

الگوریتم پایداری حفره کلیدی در پردازش لیزری سطوح

رضا فایض

پژوهشکده لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

عطاله کوهیان*

دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

این تحقیق، بر پایه تعادل فشار و موازنه انرژی روی دیواره حفره حاصل از تابش پرتو لیزر بر فصل مشترک دو سطح فلزی همانند، الگوریتمی برای تعیین پروفایل دمائی در حوضچه جوش و در فاز پلاسمای درون حفره ارائه می‌شود. معادلات انتقال حرارت، بر اساس داده های ترموفیزیکی فلز مورد نظر (فولاد) و بادر نظر گرفتن مفروضات معرفی شده، برای فازهای مایع و پلاسما، در چهار چوب روش تفاضل محدود حل شده اند. این محاسبات به تحقیق درسیمای هندسی ساختار حفره منتهی می شود که بصورت نمودارهای مربوط به جوش لیزری صفحات فولادی با استفاده از لیزر CO_2 و با توان های ۴ و ۱۰ کیلووات شبیه سازی شده اند.

واژگان کلیدی: حفره کلیدی، لیزر، پلاسما، الگوریتم

مقدمه

در فرآیند جوش لیزری، پرتوی تک فام و همدوس با شدت قابل ملاحظه بر نقطه ای از فصل مشترک دو سطح فلزی فرود آمده و منجر به ذوب و تبخیر لحظه ای در آن نقطه می شود. این فرایند به تشکیل حفره ای درون حوضچه مذاب، موسوم به حفره کلیدی منجر می شود که امکان نفوذ توان خروجی لیزر به لایه های عمیق تر را

* عهده دار مکاتبات

فراهم می‌کند. در عین حال، فرو ریزش مذاب به درون حفره کلیدی، چنین فرایندی را نا پایدار می‌سازد. در واقع، جوش لیزری به دلیل متغیرهایی متعدد نظیر افت و خیز در توان لیزر، آثار تداخلی پلاسمای درون حفره، و دینامیک شاره (مذاب) پیرامون آن، فرایندی ناپایدار است و در واقع توازن بین نیروهایی که حفره کلیدی را می‌گشایند (فشار ناشی از تبخیر لحظه ای و فشار حاصل از پرتو لیزر) و نیروهایی که در خلاف جهت و برای انسداد حفره به دیواره آن وارد می‌شوند (تنش سطحی مذاب و فشارهای هیدروستاتیک و هیدرو دینامیک) ماهیت فیزیکی این فرایند غیر تعادلی را آشکار می‌سازد. فشار تابش در مقایسه با فشار تبخیر (و یا لایه فرسایشی) قابل صرف نظر است، همچنین فشارهای هیدرواستاتیکی و هیدرو دینامیکی (در سرعت های پایین جوش لیزری) در برابر تنش سطحی مذاب جزئی محسوب می‌شوند. بنابراین موازنه نیروها در شرایط شبه پایدار، عملاً به تعادل فشار لایه فرسایشی و تنش سطحی در هر نقطه (Z, r) از دیواره حفره کلیدی تقلیل می‌یابد.

مدل های محاسباتی اولیه، بدلیل پائین بودن توان خروجی لیزر، عموماً مبتنی بر تحلیل حوضچه جوش بودند^(۱) اما با افزایش توان لیزرهای صنعتی و عمق نفوذ پرتو لیزر، مفهوم حفره کلیدی و تحقیق در سیمای هندسی آن در تجربه های جوش، برش لیزری مد نظر قرار گرفت و بنابر این مدل های محاسباتی متناظر به گونه ای طراحی شدند که به اثرات تبخیر و تشکیل حفره کلیدی توجه بیشتری می نمودند.^(۲-۳)

در این مقاله مدل جوش لیزری عمیق و ساختار هندسی حفره کلیدی از طریق برقراری موازنه صحیحی

برای انرژی و فشار مورد بررسی قرار گرفته است. هدف در این مدل این است که تمام کمیت های دخیل در جوش لیزری فلزات را بصورت همزمان با یکدیگر مرتبط و با تقریب های مناسب مدلی را برای محاسبه پارامترها در فرایند لیزری ارائه دهد.

الگوی ریاضی برای انتقال حرارت در فرایند جوش لیزری

در این مدل، مبدا مختصات چپگرد دکارتی در کانون حفره کلیدی، به عنوان نقطه ای از فصل مشترک دو سطح فلزی همانند قرار دارد و جابجایی نسبی پرتو فرودی و قطعه کار، به معنی سرعت فرایند جوش، در جهت مثبت محور X ها صورت می گیرد. بنابراین پرتو لیزر در راستای محور Z و در جهت مثبت این محور است. صورت بندی معادلات انتقال حرارت بر پایه مفروضات زیر شکل گرفته است:

I - فرایند جوش لیزری ایستامان است؛

II - ویژگی های ترموفیزیکی فازهای مایع و جامد یکسان و مستقل از دماست؛

III - درفاز بخار (پلازما) ویژگی های ترموفیزیکی و خواص اپتیکی وابسته به دماست؛

IV - گرادیان محوری حالت مذاب و پلازما ثابت است؛

V - سازوکارهای جذب پرتو لیزر به جذب فرنل در دیواره حفره کلیدی و فرایند جذب برامشتر لونگ معکوس^(۱) درفاز پلازما محدود است؛

VI - فشار گاز درون حفره ثابت در نظر گرفته می شود و از تغییرات آن در عمق حفره صرف نظر می شود.^(۷)

بر پایه این مفروضات، معادله فوریه برای انتقال حرارت در فاز مایع به صورت زیر ساده می شود:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

که در آن $\frac{\partial x}{\partial t} = u = cte$ سرعت فرآیند جوش و $\alpha = k / \rho c_p$ ضریب پخش حرارتی در فاز مایع است.

در فاز پلاسما، فرض III به یک معادله انتقال حرارت غیرخطی منجر می شود که با توجه به اینکه:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} = \frac{\partial T^*}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \text{ و } \frac{\partial k^*}{\partial t} = \frac{\partial k^*}{\partial T^*} \frac{\partial T^*}{\partial t} \quad (2)$$

و بادر نظر گرفتن فرض IV به شکل زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \alpha^* \left[\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} \right] + \beta^* \left[\frac{dk^*}{dT^*} \right] \left[\left[\frac{\partial T^*}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial T^*}{\partial y} \right]^2 + (G^*)^2 \right] + \beta^* q \quad (3)$$

در این معادله پارامترهای ستاره دار به فاز پلاسما تعلق دارند، α^* ضریب پخش حرارتی، β^* نسبت ضریب پخش حرارتی به ضریب هدایت حرارتی و q چگالی شارش گرمایی ناشی از مکانیسم های جذب پرتوی لیزر در این فاز است. بنا براین مساله انتقال حرارت در فرآیند جوش لیزری به یک مدل بر پایه معادلات مشتقات جزئی ۱ و ۳ و شرایط مرزی حاکم بر این معادلات، منتهی می شود. این معادلات در چهار چوب روش تفاضل محدود به صورت زیر بیان می شوند:

$$T_{m,n} = \frac{1}{4} \left\{ [T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}] + \frac{1}{2} \Delta x \frac{u}{\alpha} [T_{m-1,n} - T_{m+1,n}] \right\} \quad (4)$$

که در آن $T_{m,n}$ دمای هر نقطه از فاز مایع (مذاب) شبکه بندی شده ای با گام های $\Delta x = \Delta y$ را به دست می دهد. به نحو مشابهی برای فاز بخار (پلاسما) نیز خواهیم داشت:

$$T_{m,n}^* = \frac{1}{4} [T_{m+1,n}^* + T_{m-1,n}^* + T_{m,n+1}^* + T_{m,n-1}^*] - \frac{1}{8} \frac{u}{\alpha^*} (\Delta x) [T_{m+1,n}^* - T_{m-1,n}^*] + \frac{1}{16} \frac{1}{k^*} \left[\frac{dk^*}{dT} \right]^* \left[(T_{m+1,n}^* - T_{m-1,n}^*) + (T_{m,n+1}^* - T_{m,n-1}^*) + 4(\Delta x)^2 G_1^{*2} \right] + \frac{1}{4} \frac{1}{k^*} (\Delta x)^2 q. \quad (5)$$

معادلات فوق (۵ و ۴) معادلات دیفرانسیل اصلی هستند که باید در محاسبات کامپیوتری مورد استفاده قرار گیرند. صورت این معادلات نهائی، همانطوریکه انتظار می رود، نسبتاً پیچیده است هر چند که سرعت فرآیند جوش یکنواخت و گام های Δx و Δy برابر گرفته شده اند.

معادله ۵ به تعیین دما در هر نقطه از فاز پلاسمای شبکه بندی شده (بافرض گام های برابر)، یعنی $T^*_{m,n}$ ، به عنوان تابعی از ویژگی های متغیر ترموفیزیکی پلازما، چگالی شارش گرما $q[W.m^{-3}]$ ، گرادیان دمائی محوری مفروض در این فاز G^* منتهی می شود.

علاوه بر آن برانگیختگی های دمائی الکترون ها و یون ها در نزدیکی دیواره حفره کلیدی بعلت ترکیب مجدد، به شدت کاهش می یابد و این فرایند به ظهور گرادیان شعاعی بزرگی $(\partial T / \partial r)$ در این ساختار می انجامد که در معادلات (۱) و (۳) تأثیر خود را نشان می دهند. از طرف دیگر، بخشی از توان پرتو فرودی صرف فرآیند لایه فرسایشی میشود که به عنوان تابعی از چگالی عددی (n_λ) و سرعت شبه ماکسولی (\bar{u}_λ) بخار یونیده در لایه مرزی موسوم به ناد سن Knudsen Layer، به صورت زیر: ^(۷)

$$k^* \vec{\nabla} T^* - q_{vap} \Big|_\lambda = k \vec{\nabla} T \Big|_\lambda \quad (6)$$

به شرایط مرزی حاکم بر معادله انتقال حرارت افزوده می شود. در این روابط \mathbf{k}^* و \mathbf{k} به ترتیب ضریب هدایت حرارتی فازهای مایع و پلازما تعریف می شوند. q_{vap} اتلاف سطحی انرژی $[W.m^{-3}]$ به دلیل لایه فرسایشی است.

این مسئله شامل حل سامان های از معادلات ۱ و ۳ بر پایه شرایط مرزی است. توابع مستقل و مجهول این مسئله توزیع دما در فصل مشترک جامد-مایع $T(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ و در فاز پلازما $T^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ و همچنین تابع $\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0$ برای دیواره یا مرز حفره کلیدی است. اتلاف ناشی از لایه فرسایشی در لایه نادسن در همسایگی مرز مایع پلازما $q_{vap}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ بات منبع گرمایی $q(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ که به ترتیب در شرایط مرزی (معادله ۶) و در معادله انتقال حرارت (۳) ظاهر شده اند باید مورد محاسبه قرار گیرند. به عبارت دیگر حل معادلات انتقال حرارت در فاز پلازما مبتنی بر محاسبه q و چگالی شارش گرما است. بنا براین وبا توجه به اینکه پارامترهای مسئله به یکدیگر وابسته اند الگوریتم مربوط به آن باید به صورت دور تکرار های خود سازگار تنظیم شود. عبارت منبع گرمایی q عمدتاً به سازکارهای جذب بستگی دارد و عبارت q به خود ویژگی های لایه نادسن یعنی چگالی عددی فاز پلازما و سرعت جنبش یونی در این لایه وابسته است. ^(۸) ضمناً در محاسبات باید در نظر داشت که چگالی عددی گاز حاصل از تبخیر لحظه ای به نوعی تابع عدد ماخ بوده که این عدد به نوبه خود به دما در لایه مرزی ناد سن بستگی دارد. بنابراین با فرض یک مقدار معقول $(0.5 \leq Ma < 1.0)$ ، با توجه به اینکه $Ma > 1$ به ظهور امواج تکانشی (Shock) می انجامد که پایداری ساختار حفره را شدیداً تحت تأثیر قرار می دهد، به عنوان مقدار اولیه می توان چرخه تکراری محاسبه را به کار انداخت به نحوی که Ma در دوره های بعدی مجدداً محاسبه و تصحیح گردد.

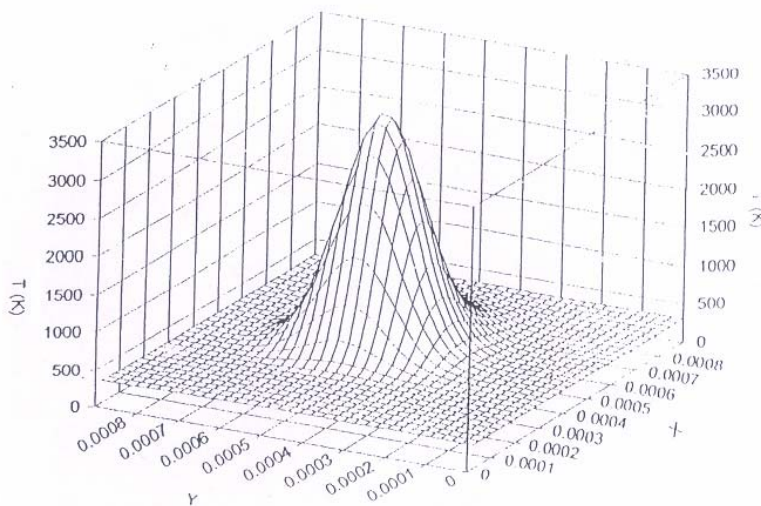
نتایج و بحث

مدل ارائه شده در این مقاله بر پایه مفروضات I-VI و بادر نظر گرفتن شرایط مرزی (رابطه ۶) برای حل معادلات انتقال حرارت در فاز های مایع و پلازما شکل گرفته است. در این مدل پایداری هندسه حفره

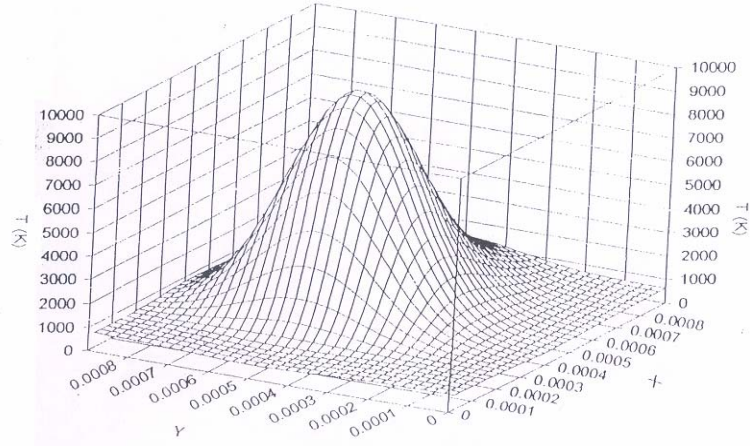
کلیدی $\lambda(x, y, z) = 0$ ، با تقریب مناسبی به تعادل فشار روی دیواره حفره و در لایه مرزی ناسن بستگی دارد. فرایند محاسبات بر پایه یک چرخه تکرار پذیر روی گرادیان دمایی در فاز مایع و پلاسما و طبعا با تخمین مقادیر اولیه برای آنها تا نیل به همگرایی و توازن نیروها و تشکیل یک حفره کلیدی پایدار انجام می گیرد.

نتیجه گیری

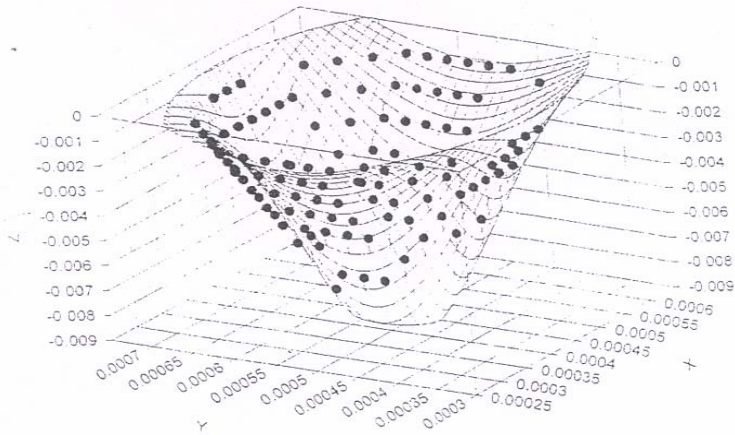
نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده به صورت پروفایل هایی برای توزیع دما در قطعه کار در سطوح بالا و پائین حفره کلیدی (شکل های ۱ و ۲) و سیمای هندسی حفره کلیدی مربوط به پرتو لیزر CO₂ با توانهای ۴KW و ۱۰KW و سرعت ۶ m/min در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



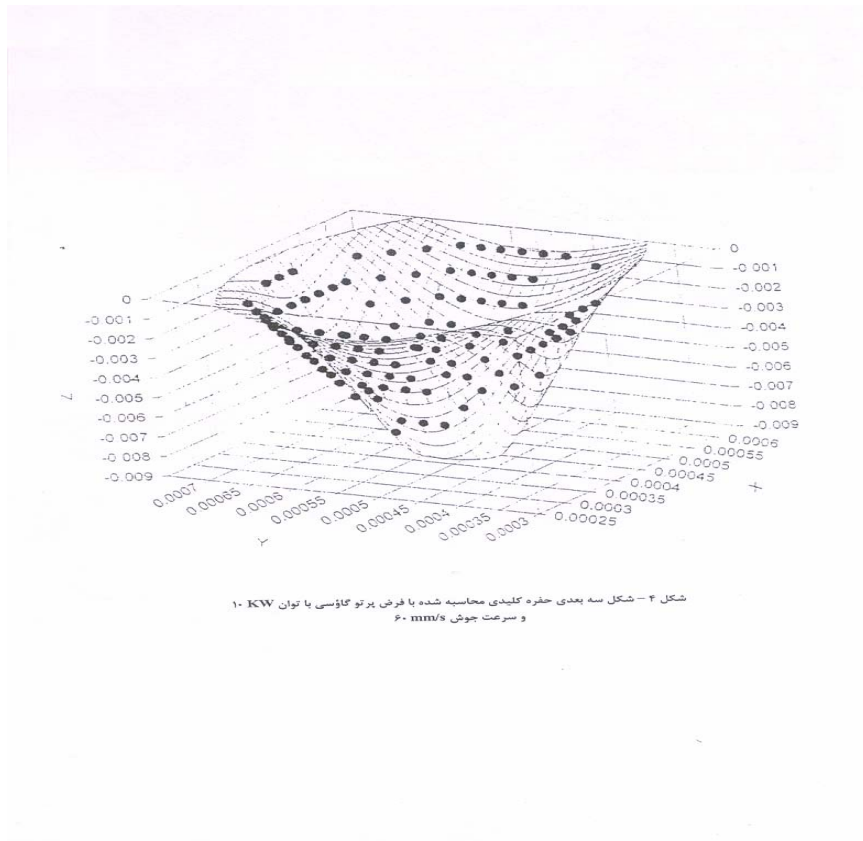
شکل ۱- توزیع دما در قطعه کار در سطح پائینی حفره کلیدی



شکل ۲- توزیع دما در قلمبه کار در سنج بالایی حفره کلیدی



شکل ۳- شکل سه بعدی حفره کلیدی محاسبه شده با فرض پرتو گاوسی با توان ۶ KW و سرعت جوش ۶ m/min



در این نمودارها مشاهده می شود که عمق جوش با توان لیزر نسبت مستقیم و با سرعت جوش نسبت معکوس دارد. الگوریتم ارائه شده قادر است شرایط بهینه از جمله سرعت فریند جوش را برای لیزرهای گوناگون با توانهای خروجی متفاوت و انواع فلزات با ضخامت های مختلف را ارائه دهد. این نتایج با مدل ریاضی برای جوش عمیق لیزری و مدل جوش عمیق بر اساس پروفیل حفره کلیدی^(۹) سازگاری مطلوبی دارند.

References:

1. Duley, W.W, *Laser Welding*, JohnWiley and Sons, NY (1999)
2. Andrews, J.G., and Atthey, D.R., *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, **9**, 2181 (1976)
3. Kross, J., and Gratzke, U., *J. Phys.D (Appl. Phys.)*, **26**, 474 (1993)
4. Kaplan, A., *J. phys. D (Appl. Phys.)*, **27**, 1805 (1994)
5. Dowden, J.M, and Kapadia, P.D., *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, **28**, 2252 (1995)
6. Vladimir, V.S., *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, **32**, L61 (1999)
7. Solana, P., and Ocana, J.L., *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, **30**, 1300 (1997)
8. Finke, B.R, and Kapadia, P.D., Dowden, J.M., *J. Phys. D (Appl. Phys.)*, **23**, 643 (1990)
9. Ocana, J.L., Molpeceres, C., and Gamaz, M.L., *Procc. SPIE.* , 1810, 566(1992)