



مدل سازی الاستیک-پلاستیک تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری لیزری در سازه‌های هوافضا

وحید ناطق^{۱*}، سامرند رش احمدی^۲ و کریم کریمی^۳^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه^۲ دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه^۳ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۲/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۸

چکیده

یکی از مناسب‌ترین فناوری‌های اتصال، جوشکاری با اشعه لیزر است که در این نوع جوشکاری به دلیل انرژی موضعی کمتری که در محل جوش اعمال می‌شود، اعوجاج کمتری به وجود می‌آید، محل جوش استحکام بالایی را دارا بوده، فرآیندی با سرعت بالا است. رشد صنعت هواپیما در کاهش وزن سازه‌های هوافضا، منجر به معرفی جوشکاری لیزری در ساخت سازه‌های هوافضا با تقویت‌کننده‌ها به جای اتصالات پرچ شده است. در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای محاسبه تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری لیزری ارائه گردیده، نتیجه به دست آمده با نتایج عددی اعتبارسنجی شده است.

هدف از این تحقیق، مطالعه توزیع تنش پسماند عرضی صفحات ساخته شده از آلومینیوم آلیاژ 6061-T6 است که در ساخت پنل‌های بدنه هواپیما به کار برده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، در صورتی که حداکثر تنش اعمال شده در قطعه کار کمتر از تنش تسلیم ماده باشد، ناحیه پلاستیک در قطعه کار ایجاد نمی‌شود که در این شرایط تنش پسماند نیز وجود نخواهد داشت. مشخص شده است که بزرگ‌ترین تنش‌ها در نزدیکی سطح صفحه گسترش پیدا می‌کنند، اما این تنش‌ها به سرعت کاهش یافته، در سطوح پایین‌تر تقریباً به صفر می‌رسند. ماده الاستیک-پلاستیک ایده آل فرض شده است. مطابقت خوبی بین نتایج تحلیلی محاسبه شده و عددی به دست آمده است.

کلمات کلیدی: جوشکاری لیزری؛ تنش پسماند عرضی؛ آلیاژهای آلومینیوم؛ مدل سازی الاستیک-پلاستیک.

Elastic-Plastic Modeling of the Residual Stresses Caused by Laser Beam Welding in Aerospace Structures

V. Nategh¹, S. Rash Ahmadi² and K. Karimi³¹M. Sc., Mech. Eng. Dept., Urmia Univ., Urmia, Iran²Assoc. Prof., Mech. Eng. Dept., Urmia Univ., Urmia, Iran³M. Sc., Mech. Eng. Dept., Urmia Univ., Urmia, Iran.

Abstract

An appropriate joining technology is the laser beam welding process, because of its low localized energy input leading to low distortion, high strength of the joint and high processing speeds. The growing of aircraft industry in reducing the weight of aerospace structure has led the introduction of laser beam welding into the fabrication of aerospace structure with stiffeners, instead of riveted joints. In the present paper an analytical model for calculation of the residual stresses induced by laser welding is proposed and numerically validated.

The aim of this work is to study the transverse residual stress distribution of plates made of an aluminum alloy 6061-T6, which is used for fabrication of fuselage panels. The results show that, if the maximum stress amount induced in the workpiece does not exceed the material yield stress, no plastic penetration will occur and there will be no residual stress. It was found that high stresses are developing close to the plate surface while these stresses decrease rapidly to almost zero values at the lower surface. An ideal elastic-plastic material curve was assumed. Good accordance is found between the calculated and numerical results.

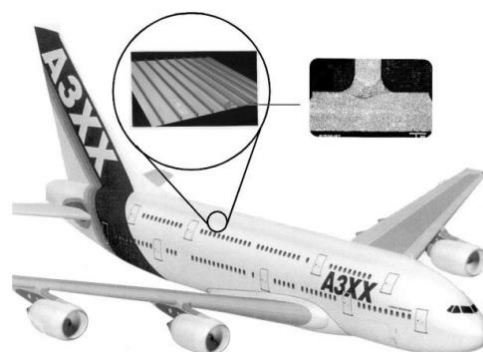
Keywords: Laser Beam Welding; Transverse Residual Stress; Aluminum Alloys; Elastic-Plastic Modeling.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: +۹۸۹۱۴۹۸۶۹۲۹۰

آدرس پست الکترونیک: v.nategh@gmail.com

۱- مقدمه

جوشکاری با لیزر، یکی از روش‌های نوین جوشکاری است که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، امروزه به خاطر سرعت، دقت، کیفیت و قابلیت کنترل آن به طور وسیعی در صنایع مختلف به کار برده می‌شود. در این روش جوشکاری، با متمرکز کردن اشعه لیزر روی فلز حوضچه مذاب تشکیل شده و عملیات جوشکاری انجام می‌گیرد. استفاده از روش جوشکاری لیزری در سازه‌های هوافضا مانند هواپیما، دارای دو مزیت نسبت به اتصالات پرچ است. اولاً، استفاده از جوشکاری لیزری، سبب کاهش وزن سازه می‌شود، زیرا مواد اضافی به کار رفته در اتصال با پرچ از جمله، ورقه‌های اضافی به کار رفته در آن در اتصال با جوشکاری لیزری استفاده نمی‌شود. ثانیاً، اتصال با استفاده از جوشکاری لیزری در سرعت بالاتری نسبت به اتصال با روش پرچ انجام می‌گیرد که از نظر سرعت فرآیند نیز، برتری قابل توجهی دارد؛ بنابراین استفاده از جوشکاری لیزری در صنعت هوافضا، سبب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. در شکل ۱، جوشکاری قسمتی از بدنه هواپیما با استفاده از اشعه لیزر نشان داده شده است.



شکل ۱- کاربرد جوشکاری لیزری در صنعت هواپیما

لیزری در اجزای بیشتر بدنه هواپیما شده است که از جمله در قسمت‌های پوسته-کلیپ^۲، کلیپ-تقویت‌کننده عرضی^۳ و تقویت‌کننده عرضی-پوسته^۴ نیز، از این روش برای اتصال استفاده می‌شود.

فرآیندهای جوشکاری ذوبی به دلیل اعمال حرارت موضعی بسیار بالا در محل جوش و سپس خنک شدن آن، به دلیل گرادیان حرارتی زیاد، سبب ایجاد تنش‌های پسماند در اتصال می‌شوند. این تنش‌ها در برخی نقاط فشاری و در برخی نقاط کششی می‌باشند که اندازه این تنش‌ها در برخی نقاط، به بالاتر از تنش تسلیم می‌رسد که سبب کاهش استحکام خستگی و یا کاهش بار حدی در کماتش سازه‌ها می‌شود؛ بنابراین تخمین اندازه و چگونگی توزیع تنش پسماند در اتصالات بسیار ضروری است.

در زمینه هوافضا مطالعاتی که تاکنون در زمینه تخمین تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری لیزری صورت گرفته، به صورت روش‌های آزمایشگاهی و عددی بوده است. لیباس^۵ و دیامانتاکوس^۶ [۱] تنش‌های پسماند ایجاد شده تحت اثر جوشکاری لیزری را در اتصال T شکل با روش المان محدود بررسی کردند. آن‌ها همچنین تأثیر تنش پسماند در ترک و فاکتور شدت تنش را نیز مورد مطالعه قرار دادند. زین‌العابدین^۷ و همکاران [۲] توانستند با انجام کارهای آزمایشگاهی و همچنین شبیه‌سازی المان محدود، توزیع تنش‌های پسماند طولی و عرضی ناشی از جوش لیزری را در ورق‌های نازک آلومینیوم AA 6056-T4 محاسبه نمایند. با توجه به اینکه در صنعت هوافضا به طور گسترده‌ای از آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود، تحقیقات زیادی در مورد ویژگی این آلیاژها صورت گرفته است. شوبرت^۸ و همکاران [۳] به بررسی آلیاژهای سبک‌وزن و قابلیت جوشکاری آن‌ها با استفاده از پرتو لیزر پرداختند. یانگ^۹ و همکاران [۴] نیز در یک اتصال T شکل از جنس آلومینیوم تغییر خواص مکانیکی فلز در اثر

در زمینه صنعت هوافضا، جوشکاری لیزری ابتدا به طور موفقیت‌آمیزی در ساخت قسمت پوسته-ستون فرعی بال^۱ هواپیماهای مختلف غیرنظامی در اروپا به کار برده شد. با توسعه این فناوری، نهایتاً منجر به استفاده از جوشکاری

² Skin-clip

³ Clip-frame

⁴ Frame-skin

⁵ Labeas

⁶ Diamantakos

⁷ Zain-ul-abdein

⁸ Schubert

⁹ Yang

¹ Skin-stringer

- با توجه به اینکه فرآیند جوشکاری لیزری در سرعت نسبتاً بالایی انجام می‌گیرد، فرض شده است، هیچ گرمایی بین قطعه و محیط مبادله نشود.

- فرض شده است که در فرآیند جوشکاری گرما به صورت نفوذ کامل^۴ در قطعات اعمال می‌شود.

۲-۱- معادله منبع گرمایی لیزری

عمدتاً در مطالعات عددی و تحلیلی که در زمینه جوشکاری‌های حالت ذوبی انجام می‌گیرد، از مدل توزیع گرمایی گاوسی استفاده می‌شود:

$$q_s(r) = \frac{fQ}{\pi r^2} \cdot \exp\left(-f \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

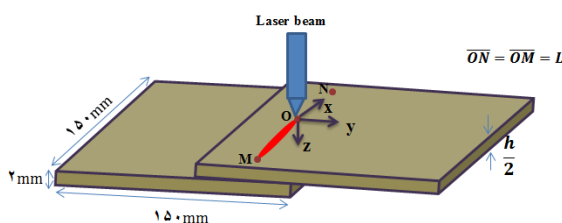
که Q توان اشعه لیزر، r_0 شعاع اشعه لیزر، $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ شعاع جریان و ضریب f (که معمولاً برابر ۳ فرض می‌شود) پارامتر توزیع اشعه لیزر را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۱)، از آنجایی که پارامتری که مقدار نفوذ گرما در قطعه را بیان کند در این رابطه وجود ندارد، بنابراین از این رابطه نمی‌توان در تحلیل حالت‌هایی استفاده کرد که اشعه لیزر به داخل قطعه نفوذ می‌کند و تنها برای بررسی حالتی که گرما روی سطح قطعه جوشکاری شده وارد می‌شود، به کار برده می‌شود. باید توجه داشت که هنگام فرآیند جوشکاری لیزر افزایش دمای محل جوشکاری شده نه تنها سبب ذوب قطعه می‌شود، بلکه سبب تبخیر موضعی شده و با تشکیل سوراخ کلید^۵ همراه است. در بررسی توزیع گرما در جوشکاری لیزری، مسئله مهم محاسبه هندسه منبع گرمایی در راستای ضخامت قطعات جوشکاری شده است، به نحوی که شرایط تحلیل مشابه شرایط واقعی باشد. شکل‌های مختلفی برای توزیع منبع گرمایی لیزری در راستای عمق ارائه شده است. نتایج، نشان می‌دهد که با افزایش نفوذ گرما در قطعه توان پرتو لیزر کاهش می‌یابد، لذا منبع گرمایی باید این ویژگی را داشته باشد. یکی از مناسب‌ترین مدل‌های ارائه شده برای توزیع توان اشعه لیزر که نزدیک به شرایط واقعی است، مدل

جوشکاری لیزری را به طور آزمایشگاهی تحلیل و بررسی کردند.

در این مقاله، با استفاده از مدل‌سازی الاستیک-پلاستیک و به صورت کاملاً تحلیلی توزیع تنش‌های پسماند عرضی در راستای ضخامت دو ورقه از جنس آلومینیوم 6061-T6 که به صورت لبه روی هم^۱ با جوشکاری لیزری متصل شده‌اند را محاسبه و در انتها برای اطمینان از صحت تحلیل انجام‌گرفته با نتایج عددی ارائه شده توسط مورایتیس^۲ و لیباس^۳ [۵] مقایسه خواهد شد.

۲- هندسه و معادلات حاکم

ابعاد و مختصات قطعات جوشکاری شده که در این تحلیل بررسی می‌شود، به طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. دو ورق دارای ابعاد یکسان می‌باشند که به صورت لبه روی هم با اشعه لیزر جوش داده می‌شوند.



شکل ۲- ابعاد و مختصات قطعات جوشکاری شده

با توجه به شکل ۲، جوشکاری از نقطه M شروع شده و تا نقطه N انجام می‌گیرد که فاصله این دو نقطه از هم ۱۲۰ میلی‌متر است. جوشکاری در راستای محور x بوده، نقطه O را به عنوان مبدأ مختصات در نظر می‌گیریم که در فاصله‌ای برابر از نقاط M و N قرار دارد؛ بنابراین اندازه \overline{OM} و \overline{ON} یکسان بوده، مقدار L فرض می‌شود؛ همچنین ضخامت هر ورق برابر $h/2$ (۲ میلی‌متر) است.

فرضیات انجام‌گرفته برای مدل‌سازی عبارت‌اند از:

- ماده الاستیک-پلاستیک ایده‌آل فرض شده است، بنابراین خواص آن مستقل از تغییرات دماست.

^۴ Full penetration

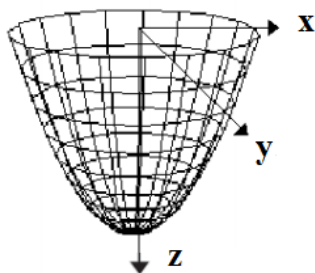
^۵ Keyhole

^۱ Lap joint

^۲ Moraitis

^۳ Labeas

(۷)، در صورتی که فرض شود مقدار گرمای وارد شده بر حجم مقدار ثابتی است، پوسته مخروطی شکلی ایجاد می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- سطح مخروطی ایجاد شده با مدل C-I-N

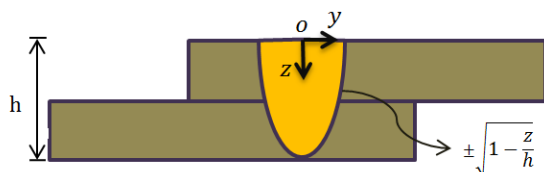
از آنجایی که شکل ۳، از فرض ریکالین مبنی بر از دست رفتن کارایی منبع گرما در نفوذ کامل جوشکاری به دست آمده است، می‌توان این پوسته مخروط را معادل با حوضچه مذاب ایجاد شده در فرآیند جوشکاری لیزری در نظر گرفت. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، نقطه 0 در فاصله‌ای برابر از شروع و پایان جوش قرار دارد. در صورتی که مدل‌سازی در نقطه 0 انجام شود، با توجه به عبور صفحه $x = 0$ از این نقطه، رابطه (۷) به شکل زیر در می‌آید:

$$z = s - 3 \frac{y^2}{r_0^2} \quad (۸)$$

با توجه به اینکه s پارامتر عمق نفوذ گرما در قطعات جوشکاری شده است، از آنجایی که فرض شده است جوشکاری به صورت نفوذ کامل در قطعات انجام شود، با در نظر گرفتن $s = h$ رابطه (۸) به صورت در می‌آید:

$$\frac{y}{r_0} = \pm \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \quad (۹)$$

این رابطه، بیانگر فرم دو بعدی حوضچه مذاب در سطح مقطع مدل است که به طور شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- فرم دو بعدی حوضچه مذاب

استوانه‌ای-پیچ‌دار-معمول^۱ (C-I-N) است که توسط راناتوسکی^۲ و چیچاکی^۳ [۶] ارائه شده است:

$$q_v(x, y, z) = \frac{kK_z Q}{\pi(1 - \exp(-K_z s))} e^{-k(x^2 + y^2) - K_z z} [1 - u(z - s)] \quad (۲)$$

که در آن Q توان پرتو لیزر، $K_z = 3/s$ تعریف‌کننده توان منبع گرمایی، $k = 3/r_0^2$ نشانگر ضریب تمرکز منبع گرما، s عمق نفوذ گرما، r_0 شعاع لیزر و $u(z - s)$ تابع هیویساید است. متناظر با رابطه بالا در صورتی که حداکثر گرمای وارده بر حجم ناحیه جوشکاری شده را به صورت رابطه (۳) در نظر بگیریم:

$$q_{v \max} = \frac{kK_z Q}{\pi(1 - \exp(-K_z s))} \quad (۳)$$

در نتیجه توزیع توان منبع گرمایی لیزری را می‌توان به فرم (۴) نوشت:

$$q_v = q_{v \max} \cdot e^{-k(x^2 + y^2) - K_z z} \cdot [1 - u(z - s)] \quad (۴)$$

بنابر نظریه ریکالین^۴ [۶]، در صورتی که منبع گرمایی به 0.05 حداکثر توان خود برسد، کارایی خود را از دست خواهد داد؛ بنابراین برای به دست آوردن محدوده اثر منبع گرمایی لیزری با استفاده از نظریه ریکالین داریم:

$$q_{v \max} \cdot e^{-k(x^2 + y^2) - K_z z} \cdot [1 - u(z - s)] = 0.05 q_{v \max} \quad (۵)$$

در حالتی که $z < s$ باشد، $u(z - s) = 0$ بوده و گرما در راستای ضخامت مدل نفوذ می‌کند [۷]. با در نظر گرفتن این فرض، رابطه (۵) به شکل (۶) خواهد بود:

$$k(x^2 + y^2) + K_z z = 3 \quad (۶)$$

که با جایگذاری مقادیر $K_z = 3/s$ و $k = 3/r_0^2$ رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$z = s - \frac{3}{r_0^2} (x^2 + y^2) \quad (۷)$$

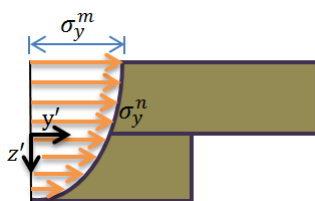
با توجه به اینکه s و r_0 مقادیر ثابتی هستند، با ترسیم رابطه

^۱ Cylindrical-Involution-Normal

^۲ Rاناتowski

^۳ Ciecchacki

^۴ Rykalin



شکل ۶- پروفیل تنش ایجاد شده در سطح مقطع

$$\sigma_y^n = +\sigma_y^m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{z'}{h}} \quad (12)$$

با توجه به اصل سوپربوزیشن پروفیل تنش را می‌توانیم به صورت حاصل جمع یک تنش و ممان خمشی بنویسیم. تنش نرمال یکنواخت و ممان خمشی حاصل از پروفیل تنش به ترتیب، با روابط (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \sigma_y^{n1} &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y^n dz' = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y^m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{z'}{h}} dz' \\ &= \frac{2}{3} \sigma_y^m \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} M &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y^n Lz' dz' = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y^m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{z'}{h}} Lz' dz' \\ &= -\frac{1}{15} \sigma_y^m h^2 L \end{aligned} \quad (14)$$

ممان وارد شده بر سطح مقطع، باعث ایجاد تنش یکنواخت می‌شود. تنش خمشی ایجاد شده در اثر ممان خمشی، به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود:

$$\sigma_y^{n2} = \frac{Mz'}{I_{x'}} \quad (15)$$

که در این رابطه M ممان خمشی و $I_{x'}$ ممان اینرسی نسبت به تار خنثی است که به صورت زیر تعریف شده است:

$$I_{x'} = \frac{Lh^3}{12} \quad (16)$$

با جایگذاری روابط (۱۴) و (۱۶) در رابطه (۱۵) تنش نرمال یکنواخت حاصل از ممان خمشی به صورت رابطه (۱۷) به دست می‌آید:

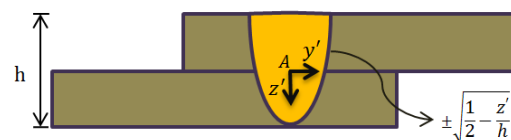
$$\sigma_y^{n2} = \frac{-\frac{1}{15} \sigma_y^m h^2 Lz'}{\frac{1}{12} Lh^3} = -\frac{4}{5} \sigma_y^m \cdot \frac{z'}{h} \quad (17)$$

در نتیجه تنش نرمال کل را می‌توان از جمع تنش‌های نرمال یکنواخت وارد شده بر مقطع به دست آورد:

۲-۲- تحلیل تنش الاستیک-پلاستیک

نفوذ گرما و تشکیل حوضچه مذاب داخل قطعات، سبب ایجاد تغییراتی در خواص ماده شده، سبب به وجود آمدن ناحیه پلاستیک می‌شود. تغییر خواص مواد در این حالت، سبب پیچیده‌تر شدن تحلیل تنش‌های گرمایی می‌شود. با توجه به فرضیات انجام گرفته، با مشخص کردن ناحیه‌های پلاستیک و الاستیک در قطعات جوشکاری شده، می‌توان تنش‌های ایجاد شده در این نواحی را به دست آورد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای اینکه بتوان نفوذ پلاستیک را نشان داد، به مبداء A مختصات جدید تعریف می‌کنیم؛ بنابراین با توجه به رابطه (۹)، فرم پروفیل حوضچه مذاب در مختصات جدید به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{y'}{r_0} = \pm \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{z'}{h}} \quad (10)$$

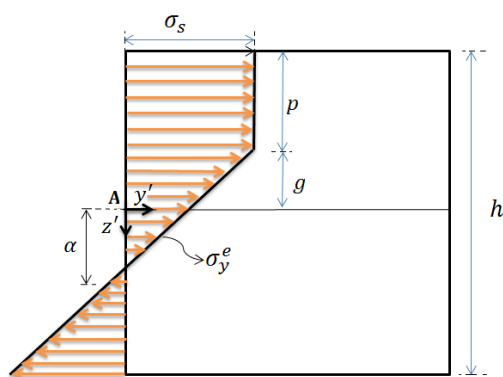


شکل ۵- تعریف مختصات جدید در حوضچه مذاب

در صورتی که تنش‌های ایجاد شده داخل حوضچه مذاب را به صورت دوبعدی بررسی کنیم، این پروفیل تنش را می‌توان به شکل رابطه (۱۱) بیان کرد:

$$\sigma_y^n = \pm \sigma_y^m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{z'}{h}} \quad (11)$$

که در اینجا σ_y^m بزرگ‌ترین تنش وارد شده روی سطح صفحه جوشکاری شده است. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با توجه به تقارن موجود در پروفیل تنش در حوضچه مذاب، می‌توانیم تحلیل تنش را در یک سمت بررسی کنیم؛ بنابراین توزیع تنش در سمت راست رابطه (۱۱) را برای مدل‌سازی تنش‌های الاستیک و پلاستیک در نظر می‌گیریم. این پروفیل توزیع تنش، به طور شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده است؛ در نتیجه توزیع تنش در این قسمت را می‌توان به صورت رابطه (۱۲) بیان کرد:



شکل ۷- توزیع تنش‌های الاستیک و پلاستیک در سطح مقطع مدل

$$m = \frac{8}{3} \cdot \frac{2\sigma_y^m - 3\sigma_s}{h \left(1 + 4 \left(\frac{g}{h} \right) + 4 \left(\frac{g}{h} \right)^2 \right)} \quad (21)$$

نهایتاً با جایگذاری این شیب در رابطه (۱۹) معادله خط تنش الاستیک در راستای ضخامت قطعه به دست می‌آید:

$$\sigma_y^e = \frac{8}{3} \cdot \frac{2\sigma_y^m - 3\sigma_s}{h \left(1 + 4 \left(\frac{g}{h} \right) + 4 \left(\frac{g}{h} \right)^2 \right)} (z' + g) + \sigma_s \quad (22)$$

۳- فرمول‌بندی تنش پسماند

تنش‌های پسماند در فرآیند جوشکاری، بعد از خنک شدن قطعات جوشکاری شده و رسیدن دمای آن به دمای محیط به وجود می‌آیند. توزیع تنش‌های پسماند عرضی در نواحی پلاستیک و الاستیک به ترتیب، از روابط (۲۳) و (۲۴) به دست می‌آید:

$$\sigma_y^{re} = \sigma_s - \sigma_y^h \quad (-h/2 \leq z' < -g) \quad (23)$$

$$\sigma_y^{re} = \sigma_y^e - \sigma_y^h \quad (-g \leq z' \leq h/2) \quad (24)$$

بازه $-h/2 \leq z' < -g$ نشانگر محدوده پلاستیک است و بازه $-g \leq z' \leq h/2$ محدوده الاستیک را نشان می‌دهد. با جایگذاری معادلات خطوط تنش نرمال کل (σ_y^h) و تنش الاستیک (σ_y^e) در روابط بالا، توزیع تنش‌های پسماند عرضی در محدوده پلاستیک از رابطه (۲۵)،

$$\sigma_y^{re} = \left(\sigma_s - \frac{2}{3} \sigma_y^m \right) + \frac{4}{5} \sigma_y^m \frac{z'}{h} \quad (-h/2 \leq z' < -g) \quad (25)$$

$$\sigma_y^h = \sigma_y^{n1} + \sigma_y^{n2} \quad (18)$$

$$\sigma_y^h = \frac{2}{3} \sigma_y^m - \frac{4}{5} \sigma_y^m \frac{z'}{h}$$

با توجه به رابطه (۱۸)، در سطح قطعات جوشکاری شده با $(z' = -h/2)$ حداکثر تنش نرمال بر مدل وارد می‌شود.

فرآیند جوشکاری و اتصال قطعات به یکدیگر، زمانی انجام می‌گیرد که تنش گرمایی وارد شده از تنش تسلیم فلز بیشتر باشد که در این حالت، قطعات وارد منطقه پلاستیک شده و بعد از خنک شدن و رسیدن به دمای اتاق اتصال قطعات صورت می‌گیرد. در شکل ۷، توزیع تنش‌های الاستیک-پلاستیک در مقطع مدل نشان داده شده است [۸]. نواحی پلاستیک (p) و الاستیک ($h - p$) دارای توزیع تنش‌های متفاوتی می‌باشند. در محدوده پلاستیک مقدار تنشی که به قطعه وارد می‌شود، برابر تنش تسلیم (σ_s) فلز است. با توجه به شکل ۷، معادله خط تنش الاستیک (σ_y^e) به صورت خط راست است. همچنین تنش نرمال کل که از رابطه (۱۸) به دست آمد، بر سطح مقطع مدل وارد شده در نقطه‌ای مانند α خط تنش الاستیک را قطع می‌کند. برای به دست آوردن معادله خط تنش الاستیک، با توجه به اینکه معادله آن به صورت خط راست است و نقطه $(-g, \sigma_s)$ از این خط معلوم است، بنابراین معادله تنش الاستیک به صورت رابطه (۱۹) خواهد بود:

$$\sigma_y^e - \sigma_s = m(z' - (-g)) \quad (19)$$

که در اینجا m ، شیب خط تنش الاستیک است. برای به دست آوردن این شیب، از رابطه زیر استفاده می‌شود که در مقاله ارائه شده توسط یانگ^۱ و ژیانو^۲ [۹] نیز برای به دست آوردن معادله خط الاستیک به کار برده شده است:

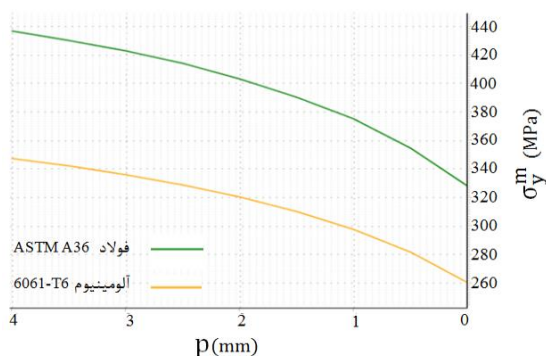
$$\int_{-g}^{-h/2} (\sigma_y^h - \sigma_s) dz' + \int_{\alpha}^{h/2} (\sigma_y^h - \sigma_y^e) dz' = \int_{-g}^{\alpha} (\sigma_y^e - \sigma_y^h) dz' \quad (20)$$

با جایگذاری روابط (۱۸) و (۱۹) در (۲۰) و انتگرال‌گیری، شیب خط الاستیک به دست می‌آید:

¹ Yang
² Xiao

پلاستیک انجام گرفته، رابطه (۲۸) بیانگر ارتباط بزرگ‌ترین تنش اعمال شده روی سطح و عمق نفوذ پلاستیک است. با توجه به مراجع [۱۰ و ۱۱] آلومینیوم 6061-T6 و فولاد ASTM A3 در دمای اتاق به ترتیب، دارای تنش‌های تسلیم ۲۷۷/۷ و ۳۵۰ مگا پاسکال می‌باشند.

در شکل ۸ تغییرات عمق نفوذ پلاستیک با افزایش بزرگ‌ترین تنش وارد شده بر سطح قطعات از جنس‌های آلومینیوم 6061-T6 و فولاد ASTM A36 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، همچنان که بزرگ‌ترین تنش وارد شده به سطح جوش بیشتر می‌شود، نفوذ پلاستیک نیز با افزایش همراه است. با توجه به اینکه ضخامت کل مدل ۴ میلی‌متر است، در شرایطی که تنشی حدود ۳۴۵ مگا پاسکال بر سطح مدل آلومینیومی اعمال شود، عمق نفوذ پلاستیک، کل ضخامت مدل خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود در صورت وارد شدن تنشی بیشتر از ۳۳۰ مگا پاسکال بر سطح قطعات از جنس فولاد ASTM A36، قطعه وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و همچنان که تنش بیشتری اعمال شود، نفوذ پلاستیک نیز افزایش می‌یابد که با اعمال تنشی در حدود ۴۴۰ مگا پاسکال، عمق نفوذ پلاستیک به صورت کل ضخامت مدل فولادی خواهد بود.



شکل ۸- تغییرات نفوذ پلاستیک با افزایش بزرگ‌ترین تنش وارد شده بر سطح آلومینیوم 6061-T6 و فولاد ASTM A36

همان‌طور که گفته شد، روابط نهایی توزیع تنش پسماند عرضی با قرار دادن رابطه (۲۸) در روابط (۲۵) و (۲۶) به

و در محدوده الاستیک از رابطه (۲۶)،

$$\sigma_y^{re} = \left(\frac{8}{3} \cdot \frac{2\sigma_y^m - 3\sigma_s}{\left(1 + 4\left(\frac{g}{h}\right) + 4\left(\frac{g}{h}\right)^2\right)} \cdot \frac{g}{h} + \sigma_s - \frac{2}{3}\sigma_y^m \right) + \left(\frac{8}{3} \cdot \frac{2\sigma_y^m - 3\sigma_s}{\left(1 + 4\left(\frac{g}{h}\right) + 4\left(\frac{g}{h}\right)^2\right)} + \frac{4}{5}\sigma_y^m \right) \cdot \frac{z'}{h}$$

$$(-g \leq z' \leq h/2) \quad (26)$$

به دست می‌آید. اما وجود پارامتر بزرگ‌ترین تنش اعمال شده روی سطح (σ_y^m) مانع از به دست آوردن مقادیر تنش پسماند می‌شود. با توجه به اینکه با افزایش تنش اعمال شده بر سطح، مقدار نفوذ پلاستیک افزایش می‌یابد، برای حذف σ_y^m از رابطه تنش پسماند، یک رابطه مستقل بین بزرگ‌ترین تنش اعمال شده روی سطح و نفوذ پلاستیک باید به دست آورد.

تنش‌های الاستیک و پلاستیکی که در سطح مقطع مدل وجود دارند، سبب ایجاد ممان خمشی می‌شوند که از رابطه (۲۷) به دست می‌آید:

$$M = L \int_{-\frac{h}{2}}^{-g} \sigma_s z' dz' + L \int_{-g}^{\frac{h}{2}} \sigma_y^e z' dz' \quad (27)$$

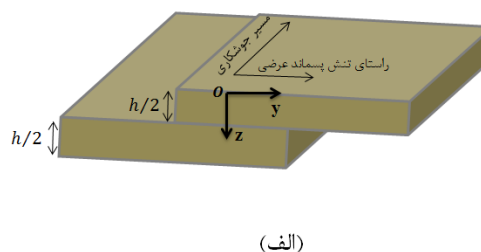
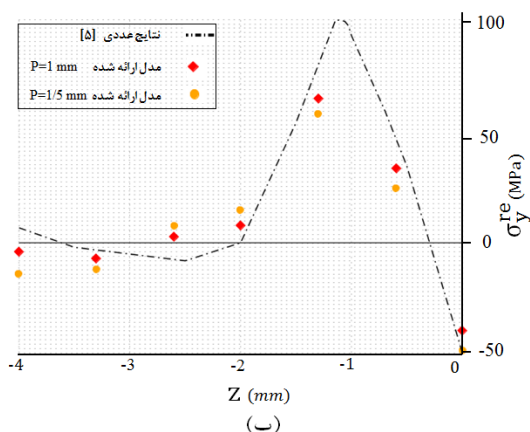
ممان خمشی ایجاد شده در ناحیه‌های الاستیک و پلاستیک، برابر ممان حاصل از پروفیل تنش است که از رابطه (۱۲) به دست آمد. با مساوی قرار دادن این دو ممان و ساده‌سازی، رابطه (۲۸) به دست می‌آید:

$$\sigma_y^m = \frac{15(g-h)\sigma_s}{10g-13h} \quad (28)$$

با جایگذاری رابطه (۲۸) در روابط (۲۵) و (۲۶)، پارامتر حذف شده و روابط نهایی توزیع تنش پسماند در محدوده پلاستیک و الاستیک به دست می‌آید.

۴- نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل ۲ نیز نشان داده شد، ابعاد و شرایط قطعات جوشکاری شده شامل، دو قطعه به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۲ (ابعاد به میلی‌متر) است که به صورت لبه روی هم قرار گرفته و با استفاده از جوشکاری لیزری به همدیگر متصل می‌شوند. با توجه به نتایج مدل‌سازی الاستیک-



شکل ۹- الف) تعریف راستای اثر تنش پسماند عرضی بر مدل و راستای محاسبه تنش پسماند (z) ب) توزیع تنش پسماند عرضی در راستای ضخامت برای آلومینیوم 6061-T6

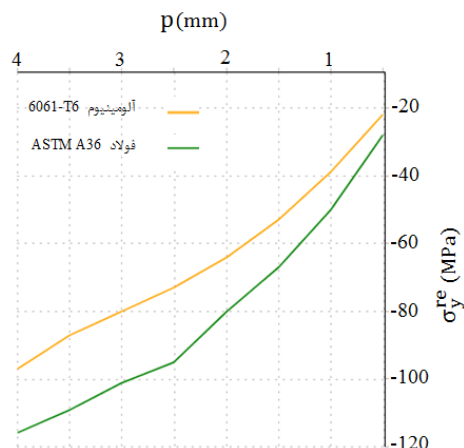
مدل محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین مقادیر تنش پسماند در ناحیه نزدیک به سطح مدل (ناحیه پلاستیک) ایجاد می‌شود. موقعیت بزرگ‌ترین مقدار تنش پسماند در مرز بین ناحیه پلاستیک و الاستیک بوده و از این قسمت به سمت ناحیه‌های پایین‌تر قطعه، تنش پسماند به شدت کاهش یافته و در سطوح پایین حدود صفر است؛ همچنین ملاحظه می‌شود که در سطح بالایی تنش پسماند عرضی، فشاری بوده و در ناحیه پلاستیک کششی می‌شود.

در شکل ۱۰، تغییرات تنش پسماند عرضی روی سطح با افزایش عمق نفوذ پلاستیک برای آلومینیوم 6061-T6 و فولاد ASTM A36 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تنش پسماند عرضی روی سطح همواره به صورت تنش فشاری بر قطعات جوشکاری شده وارد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نفوذ پلاستیک، تنش پسماند در سطح نیز افزایش می‌یابد و در صورتی که قطعات جوشکاری شده به طور کامل تسلیم پلاستیک شوند، $(p = h)$ بیش‌ترین مقدار تنش پسماند ایجاد می‌شود. با توجه به بالاتر بودن تنش تسلیم فولاد نسبت به آلومینیوم، در شرایط نفوذ پلاستیک یکسان تنش پسماند ایجاد شده در قطعه فولادی بیشتر از آلومینیوم است.

دست می‌آیند. نتایج به دست آمده از توزیع تنش پسماند در این تحقیق، با نتایج عددی ارائه شده توسط مورایتیس و لیباس [۵] مقایسه می‌شود. جنس، ابعاد و شرایط جوشکاری در هر دو تحلیل، یکسان است. هم در این تحلیل و هم در نمونه عددی دو قطعه به ابعاد $150 \times 150 \times 2$ (ابعاد به میلی‌متر) می‌باشند که از جنس آلومینیوم 6061-T6 بوده، به صورت لبه روی هم، جوش خورده‌اند. شکل ۹-الف نشان‌دهنده راستای اثر تنش پسماند عرضی در قطعات جوشکاری شده و همچنین راستای محاسبه تنش پسماند است. نتایج تحلیلی توزیع تنش پسماند عرضی در راستای ضخامت مدل در شکل ۹-ب نشان داده شده است. نتایج عددی نیز، در همان شکل نشان داده شده است. با استفاده از روابط به دست آمده از مدل‌سازی الاستیک-پلاستیک، تنش پسماند عرضی در راستای ضخامت برای دو حالت نفوذ پلاستیک‌های ۱ و $1/5$ میلی‌متر محاسبه شده‌اند که به ترتیب، با علائم (\bullet) و (\circ) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در روابط ارائه شده برای توزیع تنش پسماند پارامتر ضخامت با z' بیان شده است، بنابراین در محاسبه تنش پسماند در صورتی که در روابط $z' = -h/2$ قرار دهیم، این به معنای همان سطح بالایی مدل است، یعنی موقعیت $z = 0$ برای مشخص کردن تنش پسماند سایر نقاط نیز به همین ترتیب عمل می‌کنیم (شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه شود). همان‌طور که در شکل ۹-ب ملاحظه می‌شود، با استفاده از نتایج تحلیلی تنش پسماند در چند نقطه تصادفی از ضخامت

۶- فهرست علائم

ضخامت ورقه، m	$h/2$
پارامتر توزیع پرتو لیزر، بدون بعد	f
توان اشعه لیزر، W	Q
شعاع اشعه لیزر، m	r_0
شعاع جریان، m	r
توزیع منبع گرمایی سطحی اشعه لیزر، W/m^2	$q(s)$
توزیع منبع گرمایی حجمی اشعه لیزر، W/m^3	q_v
ضریب تمرکز منبع گرما، $1/m^2$	k
توان منبع گرمایی، $1/m$	K_z
عمق نفوذ منبع گرمایی، m	s
تابع هیپوساید	$u(z-s)$
حداکثر گرمای وارده بر حجم، W/m^3	$q_v \max$
تنش در حوضچه مذاب، MPa	σ_y^n
بزرگ‌ترین تنش وارد شده روی سطح، MPa	σ_y^m
تنش نرمال یکنواخت، MPa	σ_y^{n1}
ممان خمشی، N.m	M
نصف طول خط جوش، m	L
تنش خمشی، MPa	σ_y^{n2}
ممان اینرسی حول تار خنثی، m^4	I_x
تنش نرمال کل، MPa	σ_y^h
نفوذ پلاستیک، m	p
تنش الاستیک، MPa	σ_y^e
شیب خط الاستیک، W/m^3	m
تنش تسلیم، MPa	σ_s
فاصله از وسط قطعه تا نقطه تسلیم، m	g
تنش پسماند عرضی، MPa	σ_y^r



شکل ۱۰- تغییرات تنش پسماند عرضی روی سطح با افزایش نفوذ پلاستیک در آلومینیوم 6061-T6 و فولاد ASTM A36

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با ارائه یک مدل جدید بر مبنای نظریه الاستیک-پلاستیک توزیع تنش پسماند عرضی در راستای ضخامت دو قطعه نازک به دست آمد که به صورت لبه روی هم با اشعه لیزر جوش خورده بودند. با بررسی روابط به دست آمده ملاحظه شد، در صورتی که بزرگ‌ترین تنش وارد شده بر سطح بیشتر از تنش تسلیم ماده باشد، قطعه وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و همچنین ملاحظه شد که با افزایش تنش اعمال شده در سطح، عمق نفوذ پلاستیک نیز بیشتر می‌شود. با توجه به کاربرد وسیع آلیاژهای آلومینیوم و جوشکاری لیزری در ساخت بدنه هواپیما و سازه‌های هوافضا، توزیع تنش پسماند بر روی قطعات آلومینیوم 6061-T6 بررسی گردیده و با نتایج عددی مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که بیش‌ترین مقادیر تنش پسماند در ناحیه پلاستیک ایجاد می‌شود. همچنین ملاحظه شد، تنش پسماند عرضی در سطح مدل به صورت تنش فشاری بوده، حداکثر مقدار تنش پسماند در مرز ناحیه الاستیک-پلاستیک بر قطعه وارد می‌شود. با استفاده از روابط به دست آمده تأثیر افزایش عمق نفوذ پلاستیک بر تنش پسماند عرضی روی سطح بالایی قطعات آلومینیوم 6061-T6 و فولاد ASTM A36 بررسی شد و مشاهده شد که با افزایش نفوذ پلاستیک، مقدار تنش پسماند روی سطح نیز بیشتر می‌شود.

- ۷- مراجع
- [6] Ranatowski E, Ciecacki K (2010) Mathematical modelling of laser welding in shipbuilding. *Sci J* 24(96): 80-87.
- [7] Ranatowski E (2010) Problems of welding in shipbuilding. Part I: Theoretical basis of modelling and an analytical assessment of heat sources models. *Pol Marit Res* 1(64): 75-79.
- [8] Lee H, Wu Jia (2009) Correlation between corrosion resistance properties and thermal cycles experienced by gas tungsten arc welding and laser beam welding Alloy 690 butt weldments. *Corros Sci* 51:733-743.
- [9] Yang L, Xiao Z (1995). Elastic-plastic modelling of the residual stress caused by welding. *J Mater Process Tech* 48: 589-601.
- [10] Zimmerman J, Wlosinski W, Lindemann Z (2009) Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic-metal friction welding. *J Mater Process Tech* 209: 644-653.
- [11] Kong F, Ma J, Kovacevic R (2011) Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process. *J Mater Process Tech* 211: 1102-1111.
- [1] Labeas G, Diamantakos I (2013) Laser beam welding residual stresses of cracked T-joints. *Theor Appl Fract Mec* 63-64: 69-76.
- [2] Zain-ul-abdein M, Daniel N, Jullien J, Deloison D (2010) Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4. *Mater Sci Eng A* 527: 3025-3039.
- [3] Schubert E, Klassen M, Zerner I, Walz C, Sepold G (2001) Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. *J Mater Process Tech* 115: 2-8.
- [4] Yang Z, Tao W, Li L, Chen Y, Li F, Zhang Y (2012) Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: process, microstructure, and mechanical properties. *Mater Design* 33: 652-658.
- [5] Moraitis G, Labeas G (2008) Residual stress and distortion calculation of laser beam welding for aluminum lap joints. *J Mater Process Tech* 198: 260-269.