

## تشخیص مسیر جوشکاری لیزری صفحات مبدل های حرارتی با استفاده از الگوریتم های پردازش تصویر

مبدل های تمام جوشی، یکی از انواع مبدل های حرارتی صفحه ای می باشند که به دلیل کار در فشار و دمای زیاد، آب بندی آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش از جوش لیزر به جهت آب بندی صحیح صفحات استفاده می شود. یکی از عوامل اصلی و مهم در کیفیت جوشکاری لیزر، تشخیص موقعیت صحیح مسیر جوش است و چون صفحات دارای ضخامت کم در حدود ۱ میلی متر هستند، این مسئله از اهمیت بالاتری برخوردار می باشد. تشخیص مسیر توسط اپراتور و به صورت بصری، فرآیندی زمان بر است و دقت تشخیص مسیر پایین می باشد. به عنوان روشی جایگزین سعی شده تا با استفاده از سیستم بینایی برای تصویربرداری مسیر پیش از شروع جوشکاری و سپس پردازش تصاویر، برنامه مسیر حرکتی محورهای دستگاه مشخص شود. میزان خطا تشخیص مسیر در حدود ۰/۰۳۷ میلی متر گزارش شده، به عبارتی برنامه دارای دقت مطلوب می باشد. در آخر نتایج کنترل کیفیت بصری جوشکاری انجام شده بر روی چند نمونه، نشان از کیفیت مطلوب جوش صل از سیستم توسعه داده شده می دهد.

یاسمین عزمی<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی

مینا نورالهی<sup>۲</sup>

دانشجوی کارشناسی

محمدحسین

فرشیدیان فر<sup>۳</sup>

استادیار

پوریا اولیاءزاده<sup>۴</sup>

سرپرست مرکز

پژوهش های صنعتی

سیده غزال

مهردویان مشهدی<sup>۵</sup>

کارشناس ارشد مهندسی

مرکز فناوری های نوین

واژه های راهنما: مبدل های تمام جوشی، جوش لیزر، تشخیص مسیر، سیستم بینایی، پردازش تصویر، درون یابی اسپیلاین

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، جمهوری اسلامی ایران،  
azmi.yasamin@mail.um.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، جمهوری اسلامی ایران،  
mina.noorollahi@mail.um.ac.ir

<sup>۳</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، جمهوری اسلامی ایران،  
farshidianfar@um.ac.ir

<sup>۴</sup> دکتری تخصصی، سرپرست مرکز پژوهش های صنعتی، طاهای قالب توس، مشهد، جمهوری اسلامی ایران،  
pouria\_oliazadeh@alumni.um.ac.ir

<sup>۵</sup> کارشناس ارشد مهندسی مرکز فناوری های نوین، طاهای قالب توس، مشهد، جمهوری اسلامی ایران،  
s.gh.mahdavianmashhadi@alumni.um.ac.ir

## ۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی وسیله انتقال حرارت بین دو یا چند سیال می‌باشند که کاربرد گسترده‌ای در صنعت و ساختمان‌های مسکونی دارند، در نتیجه نیاز است تا کارایی و دقت ساخت آن‌ها بالا باشد تا از خسارت‌های مالی و جانی، مانند نشت سیال شیمیایی یا دما بالا و آسیب به انسان جلوگیری شود [۱]. روند تولید انواع مبدل‌های حرارتی دارای پیچیدگی بسیاری است که به دنبال آن هزینه زیاد و نیروی کار ماهر و متعددی را نیاز دارد؛ حال آنکه در دنیای مدرن امروز، هوشمندسازی فرآیندهای تولید یا به عبارتی اتوماسیون صنعتی به منظور افزایش دقت و سرعت ساخت، از جمله موضوعات مهم به‌شمار می‌آید که در آن به استفاده از فناوری‌های نو به کمک کامپیوتر پرداخته می‌شود [۲]؛ در نتیجه استفاده از سیستم‌های اتوماسیون صنعتی برای بخشی از فرآیند تولید مبدل‌های حرارتی ضروری است. فرآیند تولید مبدل‌های صفحه‌ای در میان انواع مختلف مبدل‌های حرارتی به دلیل کاربرد ویژه در تأسیسات ساختمان‌ها، اهمیت بالایی دارد و آب‌بندی مسیرهای عبور سیال از جمله بخش‌های مهم در ساخت به دلیل جلوگیری از نشت سیال می‌باشد. با توجه به چگونگی آب‌بندی مبدل‌های صفحه‌ای، سه نوع مختلف تمام‌واشر، نیمه‌جوشی و تمام‌جوشی برای این نوع مبدل وجود دارد که نوع آخر در شرایط دما بالا (تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار زیاد (تا ۴۰ بار) کار می‌کند و بیانگر اهمیت کیفیت بالای جوش به جهت آب‌بندی درست صفحات مبدل در این شرایط کاری می‌باشد [۳].

به هدف رسیدن به کارایی و دقت مطلوب ساخت آن‌ها نیاز است تا پارامترهای جوشکاری از جمله نوع جوش، توان، سرعت، مود و دیگر موارد به درستی و تا حدودی با استفاده از تجربه تعیین شوند. به عبارتی با توجه به خسارت‌های زیاد ناشی از آب‌بندی نادرست صفحات و در نتیجه نشت سیال، انتخاب درست نوع جوش موضوع مورد بحث صنعت‌گران بوده است [۴]. حال آنکه امروزه استفاده از تکنولوژی لیزر و کاربردهای مختلف آن و به‌طور خاص در جوشکاری با ویژگی‌های منحصر به فرد به مانند جوشکاری سریع و با کیفیت بالا در درزهای بلند و مستقیم، به‌طور معمول برای این نوع مبدل از جوش لیزر استفاده می‌شود. اما باید به خاطر داشت فرآیند جوشکاری لیزر خود دارای پیچیدگی می‌باشد و نیاز است تا با دقت بالا انجام شود. در جوشکاری لیزری لبه‌ای مبدل‌های تمام‌جوشی به دلیل ضخامت بسیار کم هر صفحه (معادل با ۱ میلی‌متر) و وجود اعوجاج زیاد در لبه‌ها (نتیجه فرآیند پرس)، تشخیص درز جوش دارای دشواری بسیاری است؛ به بیانی در صورت تشخیص نادرست، پرتو لیزر از مسیر اصلی خارج شده، باعث ذوب نشدن کامل دو لبه درز و در نتیجه آب‌بند نشدن صحیح خواهد شد و نیز روکش قرار گرفته بر سطح بیرونی صفحات که وظیفه حفاظت در برابر اکسیداسیون را دارد، آسیب می‌بیند. همچنین در موارد بسیاری ناهمواری‌های صفحات (ناحیه شورون‌ها) نیز دچار تغییر شکل می‌شوند که این خود عاملی برای کاهش راندمان دستگاه می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع، جوشکاری به‌صورت دستی انجام نمی‌شود بلکه گان جوش لیزر بر روی بازو دستگاه CNC [۵] یا ربات‌های صنعتی [۶] [۷] متصل شده و تشخیص مسیر جهت تعیین برنامه حرکت بازو، به‌طور معمول با مشخص کردن چند نقطه از مسیر توسط اپراتور انجام می‌شود که خود فرآیندی زمان‌بر است، به عبارتی برای یک مسیر با طول ۷۰ سانتی‌متر به‌طور میانگین ۲۰ دقیقه نیاز است و به دلیل زیادبودن تعداد مسیرهای جوش، رفع مشکل سرعت کم جوشکاری نیز در کنار افزایش دقت تشخیص مسیر جوش دارای اهمیت است. از این‌رو در این پژوهش از سیستم تشخیص مسیر خودکار مبتنی بر بینایی به هدف بهبود کیفیت جوش لیزر، کاهش زمان جوشکاری

صفحات مبدل‌های حرارتی و کاهش عیوب جوش ناشی از انحراف گان از مسیر اصلی استفاده شده است. لازم به ذکر است پژوهش‌های بسیاری به بررسی تشخیص مسیر در جوشکاری به صورت خودکار با استفاده از سیستم بینایی ماشین پرداخته‌اند؛ اما مطالعات اندکی به طور خاص جوش لیزری لبه‌ای را بررسی کرده‌اند. به همین دلیل استفاده از سیستم بینایی با استفاده از فیلترهای نوری به منظور کاهش نویزهای تصویر به صورت فیزیکی قبل از ورود تصاویر به محیط برنامه‌نویسی، تشخیص مسیر خودکار، گزارش مختصات درز جوش، همچنین ارسال این مختصات به PLC و انجام جوش لیزری لبه‌ای با حداقل ایجاد عیوب و پیاده‌سازی پروژه در محیط صنعتی از اهمیت‌های این پژوهش است.

رویکرد تشخیص مسیر مبتنی بر بینایی دارای مزایای متعددی از جمله دقت بالا، تشخیص سریع و بدون نیاز به تماس ابزار با قطعه می باشد [۸]. از این رو ردیابی مسیر مبتنی بر بینایی در کنترل مسیر حرکت ربات [۹]، سیستم‌های تشخیص لبه شی [۱۰] و اکثر سیستم‌های جوشکاری اتوماتیک [۱۱] کاربرد دارند. سیستم بینایی به طور کلی شامل یک منبع نوری، دوربین به منظور تصویربرداری از نمونه مورد نظر و سپس پردازش تصویر برای استخراج ویژگی‌های مطلوب است و می‌توان سیستم آن را با توجه به منبع نوری به کار گرفته شده برای روشن کردن نمونه به دو دسته سیستم بینایی فعال<sup>۱</sup> و سیستم بینایی غیرفعال<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کرد. در سیستم بینایی غیرفعال از منبع نور خارجی استفاده نمی‌شود و برای روشنایی مسیر از نور محیط بهره گرفته می‌شود. حال آنکه، بنفیان و همکاران در پژوهشی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر پیشنهاد داده‌اند برای بدست آوردن مشخصات حوضچه مذاب جوش بهتر است از سیستم بینایی غیرفعال استفاده شود [۱۰]. در سال ۲۰۱۴ یانلینگ خو و همکاران [۱۲] از یک سیستم بینایی غیرفعال برای ردیابی بی‌درنگ<sup>۳</sup> مسیر جوشکاری قوسی تنگستن گاز و جوشکاری قوس فلزی گازی استفاده کرده‌اند. آنها معتقدند، سیستم بینایی غیرفعال ارزان‌تر بوده و اطلاعات کافی در رابطه با مسیر جوش می‌دهد؛ این در حالی است که به دلیل وجود جرقه و پاشش جوشکاری در تشخیص مسیر بی‌درنگ (برخط) و همچنین تغییر میزان روشنایی محیط، کیفیت تصویر کاهش یافته و در پی آن باعث تولید داده پرت می‌شود و بر کارایی سیستم بینایی غیرفعال تأثیر می‌گذارد. به منظور افزایش کیفیت تصویر سیستم بینایی غیرفعال، وانجون شائو و همکاران در سال ۲۰۱۹ با بهره‌گیری از سیستم بینایی غیرفعال در جوشکاری لیزری لب‌به‌لب مسیر جوش باریک و همچنین توسعه الگوریتم‌های پردازش تصویر با استفاده از فیلتر ذره‌ای و تبدیل هاف توانستند درز را در تصاویر حاوی پاشش‌های جوش به خوبی تشخیص دهند [۵]، اما باید در نظر داشت، اتکا به یک نوع خاص جوشکاری و کارایی مناسب برنامه پردازش تصویر تنها تحت شرایط خاص، باعث کاهش میزان تکرارپذیری سیستم خواهد شد که مطلوب نمی‌باشد. به دنبال افزایش میزان قابلیت اطمینان سیستم، ماتجز کوس و همکاران [۷] در همان سال توانستند با اضافه کردن یک لیزر راهنما به صورت هم‌محور با لیزر جوشکاری به منظور یکسان‌سازی شدت نور ناحیه اثر جوش (حوضچه مذاب) با ناحیه اطراف، تصویر با کنتراست و کیفیت بالا از جوش و مسیر آن بدست آورند و مشکل وجود تصویر بی‌کیفیت به دلیل نور زیاد تولید شده توسط حوضچه مذاب را رفع کنند. نکته قابل توجه در سیستم توسعه داده شده توسط آنها استفاده از لیزر با قدرت زیاد است که توانسته بر شدت نور جوش غلبه

<sup>1</sup> Active vision system

<sup>2</sup> Passive vision system

<sup>3</sup> Real-time

کرده و تصویر با کیفیت ایجاد کند، اما تهیه و تنظیم این نوع لیزر بسیار هزینه‌بر بوده و به‌صرفه نمی‌باشد. حال آنکه از سال‌های قبل به‌دنبال توسعه سیستم تشخیص مسیر با صرفه اقتصادی، پژوهشگران از سیستم بینایی فعال به همراه منبع روشنایی با توان بسیار پایین‌تر به‌گونه‌ای که تنها از درز جوش تصویربرداری می‌شود، استفاده کرده‌اند. دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با توسعه یک سیستم بینایی فعال برای تشخیص مسیر بی‌درنگ، توانستند مسیر جوش را با دقت ۰/۵ میلی‌متر شناسایی کنند [۱۳]. همانطور که قبل‌تر اشاره شد در سیستم بینایی فعال، انتخاب منبع نور خارجی مناسب بر کیفیت ردیابی تأثیر می‌گذارد و به‌طور معمول برای تشخیص مسیر جوش از روشنایی لیزر راهنما استفاده می‌شود [۱۵]، [۱۴]. با این حال، تصاویر سیستم فعال با روشنایی لیزری همچنان دارای کیفیت کم به دلیل وجود جرقه جوش، پاشش مواد در تشخیص مسیر بی‌درنگ و در مواردی تغییر روشنایی پرتو لیزر راهنما نیز می‌باشد که بر کیفیت ردیابی تأثیر می‌گذارد [۱۶]. برخی از محققان با در نظر گرفتن منطقه شامل ویژگی‌های مسیر جوش<sup>۱</sup> [۹] و یا با استفاده از مشخصه‌های کانولوشن [۱۵] توانسته‌اند بر مشکل کاهش کیفیت تصویر ناشی از عوامل محیطی غلبه کنند. جانفنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از فیلتر میانه<sup>۲</sup> کیفیت تصویر را پیش از پردازش تصویر و تشخیص مسیر افزایش داده‌اند و به دقت ۰/۱ میلی‌متر در جوشکاری قوس الکتریکی لب به لب مسیر باریک رسیده‌اند [۱۷]. بولدیرین و همکاران در سال ۲۰۲۴ برای کاهش شکاف‌های جوشکاری ناشی از تشخیص مسیر نادرست از دو کنترل موازی استفاده کرده‌اند که با استفاده از تصاویر خاکستری موقیعت درز جوش را گزارش می‌کنند و دامنه جوش تا ۰/۶ میلی‌متر کنترل می‌کنند [۱۸]، اما این سیستم به علت وجود شرایط خاص برای انجام آزمایش قابلیت پیاده‌سازی در محیط صنعتی را ندارد. همچنین ارتعاشات وارده بر گان بیشتر از حد معمول موجب آسیب به آن می‌شود. به دنبال گریز از وجود پاشش‌های جوش در تصویر و آسیب ناشی از حرارت آن به قطعات سیستم استفاده از سیستم بینایی برون‌خط (تصویربرداری پیش از جوشکاری) استفاده می‌شود و به‌عبارتی پروفیل مسیر جوش قبل از شروع فرآیند استخراج می‌شود که در موارد بسیار زیادی می‌تواند به صرفه‌ترین و ساده‌ترین سیستم باشد. با این حال داده‌های مختصات مسیر حاصل از پردازش دارای نویز بوده است (نوسان در داده‌ها). روش‌های متنوعی به مانند درون‌یابی وجود دارند که امکان کاهش داده‌های نویز در زمان کوتاه و با دقت مناسب را ایجاد کرده و پروفیل مسیر را با یک تابع بهینه گزارش می‌کنند.

همانطور که بیان شد، دقت تشخیص مسیر در جوشکاری صفحات مبدل‌های حرارتی و همچنین کاهش زمان صرف شده دارای اهمیت بالایی است. از این‌رو هدف پژوهش حاضر استفاده از سیستم بینایی فعال برون‌خط و الگوریتم‌های پردازش تصویر برای تشخیص مسیر جوش لیزری لبه‌ای صفحات مبدل می‌باشد. یکی دیگر از اهداف پژوهش پیاده‌سازی برنامه در محیط صنعتی با تکرارپذیری بالا و سرعت و دقت مناسب است. در این مقاله با طراحی مناسب اجزاء و محل قرارگیری سیستم بینایی پس از تصویربرداری از مسیر جوش و ارسال تصاویر به‌صورت همزمان به‌عنوان ورودی برنامه توسعه داده شده، در آنجا ابتدا با در نظر گرفتن منطقه شامل ویژگی‌های مسیر جوش در هر تصویر و با استفاده از الگوریتم‌های مورفولوژی، کیفیت بهبود می‌یابد و سپس با تشخیص لبه‌های مسیر، نقاط مختلف مسیر جوش بدست می‌آید. در آخر نیز برای کاهش تغییرات زیاد در

<sup>1</sup> ROI (Region of Interest)

<sup>2</sup> Median filter

داده‌ها، حذف داده‌های نویز و برازش تابع بهینه از درون‌یابی اسپلاین<sup>۱</sup> استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی، تصویربرداری از ۱۰ نمونه مسیر جوش انجام شده و میزان خطا تشخیص در حدود ۰/۰۳۷ میلی‌متر بوده است و نیز با انجام جوشکاری بر روی چند نمونه مسیر جوش با بهره‌گیری از دو روش انتخاب نقاط مسیر به صورت دست (بصری) و مقایسه کیفیت جوش حاصل از هر روش می‌توان پی برد که برنامه تشخیص مسیر مبتنی بر سیستم بینایی دارای دقت قابل قبولی است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از اعتبارسنجی و تست برنامه بر روی نمونه مسیرهای متعدد می‌توان به تکرارپذیری برنامه جوشکاری در محیط صنعتی مجموعه پی برد.

## ۲- مواد و روش‌ها

این پروژه در شرکت دانش بنیان طاها قالب توس مشهد به مدت ۱۳ ماه بر روی دو مجموعه صفحات ۲۰ تایی مبدل حرارتی بلاک که دارای ۴ وجه (هر وجه دارای ۲۰ مسیر ۷۵ سانتی‌متری)، پیاده‌سازی شده است. به منظور اتوماتیک کردن فرآیند جوشکاری لیزر با هدف بهبود سرعت جوشکاری و بهبود کیفیت جوشکاری صفحات نازک مبدل‌های حرارتی بلاک از سیستمی دارای بخش‌هایی نظیر دستگاه CNC سه‌محور، تجهیزات جوشکاری لیزری از جمله گان لیزر و ماشین جوشکاری، سیستم بینایی شامل دوربین-Blackfly S BFS-U3 و 23S3M شرکت FLIR، لنز نوری FL-CC2518-5M شرکت RICOH، فیلترهای نوری شرکت MidOpt و لیزر خطی قرمز رنگ با طول موج ۶۵۰ نانومتر و توان ۴۵۰ میلی‌وات استفاده شده است. برای سیستم‌های کنترلی و حرکتی نیز از PLC شرکت delta و سروموتورها به همراه درایور آنها بهره‌گیری شده است. لازم به ذکر است برای کنارهم قراردادن صفحات مبدل‌های حرارتی و نگه‌داشتن آنها در یک موقعیت ثابت از یک فیکسچر موجود در مجموعه به کار گرفته شده است. سطح صفحات قبل از انجام جوشکاری سمباده کشیده شده است تا سطحی یکنواخت داشته باشند. جنس نمونه‌ها و صفحات در این پژوهش عمدتاً از فولاد ضدزنگ L304 و L316 است.

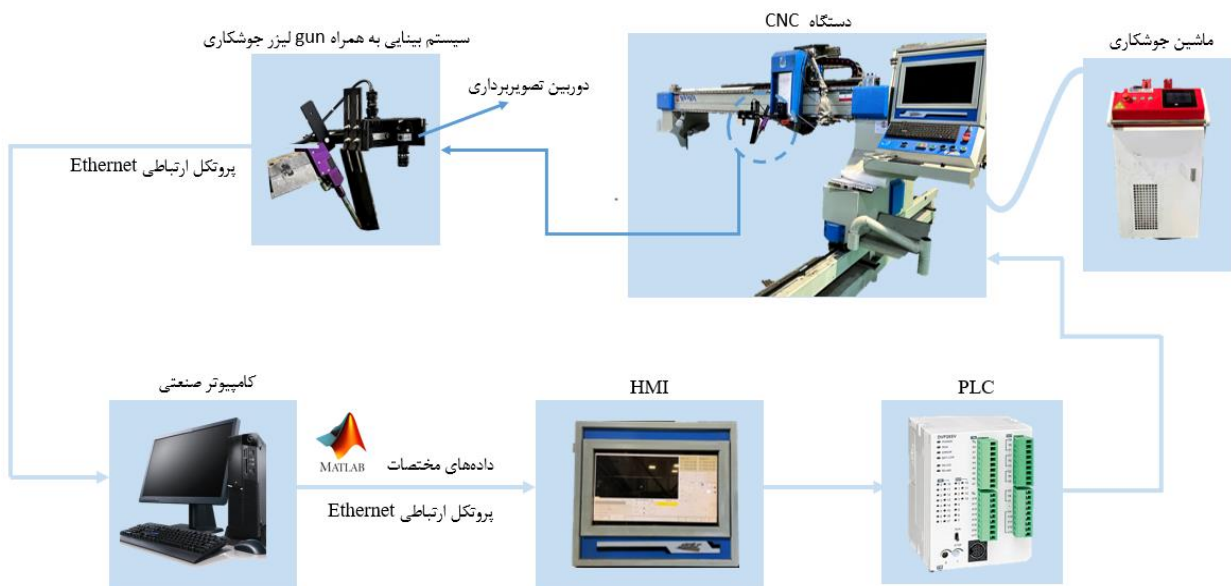
در جدول (۱) مشخصات و پارامترهای جوشکاری صفحات نشان داده شده است. با توجه به تصویربرداری با سیستم بینایی و پردازش تصاویر، سیگنال مربوط به موقعیت مسیر از محیط متلب به کنترلرها با استفاده از پروتکل ارتباطی Modbus انتقال داده شده است.

### جدول ۱- پارامترهای تجربی

پارامتر	مقدار	واحد
ضخامت صفحات	۱	mm
طول صفحات	۷۵	cm
توان جوشکاری	۱۰۰۰	w
سرعت جوشکاری	۲۱۲	mm/min

<sup>۱</sup>Spline interpolation

### ۳- مبانی و روش توسعه سیستم بینایی ماشین



شکل ۱- دیگرام سیستم تشخیص مسیر و جوشکاری با استفاده از CNC سه محور

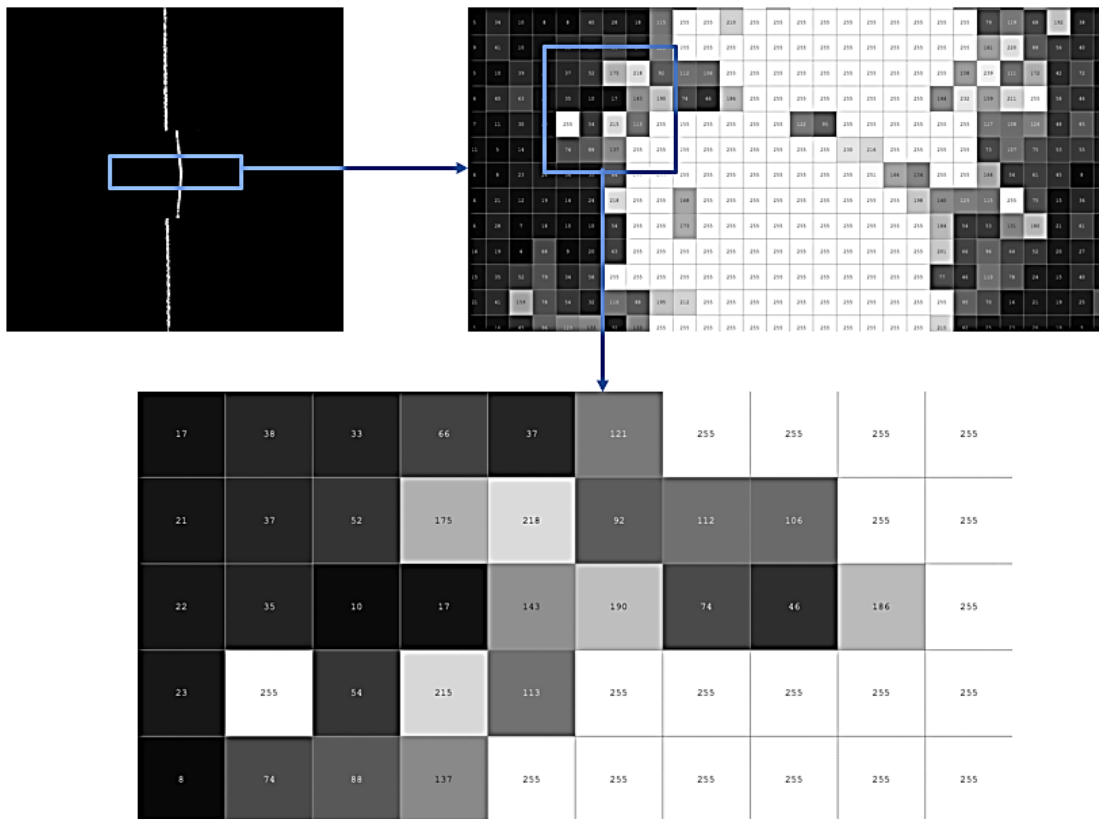
فرآیند جوشکاری لیزری اتوماتیک ترکیبی از سخت‌افزارها و نرم‌افزارها در کنار هم می‌باشد. در این فرآیند ابتدا از مسیر جوش با استفاده از دوربین سیستم بینایی تصویربرداری می‌شود، سپس این تصاویر از طریق یک پروتکل ارتباطی به نام Ethernet وارد محیط نرم‌افزار متلب شده تا توسط برنامه تشخیص مسیر پیاده‌سازی شده در متلب، پردازش شوند و سپس مختصات مسیر گزارش می‌شود. پس از آن مختصات به دست آمده به‌عنوان سیگنال ورودی به PLC داده می‌شود، سپس فرمان کنترلی از PLC به درایور و بعد از آن به سروموتورهای CNC منتقل می‌شود. در نتیجه حرکت سروموتورها، گان لیزر جوش در طول فرآیند جوشکاری در موقعیت مسیر تشخیص داده شده، حرکت می‌کند (شکل (۱)). هدف اصلی این پژوهش در بخش اصلی یعنی طراحی سیستم بینایی بوده است؛ لذا در ادامه به مبانی نظری سیستم بینایی ماشین و پردازش تصویر و نیز روش توسعه آن پرداخته شده است.

#### ۳-۱- سیستم بینایی ماشین

در پی افزایش جمعیت نیاز به ساخت قطعات مختلف در تعداد و سرعت بالاتر، بیشتر از قبل شد و به دلیل تعداد محدود نیروی کار، اتوماسیون صنعتی ظهور پیدا کرد که سیستم بینایی بخش مهمی از آن می‌باشد. این سیستم به‌طور کلی قادر به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل تصویر و گزارش ویژگی موردنظر از آن می‌باشد. طراحی چنین سیستمی وابسته به کاربرد آن است. برای مثال انتخاب منبع نور مناسب به‌عنوان جز مهم و اصلی آن برای کنترل کیفیت بطری‌های آب در انتهای خط تولید ساخت کاملاً متفاوت از نوع استفاده شده در حذف نور مرئی تولیدشده در جوش لیزر که مدنظر این پژوهش بوده است، می‌باشد [۱۹]. طراحی سیستم بینایی به مفهوم انتخاب و تعیین موقعیت اجزاء آن (سخت‌افزار) و همچنین توسعه برنامه پردازش تصویر (نرم‌افزار) است که در ادامه به معرفی هر یک از اجزا و پردازش تصویر پرداخته شده است.

## ۳-۱-۱- دوربین

دوربین وظیفه دریافت پرتو نور بازتاب شده از اجسام را بر عهده دارد. تصویربرداری تقریباً ۸۵ درصد موفقیت کار نهایی را شامل می‌شود؛ به عبارتی در بیشتر موارد، عیب ایجاد شده در کارکرد بینایی ماشین، مربوط به تصویر گرفته شده می‌باشد. تمامی دوربین‌ها دارای مجموعه از قطعات حساس به نور می‌باشند که با جذب انرژی و با توجه به مقدار آن، تصویر ناشی از پرتوهای بازتاب شده از سوژه موردنظر را ایجاد می‌کند حسگرهای موجود در دوربین‌ها را می‌توان به سطوحی تشبیه کرد که هر کدام انرژی نور دریافت شده را به میکرو ولتاژ تبدیل کرده و مقدار آن را به همان حسگر نسبت داده می‌دهند؛ این حسگرها، پیکسل نامیده می‌شوند. دوربین‌ها از نقطه‌نظر معماری پیکسل‌ها و همچنین چگونگی انتقال داده دارای دو دسته کلی  $^1\text{CCD}$  و  $^2\text{CMOS}$  می‌باشند. هر دو نوع حسگر در دریافت و تبدیل نور به سیگنال الکتریکی به شکل یکسانی عمل می‌کنند. وقتی که نور با تراشه نیم‌رسانا برخورد می‌کند بارهای الکتریکی در حسگر تصویر به وجود آمده و نگهداری می‌شوند. هم‌زمان با خواندن تصاویر توسط تراشه، این بارها به گره مشخصی رفته و ولتاژی متناسب با تعداد بارها ایجاد می‌شود. مدارهای جانبی دوربین، این ولتاژ را به داده‌های دیجیتالی تبدیل می‌کنند. هر یک از آن‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فرد است، برای مثال دوربین‌های  $\text{CCD}$ ، تصویربرداری با کیفیت بالا انجام می‌دهند، اما این دقت هزینه کاهش سرعت را به دنبال دارد که دوربین‌های  $\text{CMOS}$  با مستعدتر بودن در برابر نویز، سرعت را افزایش داده در نتیجه برای کاربردهای آنلاین مناسب می‌باشند.



شکل ۲- تصویر خاکستری و مقادیر هر پیکسل مرتبط با میزان روشنایی

<sup>1</sup> Charge Coupled Device

<sup>2</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor

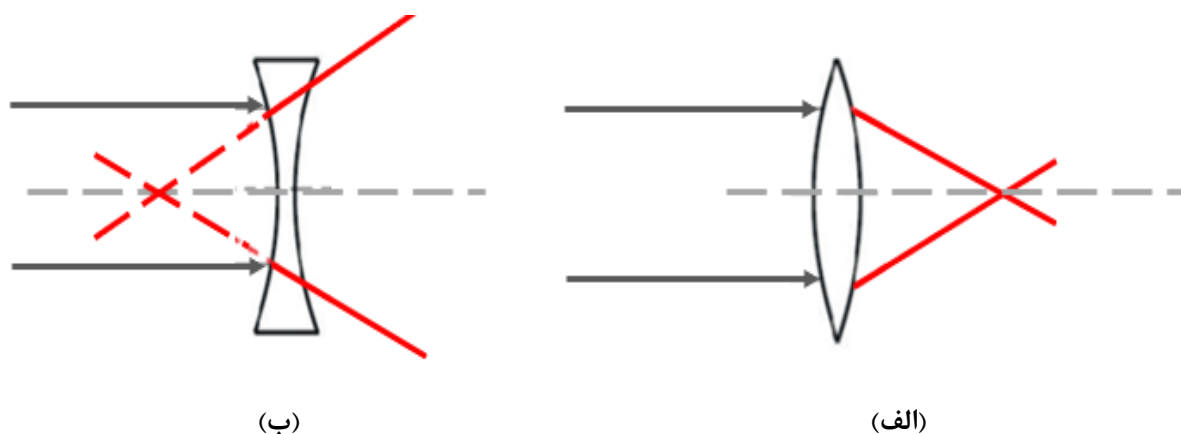
لازم به ذکر است به دلیل ذکر شده از دوربین‌های سری CMOS در این پژوهش استفاده شده است. پیکسل‌ها با توجه به نوع ساخت آن‌ها می‌توانند تصاویر را به صورت خاکستری و یا رنگی دریافت کنند. در این پژوهش از نوع خاکستری استفاده شده، در نتیجه ابتدا به بررسی آن پرداخته شده است. در تصویرهای خاکستری به هر پیکسل، یک عدد نسبت داده می‌شود که معادل با میزان روشنایی یا تاریکی تصویر در آن منطقه است، این عدد با توجه به میکرو ولتاژ محاسبه شده برای هر حسگر تعیین می‌شود و دارای مقادیر ۰ تا ۲۵۵ است که ۰ معادل با کاملاً تاریک (سیاه) و ۲۵۵ نشان‌گر کاملاً روشن (سفید) می‌باشد (شکل (۲)).

### ۳-۱-۲- لنز

هدف اصلی هر لنز جمع‌آوری نور بازتاب شده از سوژه موردنظر و در نتیجه ایجاد تصویر بر روی سنسورهای دوربین می‌باشد. از این رو نور ابتدا از لنز عبور کرده سپس به سنسورهای دوربین می‌رسد. لنزها آرایشی از انواع عدسی‌ها در کنار یکدیگر می‌باشند. محدب و مقعر دو طبقه‌بندی عدسی‌ها می‌باشند. مرکز عدسی محدب، ضخیم و عدسی مقعر برخلاف آن است. همانطور که می‌توان در شکل (۳) مشاهده کرد، در صورت عبور نکردن پرتو از عدسی محدب، پرتوهای بازتاب شده همگرا نمی‌شوند. لذا از لنزها استفاده می‌شود تا پس از عبور نور از عدسی‌ها و به دلیل وجود پدیده شکست، این پرتوها در یک نقطه به نام نقطه کانونی متمرکز می‌شوند.

### ۳-۱-۳- فیلتر

گذر کردن نور رسیده شده به سنسور از فیلتر که با استفاده از آن می‌توان یک طول موج مشخص را عبور دهد. فیلترها با هدف گذر یک طول موج مشخص ساخته می‌شوند و انواع مختلفی دارند. فیلترها در عکاسی، صفحاتی از جنس شیشه، پلاستیک یا ژلاتین با قابی که می‌تواند از فلز، مقوا یا پلاستیک فشرده بوده و یا بدون قاب هستند که در مقابل لنز یا منبع نور قرار داده می‌شوند تا باعث تغییراتی در کیفیت یا کمیت نور می‌شوند. انتهای لنز دوربین‌ها، رزوه است و می‌شود فیلتر را به آن پیچ نمود. یک راه عالی برای محافظت از سطح لنز در برابر گردوغبار، رطوبت استفاده از فیلتر است، اما کارکرد اصلی آن فقط محافظت از لنز نیست و به بهتر شدن عکس‌هایی که می‌گیرد هم کمک خواهند. در واقع فیلترها به حداقل رساندن تابش نور و بازتاب آن، افزایش شدت رنگ، کاهش نور ورودی به لنز و موارد دیگر کمک می‌کنند.



شکل ۳- تصاویر شماتیک عبور پرتو نور از عدسی‌های (الف) محدب و (ب) مقعر

### ۳-۱-۴- پردازش تصویر

به‌طور کلی الگوریتم‌های پردازش تصویر در شاخه بینایی ماشین به‌منظور درک معنی و محتوای تصویر توسعه داده شده‌اند. ورودی این الگوریتم‌ها سیگنال به‌صورت تصویر است که در واقع یک ماتریس دارای بعد می‌باشد که درایه‌های آن بیان میزان روشنایی هر پیکسل است. خروجی آن‌ها وابسته به نوع آن می‌باشد به‌طور کلی به دو دسته الگوریتم‌های افزایش کیفیت تصویر و استخراج ویژگی تقسیم‌بندی می‌شوند که در این پژوهش ابتدا به‌منظور دستیابی به کیفیت مطلوب و نیز استخراج مختصات مسیر جوش از هر دو نوع الگوریتم‌ها استفاده شده است که در بخش روش توسعه و طراحی سیستم به جزئیات آن‌ها پرداخته شده است.

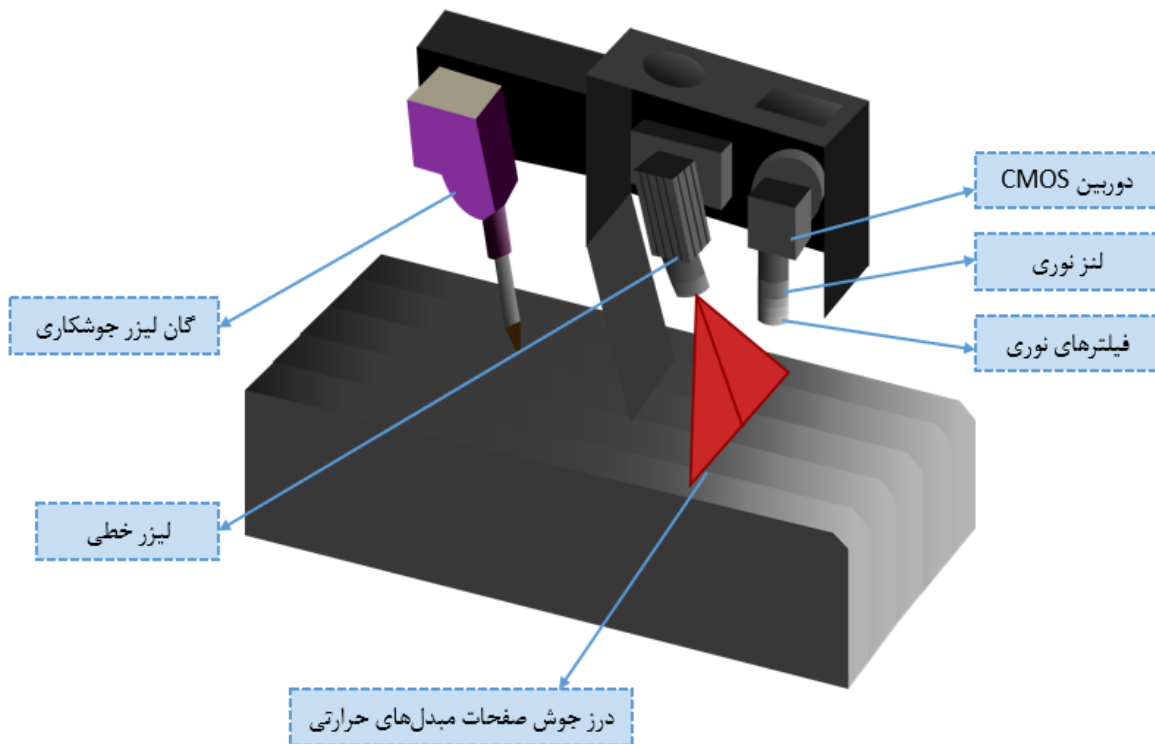
### ۳-۲- روش توسعه سیستم

#### ۳-۲-۱- طراحی سخت‌افزار

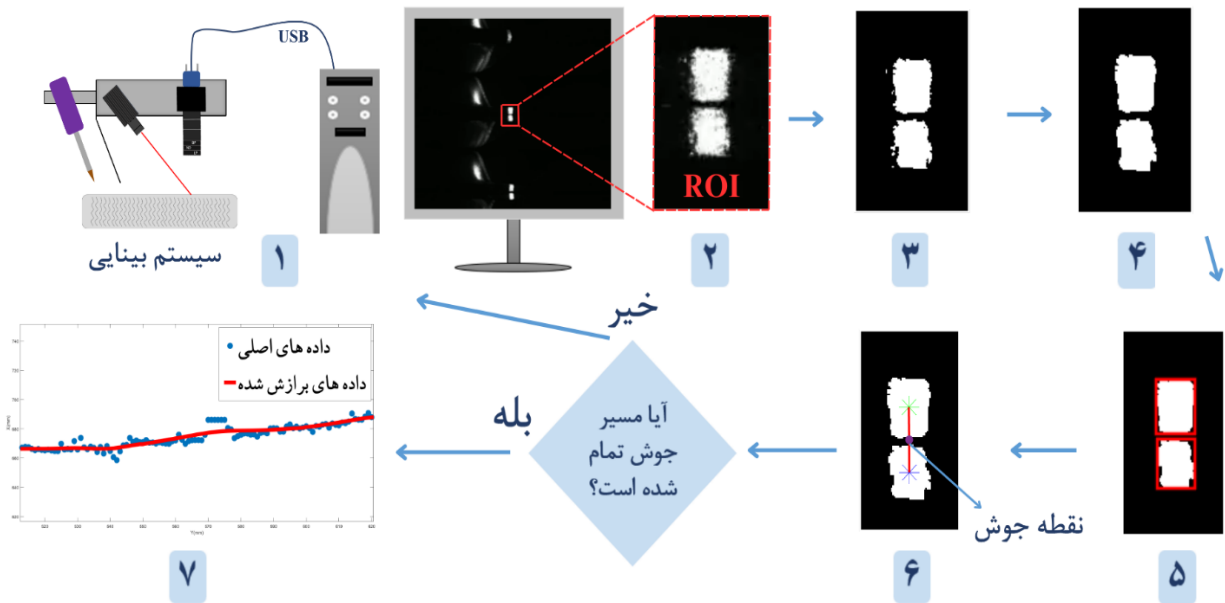
سخت‌افزار سیستم بینایی ماشین در شکل (۴) به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. هر کدام از اجزای سیستم بینایی با هدف خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دوربین‌ها برای تصویربرداری از درز جوش صفحات مبدل از لنز برای همگرا کردن پرتوهای نور و از فیلترها برای بهبود کیفیت تصویر استفاده می‌شود. منبع نوری در این سیستم، یک لیزر خطی است که درز و مسیر جوشکاری صفحات مبدل‌ها را مشخص و روشن می‌کند.

#### ۳-۲-۲- طراحی نرم‌افزار

همانطور که قبل‌تر توضیح داده شد، جوشکاری لبه‌ای صفحه‌های مبدل‌های حرارتی به دلیل ضخامت کم آنها دشوار می‌باشد؛ لذا نیاز است تا تصویربرداری و سپس پردازش تصویر با دقت بالا انجام شود.



شکل ۴- شماتیک سیستم بینایی و گان لیزر جوشکاری



**شکل ۵-** فلوجارت تشخیص مسیر؛ (۱) دریافت تصویر، (۲) برش تصویر به منظور مشخص کردن ROI، (۳) تصویر دودویی، (۴) افزایش کیفیت با استفاده از الگوریتم‌های مورفولوژی، (۵) در نظر گرفتن دو لبه درز، (۶) تشخیص مختصات نقطه جوش، (۷) حذف داده‌های نویز پس از اتمام مسیر و گزارش پروفیل

پردازش کل تصویر در هر فریم به دلیل حجم زیاد داده‌ها زمان‌بر و باعث کاهش سرعت پردازش می‌شود؛ لذا در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن یک منطقه شامل ویژگی‌های جوش، تنها شی‌های مربوط به لبه‌های درز مورد بررسی قرار گیرند. به منظور کاهش نویزهای موجود در تصویر، ابتدا تصویر را دودویی کرده، سپس با استفاده از الگوریتم‌های مورفولوژی سعی در افزایش کیفیت تصویر شده است. سپس لبه‌های درز تشخیص داده شده و نقطه میانی فاصله مراکز آنها به عنوان نقطه جوش گزارش می‌شود. در آخر نیز به دلیل احتمال وجود داده‌های نویز از الگوریتم درون‌یابی اسپیلاین جهت کاهش میزان نواسانات در داده‌های متوالی بهره گرفته شده است. در شکل (۵) مراحل الگوریتم تشخیص پروفیل مسیر جوش از دریافت تصویر و پردازش آن تا حذف داده‌های نویز و گزارش پروفیل، نشان داده شده است.

شدت روشنایی بیشتر نوار لیزر نسبت به پس‌زمینه باعث می‌شود بتوان پیکسل‌های تصویر را از نظر شدت روشنایی به دو گروه کاملاً روشن و کاملاً تاریک تقسیم کرد (تصویر دودویی). این کار سبب می‌شود که تصویر تنها یکی از دو مقدار ۰ یا ۱ را داشته باشد و این امر موجب حجم کم، پردازش سریع‌تر و امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های مورفولوژی بر روی تصاویر می‌شود. به منظور دودویی کردن تصویر مقدار هر پیکسل با حد آستانه تعیین شده از روش اتسو<sup>۱</sup> مقایسه می‌شود و در صورت بزرگتر یا مساوی بودن به مقدار یک (کاملاً روشن) و در غیر اینصورت به مقدار صفر (کاملاً تاریک) تبدیل خواهد شد.

با دودویی کردن تصویر همچنان کیفیت آن مطلوب نمی‌باشد، در نتیجه با استفاده از عملیات مورفولوژی مانند باز کردن تصویر و پر کردن حفره اشیاء، کیفیت تصویر بهبود یافته‌است. عملیات مورفولوژی به مجموعه‌ای از تکنیک‌ها و فرآیندها اطلاق می‌شود که برای تجزیه و تحلیل و تغییر ساختار و شکل اشیاء در تصاویر به کار می‌روند.

<sup>1</sup>Otsu's method



شکل ۶- تأثیر استفاده از الگوریتم‌های مورفولوژی؛ (الف) تصویر اصلی گرفته شده با سیستم بینایی، (ب) تصویر پردازش شده بعد از اعمال الگوریتم‌های مورفولوژی

عملیات مورفولوژی به‌طور کلی برای حذف نویز، پر کردن حفره‌ها و شناسایی اشیاء در تصاویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌ای از عملیات مورفولوژی در شکل (۶) نشان داده شده است و تأثیر استفاده از الگوریتم‌های مورفولوژی بر روی تصویر حاصل از تصویربرداری سیستم بینایی در آن قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود نویزهای تصویر لبه‌های صفحات مبدل‌های حرارتی حذف شده و همچنین حفره‌های موجود در تصویر پر شده است. الگوریتم اصلی استفاده شده روش نازک‌سازی<sup>۱</sup> می‌باشد. در ادامه به توضیحی از دو روش اتسو و نازک‌سازی تصویر (استخراج اسکلت تصویر) و همچنین به استفاده از منحنی اسپیلاین به‌منظور حذف داده‌های پرت پرداخته شده است.

### ۳-۲-۱- روش اتسو

اتسو یکی از روش‌های مناسب برای آستانه‌گذاری در تصاویر با هیستوگرام<sup>۲</sup> دارای دو قله می‌باشد. در این روش حد آستانه‌ای برای تصویر انتخاب می‌شود که دو قله هیستوگرام تصویر را از هم تفکیک کند. برای یک تصویر، ۲۵۶ مقدار برای حد آستانه وجود دارد. هر کدام از حد آستانه‌ها هیستوگرام تصویر را به دو گروه تقسیم می‌کنند. به ازای هر گزینه از حد آستانه، هیستوگرام تصویر به دو گروه تقسیم می‌شود، سپس طبق رابطه (۱) واریانس بین کلاسی بین دو گروه محاسبه می‌شود و این کار برای همه ۲۵۶ مقدار انجام می‌شود و به ازای هر کدام واریانس بین کلاسی محاسبه می‌شود. در انتها واریانس بین کلاسی تمامی حد آستانه‌ها باهم مقایسه می‌شود و حد آستانه بهینه انتخاب می‌شود. حد آستانه‌ای بهینه است که در آن واریانس بین کلاسی ماکزیمم شود [۲۰]. به عبارتی حد آستانه‌ای بهینه است که باعث شود میانگین دو قله هیستوگرام بیشترین فاصله را نسبت به هم داشته باشند.

$$\sigma_w^2(t) = w_0(t) \cdot \sigma_0^2(t) + w_1(t) \cdot \sigma_1^2(t) \quad (1)$$

<sup>۱</sup>Thinning methodologies

<sup>۲</sup>Histogram

## ۳-۲-۲-۲- الگوریتم نازک‌سازی تصویر

به منظور کاهش حجم اطلاعات یا به عبارتی حذف دیتاهای اضافی که به فرآیند استخراج ویژگی‌های مدنظر کمکی نمی‌کنند در کنار حفظ ارتباط و شکل کلی اشیاء از این الگوریتم استفاده شده است. الگوریتم‌های متعددی به این منظور استفاده شده است که در پژوهش حاضر از روش زیر استفاده شده است [۲۱].

سه شرط  $G_1$ ،  $G_2$ ،  $G_3$  و  $G'_3$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

شرط  $G_1$ :

$$X_H(p) = 1 \quad (1-1)$$

تعریف می‌شود:

$$X_H(p) = \sum_{i=1}^4 b_i \quad (1-2)$$

$$b_i = \begin{cases} 1, & \text{if } x_{2i-1} = 0 \text{ and } (x_{2i} = 1 \text{ or } x_{2i+1} = 1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

شرط  $G_2$ :

$$2 \leq \min\{n_1(p), n_2(p)\} \leq 3 \quad (1-3)$$

تعریف می‌شود:

$$n_1(p) = \sum_{i=1}^4 x_{2i-1} \vee x_{2i} \quad (1-4)$$

$$n_2(p) = \sum_{i=1}^4 x_{2i} \vee x_{2i+1}$$

شرط  $G_3$ :

$$(x_2 \vee x_3 \vee \bar{x}_8) \wedge x_1 = 0 \quad (2)$$

شرط  $G'_3$ :

$$(x_6 \vee x_7 \vee \bar{x}_4) \wedge x_5 = 0 \quad (3)$$

حال اگر:

۱. در زیر تکرار اول سه شرط  $G_1, G_2, G_3$  برقرار باشند، پیکسل  $p$  حذف می‌شود.
۲. در زیر تکرار دوم سه شرط  $G_1, G_2, G'_3$  برقرار باشند، پیکسل  $p$  حذف می‌شود.

### ۳-۲-۳- منحنی اسپیلاین

در برخورد ناشی از لیزر خطی با لبه‌های صفحات، دو شی مستطیل شکل کاملاً روشن در تصویر تشکیل می‌شود (شکل (۵)). با توجه به آنکه درز میان دو لبه صفحات نشان‌دهنده مسیر جوش است، مختصات هر نقطه از مسیر، نقطه وسط خط فاصل مراکز دو لبه (دو شی مستطیل) می‌باشد.

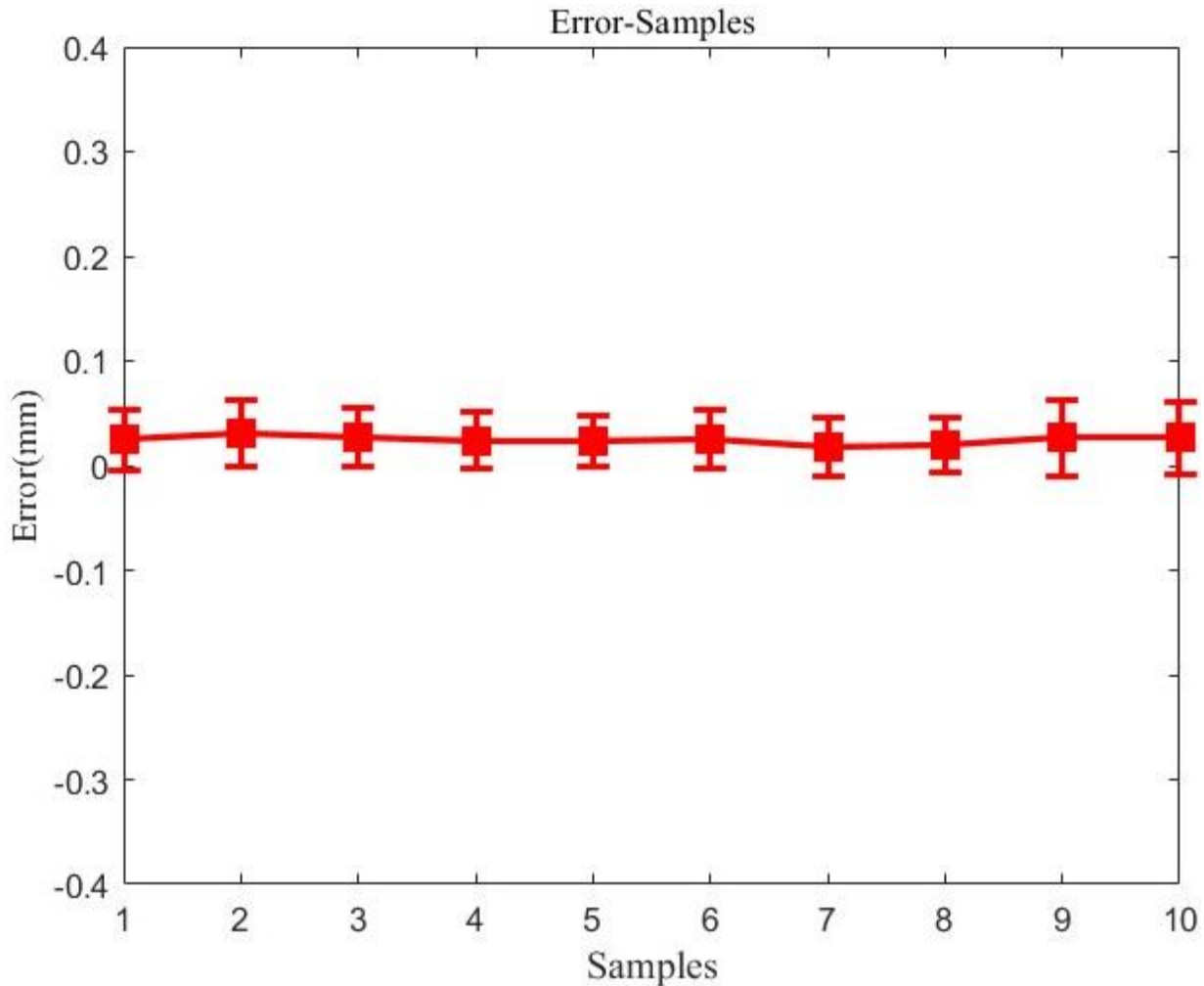
همانطور که قبل تر بیان شد، به دلایل مختلف همچون تغییر لحظه‌ای نور لیزر خطی، کثیفی سطح لبه‌های درز و غیره، کیفیت تصویر گرفته شده کاهش یافته و در نتیجه خطا تشخیص پروفیل مسیر افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود پس از تشخیص پروفیل مسیر جوش، داده‌ها دارای نویز می‌باشند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم دورن‌یابی اسپیلاین یک منحنی به داده‌های اصلی برازش شده است و در نتیجه آن نواسانات داده‌ها کاهش یافته است.

با استفاده از این الگوریتم، منحنی اسپیلاین مکعبی به داده‌های  $(XX, YY)$  (مختصات نقاط مسیر جوش) برازش می‌شود [۲۲]. تابع اسپیلاین  $f$  معادل است با مقادیر برازش شده  $YY_i$  به ازاء  $XX_i$  در اندازه  $(XX)$ :  $i = 1$  که باعث کمینه شدن رابطه (۲) را می‌شود:

$$S = P \sum_{j=1}^n |YY_j - f(XX_j)|^2 + (1 - P) \int_{x_1}^{x_n} (f''(t))^2 dt \quad (4)$$

### ۴- تحلیل و اعتبارسنجی

نتایج آزمایش جوشکاری انجام شده بر روی نمونه مسیرهای جوش با دو روش جوشکاری به صورت بصری و جوشکاری مبتنی بر بینایی در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به منظور اعتبارسنجی استخراج مختصات مسیر جوش معیاری با توجه به ضخامت صفحات مبدل و قطر گان لیزر تعریف شده است. بیان می‌شود که ضخامت هر لبه جوش برابر با ۱ میلی‌متر است که با کنار هم قرار گرفتن آن‌ها به طور کل ضخامت مسیر جوش برابر با ۲ میلی‌متر خواهد بود، همچنین قطر جوش لیزر در برخورد با صفحات برابر با ۱/۶ میلی‌متر است به عبارتی اگر گان لیزر به اندازه بیشتر از ۰/۴ میلی‌متر از مسیر درست خود جابه‌جا شود، جوش به طور کامل تشکیل نشده و عیوب جوش به وجود می‌آید. از ۱۰ نمونه مسیر مختلف تصویربرداری شده است و با اعمال الگوریتم پردازش تصویر توسعه داده شده، میزان خطا تشخیص مسیر محاسبه شده است. همانطور که می‌توان در نمودار (۱) مشاهده کرد به طور میانگین، میزان خطا تشخیص از ۰/۳۷ میلی‌متر بیشتر نشده است که نشان دهنده دقت بالای تشخیص مسیر و همچنین چون این میزان دقت در نمونه‌های مختلف تقریباً یکسان است لذا تکرارپذیری سیستم را نیز نشان می‌دهد.

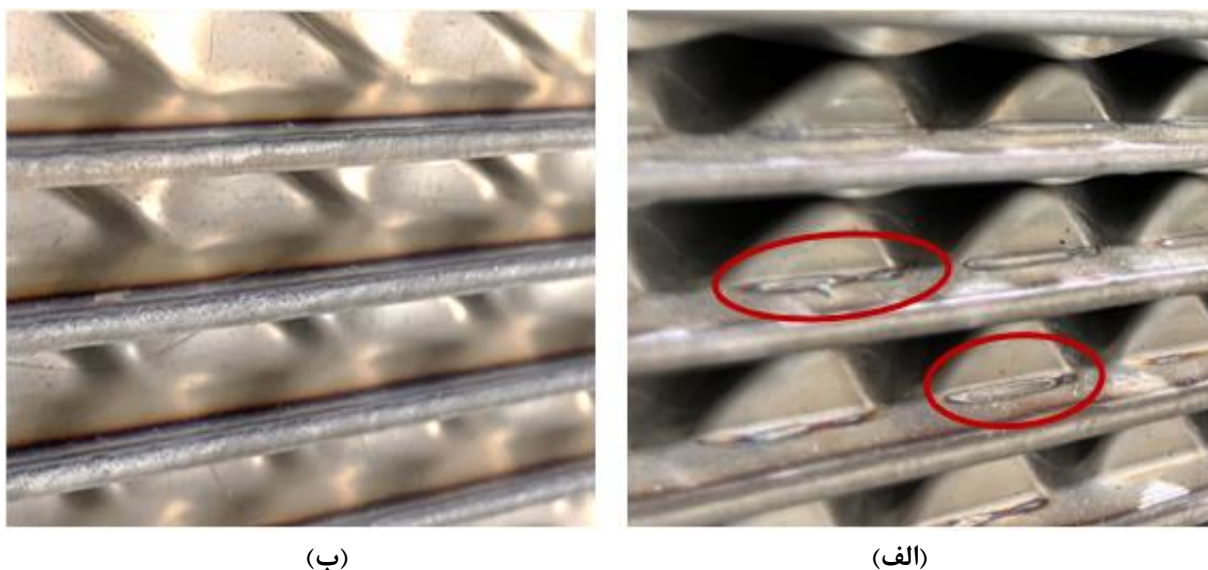


نمودار ۱- نمودار میانگین با انحراف معیار میزان خطا الگوریتم در ۱۰ تست مختلف

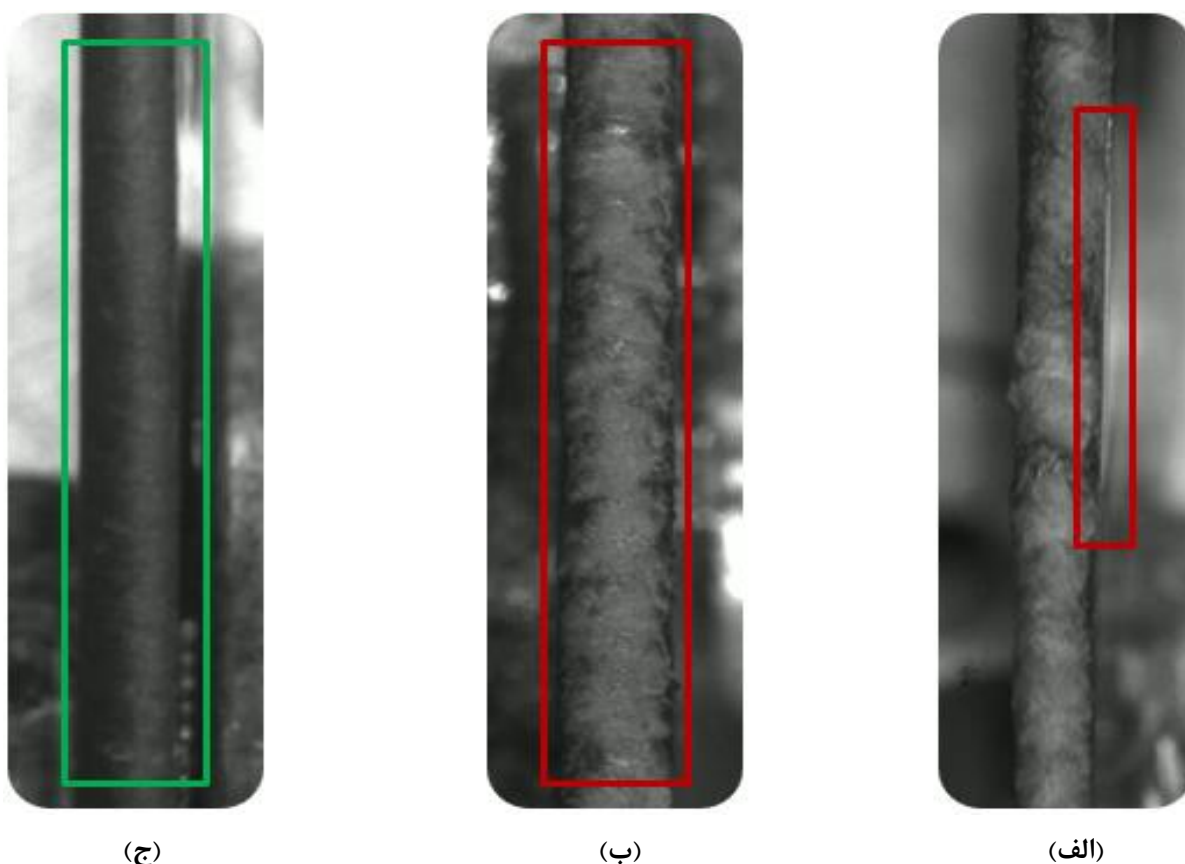
جدول ۲- مقایسه زمان جوشکاری دو مسیر با روش بصری و بینایی

زمان جوشکاری مسیر ۲	زمان جوشکاری مسیر ۱	روش جوشکاری
۱۹ دقیقه	۱۸ دقیقه	جوشکاری بصری
۳/۵ دقیقه	۳ دقیقه	جوشکاری مبتنی بر بینایی

همانطور که قبل تر بیان شد علاوه بر اهمیت دقت تشخیص مسیر جوش، مدت زمان کل جوشکاری نیز حائز اهمیت است به عبارتی جوشکاری بصری فرآیندی بسیار کند می‌باشد به طوری که یک مسیر ۷۵ سانتی متری را در مدت زمان تقریبی میانگین ۱۸ دقیقه جوش می‌دهد ولی جوشکاری مبتنی بر بینایی، همان مسیر را در مدت زمان ۳ دقیقه جوش می‌دهد و این مسئله یعنی استفاده از روش جوش مبتنی بر بینایی می‌تواند در صنعت، زمان کل جوشکاری هر مسیر را تا ۵/۵ برابر کاهش دهد. در جدول (۲) زمان جوشکاری دو نمونه جوش نشان داده شده است.



شکل ۷- (الف) جوشکاری بصری و در نتیجه آسیب به ناحیه شورون‌ها که با دایره قرمز مشخص شده‌اند، (ب) جوشکاری با استفاده از سیستم تشخیص مسیر و بدون آسیب به ناحیه شورون‌ها



شکل ۸- (الف) نمونه جوش در روش تشخیص مسیر بصری ذوب نشدن کامل دو لبه، (ب) نمونه جوش در روش تشخیص مسیر بصری ناپیوستگی سطح، (ج) نمونه جوش در روش تشخیص مسیر مبتنی بر بینایی

حال پس از بررسی صحت برنامه، تست جوشکاری با تشخیص مسیر جوش مبتنی بر سیستم بینایی توسعه داده شده بر روی چند نمونه مختلف انجام شده که در ادامه به بررسی کیفیت جوش حاصل پرداخته شده است.

معیارهای مختلفی جهت بررسی کیفیت جوش مدنظر قرار گرفته است که یکی از آن‌ها، میزان آسیب به ناحیه شورون‌های صفحات می‌باشد. در صورت برخورد پرتو لیزر جوش به ناحیه شورون‌ها، باعث ایجاد ترک و سوراخ در صفحات شده و کارایی مبدل را پایین می‌آورد که این موضوع در نتیجه تشخیص مسیر نادرست می‌باشد. همانطور که می‌توان در شکل (۷-الف) مشاهده کرد، در روش بصری به ناحیه شورون‌ها آسیب وارده شده است (دایره‌های قرمز رنگ) این در حالی است که در نمونه جوشکاری مبتنی بر بینایی، این ترک‌ها وجود ندارند و نشان می‌دهد تشخیص مسیر جوش به درستی انجام شده است.

یکی دیگر از معیارهای بررسی کیفیت جوش، ذوب شدن کامل دو لبه صفحات است که اگر هر کدام از دو لبه کامل ذوب نشوند، اتصال بین دو صفحه به‌طور کامل برقرار نمی‌شود و همانطور که قبل‌تر بیان شد، این اتفاق موجب آب‌بندی ناقص صفحات مبدل‌های حرارتی می‌شود. همانطور که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود دو لبه در روش جوشکاری بصری به درستی ذوب نشده‌اند. این عیب LOF نام دارد که یکی از پرتکرارترین عیوب در جوشکاری لبه‌ای است. همچنین یکی دیگر از معیارهای مهم بررسی کیفیت جوش، پیوستگی سطح جوش انجام شده است. هر گونه ناپیوستگی در جوش سبب کاهش عمر کاری مبدل می‌شود (شکل ۸-ب). همانطور که در شکل (۸-پ) نشان داده شده است، در روش جوشکاری مبتنی بر بینایی این مشکلات وجود ندارند و جوش کاملاً یکنواخت و بدون عیب است.

## ۵- مقایسه نتایج با بقیه پژوهش‌ها

در این بخش مقایسه‌ای میان پژوهش حاضر و نتایج بخشی از کار بنفیان و همکاران در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، با توجه به اهمیت بررسی میزان بهبود برنامه توسعه داده شده نسبت به کارهای مشابه، انجام شده است. در پژوهش ذکر شده سه نوع از سیستم‌های بینایی برای تشخیص مسیر جوش مورد بررسی قرار گرفته است که در یکی از آن‌ها پردازش به‌صورت آفلاین بوده و مشابه برنامه توسعه داده شده در این پژوهش است. در سیستم این مقاله ابتدا از کل مسیر یک عکس گرفته می‌شود سپس پردازش شده و مسیر جوش استخراج و به ربات ارسال و جوشکاری انجام می‌شود. به دلیل آنکه از کل مسیر یک عکس گرفته می‌شود استخراج انحناهای مسیر جوشکاری ورق‌های نازک به طول کامل ممکن نمی‌باشد. همچنین پردازش عکس و سپس برازش منحنی مسیر به داده‌ها فرآیندی وقت‌گیر است، در نتیجه زمان کل صرف شده ۷ دقیقه می‌باشد که در مقایسه با پژوهش حاضر (۳ دقیقه) بیشتر می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برنامه‌ای به جهت تشخیص مسیر جوش لیزری لبه‌ای صفحات مبدل‌ها با هدف کاهش زمان کل جوشکاری و بهبود کیفیت جوش با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر و تکنیک‌های پردازش داده‌ها، پیشنهاد شده است. به‌منظور صحت‌سنجی برنامه تشخیص مسیر، مختصات مسیر ۱۰ نمونه تست استخراج شده است و میزان خطا تشخیص در حدود ۰/۰۳۷ میلی‌متر می‌باشد که از میزان مجاز ۰/۴ میلی‌متر کمتر بوده است؛ همچنین برنامه پیشنهادی توانسته است زمان کل جوشکاری هر مسیر را تا ۵/۵ برابر کاهش دهد. در آخر با انجام تست جوش مشاهده شده است که سیستم بینایی توسعه داده شده توانسته از ایجاد مشکلاتی

ناشی از تشخیص مسیر نادرست و در نتیجه انحراف گان لیزر و آسیب به روکش صفحات و ناحیه شورون‌ها، جلوگیری کند و نیز با ذوب شدن کامل دو لبه صفحات، موجب ایجاد جوش یکنواخت و با کیفیت شده است.

## تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت مالی و معنوی شرکت دانش بنیان طاهاقالب توس فراهم شده است (شماره پژوهانه: CIR-02-01). نویسندگان از واحد مهندسی مرکز فناوری‌های نوین شرکت طاهاقالب توس کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## مراجع

- [1] O. Levenspiel, "Introduction to Heat Exchangers," pp. 243–249, 1998, doi: 10.1007/978-1-4899-0104-0\_12.
- [2] J.-P. Vasseur, and A. Dunkels, "Industrial Automation," *Interconnecting Smart Objects with IP*, pp. 325–333, 2010, doi: 10.1016/B978-0-12-375165-2.00021-1.
- [3] K. Xu, K. Qin, H. Wu, and R. Smith, "A New Computer-aided Optimization-based Method for the Design of Single Multi-pass Plate Heat Exchangers," *Processes*, Vol. 10, No. 4, pp. 767, 2022, <https://doi.org/10.3390/pr10040767>.
- [4] Z. Sun, and J. C. Ion, "Laser Welding of Dissimilar Metal Combinations," *Journal of Materials Science*, Vol. 30, No. 17, pp. 4205–4214, 1995, <https://doi.org/10.1007/BF00361499>.
- [5] W. J. Shao, X. F. Liu, and Z. J. Wu, "A Robust Weld Seam Detection Method Based on Particle Filter for Laser Welding by using a Passive Vision Sensor," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, No. 5–8, pp. 2971–2980, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04029-x>.
- [6] A. Rout, B. B. V. L. Deepak, and B. B. Biswal, "Advances in Weld Seam Tracking Techniques for Robotic Welding: A Review," *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, Vol. 56, pp. 12–37, 2019, doi: 10.1016/J.RCIM.2018.08.003.
- [7] M. Kos, E. Arko, H. Kosler, and M. Jezeršek, "Remote-laser Welding System with in-line Adaptive 3D Seam Tracking and Power Control," *Procedia CIRP*, Vol. 81, pp. 1189–1194, 2019, doi: 10.1016/J.PROCIR.2019.03.290.
- [8] N. Wei, X. Yin, Z. Li, J. Xi, R. Yang, and N. Kong, "A Seam Tracking Algorithm Utilizing Spatio-temporal Information of Laser Vision in Thin Plate Butt Welding for Shipbuilding," *Advances in Transdisciplinary Engineering*, Vol. 37, pp. 74–81, 2023, doi: 10.3233/ATDE230124.
- [9] Y. Zou, and W. Zhou, "Automatic Seam Detection and Tracking System for Robots Based on Laser Vision," *Mechatronics*, Vol. 63, pp. 102261, 2019, doi: 10.1016/J.MECHATRONICS.2019.102261.

- [10] Y. Xu, G. Fang, N. Lv, S. Chen, and J. Jia Zou, "Computer Vision Technology for Seam Tracking in Robotic GTAW and GMAW," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 32, pp. 25–36, 2015, doi: 10.1016/J.RCIM.2014.09.002.
- [11] P. Kiddee, Z. Fang, and M. Tan, "An Automated Weld Seam Tracking System for Thick Pate using Cross Mark Structured Light," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016 87:9, Vol. 87, No. 9, pp. 3589–3603, 2016, doi: 10.1007/S00170-016-8729-7.
- [12] Y. Xu, G. Fang, N. Lv, S. Chen, and J. Jia Zou, "Computer Vision Technology for Seam Tracking in Robotic GTAW and GMAW," *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, Vol. 32, pp. 25–36, 2015, doi: 10.1016/J.RCIM.2014.09.002.
- [13] Y. Ding, W. Huang, and R. Kovacevic, "An On-line Shape-matching Weld Seam Tracking System," *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, Vol. 42, pp. 103–112, 2016, doi: 10.1016/J.RCIM.2016.05.012.
- [14] J. Muhammad, H. Altun, and E. Abo-Serie, "Welding Seam Profiling Techniques Based on Active Vision Sensing for Intelligent Robotic Welding," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 1–4, pp. 127–145, 2017, doi: 10.1007/S00170-016-8707-0/METRICS.
- [15] Y. Zou, X. Wei, and J. Chen, "Conditional Generative Adversarial Network-based Training Image Inpainting for Laser Vision Seam Tracking," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 134, pp. 106140, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106140>.
- [16] J. Fan, S. Deng, F. Jing, C. Zhou, L. Yang, T. Long, and M. Tan, "An Initial Point Alignment and Seam-tracking System for Narrow Weld," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 16, No. 2, pp. 877–886, 2020, <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2919658>.
- [17] D. M. Boldrin, L. M. Tosatti, B. Previtali, and A. G. Demir, "Seam Tracking and Gap Bridging during Robotic Laser Beam Welding via Grayscale Imaging and Wobbling," *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, Vol. 89, pp. 102774, 2024, doi: 10.1016/J.RCIM.2024.102774.
- [18] H. Golnabi, and A. Asadpour, "Design and Application of Industrial Machine Vision Systems," *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, Vol. 23, No. 6, pp. 630–637, 2007, doi: 10.1016/J.RCIM.2007.02.005.
- [19] S. H. Dau, T. P. Dang, L. N. A. Khang, N. H. Chi, and L. H. Trang, "A Proposal for an Optical System Utilizing Two Lighting Methods Combined with an Offset Mirror System Applied to an Automated Quality Inspection System for Glass Bottle Bodies," *IFMBE Proc*, vol. 122, pp. 1033–1046, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-90194-2\_75.
- [20] T. Y. Goh, S. N. Basah, H. Yazid, M. J. Aziz Safar, and F. S. Ahmad Saad, "Performance Analysis of Image Thresholding: Otsu Technique," *Measurement*, Vol. 114, pp. 298–307, 2018, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2017.09.052.
- [21] L. Lam, and S. W. Lee, "Thinning Methodologies—A Comprehensive Survey," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 9, pp. 869–885, 1992, doi: 10.1109/34.161346.

[22] H. L. Weinert, "A Fast Compact Algorithm for Cubic Spline Smoothing," *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 53, No. 4, pp. 932–940, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.csda.2008.10.036>.

## فهرست نمادهای انگلیسی

$n$  تعداد ورودی‌های  $XX$  (اندازه  $XX$ )

$P$  متغیر تعیین‌کننده میزان صافی منحنی اسپیلاین (به ازاء مقادیر کوچک، منحنی هموارتر است و بالعکس)

$p$  پیکسل

$w_0(t)$  وزن کلاس پیش‌زمینه

$w_1(t)$  وزن کلاس پس‌زمینه

$XX$  مختصات در محور اول مسیر جوش

$x$  مقدار پیکسل‌های همسایه  $p$  با شروع از سمت راست‌ترین و به صورت پادساعتگرد

$YY$  مختصات در محور دوم مسیر جوش

## نمادهای یونانی

$\sigma_w^2(t)$  واریانس کل

$\sigma_0^2(t)$  واریانس کل پیش‌زمینه

$\sigma_1^2(t)$  واریانس کل پیش‌زمینه

## Laser Welding Seam Tracking in Fully-welded Heat Exchanger Plates using Image Processing Algorithms

**Yasamin Azmi**

Bachelor's Student, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mashhad, Iran  
azmi.yasamin@mail.um.ac.ir

**Mina Nourollahi**

Bachelor's Student, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mashhad, Iran  
mina.noorollahi@mail.um.ac.ir

\*Corresponding author: **Mohammad Hossein Farshidianfar**

Assistant Professor, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mashhad, Iran  
farshidianfar@um.ac.ir

**Pouria Oliyazadeh**

Ph.D., Supervisor of Industrial Research Center of TGT, Mashhad, Iran  
pouria\_oliyazadeh@alumni.um.ac.ir

**Seyedeh Ghazal Mahdavian Mashhadi**

Master's degree, Research Engineering of CIR, Mashhad, Iran  
s.gh.mahdavianmashhadi@alumni.um.ac.ir

### Abstract

Fully welded heat exchangers, a type of plate heat exchanger, are vital for high-pressure and high-temperature applications, where effective sealing is critical to prevent leaks and ensure operational efficiency. In this study, laser welding is utilized to achieve precise sealing of the plates. A primary factor in achieving high-quality laser welding is the accurate detection of the weld path, which is particularly challenging due to the plates' thin thickness of approximately 1 mm. Manual visual path detection by an operator is labor-intensive, time-consuming, and often lacks the necessary precision for consistent results. As an alternative, a vision system is employed to capture high-resolution images of the weld path before welding begins. These images are processed using a custom-developed computer program to generate the motion path for the CNC machine's axes. The path detection error is approximately 0.037 mm, demonstrating the program's high precision. Visual quality control of welds on multiple samples confirms the superior quality and reliability of the developed system, offering significant improvements over traditional methods.

*Keywords:* Fully-welded heat exchangers, Laser welding, Path generation, Vision system, Image processing, Spline interpolation