۰ میلی‌متر.

جدول ۲. ابعاد پوسته‌های مورد مطالعه با توجه به شکل ۶.

	نمونه						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
$L(mm)$	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۰۰
$S(mm)$	۱۸۰	۲۴۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۲۰
ضخامت (mm)	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵

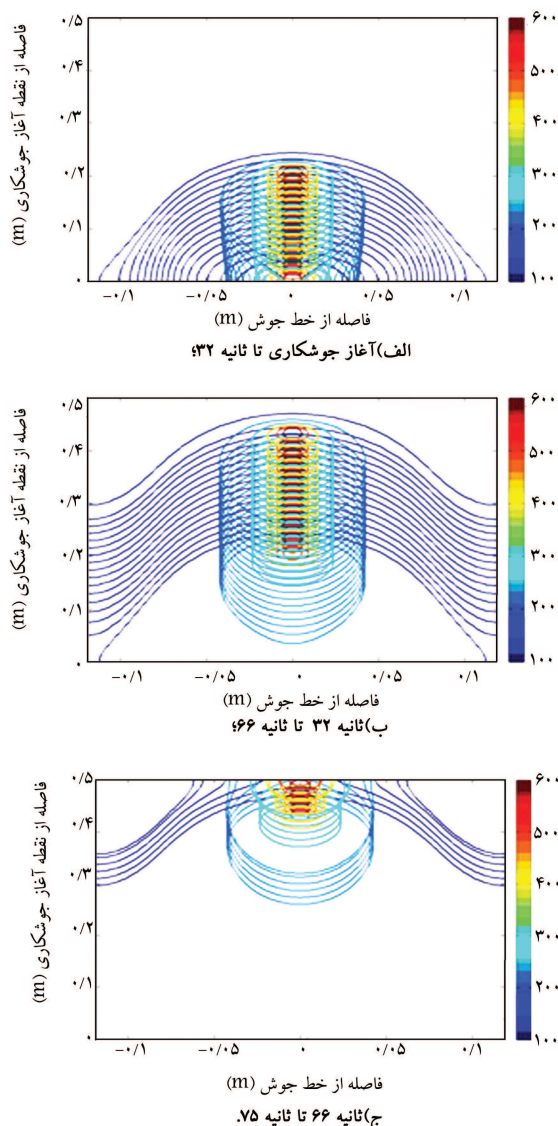
مدل‌سازی

در شکل ۶ و جدول ۲ ابعاد نمونه‌های تحت مطالعه ارائه شده است. در این مدل‌سازی، پوسته‌ها با شرایط مرزی آزاد در حالی که زیر خط جوش مهار شده، تحلیل شده‌اند. از این شرایط مرزی در تحلیل سب‌بعدی مقادیر ویژه کمانش نیز استفاده شده است. بیشترین المان استفاده شده در این مدل‌سازی ۱۱۰۰۰ المان سب‌بعدی بوده است. تراکم المان‌ها از نزدیکی خط جوش به کناره‌های قطعه کار کاهش می‌یابد.

نتایج و بحث

در شکل ۷ تأثیر ابعاد پوسته‌های تحت جوشکاری بر نرخ آنتروپی تولیدی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود ابعاد قطعه کار بر الگوی زمان‌مند آنتروپی تولیدی تأثیر می‌گذارد. به‌ازاء طول جوشکاری یکسان، افزایش عرض قطعه کار منجر به افزایش مقدار آنتروپی تولیدی می‌شود. به‌طور مشابه در قطعات تحت جوشکاری با عرض یکسان، آن که دارای خط جوشکاری بلندتری است، دارای بیشترین آنتروپی تولیدی است.

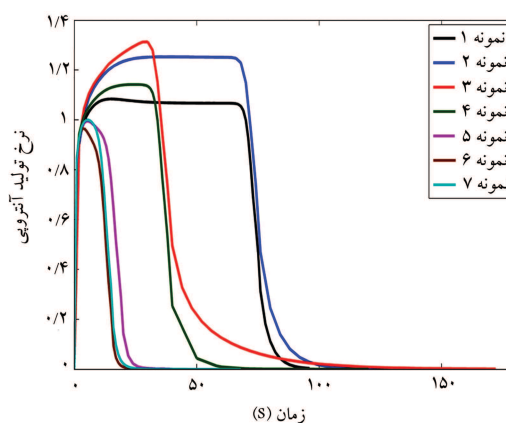
براساس شکل ۷ رشد نرخ آنتروپی در نمونه‌های ۱، ۲ و ۴ با پیشروی جوشکاری به حالت پایدار می‌رسد و قبل از رسیدن به مرحله‌ی هم‌دمایی در مرحله‌ی سرد شدن نزول می‌کند. بررسی تغییرات زمان‌مند خطوط هم‌دمای حاصل از فرایند جوشکاری این سه نمونه به‌خوبی نشان می‌دهد که طول قطعه کار نسبت به عرض آن برای ایجاد یک حالت پایدار در تغییرات زمان‌مند خطوط هم‌دمای حاصل از فرایند جوشکاری کافی است. این رفتار در نمونه‌ی ۲، در شکل ۸ به تفسیر نشان داده شده است. این نمونه از ثانیه‌ی ۳۲ آغاز جوشکاری این روند پایدار در حرکت خطوط هم‌دمای را تجربه می‌کند. این روند تا ثانیه‌ی ۶۸ جوشکاری ادامه می‌یابد و در این لحظه به‌سبب نزدیک شدن مشعل به لبه‌ی انتهایی و خروج آن از قطعه‌کار این روند پایدار به هم می‌ریزد. در بازه زمانی ۳۲ تا ۶۸ ثانیه، جوشکاری به‌دلیل وجود تغییرات زمان‌مند پایدار در خطوط هم‌دمای میزان نرخ آنتروپی تغییر نمی‌کند. در شکل ۸ می‌توان آغاز و پایان این روند را به‌خوبی مشاهده کرد. در نمونه‌ی ۳، نرخ آنتروپی تقریباً تا پیش از خروج مشعل از قطعه کار رشد می‌کند. در این نمونه تغییرات زمان‌مند خطوط هم‌دمای پیشرونده و متغیر است (شکل ۹). زمانی که سردترین خطوط احاطه‌کننده‌ی خط جوش کل طول قطعه کار را پوشش می‌دهد، نرخ آنتروپی شروع به کاهش می‌کند. این رخداد تقریباً از ثانیه‌های آخر جوشکاری (نزدیک شدن مشعل به لبه‌ی انتهایی و خروج آن) آغاز می‌شود و تا سرد شدن



شکل ۸. تغییرات زمان‌مند خطوط هم‌دمای حول حوضچه‌ی مذاب طی فرایند جوشکاری نمونه ۲.

کامل قطعه کار پیش می‌رود. خلاصه‌ی نتایج حاصل از پژوهش بر روی پوسته‌ی نازک تحت جوشکاری در جدول ۳ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود تمام نمونه‌هایی که نسبت SW/S_{cri} در آنها بیشتر از ۱ است، کمانش کرده‌اند و برعکس.

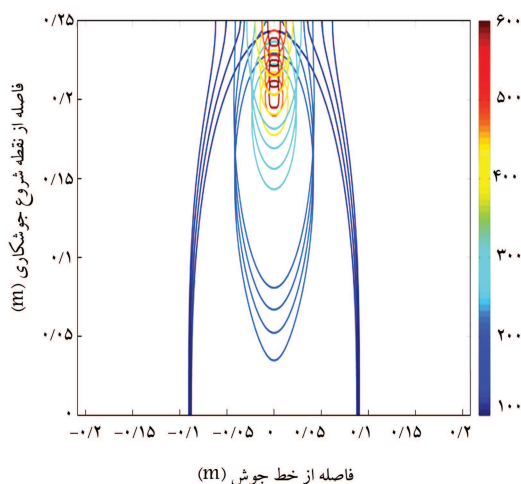
تحلیل سه‌بعدی ترمومکانیک پوسته‌های نازک تحت مطالعه نشان می‌دهد که تمام نمونه‌هایی که دارای نسبت SW/S_{cri} بزرگ‌تر از ۱ هستند، زمانی که کل آنتروپی تولیدی آنها بیشتر از S_{cri} مربوطه می‌شود کمانش می‌کنند. این نکته



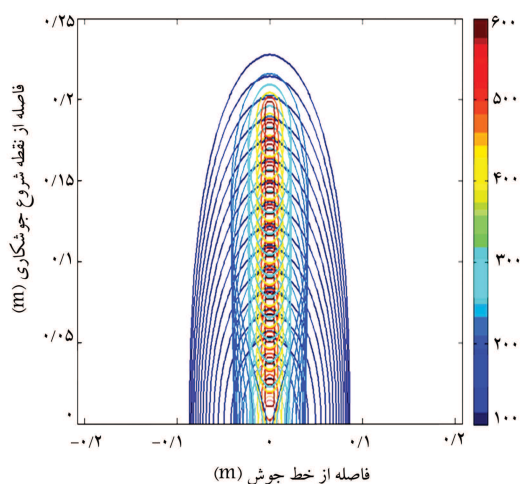
شکل ۷. نرخ آنتروپی تولیدی پوسته‌های تحت مطالعه.

جدول ۳. خلاصه نتایج مطالعه روی پوسته‌های نازک تحت جوشکاری.

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
SW	۷۹/۰۴	۹۲	۵۲/۵۵	۴۲	۱۶	۱۱/۸	۱۲/۹۵
SW/S_{cri}	۹/۸۴	۱۶/۰۲	۱/۸۸	۵/۴	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۷۵
پیش‌بینی وقوع کمانش	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر
مدل سه‌بعدی ترمومکانیکی جوش	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر



ب) تغییرات خطوط هم دما از ثانیه ۳۲ جوشکاری تا ۳۸.



الف) تغییرات خطوط هم دما با پیشروی مشعل جوشکاری از آغاز تا ثانیه ۳۰.

شکل ۹. تغییرات زمان مند خطوط هم دما حول حوضچه‌ی مذاب حاصل از فرایند جوشکاری نمونه ۳.

نتیجه‌گیری

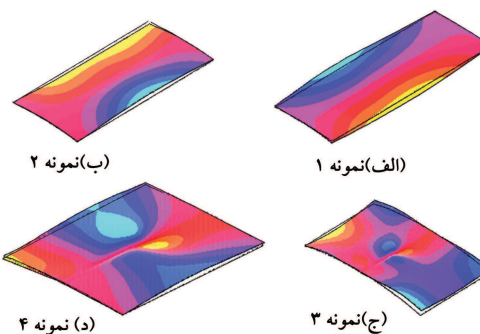
در این پژوهش روشی برای پیش‌بینی امکان کمانش پوسته‌های نازک تحت جوشکاری بر مبنای آنتروپی تولیدی در جوشکاری و مقایسه‌ی آن با آنتروپی بحرانی به دست آمده است. بدین‌منظور:

۱. در این روش با بهره‌گیری از تحلیل حرارتی سه‌بعدی و گذرا، کل آنتروپی تولیدی در فرایند جوشکاری تعیین می‌شود.

۲. براساس سازوکار تعیین کمانش با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه میزان آنتروپی لازم برای شکل‌گیری اولین مد کمانش قطعه کار محاسبه می‌شود.

۳. با مقایسه‌ی این دو آنتروپی می‌توان احتمال کمانش قطعه کار را بررسی کرد.

درستی پیش‌بینی براساس تحلیل سه‌بعدی اجزاء محدود جوش (حرارتی-مکانیکی) که خود با نتایج آزمایشگاهی تأیید شده، بررسی و تأیید شده است. زمان لازم برای اجرای روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های تحلیلی موجود برای پیش‌بینی کمانش قطعات جوش‌شونده، کم‌تر است زیرا در این روش تحلیل مکانیکی جوش حذف شده است.



شکل ۱۰. تغییر شکل پوسته‌ها بعد از رخداد کمانش در آنها براساس مدل سه‌بعدی ترمومکانیکی جوش.

نشان می‌دهد که با این روش می‌توان زمان احتمالی کمانش را نیز پیش‌بینی کرد. تغییر شکل ناشی از کمانش در پوسته‌های کمانش کرده‌ی تحت مطالعه براساس تحلیل سه‌بعدی ترمومکانیک اجزاء محدود در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

منابع (References)

1. Masubuchi, K., *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, Oxford (1980).
2. Murakawa, H., Ueda, Y. and Zhong, X.M. "Buckling behavior of plates under idealized inherent strain", *Transactions of JWRI*, **24**(2), pp. 87-91 (1995).
3. Michaleris, P. and Debicari, A. "Prediction of welding distortion", *Welding Journal*, **76**(4), pp. 172-180 (1997).
4. Tsai, C.L., Park, S.C. and Cheng, W.T. "Welding distortion of a thin-plate panel structure", *A.W.S., Welding Journal, Research Supplement*, **78**, pp. 156s-165s (1999).
5. Dean, D. and Hidekazu, M. "FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel

- structures", *Computational Materials Science*, **43**, pp. 591-607 (2008).
6. Michaleris, P. and Debiccari, A. "A predictive technique for buckling analysis of thin section panels due to welding", *Journal of Ship Production*, **12**(4), pp. 269-275 (1996).
7. Michaleris, P., Deo, M.V. and Sun, J. "Prediction of buckling distortion of welded structures", *Science and Technology of Welding & Joining*, **8**(1), pp. 55-61 (2003).
8. Schenk, T., Richardson, I.M., Kraska, M. and Ohnimus, S. "Modeling buckling distortion of DP600 overlap joints due to gas metal arc welding and the influence of the mesh density", *Computational Materials Science*, **46**, pp.977-8-986, www.sciencedirect.com, Available online (30 May 2009).
9. Ziaee, S., Kadivar, M.H. and Jafarpur, K. "Experimental evaluation of the effect of external restraint on buckling behavior of thin welded shells", *IJST, Transaction B, Eng.*, **33**(B5), pp. 397-413 (2009).
10. Ziaee, S. "Effect of shell dimensions and welding sequence on buckling behavior of welded shells", ICME2010, Noshirvani University of Technology, Babol (2010).
11. Fallahi, A., Jafarpur, K.h. and Nami, M.R. "Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment", *Scientia Iranica B*, **18**(3), pp. 398-406 (2011).
12. Ronda, J. and Oliver, G.J. "Comparison of applicability of various thermo-viscoplastic constitutive models in modeling of welding", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **153**, pp. 195-221 (1998).
13. Brown, S.B., Kim, K.H. and Anand, L. "An internal variable constitutive model for hot working of metals", *International Journal of Plasticity*, **5**, pp. 95-130 (1989).

WELDING BUCKLING PREDICTION OF THIN SHELLS BASED ON ENTROPY GENERATION

S. Ziaee(corresponding author)

ziaee@mail.yu.ac.ir

**Dept. of Mechanical Engineering
Yasouj University**

K. Jafarpour

kjafarme@shirazu.ac.ir

**School of Mechanical Engineering
Shiraz University**

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 57-63, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 29 October 2011; received in revised form 17 November 2012; accepted 10 December 2012.

Abstract

Welding has been employed at an increasing rate for its advantage in high joint efficiency, water and air tightness, weight saving, reduction in fabrication cost and design flexibility. However, welded structures are not free from problems. Residual stress and distortion are major difficulties with welded structures. The buckling distortion of welded structures caused by welding stress is seen in relatively thin welded structures. Buckling distortion causes loss of dimensional control, structural integrity and increased fabrication costs. Thus, it is necessary to achieve a predictive analysis technique to determine the susceptibility of a particular design to buckling distortion. This paper presents a predictive buckling distortion method to determine if welded structures buckle during welding or not. In this method, a 3D thermal transient process is coupled to a 3D eigenvalue analysis to determine the total entropy generation due to welding and critical total entropy generation, respectively. In this work, because of the small size of the melted region (weld pool), the heat source model developed by the “moving isotherm pool” is used. Welding time in this work is calculated by dividing the welder speed obtained from the practical welding characteristics data by the length of the welded region. The temperature dependent thermal properties of material were also incorporated into the model. In this research, temperature distribution producing the minimum value of longitudinal stress to cause the buckling of welded shells is predicted by 3D eigenvalue analysis. This temperature distribution creates negative longitudinal strains in the welded region, causes tensile longitudinal stress in regions close to the weld line and compressive stress in regions away from the weld line. Total entropy generation, due to

this temperature distribution, which is named critical entropy (S_{cri}), is calculated. The comparison between total entropy generation due to completely welded shells (S_W) and critical entropy is a good criterion to predict the possibility of buckling welded shells. In this method, the computational time is much less than in the previous methods because of omitting the mechanical analysis of welding. The correctness of this predictive method is proved by analytical results.

Key Words: welding buckling, entropy generation, thin shells, eigenvalue analysis, 3D thermal transient analysis.