



ارزیابی هوازدهی در بناهای تاریخی با استفاده از روش ترموگرافی مادون قرمز (IRT)

میراسدالله حجازی

دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز

اصلان رضایی فرد

دانشجوی دکتری تخصصی ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز

چکیده:

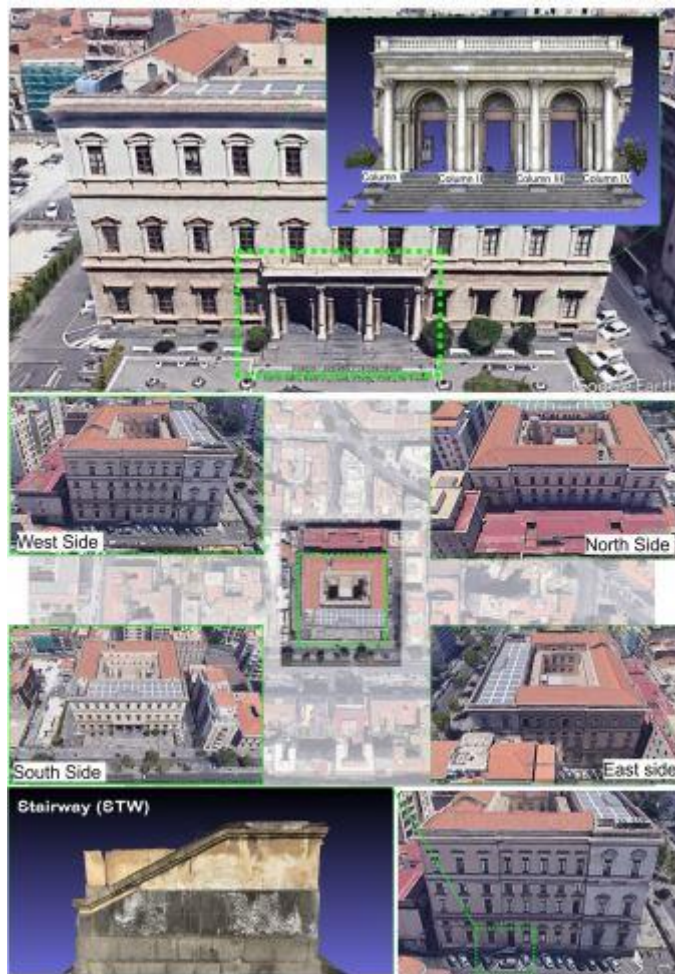
استفاده از روش های تشخیصی هوازدهی به عنوان چالشی اساسی در این زمینه حفاظت، نظارت و مرمت از میراث فرهنگی شناخته می شود. پتانسیل روش ترموگرافی مادون قرمز نشان داده شده به همین منظور شایسته بررسی و توجه است. این مقاله نتایج به دست آمده از استفاده از آن برای بررسی سریع انواع مختلف هوازدهی را ارائه می کند. گذشته از تاثیر سنگ های طبیعی در بناهای تاریخی روش ترموگرافی مادون قرمز امکان تشخیص و نقشه برداری از دماهای سطحی مختلف را به واسطه حضور شکوفه، زیرگل، آلوئول سازی، پوسته سیاه و هوازدهی زیستی در سنگ های آهک و بازالت را نشان می دهد. داده های مادون قرمز توسط مدل های سه بعدی فتوگرامتری از نقاط بررسی شده، که داده های کمی را ارائه می دهد استخراج می گردند. ضخامت سنگ تحت تاثیر هوازدهی مکانیکی و انفعالات کلیدی بین دو فاکتور بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که روش مادون قرمز با بررسی عواملی که عمدتاً شامل مورفولوژی و رنگ و رخ سنگ و همچنین محیط زیست است، شرایط تکمیل تحلیل هایی را که توسط کارهای میدانی نیز تایید شده را فراهم می سازد. این مهم پتانسیل خوب روش ترموگرافی مادون قرمز را به عنوان یک روش تشخیص سریع هوازدهی تایید می کند. بنابراین این مطالعه را می توان مرجع آغازین توسعه دانش در این زمینه در نظر گرفت که در موارد مشابه نیز از این روش بهره گرفته شود.

کلمات کلیدی: روش ترموگرافی مادون قرمز، فتوگرامتری، سنگ طبیعی، هوازدهی

مقدمه

زمان و عوامل جوی (باران، باد، تابش خورشیدی، آلاینده ها، چرخه های انجماد و ذوب، تبلور محلول های نمکی، و رشد موجودات از عوامل اصلی خراب شدن مصالح سنگی در معرض شرایط خارجی هستند. مصاحی که به عنوان مصالح ساختمانی یا تزئین ساختمان ها استفاده می شود. با وجود تنوع روش ها با هدف حفظ ظاهر سنگ ها، هوازدهی به عنوان یک مشکل جدی به ویژه در حفظ میراث فرهنگی مطرح شده است. به طور خاص، ترکیب کانی شناسی سنگ ها به همراه خواص فیزیکی آنها (با ویژگی های خاص با توجه به تخلخل) یک نقش کلیدی در فرآیندهای تخریب این بناها را بازی می کند. در دهه گذشته، فناوری های غیر مخرب و روش های مختلفی برای مطالعه استفاده شده است. کاسولا و همکاران وجود ترک ها و ریز ترک ها در سنگ را از طریق ترکیب تکنیک های اسکن لیزر و اولتراسوند عامل مهم تشخیص دادند. در حالی که آودلیس و مورفولو استفاده از روش ترموگرافی مادون قرمز (IRT) برای تشخیص ترک های سطحی، جداسازی ها، تفاوت در مواد یا وجود رطوبت در داخل سازه ها را گسترش دادند. با این وجود فرآیندی که منجر به تجزیه و تحلیل مشکل و راه حل های ممکن برای بازسازی و یا حفاظت از سنگ ها می گردد اغلب بر اساس تجزیه و تحلیل بصری اولیه است. با این وجود، بازرسی های بصری به تنهایی یک توصیف غیر کامل از آن را ارائه خواهد داد. مشکل اصلی عدم امکان تشخیص پیشرفت هوازدهی با چشم غیر مسلح است. لذا هدف این مقاله آزمایش پتانسیل IRT کاربردی برای حل این مشکل است. برای ارزیابی اولیه پدیده های هوازدهی موثر بر سنگ های طبیعی ترکیب فتوگرامتری و کارهای میدانی قابل استفاده می باشد. استفاده از IRT بر روی سنگ ها پدیده توسعه یافته در مطالعات زمین شناسی مهندسی برای اهداف مختلف مانند آزمایشگاه تخمین غیر مستقیم تخلخل و ارزیابی تداوم منافذ است. این در حالی است که در این زمینه روش به طور گسترده ای برای توصیف توده های سنگی استفاده می شود. به عنوان مثال استفاده از آن برای توصیف سنگ در میراث فرهنگی هنوز در دست توسعه و پیشرفت است و این تحقیقات در این زمینه کمک می کند.

برای آزمایش و اعتبار سنجی کاربرد روش IRT یک ساختمان تاریخی واقع در شهر کاتانیای ایتالیا انتخاب گردید. جنوب ایتالیا یکی از مفرهای دانشگاهی است. شهر کاتانیا که بین سال های ۱۹۳۵ و ۱۹۴۲ ساخته شد (شکل ۱). همانطور که برای بسیاری دیگر از تاریخی بناهای ساخته شده در اواخر باروک در شهر مذکور سبک معماری آن شامل استفاده از انواع سنگ ها به ویژه سنگ آهک بزرگ روشن و یک سنگ آذرین خاکستری تیره است. هر دو نوع سنگ تا حد زیادی در معادن محلی واقع در کوه های هایبلین در جنوب کاتانیا در دسترس بودند. در کوه اتنا نیز سنگ ها نمایانگر هوازدهی تحت تاثیر انواع مختلف پارمترها بودند. در امتداد دیوارهای خارجی انتخاب شده و با استفاده از آن تحت یک توصیف هوازدهی قرار گرفت. بررسی ها با مدل های سه بعدی فتوگرامتری و IRT مقایسه شدند. با روش بیان حرارتی مادون قرمز هدف این است انواع هوازدهی انتخاب شده را درک کنید تا یک رویکرد نوآورانه برای مطالعه اولیه سریع هوازدهی از طریق جایگزین روش های غیر تماسی پیشنهاد گردد.



تصویر ۱. نمای کلی ساختمان Palazzo delle Scienze (PdS) انتخاب شده برای این مطالعه. عناصر محصور شده در مستطیل های چین دار مدل های سه بعدی که از نقطه متراکم فتوگرامتری ساخته شده اند. و برای تجزیه و تحلیل هوازگی ارائه شده در اینجا استفاده می شود.

مواد و روش ها:

این سنگ ها به عنوان مصالح ساختمانی در مرکز شهر باستانی کاتانیا استفاده می شد. در طول قرن هجدهم و نوزدهم هر دو سنگ آذرین و رسوبی از مصالح عمده هستند. استفاده تلفیقی از آنها باعث ایجاد یک رنگ دوگانه روشن تاریک در نما می شود. سنگ های رسوبی، سنگ های کربناته (عمدتاً سنگ های آهکی)، استخراج شده از روی کوه های هیبلین (جنوب شرقی سیسیل) و متعلق به دوران های زمین شناسی مختلف می باشند. این در حالی است که سنگ های آذرین متعلق به جریان های گدازه ای تاریخی یا ماقبل تاریخ کوه اتنا هستند. این سنگ ها می توانند به عنوان تراکی بازالت ها و تراکیاندزیت ها طبقه بندی شوند، به عنوان مثال یک بافت پورفیری و یک ترکیب معدنی معمولاً با پلاژیوکلاز، پیروکسن و الیوین نشان داده می شود. در یک توده زمین متبلور به ندرت ویتروفریک یافت می شود. همه اینها از این به بعد به عنوان "بازالت" شناخته می شود و با توجه به بافت آنها به دو دسته تقسیم می شوند: توده ای و تاولی رویکرد روش شناختی که برای این تحقیق دنبال می شود شامل تمرکز بر توصیف آزمایشگاهی سنگ های مورد مطالعه و استفاده از سنجش از دور برای شناسایی هوازگی سنگ ها است.

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آزمایشگاهی :

هر دو گونه سنگ در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف تخمین خصوصیات زمین شناسی مهندسی اصلی آنها است. نمونه ها ۷۰ میلی متر بودند ($5 \pm$) مکعب، و آزمایشات فیزیکی-مکانیکی مطابق با EN1926 و مشخصات EN1936 به طور خاص، ضریب جذب (ic)، چگالی ظاهری (gb) و کل تخلخل (n) بر اساس وزن سنگ در خشک (mdry)، اشباع (msat) و محاسبه شد. شرایط هیدرواستاتیک (mw)، مطابق با معادلات (۱) و (۳) که چگالی آب است و γ_r چگالی واقعی سنگ است که بر اساس روش پیکنومتر محاسبه می شود. مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مدول الاستیک (E) از طریق تخمین تست های فشرده سازی با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک اتوماتیک ۳۰۰۰ کیلو نیوتن انجام می شود. برای تعیین مدول الاستیک به کنسول E Modulus متصل است.

$$ic = (m_{sat} - m_{dry}) / m_{dry} \quad (1)$$

$$\gamma_b = \frac{m_{dry}}{m_{sat} - m_w} \rho \quad (2)$$

$$n = \left(1 - \frac{\gamma_b}{\gamma_r}\right) 100 \quad (3)$$

تکنیک IRT

تکنیک IRT بر این اصل استوار است که هر شکلی از ماده با دمای بالای صفر مطلق تشعشعات حرارتی ساطع می کند که طول موج آن عمدتاً در محدوده باند مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی قرار می گیرد. این تابش ساطع شده با توجه به قانون استفان-بولتزمن با دمای جسم ساطع کننده متناسب است. از این رو، دمای سطح یک جسم را می توان توسط دستگاه های خاصی به نام دوربین های حرارتی تخمین زد و در محدوده طول موج های ۱۳ تا ۱۴ میکرومتر کار می کنند. با توجه به این واقعیت که تشعشعات حرارتی عمدتاً با چشم غیرمسلح قابل رویت نیستند IRT ابزار مفیدی است برای گسترش ادراک انسان حتی به سمت تشخیص پدیده های غیر قابل مشاهده IRT در حال حاضر در بسیاری از فعالیت ها و شاخه های علمی مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین برای بررسی خصوصیات سنگ ها کاربرد خاصی دارد. به طور خاص از آن برای مطالعه شکستگی سنگ در توده های سنگی استفاده می شود. همچنین برای توصیف سنگ دست نخورده خواص و تغییرات مرتبط تحت شرایط خاص نیز جالب توجه است. در چارچوب حفاظت از میراث فرهنگی روش IRT قبلاً در تشخیص بیوکونیزاسیون نیز مفید بوده است. این مکانیسم بر روی سنگ های طبیعی مطالعه پوسته های سولفات و به طور کلی برای بررسی فرآیندهای تخریب شیمیایی در ساختمان های تاریخی مورد توجه است. در این مقاله تصاویر IRT در نقاط منتخب ساختمان Pds به دست آمد. هدف از آن دسته بندی انواع مختلف هوازدگی و روشن کردن موارد مربوطه است. جنبه حرارتی بررسی ها در نبود تابش مستقیم خورشید انجام شد. همچنین در طول تابستان و در شرایط بدون باران با استفاده از دوربین حرارتی حساس با وضوح مادون قرمز 320×240 پیکسل و دما محدوده بین ۲۰ تا ۶۵ درجه سانتیگراد با دقت ± 2 درجه سانتیگراد مقدار انتشار با توجه به داده های مربوط به همان سنگ تعیین شد. یعنی ۰.۹۴ و ۰.۹۵ برای بازالت و سنگ آهک به ترتیب نتایج متفاوتی به دست آمد. تصاویر حرارتی برای برجسته کردن ویژگی های خاص با توجه به مشاهده های مختلف پس پردازش شدند. انواع هوازدگی و نتایج با کارهای میدانی تایید شد. بررسی فتوگرامتری و بازسازی دیجیتال فتوگرامتری از عناصر ساختمان بررسی شده توسط IRT با هدف تایید از تحلیل ارائه شده در اینجا انجام شد. به طور خاص از این تکنیک مدل ها به طور گسترده در زمینه میراث فرهنگی برای تولید ابر متراکم استفاده می شوند. برای تجزیه و تحلیل مدل های دیجیتال عناصر ساختاری. نیز این روش قابل توجه است. در این مطالعه تحلیل از طریق فتوگرامتری انجام شد که قبلاً نتایج خوبی در این زمینه به دست آمده بود. به عنوان مثال ۳۹ تصاویر دیجیتال توسط دوربین دیجیتال آینه ای نیکون Z62 با یک دوربین عکاسی دیجیتال به دست آمد. سنسور CMOS نیمه هادی اکسید فلزی مکمل با اندازه ۳۵.۹ میلی متر \times ۲۴.۹ میلی متر وضوح 6048×4024 پیکسل، مجهز به لنز ۲۴-۷۰ میلی متری نیکون (نیکون، توکیو،

ژاپن) از مشخصات بارز این روش است. سپس ابرهای نقطه متراکم توسط ابزار خاصی که در آن پیاده سازی شده است پردازش شدند. برنامه کامپیوتری CloudCompare با هدف دستیابی به مدل دیجیتالی ارتفاع (DEM) از عناصر ساختاری تحلیل شده. این روشها به طور خاص برای مطالعه شرایط مورفولوژیکی سنگ تحت یک نوع هوازدگی خاص (آلئولیزاسیون) به کار رفت. با اشاره خاص به ارزیابی کمی عمق هوازدگی این روش قابلیت خوبی را برای تحلیل به نمایش گذاشت.

پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ

سنگ آهک هیبلن

شکل a2 سنگ آهک ریزدانه استخراج شده در کوه های هیبلن و خاصیت متخلخل آن در شکل b نشان داده می شود. بافتی که توسط حفره های میلی متری ایجاد می شود. تخلخل کل آنها به طور کلی مربوط به فرایندهای اولیه است. فرایندها به طور متوسط، حدود ۳۷.۶۵٪ دخالت دارند. بیشتر آن توسط به هم پیوسته نشان داده می شود حفره هایی که به سنگ خاصیت تخلخل موثر می دهند به طور متوسط حدود ۲۷ درصد می باشند. چگالی ظاهری آنها بین ۱۵۰۱ تا ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است و درجه فشردگی با نسبت بین چگالی واقعی و حجم بین ۱.۴۳ و ۱.۷۹ است. (جدول ۱). در این مورد چگالی واقعی بر اساس روش پیکنومتر محاسبه شد (شکل ۲ ج). فشردگی سازی تک محوری آزمایشات در شکل ۲ d طیف وسیعی از مقادیر مقاومت را نمایش می دهد. (جدول ۱). به خصوص متخلخل ترین نمونه ها با مقادیر کمتر UCS و E مشخص می شوند که نشان دهنده کنترل توسط تخلخل بر روی رفتار مکانیکی این سنگ ها می باشد. چنین خواصی از نظر آماری به خوبی همبستگی با میزان UCS و میزان تخلخل را نمایش می دهند. با رسم UCS در برابر تخلخل در شکل e2 یک همبستگی آماری خطی منفی با ضریب تعیین $r^2 = 0.81$ مشخص شده است. وابستگی شدید بین مقاومت و تخلخل سنگ با توجه به چندین تجربه استنباط و می گردد. از سوی دیگر، UCS و E از نظر آماری با یک رابطه خطی مثبت همبستگی شکل ۲ قسمت اف نشان می دهد که بالاترین مقاومت نسبت به تغییر شکل پذیری سنگ دست نخورده می باشد.





شکل ۲: (الف، ب) بلوک های سنگ آهک در معدن نمونه برداری. (ج، د) عکسی که در با استفاده از پیکنومتر گرفته شده است بر مبنای تجزیه و تحلیل برای فرآیند تخمین چگالی واقعی. (ه) نمونه بازالت در شرایط هیدرولیک قبل از تست فشرده سازی تک محوری. f رگرسیون آماری بین UCS و تخلخل کل. (ز) رگرسیون آماری بین UCS و E. بازالت های اتنا از سوی دیگر نمونه های عظیم بازالت در معدنی واقع در کوهستانی هستند. (شکل ۳ a یک ساختار عظیم ماکروسکوپی بدون حفره های قابل مشاهده را نشان می دهد. شکل b۳ مشخصات آزمایشگاهی آن ها (شکل ۳ c,d خواص مکانیکی خوبی را نشان می دهد. مقادیر متوسط UCS حدود ۲۱۰ مگاپاسکال است. دامنه آماری گسترده ای از این پارمترها در بازالت ها قابل تشخیص است که اغلب تحت تاثیر ویژگی های سنگی خاص مانند وجود از ترک ها می باشند. تخلخل کل سنگ های مورد آزمایش کم (به طور متوسط ۴/۷ درصد) بوده و حفره ها توسط هر دو ابزار microvoids و microcracks برخلاف سنگ های آهکی با قابلیت بهتری نمایش داده می شود.

انواع هوازگی مشاهده شده

نتایج مربوط به اشکال مشاهده شده هوازگی در امتداد نقاط مورد بررسی در Pds ارائه شده است. توضیحات ارائه شده در این بخش بر اساس نوع هوازگی متمایز شده است. بر اساس بررسی های درجا با هدف توصیف ویژگی های اصلی در امتداد نقاط انتخاب شده به طور خاص چهار نوع پدیده هوازگی مشاهده شده است: (۱) شکوفه و زیرگل

(۲) آلئولیزاسیون

(۳) پوسته سیاه

و (۴) هوازگی زیستی.

نوع اول در هر دو لنوع سنگ مشاهده شد در حالی که آلئولیزاسیون پوسته سیاه و هوازگی زیستی در سنگ آهک گزارش و مشاهده شده است. شکوفه و زیرگل هوازگی شیمیایی سنگ ها فرآیندی خودبه خود و غیرقابل برگشت است و مواد را تحت تاثیر شرایط دما و فشار معین به سمت حالت پایدارتری قرار می دهد. در میان فرآیندهای هوازگی شیمیایی شکوفه زایی ناشی از رسوب گذاری و کریستال شدن نمک ها پس از آن یک محلول از طریق سنگ ایجاد و سپس تبخیر می شود. این مواد معدنی عموماً سولفات ها و کربنات های سدیم پتاسیم یا کلسیم هستند به علاوه نیترات ها و کلریدها. به ویژه نقش نمک ها در هوازگی سنگ ها در طول دهه های گذشته، هم در مناطق طبیعی و هم در بناهای تاریخی شناخته شده و مشخص است. نمک ها نه تنها به عنوان یک نیروی فیزیکی بلکه به عنوان محلول های نمکی نیز عمل می کنند که این امر باعث تسهیل این امر می شود.

میزان انحلال مواد معدنی سیلیکاتی

از آنجایی که این فرآیند از عبور آب از سنگ ناشی می شود وقوع آن حاکی از پدیده های نفوذ آب و عوامل مرتبط با آن است. در واقع شکوفه شور ممکن است باعث پارگی هالوکلاستیک و آسیب به مصالح گردد. پدیده ای که نه تنها در سنگ های ساختمانی و تزئینی یک مسئله جدی است، همچنین برای بناهای ساخت و ساز زیرزمینی نیز به عنوان پدیده ای موثر مطرح است. با توجه به اینکه سنگ های طبیعی به عنوان مصالح ساختمانی به کار می روند، فشار بیش از حد ایجاد شده توسط کریستال های نمک باعث لایه برداری سنگ از طریق جدا شدن تدریجی می شود. کم عمق ترین بخش های سنگی به طور خاص نتایج کریستالیزاسیون نمک و بارش در زیر سطح یک ماده را نشان می دهند. این مورد باعث پوسته شدن، شرک زدن، پوسته پوسته شدن و یا ایجاد حفره به عنوان ساب گل آذین شناخته می شود. در حالی که گلدی نسبتاً آسان بوده اما در ساقه گل سخت است زیرا در زیر سطح سنگ تشکیل شده است. در میان عناصر Pds انتخاب شده برای این مطالعه این فرم هوازگی در هر دو سنگ آذرین یافت شد. با توجه به نوع سنگ آذرین ما برخی از تفاوت ها را با توجه به قرار گرفتن در معرض نمای ساختمان پیدا کردیم. بیشترین بخش تحت تاثیر رو به شمال است، جایی که سنگ آذرین پوسته پوسته شده و پوسته شدن عمیقاً توسعه یافته است (شکل ۴ a,b). شواهدی از شکوفایی هم در بخش سنگ داخلی برهنه و هم در قسمت بیرونی ورق سنگ خارجی هوازده و سست را نشان می دهد (شکل ۴ a). در این مورد، ضخامت سنگ تحت تاثیر قرار

می گیرد و هوازدگی مکانیکی و شیمیایی حداکثر است. در امتداد نمای رو به غرب، نشانه های شکوفه در نوار سنگ آذرین هم مرز با پلکان قابل مشاهده است. یک ورودی ثانویه به ساختمان که از این پس به عنوان STW شناخته می شود. این عنصر نسبت به ساختار اصلی PdS بیرون زده و بیشتر در معرض عوامل هوازدگی جوی آن قرار دارد (شکل ۴ج). در این نقطه، ما همچنین می توانیم به نوعی ارزیابی کنیم که پوسته پوسته شدن سنگ مکانیکی که توسط لایه های مختلف ورقه های سنگ پوسته پوسته شده حاکی از پیشرفت هوازدگی در درون سنگ درونی است (شکل ۴ قسمت d)

هوازدگی آلوئولی

هوازدگی آلوئولی یا لانه زنبوری نوعی پدیده هوازدگی به عنوان یک نتیجه از تعدادی از فرآیندهای مختلف هوازدگی است که ناشی از محلول نمک و تاثیر آن در سنگ ها بوده و در بیشتر موارد تجزیه دانه ای و یا پوسته پوسته شدن از نتایج آن است آثار آن بر سنگ ها وجود گسترده حفره های قابل مشاهده (آلوئول) متغیر در شکل و اندازه است. به ویژه فشارهای ایجاد شده توسط کریستالیزاسیون نمک ناشی از محلول های فوق اشباع نفوذ از طریق سنگ عامل اصلی هوازدگی فیزیکی شیمیایی سنگ است. این پدیده توسط اثر ساییده تحت فشار توسط سنگ دانه های نامنسجم ایجاد شده که توسط جریان های هوای متلاطم اثر آن تشدید می گردد. بزرگ شدن اندازه حفره ها در این مطالعه موردی هوازدگی آلوئولی را به خوبی در سنگ های آهکی مورد استفاده توسعه داده است. هم برای نمای بالایی و هم برای ستون سازه به دلیل درجه تخلخل و کم بودن آنها استحکام مکانیکی تحت تاثیر قرار گرفته است. این نوع یک نمونه رایج برای این فرآیند هوازدگی است. با مطالعه های فراوان بر روی سنگ های متعلق به یک موقعیت زمین شناسی این نتایج اثبات شده است. به طور کلی بر روی انواع سنگ کربناته در سراسر جهان این نتیجه واضح و نمایان است. به عنوان مثال وجود آلوئول ها در قسمت های خاصی از نما و ستون ها این نوع هوازدگی را به وضوح نشان می دهد. در مورد اول بلافاصله در بالای باند پایه بازالت با موقعیت خاص یافت می شوند (شکل ۵a). در حالی که در ستون ها در رخ بیرونی این هوازدگی رخ می دهد (شکل ۵b,c). در هر دو مورد سنگ بازالت زیرین بیرون زدگی بیشتری دارد بنابراین مبنایی برای جهش ارائه می کند. قطرات آب باران نیز تجزیه مکانیکی سنگ آهک را افزایش می دهد. تکامل چنین فرآیند هوازدگی را می توان با تعیین مورفولوژیکی تشخیص داد. آلوئول ها که با ایجاد هوازدگی تمایل به ادغام دارند و منجر به تشکیل بخش های رو به گسترش می شوند نیز مشخص هستند (شکل ۵ c). هوازدگی ناشی از آلودگی هوا و فعالیت بیولوژیکی هوازدگی ناشی از آلودگی هوا بر روی سنگ های کربناته با رنگ سیاه بیان می شود. پوسته های تشکیل شده روی آنها از یک واکنش سولفات شده نشات می گیرد SO₂ با کلسیت واکنش داده و تشکیل گچ داده و تشکیل ذراتی (به ویژه دوده) باعث سیاه شدن آن می شود. این پدیده در تعاریف به خوبی پذیرفته شده است، زیرا تا حد زیادی بناها را تحت تأثیر قرار می دهد. در محیط های شهری به لطف قابلیت آلاینده های جوی برای تشکیل ترکیباتی که می تواند با مصالح ساختمانی واکنش داشته باشد این پدیده ها کاملاً رایج است. آثار تخریب روی سنگ های آهکی و مصالح ساختمانی قابل مشاهده است. به عنوان مثال به ویژه در بخش های سرپوشیده که از شستشو محافظت می شود تاثیر گچ نیز در این نوع فعل و انفعالات مشهود است. پوسته سیاه منجر به ضخیم شدن تدریجی و کاهش تخلخل سنگ می شود. علاوه بر این، رنگ سیاه بیشتر از سنگ های رنگ روشن اطراف جذب گرما را بیشتر می کند و باعث افزایش هوازدگی می شود. پدیده های اتساع مکانیکی که به تدریج نگرش مکانیکی را تضعیف می کند بر خود سنگ نیز تا تجزیه تدریجی آن اثر گذار است. در ساختمان مورد بررسی پوسته سیاه در موارد متعددی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵a). در قسمت توخالی بین چنبره های ستون و در برخی از نقاط نما مانند آنهایی که در زیر طاقچه های پنجره قرار دارند نیز بررسی صورت گرفت (شکل ۵b,c).

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از رویکرد روش شناختی پیمایشی ارائه شده در این مقاله نشان می دهد که ترموگرافی مادون قرمز (IRT) ابزار غیر تماسی مفیدی را جهت تخمین هوازدگی نشان می دهد که می توان از آن در شناسایی هوازدگی استفاده کرد. در ارزیابی اولیه سریعاً وضعیت هوازدگی سنگهای طبیعی مشخص و از تجزیه و تحلیل انواع مختلف هوازدگی در دو نوع سنگ به کار گرفته شده برای ساخت یک بنای تاریخی نتایج را می توان به صورت زیر خلاصه و مورد بحث قرار داد :

۱) این هوازدگی تنها بر روی سنگ های آهکی تأثیر می گذارد که حاکی از نوع ضعیف تر سنگ ها است. در اینجا تجزیه و تحلیل ها نشانگر وقوع آن در آن مناطق سنگی همپوشانی محلی یافت شده در نوار بازالتی بیرونی است. جایی که به تدریج قطرات

باران نیز در این رابطه با ضربه و فرسایش در سطح سنگ آهک موارد هوازدگی را تشدید می سازد. هر دو مورد ستون و دیوار در معرض راه پله غربی تحت تأثیر این نوع هوازدگی قرار می گیرد. شکل خلاصه شماتیک محدوده های کیفی دمای IRT مربوط به هر نوع هوازدگی را در شرایط بدون تابش خورشیدی و تحت تأثیر نوع سنگ نشان می دهد. گلدھی هر دو نوع سنگ مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می دهد و وقوع آن منجر به تشکیل یک حالت کریستالیزه نمک با رنگ روشن روی سطح سنگ می گردد. هنگامی که کریستالیزاسیون نمک در ساختار سنگ رخ می دهد (زیرزن گل) منجر به پیشرفت پیش رونده هوازدگی می شود. پوسته پوسته شدن سطح سنگ تولید برش های نازکی از مواد سنگ و به تدریج جدا شدن از صخره می شود.

(۲) با روش IRT امکان تشخیص این نوع هوازدگی فراهم شد. تضادهای حرارتی کلیدی به ویژه در بازالت ها موثر بوده و بالاترین درجه حرارت سطح در صخره ها جایی که هوازدگی رخ نداده است یا سنگ برهنه یافت شدند مشاهده می گردد. بخش هایی که در آن پدیده پوسته پوسته شدن سنگ را در زیر سطح هوازده قرار می دهد. دمای سطح متوسط در جایی که مقدار تبلور نمک است رخ داده است. کمترین مقادیر اندازه گیری شده ضخامت منطبق بر پایین ترین سطح درجه حرارت در برش های سنگ تا حدی از زیر لایه جدا شده است. به دلیل پدیده پوسته پوسته شدن علاوه بر این در مناطق سرد بر این بخش های سنگی تأثیر می گذارند. مناطق مورد اشاره را می توان به عنوان مناطق گسترش پوسته پوسته در نظر گرفت. بنابراین اطلاعات جالبی ارائه خواهد شد. در غیر این صورت با چشم غیر مسلح قابل تشخیص نیست. همین ملاحظات را می توان برای سنگ های آهکی که در آن شکوفه زایی اغلب با دیگر انواع هوازدگی همراه است لحاظ نمود. جایی که پوسته پوسته شدن دمای سطح کمی بالاتر از محیط اطراف را نشان داد. منطقه با شکوفه بر خلاف آنچه در استریوبات های بازالتی مشاهده شد. این موارد ممکن است به دلیل وجود یک شکوفه سنگین تر در اطراف قطعه سنگ آهک باشد که جذب رطوبت را نیز به دلیل بیشترین تخلخل سنگ افزایش می دهد. اگر با سنگ بازالت مقایسه شود هوازدگی آلوئولی فقط بر سنگ های آهکی تأثیر می گذارد که نشان دهنده نوع سنگ ضعیف تر است. دلیل آن نیز در اینجا تجزیه و تحلیل شده است. وقوع آن بیشتر در آن مناطق سنگی همپوشانی محلی یافت شد. نوار بازالتی بیرون زده که با وجود تأثیر قطرات باران و در نتیجه ضربه و فرسایش در سطح سنگ آهک تأثیر هوازدگی کاملاً مشهودتر بود. هر دو مورد ستون و دیوار در معرض راه پله غربی تحت تأثیر این نوع هوازدگی قرار می گیرد. این موارد که اغلب همراه با گلدھی و شواهد پوسته پوسته شدن مربوطه رخ می دهد همچنین عمق افقی آنها با استفاده از مدل های فتوگرامتری سه بعدی تخمین زده شد. در بناها و ساختمان های تاریخی امکان مقایسه مورفولوژی ساختار آلوئولی با نتایج IRT را فراهم شد. نتایج دیگر آن که به خصوص زمانی که ساختار آلوئولی به خوبی مشخص باشد آلوئول ها سطح بالایی از شکل خود را حفظ می کنند. درجه حرارت به دلیل مورفولوژی توخالی در حالی که هنگام شکوفه و یا پوسته پوسته شدن در داخل حفره رخ می دهد، دمای سطح آن کاهش می یابد.

(۳) پوسته سیاه و هوای زیستی در سنگ آهک مورد بررسی قرار گرفت. اولی در امن ترین قسمت های نما یا جایی که آب باران پخش نمی شود اثر شستشو بر روی سطح سنگ هوازدگی زیستی در نواحی خاص به ویژه در متناظر با علائم جریان آب رخ می دهد. با توجه به اینکه در طول فصل خشک جنبه IRT این دو نوع هوازدگی انجام می شود توسط دمای سطح گرم ناشی از رنگ تیره تر که متعلق به آن است این مورد کنترل می شود. بخش سنگی هوازده در این مورد خاص تفاوت رنگی بین سنگ های شسته شده و لایه های تیره تر امکان تمایز را ممکن می سازد. این عناصر توسط IRT و این روش تایید می شود. نتایج IRT گزارش شده در اینجا به انطباق با بررسی های انجام شده حکایت دارد و نتایج آن در زمانی که بنا تحت هیچ تابش مستقیم خورشیدی نباشد بهترین زمان برای بررسی های روش IRT در نظر گرفته می شود. مکانیک سنگ و عدم وجود باران نیز بر نتایج اثر می گذارد. بنابراین چنین نتایجی باید با همراهی مطالعات مقدماتی در نظر گرفته شود و بیشتر باید برای بررسی قابلیت اجرای روش انجام شود. به هر حال روش IRT یک ابزار قابل اعتماد برای پهنه بندی اولیه بود و نقشه برداری از فرآیندهای هوازدگی موثر بر سنگ های طبیعی نیز با این روش تسهیل گردید. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می کند که مطالعات به ویژه برای ارزیابی های اولیه سریع مورد نیاز است. IRT می تواند در واقع برای تعریف استراتژی های ترمیم و یا اولویت بندی برای مکان یابی سریع مشکل

مورد بحث نیز ارائه شود. به خصوص اگر سازه ساختمان مرتفع واقع شده باشد بخش ترکیبی مفیدی با فتوگرامتری سه بعدی داشته و پتانسیل بالایی برای تخمین کمی پیشروی هوازدگی بر حسب ضخامت تحت تاثیر سنگ ارائه می دهد. این امر نیز هم برای اهداف نظارتی و هم برای مطالعه هوازدگی مفید خواهد بود. پیشرفت در زمینه بررسی هوازدگی در ساختمان های تاریخی و تأیید کارایی نیز با این مدل ها صورت خواهد پذیرفت.

منابع

- Schiavon, N.; Chiavari, G.; Fabbri, D. Soiling of Limestone in an Urban Environment Characterized by Heavy Vehicular Exhaust Emissions. *Environ. Geol.* **2004**, *46*, 448–455. [CrossRef]
2. Lefèvre, R.A.; Ausset, P. Atmospheric Pollution and Building Materials: Stone and Glass. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* **2002**, *205*, 329–345. [CrossRef]
3. Montana, G.; Randazzo, L.; Mazzoleni, P. Natural and Anthropogenic Sources of Total Suspended Particulate and Their Contribution to the Formation of Black Crusts on Building Stone Materials of Catania (Sicily). *Environ. Earth Sci.* **2012**, *67*, 1097–1110. [CrossRef]
4. Winkler, E.M. Important Agents of Weathering for Building and Monumental Stone. *Eng. Geol.* **1966**, *1*, 381–400. [CrossRef]
5. Benavente, D. Role of Pore Structure in Salt Crystallisation in Unsaturated Porous Stone. *J. Cryst. Growth* **2004**, *260*, 532–544. [CrossRef]
- Heritage* **2022**, *5*, 2612
6. Chastre, C.; Ludovico-Marques, M. Nondestructive Testing Methodology to Assess the Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments. In *Handbook of Materials Failure Analysis*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; pp. 255–294. [CrossRef]
7. Donato, A.; Randazzo, L.; Ricca, M.; Rovella, N.; Collina, M.; Ruggieri, N.; Dodaro, F.; Costanzo, A.; Alberghina, M.F.; Schiavone, S.; et al. Decay Assessment of Stone-Built Cultural Heritage: The Case Study of the Cosenza Cathedral Façade (South Calabria, Italy). *Remote Sens.* **2021**, *13*, 3925. [CrossRef]
8. Ercoli, L.; Megna, B.; Nocilla, A.; Zimbardo, M. Measure of a Limestone Weathering Degree Using Laser Scanner. *Int. J. Archit. Herit.* **2013**, *7*, 591–607. [CrossRef]
9. Casula, G. Experimental application of 3-d terrestrial laser scanning and acoustic techniques in assessing the quality of stones used in monumental structures. In Proceedings of the 4th International Conference on NDT, Chania, Greece, 11–14 October 2007.
10. Avdelidis, N.P.; Moropoulou, A. Applications of Infrared Thermography for the Investigation of Historic Structures. *J. Cult. Herit.* **2004**, *5*, 119–127. [CrossRef]

First Author **Asadollah Hejazi**

Second Author¹ **Aslan Rezaeifard**

Abstract - ۱-۱

The use of weathering diagnostic methods is known as a fundamental challenge in the field of protection, monitoring and restoration of cultural heritage. The potential of the shown infrared thermography method deserves to be investigated and paid attention to. This paper presents the results obtained from its use for rapid investigation of different types of weathering. Apart from the effect of natural stones in historical buildings, infrared thermography method shows the possibility of detecting and mapping different surface temperatures due to the presence of bloom, subflora, alveoli formation, black crust and biological weathering in limestone and basalt. Infrared data are extracted by three-dimensional photogrammetric models of the investigated points, which provide quantitative data. The rock thickness has been investigated under the influence of mechanical weathering and the

1-Corresponding Author

key interactions between two factors. The obtained results show that the infrared method, by examining the factors that mainly include the morphology, color and appearance of the rock, as well as the environment, fulfills the conditions for completing the analyzes that It is also confirmed by field work. This important fact confirms the good potential of the infrared thermography method as a quick detection method of weathering. Therefore, this study can be considered as the initial reference for the development of knowledge in this field, so that this method can be used in similar cases.

Key words: subterranean thermography method, photogrammetry, natural stone, weathering