HSA
میراث جنوب غرب آسیا
HERITAGE OF SOUTHWEST ASIA

تصویربرداری حرارتی فروسرخ: روشی غیرتخریبی برای ارزیابی وضعیت حفاظتی کاشی‌های تاریخی پیش از مداخله مرمتی[۱]

زهره چهاردولی

دانشکده شیمی، آزمایشگاه تشخیص هنر توسط میکرو شیمی و میکروسکوپی، دانشگاه بلونیا، بلونیا، ایتالیا

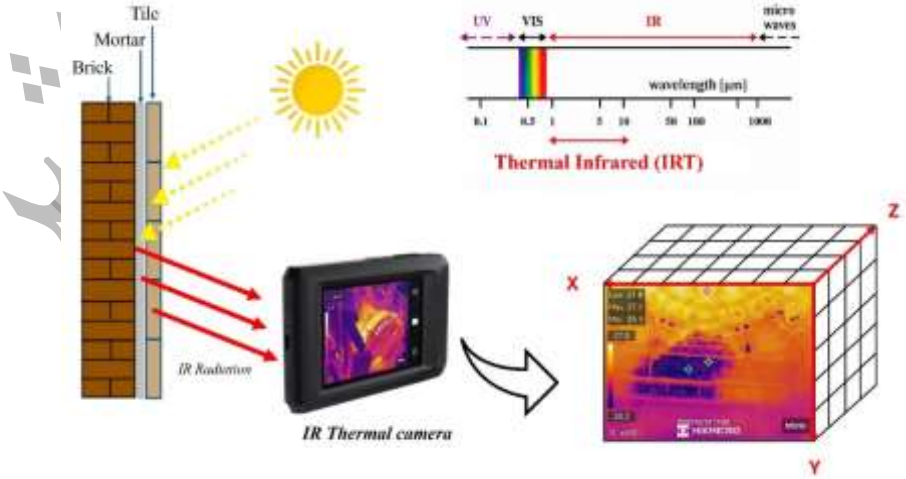
https://orcid.org/0000-0003-4926-2506

zohreh.chahardoli@gmail.com

چکیده

ارزیابی میزان تخریب و حفاظت در بناهای تاریخی و آرایه‌های معماری برای حفاظت پیشگیرانه مؤثر از میراث فرهنگی ضروری است. شناسایی زودهنگام آسیب و عوامل خطر برای پیشگیری از آسیب بیشتر و پشتیبانی از برنامه‌ریزی آگاهانه حفاظتی، حیاتی است. روش‌های بررسی غیرمخرب و در مکان تاریخی، که امکان ارزیابی آثار تاریخی را بدون نمونه‌برداری یا مداخله فیزیکی فراهم می‌کنند، در این زمینه مطالعاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در میان این روش‌ها، تصویربرداری حرارتی مادون قرمز در سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای را در پژوهش‌های حفاظتی و مرمتی به خود جلب کرده است. این پژوهش به بررسی اثربخشی تصویربرداری حرارتی مادون قرمز به‌عنوان یک روش میدانی برای ارزیابی وضعیت چندین نمای کاشی‌کاری تاریخی، شامل شناسایی ویژگی‌ها و نقایص زیرسطحی، در کاخ گلستان و مسجد سلطانی (امام) در تهران می‌پردازد. برای این منظور، مجموعه‌ای از بررسی‌های حرارتی تحت شرایط محیط طبیعی انجام شد و ترموگرام‌های به‌دست‌آمده با تمرکز بر الگوهای توزیع دما (گرما، درجه سانتی‌گراد) و ناهنجاری‌های حرارتی تحلیل شدند. هدف اصلی این پژوهش، تعیین توانایی تصویربرداری حرارتی مادون قرمز در غربالگری اولیه مناطق مستعد فرسودگی و آسیب و همچنین شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی مرتبط با نفوذ رطوبت، جدایش کاشی‌های تاریخی از بستر، و ناهمگونی ساختاری در آرایه‌های کاشی‌کاری تاریخی بود. یافته‌ها نشان می‌دهند که تصویربرداری حرارتی مادون قرمز به‌طور مؤثر نقایص سطحی و زیرسطحی را آشکار می‌سازد و بینش ارزشمندی درباره وضعیت آرایه‌های کاشی‌کاری و مصالح ساختمانی ارائه می‌دهد. این فناوری، بدون نیاز به نمونه‌برداری یا مداخله فیزیکی، امکان ارزیابی اولیه سریع، درجا، و مقایسه‌ای از بناهای تاریخی را فراهم می‌کند. این نتایج پتانسیل تصویربرداری حرارتی مادون قرمز را به‌عنوان ابزاری برای تشخیص ابتدایی کارآمد در شناسایی سریع محل آسیب در حفاظت و مرمت آثار تاریخی و میراث فرهنگی برجسته می‌سازند و داده‌های قابل‌اعتمادی برای آگاهی از تصمیم‌گیری و هدایت تلاش‌های حفاظتی آینده فراهم می‌آورند.

کلیدواژه‌ها: آثار تاریخی؛ ارزیابی غیرتخریبی؛ تصویربرداری حرارتی مادون قرمز؛ مصالح ساختمانی؛ کاشی‌کاری تاریخی؛ حفاظت پیشگیرانه.



شکل ۱. چکیده تصویری خلاصه عملکرد روش تصویربرداری حرارتی فروسرخ(IRT)

۱ نسخه انگلیسی این مقاله با عنوان زیر در همین شماره مجله منتشر شده است.

Infrared Thermal Imaging: A Non-Destructive Technique for Pre-Screening Historical Tile's Detachment

۱.مقدمه

مطالعات علمی میراث فرهنگی و آرایه‌های معماری اهمیت بسزایی دارند، چراکه امکان گردآوری اطلاعات ارزشمندی را فراهم می‌کنند (Dritsa et al., 2022; Sfarra et al., 2018). ارزیابی وضعیت حفاظتی یک اثر تاریخی نیز از دغدغه‌های اصلی علم حفاظت به شمار می‌رود (Mercuri et al., 2011). حفظ طولانی‌مدت آثار تاریخی و هنری بیش از پیش به توسعه ابزارهای کارآمد و پیشرفته برای تحلیل و پایش آن وابسته است (Ljungberg, 1997; Meola et al., 2005). نماهای تاریخی و آرایه‌های معماری آن‌ها پیوسته در معرض تابش نور خورشید، نوسانات دما، بارندگی و باد قرار دارند. این عوامل تنش‌زا تغییراتی در چرخه حرارتی و رطوبتی آن‌ها ایجاد می‌کنند که به‌مرور به ترک‌خوردگی، نفوذ آب، کاهش چسبندگی و جداشدگی اجزای سرامیکی می‌انجامد (de Melo et al., 2024). از آنجا که این فرایندها اغلب در لایه زیرین سطح قابل‌مشاهده آغاز می‌شوند، روش‌های غیرمخربی که بتوانند آن‌ها را در مراحل اولیه شناسایی کنند، جایگاهی مهم در حفاظت آثار تاریخی پیدا کرده‌اند (Bashevskaya et al., 2017). این روش‌ها داده‌های تشخیصی لازم برای ارزیابی پیش از مداخله را فراهم می‌کنند و خطر مرمت‌های نسنجیده و نادقیق را کاهش می‌دهند (Dritsa et al., 2022; Barbosa et al., 2021). تصویربرداری حرارتی فروسرخ (IRT) دمای سطحی و زیرسطحی را از راه دور و بدون تماس فیزیکی با اثر ثبت می‌کند. دوربین حرارتی فروسرخ، دستگاهی سبک‌وزن و قابل‌حمل برای استفاده در بررسی‌های علمی در مکان تاریخی است و داده‌های سه‌بعدی را با سرعت و وضوح بالا ثبت می‌کند (Costanzo et al., 2015; Meola et al., 2005; Vavilov et al., 1997). پیشرفت‌های اخیر در ساخت تجهیزات نیز دوربین‌های حرارتی را به‌مراتب مقرون‌به‌صرفه‌تر کرده است. آن‌ها معمولاً در بازه مادون قرمز دور (FIR)، حدود ۹۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰ نانومتر، عمل می‌کنند. با افزایش دمای جسم، میزان تابش ساطع‌شده افزایش می‌یابد و همین ویژگی، امکان شناسایی ناهمگنی‌های حرارتی و ساختاری را فراهم می‌آورد (Gade & Moeslund, 2014). روش‌های تصویربرداری حرارتی فروسرخ به‌طور کلی به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند؛ درحالی‌که در حالت فعال می‌توان با استفاده از تحریک حرارتی کنترل‌شده، ناپیوستگی‌های زیرسطحی را آشکار کرد و در حالت غیرفعال (PT) بر پایه گرادیان‌های حرارتی طبیعی، مانند گرم‌شدن و سردشدن روزانه در اثر تابش خورشید، متکی است. حالت تصویربرداری حرارتی غیرفعال به‌ویژه برای سطوح وسیع آرایه‌های معماری و بناهای تاریخی اهمیت دارد، چراکه در این سطوح تحریک گرمای مصنوعی عملاً امکان‌پذیر نیست (Bashevskaya et al., 2017; Mercuri et al., 2011).

در حوزه میراث فرهنگی، تصویربرداری حرارتی فروسرخ در مطالعات پژوهشی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نخستین آن‌ها تشخیص رطوبت (صعودی و نزولی) در نمای ساختمان تاریخی است که پیشینه‌ای طولانی دارد (Bomberg & Shirtliffe, 1978). نواحی مرطوب معمولاً به دلیل سرمایش تبخیری و اینرسی حرارتی بالاتر، سردتر دیده می‌شوند و با ترکیب دمای سطح دیوار و رطوبت نسبی محیط می‌توان خطر میعان را از طریق نقطه شبنم ارزیابی کرد (Grinzato et al., 2002). دومین استفاده پژوهشی تصویربرداری حرارتی فروسرخ، بررسی آرایه‌های معماری و نقاشی‌های دیواری است که در آن از IRT برای مکان‌یابی جداشدگی‌ها، حفره‌ها و ساختارهای پنهان در آرایه‌های گچ‌بری و دیوارنگاره‌ها استفاده شده است (Tortora et al., 2016). از دیگر پژوهش‌ها می‌توان به سطوح موزاییکی و سرامیکی اشاره کرد. تصویربرداری حرارتی غیرفعال و فعال برای بررسی کف‌پوش‌ها و سازه‌های موزاییکی به کار رفته است و جداشدگی روکش‌های سرامیکی چسبانده‌شده امروزی با بارگذاری چرخه‌ای گرمایی-رطوبتی مرتبط دانسته شده است (Theodorakeas et al., 2015; Theodorakeas et al., 2018).

این مطالعات خلأ علمی مشخصی را نمایان می‌کند. آرایه‌های کاشی لعاب‌دار تاریخی ساختاری چندلایه دارند که از لعاب شیشه‌ای نازک، بدنه سرامیکی، ملاط بستر و زیرلایه‌ای از آجر یا سنگ تشکیل شده است. رفتار حرارتی این سامانه در مقایسه با مصالح مجاور تاکنون کمتر به‌طور مستقیم مورد توجه قرار گرفته است. این لایه‌ها از نظر ضریب انبساط حرارتی، ظرفیت گرمایی حجمی و رسانندگی حرارتی با یکدیگر تفاوت دارند؛ ازاین‌رو هر چرخه گرمایش و سرمایش، گرادیان‌ها و تنش‌های حرارتی در فصل مشترک آن‌ها ایجاد می‌کند. این تنش‌ها در لایه شکننده لعاب و در محل اتصال کاشی و ملاط بحرانی‌ترند و ممکن است به ریزترک‌ها، پوسته‌شدن لعاب و سرانجام جداشدن لعاب از بدنه یا کاشی از زیرلایه منجر شوند (Fitzner et al., 2002; Hall & Hoff, 2011). نفوذ رطوبت نیز از طریق چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدن و تبلور نمک‌ها این روند را تشدید می‌کند. جداشدگی آرایه‌های کاشی‌کاری از بستر را به‌ندرت می‌توان تنها با بازرسی چشمی تشخیص داد. علاوه بر آن، دشواری دیگری در عمل وجود دارد، و آن تمایز میان فرسایش فعال و مرمت‌های گذشته

است؛ به‌طور مثال مواردی مانند کاشی‌های مرمتی جایگزین، ملاط‌های جدید و پرکننده‌ها که ممکن است به چشم مشابه به نظر برسند، از نظر جنس و در نتیجه پاسخ حرارتی با هم متفاوت‌اند.

این چالش‌ها در معماری دوره قاجار (۱۷۸۹–۱۹۲۵ م) نمود بیشتری دارند. آرایه‌های کاشی‌کاری در دوره قاجار از انتزاع هندسی دوره‌های پیشین فاصله گرفت و به سوی روایت تصویری، رنگ‌آمیزی غنی و چندرنگ و تأثیرپذیری از هنر اروپایی سمت‌وسو گرفت. اوج این هنر در کاخ گلستان تهران (ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو) به یادگار مانده است؛ کاخی که دیوارهایش با کاشی‌نگاره‌های چشم‌نواز پوشیده شده و موضوعاتشان از صحنه‌های باشکوه نبرد تا نقوش گیاهی ظریف و تکرارشونده را در بر می‌گیرد و در طول زمان بارها مرمت شده‌اند (UNESCO, 2013; Zandieh et al., 2013). طرح‌های تزئینی کاشی لعاب‌دار قاجاری، آجر، سنگ و ملاط را در یک ترکیب واحد کنار هم می‌نشاند و همین تنوع مصالح باعث می‌شود این تزئینات در برابر تنش حرارتی و فرسایش ناشی از رطوبت به‌شدت آسیب‌پذیر باشند و همچنین ارزیابی‌شان با بررسی‌های چشمی متداول دشوار باشد.

بر این اساس، پژوهش حاضر سعی دارد یک دوربین حرارتی فروسرخ (HIKMICRO Pocket Series) را در حالت غیرفعال به‌عنوان ابزاری سریع برای مطالعه اولیه آرایه‌های کاشی‌کاری و بقیه تزئینات آجری، سنگی و بنایی مرتبط با آن‌ها بررسی کند. هدف نخست این است که مشخص شود آیا سطوح آرایه‌های کاشی‌کاری در برابر تابش طبیعی خورشید پاسخی متفاوت از آجر، سنگ و ملاط مجاور نشان می‌دهند و آیا ناهنجاری‌های حرارتی در فصل مشترک این مصالح متمرکز می‌شوند یا خیر. در ادامه، این پژوهش بررسی می‌کند که آیا چنین ابزاری می‌تواند ناهنجاری‌های ناشی از نفوذ رطوبت را از جداشدگی کاشی‌ها از بستر، و نیز از نشانه‌های مداخلات مرمتی گذشته تفکیک کند. در نهایت، این پرسش مطرح می‌شود که آیا می‌توان این نشانه‌های حرارتی را به مبنایی کاربردی برای اولویت‌بندی مداخلات مرمتی بر اساس نوع ناهنجاری تبدیل کرد.

۲.مواد و روش‌ها

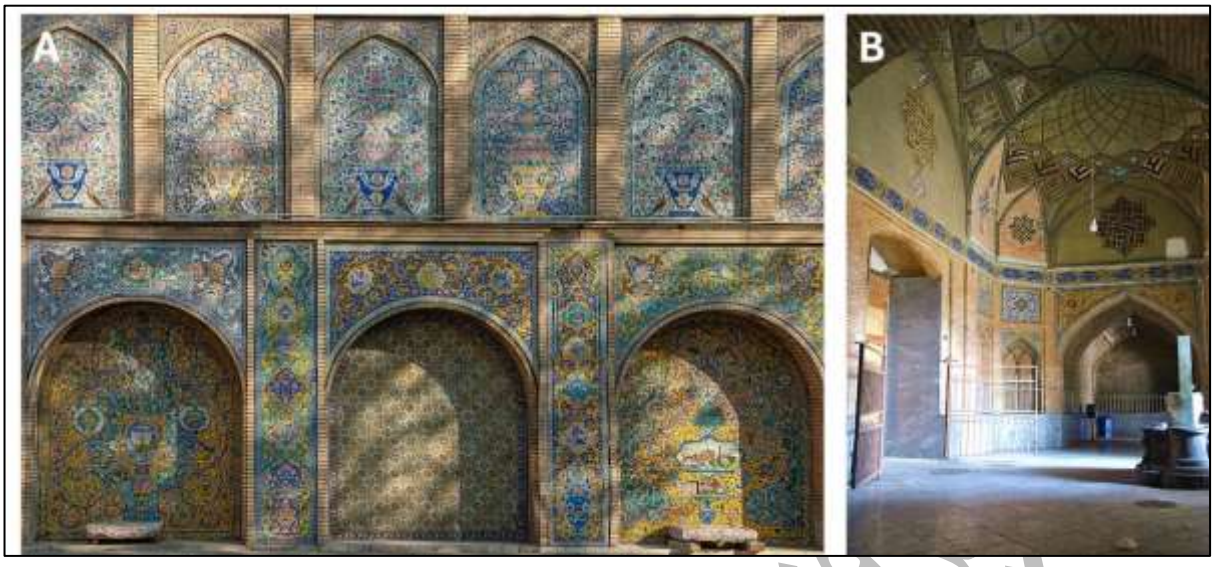
۱.۲.بناهای مورد مطالعه

برای آزمون کاربردهای گسترده تصویربرداری حرارتی فروسرخ (IRT) در میراث فرهنگی در زمینه حفاظت از آرایه‌های کاشی‌کاری تاریخی، دو بنای تاریخی به‌عنوان نمونه موردی انتخاب شدند. مسجد سلطانی (امام) و کاخ گلستان (شکل ۲)، که هر دو در تهران واقع‌اند و به دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی) تعلق دارند، زیر نظر کارشناس میراث فرهنگی مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات این بناها در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول۱ .مشخصات کلی بناهای تاریخی مورد مطالعه برای تحلیل تصویربرداری حرارتی فروسرخ(IRT)

نام بنای تاریخی	نمونه موردی	دوره تاریخی	آرایه‌های معماری	مکان
مسجد سلطانی	SM1	دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی)	کاشی‌کاری؛ آجرکاری	تهران
	SM2	دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی)	کاشی‌کاری؛ آجرکاری	تهران
کاخ گلستان	GP1	دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی)	کاشی‌کاری؛ آجرکاری؛ گچ‌بری؛ سنگ	تهران
	GP2	دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی)	کاشی‌کاری؛ آجرکاری	تهران
	GP3	دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی)	کاشی‌کاری؛ آجرکاری	تهران
	GP4	دوره قاجار (قرن نوزدهم میلادی)	کاشی‌کاری؛ آجرکاری ؛ سنگ	تهران

پذیرفته شده در انتظار انتشار



شکل ۲. فضای داخلی دو بنای تاریخی انتخاب شده برای مطالعه: (A) کاخ گلستان (B) مسجد سلطانی (امام)

۲.۲.تصویربرداری حرارتی مادون قرمز

برای انجام آزمایش‌ها از یک دوربین حرارتی مادون قرمز سری HIKMICRO Pocket با آشکارساز VOx با وضوح بالا، مجهز به یک دوربین اپتیکی ۸ مگاپیکسلی و یک صفحه‌نمایش لمسی LCD به اندازه ۳٫۵ اینچ استفاده شد. این دوربین ترموگرافی دارای تفکیک‌پذیری حرارتی ۲۵۶×۱۹۲ پیکسل (۴۹٬۱۵۲ پیکسل) و حساسیت حرارتی کمتر از ۴۰ میلی‌کلوین در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است و می‌تواند دما را در بازه ۲۰- تا ۴۰۰+ درجه سانتی‌گراد با دقت حداکثر ±۲ درجه یا ±۲٪ اندازه‌گیری کند. نرخ تصویربرداری ۲۵ هرتز امکان پایش سریع را فراهم می‌سازد و وجود حالت‌های مختلف تصویربرداری شامل حرارتی، تلفیقی، تصویر در تصویر و اپتیکی، همراه با دوربین اپتیکی ۸ مگاپیکسلی، انعطاف‌پذیری بالایی در تحلیل داده‌ها ایجاد می‌کند. سری Pocket یک ابزار قدرتمند ترموگرافی است که در جیب جا می‌گیرد و سبک‌بودن آن این امکان را فراهم می‌آورد تا به‌صورت پرتابل استفاده شود. مهم‌ترین ویژگی این تکنیک در استفاده راحت و مستقیم برای تصویربرداری از اثر تاریخی یا هنری بدون نیاز به آماده‌سازی‌های خاص است. تمامی تصاویر حرارتی مادون قرمز استفاده‌شده در این مطالعه در فصل بهار – ماه اردیبهشت تصویربرداری شده است.

۳.۲.پردازش و تحلیل اطلاعات

برای استخراج داده‌ها و تحلیل آن‌ها از نرم‌افزار HIKMICRO Analyser استفاده شد. برای تفسیر بهتر داده‌های تصویری، روش‌های متعددی برای ارزیابی داده‌ها به کار رفت. برای نمایش بهتر تغییرات حرارتی از الگوریتم‌های تلفیق داده‌ها و برای طبقه‌بندی داده‌ها از پالت‌های حرارتی رنگ‌ها برای نمایش دما استفاده شد. از پالت خاکستری (White/Black Hot) برای نمایش جزئیات، رنگین‌کمانی برای ایجاد کنتراست بالا در اختلاف‌های دمایی کوچک، و پالت‌های تخصصی مانند Ironbow/Lava برای تمایز شهودی نواحی گرم و سرد استفاده شد (گرم = روشن/طیف‌های گرم، سرد = تیره/آبی).

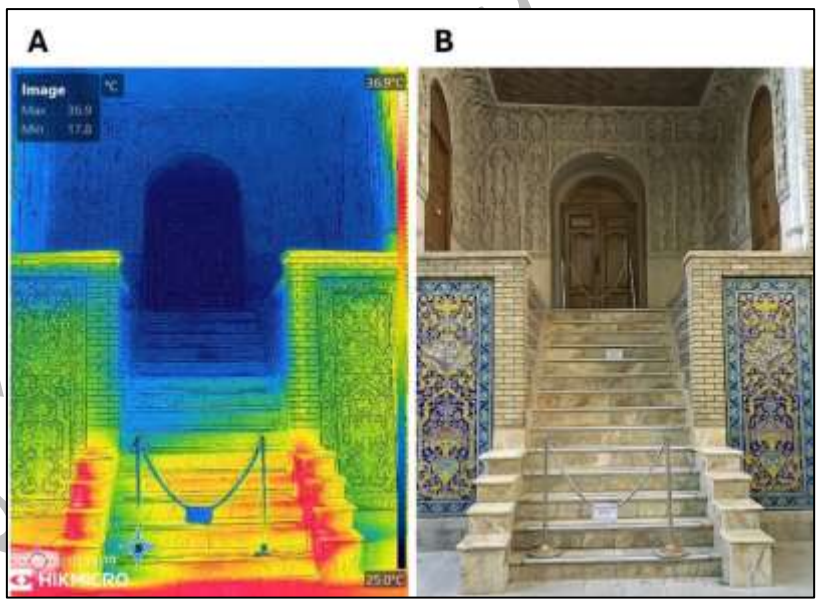
۳. نتایج و بحث

برای پایش ناهنجاری‌ها، آرایه‌های کاشی‌کاری در فضای داخلی و بیرونی در دو بنای تاریخی کاخ گلستان و مسجد سلطانی با دوربین حرارتی فروسرخ مورد بررسی قرار گرفتند و بخش‌های مختلف بر اساس جنس مصالح و وضعیتشان ارزیابی شدند. همه داده‌ها در شرایط آب‌وهوایی معتدل برداشت شدند. پایگاه داده به‌دست‌آمده بر اساس نوع مصالح بنایی و آرایه‌های تزئینی به‌کاررفته در هر بنا، در دو گروه دسته‌بندی شد. بررسی‌های حرارتی در حالت غیرفعال و با تکیه بر گرادیان‌های حرارتی طبیعی انجام شدند. از تصویربرداری حرارتی فروسرخ فعال استفاده نشد، چراکه هدف، شناسایی اولیه سریع و درمکان سطوح وسیع و آسیب‌پذیر تاریخی بود که در معرض بازدید عموم قرار دارند. ناهنجاری‌ها به‌صورت تضادهای حرارتی نسبی تفسیر شدند، نه بر اساس دمای مطلق. بنابراین جداشدگی‌های احتمالی کاشی‌کاری‌ها و نواحی متأثر از رطوبت باید با روش‌های غیرمخرب تکمیلی تأیید شوند.

۳.۱. داده‌های کاخ گلستان (GP۱)

به‌منظور ارزیابی وضعیت حفاظتی و جدایش کاشی‌های لعاب‌دار، بخش‌ها و مصالح مختلف بر اساس داده‌های تصاویر حرارتی (شکل ۳) و از طریق تحلیل ناحیه‌ای و تک‌نقطه‌ای بررسی شدند. شکل a۳ ترموگرام محوطه GP1 را نشان می‌دهد. دمای سطوح بین ۲۴٫۰ تا ۳۶٫۹ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. در فضای سرپوشیده، دما بین ۲۴ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد بود و کمترین مقدار (P3:۲۴٫۱ درجه سانتی‌گراد روی در چوبی انتهای اتاق ثبت شد. دما به‌تدریج به سمت نواحی بیرونی و در معرض تابش افزایش می‌یافت. بیشترین مقادیر روی سطوح سنگی پایه سازه (P2:۳۵٫۰ درجه سانتی‌گراد؛ P1:۳۶٫۸ درجه سانتی‌گراد) و روی پله‌ها (R2:۳۰٫۰ تا ۳۵٫۸ درجه سانتی‌گراد) ثبت شد. جزئیات مربوط به سطوح آرایه‌های کاشی‌کاری در شکل ۵ و جدول ۲ آمده است.

عوامل متعددی ممکن است در این تفاوت‌ها نقش داشته باشند. آشکارترین آن‌ها میزان قرارگیری در معرض تابش خورشید است. فضای سرپوشیده در زمان برداشت داده‌ها هیچ تابش مستقیمی دریافت نمی‌کرد، درحالی‌که نما، پایه سنگی و پله‌ها مستقیماً زیر نور آفتاب بودند. به بیان دقیق‌تر، این سطوح در آن ساعت از روز شدت تابش بالایی نیز دریافت می‌کردند. ازاین‌رو، دمای پایین فضای سرپوشیده، از جمله در محل در چوبی، عمدتاً ناشی از سایه است. از آنجا که سطوح چوبی و سنگی در شرایط تابش یکسانی قرار نداشتند، این داده‌ها امکان تفکیک اثر ویژگی‌های مصالح را فراهم نمی‌کنند. هرچند تابش مستقیم خورشید می‌تواند دمای سطح چوب را به‌طور موقت بالا ببرد، ظرفیت کم ذخیره حرارتی چوب باعث می‌شود گرمای جذب‌شده به‌سرعت از دست برود و در نتیجه پایداری حرارتی آن کمتر باشد (Steinhagen & Haslett, 1993). با این حال، ویژگی‌های مصالح نیز ممکن است بر این پاسخ اثر بگذارند. این تفاوت‌ها از خواص فیزیکی مصالح، از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی و رسانندگی حرارتی، ناشی می‌شوند که در مجموع ظرفیت گرمایی حجمی و در نهایت اینرسی حرارتی هر ماده را تعیین می‌کنند(Incropera et al., 2011; Çengel & Ghajar, 2015).

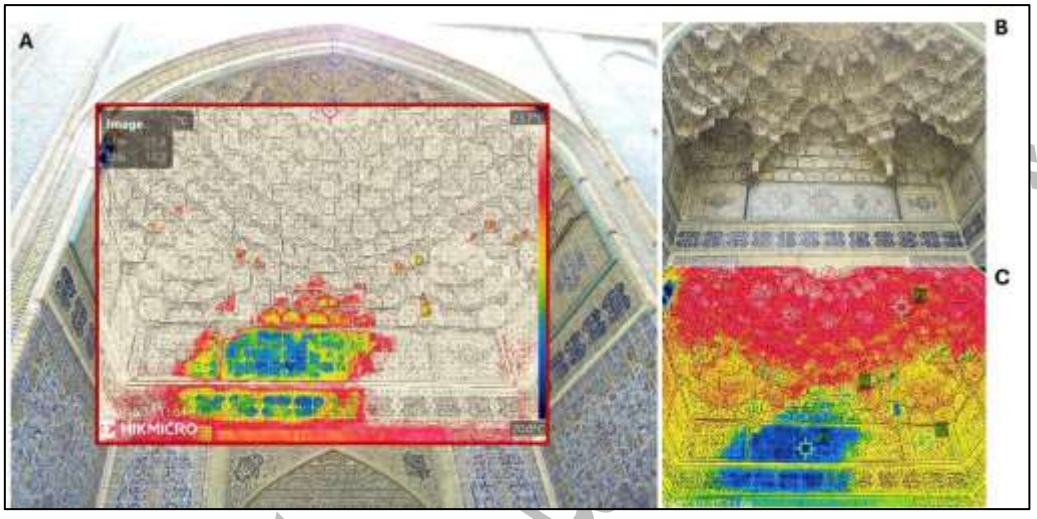


شکل ۳ .توزیع مکانی دما (GP1) (A) تصویر حرارتی فروسرخ با گستره دمایی ۲۴٫۰ تا ۳۶٫۹ درجه سانتی‌گراد؛ (B) تصویر نور مرئی از مکان مورد مطالعه

۳.۲. داده‌های مسجد سلطانی (SM1)

شکل ۴ مقایسه‌ای میان تصویر نور مرئی و توزیع حرارتی تصاویر حرارتی فروسرخ از سطح کاشی مقرنس، به‌عنوان یک تزئین معماری سه‌بعدی، در ورودی جنوبی مسجد سلطانی تهران را به همراه نقاط اندازه‌گیری منتخب نشان می‌دهد. تصویر نور مرئی جزئیات هندسی و تزئینی مقرنس و کتیبه‌ها را به‌وضوح نشان می‌دهد و به‌عنوان تصویر مرجع برای تطبیق و تفسیر داده‌های حرارتی به کار می‌رود. همان‌طور که در شکل b۴ دیده می‌شود، در تصویربرداری با نور مرئی هیچ بی‌نظمی آشکار یا نشانه‌ای از فرسایش یا آسیب سازه‌ای در مقرنس یا کتیبه‌ها قابل‌تشخیص نیست.

در مقابل، تصویر حرارتی فروسرخ و نقشه توزیع دما، تغییرات حرارتی چشمگیری را در همین نواحی آشکار می‌کنند که در تصویر نور مرئی قابل‌تشخیص نیستند. ترموگرام فروسرخ، توزیع دمای ناهمگنی را در سطح کاشی مقرنس نشان می‌دهد. بخش‌های میانی و پایینی تصویر دمای کمتری نسبت به نواحی بالایی دارند؛ تفاوتی که به‌روشنی در مقیاس رنگی بازتاب یافته است. چهار نقطه اندازه‌گیری تعیین‌شده (P1 تا P4) اختلاف دمای محسوسی با یکدیگر دارند. همان‌طور که در شکل a۴ دیده می‌شود، ناحیه مورد نظر (ROI) دربرگیرنده نقطه P1، ۳ درجه سانتی‌گراد سردتر از ناحیه مرجع در P2 بود، هرچند هر دو در ارتفاع یکسان و در شرایط محیطی مشابهی قرار داشتند. این ناهنجاری موضعی از وجود علتی مشخص حکایت دارد، مانند نفوذ رطوبت، حفره‌ای زیرسطحی، یا تفاوت در جنس مصالح یا شیوه اجرا که ممکن است به جداشدگی کاشی بینجامد. برای تأیید منشأ آن، بررسی‌های بیشتری لازم است.



شکل ۴. (A) تصویر نور مرئی از طاق مقرنس، به همراه ترموگرام درج‌شده با لبه‌های تقویت‌شده (۲۰٫۰ تا ۲۳٫۷ درجه سانتی‌گراد). (B) نمای نزدیک با نور مرئی از مقرنس و نوار کاشی‌کاری‌شده. (C) ترموگرام (۱۷٫۲ تا ۲۷٫۵ درجه سانتی‌گراد) که سازه گرم مقرنس (قرمز/نارنجی)، نوار کاشی‌کاری‌شده با دمای بینابینی (زرد–سبز) و ناحیه ناهنجار سردتر (آبی) را نشان می‌دهد.

P3که در بخش بالایی سازه مقرنس قرار دارد، بیشترین دما را ثبت کرد که با قرارگیری بیشتر آن در معرض تابش خورشید و هندسه پیچیده سه‌بعدی‌اش همخوانی دارد P4 .که در محل گذار میان مقرنس و نوار کاشی‌کاری‌شده زیرین واقع است، مقداری بینابینی ثبت کرد که بازتاب گذار تدریجی حرارتی میان این دو عنصر معماری است. در نوار کاشی‌کاری‌شده، P2 دمایی متوسط و همخوان با سطوح پیرامون ثبت کرد.

نتایج وجمع بندی اطلاعات

این پژوهش نشان می‌دهد که تصویربرداری حرارتی فروسرخ (IRT) ابزاری بسیار کارآمد، غیرمخرب و بدون تماس برای غربالگری اولیه وضعیت حفاظتی آرایه‌های کاشی‌کاری تاریخی و مصالح معماری مرتبط با آن‌هاست. یکی از نقاط قوت اصلی این رویکرد پیشنهادی، سرعت آن است: تصویربرداری حرارتی فروسرخ به روش غیرفعال این امکان را فراهم می‌کند که سطوح وسیعی از نمای بنای تاریخی در مدت زمان کوتاهی غربالگری شود و نواحی در معرض خطر فرسایش دقیقاً مشخص شوند؛ ازاین‌رو این روش گام نخست کارآمدی در یک فرایند تشخیصی چندمرحله‌ای به شمار می‌رود.

در همه محوطه‌های بررسی‌شده، تصویربرداری حرارتی فروسرخ به‌طور پیوسته تضادهای حرارتی میان کاشی‌های لعاب‌دار، سنگ، آجر و چوب را آشکار کرد و شواهد روشنی از رفتار حرارتی هر یک از این مصالح و پیامدهای آن برای عملکرد سازه‌ای بلندمدت به دست داد. سنگ بیشترین توانایی را در جذب و نگهداری حرارت نشان داد و همین امر به ایجاد گرادیان‌های حرارتی شدید و تنش‌های درونی می‌انجامد که می‌تواند در گذر زمان روند تخریب را تسریع کند. اختلاف دما میان کاشی‌های لعاب‌دار و مصالح بنایی پیرامون، گرادیان‌های حرارتی موضعی در فصل مشترک مصالح ایجاد کرد؛ اثری که به‌ویژه در جاهایی که مصالح ناهمسان مستقیماً در کنار هم به کار رفته‌اند، نگران‌کننده است.

مهم‌تر از همه، این یافته‌ها به‌طور مستقیم ارزش تصویربرداری حرارتی فروسرخ را به‌عنوان ابزاری برای هشدار زودهنگام جداشدگی آرایه‌های کاشی‌کاری تاریخی تأیید می‌کنند. به‌طور مشخص، جذب حرارت کمتر می‌تواند نشانگر ناهنجاری‌هایی باشد که احتمالاً از تخریب ملاط پشت کاشی و جداشدگی آن حکایت دارند. جذب و نگهداشت حرارت بیشتر در کاشی‌های لعاب‌دار نسبت به آجرهای پیرامون، از افزایش خطر بلندمدت جداشدگی از بستر خبر می‌دهد. این بررسی، تمرکز تنش در فصل مشترک کاشی و ملاط را به‌عنوان پیش‌درآمدی کلیدی برای کاهش چسبندگی و نفوذ رطوبت شناسایی کرد؛ یعنی دقیقاً همان سازوکار فرسایشی که تصویربرداری حرارتی فروسرخ برای تشخیص آن، پیش از آنکه به چشم دیده شود یا از نظر سازه‌ای بحرانی شود، بسیار مناسب است. ناهنجاری‌های حرارتی ثبت‌شده در مقرنس‌ها (SM1)، قاب‌های کاشی‌کاری‌شده (GP2 و GP3) و سطوح سنگی، به‌طور پیوسته با نواحی محتمل تجمع رطوبت مطابقت داشتند و این قابلیت تشخیصی را تأیید کردند.

این رویکرد، بررسی و شناخت وضعیت حفاظتی این مجموعه‌های تاریخی را به‌طور چشمگیری بهبود خواهد بخشید. همچنین زمان کوتاه گردآوری داده‌ها و بازده تحلیلی بالای آن، کاربرد آن را به‌عنوان روشی برای شناسایی زودهنگام محل احتمالی وقوع آسیب‌ها در چارچوب یک پروتکل گسترده‌تر حفاظت پیشگیرانه توجیه می‌کند. در مجموع، این نتایج تصویربرداری حرارتی فروسرخ را به‌عنوان ابزار تشخیصی قابل‌اعتماد، کارآمد و غیرتهاجمی برای تشخیص زودهنگام و غربالگری اولیه جداشدگی کاشی تثبیت می‌کنند؛ ابزاری که می‌تواند به شکلی معنادار راهبردهای پایش و حفاظت بناهای تاریخی را پشتیبانی کند.

محدودیت‌ها و پژوهش‌های آینده

این پژوهش، به‌عنوان یک رویکرد تشخیصی و درمحل آثار تاریخی، در شرایط طبیعی محیطی انجام شد. بنابراین امکان کنترل کامل تابش خورشید، سایه و باد وجود نداشت و ارزیابی ناهنجاری‌ها به‌صورت تضاد نسبی در مقایسه با نواحی مرجع از همان جنس، راهکار مؤثری برای در نظر گرفتن این عوامل بود. ناهنجاری‌های شناسایی‌شده، از جمله مواردی که احتمالاً با رطوبت، جداشدگی و مرمت‌های گذشته مرتبط‌اند، مبنای مشخصی برای بررسی‌های تکمیلی هدفمند فراهم می‌کنند. در پژوهش‌های آینده می‌توان ناهنجاری‌های منتخب را با روش‌هایی متناسب با هر سازوکار فرسایش راستی‌آزمایی کرد. جداشدگی لعاب را می‌توان با روش‌های میکروسکوپی و طیف‌سنجی، مانند SEM، رامان، FTIR، XRF و تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی، بررسی کرد که لعاب را همراه با محصولات دگرسانی، نمک‌ها و مواد مرمتی مرتبط با آن مشخصه‌یابی می‌کنند. جداشدگی کاشی از زیرلایه را نیز می‌توان با رادار، آزمون فراصوت و آزمون ضربه بررسی کرد که حفره‌ها و کاهش چسبندگی میان کاشی و زیرلایه را آشکار می‌کنند. تکرار بررسی‌ها در فصل‌های مختلف سال، از جمله دوره‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و چرخه‌های کامل شبانه‌روزی، شناخت دقیق‌تری از رفتار حرارتی کاشی‌کاری به دست می‌دهد. ترکیب این رویکردها با تصویربرداری حرارتی فروسرخ فعال روی نواحی آزمایشی کوچک، مدل‌سازی انتقال حرارت و تحلیل چندمتغیره توالی تصاویر حرارتی، به تدوین سازوکاری قابل‌اتکا و عینی برای اولویت‌بندی مداخلات حفاظتی در نماهای کاشی‌کاری قاجار کمک خواهد کرد.

سپاسگزاری: نویسنده مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از مهندس محمدحسن محب‌علی به‌دلیل مساعدت‌های فنی ایشان در طول انجام این پژوهش و همچنین از مهندس امین محب‌علی به‌خاطر پشتیبانی فنی و همکاری ارزشمند ایشان در فرایند گردآوری داده‌های تصویربرداری حرارتی مادون قرمز (IRT) اعلام می‌دارد.

مشارکت نویسنده: نویسنده به‌تنهایی مسئول تمامی مراحل این پژوهش، شامل ایده‌پردازی و تدوین طرح پژوهش، روش‌شناسی، گردآوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله بوده است.

تعارض منافع:نویسنده اعلام می‌کند که هیچ‌گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

تأمین مالی: این پژوهش از هیچ‌گونه حمایت مالی خارجی برخوردار نبوده است.

بیانیه دسترس‌پذیری داده‌ها: داده‌های پشتیبان یافته‌های این پژوهش، بنا به درخواست معقول و موجه، از طریق نویسنده قابل دسترسی هستند.

References

Allardice, B. (2012). https://www.flickr.com/photos/gballardice/7571636374

Barbosa, M. T. G., Rosse, V. J., & Laurindo, N. G. (2021). Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades. Journal of Building Engineering, 43, Article 102555. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102555

Bashevskaya, O. S., Bushuev, S. V., Poduraev, Y. V., Mel'nichenko, E. A., Shcherbakov, M. I., & Garskov, R. V. (2017). Use of infrared thermography for evaluating linear dimensions of subsurface defects. Measurement Techniques, 60(5), 495–500. https://doi.org/10.1007/s11018-017-1217-0

Bomberg, M., & Shirtliffe, C. J. (1978). Influence of moisture and moisture gradients on heat transfer through porous building materials. In R. P. Tye (Ed.), Thermal transmission measurements of insulation (ASTM STP 660, pp. 211–233). American Society for Testing and Materials.

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (5th ed.). McGraw-Hill Education.

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. https://doi.org/10.3390/s150100194

de Melo, S. B., da Paz, R. F., & Mesquita, E. (2024). Recent advances on infrared thermography for ceramic tiles detachments diagnosis: Literature review. Journal of Building Rehabilitation, 9, Article 35. https://doi.org/10.1007/s41024-024-00387-6

Dritsa, V., Orazi, N., Yao, Y., Paoloni, S., Koui, M., & Sfarra, S. (2022). Thermographic imaging in cultural heritage: A short review. Sensors, 22(23), Article 9076. https://doi.org/10.3390/s22239076

Fitzner, B., Heinrichs, K., & La Bouchardiere, D. (2002). Damage index for stone monuments. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(3), 397–417. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00006-9

Ftikou, E. (2016). Criteria for the selection of materials and techniques for the conservation of historic mosaics substrate [Doctoral dissertation, National Technical University of Athens].

Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: A survey. Machine Vision and Applications, 25(1), 245–262. https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5

Grinzato, E., Bison, P. G., & Marinetti, S. (2002). Monitoring of ancient buildings by the thermal method. Journal of Cultural Heritage, 3(1), 21–29. https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01159-7

Hall, C., & Hoff, W. D. (2011). Water transport in brick, stone and concrete (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10911

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). Wiley.

Lawrence, M., & Walker, P. (2006). The thermal performance of traditional brick masonry. Construction and Building Materials, 20(10), 785–794. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.018

Ljungberg, S. A. (1994). Infrared techniques in buildings and structures: Operation and maintenance. In X. Maldague (Ed.), Infrared methodology and technology (Non-destructive Testing Monographs and Tracts, Vol. 7, pp. 211–252). Gordon & Breach Science Publishers.

Meola, C., Di Maio, R., Roberti, N., & Carlomagno, G. M. (2005). Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. Engineering Failure Analysis, 12(6), 875–892. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.030

Mercuri, F., Paoloni, S., Cicero, C., Zammit, U., & Orazi, N. (2018). Infrared emission contrast for the visualization of subsurface graphical features in artworks. Infrared Physics & Technology, 89, 223–230. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.010

Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Delegou, E. T., Aggelakopoulou, M., Karoglou, G., Haralampopoulos, S., Griniezakis, M., Koui, P., Karmis, A., & Aggelopoulos, A. (2000). Investigation for the compatibility of conservation interventions on Hagia Sophia mosaics using NDT techniques. Journal of the European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, 59, 103–120.

Neville, A. M. (2012). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education.

Orazi, N. (2020). Mid-wave infrared reflectography and thermography for the study of ancient books: A review. Studies in Conservation, 65(8), 437–449. https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1706916

Paoloni, S., Mercuri, F., Orazi, N., Caruso, G., & Zammit, U. (2020). Photothermal approach for cultural heritage research. Journal of Applied Physics, 128(18), Article 180904. https://doi.org/10.1063/5.0023432

Sfarra, S., Fernandes, H. C., López, F., Ibarra-Castanedo, C., Zhang, H., & Maldague, X. (2018a). Qualitative assessments via infrared vision of sub-surface defects present beneath decorative surface coatings. International Journal of Thermophysics, 39, Article 13. https://doi.org/10.1007/s10765-017-2333-4

Sfarra, S., Regi, M., Tortora, M., Casieri, C., Perilli, S., & Paoletti, D. (2018b). A multi-technique nondestructive approach for characterizing the state of conservation of ancient bookbindings. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 132, 1367–1387.https://doi.org/10.1007/s10973-018-6997-z

Steinhagen, H. P., & Haslett, A. N. (1993). Thermal properties of wood. Wood and Fiber Science, 25(4), 383–395.

Theodorakeas, P., Cheilakou, E., Ftikou, E., & Koui, M. (2015). Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures. Journal of Physics: Conference Series, 655, Article 012061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012061

Theodorakeas, P., Cheilakou, E., Ftikou, E., & Koui, M. (2018). Long-term and sustainable approach to preserve ancient mosaic heritage: The case study of mosaic pavement located at the "Sanctuary of Pan," Pnyka (Athens). In M. Koui, F. Zezza, & D. Kouis (Eds.), Proceedings of the 10th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, MONUBASIN 2017 (pp. 105–113). Springer.

Tortora, M., Sfarra, S., Chiarini, M., Daniele, V., Taglieri, G., & Cerichelli, G. (2016). Non-destructive and micro-invasive testing techniques for characterizing materials, structures and restoration problems in mural paintings. Applied Surface Science, 387, 971–985. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433216314507

Tortora, M., Sfarra, S., & Casieri, C. (2019). NMR relaxometry and IR thermography to study ancient cotton paper bookbinding. Applied Sciences, 9(16), Article 3406.https://doi.org/10.3390/app9163406

UNESCO. (2013). Golestan Palace. UNESCO World Heritage Centre.https://whc.unesco.org/en/list/1422/

Vavilov, V., Kauppinen, T., & Grinzato, E. (1997). Thermal characterization of defects in building envelopes using long square pulse and slow thermal wave techniques. Research in Nondestructive Evaluation, 9(4), 181–200. https://doi.org/10.1080/09349849709414473

Yang, X., Chen, B., Hu, G., Wang, X., Fang, W., Zhang, J., Tao, N., & Yuan, G. (2022). Pulsed infrared thermographic study of a Chinese Bronze Lei. Heritage Science, 10, Article 152. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00791-6

Zandieh, M., Fahimi Far, A., Khaleghi, I., & Mohammadi Haji Abadi, F. (2013). The identity of the early Qajarid architectural decoration and its sources from the beginning to the end of Fat'h Ali Shah period (1785–1834). International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning, 23(1–2).

پذیرفته شده آماده نشر