

Non-Destructive Evaluation of the Welded Joints Using Infrared Thermography Technique

Abbas Bayati¹ | Mohammadreza Farahani^{2✉}

1. School of Mechanical engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: abbasbayati96@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, School of Mechanical engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mrfarahani@ut.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 13 August 2023

Revised 31 December 2023

Accepted 1 February 2024

Keywords:

Infrared Thermography,
Non-Destructive Tests,
Welded Joints,
Weld Inspection.

ABSTRACT

One of the most important and challenging processes of manufacturing industrial parts has always been the process of creating various joints, including permanent joints by the welding method. Considering the sensitivity of the welded joints in terms of defects and cracks caused by the process, checking the accuracy, precision, and health of the created weld is one of the most important concerns of researchers and craftsmen. For this reason, the development of non-destructive methods to check the integrity and quality of the joints created by the welding process has been increasing in recent years. However, each of these methods has always shown certain limitations in the evaluation of welded parts. Among these limitations is the need to cool down the part before the inspection process and the need for direct contact with the part. The infrared thermography method, as one of the advanced non-destructive inspection methods, has been widely used in the inspection of welded joints in recent years due to its many advantages. Among the advantages of infrared thermography, it can be mentioned that it is non-contact, online, and has the ability to quickly evaluate a very large area of the part. Also, this process can check the health of the part during its working life in an assembled set. These unique features have turned the infrared thermography method into a method with a very high potential in the testing, process control, and automation of the welding process. In addition, the ability to synchronize with the methods of artificial intelligence, machine learning, deep learning, and signal and image processing has shown the potential of this method to be used more and more in modern industries in the future. Also, the research fields in this area are very untouched and many research gaps are felt in this field. In the upcoming research, an attempt has been made to create a suitable background for this process by presenting an overview of the principles of infrared thermography. Also, the applications of infrared thermography in the welding process, especially in non-destructive inspections, have been investigated, in which different methods of infrared thermography in non-destructive inspections have been described and explained.

Cite this article: Bayati, A., Farahani, M. (2023). Non-Destructive Evaluation of the Welded Joints Using Infrared Thermography Technique. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 13-26. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.405853.1123>

ارزیابی غیرمخرب اتصالات جوشی با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

عباس بیاتی^۱ | محمدرضا فراهانی^۲ ✉

۱. دانشکده ی مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: abbasbayati96@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشکده ی مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده:

همواره یکی از مهم‌ترین و پرچالش‌ترین فرآیندهای تولید قطعات صنعتی، فرایند ایجاد اتصالات مختلف از جمله اتصال دائمی با روش جوشکاری بوده است. با توجه به حساس بودن اتصالات جوشکاری شده از نظر عیوب و ترک خوردگی ناشی از فرآیند، بررسی صحت، دقت و سلامت جوش ایجاد شده یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های پژوهش‌گران و صنعتگران است. به همین دلیل توسعه‌ی روش‌های غیرمخرب بررسی صحت و کیفیت اتصالات ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری، در سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای داشته است. اما همواره هر یک از این روش‌ها محدودیت‌های خاصی در بررسی قطعات جوش داده شده نشان داده‌اند. از جمله‌ی این محدودیت‌ها نیاز به سرد شدن قطعه پیش از فرآیند بررسی و نیاز به تماس مستقیم با قطعه است. روش دمانگاری فروسرخ به عنوان یکی از روش‌های بررسی غیرمخرب پیشرفته، در سال‌های اخیر در بررسی اتصالات جوشی، به دلیل مزایای بسیار کاربرد زیادی پیدا کرده است. از جمله مزایای روش دمانگاری فروسرخ می‌توان به غیر تماسی بودن، برخط بودن و توانایی بررسی سریع سطح بسیار بزرگ اشاره کرد. این فرآیند در هنگام کار قطعه در مجموعه‌ی سرهم بندی شده نیز می‌تواند سلامت آن را در طول عمر کاری بررسی کند. این ویژگی‌های منحصر به فرد، روش دمانگاری فروسرخ را به یک روش با پتانسیل بسیار بالا در بررسی، کنترل فرایند و اتوماسیون فرآیند جوشکاری تبدیل کرده است. توانایی دمانگاری فروسرخ در همگام سازی شدن با روش‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و پردازش سیگنال، پتانسیل این روش را برای کاربرد هرچه بیشتر در صنایع نوین در آینده‌ای نه چندان دور نشان داده است. در پژوهش پیش رو با ارلئه‌ی یک مرور کلی در خصوص کلیات و اصول دمانگاری فروسرخ، سعی در ایجاد یک پیش زمینه‌ی مناسب در خصوص این فرایند شده است. سرانجام کاربرد های روش دمانگاری فروسرخ در فرآیند جوشکاری به خصوص در بازرسی‌های غیر مخرب بررسی شده است که در آن روش‌های مختلف دمانگاری فروسرخ در بررسی‌های غیر مخرب با بررسی مزایا و معایب توضیح داده شده است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۲۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۱۲

کلیدواژگان:

دمانگاری فروسرخ،
آزمون‌های غیرمخرب،
اتصالات جوشی،
بازرسی جوش.

استناد: بیاتی، نام؛ عباس و فراهانی، محمد. (۱۴۰۲). ارزیابی غیرمخرب اتصالات جوشی با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ. *مجله فناوری*

آزمون‌های غیرمخرب، ۳(۳)، ۱۳-۲۶. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.405853.1123>

۱- مقدمه

در صنایع مختلف روش‌های اتصال قطعات مختلف همجنس و غیرهمجنس به یکدیگر به طور کلی به سه دسته‌ی متالورژیکی (جوش)، مکلنیک (پیچ و پرچ) و شیمیایی (چسب‌ها) تقسیم بندی می‌شوند. همواره مقاطع اتصال یافته در سازه‌ها جزو حساس‌ترین بخش‌های سازه به شمار می‌روند و دارای معایب و مشکلات فراوان بوده و یکی از مناطق مستعد برای جدایش قطعات هستند [۱]. در میان این روش‌های اتصال، روش اتصال جوشی یکی از رایج‌ترین، پرکاربردترین، ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌هاست. اتصالات جوشی به دلیل وزن کمتر، استحکام مناسب و آزادی عمل در طراحی همواره مورد توجه بوده‌اند. با وجود مزایای بیشمار اتصال جوشی این اتصالات جزو حساس‌ترین نوع اتصالات به شمار می‌روند. از دلایل این حساسیت وجود تخلخل، مک‌ها و نقایص در جوشکاری به دلیل ذات این فرایند است. از طرف دیگر تغییر شکل‌های ناخواسته، تنش‌های پسماند و ترک‌های جوشی از دیگر معایب این نوع اتصالات است که ناشی از گرم کردن دو قطعه برای ایجاد اتصال می‌باشد [۲]. تقریباً تمام تکنیک‌های ایجاد اتصالات جوشی شامل گرم کردن دو قسمتی است که باید بهم متصل شوند که در این فرایند تغییر ساختار ماده و خواص آن ممکن است اتفاق بیفتد. به صورت دقیق‌تر منطقه‌ی متأثر از گرما^۱ (HAZ) در نزدیکی منطقه‌ی جوشکاری ضعیف شده و با تغییر ساختار متالورژیکی استحکام کمتری را دارا می‌شود و حتی ممکن است این استحکام کمتر از استحکام تمام بخش‌های دیگر سازه باشد. این مکانیزم کاهش استحکام و وجود حباب‌ها و ناخالصی‌ها همگی در هرچه حساس‌تر شدن قسمت جوشکاری شده دخیل هستند [۳].

با توجه به موارد مطرح شده در خصوص حساسیت قسمت‌های جوشکاری شده، نظارت و بازرسی دقیق قطعات جوشکاری شده امری بدیهی به نظر می‌رسد [۴]. زیرا همواره این قطعات در معرض خطر جدایش و شکست از ناحیه‌ی جوش خورده هستند که می‌تواند منجر به فروریزش‌های فاجعه بار شود [۵]. با پیشرفت توامان صنایع و تکنیک‌های جوشکاری، نیاز فزاینده‌ای به روش‌های موثر برای بررسی،

پایش وضعیت برخط و نظارت بر فرایند در زمینه‌ی جوشکاری در هنگام تولید و در هنگام ارائه‌ی سرویس احساس می‌شود. بازرسی‌های دوره‌ای در زمان استفاده از سازه‌ها و قطعات جوش خورده از اهمیت زیادی برخوردار است تا سلامت قطعه در طول دوره‌ی استفاده تضمین شود. آزمون‌های غیرمخرب^۲ (NDT) به مجموعه آزمون‌هایی اطلاق می‌شوند که بدون تخریب سازه یا تأثیر بر روی کیفیت و کاربری آن، نقایص داخلی و سطحی قطعه را مشخص می‌کنند. این روش‌ها برای بررسی صحت عملکرد، کیفیت و وضعیت قطعه در زمان تولید یا در زمان استفاده به کار می‌روند [۶].

آزمون‌های غیرمخرب برای بررسی اتصالات جوشی به شکل چشم‌گیری به کار می‌روند [۷] زیرا علاوه بر مشخص کردن عیوب داخلی و سطحی، کیفیت جوش و شرایط آن در حین کار را نیز بررسی می‌کنند. این روش‌ها بدون نیاز به آسیب رساندن به قطعه یا اختلال در کاربری آن می‌توانند صحت و کیفیت اتصال را بررسی کرده و در بازرسی‌های دوره‌ای در طی عمر قطعه صحت و پایداری اتصال را تضمین کرده و از فروریزش‌های فاجعه بار جلوگیری کنند.

تکنیک‌های مختلف آزمون‌های غیرمخرب از جمله آزمون رادیوگرافی (RT) [۸]، جریان گردابی [۹]، ذرات مغناطیسی (MT) [۱۰]، مایع نافذ (PT) [۱۱] و آزمون فراصوت (سنی [۱۲]، موج برشی [۱۳] و آرایه فازی [۱۴]) در بازرسی‌های جوش به کار گرفته می‌شوند که هر یک با چالش‌ها و محدودیت‌های خاص خود برای تشخیص عیوب جوش رو به رو هستند. برای مثال ضخامت ماده در تست رادیوگرافی می‌تواند باعث محدودیت عملکرد باشد که برای هندسه‌های خاص آن را غیر قابل استفاده می‌کند [۱۵]. یا ذرات مغناطیسی برای سطوح خشن مناسب نیستند و نرخ بالای مثبت کاذب را گزارش می‌کنند. همچنین آزمون مایع نافذ برای تشخیص عیوب سطحی مناسب است و برای سطوح داغ کاربردی ندارد [۱۵]. تست‌های التراسونیک سننی قابلیت ذخیره‌ی اطلاعات دائمی بازرسی را ندارد و نتایج فقط قابلیت بررسی درجا دارند و بعداً توسط دیگران قابل بررسی نیستند. همچنین نیاز به تماس مستقیم با قطعه برای ارسال و دریافت امواج فراصوت در ماده دارد که در

² Non-Destructive Tests¹ Heat Affected Zone

شرایط دما بالا کاربرد آن را بسیار محدود می‌کند [۱۶]. علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده این روش‌ها نیازمند اپراتورهای با مهارت بالا برای انجام بازرسی و تحلیل داده هاست. همین عامل باعث افزایش قیمت تمام شده بازرسی‌های جوشی و غیرقابل اتکا بودن بازرسی هاست. زیرا هر فرد ممکن است به روشی متفاوت داده‌ها را جمع‌آوری کند، آزمون را انجام دهد و نتایج را تحلیل کند. تماس مستقیم ماده در این روش‌ها نیز در بازرسی جوش محدودیت بزرگی به حساب می‌آید زیرا باید زمان کافی به قطعه داده شود تا خنک شده و سپس بازرسی انجام شود. اتصالات جوشی بسته به نوع اتصال از ۳۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند و برای خنک شدن زمانی گاهی تا ۴ ساعت نیاز است. این کار فضای کارگاهی را اشغال کرده و باعث اتلاف زمان تولید و بازرسی و در نتیجه افزایش هزینه‌ها می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهشگران با ترکیب تکنیک‌های آزمون‌های غیرمخرب با روش‌های پردازش تصویر و سیگنال سعی در رفع این معضلات، اتکا پذیری نتایج و بهبود اتوماسیون پذیری این روش‌ها داشته‌اند [۱۷-۱۹].

برخلاف روش‌های سنتی آزمون‌های غیرمخرب دمانگاری فرسوخ^۱ (IRT) مزایای بسیاری را برای بررسی غیرمخرب اتصالات جوشی و حتی ساخت افزایشی [۲۰] فراهم کرده است. این روش که در بازرسی‌های جوشی نسبتاً نوپاست می‌تواند بدون نیاز به تماس با قطعه معایب جوش را بررسی کند. این خصوصیت قابلیت این را فراهم می‌کند که بازرسی جوش در هنگام جوش، بلافاصله بعد از جوشکاری، در زمان مونتاژ قطعات و در حین عملکرد قطعه بدون نیاز به آماده‌سازی سطحی یا روش‌های پیش پردازش دیگر و بدون نیاز به خنک شدن، صورت پذیرد [۲۱]. به طور کلی استفاده از روش دمانگاری فرسوخ مزایای زیر را دارد:

۱. یک تکنیک بدون نیاز به تماس است.
۲. سطح بسیار وسیعی در زمان کوتاهی بررسی می‌شود.
۳. تشعشعات مضرمانند برخی روش‌های

غیرمخرب دیگر ندارد.
 ۴. داده‌ها قابلیت ذخیره‌سازی، پردازش و بررسی بعدی را دارد.
 ۵. هیچ وقفه‌ای در تولید اتفاق نمی‌افتد.
 از معایب این روش می‌توان به بالا بودن هزینه‌ی تجهیزات از جمله دوربین‌های دمانگار اشاره کرد [۲۲]. محدودیت دیگر این روش در شرایط خاصی است که درون قطعه با ماده‌ای که برای تشعشع فرسوخ شفاف نیست، مثل برخی شیشه‌ها، پوشیده شده باشد.
 این روش کاربرد فراوانی در آزمون‌های غیرمخرب برای مواد مختلف از جمله کامپوزیت‌ها [۲۳]، فلزات [۲۴] و پلیمرها [۲۵] دارد. کاربرد‌های بسیار زیاد این روش فقط به آزمون‌های غیرمخرب محدود نشده و کاربرد بسیاری در صنایع مختلف الکتریکی [۲۶]، مکانیکی [۲۷]، عمران [۲۸]، پزشکی [۲۹] و میراث فرهنگی [۳۰] دارد. برخی از این کاربردها شامل بررسی پایش وضعیت [۳۱]، اندازه‌گیری میزان خستگی [۳۲]، برون رفت انرژی از سیستم [۳۳]، بررسی دمای بدن [۳۴] و بررسی ترک‌ها در سازه‌های تاریخی [۳۵] می‌باشد.

دمانگاری فرسوخ به دو روش فعال^۲ و غیرفعال^۳ انجام می‌گیرد. در دمانگاری فعال تحریک بیرونی برای بالا بردن دمای جسم توسط ما صورت می‌گیرد اما در دمانگاری غیرفعال از انرژی گرمایی موجود در خود سازه برای دمانگاری استفاده می‌شود [۳۶]. در بررسی‌های اتصالات جوشی از انواع روش‌های دمانگاری غیرفعال و فعال استفاده می‌شود. برخی از روش‌های دمانگاری فعال بر اساس روش تحریک عبارتند از: آزمون دمانگاری پالسی فرسوخ^۴، آزمون دمانگاری قفل فرسوخ^۵، آزمون دمانگاری فراصوت فرسوخ^۶، آزمون دمانگاری اسکن لیزری فرسوخ^۷ و آزمون اسکن امواج حرارتی فرسوخ گریپینگ^۸.

در پژوهش پیش رو پس از بررسی اصول اولیه دمانگاری فرسوخ و کاربردهای آن در بررسی اتصالات جوشی به بررسی مطالعات انجام شده توسط انواع روش‌های دمانگاری مطرح شده در بازرسی جوشی و مزایا و معایب

⁵ Infrared Lock-In Thermography Testing
⁶ Infrared Ultrasonic Thermography Testing
⁷ Infrared Laser Scanning Thermography Testing
⁸ Grating Infrared Thermal Wave Scanning Test

¹ Infrared Thermography
² Active
³ Passive
⁴ Infrared Pulsed Thermography Testing

هریک از این روش‌ها می‌پردازیم.

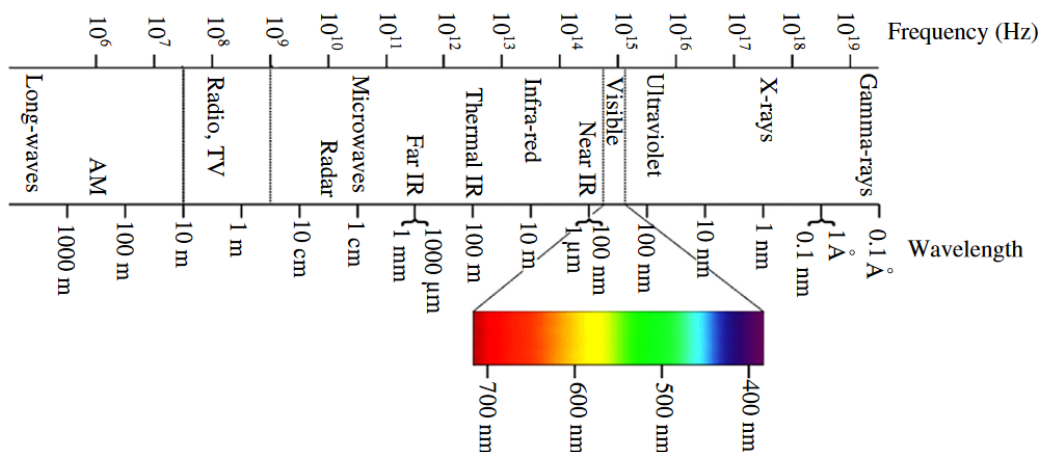
۲- اصول اولیه ی دمانگاری فروسرخ

در منابع دیگری به تفصیل به اصول اولیه و معادلات حاکم بر دمانگاری فروسرخ پرداخته شده است [۳۷] برای فراهم کردن یک پیش زمینه‌ی مناسب در خصوص دمانگاری فروسرخ، در این بخش به بررسی اصول اولیه‌ی حاکم بر این فرایند در دو بخش کلیات و روابط فیزیکی بیان شده است.

۲-۱ کلیات دمانگاری فروسرخ

دمانگاری فروسرخ علم مرتبط با جمع آوری و پردازش اطلاعات حرارتی از دستگاه‌های اندازه‌گیری غیر تماسی می‌باشد [۳۸]. پایه و اساس این علم تشعشع فروسرخ است.

این تشعشع یکی از امواج الکترومغناطیسی است با طول موج بلندتر از نور مرئی در بازه‌ی ۰/۷۵ تا ۱۰۰۰ میکرومتر است. هر جسمی با دمای بالای صفر مطلق مدام از خود تشعشع فروسرخ ساطع می‌کند. این امواج به سه دسته ی فروسرخ نزدیک (۰/۷۵ تا ۳ میکرومتر)، فروسرخ متوسط (۳ تا ۶ میکرومتر) و فروسرخ دور (۶ تا ۱۰۰۰ میکرومتر تقسیم می‌شوند. این امواج برای چشم انسان غیر قابل مشاهده است [۳۹]. به همین دلیل برای جمع آوری و پردازش اطلاعات ناشی از این تشعشعات نیاز به دستگاه‌ها و وسایل اندازه‌گیری خاصی است. طیف کامل امواج الکترومغناطیسی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱) طیف کامل امواج الکترومغناطیسی [۴۰]

هر نقطه تمرکز کرده و با تبدیل آن به سیگنال الکتریکی آن را در یک تصویر دمانگاری نمایش می‌دهند. هرچه نقطه داغ‌تر باشد، نقطه‌ی مرتبط با آن در تصویر روشن‌تر خواهد بود [۴۲]. این مکانیزم در کاربرد یک دمانگاری در لحظه‌ی یک جسم گرم در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است. این تصویر اجزای مختلف دوربین را برای دریافت و پردازش تابش فروسرخ و تبدیل آن به تصویر لحظه‌ای را نشان می‌دهد.

امواج فروسرخ با طول موج ۲-۱۳ میکرومتر توسط تصویربردارهای حرارتی فروسرخ درک و استفاده می‌شوند و فقط طول موج‌های ۱-۲/۵، ۳-۵ و ۸-۱۳ میکرومتر از طریق هوا می‌توانند به مقصد برسند [۴۱].

حسگرهای حرارتی فروسرخ نیز براساس خواص این سه طیف طراحی و ساخته می‌شوند. هرچه حرارت جسم بیشتر باشد تشعشع فروسرخ گسیل شده شدیدتر است. مهم‌ترین بخش یک سیستم دمانگاری حسگر حرارتی آن می‌باشد و به دو بخش عمده‌ی حرارتی و نیمه رساناها تقسیم می‌شوند. این حسگرها شامل پیکربندی نوری (لنز، آینه و غیره)، المان‌های حسگر، سیستم خنک کننده و بخش‌های الکترونیکی می‌باشد. دوربین‌های حرارتی بر تشعشع وارده از

معادله‌ی پلانک (۳) می‌تواند محاسبه شود.

$$L_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (3)$$

که در آن λ طول موج تابش (میکرومتر)، L_{λ} توان تابیده شده توسط جسم سیاه بر واحد سطح و برای طول موج مشخص است ($Wm^{-1}\mu m^{-1}sr^{-1}$)، T دمای مطلق، C_1 و C_2 به ترتیب ثابت اول و دوم تابش هستند. با انتگرال گیری از رابطه‌ی پلانک روی همه‌ی فرکانس‌ها، قانون استفان-بولتزمن که به صورت زیر بیان می‌شود بدست خواهد آمد:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

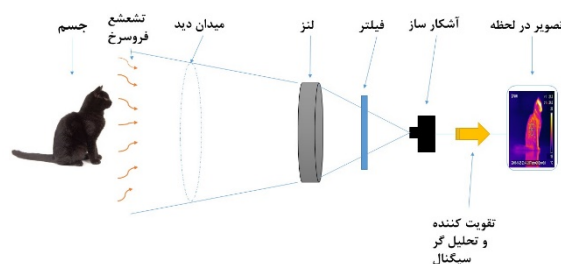
که در آن q نرخ گسیل انرژی (W)، سطح تابنده‌ی انرژی (m^2)، T دمای مطلق جسم (K)، σ ثابت استفان-بولتزمن ($\sigma = 5.676 \times 10^{-8} Wm^{-2}k^{-4}$) و ε تابندگی برای سطح تابنده برای طول موج ثابت و دمای مطلق ثابت است. برای جسم سیاه تابندگی همواره برابر یک است اما برای جسم واقعی کمتر از این مقدار است. اگر تابندگی ثابت و غیروابسته به طول موج باشد جسم یک جسم خاکستری نامیده می‌شود اما یک جسم واقعی نه تابندگی ثابتی دارد و نه غیر وابسته به طول موج است. اما در بازه‌های کوچک طول موج می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت و با این فرض می‌توان جسم واقعی را یک جسم خاکستری پنداشت [۲۱]. طول موج پیک طیف گسیلی نیز با قانون جابه جایی وین به دمای مطلق سطح نشر مربوط می‌شود:

$$\lambda_{max} = 2897.7 \mu m K \quad (5)$$

در دمانگاری فرسرخ، تشعشع گسیل شده توسط جسم با روشی غیر تماسی توسط حسگر فرسرخ با استفاده از معادله‌ی استفان-بولتزمن حس می‌شود و با آن دمای جسم مشخص می‌شود [۴۱].

۳- کاربرد دمانگاری فرسرخ در جوش

با توجه به دامنه‌ی وسیع کاربرد دمانگاری فرسرخ و وجود دما به عنوان عضوی جدایی ناپذیر در فرآیند جوشکاری، یکی از کاربردهای مهم دمانگاری فرسرخ در جوشکاری است. با بدست آمدن تصاویر برخط از توزیع گرادیان دما با استفاده از فناوری دمانگاری فرسرخ، مهم‌ترین نیازهای جوشکاری یعنی پایش میدان دمای جوشکاری، فرایند جوشکاری و تشخیص عیوب جوشکاری



شکل ۲) پیکربندی تصویر برداری فرسرخ

در این تصویر فاصله‌ی بین جسم تا لنز یک پارامتر مهم است. لنز وظیفه‌ی جمع آوری انرژی، فیلتر وظیفه‌ی عبوردهی طیف خاصی از نور، آشکار ساز وظیفه‌ی تبدیل انرژی فرسرخ به سیگنال الکتریکی و بخش تقویت کننده و تحلیل گر وظیفه‌ی تبدیل سیگنال الکتریکی به تصویر دمانگاری را برعهده دارند.

۲-۲ روابط فیزیکی حاکم بر دمانگاری فرسرخ

سه حالت مختلف برای تشعشع تابیده شده بر یک جسم متصور است: عبور، بازتاب و جذب. کسری از انرژی تابیده شده به جسم که از جسم عبور کند یا جذب شود یا بازتاب کند بیانگر سه پارامتر مربوط به جسم است در مواجهه با انرژی تابیده شده به آن است. سه پارامتر توصیف کننده‌ی این پدیده عبارتند از: جذب طیفی α_{λ} ، که بیانگر میزان کسر طیف جذب شده توسط جسم است، بازتاب طیفی ρ_{λ} ، که بیانگر میزان کسر طیف بازتاب شده توسط جسم و عبور طیفی τ_{λ} ، بیانگر میزان کسر طیف عبور کرده از جسم است [۴۳]. این سه پارامتر بستگی به طول موج دارد و همانطور که در معادله ۱ نشان داده شده است، برای هر طول موجی باید جمع این سه پارامتر برابر واحد شود:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (1)$$

برای جسم مات کل انرژی تابیده شده یا بازتاب می‌شود یا جذب می‌شود بنابراین معادله (۱) به معادله (۲) تبدیل می‌شود.

$$\alpha_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (2)$$

موادی که بازتابش و عبور پذیری صفر باشد و تمام انرژی تابیده شده جذب شود، جسم سیاه نامیده می‌شوند. تشعشع الکترومغناطیسی ساطع شده از جسم سیاه ($W_{\lambda b}$) با

هنگامی که توزیع دما روی سطح صفحات تغییر می‌کند، ولتاژ جوش و سرعت تغذیه سیم که از پارامترهای تاثیر گذار بر عمق نفوذ هستند، با توجه به اطلاعات بازخورد و گرمای ورودی جوش به منظور جبران تغییرات ابعاد هندسی صفحه و دستیابی به عمق نفوذ مورد نظر، تنظیم می‌شد. با پیشرفت شبکه‌های عصبی [۴۷]، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق [۴۸] این تکنولوژی‌ها پیشرفت کرده و مدل‌های سازگار تری برای کنترل عمق نفوذ و ردیابی درز جوش بنا نهاده شد. برای مثال یو و همکاران با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANN) برای جوشکاری لب به لب با گاز محافظ (GMAW) مدلی ایجاد کردند که با بررسی دمای یک نقطه دلخواه در HAZ توسط دمانگاری فروسرخ به صورت برخط عمق نفوذ را کنترل می‌کند و با بررسی‌های تجربی برای تایید این مدل به دقت بالای ۹۶ درصدی برای عمق نفوذ دست یافتند [۴۹].

۳-۳ آزمون غیرمخرب جوش و پایش کیفیت

روش‌های مختلف دمانگاری فروسرخ برای بررسی عیوب جوشکاری و کیفیت و سلامت جوش در انواع روش‌های جوشکاری کاربرد گسترده‌ای دارند. تست دمانگاری فروسرخ از رابطه متناظر بین تابش حرارتی و دما استفاده می‌کند. با اشکال مختلف تحریک حرارتی فعال، ساختار جسم را می‌توان با تفاوت توزیع دمای سطح نشان داد و سپس می‌توان نقص را به طور دقیق تعیین و شناسایی کرد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هنگامی که سیگنال حرارتی به سطح جسم اعمال می‌شود، اگر ماده یکنواخت باشد و در جهت انتشار نقصی نداشته باشد، موج حرارتی به آرامی در جسم منتشر می‌شود. در نهایت، سیگنال پاسخ حرارتی روی سطح به طور یکنواخت توزیع می‌شود، یعنی توزیع دما در سطح نمونه یکسان است و هیچ گونه ناهنجاری وجود ندارد. اگر عیوب در نمونه وجود داشته باشد، انعکاس زمانی رخ می‌دهد که موج گرما به نقص منتقل می‌شود و در نتیجه توزیع دمای سطح به طور ناگهانی تغییر می‌کند [۵۰].

مرتفع شده است. از کاربردهای فن آوری دما نگاری فروسرخ در جوشکاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۳-۱ ردیابی درز^۱

با توجه به اینکه جوشکاری دستی توسط اپراتور انسانی دارای خطرات و چالش‌های زیادی همچون دمای بالا و آسیب بدنی می‌باشد امروزه با پیشرفت تکنولوژی راه‌هایی برای اتوماسیون و استفاده از ربات‌ها برای جوشکاری ابداع شده است. یکی از مهم‌ترین مسائل در جوشکاری با ربات‌ها یا سیستم‌های خودکار که بر کیفیت جوش ایجاد شده تاثیر مستقیم می‌گذارد رهیابی درز جوش یا محل رسیدن دو قطعه بهم توسط این ماشین هاست. برای اینکار از سنسورهای مختلفی استفاده می‌شود تا مسیر جوشکاری را دائماً برای ربات یا ماشین جوشکاری خودکار ارسال کند [۴۴]. یکی از کاربردهای مهم دمانگاری فروسرخ در این سنسورهاست. جزئیات این روش در پژوهش‌های مختلف انجام شده در این زمینه بیان شده است. برای مثال گائو و همکارانش از دمانگاری فروسرخ برای تحقیق در مورد ردیابی درز در طول جوشکاری لیزر فیبر فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده کردند. برای این کار انحراف بین کانون پرتو لیزر و مرکز درز جوش با پارامتر گرادیان حرارتی استخراج شد و موقعیت فوکوس پرتو لیزر در زمان واقعی با استفاده از معادلات کالیبراسیون تنظیم شد [۴۵].

۳-۲ کنترل عمق نفوذ

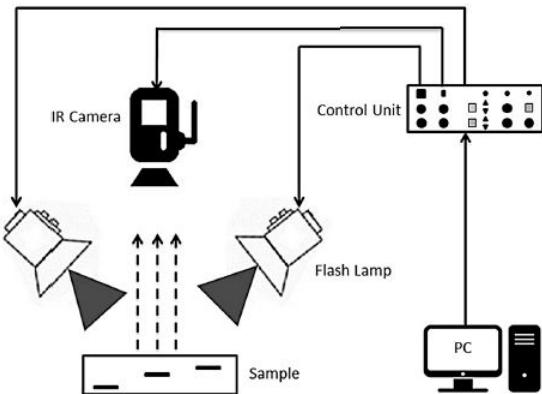
یکی دیگر از کاربردهای دمانگاری فروسرخ در جوشکاری خودکار کنترل عمق نفوذ جوش است. با بررسی و پایش دائمی توزیع دما در سطح مورد جوشکاری می‌توان با ایجاد یک سیستم حلقه بسته و فیدبک دائمی به سیستم جوشکاری، پارامترهای جوش را به نحوی تنظیم کرد تا عمق نفوذ مد نظر ایجاد شده و کیفیت مورد نظر در دسترس قرار گیرد. یک مثال ساده از این کاربرد در پژوهش وینکل و همکاران آمده است که در آن با استفاده از یک سنسور فروسرخ عمق نفوذ را در جوشکاری زیر پودری کنترل کردند [۴۶]. برای این کار ابتدا مدل انتقال حرارت ایجاد شد.

² Artificial Neural Network

¹ Seam tracking

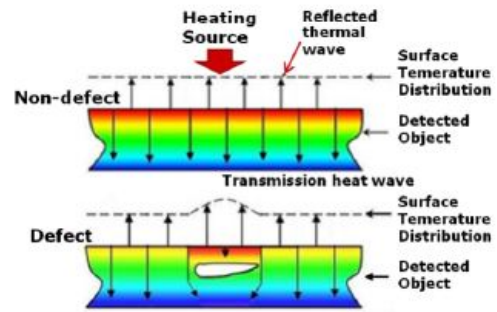
۳-۳-۱ آزمون دمانگاری پالسی فرسوخ

دمانگاری پالسی در صنعت هواپیمای کاربردهای مختلفی مانند ارزیابی اجزای هواپیما استفاده شده است [۵۱]. این فناوری قادر است به صورت برخط و خیلی سریع عیوب مختلف مانند ترک خوردگی، آسیب خستگی، زنگ زدگی، خوردگی [۵۲] و لایه لایه شدن [۵۳، ۵۴] در مواد مختلف را تشخیص دهد [۵۰]. لامپ‌های فرسوخ، لامپ‌های هالوژن و تفنگ‌های هوای گرم برای تولید یک یا چند پالس حرارتی روی سطح قطعات در عرض ۲ تا ۱۰ میلی‌ثانیه استفاده می‌شوند. گرما به داخل ماده منتقل می‌شود و با عیوب موجود در تعامل است. توزیع ناهمگن حرارت بر روی سطح قطعه ناشی از عیوب داخلی با استفاده از دوربین فرسوخ اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۴ یک سامانه متداول دمانگاری پالسی را نشان می‌دهد. یک مولد حرارت خارجی (لامپ‌های فرسوخ، لامپ‌های هالوژن، تفنگ‌های هوای گرم)، دوربین فرسوخ، واحد کنترل و رایانه با نرم‌افزار پردازش داده معمولاً تجهیزات مورد نیاز برای انجام دمانگاری پالسی هستند [۵۵-۵۷].



شکل ۴ سامانه دمانگاری پالسی [۵۸]

در سال‌های اخیر روش‌های دیگری از دمانگاری پالسی ارائه شده است و در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال آووکاتو و همکاران دمانگاری پالسی را در مد بازتابی با تحریک فلش لامپ برای اتصال جوش داده شده با روش جوش مقاومتی پروجکشن انجام دادند که

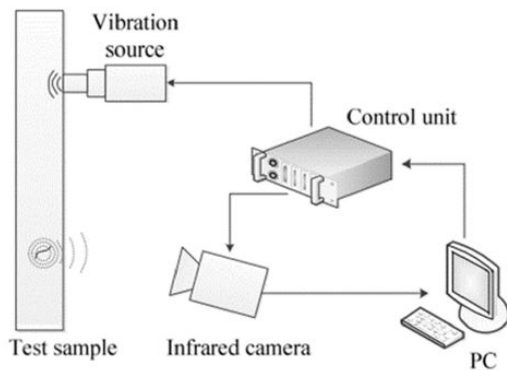


شکل ۳ نحوه ی تشخیص عیوب توسط دمانگاری فرسوخ [۵۰]

سازوکار بیان شده اصل کلی بررسی‌های دمانگاری را بیان می‌کند اما همانطور که در بخش‌های قبلی بیان شد روش‌های مختلف دمانگاری فعال از جمله آزمون دمانگاری پالسی فرسوخ، آزمون دمانگاری قفل فرسوخ، آزمون دمانگاری فراصوت فرسوخ، آزمون دمانگاری اسکن لیزری فرسوخ و آزمون اسکن امواج حرارتی فرسوخ گریپینگ و آزمون دمانگاری غیر فعال برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. در دمانگاری غیرفعال، ویژگی‌های مورد نظر برای بررسی طبیعتاً در دمای بالاتر یا پایین تر از پس زمینه قرار دارند. پروفیل‌های دمای غیرعادی یک مشکل بالقوه را نشان می‌دهد و یک فاکتور کلیدی تفاوت دما است که با توجه به یک مرجع خاص است که اغلب به عنوان مقدار ΔT یا نقطه داغ نامیده می‌شود. به طور کلی، دمانگاری غیرفعال نسبتاً کیفی است زیرا هدف صرفاً تشخیص ناهنجاری‌ها است. در صورتی که دمای پس زمینه با دمای جسم تفاوت چندانی نداشته باشد تشخیص سخت است که از معایب این روش به شمار می‌آید. همانطور که پیش تر گفته شد این روش کیفی است و با دقت بالا نمی‌تواند عیوب را تشخیص دهد. پس کاربردهای روش دمانگاری غیر فعال بیشتر در پایش وضعیت برخط پروسه هاست. این روش برای پایش وضعیت برخط جوشکاری روشی عالی است. از طرف دیگر، در دمانگاری فعال، لازم است مقداری انرژی به نمونه بازرسی شده هدایت شود تا اختلاف دمایی قابل توجهی به دست آید که شاهد وجود ناهنجاری‌های زیرسطحی باشد. این روش در کاربرد‌های بازرسی بعد از پروسه بیشتر کاربرد دارد. بنابراین این روش برای بازرسی‌های جوش مناسب است. از معایب این روش نیاز به صرف انرژی برای تحریک قطعه است که در دمانگاری غیرفعال وجود نداشت.

۳-۳-۳ آزمون دمانگاری فراصوت فروسرخ

این آزمون که تلفیقی از تکنیک آزمون التراسونیک و دمانگاری فروسرخ است به نام دمانگاری ارتعاشی نیز شناخته می‌شود و برای تشخیص دقیق و سریع ترک‌ها و عیوب زیرسطحی و نزدیک سطح مناسب است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، امواج صوتی ایجاد شده توسط یک منبع ارتعاشی مثل یک منبع پیزوالکتریک به جسم منتقل می‌شود و هنگامی که به یک عیب می‌رسد، به دلیل اصطکاک، تبدیل به گرما می‌شود. گرمای ایجاد شده به سطح جسم انتقال پیدا کرده و با دوربین فروسرخ مشاهده می‌شود. یک سامانه معمول برای دمانگاری ارتعاشی شامل منبع فراصوت، دوربین فروسرخ، واحد کنترل و یک رایانه با نرم افزار پردازش داده است [۶۶].



شکل ۵) سامانه آزمون دمانگاری ارتعاشی [۶۶]

در پژوهش‌های زیادی از این روش برای بررسی اتصالات جوشی استفاده شده است. برای مثال از این روش برای تشخیص ترک‌ها در جوش اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های نازک آلایژ آلومینیوم استفاده شده است [۶۷].

۳-۳-۴ آزمون‌های دمانگاری دیگر

روش‌های پرکاربرد در بازرسی جوش با روش دمانگاری در بخش‌های قبلی بررسی شد. روش‌های دیگر آزمون دمانگاری فروسرخ فعال وجود دارد که کاربرد کمتری در بازرسی‌های جوشی دارد. این روش‌ها شامل دمانگاری جریان ادی [۶۸]، دمانگاری لیزر-نقطه‌ای و دمانگاری لیزر-خطی [۶۹]. به طور کلی در جدول ۱ روش دمانگاری فروسرخ با سایر روش‌های بررسی غیر مخرب از نظر مزایا و معایب به طور مفصل بررسی شده است.

با روش دمانگاری پالسی فازی^۱ (PPT) پس پردازش شد [۵۹]. در پژوهشی دیگر برای بررسی عیوب موجود در جوش فولاد زنگ نزن از روش دمانگاری پالسی القایی^۲ (PIT) استفاده شده است [۶۰]. همچنین از دمانگاری پالسی به همراه اندازه گیری‌های مقاومتی الکتریکی برای بررسی جوش‌های فراصوت فلزات نیز استفاده شده است [۶۱].

۳-۳-۲ دمانگاری قفل فروسرخ

دمانگاری قفل فروسرخ از منبع گرمای مدوله شده دوره‌ای برای گرم کردن جسم به صورت دوره ای استفاده می‌کند [۶۲، ۶۳]. اگر نقصی در جسم وجود داشته باشد، نقص بر روی توزیع دمای سطح بالای آن اثر دوره‌ای خواهد داشت، حتی در پیک‌های نسبتاً کم. بنابراین بین محل معیوب و غیرمعیوب تفاوت فاز وجود خواهد داشت. مزیت زاویه فاز این است که نسبت به تغییرات موضعی در نور یا گسیل سطح حساسیت کمتری دارد، زیرا وضوح عمق تست تحریک تک فرکانس آن ثابت است (یعنی طول موج حرارتی ثابت). دوربین حرارتی فروسرخ توزیع دمای سطح جسم را جمع آوری می‌کند. سیگنال‌های نویز، سیگنال‌های DC و سایر سیگنال‌های تداخل در توالی تصویر گرمایی جمع آوری شده وجود دارد. هدف از قفل کردن، جدا کردن سیگنال‌های مفید ضعیف از بسیاری از سیگنال‌های تداخلی است. منابع تحریک حرارتی مورد استفاده در روش قفل فاز شامل لامپ هالوزن، لامپ فروسرخ، لیزر، فراصوت، الکترومغناطیسی و غیره است [۶۴].

از کاربردهای این روش می‌توان به پژوهش انجام شده توسط لی و همکاران اشاره کرد که از دمانگاری قفلی برای اندازه گیری اندازه ناگت جوش نقطه‌ای مقاومتی استفاده کرد. آنها روش‌های دمانگاری فراصوت فروسرخ، عکس فروسرخ و دمانگاری قفل را مقایسه کردند. نتیجه گیری آنها این بود که روش قفل کردن مناسب ترین روش برای اندازه‌گیری ناگت جوش است. با این حال، دمانگاری قفل یک نقطه ضعف بزرگ در مورد اتوماسیون دارد و آن اینکه زمان بیشتری از دمانگاری پالسی مصرف می‌کند [۶۵].

² Pulsed Inductive Thermography

¹ Pulsed Phase Thermography

جدول ۱) مقایسه‌ی روش‌های مختلف بازرسی غیرمخرب

روش بازرسی	دامنه‌ی کاربرد	مزایا	معایب
آزمون اشعه‌ی X	ریخته‌گری، جوشکاری، مواد غیر فلزی، کامپوزیت	عدم محدودیت به مواد و هندسه - توانایی حفظ سوابق بازرسی به صورت دائمی - حساس‌ترین به عیوب حجمی مانند تخلخل، ورود سرباره و نفوذ ناقص	سختی یافتن ترک عمود بر پرتو - سختی یافتن عیوب عمقی - الزامات سختگیرانه در نصب و ایمنی - مناسب نبودن برای تشخیص آنلاین در محل - طولانی بودن چرخه تشخیص - هزینه بالا
آزمون فراصوت	آهنگری، جوشکاری، اتصالات چسبی، مواد غیر فلزی	حساس به نقص - نتایج سریع و محل دقیق نقص	دشواری تشخیص قطعات کوچک، نازک و پیچیده - نیاز به عامل جفت شونده - سرعت پایین - طولانی بودن دوره تشخیص
آزمون ذرات مغناطیسی	مواد فرومغناطیس	حساسیت بالاتر از بازرسی فراصوت یا رادیوگرافی - سادگی عملیات هنگام آزمایش عیوب سطحی مواد فرومغناطیسی - نتایج بصری	محدود به مواد فرومغناطیسی - دشوار بودن اندازه‌گیری کمی عمق نقص
آزمون مایع نافذ	مواد مختلف	تجهیزات و عملیات ساده و حساسیت بالا - نمایش نقایص به طور مستقیم نمایش - مناسب برای بازرسی قطعات کار بزرگ و قطعات نامنظم و همچنین نگهداری و بازرسی قطعات در محل	پیمیدگی فرآیند - فرار بودن محلول تست - قابل تشخیص بودن فقط عیوب باز شده در سطح - عدم توانایی در بازرسی مواد متخلخل سطحی
آزمون جریان گردابی	مواد رسانا	خودکار بودن تجهیزات - عدم نیاز به تمیز کردن سطح قطعه آزمایش - صرفه جویی در زمان	حساس به اثر لبه ناشی از هندسه قطعه و تغییر ناگهانی - نمایش کاذب
آزمون دمانگاری فرسوخ	مواد فلزی و غیر فلزی	سریع - بزرگ بودن منطقه تشخیص - بصری بودن نتایج آزمون - بدون آلودگی یا تماس با قطعه آزمایش	نیاز به مدل محاسباتی ریاضی موثرتر برای تعیین عمق عیوب برای قطعات ساختاری با شکل پیچیده - عمق تشخیص محدود عیوب - تجهیزات گران قیمت

۴- نتیجه‌گیری

روش دمانگاری فرسوخ یکی از روش‌های غیرمخرب پیشرفته برای بررسی اتصالات جوشی است که دامنه‌ی کاربرد آن در جوشکاری در ده سال اخیر با توجه به اتوماسیون روزافزون صنایع و نیاز به جوشکاری‌های خودکار افزایش چشم‌گیری داشته است. این روش برای پایش وضعیت درحین جوشکاری، بعد از آن و بدون نیاز به زمان برای خنک شدن قطعه کاربرد دارد. این روش، بر خلاف روش‌های غیرمخرب دیگر، روشی غیر تماسی، از راه دور، برخط و درمحل است. انواع عیوب جوشی با استفاده از تکنیک‌های مختلف حرارت نگاری تشخیص داده می‌شود و اندازه و محل عیب کاملاً مشخص می‌گردد. با همگام سازی

تصویر برداری فرسوخ با علوم درحال پیشرفت و نوین از جمله یادگیری ماشینی، هوش مصنوعی و الگوریتم‌های پردازش تصویر و سیگنال این روش می‌تواند در ارزیابی کمی غیرمخرب جوشکاری و کنترل عملیات جوشکاری خودکار نقش آفرین باشد. در پژوهش انجام شده مقدمات، کلیات و روابط حاکم بر دمانگاری فرو سرخ بیان و کاربرد آن در جوشکاری به خصوص ارزیابی غیرمخرب عیوب جوشکاری به تفصیل بحث و بررسی شد. این بررسی‌ها می‌تواند به ایجاد یک پیش زمینه‌ی مناسب برای پژوهش گران و صنعت گران درخصوص فرایند دمانگاری فرسوخ و کاربرد آن در بررسی‌های غیرمخرب اتصالات جوشی و کارهای انجام شده در این زمینه منجر شود. با توجه به نو پا بودن این فرایند در بررسی‌های غیرمخرب اتصالات جوشی، خلاهای تحقیقاتی

- surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 33 (3), 290-300.
- [11] Reddy, K.A. (2017). Non-destructive testing, evaluation of stainless steel materials. *Materials Today: Proceedings*, 4 (8), 7302-7312.
- [12] Amiri, N., Farrahi, G. H., Kashyzadeh, K. R., & Chizari, M. (2020). Applications of ultrasonic testing and machine learning methods to predict the static & fatigue behavior of spot-welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 52, 26-34.
- [13] Xu, Z., M. Wu, and W. Fan. (2021). Sparse-based defect detection of weld feature guided waves with a fusion of shear wave characteristics. *Measurement*, 174, 109018.
- [14] Li, W., Z. Zhou, and Y. Li (2019). Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array. *Ultrasonics*, 96, 75-82.
- [15] Dorafshan, S., M. Maguire, and W. Collins. (2018). Infrared thermography for weld inspection: feasibility and application. *Infrastructures*, 3 (4), 45.
- [16] Lhémery, A., Calmon, P., Lecœur-Taïbi, I., Raillon, R., & Paradis, L. (2000). Modeling tools for ultrasonic inspection of welds. *NDT & E International*, 33(7), 499-513.
- [17] Sudhagar, S., M. Sakthivel, and S.A.A. Daniel (2020). Application of image processing to radiographic image for quantitative assessment of friction stir welding quality of aluminium 2024 alloy. *Measurement*, 152, 107294.
- [18] Vasilev, M., MacLeod, C., Galbraith, W., Javadi, Y., Foster, E., Dobie, G., ... & Gachagan, A. (2021). Non-contact in-process ultrasonic screening of thin fusion welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 445-454.
- [19] Meshkizadeh, P. and M. Farahani. (2022). Developing effective thermal signal processing to improve thermographic non-destructive inspection of metallic components. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 37 (4), 367-385.
- [20] Meshkizadeh, P., Farahani, M., Rezaee Hajideh, M., & Heidari-Rarani, M. (2020). Implementing thermal image processing techniques for enhancing the detectability of defects in thermography of additive manufacturing components. *NDT Technology*, 2(6), 36-45.
- [21] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305-12348.
- بسیاری در این زمینه وجود دارد. بسیاری از روش‌های دمانگاری فروسرخ همچنان برای بررسی اتصالات جوشی انجام نشده است.
- ۵- تعارض منافع**
- هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.
- ۶- منابع**
- [1] Meola, C., Carlomagno, G. M., Squillace, A., & Giorleo, G. (2004). The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints. *Infrared physics & technology*, 46(1-2), 93-99.
- [2] Messler Jr, R.W. (2008). Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy. *John Wiley & Sons*.
- [3] Lippold, J.C. (2014). Welding metallurgy and weldability. *John Wiley & Sons*.
- [4] Gao, P., Wang, C., Li, Y., & Cong, Z. (2015). Electromagnetic and eddy current NDT in weld inspection: A review. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 57(6), 337-345.
- [5] France, E. (2019). The alexander L. Kielland disaster revisited: A review by an experienced welding engineer of the catastrophic north sea platform collapse. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19 (4), 875-881.
- [6] Helal, J., M. Sofi, and P. Mendis. (2015). Non-destructive testing of concrete: A review of methods. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14 (1), 97-105.
- [7] Deepak, J. R., Raja, V. B., Srikanth, D., Surendran, H., & Nickolas, M. M. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3732-3737.
- [8] Boaretto, N. and T.M. Centeno. (2017). Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI. *Ndt & E International*, 86, 7-13.
- [9] Almeida, G., Gonzalez, J., Rosado, L., Vilaça, P., & Santos, T. G. (2013). Advances in NDT and materials characterization by eddy currents. *Procedia Cirp*, 7, 359-364.
- [10] Zolfaghari, A., A. Zolfaghari, and F. Kolahan. (2018) Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the

- through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. *Building and Environment*, 146, 190-205.
- [34] Wang, Q., Zhou, Y., Ghassemi, P., McBride, D., Casamento, J. P., & Pfefer, T. J. (2021). Infrared thermography for measuring elevated body temperature: Clinical accuracy, calibration, and evaluation. *Sensors*, 22(1), 215.
- [35] De Capua, C., R. Morello, and I. Jablonski. (2018). Active and eddy current pulsed thermography to detect surface crack and defect in historical and archaeological discoveries. *Measurement*, 116, 676-684.
- [36] Mohammadian, M., Akbari, D., Farahani, M., & Faraji Kalajahi, P. (2022). Nondestructive inspection of gas turbine blades by active thermography using different fluids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(12), 1553-1563.
- [37] Meola, C. (2012). Origin and theory of infrared thermography. *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends, Bentham eBooks*, 3-28.
- [38] Maldague, X. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.
- [39] Modest, M.F. and S. Mazumder. (2021). Radiative heat transfer. *Academic press*.
- [40] Ralston, J.C. and A.D. Strange. (2013). Developing selective mining capability for longwall shearers using thermal infrared-based seam tracking. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (1), 47-53.
- [41] Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring—A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55.
- [42] Suriani, M. J., Ali, A., Khalina, A., Sapuan, S. M., & Abdullah, S. (2012). Detection of defects in kenaf/epoxy using infrared thermal imaging technique. *Procedia Chemistry*, 4, 172-178.
- [43] Möllmann, K. P., Karstädt, D., Pinno, F., & Vollmer, M. (2005). Selected critical applications for thermography: Convections in fluids, selective emitters and highly reflecting materials. In *In: InfraMation 2005: proceedings/sponsored and published by the Inframation Training Center.... Vol. 6, 161-174 (pp. 161-174)*.
- [44] Rout, A., B. Deepak, and B. Biswal (2019). Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. *robotics and computer-integrated manufacturing*, 56, 12-37.
- [45] Gao, X., D. You, and S. Katayama. (2012). Infrared
- [22] Dávila-Sacoto, M. A., Hernández-Callejo, L., Alonso-Gómez, V., Gallardo-Saavedra, S., & González-Morales, L. (2021). Low-cost infrared thermography in aid of photovoltaic panels degradation research. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (101), 20-30.
- [23] Ardebili, A., M. Farahani, and S. Asghari. (2020). Thermography with radiation excitation for non-destructive evaluation of composite and sheet metal. *NDT Technology*, 2 (5), 3-13.
- [24] Kolagar, A. M., Cheraghzadeh, M., Akbari, D., & Farahani, M. (2021). Nondestructive Evaluation of Gas Turbine Blade Cooling Holes Blockage by Thermography. *NDT Technology*, 2(6), 46-52.
- [25] Meshkizadeh, P., Rezaee Hajideh, M., Farahani, M., & Heidari-Rarani, M. (2021). Thermal signal reconstruction and employment of K clustering method for inspection of additive manufactured polymer parts. *NDT Technology*, 2(7), 60-69.
- [26] Muttillio, M., Nardi, I., Stornelli, V., de Rubeis, T., Pasqualoni, G., & Ambrosini, D. (2020). On field infrared thermography sensing for PV system efficiency assessment: Results and comparison with electrical models. *Sensors*, 20(4), 1055.
- [27] Osornio-Rios, R.A., J.A. Antonino-Daviu, and R. de Jesus Romero-Troncoso. (2018). Recent industrial applications of infrared thermography: A review. *IEEE transactions on industrial informatics*, 15 (2), 615-625
- [28] Lucchi, E. (2018). Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3077-3090.
- [29] Jasti, N., Bista, S., Bhargav, H., Sinha, S., Gupta, S., Chaturvedi, S. K., & Gangadhar, B. N. (2019). Medical Applications of Infrared Thermography: A Narrative Review. *Journal of Stem Cells*, 14(1).
- [30] Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Karoglou, M., Delegou, E. T., Alexakis, E., & Keramidis, V. (2018). Multispectral applications of infrared thermography in the diagnosis and protection of built cultural heritage. *Applied Sciences*, 8(2), 284.
- [31] Herraiz, Á.H., A.P. Marugán, and F.P.G. Márquez. (2020). A review on condition monitoring system for solar plants based on thermography. *Non-destructive testing and condition monitoring techniques for renewable energy industrial assets*, 103-118.
- [32] Crupi, V., G. Chiofalo, and E. Guglielmino. (2010). Using infrared thermography in low-cycle fatigue studies of welded joints. *Welding Journal*, 89 (9), 195-200.
- [33] Nardi, I., Lucchi, E., de Rubeis, T., & Ambrosini, D. (2018). Quantification of heat energy losses

- 15(10), 3697.
- [56] Nategh, K. F., & Farahani, M. (2022). M. Improving the nondestructive thermography inspection results for detection of circular defects in coated metals using principal component analysis. *NDT Technology*, 2(9), 33-40.
- [57] Nategh, K. F., & Farahani, M. (2022). M. Evaluating the circular defect detection capability in thermography testing by the use of analytical method. *NDT Technology*, 3(3), 1-9.
- [58] Chung, Y., Shrestha, R., Lee, S., & Kim, W. (2020). Thermographic inspection of internal defects in steel structures: analysis of signal processing techniques in pulsed thermography. *Sensors*, 20(21), 6015.
- [59] Dell'Avvocato, G., Palumbo, D., Pepe, R., & Galietti, U. (2021, February). Non-destructive evaluation of resistance projection welded joints (RPW) by flash thermography. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1038, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- [60] Cheng, Y., Bai, L., Yang, F., Chen, Y., Jiang, S., & Yin, C. (2016). Stainless steel weld defect detection using pulsed inductive thermography. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(7), 1-4.
- [61] McGovern, M.E., T.J. Rinker, and R.C. Sekol. (2019). Assessment of Ultrasonic Welds Using Pulsed Infrared Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 2 (1).
- [62] Khoshkbar, R., Farahani, M., Safarabadi, M., & Asghari, S. (2019). Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates. *NDT Technology*, 2(4), 38-45.
- [63] Ardebili, A., Farahani, M., & Asghari, S. (2020). Thermography with radiation excitation for non-destructive evaluation of composite and sheet metal. *NDT Technology*, 2(5), 3-13
- [64] Lee, S., Nam, J., Hwang, W., Kim, J., & Lee, B. (2011). A study on integrity assessment of the resistance spot weld by Infrared Thermography. *Procedia Engineering*, 10, 1748-1753.
- [65] Roemer, J., Pieczonka, L., Szewdo, M., Uhl, T., & Staszewski, W. J. (2013). Thermography of metallic and composite structures-review of applications. *Int. Work. Smart Mater. Struct. SHM*, 18(11).
- [66] Stepinski, T., T. Uhl, and W. Staszewski (2013). *Advanced structural damage detection: from theory to engineering applications*, John Wiley and Sons.
- [67] Guo, X. (2020). Ultrasonic infrared thermography of aluminium thin plates for crack inspection in image recognition for seam tracking monitoring during fiber laser welding. *Mechatronics*, 22 (4), 370-380.
- [46] Wikle Iii, H. C., Kottilingam, S., Zee, R. H., & Chin, B. A. (2001). Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process. *Journal of materials processing technology*, 113(1-3), 228-233.
- [47] Ghanty, P., Vasudevan, M., Mukherjee, D. P., Pal, N. R., Chandrasekhar, N., Maduraimuthu, V., ... & Raj, B. (2008). Artificial neural network approach for estimating weld bead width and depth of penetration from infrared thermal image of weld pool. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(4), 395-401.
- [48] Buongiorno, D., Prunella, M., Grossi, S., Hussain, S. M., Rennola, A., Longo, N., ... & Brunetti, A. (2022). Inline defective laser weld identification by processing thermal image sequences with machine and deep learning techniques. *Applied Sciences*, 12(13), 6455.
- [49] Yu, R., Han, J., Bai, L., & Zhao, Z. (2021). Identification of butt welded joint penetration based on infrared thermal imaging. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1486-1495.
- [50] Qu, Z., P. Jiang, and W. Zhang (2020). Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques. *Sensors*, 20 (14), 3851.
- [51] Ciampa, F., Mahmoodi, P., Pinto, F., & Meo, M. (2018). Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components. *Sensors*, 18(2), 609.
- [52] Ahmadi, A., M. Farahani, and A. Ardebili. (2020). Applying pulse thermography technique for corrosion defect evaluation on the steel plates. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 7 (5), 24-32.
- [53] Ardebili, A. and M. Farahani. (2020). Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells Using Pulse Thermography. *Modares Mechanical Engineering*, 20 (9), 2303-2312.
- [54] Ardebili, A. and M. Farahani. (2022). Delamination Defect Evaluation in CFRP Composite Patches by the Use of Active Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 41 (3), 61.
- [55] Shaloo, M., Schnall, M., Klein, T., Huber, N., & Reitingner, B. (2022). A Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes. *Materials*,

- friction stir welded joints. *IEEE Sensors Journal*, 20 (12), 6524-6531.
- [68] Taram, A., Roquelet, C., Meilland, P., Dupuy, T., Kaczynski, C., Bodnar, J. L., & Duvaut, T. (2018). Nondestructive testing of resistance spot welds using eddy current thermography. *Applied optics*, 57(18), D63-D68.
- [69] Kim, C., S. Hwang, and H. Sohn. (2022). Weld crack detection and quantification using laser thermography, mask R-CNN, and CycleGAN. *Automation in Construction*, 143, 104568.