

# بررسی پارامترهای موثر بر دمش گاز محافظ در جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG

مصطفی جوکار\*<sup>۱</sup>، فرشید مالک قاینی<sup>۲</sup>، محمد جواد ترکمنی<sup>۳</sup>، حسین جغتایی<sup>۴</sup> و محمد صفا عین الدین<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد، شرکت مناطق نفتخیز جنوب، اداره بازرسی فنی و خوردگی فلزات، اهواز، ایران

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید عباسپور، گروه مهندسی مکانیک، تهران، ایران

\*m.jokar55@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۳۱)

## چکیده

در جوشکاری لیزری، گاز محافظ وظیفه حفاظت از لنزهای لیزر در برابر پراکنش مذاب، حفاظت از حوضچه مذاب در برابر اتمسفر و بهبود بازده فرآیند جوشکاری را دارد. بنابراین نحوه حفاظت مناسب از حوضچه مذاب به منظور دستیابی به جوش سالم و مطمئن بسیار مهم است. در این پژوهش، اثر تغییر نرخ جریان گاز محافظ هلیوم بر خواص حوضچه مذاب حاصل از جوشکاری فولاد ST14 با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG به روش تجربی و شبیه‌سازی بررسی شده است. نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به منظور درک بهتر اثر گاز محافظ در جوشکاری لیزری استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیر قابل ملاحظه گاز محافظ بر خواص جوش لیزر پالسی Nd:YAG است. پیش‌بینی شبیه‌سازی برای تشریح نتایج تجربی مورد استفاده قرار گرفت.

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری لیزری، لیزر Nd:YAG، گاز محافظ هلیوم، پلاسمای جوشکاری، حوضچه مذاب، دینامیک سیالات محاسباتی

## ۱- مقدمه

ب- محافظت از حوضچه مذاب و جلوگیری از اکسایش و تشکیل آخال در فلز جوش.

ج- محافظت از لنزهای نوری لیزر و خنک کردن آن‌ها.

می‌توان گفت که گاز محافظ دارای یک وظیفه مکانیکی (پراکنده کردن بخارات و پلاسمای تشکیل شده) و شیمیایی

(محافظت از حوضچه مذاب) است. مهمترین متغیرهای مربوط به

گاز محافظ یکی از عوامل موثر بر مشخصات جوش تولیدی در جوشکاری لیزری است. در جوشکاری لیزری معمولاً یک گاز محافظ با استفاده از نازل‌های هم محور یا جانبی برای برآورده ساختن اهداف زیر به منطقه جوش دمیده می‌شود [۱-۴]:

الف- پراکنده کردن بخارات و پلاسمای تشکیل شده در بالای حوضچه جوش.

محافظ در جوشکاری فولاد کم کربن ST14 با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

از ورق فولاد کم کربن با ضخامت ۲ mm با ترکیب مندرج در جدول (۱) به عنوان قطعه کار جوشکاری استفاده شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (بر حسب درصد وزنی)

عنصر	S	P	Mn	C	Fe
درصد وزنی	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۲۲	۰/۰۵	پایه

از دستگاه لیزر Nd:YAG پالسی، مدل IQL-10 با حداکثر توان متوسط ۴۰۰ وات و پالس‌های خروجی مربعی شکل به منظور جوشکاری و از یک سامانه متمرکز کننده با فاصله کانونی mm ۷۵ جهت متمرکز نمودن پرتو لیزر استفاده شده است. حداقل قطر لکه لیزر قابل دستیابی در این دستگاه لیزر ۲۵۰ میکرومتر است. از توان سنج مدل 5000W-LP و ژول سنج مدل LA300W-LP ساخت شرکت OPHIR برای اندازه‌گیری توان و انرژی پالس لیزر استفاده شد. برای نگهداری و جلوگیری از جابجایی احتمالی نمونه‌ها در حین جوشکاری از یک نگه‌دارنده مخصوص استفاده شد. همچنین یک میز با امکان جابجایی در سه جهت X، Y و Z با دقت ۰/۰۵ mm به منظور حرکت قطعه کار با سرعت مورد نظر در زیر نقطه تمرکز باریکه لیزر که ثابت است، مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری نرخ جریان گاز از جریان‌سنج‌های معروف به Rotameter ساخت شرکت Officine Orobiche استفاده شد. متغیرهای جوشکاری در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): متغیرهای جوشکاری

شناسه نمونه	نرخ جریان گاز محافظ (Lit/min)	سرعت جوشکاری (mm/s)	توان متوسط (W)	عرض پالس (ms)	فرکانس (Hz)
A	۲۰	۴	۲۲۰	۷	۲۰
B	۶۰	۴	۲۲۰	۷	۲۰
C	۸۰	۴	۲۲۰	۷	۲۰
D	۱۰۰	۴	۲۲۰	۷	۲۰

گاز محافظ که می‌تواند بر روی مشخصات جوش تأثیر بگذارد عبارتند از:

الف- ترکیب گاز محافظ. ب- نرخ جریان گاز محافظ. ت- مشخصات هندسی نازل گاز محافظ.

تا به حال تحقیقات بسیاری در زمینه اثر گاز محافظ در جوشکاری لیزری انجام شده است. به عنوان مثال در تحقیقات که در آن لیزر با استفاده از تقویت نور در گاز دی‌اکسید کربن تولید شده بود، اثر تغییر نرخ جریان و زاویه نازل بر مشخصات جوش و پلاسما [۹-۵] بررسی و مشاهده شد. با افزایش زاویه نازل عمق جوش افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش نرخ جریان گاز محافظ، ضریب جذب و دمای پلاسما کاهش می‌یابد.

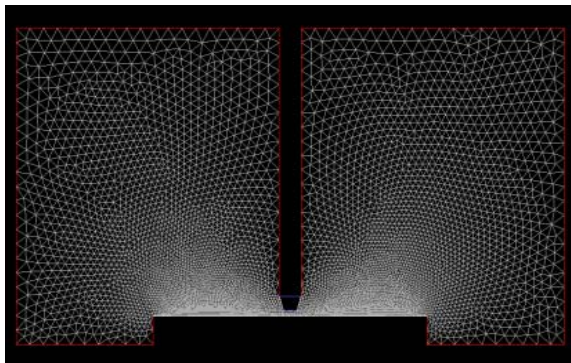
در جوشکاری لیزری عموماً از گازهای نجیب آرگون و هلیوم به عنوان گاز محافظ استفاده می‌شود. خواص مکانیکی و عمق نفوذ جوش حاصل از گاز هلیوم مناسب‌تر از گاز آرگون است [۱۰-۱۱]. همچنین تحقیقاتی در زمینه استفاده از گازهای فعال در ترکیب گاز محافظ به منظور کاهش هزینه‌های تولید و بهبود خواص مکانیکی انجام شده است [۱۰-۱۱]. استفاده از گاز دی‌اکسید کربن به عنوان گاز محافظ، به علت ایجاد تخلخل در جوش موجب افت خواص مکانیکی جوش می‌گردد [۱۰]. گزارش شده است که استفاده از ترکیب ۵۰ درصد نیتروژن به علاوه ۵۰ درصد آرگون در گاز محافظ موجب ایجاد جوش با خواص مکانیکی قابل قبول می‌شود، از طرفی استفاده از نیتروژن موجب کاهش هزینه‌های تولید می‌گردد [۱۱].

نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزاری قوی برای شبیه‌سازی سیستم‌های سیال است. به دلیل پیچیدگی‌های موجود در واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی حاکم بر منطقه برهم‌کنش بین پرتو لیزر و ابر پلاسما، تا به حال بررسی‌های کمی به منظور شبیه‌سازی اثر گاز محافظ در جوشکاری لیزری انجام شده است [۱۲].

این پژوهش متمرکز بر استفاده از نرم افزار CFD به منظور بررسی اثر گاز محافظ بر نحوه محافظت از حوضچه مذاب است. همچنین نتایج تجربی حاصل از اثر تغییر نرخ جریان گاز

شکل (۱) قابل مشاهده است.

برای تحلیل از نرم افزار FLUENT استفاده شده و فرض گردیده است که تغییرات زمان بر فرایند اثرگذار است و فرایند در یک زمان خاص مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل (۱): مدل شبیه سازی و مش بندی آن.

در این پژوهش از نرم افزار FLUENT برای بررسی اثر گاز محافظ در جوشکاری لیزری استفاده شده است. مدل متلاطم مطابق با استاندارد دو معادله ای k-ε به شرح زیر است که تمام پارامترهای موجود در این معادلات در جدول (۳) معرفی شده است [۳]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) \quad (1)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \mu_i) \quad (2)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + P_\varepsilon + P_b - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \mu_i) \quad (3)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) (P_k + C_3 P_b) - C_2 \rho \left( \frac{\varepsilon^2}{k} \right)$$

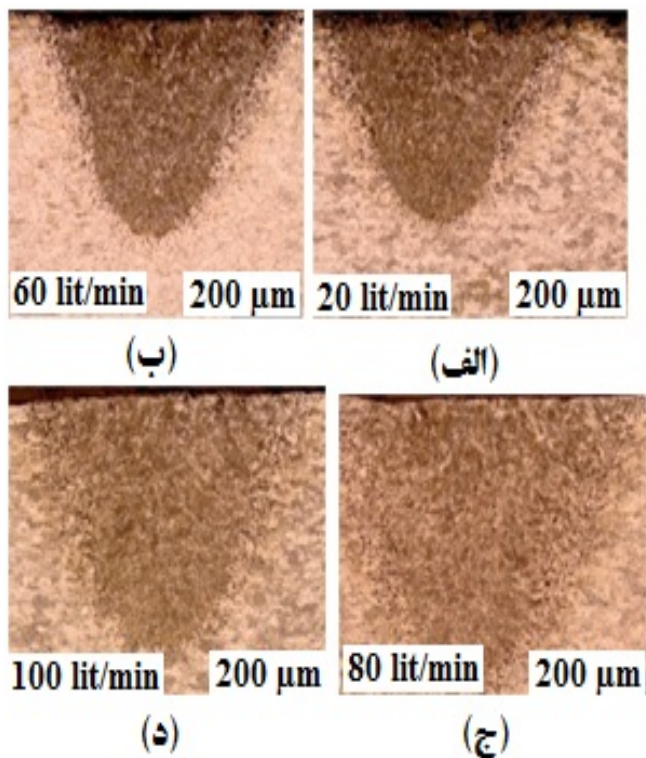
$$\mu = \rho C_\mu \left( \frac{k^2}{\varepsilon} \right), P_k = \mu S^2, P_b = \xi_i \mu / \rho P_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) p \quad (4)$$

این معادلات در مدل سازی جریان متلاطم بسیار پر کاربرد هستند. محیط جوشکاری ناحیه ای به صورت شکل (۱) است. ناحیه مورد بررسی شامل هوای آرام در دمای ۲۰ °C و فشار ۱۰<sup>۵</sup> پاسکال است. شبیه سازی این فرآیند بدون در نظر گرفتن منابع گرمایی و پلازما در شرایط شبیه سازی انجام شده است.

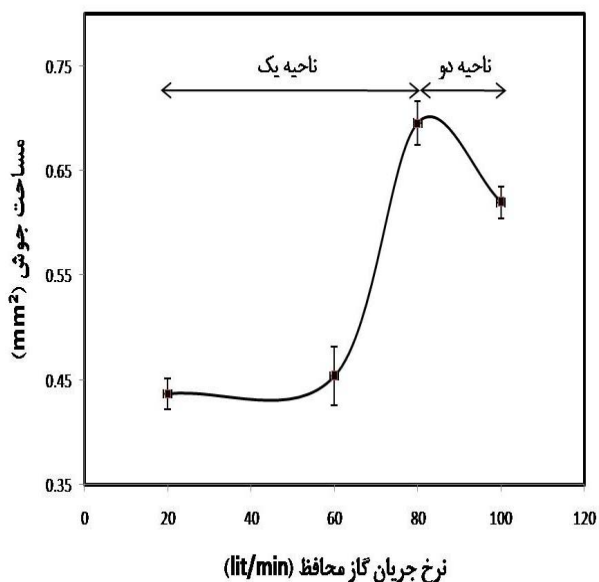
قبل از انجام فرآیند جوشکاری ابتدا نمونه ها با سنباده شماره ۱۸۰ تمیز و سپس با استون شستشو شدند. به منظور بررسی تغییرات ابعادی فلز جوش، ۳ نمونه متالوگرافی از سطح مقطع عرضی جوش انتخاب گردید و از وسط خط جوش برش داده شدند. نمونه های انتخاب شده پس از پولیش کاری و حکاکی در محلول نایتال ۳٪ با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. به منظور اندازه گیری دقیق ابعاد و مساحت ناحیه جوش از نرم افزار Image Tool استفاده شد.

## ۲-۱- روند شبیه سازی

برای مدل سازی این فرایند از نرم افزار GAMBIT استفاده شده است. هندسه مدل مطابق با شرایط آزمایش طراحی و شبیه سازی شده است. در شبیه سازی فرض شده که گاز از درون یک محفظه به داخل محیط وارد، با هوا ترکیب می شود و به یک سطح برخورد می کند. در این پژوهش تغییرات دما و انتقال حرارت سطح بررسی نشده، از این رو سطح مورد بررسی (سطح فلز پایه) به عنوان یک Rigid Body در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی محفظه ای گاز به این صورت است که محفظه از دو دیوار صلب در کناره ها و دو مرز عبور جرم در بالا و پایین، تشکیل شده است که جهت حرکت گاز از بالا به پایین می باشد. در این پژوهش سعی شده تا تقارن نسبت به محور عمودی برقرار شود و در شبیه سازی صفحه در دو بعد، از خط استفاده شده و تعریف آن به عنوان جسم صلب صورت گرفته است. در نرم افزارهای المان محدود، فقط تعداد المانها، دقت نتایج را تعیین نمی کند و حتی در مواردی زیاد بودن تعداد المانها مشکلاتی نظیر زیاد شدن زمان حل و اشغال کردن حجم زیادی از رم کامپیوتر را بوجود می آورد. به هر حال باید سعی شود تا تعداد بهینه المان انتخاب شود. در این بررسی مشاهده شد که از تعداد المان حدود ۱۲۰۰۰ نتایج حاصل از شبیه سازی نسبتا مستقل از تعداد المان است. مدل طراحی شده در این پژوهش از ۱۲۷۲۵ المان تشکیل شده است. در نرم افزار GAMBIT مرز محیط مورد نیاز باید تعریف شود که چگونگی انجام این عمل در



شکل (۲): تصویر مقطع عرضی جوش در نمونه‌های الف) A (نرخ جریان ۲۰ lit/min)، ب) B (نرخ جریان ۶۰ lit/min)، ج) C (نرخ جریان ۸۰ lit/min) و د) D (نرخ جریان ۱۰۰ lit/min).



شکل (۳): تغییرات مساحت جوش بر حسب نرخ جریان گاز محافظ

جدول (۳): پارامترهای مورد استفاده در معادله k-ε [۳]

مقادیر ثابت	پارامترها
$C_1=1/44$	انرژی جنبشی متلاطم
$C_2=1/92$	اتلاف متلاطم
$C_{\mu}=0/09$	زمان
$\sigma_k=1$	مختصات فضایی در جهت $i$
$\sigma_\epsilon=1/3$	مقدار سرعت در جهت $i$
$Pr_t=0/85$	دما
	چگالی
	ویسکوزیته
	مدول تغییرات تانسور کرنش
	شتاب جاذبه در جهت $i$

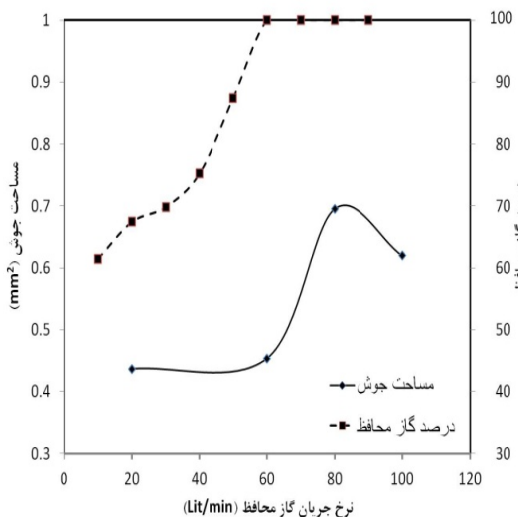
### ۳- نتایج و بحث

تصاویر مقطع عرضی جوش به دست آمده از نمونه‌های حاصل از جوشکاری با نازل هم‌محور با پرتو لیزر و با قطر ۵ میلی‌متر در شکل (۲) نمایش داده شده است. در روش جوشکاری لیزری مساحت و نسبت عمق به عرض مقطع عرضی جوش به ترتیب بیانگر حرارت جذب شده توسط قطعه کار و تمرکز پرتو لیزر است.

شکل (۳) نتایج تجربی مساحت مقطع عرضی جوش را بر حسب نرخ جریان گاز محافظ نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج تجربی، با افزایش نرخ جریان گاز محافظ، مساحت جوش (انرژی جذب شده توسط قطعه کار) حدود ۵۹ درصد افزایش یافته و در نرخ جریان ۸۰ lit/min به یک مقدار بیشینه می‌رسد (ناحیه یک) و سپس ۱۱ درصد کاهش می‌یابد (ناحیه دو).

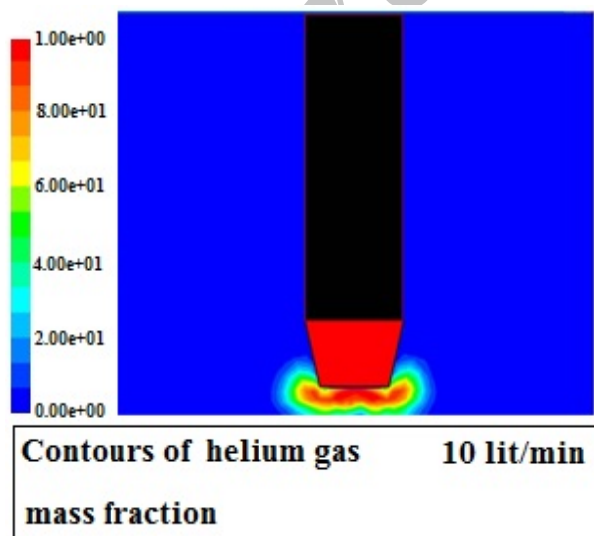
نمودار تغییرات نسبت عمق به عرض جوش بر حسب نرخ جریان گاز محافظ در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش نرخ جریان گاز محافظ، نسبت عمق به عرض جوش ۳۳ درصد افزایش و در نرخ جریان ۸۰ lit/min به یک مقدار بیشینه می‌رسد (ناحیه یک) و سپس ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (ناحیه دو).

بین نازل تا سطح فلز (ناحیه‌ای که برهم کنش بین پرتو لیزر و ذرات گازی در آن رخ می‌دهد) و نتایج تجربی مساحت مقطع عرضی جوش بر حسب نرخ جریان گاز محافظ را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود در نرخ جریان‌های بالاتر از ۶۰ lit/min ناحیه برهم کنش بین پرتو لیزر و ذرات گازی کاملاً توسط گاز محافظ پوشش داده می‌شود.

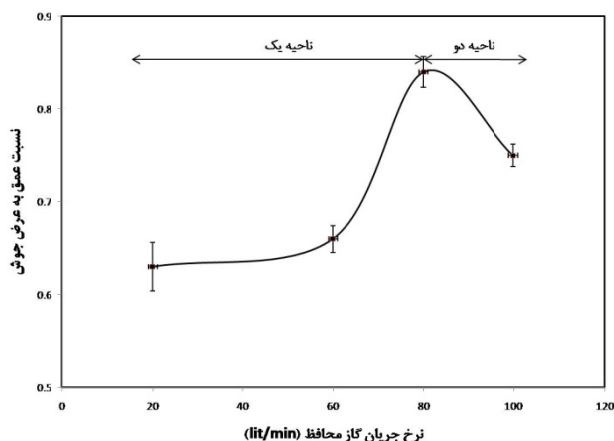


شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی درصد گاز محافظ در ناحیه برهم کنش لیزر با گاز و مساحت جوش بر حسب نرخ جریان گاز محافظ.

توزیع گاز محافظ در محیط شبیه‌سازی شده در نرخ جریان‌های ۱۰ و ۶۰ lit/min در شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شده است.

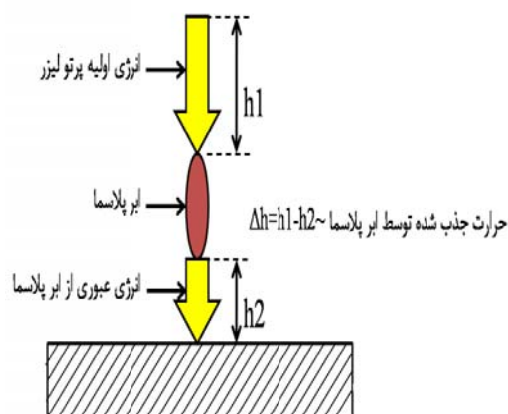


شکل (۷): توزیع گاز محافظ هلیوم در نرخ جریان ۱۰ Lit/min.



شکل (۴): تغییرات نسبت عمق به عرض جوش بر حسب نرخ جریان گاز محافظ

در حین جوشکاری لیزری، ابر پلاسما در اثر برهم کنش بین پرتو لیزر و ذرات گازی موجود (حاصل از بخارات فلز پایه و گاز محافظ) در مسیر پرتو تولید می‌شود. در شکل (۵) تشکیل ابر پلاسما به صورت شماتیک نشان داده شده است. پلاسما بخشی از انرژی پرتو لیزر را جذب می‌کند و موجب کاهش بازده جوشکاری می‌شود، از اینرو می‌توان با محاسبه درصد گاز محافظ موجود در مسیر پرتو لیزر، اثر گاز محافظ را بر انرژی عبوری از پلاسما تخمین زد.



شکل (۵): تصویر شماتیک برهم کنش پرتو لیزر با ابر پلاسما در حین جوشکاری لیزری.

شکل (۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی درصد گاز محافظ در ناحیه

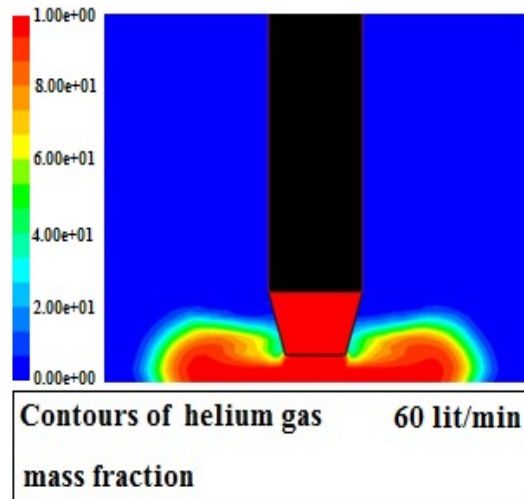


شکل (۱۰): درصد گاز محافظ موجود در مسیر پرتو لیزر در نرخ جریان ۶۰ Lit/min.

در حین جوشکاری لیزری، انرژی عبوری از ابر پلاسما با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

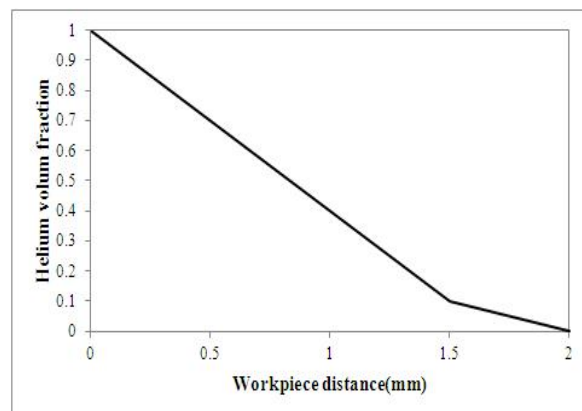
$$I = I_0 \exp(-\alpha h) \quad (5)$$

که در آن  $I(j)$  انرژی پرتو لیزر عبوری از پلاسما،  $I_0(j)$  انرژی پرتو لیزر هنگام برخورد به پلاسما،  $\alpha(l/m)$  ضریب جذب برمشرلانگ معکوس و  $h(m)$  ارتفاع پلاسما است. مشاهده شد با افزایش نرخ جریان گاز محافظ، درصد گاز محافظ در مسیر پرتو لیزر افزایش می‌یابد. افزایش گاز محافظ موجب کاهش چگالی و در نتیجه کاهش ضریب جذب پلاسما می‌شود [۹]. بنابراین می‌توان گفت در ناحیه یک از شکل (۳) (تا نرخ جریان ۸۰ lit/min) افزایش نرخ جریان گاز محافظ با کاهش ضریب جذب و ارتفاع پلاسما همراه است که به موجب آن حرارت عبوری از پلاسما افزایش می‌یابد. افزایش حرارت عبوری از پلاسما تا هنگامی که منطقه برهم‌کنش گاز با پرتو لیزر کاملاً توسط گاز محافظ پوشش داده شود ادامه می‌یابد. پس از آنکه درصد گاز محافظ در منطقه برهم‌کنش بین پرتو لیزر و ذرات گازی به حداکثر حد ممکن رسید، افزایش نرخ جریان گاز محافظ تأثیری بر روی حرارت عبوری از پلاسما ندارد. همان‌گونه که اشاره شد، بر اساس نتایج شبیه‌سازی در نرخ جریان‌های بالاتر از ۶۰ Lit/min ناحیه برهم‌کنش بین پرتو لیزر و ابر پلاسما کاملاً توسط گاز محافظ پوشش داده می‌شود، اما بر اساس نتایج تجربی بیشترین مساحت جوش (بیانگر حداکثر انرژی عبوری از

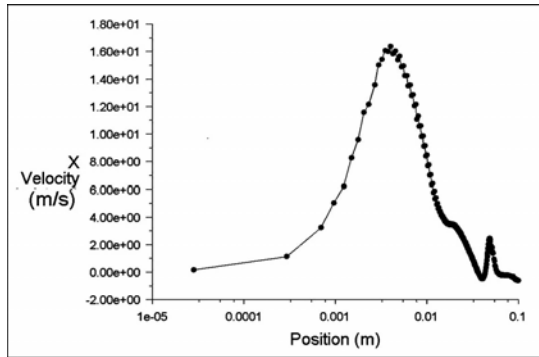


شکل (۸): توزیع گاز محافظ هلیوم در نرخ جریان ۶۰ Lit/min.

درصد گاز محافظ موجود در مسیر پرتو لیزر در نرخ جریان‌های ۱۰ و ۶۰ lit/min به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این نمودارها محور  $x$  و  $y$  به ترتیب معرف فاصله نازل گاز محافظ تا سطح قطعه کار و کسر حجمی گاز محافظ است. با مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که در نرخ جریان ۱۰ Lit/min سطح قطعه کار توسط گاز محافظ پوشش داده نشده است و با فاصله از سطح نازل درصد گاز محافظ به سرعت کاهش پیدا می‌کند، بنابراین انتظار می‌رود که حفاظت از حوضچه مذاب در برابر اکسیداسیون پایین باشد. اما در نرخ جریان ۶۰ Lit/min، سطح قطعه کار به خوبی توسط گاز محافظ پوشش داده می‌شود



شکل (۹): درصد گاز محافظ موجود در مسیر پرتو لیزر در نرخ جریان ۱۰ Lit/min.



شکل (۱۳): تغییرات سرعت گاز محافظ بر حسب فاصله از مرکز جوش در محور Xها بر روی سطح قطعه کار در نرخ جریان ۶۰ Lit/min.

شار انتقال حرارت از طریق جریان همرفتی از قانون نیوتن به-

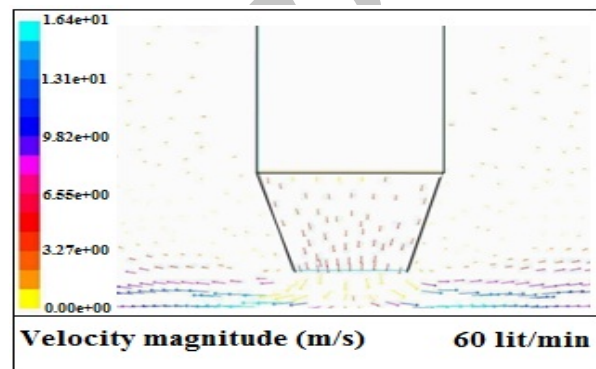
دست می‌آید [۱۴]:

$$q_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

که در آن  $h$  ضریب هدایت حرارتی جریان همرفت آزاد،  $T_s$  دمای سطح جوش،  $T_\infty$  دمای سیال و  $A$  مساحت سطح جوش است. ضریب انتقال حرارت همرفت به هندسه و جریان سیال خنک کننده بستگی دارد. با توجه به معادله (۶) افزایش نرخ جریان گاز محافظ موجب افزایش انتقال حرارت از سطح جوش به وسیله جریان همرفت می‌شود. تحقیقات انجام شده در مورد تأثیر نرخ جریان گاز بر روی دمای پلاسما در جوشکاری با لیزر Nd:YAG پالسی نشان می‌دهد که با افزایش نرخ جریان گاز محافظ دمای پلاسما ابتدا ثابت مانده و در ادامه کاهش می‌یابد [۱۵]، در نتیجه انرژی منتقل شده از طریق پلاسما به دیواره‌های حوضچه مذاب کاهش می‌یابد. بنابراین اتلاف حرارت به وسیله جریان همرفت و کاهش انرژی منتقل شده از پلاسما به جوش می‌تواند دلیل کاهش مساحت جوش در ناحیه دو از شکل (۲) باشد.

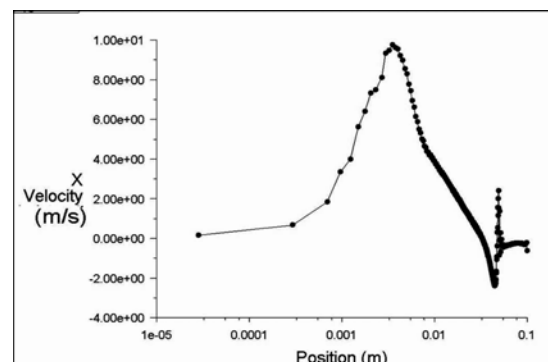
شکل (۱۴) ریز ساختار جوش به دست آمده از نمونه‌های A (نرخ جریان ۲۰ lit/min) و C (نرخ جریان ۸۰ lit/min) را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر دو نمونه فریت چند وجهی جزء سازنده فلز جوش است اما با افزایش نرخ جریان گاز محافظ ساختار جوش درشت‌تر شده است. اندازه

ابر پلاسما) در نرخ جریان ۸۰ Lit/min به دست می‌آید. با توجه به آنکه فشار ابر پلاسما بالاتر از فشار اتمسفر است، بنابراین انتظار می‌رود برای کنار زدن آن نیاز به فشار و نرخ جریان گاز بیشتری باشد. از این رو می‌توان گفت اختلاف نتایج تجربی و شبیه سازی ممکن است به علت نادیده گرفتن اثر برهم‌کنش بین پرتو لیزر با ابر پلاسما و بخارات حاصل از فلز پایه در شبیه سازی باشد. شکل (۱۱) بردار سرعت گاز در نرخ جریان ۶۰ Lit/min را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۱): بردارهای سرعت گاز در نرخ جریان ۶۰ Lit/min.

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب نشان دهنده تغییرات سرعت گاز محافظ بر حسب فاصله از مرکز جوش در محور Xها (در سطح قطعه کار) در نرخ جریان ۱۰ و ۶۰ lit/min است. مشاهده می‌شود حداکثر سرعت گاز در نرخ جریان ۱۰ و ۶۰ lit/min به ترتیب برابر ۱۰ و ۱۶/۳ m/s است. بنابراین با افزایش نرخ جریان گاز محافظ، سرعت گاز در سطح قطعه کار افزایش می‌یابد.



شکل (۱۲): تغییرات سرعت گاز محافظ بر حسب فاصله از مرکز جوش در محور Xها بر روی سطح قطعه کار در نرخ جریان ۱۰ Lit/min.

Fluent برای شبیه‌سازی اثر گاز محافظ هلیوم مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که:

۱- با افزایش نرخ جریان گاز محافظ هلیوم، مساحت و نسبت عمق به عرض جوش ابتدا افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد.

۲- بیشترین نسبت عمق به عرض جوش در نرخ جریان Lit/min ۸۰ حاصل شد.

۳- با افزایش نرخ جریان گاز محافظ منطقه برهم کنش بین پرتو لیزر و ابر پلاسما و سطح قطعه کار محافظت بهتری می‌شود.

۴- با افزایش مقدار جریان گاز محافظ، سرعت جریان گاز افزایش می‌یابد.

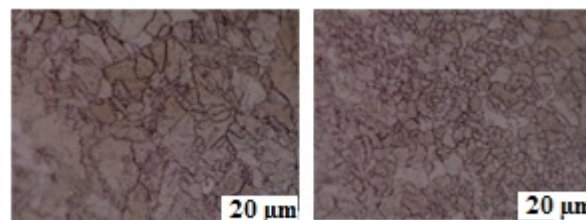
### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از تمامی مسئولین و دست اندرکاران مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران بویژه جناب آقای علی چهرقانی بخاطر کمک‌ها و همفکری‌هایشان قدردانی نمایند.

### ۶- مراجع

- [1] L. J. Zhang, J. X. Zhang, A. Q. Duanand & S. L. Gong "Numerical and experimental study of the effect of side assisting gas during laser welding", Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., vol.14, pp. 875-890, 2006.
- [2] H.Wangy., Shi, S.Gong, & a.Duan, "Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding", Journal of Materials Processing Technology, vol.184, pp. 379-385, 2007.
- [3] D.Grevey,P. Sallamand, E.Cicala, & S. Ignat, "Gas protection optimization during Nd: YAG laser welding", Optics & Laser Technology, vol.37, pp.647-651, 2005.
- [4] G.Tani, A.AscariG.Campana, & A.Fortunato, "A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys", Applied Surface Science, vol.254, pp.904-907, 2007.

متوسط دانه‌های فریت چند وجهی در نمونه‌های A و C به ترتیب  $5/5 \pm 0/05$  و  $8/8 \pm 0/05$  میکرومتر است.



شکل (۱۴): ریزساختار فلز جوش در نمونه‌های: الف) A گاز هلیوم با نرخ جریان ۲۰ lit/min و ب) C گاز هلیوم با نرخ جریان ۸۰ lit/min

گاز محافظ می‌تواند از طریق برهم کنش با فلز جوش و تغییر حرارت اعمالی بر ریز ساختار جوش تأثیر گذارد. از آنجا که هلیوم یک گاز بی اثر است، بنابراین در این آزمایش‌ها ریز ساختار جوش تنها متأثر از تغییرات حرارت اعمالی به جوش است. نرخ سرمایش در فلز جوش با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_x = \left(\frac{dT}{dx}\right)_t \left(\frac{dx}{dt}\right)_T = -2\pi kV \frac{(T-T_0)^2}{Q} \quad (7)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی قطعه کار، V سرعت جوشکاری،  $T_0$  دمای اولیه قطعه کار و Q حرارت جذب شده توسط قطعه کار است. اگر مساحت ناحیه جوش را متناسب با حرارت جذب شده توسط فلز پایه در نظر بگیریم، بنابراین نرخ سرمایش با مساحت ناحیه جوش رابطه عکس دارد. کاهش نرخ سرمایش موجب رشد دانه‌های آستنیت و متعاقب آن ریزساختار نهایی درشت‌تری می‌شود. بنابراین افزایش نرخ جریان گاز محافظ از طریق افزایش حرارت اعمالی موجب ایجاد ساختار درشت دانه‌تری شده است.

### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر نرخ جریان گاز محافظ هلیوم بر شکل جوش حاصل از جوشکاری با لیزر پالسی Nd:YAG بررسی شد، همچنین به منظور تکمیل بررسی‌های انجام شده از نرم‌افزار



- weldability of low carbon automotive galvanized steel”, *Materials Science and Engineering*, 272, pp. 357–362, 1999.
- [11] U.Reisgen, M. Schleser, O. Mokrov, E. Ahmed, “Shielding gas influences on laser weldability of tailored blanks of advanced automotive steels”, *Applied Surface Science*, vol.257, pp. 1401–1406, 2010.
- [12] G.Tani, A. Ascari, G.Campana & A. Fortunato, “A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys”, *Applied Surface Science*, vol.254, pp.904–907, 2007.
- [13] V.V.Semak, R.J. Steele & P.W.Fuerschbach, “Role of beam absorption in plasma during laser welding”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.33, pp. 1179–1185, 2000.
- [14] J.P.Holman, "Heat Transfer", New York, McGraw-Hill, 1997.
- [15] J.Sabbaghzadeh, S.Dadras & M.J.Torkamany, “Comparison of pulsed Nd:YAG laser welding qualitative features with plasma plume thermal characteristics”, *J. Phys.D*, Vol. 40, pp.1047-51, 2007.
- [16] S.Kou “Welding Metallurgy”, Second ed, Wiley/Interscience, New York, pp.37-60.
- [5] B.Bauer, S. Kralj, Z.Kozuh & L.Dorn, “Effects of type of shielding gas upon local mechanical properties of laser welded joint in heat-treatable steel”, *Mat.-wiss. u.Werkstofftech*, vol 42, No. 8, 718-726, 2011.
- [6] D.Grevey, P. Sallamand, E. Cicala, & S. Ignat, “Gas protection optimization during Nd: YAG laser welding”, *Optics & Laser Technology*, vol. 37, pp.647–651, 2005.
- [7] H.Wang, Y. Shi, S.Gong & A. Duan, “Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.184, pp. 379–385, 2007.
- [8] L.J.Zhang, J.X. Zhang, A.Q. Duanand & S.L. Gong, “Numerical and experimental study of the effect of side assisting gas during laser welding”, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* vol. 14, pp. 875–890, 2006.
- [9] M.Beck, P. Berger & H. Hiigel, “The effects of the use of different shielding gas mixtures in laser welding of metals”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 28, pp. 2051-2059, 1995.
- [10] B.G.Chung, S.Rhee & C.H.Lee, “The effect of shielding gas types on CO<sub>2</sub> laser tailored blank