Journal of Athar

ISSN: 2538-1830 | Volume 42 | Issue 3 | Fall 2021

A Review of the Role of Infrared Thermography in Conservation and Restoration of Historic Buildings as A Non-destructive Method and Its Application in the Construction Industry

Sajad Moazen[1], Helia Vali[2*], Sepideh Banayi[3]

1. Assistant Professor, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. MA Student, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3. MA Student, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Article Info

Review Article

Received: 2021/09/17;
Accepted: 2021/11/24;
Published Online 2021/12/12

10.30699/athar.42.3.234

Use your device to scan and read the article online

Corresponding Author
Helia Vali
MA Student, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
Email:
Helia.vali.29@gmail.com

ABSTRACT

Non-destructive testing is one of the non-invasive and non-contact methods that allow us to ensure the correct operation of the structure without damaging it. Since non-destructive methods do not damage the structural components, it saves time and money. On the other hand, historic buildings have been exposed to considerable damages over time, and even after protective measures, they need constant monitoring and control. Therefore, using non-destructive methods, historical buildings can be preserved. Infrared thermography is one of the non-destructive methods that provide thermal images (thermograms) by thermal cameras to evaluate historic buildings and multiple structures without damaging the components of the structure in the shortest time. This research reviews some articles regarding non-destructive infrared thermography using the descriptive-analytical method. Also, this paper introduces the infrared thermography method, its types, and its application in historic buildings and the construction industry. Examination of the mentioned materials and examples showed that the researchers could use this method to determine the pattern of cracks in buildings, detect damage in the interior and exterior of the building, investigate the place of energy loss in the building, damage in the openings, and determine the texture of materials. It is also possible to distinguish between newly repaired parts and pre-existing parts with the help of surface thermometers and based on different thermal properties of materials.

Keywords: Historic buildings, Non-destructive testing, Infrared thermography, Thermal camera, Thermogram

Copyright © 2022. This open-access journal is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

How to Cite This Article:

Moazen, S., Vali, H., & Banayi, S. (2021). A Review of the Role of Infrared Thermography in Conservation and Restoration of Historic Buildings as A Non-destructive Method and Its Application in the Construction Industry. *Athar*, *42* (3), 234-259.

مجلهٔ علمی اثر

شاپا: ۱۸۳۰-۲۵۳۸ دوره ۴۲ | شماره ۳ | پاییز ۱۴۰۰

مقالهٔ مروری

مروری بر جایگاه گرماسنجی مادون‌قرمز در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی به‌عنوان روشی غیرمخرب و کاربرد آن در صنعت ساختمان

سجاد مؤذن[۱]، هلیا ولی[۲*]، سپیده بنایی[۳]

۱. استادیار، گروه مرمت، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرمت، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرمت، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳

انتشار آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱

نویسندهٔ مسئول:

هلیا ولی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرمت، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پست الکترونیک:

Helia.vali.29@gmail.com

خلاصه

آزمایش‌های غیرمخرب از جمله روش‌های غیرتهاجمی و غیرتماسی هستند که بدون ایجاد آسیب در سازه‌ها این امکان را فراهم می‌کنند تا از صحت عملکرد سازه مطمئن شویم؛ بنابراین چون روش‌های غیرمخرب به اجزای سازه صدمه‌ای وارد نمی‌کنند، باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه نیز می‌شوند. از طرفی ابنیه تاریخی نیز در طی زمان در معرض آسیب‌های متعدد قرار گرفته و حتی پس از اقدامات حفاظتی نیز نیازمند پایش و کنترل مداوم هستند؛ از این‌رو با بهره‌گیری از روش‌های غیرمخرب می‌توان بناهای تاریخی را حفظ نموده و از سلامت آنها نیز اطمینان پیدا کرد. گرماسنجی مادون‌قرمز ۱ یکی از روش‌های غیرمخرب است که با تهیه تصاویر حرارتی (ترموگرام) به‌وسیله دوربین‌های حرارتی امکان ارزیابی ابنیه تاریخی و سازه‌های متعدد را بدون آسیب به اجزای سازه و در کوتاه‌ترین زمان فراهم می‌کند. این پژوهش به‌صورت مروری و با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی و بررسی ۴۱ مقاله در حوزهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز انجام شده است. همچنین در این مقاله روش گرماسنجی مادون‌قرمز، انواع و کاربرد آن در ابنیه تاریخی و صنعت ساختمان معرفی شده است. بررسی مطالب و مثال‌های ذکرشده نشان می‌دهد که می‌توان از این روش برای مشخص‌نمودن الگوی ترک در ابنیه، تشخیص آسیب در بخش‌های داخلی و خارجی ساختمان، بررسی محل اتلاف انرژی در بنا، ارزیابی آسیب‌های ایجادشده در محل بازشوها، مشخص‌نمودن بافت مصالح و همچنین محل بازشوها و فضاهای خالی پنهان در زیر تزیینات و اندودها، تعیین محل نشت آب و هوا، تحلیل توزیع دما در ساختمان، شناسایی محل آسیب در عایق‌ها و لوله‌کشی‌های تأسیسات استفاده کرد. همچنین می‌توان تمایز بین بخش‌های مرمت‌شده جدید و بخش‌های از پیش موجود را با کمک حرارت‌سنجی سطوح و براساس خصوصیات متفاوت حرارتی مصالح تشخیص داد.

کلیدواژه‌ها: ابنیه تاریخی، آزمایش غیرمخرب، گرماسنجی مادون‌قرمز، دوربین حرارتی، ترموگرام

حق کپی رایت انتشار: این نشریه ی دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهینامه بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

مؤذن سجاد، ولی هلیا، بنایی سپیده. (۱۴۰۰). مروری بر جایگاه گرماسنجی مادون‌قرمز در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی به‌عنوان روشی غیرمخرب و کاربرد آن در صنعت ساختمان. *فصلنامه علمی اثر*، ۴۲ (۳)، ۲۳۴-۲۵۹.

مقدمه

نظارت و پایش سلامتی در انواع مختلف سازه‌ها برای حفظ شرایط مطلوب آنها ضروری است. نظر به اینکه ابنیه تاریخی بخشی از فرهنگ و تمدن ملت‌هاست، حفظ و حراست این میراث از اهمیت بالایی برخوردار است؛ بنابراین مستندنگاری و شناخت جامع و دقیق بناهای تاریخی برای اتخاذ تصمیم مناسب هنگام انجام مداخلات حفاظتی و مرمتی ضرورت دارد. با توجه به اینکه این ابنیه قدمت زیادی دارند و طی گذر زمان متحمل آسیب‌های متعدد گشته و امکان ناپایداری به‌دلیل خستگی مصالح در آنها وجود دارد، توصیه می‌شود حتی‌المقدور از روش‌های مخرب که امکان تخریب و صدمه به بنا را به همراه دارند، برای شناخت استفاده نشود؛ بنابراین شناخت روش‌های غیرمخرب و رجوع به آنها اهمیت بالایی دارد؛ از این‌رو شناسایی آسیب‌هایی که بر پایداری ساختاری این ابنیه تأثیر می‌گذارد، با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب و به‌واسطه تمایز خصوصیات حرارتی نقاط آسیب‌دیده در مقایسه با مناطق بدون تغییر، ممکن می‌شود. امروزه روش‌های غیرمخرب به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و محبوبیت آنها در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. دلیل اصلی این امر کارکرد بیشتر این روش‌ها از راه دور و غیرتماسی بودن آنهاست. عدم تماس، امکان تجزیه و تحلیل عملکرد حتی برای سازه‌هایی که دسترسی به آنها دشوار است یا تحت شرایط ناامن قرار گرفته‌اند، مانند سازه‌هایی که در دمای بسیار بالا یا پایین هستند، یا سازه‌هایی که ناپایدار هستند فراهم می‌کند. از مزایای دیگر استفاده از روش‌های غیرمخرب این است که این روش‌ها به بناهای تاریخی مورد مطالعه آسیبی وارد نکرده و در مقایسه با روش‌های سنتی سرعت عمل بالایی دارند (Garrido et al., 2018) آزمایش‌های غیرمخرب، به‌ویژه در بناهای تاریخی می‌تواند مسائل اساسی مانند ویژگی‌های مصالح و سازه را که با ارتقا و تغییرات ساختمان در طول زمان تغییر می‌کند، مورد بررسی قرار دهد. طبقه‌بندی اساسی آزمون غیرمخرب طی دو دهه گذشته با در دسترس بودن گرماسنجی مادون‌قرمز و به‌تدریج تبدیل‌شدن به یک رشته مستقل، دستخوش تغییراتی شده است (Glavaš et al., 2019). این روش را می‌توان در مطالعات مختلف برای تجزیه و تحلیل ساختارهایی با یک یا چند آسیب براساس رفتار حرارتی غیرعادی آنها در مقایسه با ساختارهای سالم و بدون آسیب استفاده کرد (Garrido et al., 2018). در آسیب‌شناسی‌های حرارتی، آسیب‌ها باعث توزیع دما به‌صورت غیرطبیعی در مقایسه با توزیع دما در بقیه قسمت‌های سازه می‌شوند. نمونه‌هایی از آسیب‌شناسی‌های حرارتی شامل پل‌های حرارتی و نفوذ هوا در ساختمان‌ها، ایجاد ترک و شکاف و رطوبت است (Mineo & Pappalardo, 2021). هدف از این پژوهش معرفی یک روش نوین و غیرمخرب به‌منظور بررسی و کنترل آسیب‌ها در ابنیه تاریخی و نقص‌های ایجادشده در ساختمان و پایش این ابنیه پس از اقدامات حفاظتی با استفاده از روش گرماسنجی مادون‌قرمز است.

پیشینهٔ تحقیق

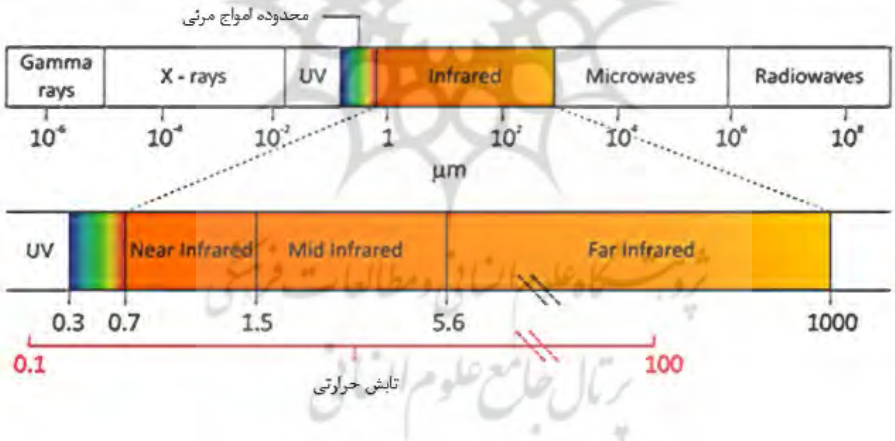
تاریخچه گرماسنجی مادون‌قرمز

پرتوهای مادون‌قرمز در سال ۱۸۰۰ میلادی توسط ویلیام هرشل[۲] کشف شد. پس از کشف اثر حرارتی در سال ۱۸۲۱، گرماسنجی مادون‌قرمز جهان علمی را تحت تأثیر قرار داد تا تکنیک‌های تفسیر و روش‌های آزمایش برای سازه‌های مختلف ساختمان را بررسی کند. در همین راستا، اولین دوربین مادون‌قرمز در سال ۱۹۲۹ توسط تیهانی[۳] کارمند ارتش در بریتانیا برای دفاع ضد هوایی به کار گرفته شد. پس از آن اولین نسل دوربین‌های مادون‌قرمز تجاری در اواخر دهه ۶۰ ظهور کرد. درنهایت در دهه ۹۰ نسل جدیدی از تجهیزات و آشکارسازها تولید شد که قادر به ارزیابی دما در نقاط مختلف بوده و نیازی به سیستم خنک‌کننده خاصی نداشتند (Ţurcanu et al., 2019).

تئوری گرماسنجی مادون‌قرمز

در زمینه تجزیه و تحلیل حرارتی در سازه‌ها، روش گرماسنجی مادون‌قرمز، روشی بهینه در میان روش‌های

غیرمخرب است. دلیل این امر اندازه‌گیری دمای هر سطح، از جمله تأثیر پدیده‌های زیرسطحی در برخی موارد، از طریق ارزیابی گرما یا تابش ساطع‌شده در محدوده امواج مادون‌قرمز از سطح جسم در حال مطالعه و تبدیل آن به مقادیر دماست. در دمای بالاتر از صفر مطلق، همهٔ اجسام در نتیجهٔ نوسانات الکترونی یا تغییرات حرارتی درون ماده، امواج الکترومغناطیسی را در محدودهٔ امواج مادون‌قرمز ساطع می‌کنند. در بین باندهای طیفی، محدودهٔ ۰/۴-۱۰۰۰ میکرومتر متعلق به امواج مادون‌قرمز است که به چهار باند تقسیم می‌شود: اشعهٔ مادون‌قرمز نزدیک، امواج مادون‌قرمز دور، امواج مادون‌قرمز متوسط و مادون‌قرمز حرارتی (شکل ۱) (Garrido et al., 2018). امواج مادون‌قرمز برای چشم انسان قابل‌مشاهده نیست و برای پردازش چنین سیگنال‌هایی به دستگاه‌های خاصی نیاز است. این ابزارها دوربین‌های مادون‌قرمز هستند که می‌توانند امواج یا گرمای ساطع‌شده توسط یک ماده یا جسم را برای ایجاد یک تصویر حرارتی، تشخیص دهند و ثبت نمایند و با توجه به این تصاویر می‌توان الگوی دما را بازسازی کرد. بر این اساس، دمای سطح یک جسم می‌تواند به‌سرعت تخمین زده شود. برای جسمی در دمای محیط، حداکثر طول‌موج در محدوده امواج مادون‌قرمز رخ می‌دهد؛ به همین دلیل تصویربرداری حرارتی به‌عنوان یک روش سنجش از راه دور بسیار قدرتمند برای مطالعات میدانی در نظر گرفته شده است. به لطف این واقعیت که تابش حرارتی می‌تواند از دود، ذرات معلق در هوا، گردوغبار و مه عبور کند، از لحاظ میزان نفوذ در عمق اجسام، روش مؤثرتری نسبت به امواج یا تابش مرئی محسوب می‌شود (Mineo & Pappalardo, 2021).

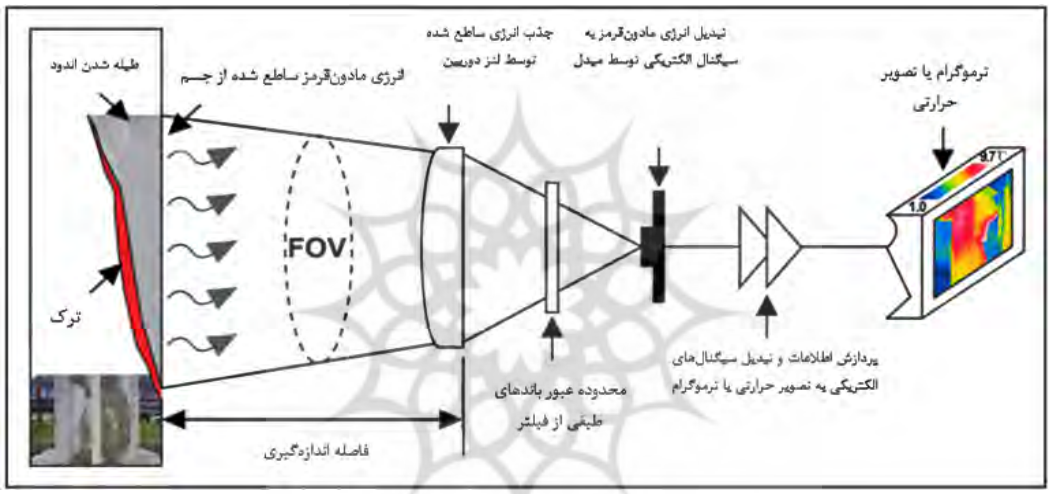


شکل ۱. طیف امواج الکترومغناطیسی با دامنه وقوع تابش گرمایی و محدوده امواج مادون‌قرمز
منبع (Mineo & Pappalardo, 2021)

داده‌های روش گرماسنجی مادون‌قرمز

تصویر حرارتی، تصویری از شدت تشعشع حرارتی یا دمای ظاهری اجسام موردنظر است که تمام تابش‌ها را صرف‌نظر از منبع آنها شامل می‌شود. خروجی معمول این روش شامل دادهٔ خام به‌صورت ماتریسی از دماست که اندازهٔ آن با مشخصات فنی حسگر ارتباط دارد (Cadelano et al., 2015). همهٔ اشیا از خود اشعه مادون‌قرمز ساطع می‌کنند و این یکی از راه‌های انتقال حرارت است. گرماسنجی از یک دوربین مادون‌قرمز برای تشخیص و ثبت انرژی مادون‌قرمز و تولید یک تصویر حرارتی از دمای سطح ساختمان استفاده می‌کند. یک دوربین مادون‌قرمز دارای حسگرهای تخصصی برای تشخیص تشعشع مادون‌قرمز است. بدین‌ترتیب در ابتدا

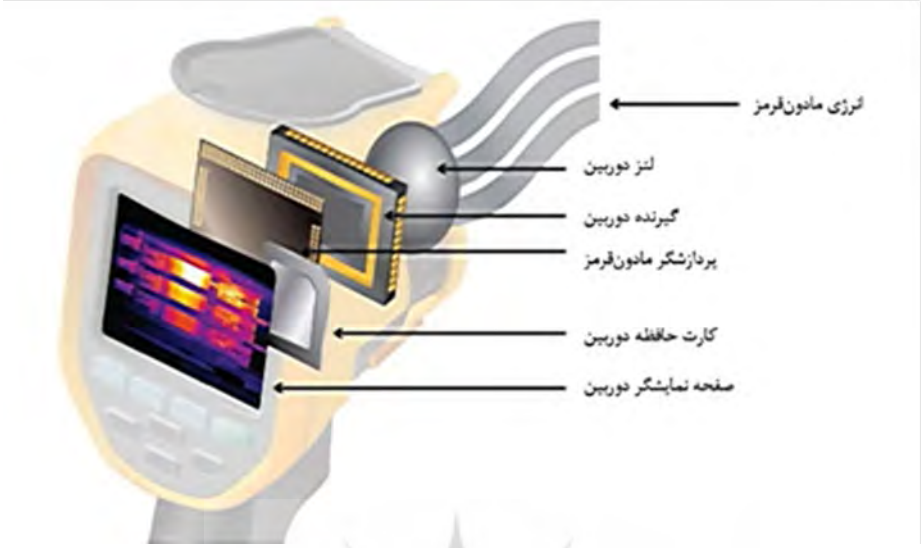
اشعهٔ مادون‌قرمز از طریق لنزی که قادر به انتقال امواج مادون‌قرمز است، جمع‌آوری شده و بر هدایت الکتریکی سنسورها تأثیر می‌گذارد. این داده‌ها به تصویری بصری تبدیل می‌شوند که ترموگرام (نقشه دما) سطح مورد بررسی نامیده می‌شود (شکل ۲). سنسورها به نور مرئی پاسخ نمی‌دهند؛ بنابراین دوربین فقط اشعهٔ مادون‌قرمز را که از یک جسم ساطع‌شده یا منعکس می‌شود، ثبت می‌کند. بر همین اساس می‌توان داده‌ها را در شرایط کم‌نور یا بدون نور جمع‌آوری کرد. رنگ‌های روشن‌تر (قرمز، نارنجی، زرد) نشانگر دمای گرم‌تر ناشی از گرما و تابش مادون‌قرمز هستند. رنگ‌های تیره (بنفش، آبی تیره، مشکی) نشانگر دمای سردتر ناشی از گرمای کمتر و تابش اشعهٔ مادون‌قرمز هستند (Spodek & Rosina, 2009). البته باید توجه کرد که تصاویر ایجادشده توسط دوربین در اصل تصاویری خاکستری هستند که با کمک پردازنده به تصویر رنگی تبدیل می‌شوند (Knospe, 2017).



شکل ۲. نحوه عملکرد گرماسنجی مادون‌قرمز
منبع (Jo et al., 2013)

ابزار گرماسنجی مادون‌قرمز

یکی از مهم‌ترین ابزار در این زمینهٔ دوربین‌های حرارتی هستند. از دوربین‌های مادون‌قرمز برای حرارت‌سنجی و تجسم‌بخشی طیف نامرئی، به‌ویژه اشعهٔ مادون‌قرمز ساطع‌شده از اجسام استفاده می‌شود (شکل ۳). همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، اساس کار این دوربین‌ها بدین‌گونه است که انرژی مادون‌قرمز ساطع‌شده از جسم توسط چشمی متمرکزشده و به پردازشگر مادون‌قرمز منتقل می‌شود. در مرحلهٔ بعد آشکارساز اطلاعات را برای پردازش تصویر به حسگر الکترونیکی ارسال می‌کند. در آخر حسگر الکترونیکی داده‌های حاصل را به تصویر حرارتی تبدیل کرده که می‌تواند در یک مانیتور ویدیویی استاندارد یا صفحهٔ LCD دوربین مشاهده شود. این دوربین‌ها در سال‌های اخیر رواج پیدا کرده‌اند؛ زیرا استفاده از آنها آسان است و از دست دادن گرما را برای چشم انسان قابل‌مشاهده می‌کند. این دوربین‌ها توسط شرکت‌های متعددی همچون FLIR, Sonel و FLUKE تولید شده و براساس ویژگی‌ها و کاربردشان شامل انواع متفاوتی از جمله دوربین‌های حرارتی با قابلیت اتصال به تلفن همراه، دوربین‌های جیبی، دوربین‌های کامپکت ۴ و دوربین‌های پیشرفته هستند.



شکل ۳. نحوه عملکرد دوربین گرماسنجی مادون‌قرمز
منبع (FLUKE catalog, 2020)

پس از تصویربرداری حرارتی توسط دوربین‌ها یک رایانه یا واحد پردازش سیگنال برای جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و نمایش داده‌ها لازم است. نرم‌افزارهای متعددی توسط شرکت‌ها با هدف ارزیابی تصاویر حرارتی تهیه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این نرم‌افزارها SONEL THERMOANALYZE 2، تهیه‌شده توسط شرکت Sonel است. همچنین این شرکت در سال‌های اخیر اقدام به تهیهٔ نسخهٔ تلفن همراه این برنامه با نام SONEL KT MOBILE با هدف مدیریت دوربین از دستگاه تلفن همراه کرده است (https://api.sonel.pl, 2021). در صورتی که گرماسنجی به‌صورت فعال انجام شود، نیازمند منابع حرارتی متفاوت با توجه به هدف تصویربرداری است.

متغیرهای تأثیرگذار در گرماسنجی مادون‌قرمز

به‌منظور تبدیل مقادیر گرما یا تابش توسط حسگر حرارتی دوربین مادون‌قرمز به مقادیر دقیق دمای مطلق، پارامترهایی از جمله دما و رطوبت نسبی، فاصلهٔ بین دوربین ترموگرافی و جسم مورد مطالعه، میزان انتشار و بازتاب سطح جسم و قابلیت انتقال و دمای منعکس‌شده در محیط (Garrido et al., 2018) همچنین سرعت باد و دمای سطح برخی از نقاط شاهد و دمای فضای داخل نیز در نظر گرفته می‌شود (Rizzi et al., 2007). موارد ذیل نیز می‌توانند در انجام گرماسنجی مادون‌قرمز مؤثر واقع‌شده و عدم توجه به آنها موجب خطا در سنجش دمای سطوح می‌شود.

- شرایط آب و هوایی: نتایج و بررسی گرماسنجی مادون‌قرمز به موقعیت جغرافیایی ساختمان در حال بررسی بستگی دارد. مطالعه و بررسی با استفاده از این روش نباید در زمان برف، باران و مه صورت گیرد. خطاهایی در اندازه‌گیری به‌دلیل جذب اشعهٔ مادون‌قرمز (گرما) به‌وسیلهٔ آب موجود در هوا ایجاد می‌شود. همچنین تابش مستقیم و پراکندهٔ خورشیدی، به‌ویژه در دورهٔ پاییز و تابستان می‌تواند بخش‌هایی از دیواره‌ای را که در معرض دید قرار دارد، گرم کند؛ بنابراین مناطقی با درجه حرارت بالا تولید می‌شود که ناشی از انتقال حرارت خالص از طریق دیوار نیست. سطوح صاف مانند شیشه، کاشی و سرامیک به‌خوبی تابش خورشید را منعکس می‌کند و ممکن است سبب ایجاد خطا در ثبت درجه حرارت شوند؛ بنابراین

پیشنهاد می‌شود بررسی به‌وسیلهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز در اوایل صبح یا شب، درحالی‌که تأثیر محیط حداقل است، انجام شود. همچنین باد شدید، نمای ساختمان و اشیاء در حال بررسی را به‌طور قابل‌توجهی خنک می‌کند؛ بنابراین تصویربرداری حرارتی توسط دوربین مادون‌قرمز هنگامی‌که سرعت باد کمتر از ۷-۵ متر بر ثانیه است، توصیه می‌شود (Vavilov & Burleigh, 2020).

- شرایط خرداقلیم‌ها: اصطلاح «خرداقلیم» به شرایط محیطی غیرمعمولی اشاره دارد که در یک مکان محدود وجود دارد، به‌ویژه هنگامی‌که این شرایط با منطقه اطراف آن متفاوت باشد.
- فاصلهٔ دوربین حرارتی تا سوژه: با افزایش فاصلهٔ بین دوربین و یک جسم در حال آزمایش، محدودهٔ آزمایش وسیع‌تر می‌شود؛ درنتیجه وضوح مکانی کاهش یافته و اندازه‌گیری دما به‌دلیل میزان جذب جو دقت کمتری دارد. در معمول‌ترین کاربردهای عملی این روش، مسافت مناسب کمتر از ۵۰-۳۰ متر است. در فواصل بیشتر، باید از فرمول‌های تصحیح برای میزان جذب گرما در جو استفاده کرد.
- شرایط داخلی: مشکلات اصلی در انجام بازرسی در محیط داخلی عبارت‌اند از: استفاده از فن و بخاری، احاطه‌شدن مناطق در حال آزمایش توسط مبلمان، فرش و سایر اشیاء، جداشدن کاغذدیواری، گچ و نقاشی‌های ناهموار در مناطق تحت آزمایش. با استفاده از روش‌هایی مانند پوشاندن بخاری‌ها با محافظ‌های مات یا با انتخاب مناسب محل آزمایش و زاویهٔ دید می‌توان از تابش گرما توسط بخاری‌های موجود در فضا جلوگیری کرد. دوربین حرارتی نیز برای جلوگیری از بازتاب گرما باید حدود ۱ متر از جسم در حال آزمایش فاصله داشته باشد (Vavilov & Burleigh, 2020).
- میزان رطوبت موجود در هوا: رطوبت نسبی هوا در محیط اندازه‌گیری باید به‌اندازهٔ کافی کم باشد تا در هوا (غبار)، روی جسم اندازه‌گیری، روی شیشه محافظ یا عدسی تصویرگر حرارتی تراکم آب وجود نداشته باشد. اگر عدسی (شیشهٔ محافظ) به‌اشتباه با رطوبت پوشیده شده باشد، مقداری از اشعه مادون‌قرمز که به صفحهٔ دوربین برخورد می‌کند، دریافت نمی‌شود؛ زیرا آب روی عدسی از نفوذ اشعه و گرمای آن درون عدسی دوربین جلوگیری خواهد کرد (Knospe, 2017).
- رنگ مصالح: هنگام اندازه‌گیری دما با استفاده از دوربین حرارتی، رنگ ماده هیچ تأثیر محسوسی بر گرمای مادون‌قرمز ناشی از جسم تحت اندازه‌گیری ندارد. هرچند سطوح تیره گرمای مادون‌قرمز را بیشتر از سطوح روشن جذب می‌کنند و بنابراین با سرعت بیشتری گرم می‌شوند؛ با این حال، گرمای مادون‌قرمز ساطع‌شده به دمای سطح جسم بستگی دارد، نه رنگ آن.
- سطح جسم: خصوصیات سطح جسم تحت اندازه‌گیری نقش مهمی در اندازه‌گیری دما با دوربین حرارتی دارد؛ زیرا انتشارپذیری سطح با توجه به ساختار سطح، کثیفی یا پوشش آن متفاوت است. سطوح صاف، براق، بازتابنده یا صیقلی به‌طورکلی دارای انتشارپذیری کمتری از سطوح مات، زبر و خشن یا خراشیده شده از همان ماده است. همچنین وجود رطوبت، برف و یخ‌زدگی در سطح بر اندازه‌گیری دقیق دما توسط دوربین حرارتی تأثیر می‌گذارد؛ زیرا رطوبت موجب کاهش دمای سطح شده و برف روی سطوح نیز مانند عایق عمل می‌کند (Knospe, 2017).

گسترهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز

گرماسنجی مادون‌قرمز گستره وسیعی از علوم را شامل می‌شود. این روش در علوم مختلفی ازجمله پزشکی،

زیست‌شناسی، شیمی، مهندسی و علوم مواد، علوم زندگی و ورزش، هواشناسی و کشاورزی کاربرد دارد، اما غالب‌ترین زمینه‌های مربوط به برنامه‌های گرماسنجی در زمینهٔ علوم کاربردی و مهندسی هستند (Mineo & Pappalardo, 2021). در ذیل به کاربرد گرماسنجی مادون‌قرمز در بناها و سایت‌های تاریخی و موارد استفاده آن می‌پردازیم:

- کاربرد گرماسنجی مادون‌قرمز در ساختمان

امروزه مطالعات متعددی با استفاده از روش گرماسنجی روی ساختمان‌ها انجام می‌شود و فرایند استفاده از این روش رو به افزایش است. دلیل این امر بحث انرژی در ساختمان و تجزیه و تحلیل برای دستیابی به بازده و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. به همین سبب بررسی و مطالعه به‌وسیله گرماسنجی مادون‌قرمز از خصوصیات حرارتی مصالح ساختمانی گرفته تا شناسایی خصوصیات حرارتی آسیب‌های ساختمان را دربرمی‌گیرد. درمورد آسیب‌شناسی حرارتی (مطالعهٔ آسیب‌ها و عوامل آن در ساختمان)، به‌دلیل مقادیر دمای غیرعادی آسیب‌ها با توجه به محیط بدون تغییر، گرماسنجی یک تکنیک مناسب برای تشخیص و محاسبه برخی از خصوصیات گرمایی آنهاست. همچنین یکی دیگر از آسیب‌های مهم در ساختمان بحث رطوبت است که با استفاده از این روش می‌توان نقاط مرطوب و بخش‌هایی را که دچار نشت آب شده‌اند شناسایی کرد (Garrido et al., 2018).

- کاربرد گرماسنجی مادون‌قرمز در سایت‌های تاریخی

درمورد اشیای مدفون، گرماسنجی با توجه به ویژگی حرارتی متفاوت هوای محبوس‌شده در سطح زیرین زمین، نسبت به خاک بکر می‌تواند روشی مفید برای شناسایی اشیای میراثی مدفون باشد. معمولاً برای شناسایی بقایای باستان‌شناسی مدفون در یک مکان از گرماسنجی هوایی استفاده می‌شود. درمورد اشیای تقریباً سالم، هدف این روش ارزیابی میزان پوسیدگی آنها به‌منظور انجام اقدامات حفاظت و مرمت است (Garrido et al., 2018). هدف اصلی از بررسی گرماسنجی در بناهای تاریخی، آشکارسازی ناهنجاری‌های پنهان در زیر سطح یا در بافت پیچیده بناست که یا قابل‌تشخیص یا به‌راحتی با چشم غیرمسلح قابل‌مشاهده نیستند. این ناهنجاری‌ها ممکن است اجزایی گسسته، تغییرات ساختمان به‌مرورزمان یا هر دو مورد باشد. این شیوه مزیت قابل‌توجهی در ترکیب تصویربرداری حرارتی با سایر تکنیک‌های سنجش از راه دور دارد (Brooke, 2018). به‌طورکلی از این روش در ساختمان به‌ویژه در ابنیه تاریخی برای بررسی موارد زیر استفاده می‌شود:

- بررسی و ارزیابی اقدامات حفاظتی صورت‌گرفته
- بررسی و شناسایی ویژگی‌های سطوح و بستر
- تشخیص نقص‌های پنهان در داخل بنا (نوع و ضخامت و جابه‌جاشدگی عایق طراحی، ریزش یا فشردگی مواد عایق، جداشدن گچ یا پوشش‌های تزیینی از سطح دیوار حائل)
- بررسی زیرساخت‌ها و ساختارهای پنهان
- تشخیص رطوبت
- تجزیه و تحلیل میزان خوردگی در فلزات
- بررسی کیفیت جوشکاری در عناصر مسلح
- بررسی چسبندگی نقاشی‌های دیواری
- نقشه‌برداری از ترک‌ها و شناسایی آنها
- بررسی جریان هوا در ساختمان و میزان اتلاف انرژی
- پایش و نگهداری ساختمان
- پایش جزای الکتریکی
- پایش تغییر شکل (Rizzi et al., 2007).

مزایا و محدودیت‌های گرماسنجی مادون‌قرمز

- مزایا

- هزینه‌های نگهداری از بخش‌های مختلف بنا را کاهش می‌دهد (از جمله کاهش مصرف انرژی)، به شرطی که آسیب‌های حرارتی به‌موقع و قبل از اینکه منجر به خرابی سازه‌ها شوند، شناسایی گردند.

- یک روش غیرمخرب بوده و دوربین حرارتی برای اندازه‌گیری با زیرساخت‌های مورد مطالعه تماس ندارد.
- یک تکنیک غیرتهاجمی است؛ یعنی این روش به‌هیچ‌وجه در ساختار نفوذ نمی‌کند یا بر آن تأثیر نمی‌گذارد.
- نتایج را در تصاویر حرارتی دوبعدی فراهم می‌کند و مقایسه بین مناطق مختلف زیرساخت بنای موردمطالعه را تسهیل می‌کند.
- دوربین‌های حرارتی، مقرون‌به‌صرفه بوده و در لحظه اندازه‌گیری را انجام می‌دهند. همچنین امکان اسکن با سرعت بالا از ساختار را نیز فراهم می‌کند (معمولاً ۳۰ تا ۶۰ تصویر حرارتی در ثانیه).

- محدودیت‌ها

- دقت اندازه‌گیری دما در دوربین‌های استاندارد به‌اندازه روش‌های تماسی مانند ترموکوپل‌ها با دقت ۲± درصد نیست.
- در بیشتر مطالعات ترموگرافی، تفسیر تصاویر حرارتی توسط اپراتور انجام می‌شود که نیازمند سطح بالایی از مهارت در استفاده از این روش بوده و عمدتاً این تکنیک به تخصص اپراتور متکی است (Garrido et al., 2018).
- این روش فقط به بررسی ساختارهای جامد محدود می‌شود و همچنین به‌عنوان «تکنیک مرزی» در نظر گرفته می‌شود. به این معنی که توانایی آن برای بازرسی، تنها تا عمق مشخصی از هدف برای تشخیص آسیب‌ها محدود می‌شود (Kylili et al., 2014).
-

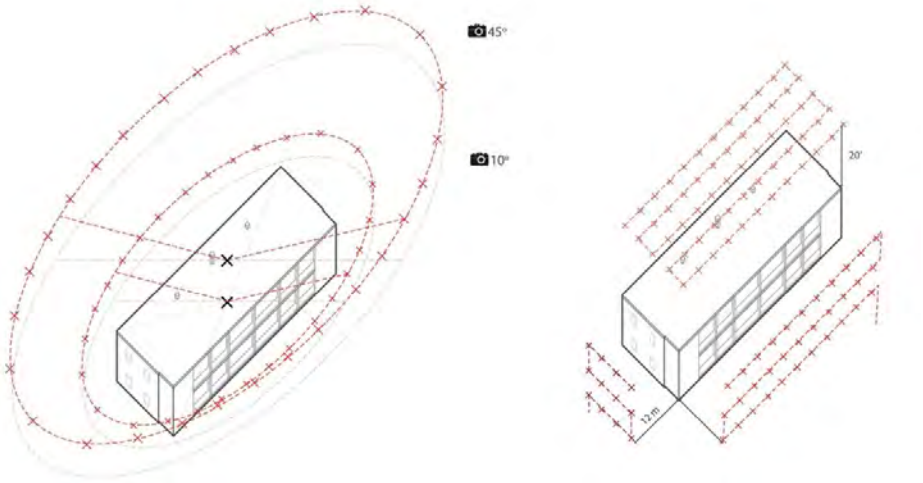
انواع روش‌های کاربردی در گرماسنجی مادون‌قرمز

- گرماسنجی به صورت دستی

استفاده از انواع دوربین‌های حرارتی به‌صورت دستی در بخش‌های مختلف ساختمان و قسمت‌هایی که دسترسی به آنها آسان است، صورت می‌گیرد. در این روش فرد به‌راحتی می‌تواند آزادانه در جهات مختلف ساختمان حرکت کرده و با استفاده از یک دوربین حرارتی قابل‌حمل از کلیه نقاط بنا تصویربرداری نموده و تمامی آسیب‌ها و اطلاعات موردنیاز برای شناخت کامل ساختمان برای تصمیم‌گیری مناسب به‌منظور مداخله و پس از آن پایش سلامت بنا را کسب کند. پس از تصویربرداری توسط دوربین حرارتی اطلاعات توسط نرم‌افزار پردازش‌شده و درنهایت ترموگرام تهیه‌شده اطلاعات را در اختیار فرد قرار می‌دهد.

- گرماسنجی به صورت هوایی[5]

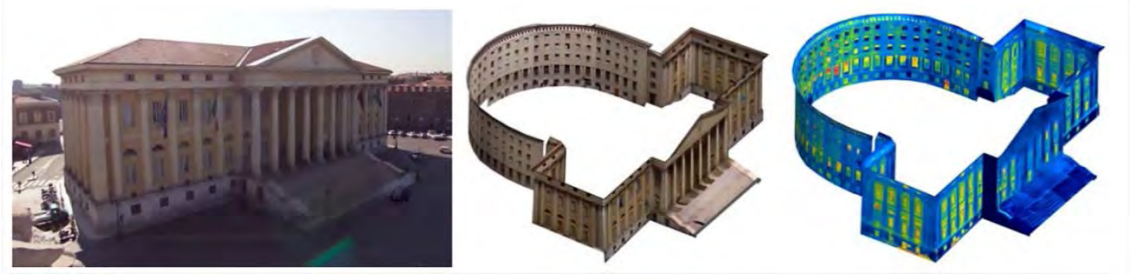
با ظهور دوربین‌های حرارتی نصب‌شده روی هواپیمای بدون سرنشین (پهپاد)، فناوری گرماسنجی اکنون برای مطالعهٔ پوشش‌های ساختمانی، سایت‌ها و شهرهای تاریخی دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است (شکل ۴). سیستم گرماسنجی اثربخشی خوبی در تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی نشان می‌دهد، اما در انجام دقیق اندازه‌گیری‌های سطوح (سطوح قرارگرفته در ارتفاعات مانند پوشش بام) تحت شرایط عملیاتی، برخی از مشکلات را به وجود می‌آورد. کار با پهپادها انعطاف‌پذیری زیادی ایجاد می‌کند، اما زاویهٔ دید به‌شدت بر داده‌های گرفته‌شده تأثیر می‌گذارد و برای جلوگیری از ایجاد اختلال در اثر بازتاب‌های خاص، باید در نظر گرفته شود (Ortiz-Sanz et al., 2019). شکل ۴ فواصل توصیه شده در جهات و نماهای مختلف را به‌منظور تصویربرداری حرارتی به‌کمک پهپاد ارائه می‌دهد؛ درحالی‌که هرکدام مزایای خود را دارند، ارزیابی فاصلهٔ مطلوب به نیازهای خاص صنعت بستگی دارد.



شکل ۴. مؤلفه‌های مسیر پرواز برای بازرسی ساختمان
منبع (Rakha & Gorodetsky, 2018)

- گرماسنجی سه‌بعدی

تکنیک‌های تصویربرداری چندطیفی به ابزاری قدرتمند در تجزیه و تحلیل علمی و مستندسازی اشیاء تبدیل می‌شوند؛ زیرا تصاویر در طول‌موج‌های مختلف اطلاعاتی را فراهم می‌کنند که چشم انسان قادر به دیدن آنها نیست. این تکنیک‌ها با استفاده از محدوده طیفی از اشعهٔ ماوراءبنفش، قابل‌مشاهده تا تابش مادون‌قرمز، مدل سه‌بعدی را با اطلاعات مکانی و طیفی ارائه می‌دهند. ادغام این داده‌ها بعد دیگری به نتایج می‌دهد و اطلاعات طیفی همراه با موارد سه‌بعدی و قابل‌مشاهده ارائه می‌شوند. از طریق این مدل سه‌بعدی می‌توان سازه و تزیینات از جمله نقاشی‌های دیواری را به‌صورت عمیق‌تری تجزیه و تحلیل کرد؛ زیرا داده‌های (تصاویر حرارتی) ثبت‌شده روی هندسه سه‌بعدی، تجزیه و تحلیل کمی مفید را فراهم می‌کنند. تصاویر دیجیتال به‌دست‌آمده در طیف مرئی برای بازیابی هندسه و ایجاد بافت سه‌بعدی استفاده می‌شود (شکل ۵). درحالی‌که برای تجزیه و تحلیل و مطالعات عمیق‌تر، از داده‌های تصاویر حرارتی به همراه تصاویر ماوراءبنفش نیز باید استفاده شود. این ادغام روش برای حفاظت‌گران و مرمتگران بسیار مفید است؛ زیرا آنها مجموعه کاملی از اطلاعات را که شامل مشخصات مختلف شیء مورد تحقیق است به دست می‌آورند (Rizzi et al., 2007).



شکل ۵. Palazzo Barbieri واقع در Verona, Italy
مدل بازسازی‌شده سه‌بعدی دیوارهای خارجی، با بافت قابل‌مشاهده و مادون‌قرمز تجسم یافته است
منبع (Rizzi et al., 2007)

در این ساختمان، تصویر سه‌بعدی با استفاده از همپوشانی ۲۹ تصویر گرفته‌شده توسط دوربین SRL Kodak DCS Pro به دست آمده است. از سوی دیگر، برای تولید مدل سه‌بعدی مادون‌قرمز، از ۱۵۰ تصویر که با دوربین حرارتی FLIR P640 تهیه شده، استفاده شد. هدف نهایی اندازه‌گیری صحیح دمای سطح ساختمان تاریخی است، که امروزه به‌عنوان تالار شهر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دسته‌بندی انواع گرماسنجی مادون‌قرمز براساس منبع تابش

- گرماسنجی غیرفعال

گرماسنجی غیرفعال مربوط به استفاده از منابع گرمای طبیعی، مانند تابش خورشید یا دمای خرداقلیم است که به‌آرامی تغییر می‌کند. این روش فرایندی است برای تجزیه و تحلیل حرارتی سازه‌هایی که برای مدت‌زمان طولانی در حالت ثابت هستند؛ یعنی در محیطی واقع شده‌اند که دما تغییر نمی‌کند (Glavaš et al., 2019). در گرماسنجی غیرفعال، دمای اجزا یا عناصر کنترل می‌شود تا بتوان با استفاده از آن، انحرافات و تغییرات ایجادشده توسط ناهنجاری‌ها را تشخیص داد. هدف این روش تعیین مکان‌هایی است که دما در آن متفاوت است (نقاط گرم یا سرد)، درنتیجه این امر عنصر آسیب‌دیده را شناسایی می‌کند (Bauer et al., 2015). داخل یک ساختمان بدون سیستم گرمایشی، تغییرات در محیط غالباً به‌قدری کم و کند است که فقط ناپیوستگی‌های اساسی سازه قابل‌تشخیص است (Spodek & Rosina, 2009)؛ به‌عنوان مثال، از گرماسنجی غیرفعال می‌توان برای بازرسی کوره‌ها، وسایل برقی، تابلو برق یا یخچال استفاده کرد. فارغ از تعمیرات قابل پیش‌بینی، از این روش می‌توان برای یافتن نقاط گرم در تجزیه و تحلیل ساختار و مکان‌یابی مناطق آسیب‌دیده بهره‌برداری کرد (Meola et al., 2017).

- گرماسنجی فعال

رویکرد فعال گرماسنجی شامل استفاده از مقداری گرمایش کنترل‌شده و اعمال آن به ساختمان به‌منظور تولید شار حرارتی است که در داخل و خارج سازه جریان دارد. با استفاده از یک مدل ریاضی مناسب برای تعریف زمان گرمایش، قدرت و نوع منبع گرمایی و شرایط مرزی برای گرفتن تصاویر در کنتراست بالاتر می‌توان نتایج قابل‌اعتمادی را به دست آورد. این رویکرد امکان تشخیص کوچک‌ترین ناهنجاری در سازه را با ارزیابی کمی تغییرات حرارتی افزایش می‌دهد. میزان گرمایی که در اثر تابش به سطح برخورد می‌کند، باید به‌صورت یکنواخت، ثابت و آسان محاسبه شود (Spodek & Rosina, 2009). در این روش، مقدار مشخصی گرما و انرژی به جسمی که در ابتدا در تعادل گرمایی با محیط قرار دارد، وارد می‌شود تا تضاد حرارتی به‌منظور استخراج ویژگی‌ها و اطلاعات مورد نیاز ایجاد شود. بررسی غیرمخرب مواد با سیستم گرماسنجی مادون‌قرمز معمولاً شامل تحریک حرارتی جسم تحت آزمایش و پایش تغییر درجه حرارت سطح آن در طی فاز گرم‌شدن یا خنک‌سازی گذراست (Meola et al., 2017). استفاده از این روش در نما بسیار دشوار است؛ زیرا تغییرات جوی در طول روز با جریان‌های حرارتی تداخل می‌کند و دقت اندازه‌گیری را تضعیف می‌کند (Bauer et al., 2015). در هنگام استفاده از این شیوه باید به این نکته توجه کرد که گرماسنجی فعال تنها درصورتی نتیجه می‌دهد که خصوصیات جسم مورد مطالعه با خصوصیات محیطی که در آن قرار دارد، متفاوت باشد. درمورد گرماسنجی فعال تحریک گرمایی می‌تواند به‌صورت التراسونیک، الکتریکی، حرارتی و مکانیکی باشد.

- گرماسنجی پالسی (PT)[۶]

یک روش گرماسنجی فعال، سریع و کارآمد مواد یا سازه‌هاست. اندازه‌گیری PT توسط تحریک حرارتی با یک پالس گرم‌کننده، از سطح محیط تحت بررسی انجام می‌شود و نظارت بر آن توسط یک دوربین مادون‌قرمز انجام شده و درنهایت تغییرات دما روی سطح آن طی مرحلهٔ

گرمایش یا خنک‌سازی گذرا بررسی می‌شود. انتشار گرما به ویژگی‌های مواد مانند هدایت حرارتی، ظرفیت گرما و چگالی بستگی دارد. وجود ناهمگنی‌ها (برای مثال حفره‌ها، لایه‌لایه شدگی‌ها) که با ویژگی‌های مختلف حرارتی مشخص می‌شوند، بر روی نقشه درجهٔ حرارت سطح تأثیر می‌گذارند و درنتیجه بدین‌گونه تشخیص داده می‌شوند. تفسیر دقیق منابع ناهنجاری از نظر اندازه، موقعیت و خصوصیات فیزیکی، فقط با تفسیر کمی از داده‌های حرارتی به‌دست‌آمده امکان‌پذیر است. این روش محبوب‌ترین تکنیک در تشخیص و آسیب‌شناسی ساختمان است (Kylili et al., 2014). گفتنی است گرمایش به‌طورکلی باید با لامپ‌های نوری قوی انجام شود، اما با لامپ‌های هالوژن ارزان‌تر نیز می‌توان این گرمایش را انجام داد. تحریک حرارتی را می‌توان با خنک‌کردن به‌جای گرم‌کردن نیز انجام داد و این امر عمدتاً با استفاده از جریان هوای سرد محقق می‌شود (Meola et al., 2017). براساس توضیحات ارائه‌شده، به‌اختصار در شکل ۶ به کاربردهای گرماسنجی فعال و غیرفعال اشاره شده است..

شکل ۶. کاربرد گرماسنجی فعال و غیرفعال
منبع (Bagavathiappan et al., 2013)

- گرماسنجی لاک-این (LT)[۷]

این روش کلاسیک اساساً با یک لامپ گرمایشی مدولار انجام‌شده و دراصطلاح ترموگرافی نوری نامیده می‌شود. در این شیوه انرژی که به‌طورکلی توسط لامپ‌های هالوژن تابیده می‌شود، به شکل یک موج گرمایی و به‌صورت دوره‌ای به سطح جسم منتقل می‌شود. سیستم گرماسنجی به‌طور منسجم با موج منبع حرارتی ادغام می‌شود و به‌گونه‌ای کار می‌کند که یک مدولاسیون سینوسی دمایی از سطح جسم حاصل شود. این سیستم با استخراج الگوی موج سینوسی در هر نقطه از تصویر، مجموعه‌ای از تصاویر حرارتی را جمع‌آوری کرده و گرمایش مدوله‌شده را با دماهای اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند (Meola et al., 2017). گرماسنجی لاک‌این از نظر کاهش سروصدا، برای ارزیابی ضخامت دیواره مزایای بیشتری نسبت به گرماسنجی پالسی دارد.

- سایر روش‌های گرماسنجی

یکی از اقدامات اصلی هنگام استفاده از روش گرماسنجی پالسی توزیع یکنواخت شار گرمایی جذب‌شده توسط سطح جسم مورد بررسی است. این امر درمورد یک سطح نسبتاً کوچک به‌راحتی قابل انجام است؛ درحالی‌که برای یک سطح بزرگ که به تعداد مشخصی لامپ برای توزیع یکنواخت نیاز دارد، استفاده از این روش دشوارتر می‌شود. تکنیک دیگری که دارای مزایایی نسبت به دماسنجی پالسی است، TRIR[۸] نام دارد. در این روش، گرما به‌صورت مرحله‌ای (پالس طولانی) به نمونه اعمال می‌شود؛ درحالی‌که دمای سطح آن به‌عنوان تابعی از زمان کنترل می‌شود. این روش به‌ویژه برای تجزیه و تحلیل پوشش‌های چندلایه به کار می‌رود. در موارد خاص مانند بازرسی از حفره‌ها و کانال‌ها، درصورت نیاز به یک پالس گرم‌کننده قوی ممکن است گرماسنجی پالسی با تزریق بخار آب (PTJV) [۹] روشی مناسب باشد. روش OLT [۱۰] به مرزهای حرارتی که اجازه ایجاد تبعیض روشن و قابل‌اعتماد بین مناطق سالم و معیوب را نمی‌دهد، حساس است. درمورد نقص‌هایی مانند ترک‌ها یا فضاهای خالی، این مشکل ممکن است با تحریک مناطق معیوب توسط امواج صوتی برطرف شود. این یک روش جایگزین برای گرماسنجی لاک‌این است که به آن ULT[۱۱] گفته می‌شود. چنین روشی به‌ویژه برای تشخیص خوردگی و ترک‌های عمودی (عمود بر سطح مشاهده‌شده) کاربرد دارد. به‌طورکلی گرماسنجی مادون‌قرمز مرتبط با تشخیص انرژی گرمایی تولیدشده توسط ارتعاشات مکانیکی، گرماسنجی لرزه‌ای ۱۲ نامیده می‌شود. تحت لرزش مکانیکی، گرما در اثر اصطکاک در جایی که ناپیوستگی‌ها مانند ترک‌ها و لایه‌لایه شدگی وجود دارد، آزاد می‌شود (Meola et al., 2017).

دسته‌بندی انواع گرماسنجی مادون‌قرمز براساس وسعت داده‌ها

- گرماسنجی کیفی

گرماسنجی کیفی اطلاعات اولیه درمورد توزیع دما روی سطح سازه‌های تجزیه و تحلیل شده را فراهم می‌کند. مقادیر واقعی دما ممکن است با آنچه در دوربین خوانده می‌شود تفاوت چشمگیری داشته باشد؛ برای مثال نمایش پیوندهای افقی و عناصر سازه‌ای در ساختمان به کمک این روش به‌وضوح قابل‌مشاهده هستند، همچنین جزئیات راه‌پله نیز با استفاده از گرماسنجی کیفی مشخص خواهد شد (Glavaš et al., 2019). علاوه بر نمایش نحوهٔ اتصالات عناصر سازه‌ای و کیفیت آن، گرماسنجی کیفی مناطق احتمالی آسیب در ساختمان به‌خصوص در سیستم پوشش‌ها را نیز نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل کیفی به اندازه‌گیری دقیق احتیاج ندارد؛ زیرا تنها به شناسایی و مقایسه الگوها و شیب‌ها یا نقاط مختلف دما (نقاط گرم و سرد) می‌پردازد. همچنین باید به این نکته توجه کرد که ارزیابی کیفی همیشه قبل از اینکه به سراغ یک ارزیابی کمی بروید، انجام می‌شود (Bauer et al., 2015).

- گرماسنجی کمی

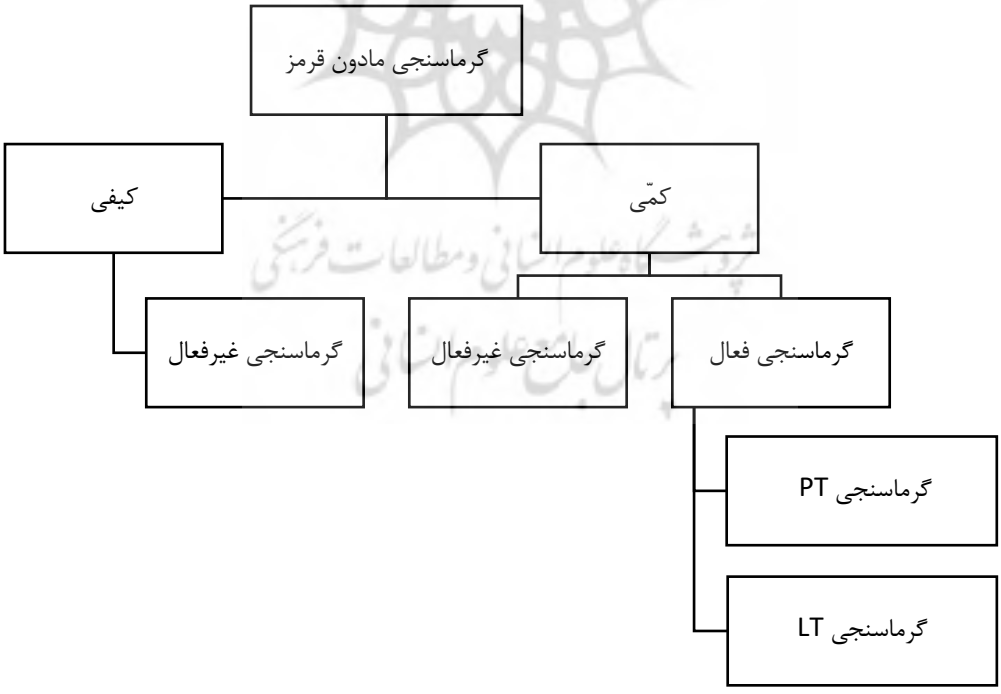
وظیفهٔ گرماسنجی کمی ارائهٔ مقادیر دقیق دما روی سطح یک جسم است. برای تکمیل تجزیه و تحلیل کمی، لازم است مقادیر دقیق انتشارپذیری، دمای منعکس‌شده و شرایط آب و هوایی هنگام ثبت تصاویر با دوربین حرارتی را وارد کنید. روش گرماسنجی کمی به شخصی باتجربه با دانش بالا در این زمینه نیاز دارد. با انجام دماسنجی کمی روی ساختمان‌ها و بازشوهای

آن، باید توجه داشت که میزان انتشار با توجه به زاویه دوربین تغییر می‌کند (Glavaš et al., 2019). ارزیابی کمی به‌دنبال طبقه‌بندی شدت ناهنجاری‌های حرارتی است؛ بنابراین دما باید به‌طور دقیق اندازه‌گیری شود. معیارهای مختلفی ممکن است برای تعیین کمی ناهنجاری‌ها استفاده شود. یکی از پرکاربردترین استفاده‌های این روش، بررسی تغییرات دما بین ناهنجاری و محیط اطراف آن است؛ بنابراین از گرماسنجی کمی می‌توان برای ارزیابی آسیب‌ها و ناهنجاری‌ها در نماها استفاده کرد. با ارزیابی نما در شرایط مختلف دمایی (روز و شب) می‌توان آسیب‌ها و ناهنجاری‌ها را با استفاده از معیارهای کمی شناسایی کرد. در این پژوهش در شکل ۷، به‌طورکلی به دسته‌بندی تکنیک‌ها و انواع روش‌های گرماسنجی پرداخته‌شده است.

همچنین در جدول ۱ اساس کار انواع روش‌های گرماسنجی و کاربرد آن در علم مرمت و صنعت ساختمان بیان‌شده است.

مطالعهٔ موردی در کاربرد گرماسنجی مادون‌قرمز

کلیسای S. Lucia واقع در Rocca di Cambio ایتالیا: شکل ۸ نشان‌دهندهٔ تصویر حرارتی تهیه‌شده از کلیساست. تصویر حرارتی در سال ۲۰۰۹ و چند روز پس از وقوع زلزله در این شهر گرفته شده است. برای حفاظت و مرمت کل دیوار و جلوگیری از فروپاشی آن، بررسی الگوی ترک‌ها و نقاط ضعیف نشان داده شده توسط ترموگرافی ضروری است (شکل ۸) (Grinzato, 2012).



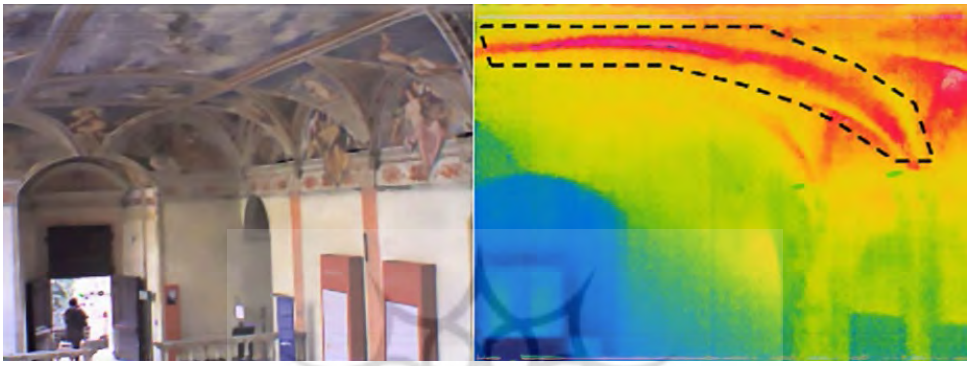
شکل ۷. دسته‌بندی تکنیک‌ها و انواع روش‌های گرماسنجی
منبع (Kylili et al., 2014)

جدول ۱. انواع روش‌های گرماسنجی و کاربرد آن

نام روش	منبع	توضیحات
گرماسنجی فعال	استفاده از لامپ‌های پرنور و قوی یا لامپ‌های هالوژن	تشخیص تغییرات کمی از خصوصیات حرارتی ناشی از ناهنجاری‌های ظریف
گرماسنجی غیرفعال	استفاده از منبع خورشید و دمای خرداقلیم	تجزیه و تحلیل حرارتی سازه‌هایی که برای مدت‌زمان طولانی در محیطی واقع شده‌اند که دما تغییر نمی‌کند.
گرماسنجی کمی	استفاده از منبع خورشید یا بهره‌گیری از منابع حرارتی	ارائه مقادیر دقیق دما روی سطح یک جسم و بررسی تغییرات دما بین ناهنجاری و محیط اطراف آن برای ارزیابی آسیب‌ها و ناهنجاری‌ها در نماها
گرماسنجی کیفی	استفاده از منبع خورشید و دمای خرداقلیم	اطلاعات اولیه درمورد توزیع دما بر روی سطح سازه را فراهم کرده و اطلاعاتی همچون نحوهٔ اتصالات عناصر سازه‌ای و کیفیت آن و نیز وضعیت پوشش بام را مشخص می‌نماید.
گرماسنجی پالسی	تحریک حرارتی و استفاده از منابع حرارتی سرد یا گرم	شناسایی آسیب‌ها در بنا (حفره‌ها و لایه‌لایه شدگی اندودها)
گرماسنجی لاک‌این	استفاده از لامپ‌های هالوژن به‌صورت دوره‌ای	ارزیابی ضخامت دیوار و تعیین اندازه آسیب‌ها
گرماسنجی دوره‌ای (TRIR)	اعمال گرما به‌صورت مرحله‌ای	تجزیه و تحلیل پوشش‌های چندلایه
گرماسنجی بهینه لاک‌این (OLT)	تحریک حرارتی توسط امواج صوتی	تشخیص ترک‌ها و فضاهای خالی
گرماسنجی لاک‌این با امواج فراصوت (ULT)	استفاده از منابع حرارتی با تحریک نوری یا با استفاده از امواج فراصوت	تشخیص خوردگی فلزات و ترک‌های عمودی
گرماسنجی لرزه‌ای	تحریک حرارتی با استفاده از ارتعاشات مکانیکی	تجزیه و تحلیل الگوی تنش و کارآمد در فلزات

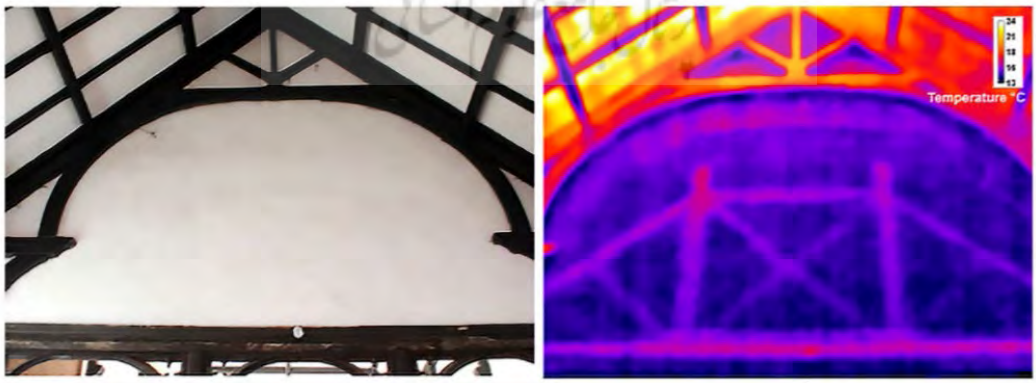
شکل ۸. نقاشی دیواری در معرض خطر زلزله: تشخیص لایه‌لایه‌شدن و ترک‌های ساختاری توسط ترموگرام
منبع (Grinzato, 2012)

قلعهٔ Buonconsiglio واقع در Trento ایتالیا: تصویربرداری حرارتی در این بنا با هدف تشخیص ناهنجاری‌های عایق‌کاری در دیوارها و سقف استفاده شده است (شکل ۹). علاوه بر این، می‌توان نشت هوا را از طریق دیوارها و سقف‌ها، بی‌نظمی‌های حرارتی، نفوذ آب و تجمع رطوبت پیدا و تعیین کرد. تجزیه و تحلیل تصاویر نشان می‌دهد که یک منطقه بسیار گرم (احتمالاً یک لوله، که در اینجا با خطوط برجسته شده است) بر روی نقاشی‌های دیواری می‌گذرد و آسیب‌هایی را ایجاد می‌کند (Rizzi et al., 2007).



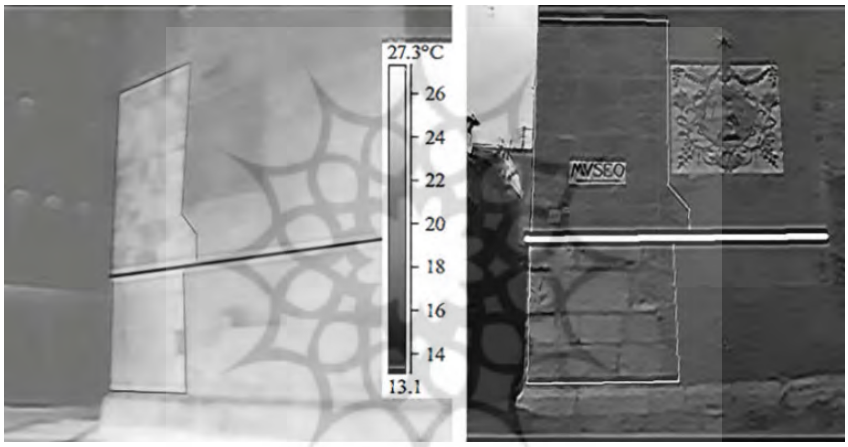
شکل ۹. تصویر ترموگرام تهیه شده از طاق‌ها و نقاشی دیواری
منبع (Rizzi et al., 2007)

کلیسای Winkburn واقع در ناتینگهام شایر انگلستان: به نظر می‌رسد بنای ساختمان همگی متعلق به اواسط قرن دوازدهم باشد، هرچند در قرون ۱۴، ۱۵ و ۱۸ تغییراتی در این کلیسا انجام شده است (Brooke, 2018). جهت شرقی و غربی این کلیسا به‌وسیلهٔ روش گرماسنجی مادون‌قرمز مورد بررسی قرار گرفت تا ساختارهای پنهان مشخص شوند (شکل ۱۰). در این بررسی، تصویربرداری حرارتی تحت شرایط مختلف دما، رطوبت و ساعات مختلف روز انجام شد. شکل ۱۰ ترموگرام ضلع شرقی کلیسا را نشان می‌دهد که در آن ساختار پشتیبان و پنهان سازه به‌وضوح در تصویر حرارتی قابل‌تشخیص است و گمان می‌رود که تصویر یک پشتیبان چوبی است که برای نگه‌داشتن دیوار گچی در قسمت بالای نما ایجاد شده است (Brooke, 2018).



شکل ۱۰. ترموگرام ضلع شرقی کلیسا به همراه تصویر آن تحت نور معمولی
منبع (Brooke, 2018)

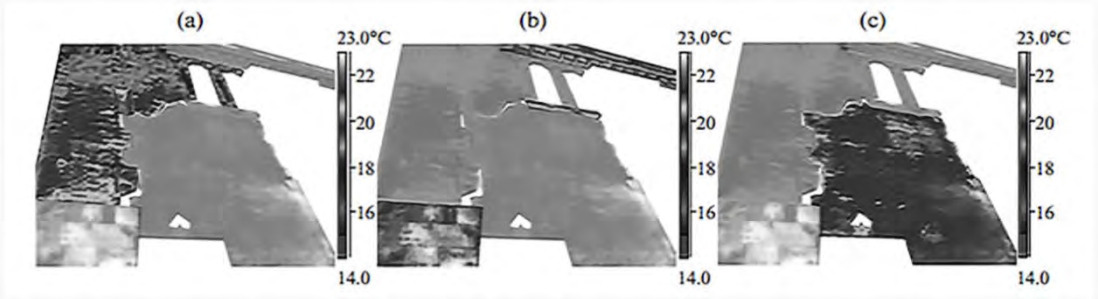
مدرسه‌ای واقع در Valencia اسپانیا متعلق به قرن ۱۶: مطالعه روی این بنا به‌منظور استفاده از مصالح متعدد به‌کاررفته در ساخت آن و تشخیص محل دقیق آنها و نیز تعیین مرز مصالح مصرفی است (Lerma et al., 2018). این تحقیق یک مطالعهٔ تحلیلی از توزیع دما در ساختمان را ارائه می‌دهد و با هدف شناسایی مصالح به‌کاررفته در ساختار و خصوصیات حرارتی آنها انجام گرفته است. سنگ، آجر و دیوار با خاک کوبیده از جمله مصالحی هستند که در نمای این ساختمان مشاهده می‌شوند. در نگاه اول، تشخیص اتصالات آجر و سنگ کار آسانی است، اما تعیین محل اتصال در دیوارهای خاک کوبیده دشوار است؛ زیرا کل محوطه با ملات آهک پوشانده شده است. درصورت وجود اشکال یا تغییر مواد در چند سانتی‌متری سطح، می‌توان آنها را با استفاده از گرماسنجی مادون‌قرمز مشاهده کرد. این روش می‌تواند برای تشخیص مواد مختلف استفاده شود، به‌عنوان مثال دو نوع سنگ واقع در گوشه جنوب غربی ساختمان در شکل ۱۱ مقایسه شده است.



شکل ۱۱. رفتار حرارتی متفاوت سنگ در گوشهٔ جنوب غربی ساختمان

منبع (Lerma et al., 2018)

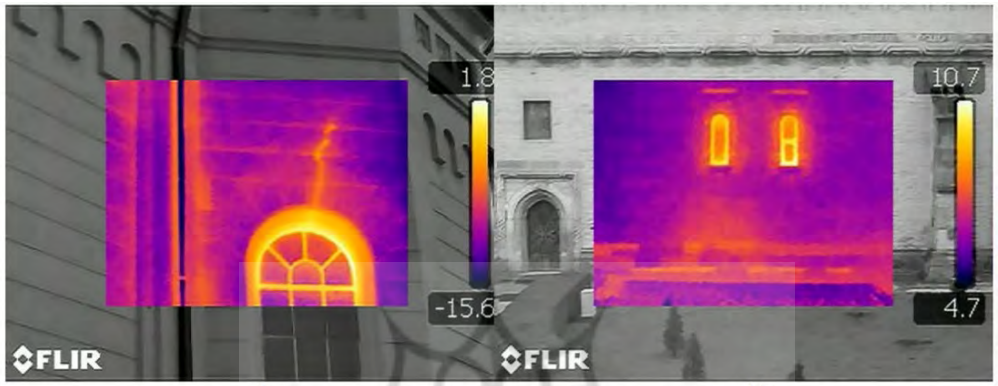
از گرماسنجی برای تجزیه و تحلیل دمای چندین ماده با محاسبهٔ مقادیر میانگین دما استفاده شده است. به‌طور خاص، این مطالعه روی سنگ پاک‌تراش، آجر و دیوار با خاک کوبیده متمرکز شده است. شکل ۱۲ مصالحی را نشان می‌دهد که این ناحیه از نما را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱۲. تجزیه و تحلیل مصالح نما a. آجر، b. سنگ و c. دیوار با خاک کوبیده

منبع (Lerma et al., 2018)

چند کلیسای متفاوت و تاریخی: هدف اصلی این پژوهش ارزیابی کاربرد گرماسنجی به‌منظور مطالعهٔ رفتار مصالح ساختمانی، ارزیابی عملکرد ساختمان، میزان اتلاف انرژی از طریق پنجره‌ها، بررسی رطوبت و جزئیات پنهان (لوله‌های زیرسطحی، دودکش‌ها، اتصالات دیوار) و بررسی سیستم‌های گرمایش و حفاظت پیشگیرانه است (شکل ۱۳) (Ţurcanu et al., 2019).



a) b)

شکل ۱۳. تصاویر حرارتی تهیه‌شده از ساختمان و نمایش آسیب‌ها نمای ترک ثبت‌شده با دوربین حرارتی در کلیسای Saint Mary از دست دادن گرما از طریق پل‌های حرارتی در محل اتصال بین دیوار و زمین منبع (Ţurcanu et al., 2019).

بحث

در این پژوهش به‌طورکلی ۴۱ مقاله در حوزهٔ علم گرماسنجی مادون‌قرمز از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۱ بررسی شد. به‌منظور مقایسه و بررسی نتایج، ۳۱ مقاله در قالب جدول ۲ ارائه شده است. هدف اصلی این امر، شناخت روش‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از آنهاست. آنچه از این مطالعه حاصل شد، بیانگر کاربردهای متفاوت گرماسنجی مادون‌قرمز در ابنیهٔ تاریخی و صنعت ساختمان است. درواقع از مقایسهٔ مطالعات متعدد در حوزهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز این نتیجه حاصل شد که بهره‌گیری از این روش غیرمخرب کمک شایانی به علم مرمت و صنعت ساختمان در بحث مطالعه و شناخت ابنیه و نیز شناسایی آسیب‌ها در بناهای تاریخی می‌کند. همچنین باید در نظر داشت، گرماسنجی مادون‌قرمز با وجود مزایای بسیار، محدودیت‌هایی نیز دارد. نتیجه‌ای که از بررسی مقالات مختلف در این زمینه در ۲۳ سال اخیر به دست آمد، بیانگر این موضوع است که این تکنیک غیرمخرب در ترکیب با سایر روش‌ها و فناوری‌ها عملکرد بهتری داشته و محدودیت‌هایی که در استفاده از این روش به‌تنهایی وجود دارد، در ترکیب با سایر روش‌ها برطرف خواهد شد. در این مقاله با بررسی نمونه‌های ذکرشده می‌توان دریافت از این روش برای مشخص‌نمودن الگوی ترک در ابنیه، تشخیص آسیب در بخش‌های داخلی و خارجی بنا، بررسی محل اتلاف انرژی در بنا، ارزیابی آسیب‌های ایجادشده در محل بازشوها، مشخص‌نمودن بافت مصالح و همچنین محل بازشوها و فضاهای خالی پنهان در زیر تزیینات و اندودها، تعیین محل نشت آب و هوا، تحلیل توزیع دما در بنا، شناسایی محل آسیب در عایق‌ها و لوله‌کشی‌های تأسیسات و یافتن ترک در جوشکاری‌ها استفاده کرد. همچنین به‌وسیله ترموگرام می‌توان تمایز بین بخش‌های مرمت‌شده با مصالح یکسان و

بخش‌های از پیش موجود را به‌کمک حرارت‌سنجی سطوح و براساس خصوصیات متفاوت حرارتی مصالح تشخیص داد. علاوه بر بررسی مقالات انگلیسی روز دنیا در حوزهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز، پیشینه بهره‌گیری از این تکنیک در ایران نیز بررسی شد. بر همین اساس در سال ۱۳۹۹ مقاله‌ای با عنوان کاربرد ترموگرافی در فن آسیب‌شناسی بناهای تاریخی (مطالعهٔ موردی: بررسی رطوبت و تشخیص مصالح در گنبد سلطانیه) با هدف آسیب‌شناسی بنا، تشخیص رطوبت در بخش‌های مختلف، شناسایی مواد و مصالح به‌کاررفته در فضاهای متفاوت به همراه تمایز بخش‌های اصیل از بخش‌های مرمت‌شده، ارزیابی مصالح فرسایش‌یافته و نیز بررسی بندکشی آجرها منتشر شد. نکته مهم تأکید نویسندگان این مقاله به محدودیت‌های تصویربرداری حرارتی از بنا و اخذ مجوزهای لازم به‌سبب نبود تجربهٔ تصویربرداری با دوربین‌های مادون‌قرمز در بناهای تاریخی ایران به‌صورت گسترده و کمبود گزارش‌های مربوط در حوزهٔ بازرسی به شیوهٔ گرماسنجی در این زمینه است؛ بنابراین بهره‌گیری از این روش به‌صورت گسترده در ایران و نیز ارائهٔ گزارش‌های متعدد در این زمینه با هدف آگاهی و آشنایی متخصصان، پژوهشگران و فعالان حوزهٔ میراث فرهنگی با این تکنیک از جمله نیازهای ضروری در امر حفاظت و مرمت بناهای تاریخی است. در پایان این پژوهش، بهره‌گیری از این تکنیک غیرمخرب در ابنیهٔ تاریخی کشورمان و ارائهٔ نتایج آن در قالب مقالات علمی برای آشنایی فعالان این حوزه با این تکنیک‌ها و نیز تلفیق مطالعات این روش‌ها با مطالعات میدانی و شهودی به‌منظور حفظ اصولی آثار برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

جدول ۲. مروری بر مطالعات گرماسنجی مادون‌قرمز در بناهای تاریخی و صنعت ساختمان

نتایج	روش‌شناسی	هدف اصلی	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی
تشخیص میزان رطوبت صعودی در خارج و داخل بنا و نیز ارزیابی کف ساختمان توسط تصاویر حرارتی	بهره‌گیری از دوربین حرارتی داخل و خارج بنا و برداشت سطوح مختلف پس از بخش‌بندی سطوح	ارزیابی رطوبت صعودی در ساختمان	Tavukçuoğlu (et al., 2003)	گرماسنجی و برداشت مقطعی ساختمان در آب‌رسانی و زهکشی ساختمان‌ها
به دست آوردن مجموعهٔ کاملی از اطلاعات از ویژگی‌های مختلف شیء یا بنای مورد بررسی به‌وسیلهٔ ادغام داده‌های حاصل از مدل‌های سه‌بعدی و تصاویر حرارتی با هدف تجزیه و تحلیل و انجام مطالعات عمیق‌تر	ادغام تکنیک‌های نقشه‌برداری دیجیتال برای مستندسازی، حفاظت و مرمت میراث و استخراج مدل‌های سه‌بعدی هندسی در ترکیب فتوگرامتری ۱۳ و تصویرهای حاصل از دوربین‌های مادون‌قرمز	مستندسازی دیجیتال و مدل‌سازی سه‌بعدی بناها و محوطه‌های میراث فرهنگی	Rizzi et al., (2007)	حفاظت دیجیتال، مستندسازی و تحلیل آثار نقاشی، بناهای تاریخی و میراث فرهنگی با فناوری مادون‌قرمز و دوربین‌های دیجیتال
تهیهٔ تصاویر حرارتی متعدد از ابنیهٔ مختلف واقع در ایتالیا و بررسی ترک، رطوبت و فضاهای پنهان در پشت تزیینات بنا	معرفی گرماسنجی مادون‌قرمز به‌عنوان روشی مؤثر در بررسی ابنیه تاریخی	معرفی روش‌های غیر مخرب در بررسی بناهای تاریخی	(Spodek & Rosina, 2009)	کاربرد گرماسنجی در بررسی ساختمان‌های تاریخی
توصیف تجربی و عددی پل‌های حرارتی در دیوارهای پیش‌ساختهٔ بنا	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز برای مطالعهٔ دیوارها	بررسی وضعیت بنا با استفاده از روش‌های غیرمخرب	Zalewski et al., 2010)	توصیف تجربی و عددی پل‌های حرارتی در دیوارهای پیش‌ساخته
شناسایی ترک‌های ساختاری به‌همراه تعیین اندازهٔ لایه‌لایه‌شدن اندودها در کنار طبقه‌بندی مصالح ساختمانی برای ارزیابی خطر لرزه‌ای و نظارت بر رطوبت بنا	بهره‌گیری از گرماسنجی فعال و غیرفعال به‌منظور ارزیابی بنا	حفاظت از میراث فرهنگی	Grinzato, (2012)	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز برای حفاظت از میراث فرهنگی

نتایج	روش‌شناسی	هدف اصلی	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی
تشخیص رطوبت و محل آن توسط روش گرماسنجی مادون‌قرمز و نیز ارزیابی میزان تراکم ازدست‌رفتهٔ چوب در مناطق مرطوب با استفاده از روش اولتراسونیک	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز به‌همراه روش اولتراسونیک ۱۴ در بازرسی سقف چوبی به‌منظور شناسایی آسیب‌ها و ارزیابی وضعیت حفاظتی آن	ارائهٔ نتایج به‌کارگیری تکنیک‌های غیرمخرب در بازرسی ساختمان‌های حفاظت‌شده	Morales-Conde et al., (2013	کاربرد تکنیک‌های غیرمخرب در بازرسی سقف چوبی بناهای تاریخی
معرفی گرماسنجی مادون‌قرمز به‌عنوان یک روش غیرمخرب و شیوه‌ای مناسب برای ارزیابی دما و میزان انرژی در ساختمان به همراه ارائهٔ مزایا و محدودیت‌های آن	مروری بر مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز	بررسی تکنیک گرماسنجی با هدف کمک به مبتدیان در درک بهتر موضوع	Usamentiaga) (et al., 2014	گرماسنجی مادون‌قرمز برای اندازه‌گیری دما و آزمایش‌های غیرمخرب
ارزیابی وضعیت نما و تشخیص خرابی‌ها و لایه‌لایه شدگی آن	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز برای بررسی وضعیت نما	بررسی وضعیت بنا با بهره‌گیری از روش‌های غیرمخرب	Bauer et al.,) (2015	گرماسنجی مادون‌قرمز، ارزیابی تکرارپذیری نتایج
شناخت وضع موجود بنای تاریخی برای اتخاذ تصمیم مناسب برای مداخله	گرماسنجی مادون‌قرمز به‌همراه استفاده از لیزر اسکنر زمینی با هدف برداشت بنا	استفاده از روش‌های غیرمخرب ترکیبی به‌منظور ارزیابی وضعیت ابنیه تاریخی	Costanzo et) (al., 2015	استفاده از گرماسنجی مادون‌قرمز به‌همراه لیزر اسکنر زمینی در یک ساختمان تاریخی
تشخیص میزان رطوبت و پدیدهٔ افلورسانس در نقاشی دیواری	فازبندی سطوح و بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز در ارزیابی نقاشی‌های دیواری	بررسی تزیینات در بناهای تاریخی	Cadelano et) (al., 2015	نظارت بر نقاشی‌های دیواری تاریخی با تجزیه و تحلیل تصویربرداری مادون‌قرمز
نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد، رویکرد غیرفعال می‌تواند به‌طور مؤثر به‌عنوان یک ابزار تشخیص رطوبت و یک تکنیک نظارت سریع بر وضعیت موزاییک استفاده شود؛ درحالی‌که بررسی گرماسنجی فعال به‌واسطهٔ بازیابی بیشتر اطلاعات کمی پتانسیل بیشتری نسبت به رویکرد غیرفعال از خود نشان داد.	اعمال گرماسنجی غیرفعال در محل بر روی روسازی‌های موزاییکی برای کسب آگاهی از وضعیت حفظ آنها و بهره‌گیری از رویکرد فعال به‌منظور مطالعهٔ موزاییک‌های گچ‌کاری‌شده و مشخص‌نمودن لایهٔ زیر گچ	ارائهٔ قابلیت‌های گرماسنجی غیرفعال و فعال برای بازرسی سازه‌های موزاییکی و ارزیابی عملکرد هر رویکرد	Theodorakeas) (et al., 2015	گرماسنجی مادون‌قرمز غیرفعال و فعال: (مروری بر برنامه‌های کاربردی برای بازرسی سازه‌های موزاییکی)
برداشت و ارزیابی دقیق وضعیت بنا	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز به همراه فتوگرامتری	برداشت نقشه‌های بنا	Scaioni et al.,) (2017	ادغام گرماسنجی مادون‌قرمز و فتوگرامتری برای نقشه‌برداری چشم‌انداز ساخته‌شده
نتایج نشان‌دهنده افزایش عملکرد حرارتی است که هدف مداخله نیز همین بوده است. با وجود این، همان‌طور که تصاویر حرارتی نشان می‌دهد، برخی از نقاط سازه همچنان نیازمند مداخله برای جلوگیری از اتلاف انرژی است.	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز در فصل تابستان و زمستان برای ارزیابی دقیق ساختمان	بازرسی بنای تاریخی و اندازه‌گیری میزان انتقال حرارتی مجموعه پس از بازسازی و مقایسهٔ آن با مقدار تبادل انرژی در بنا قبل از بازسازی	Nardi et al.,) (2017	چالش بهره‌وری انرژی برای یک ساختمان تاریخی تحت نوسازی لرزه‌ای و انرژی
ارزیابی کلی وضعیت بنا و تشخیص عناصر پنهان بنا	تصویربرداری حرارتی برای تحقیقات باستان‌شناسی از بناهای تاریخی	استفاده از روش‌های غیرمخرب در بررسی میراث فرهنگی	(Brooke, 2018)	تصویربرداری حرارتی برای بررسی باستان‌شناسی بناهای تاریخی

نتایج	روش‌شناسی	هدف اصلی	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی
ارزیابی وضعیت نما و تشخیص مصالح و آسیب‌ها	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز به شیوهٔ کمی به‌منظور بررسی وضعیت نما	استفاده از روش‌های غیرمخرب در بازرسی ساختمان	Lerma et al., (2018)	تجزیه و تحلیل کمی مصالح در ساختمان‌های تاریخی با استفاده از گرماسنجی مادون‌قرمز
ارزیابی میزان رطوبت، نشتی آب، لایه‌لایه‌شدگی اندود دیوار، تشخیص بخش‌های مرطوب و پدیدهٔ افلورسانس	بهره‌گیری از دوربین حرارتی در ساعت ۵ عصر در بخش‌هایی از بنا براساس شواهدی از نشتی آب در دیوارها	ارزیابی میزان رطوبت در بنا	Rocha et al., (2018)	ارزیابی روش گرماسنجی مادون‌قرمز برای تشخیص رطوبت در ساختمان‌ها
ارزیابی میزان اتلاف انرژی و تشخیص خرابی‌ها در بنا به کمک گرماسنجی مادون‌قرمز و ایجاد یک مدل سه‌بعدی از بنا	بهره‌گیری از پهپاد و گرماسنجی هوایی برای تصویربرداری حرارتی از بالا	ارزیابی و پایش کلی بنا با بهره‌گیری از تکنیک‌های غیرمخرب	Rakha & Gorodetsky, (2018)	بررسی کاربردهای سیستم هوایی بدون سرنشین در محیط ساخته‌شده: به سمت روش‌های بازرسی خودکار ساختمان با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین
شناسایی ترک‌ها و عمق آن در مصالح سنگی و تشخیص خرابی‌های پنهان و احتمالی در لایه‌های عمیق‌تر. تشخیص میزان دما در بخش‌های مختلف بنا با هدف بررسی بخش‌های نیازمند درمان و حفاظت توسط گرماسنجی کمی	استفاده از گرماسنجی مادون‌قرمز به‌همراه روش اولتراسونیک به‌منظور ارزیابی و تشخیص آسیب‌ها در سطوح بنا و نظارت بر تغییر ویژگی‌های ترموفیزیکی و مکانیکی مناطق مشکل‌دار قبل و پس از مداخله و درمان	ارزیابی و پایش بنا با استفاده از روش‌های غیرمخرب	Tavukçuoğlu, (2018)	آزمایش غیرمخرب برای تشخیص و نظارت ساختمان: تجربه به‌دست‌آمده با مطالعات موردی
توصیف بهره‌گیری از دوربین‌های حرارتی به همراه پهپادها و تأثیر آن در بازرسی نیروگاه‌ها و ارزیابی عملکرد آن در مقایسه با روش‌های سنتی و وقت‌گیر	بهره‌گیری از دوربین‌های حرارتی به همراه پهپادها برای تصویربرداری حرارتی از نیروگاه‌ها	بررسی اصول کلی اندازه‌گیری ترموگرافی هوایی و ابزار دقیق مورد نیاز، وضعیت فعلی دوربین‌های حرارتی و تشریح فناوری پهپاد	Gallardo-Saavedra et al., (2018)	بررسی فناوری ابزار دقیق مورد استفاده در بازرسی حرارتی هوایی نیروگاه‌های خورشیدی
بررسی نقش گرماسنجی مادون‌قرمز غیرفعال و فعال در تشخیص عناصر سازه‌ای پنهان در بناهای تاریخی	استفاده از انواع گرماسنجی مادون‌قرمز	شناسایی اجزای پنهان در میراث فرهنگی	Glavaš et al., (2019)	تعیین عناصر پنهان در دیوارهای ساختمان‌های میراث فرهنگی با استفاده از گرماسنجی مادون‌قرمز
ارزیابی وضعیت رطوبت در نما و تهیه نقشه‌های آن	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز به همراه روش ERM[15] (اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی)	ارزیابی رطوبت در بناهای تاریخی با استفاده از روش‌های غیرمخرب	Valero et al., (2019)	ارزیابی وضعیت رطوبت سطحی در نمای ساختمان‌های تاریخی با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب
نشان‌دادن اهمیت ادغام آزمایش‌های غیرمخرب مانند تصویربرداری حرارتی، اسکن لیزری به‌همراه مدل‌سازی عددی برای ارزیابی آسیب‌ها در یک بنای تاریخی و تهیه نقشه‌ای از هندسه و ترک‌های موجود با ترکیب تکنیک‌های غیرمخرب	بهره‌گیری از اسکن لیزری ۱۶ برای ثبت هندسه دیوار و ادغام آن با فتوگرامتری زمینی و تصاویر با وضوح بالا برای ثبت میزان ترک‌خوردگی در لایهٔ گچ به همراه تهیهٔ تصاویر	نشان‌دادن اهمیت یکپارچه‌سازی اسناد، آزمایش‌های غیرمخرب و مدل‌سازی عددی برای ارزیابی آسیب‌ها در سازه‌های میراثی	Napolitano et al., 2019)	ادغام تست‌های غیرمخرب، اسکن لیزری و مدل‌سازی عددی برای ارزیابی آسیب‌ها در ابنیه تاریخی

نتایج	روش‌شناسی	هدف اصلی	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی
	حرارتی توسط گرماسنجی مادون‌قرمز با هدف ارزیابی کلی بنا و شناسایی ترک‌های پنهان سازه			
تهیهٔ مدل سه‌بعدی ساختمان و ارزیابی اتلاف انرژی در بخش‌های متعدد	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز به‌همراه استفاده از فناوری لیدار (LIDAR)[17] و تهیهٔ تصاویر RGB[18]	پایش وضعیت بنا با بهره‌گیری از فناوری‌های جدید	(Shariq & Hughes, 2020)	انقلاب تکنیک‌های بازرسی بنا برای برآوردن نیازهای انرژی در مقیاس بزرگ: مروری بر آخرین فناوری
تشخیص محل رطوبت توسط گرماسنجی مادون‌قرمز و تشخیص عمق نفوذ رطوبت توسط رادار نفوذی زمین	گرماسنجی مادون‌قرمز به‌همراه استفاده از رادار نفوذی زمین (GPR)[19] در ساختمان	ارزیابی رطوبت در ساختمان‌ها با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب	(Garrido et al., 2020)	ادغام گرماسنجی مادون‌قرمز و رادار نفوذی زمین برای تشخیص و توصیف رطوبت در ساختمان
تهیهٔ مدل سه‌بعدی از بنا به‌کمک همپوشانی تصاویر و ارزیابی کلی و تشخیص میزان اتلاف انرژی	دوربین‌های حرارتی و تهیهٔ ترموگرام به همراه تصاویر RGB	استفاده از روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی حرارتی میراث فرهنگی	(Adamopoulos, Volinia, et al., 2020)	نقشه‌برداری حرارتی سه‌بعدی بنا با استفاده از تصاویر حرارتی برای ارزیابی غیرمخرب میراث فرهنگی
مستندنگاری دقیق و تهیه مدل سه‌بعدی بنا و ارزیابی اتلاف انرژی در بخش‌های متعدد	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز به همراه استفاده از فناوری لیدار (LIDAR) به‌صورت هوایی و زمینی	استفاده از روش‌های غیرمخرب در بررسی میراث فرهنگی	(Adamopoulos, Patrucco, et al., 2020)	نقشه‌برداری حرارتی سه‌بعدی میراث معماری
تشخیص میزان رطوبت در بنای سلطانیه به‌خصوص در محلی که به نظر می‌رسید رطوبتی وجود ندارد. همچنین شناسایی مواد و مصالح به‌کاررفته و در بنا به‌ویژه در ایوان طبقهٔ دوم به‌همراه تمایز بخش‌های مرمت‌شده از بخش‌های اصیل و شناسایی قسمت‌های فرسایش‌یافته و نیز بررسی دقیق بندکشی آجرها توسط تصاویر حرارتی به‌دست‌آمده از دوربین‌های حرارتی	استفاده از دوربین حرارتی در داخل و خارج بنای گنبد سلطانیه برای ارزیابی الگوی توزیع حرارتی و درنتیجه بررسی مقادیر دمای سطوح مختلف	بهره‌گیری از گرماسنجی مادون‌قرمز در آسیب‌شناسی گنبد سلطانیه	(Ezzati & Najafi, 2020)	کاربرد ترموگرافی در فن آسیب‌شناسی بناهای تاریخی مطالعهٔ موردی: بررسی رطوبت و تشخیص مصالح در گنبد سلطانیه
مقایسه تکنیک‌های غیرمخرب و بیان محدودیت‌ها و مزایای هر روش به‌همراه تعیین میزان عمق نفوذ هر تکنیک در دیوارهای موزاییکی (در این مطالعه بیشترین عمق نفوذ در لایه‌های دیوار مربوط به روش‌های اولتراسونیک و GPR بود که در مقایسه با روش گرماسنجی عمق نفوذ بیشتری داشته و به‌عنوان مکمل آن پیشنهاد می‌شود).	بررسی روش‌های متعدد غیرتهاجمی و مرور مطالعات متعدد در این زمینه	بررسی دیدگاه و چالش‌های اندازه‌گیری غیرتهاجمی بر روی موزاییک‌های دیواری به‌عنوان بخشی از میراث فرهنگی	(Chaban et al., 2020)	تصویربرداری موزاییک‌های دیواری: (مروری بر روش‌های غیرتهاجمی در محل، چالش‌های کاربردی و مرزهای جدید برای مطالعه و حفظ آنها)
درک تنش‌های حرارتی در نزدیک سطح سنگ و ارزیابی پاسخ حرارتی آن در درزها و شکاف‌های ایجادشده با استفاده از مدل	استفاده از روش گرماسنجی مادون‌قرمز با هدف بررسی رفتار حرارتی سنگ و ارزیابی نحوهٔ توزیع	بررسی توده‌های سنگی، شکاف میان آنها و توصیف رفتار حرارتی	(Grechi et al., 2021)	پایش حرارتی سه‌بعدی توده‌های سنگ از طریق گرماسنجی مادون‌قرمز و فتوگرامتری

پرتال جامع علوم انسانی

نتایج	روش‌شناسی	هدف اصلی	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی
سه‌بعدی ایجادشده و ادغام تصاویر حرارتی تهیه‌شده به‌وسیلهٔ گرماسنجی مادون‌قرمز با تصاویر RGB	دمای سطحی به‌همراه تکنیک فتوگرامتری برای ایجاد یک مدل هندسی سه‌بعدی دقیق	سنگ با استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب		
ارزیابی دقیق نقاشی و ارائهٔ راهکاری برای افزایش وضوح تصاویر حرارتی از طریق ادغام داده‌های حاصل از روش‌های مختلف گرماسنجی	استفاده از گرماسنجی به‌صورت فعال به‌همراه لامپ‌های هالوژن به‌عنوان محرک حرارتی	ارزیابی آثار هنری توسط گرماسنجی مادون‌قرمز	Moradi &) (Sfarra, 2021	اصلاح مشکل تغییرات انتشار ناشی از رنگ‌دانه‌ها در آثار هنری بازرسی‌شده توسط گرماسنجی مادون‌قرمز (یک رویکرد ساده، مفید، مؤثر و بهینه برای میراث فرهنگی)
ارزیابی کامل بنا و تشخیص رطوبت و میزان نفوذ آن در بخش‌های مختلف در شرایط متفاوت آب و هوایی و مقایسهٔ تصاویر حرارتی تهیه‌شده به‌منظور تعیین شرایط مناسب برای تصویربرداری (در این مطالعه، شرایط مناسب آب و هوایی شامل هوای صاف به دور از بارش باران و برف و نیز وزش باد به همراه قرارگرفتن در وضعیت تابش مطلوب بیان شد).	اعمال گرماسنجی غیرفعال روی یک ساختمان میراثی در هند	توضیح بیشتر درمورد نحوهٔ کار گرماسنجی در شرایط نامطلوب	Kavuru &) (Rosina, 2021	گرماسنجی مادون‌قرمز برای مرمت معماری استعماری در هند (مطالعهٔ موردی اقامتگاه بریتانیا در حیدرآباد)

نتیجه‌گیری

پایش ساختمان و کنترل سلامت ابنیهٔ تاریخی در طول زمان برای جلوگیری از آسیب‌ها و فروپاشی بنا و نیز بازبینی ساختمان پس از هر اقدام امری ضروری است. کسب اطلاعات دقیق از ساختمان و ابنیهٔ تاریخی با چشم غیرمسلح امری دشوار بوده و در بعضی موارد موجب آسیب‌رسانی به بنا می‌شود؛ بنابراین امروزه تأکید بر استفاده از تکنیک‌های غیرمخرب با هدف سنجش ساختمان از راه دور و بدون ایجاد کوچک‌ترین تخریبی برای کسب اطلاعات جامع و دقیق افزایش یافته است. در روش گرماسنجی از دوربین‌های حرارتی برای دیدن تابش طیف مادون‌قرمز و ایجاد تصویری از الگوهای حرارتی در سطح یک جسم استفاده می‌شود. با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان دریافت که علاوه بر کارایی این روش در زمینه مطالعه، شناخت و آسیب‌شناسی ابنیه به‌عنوان یک تکنیک غیرمخرب می‌توان از گرماسنجی مادون‌قرمز به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای نظارت ابنیهٔ تاریخی پس از اقدامات حفاظتی و اطمینان از مؤثربودن مداخلات استفاده کرد. همچنین با استفاده از ترکیب این روش با سایر تکنیک‌های غیرمخرب از جمله بهره‌گیری از پهپادها، رادارهای نفوذکننده در زمین و فناوری لیدار می‌توان به اطلاعات جامع‌تری دست یافت و محدودیت‌های گرماسنجی از جمله محدودیت نفوذ در عمق ساختار را برطرف کرد. نظر به مزایای این روش در بررسی میراث فرهنگی امید است که در آیندهٔ استفاده از این تکنیک و به‌خصوص ترکیب آن با سایر روش‌های غیرمخرب در ایران گسترش یابد. همچنین با توجه به اینکه نیاز به متخصصان ماهر در بهره‌گیری از این روش برای ادغام داده‌ها با سایر حسگرها و تکنیک‌ها از معایب روش گرماسنجی است، انتظار می‌رود که در آینده‌ای نه‌چندان‌دور با پیشرفت سنسورهای هوشمند IR، عملکرد سنجش، استخراج، پردازش و درک سیگنال‌ها به‌صورت خودکار انجام شده و ادغام داده‌ها و ارزیابی آن برای استفاده عموم آسان‌تر شود.

سپاسگزاری

وجود ندارد.

منابع مالی

بین نویسندگان تعارضی در منافع وجود ندارد.

تعارض منافع

وجود ندارد.

پی‌نوشت

1. Infrared thermography
2. William Herschel
3. Tihanyi
4. Compact cameras or point & shoot cameras
5. Aerial thermography
6. Pulsed thermography
7. Lock-in Thermography
8. Time resolved-infrared
9. Injecting water vapour
10. Optimal lock-in thermography
11. Ultrasound Lock-in thermography
12. Vibrothermography

۱۳. فتوگرامتری (Photogrammetry): یکی از روش‌های ایجاد مدل سه‌بعدی و روشی غیرتهاجمی است که از طریق فرایند ثبت، اندازه‌گیری و تفسیر تصاویر عکاسی به جمع‌آوری اطلاعات و مدل‌سازی اشیاء و محیط کمک می‌کند.

۱۴. روش اولتراسونیک (Ultrasonic method): یکی دیگر از آزمون‌های غیرمخرب است که براساس انتشار موج صوتی، عبور آن از اجسام و اندازه‌گیری زمان انتشار تا رسیدن به نقطه‌ای دیگر به شناخت اشیاء و بخش‌های مختلف ساختمان کمک می‌کند.

۱۵. ERM (Electrical Resistance Measuring): از تکنیک‌های غیرمخرب به‌منظور سنجش رطوبت به‌شکلی غیرمستقیم و به‌واسطهٔ ارزیابی مقاومت الکتریکی مواد است.

۱۶. TLS (terrestrial Laser Scanner): لیزر اسکن زمینی یکی از روش‌های غیرتماسی و غیرمخرب برای به دست آوردن اطلاعات دقیق از ساختمان است. این فناوری مدل سه‌بعدی اشیاء یا ساختمان را با استفاده از لیزر یا نور و محاسبه زمان انعکاس آن از سطح اجسام و با تهیهٔ ابرهای نقطه بازسازی می‌کند.

۱۷. فناوری لیدار (Lidar): از روش‌های غیرمخرب برای ایجاد داده‌های دیجیتالی سه‌بعدی از مناطق روی سطح زمین و اجسام از طریق ثبت سه‌بعدی هر نقطه با استفاده از انتشار نور یا لیزر و اندازه‌گیری زمان بازگشت آن به گیرنده پس از برخورد به سطح اجسام است.

۱۸. RGB (red, green, blue): این عبارت به سه رنگ نور اطلاق می‌شود که می‌توانند برای ایجاد رنگ‌های مختلف با هم ترکیب شوند. درواقع ترکیب سه نور قرمز، سبز و آبی روشی استاندارد برای تولید تصاویر رنگی روی صفحه‌نمایش در ابزارهای مختلف است.

۱۹. GPR (ground peneteration radar) : فناوری رادار نفوذکننده به زمین یکی از تکنیک‌های غیرمخرب و براساس یک سیستم رادار است که با انتشار امواج الکترومغناطیس و انعکاس آن از سطح جسم یا هدف به شناسایی اجسام مدفون در زیر خاک یا بررسی لایه‌های پنهان در زیر یک سطح کمک می‌کند.

References

Adamopoulos, E., Patrucco, G., Volinia, M., Girotto, M., Rinaudo, F., Tonolo, F. G., & Spanò, A. (2020). 3D Thermal Mapping of Architectural Heritage.

Adamopoulos, E., Volinia, M., Girotto, M., & Rinaudo, F. (2020). Three-dimensional thermal mapping from IRT images for rapid architectural heritage NDT. *Buildings*, *10*(10), 187.

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.

Bauer, E., de Freitas, V. P., Mustelier, N., Barreira, E., & de Freitas, S. S. (2015). Infrared thermography–evaluation of the results reproducibility. *Structural survey*.

Brooke, C. (2018). Thermal imaging for the archaeological investigation of historic buildings. *Remote Sensing*, *10*(9), 1401.

Cadelano, G., Bison, P., Bortolin, A., Ferrarini, G., Peron, F., Girotto, M., & Volinia, M. (2015). Monitoring of historical frescoes by timed infrared imaging analysis. *Opto-electronics review*, *23*(1), 102-108.

Chaban, A., Deiana, R., & Tornari, V. (2020). Wall Mosaics: A Review of On-Site Non-Invasive Methods, Application Challenges and New Frontiers for Their Study and Preservation. *Journal of Imaging*, *6*(10), 108.

Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M., & Buongiorno, M. F. (2015). Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building. *Sensors*, *15*(1), 194-213.

Ezzati, D., & Najafi, A. (2020). Application of thermography in pathology of historical buildings (case study: Investigation of moisture and detection of materials in Soltanieh dome). International Conference on Civil Engineering, Architecture, Development and Reconstruction of Urban Infrastructure in Iran, Tehran.

Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Perez, O. (2018). Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *93*, 566-579.

Garrido, I., Lagüela, S., & Arias, P. (2018). Infrared thermography's application to infrastructure inspections. *Infrastructures*, *3*(3), 35.

Garrido, I., Solla, M., Lagüela, S., & Fernández, N. (2020). IRT and GPR techniques for moisture detection and characterisation in buildings. *Sensors*, *20*(22), 6421.

Glavaš, H., Hadzima-Nyarko, M., Haničar Buljan, I., & Barić, T. (2019). Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography. *Buildings*, *9*(2), 32.

Grechi, G., Fiorucci, M., Marmoni, G. M., & Martino, S. (2021). 3D Thermal Monitoring of Jointed Rock Masses through Infrared Thermography and Photogrammetry. *Remote Sensing*, *13*(5), 957.

Grinzato, E. (2012). IR thermography applied to the cultural heritage conservation.

https://api.sonel.pl, m. f. (2021). *public/82/3d/823dcda8-7350-484d-8493-9e74174799f5/sonel_measurement_instruments_2021-07_en.pdf*. www.sonel.com

Jo, Y. H., Lee, C. H., & Yoo, J. H. (2013). Study on applicability of passive infrared thermography analysis for blistering detection of stone cultural heritage. *Journal of Conservation Science*, *29*(1), 55-67.

Kavuru, M., & Rosina, E. (2021). IR Thermography for the Restoration of Colonial Architecture in India—Case study of the British Residency in Hyderabad, Telangana. *Journal of Cultural Heritage*, *48*, 24-28.

Knospe, B. (2017). *Thermography Pocket Guide*. https://staticint.testo.com/media/1d/b7/21fc65abbea1/Pocket-GuideThermography-EN.pdf

Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, *134*, 531-549.

Lerma, C., Mas, Á., Gil, E., Vercher, J., & Torner, M. E. (2018). Quantitative analysis procedure for building materials in historic buildings by applying infrared thermography. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, *54*(8), 601-609.

Meola, C., Boccardi, S., & Carlomagno, G. M. (2017). Nondestructive testing with infrared thermography.

Mineo, S., & Pappalardo, G. (2021). Rock Emissivity Measurement for Infrared Thermography Engineering Geological Applications. *Applied Sciences*, *11*(9), 3773.

Moradi, M., & Sfarra, S. (2021). Rectifying the emissivity variations problem caused by pigments in artworks inspected by infrared thermography: A simple, useful, effective, and optimized approach for the cultural heritage field. *Infrared Physics & Technology*, *115*, 103718.

Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., & Rubio de Hita, P. (2013, 2013). Application of non-destructive techniques in the inspection of the wooden roof of historic buildings: A case study.

Napolitano, R., Hess, M., & Glisic, B. (2019). Integrating non-destructive testing, laser scanning, and numerical modeling for damage assessment: the room of the elements. *Heritage*, *2*(1), 151-168.

Nardi, I., de Rubeis, T., Taddei, M., Ambrosini, D., & Sfarra, S. (2017). The energy efficiency challenge for a historical building undergone to seismic and energy refurbishment. *Energy Procedia*, *133*, 231-242.

Ortiz-Sanz, J., Gil-Docampo, M., Arza-García, M., & Cañas-Guerrero, I. (2019). IR thermography from UAVs to monitor thermal anomalies in the envelopes of traditional wine cellars: Field test. *Remote Sensing*, *11*(12), 1424.

Rakha, T., & Gorodetsky, A. (2018). Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Automation in Construction*, *93*, 252-264.

Rizzi, A., Voltolini, F., Girardi, S., Gonzo, L., & Remondino, F. (2007). Digital preservation, documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital cameras and range sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *36*(Part5/C53), 631-636.

Rocha, J. H. A., Santos, C. F., & Póvoas, Y. V. (2018). Evaluation of the infrared thermography technique for capillarity moisture detection in buildings. *Procedia Structural Integrity*, *11*, 107-113.

Scaioni, M., Rosina, E., L'Erario, A., & Dìaz-Vilariño, L. (2017). Integration of infrared thermography and photogrammetric surveying of built landscape. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, *42*.

Shariq, M. H., & Hughes, B. R. (2020). Revolutionising building inspection techniques to meet large-scale energy demands: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109979.

Spodek, J., & Rosina, E. (2009). Application of infrared thermography to historic building investigation. *Journal of architectural conservation*, *15*(1), 65-81.

Tavukçuoğlu, A. (2018). Non-destructive testing for building diagnostics and monitoring: experience achieved with case studies.

Tavukçuoğlu, A., Düzgüneş, A., & Caner-Saltık, E. N. (2003). Thermography and Levelling Survey. In Water Supply and Drainage for Buildings. 29th International Symposium CIB WO62 2003, Ankara, Türkiye 11-12 September.

Theodorakeas, P., Cheilakou, E., Ftikou, E., & Koui, M. (2015). Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures.

Țurcanu, E. F., Ciocan, V., Verdeș, M., Luciu, R. S., Bălan, M. C., Hudișteanu, S. V., & Burlacu, A. (2019). IR thermography applied in church heritage conservation.

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.

Valero, L. R., Sasso, V. F., & Vicioso, E. P. (2019). In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques. *Case Studies in Construction Materials*, *10*, e00228.

Vavilov, V., & Burleigh, D. (2020). *Infrared thermography and thermal nondestructive testing*. Springer.

Zalewski, L., Lassue, S., Rousse, D., & Boukhalfa, K. (2010). Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. *Energy Conversion and Management*, *51*(12), 2869-287.