

ارزیابی فرسودگی ملاط آهکی در برابر چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن: مطالعه موردی راه باستانی گاشمار شهرستان نورآباد، استان لرستان

امین جمشیدی^{۱*} و موسی سبزی^۲

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- استادیار گروه تاریخ و باستان‌شناسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

نویسنده مسئول: jamshidi.am@lu.ac.ir *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۳

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶

چکیده

عوامل هوازدگی در طبیعت متنوع هستند که می‌توانند منجر به فرسودگی یک بنای باستانی و حتی تخریب و از بین رفتن آن شوند. در پژوهش حاضر، فرسودگی ملاط آهکی استفاده شده در راه باستانی گاشمار واقع در شهرستان نورآباد (استان لرستان) در برابر عوامل هوازدگی ناشی از چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن ارزیابی شده است. برای رسیدن به این هدف، آزمایش‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن تا ۵۰ چرخه روی نمونه‌های ملاط اعمال شد. بعد از هر ۱۰ چرخه، خصوصیات ظاهری (رنگ و شکل)، فیزیکی (وزن خشک و تخلخل) و مکانیکی (شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج P) تعیین شدند. نتایج دلالت بر این دارد که ملاط در اثر چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن متحمل تغییرات ظاهری بسیار جزئی شده است. در مقابل، تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که با افزایش چرخه‌ها، مقادیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها تغییرات ملموس‌تری داشته‌اند. بر اساس مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط ارتباط نزدیکی با توسعه و گسترش ریزترک‌ها بعد از چرخه‌های آزمایش داشته است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که عوامل هوازدگی ناشی از چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن، تأثیر تقریباً یکسانی بر شدت فرسودگی نمونه ملاط داشته‌اند. سرعت موج P در مقایسه با سایر خصوصیات ظاهری، فیزیکی و مکانیکی، پارامتری مناسب‌تر و دقیق‌تر برای ارزیابی فرسودگی ملاط است، در حالی که خصوصیات ظاهری نمی‌تواند پارامتری مناسب در این زمینه باشند. بر اساس نتایج، پیشنهاد می‌شود که راهکار حفاظتی برای جلوگیری از فرسودگی ملاط استفاده شده به عنوان مصالح بنایی در پل باستانی گاشمار واقع در شهرستان نورآباد بر اساس هر دو عامل هوازدگی تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن انتخاب و طراحی شود.

واژه‌های کلیدی: فرسودگی ملاط آهکی، راه باستانی گاشمار، تر-خشک شدن، گرم-سرد شدن، شهرستان نورآباد

۱- پیشگفتار

که ارتباط تنگاتنگ و دوسویه‌ای بین صنعت گردشگری و بناهای باستانی وجود دارد به طوری که این ارتباط روز به روز در حال گسترش است. واضح است، سرزمینی که از نظر تاریخی قدمت بیش‌تری داشته باشد، بازدید از بناهای باستانی آن نیز برای گردشگران جذابیت بیش‌تری خواهد داشت. حفاظت از بناهای باستانی به لحاظ طیف وسیعی از مزایای فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی دارای اهمیت بسزایی است؛ از رفاه فرهنگی و اجتماعی ساکنان منطقه حمایت می‌کند، غرور مدنی جوامع را ارتقاء می‌دهد و به همان اندازه می‌تواند وسیله‌ای برای دستیابی به اهداف اقتصادی همچون رشد و احیای مجدد شهرها، مشاغل کوچک و تأمین مسکن باشد. برای طراحی و برنامه‌ریزی اقدامات و راهکارهای حفاظتی از مصالح بنایی استفاده شده

بناهای باستانی گنجینه‌ای گران‌بها از تاریخ و فرهنگ را در خود جای داده‌اند، به طوری که قدمت، تاریخچه و تمدن یک سرزمین را تعیین می‌کنند. ایران به سبب داشتن پشته‌های چند هزار ساله، از لحاظ تنوع و تعدد بناهای باستانی به عنوان سرزمینی بسیار غنی و شناخته شده در جهان است. بناهای باستانی علاوه بر ارزش‌های ذاتی، ارزش‌هایی که حاصل نگرش و رویکرد جامعه هستند را نیز در خود جای داده‌اند. از این‌رو، حفاظت از بناهای باستانی از ضروریات سیاست‌ها و راهبردهای متولیان امر می‌باشد، به ویژه در جهان کنونی که صنعت گردشگری از کارآمدترین و پویاترین فعالیت‌های فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی محسوب می‌شود. امروزه بر همگان مبرهن است

چرخه‌های تر- خشک شدن ناشی از اختلاف در ترکیب کانی‌شناسی، خصوصیات بافتی و همچنین سطوح لامیناسیون آن‌ها بوده است. لیو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی زوال خصوصیات مقاومتی نمونه ماسه‌سنگ شیلی بعد از ۲۰ چرخه تر- خشک شدن پرداختند. این محققین همچنین از آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای بررسی تغییر در ساختار فضای خالی نمونه استفاده کردند. نتایج بر این دلالت داشت که مقاومت‌های فشاری تک‌محوری و سه‌محوری نمونه با افزایش چرخه‌های تر- خشک شدن کاهش یافته‌اند. روند کاهشی خصوصیات مقاومتی ناشی از تغییرات ساختار فضای خالی آن بوده است که این موضوع توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی تأیید شد. اثرات فرسودگی چرخه‌های تر- خشک شدن بر ویژگی‌های ظاهری یک نمونه گرانیات شامل رنگ، زبری و سختی توسط ژاو و همکاران (۲۰۲۰) بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی بیانگر این بود که چرخه‌های تر- خشک شدن اثرات منفی قابل توجهی بر ظاهر نمونه داشته است. بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی هو و همکاران (۲۰۲۲)، تأثیر چرخه‌های تر- خشک شدن روی انتشار و توسعه میکرو و ماکرو حفره‌های یک سنگ دگرگونی بررسی شد. نتایج این محققین بیانگر این بود که میکرو و ماکرو حفره‌ها رفتار کاملاً متفاوتی در مقابل چرخه‌های تر- خشک شدن از خود نشان داده‌اند. سرعت انتشار میکرو حفره‌ها در ابتدا کم و سپس افزایش می‌یابد در صورتی که برای ماکرو حفره‌ها این رخداد برعکس بوده است، یعنی ابتدا سرعت انتشار آن‌ها زیاد و در ادامه کاهش یافته است.

علاوه بر فرآیند تر- خشک شدن، گرم- سرد شدن نیز یکی دیگر از عوامل هوازدگی در فرسودگی سنگ‌های ساختمانی و مصالح بنایی است که پژوهشگران به آن پرداخته‌اند. تأثیر چرخه‌های گرم- سرد شدن روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تراورتن توسط دمیرداغ (۲۰۱۳) مطالعه شد. نتایج نشان داد که با افزایش چرخه‌های گرم- سرد شدن، تخلخل افزایش و چگالی و شاخص بار نقطه‌ای نمونه روند کاهشی داشته‌اند. خانلری و عبدی‌لر (۲۰۱۵) اثر چرخه‌های گرم- سرد شدن روی سه خصوصیت شاخص ماسه‌سنگ‌های مختلف سازند قرمز بالایی شامل تخلخل، سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری تک‌محوری را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه‌های مورد مطالعه به دلیل تنوع ترکیب کانی‌شناسی، خصوصیات

در یک بنای باستانی، نیاز به شناسایی و شناخت نوع "عامل فرسودگی" یا از دیدگاه زمین‌شناسی "عامل هوازدگی" است. این موضوع جزء ضروریات اولیه و پایه‌ای محسوب می‌گردد که در ارائه طرح حفاظتی بسیار حائز اهمیت است. در واقع اقدامات صحیح و کارآمد برای حفاظت یک بنای باستانی باید بر مبنای شناسایی و شناخت نوع عامل هوازدگی تأثیرگذار بر فرسودگی مصالح بنایی استفاده شده در آن بنا باشد. این موضوع می‌تواند منجر به پایداری و دوام بلندمدت مصالح بنایی استفاده شده در یک بنای باستانی در برابر عوامل هوازدگی شود. تاکنون تعدادی از پژوهشگران به بررسی تأثیر عوامل مختلف هوازدگی بر فرسودگی سنگ‌های ساختمانی و مصالح بنایی استفاده شده در بناهای باستانی پرداخته‌اند (جدول ۱). بخشی از این پژوهش‌ها در ارتباط با عوامل هوازدگی تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن است که در ادامه به جزئیات برخی از آن‌ها اشاره شده است.

آکین و اوزان (۲۰۱۱) تأثیر چرخه‌های تر- خشک شدن روی برخی از خصوصیات فیزیکی- مکانیکی تراورتن شامل وزن خشک، چگالی، سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری تک‌محوری را بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که چرخه‌های تر- خشک شدن تأثیر به مراتب کم‌تری نسبت به سایر عوامل هوازدگی مانند چرخه‌های انجماد-آب شدن و تبلور نمک روی فرسودگی تراورتن داشته است. تغییرات در وزن خشک، چگالی، تخلخل، جذب آب، دوام وارفتگی، مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت امواج التراسونیک نمونه‌های ایگنمبریت در اثر چرخه‌های تر- خشک شدن توسط اوزبک (۲۰۱۴) بررسی شد. این محقق نشان داد که وزن خشک و چگالی یک روند کاهشی و سایر خصوصیات ایگنمبریت روندی افزایشی با افزایش چرخه‌های تر- خشک شدن داشته‌اند. اثرات فرسودگی چرخه‌های تر- خشک شدن روی تخلخل، سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری تک‌محوری پنج نمونه ماسه‌سنگ مختلف متعلق به سازند قرمز بالایی توسط خانلری و عبدی‌لر (۲۰۱۵) با یک کار آزمایشگاهی جامع مطالعه شد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، این محققین بیان کردند که چرخه‌های تر- خشک شدن منجر به افزایش تخلخل و کاهش سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها شده است. نتایج حاکی از این بود که متفاوت بودن رفتار نمونه‌ها در مقابل

مقدار تخلخل بعد از اعمال چرخه‌های گرم- سرد شدن افزایش، در صورتی که مقادیر سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش یافته‌اند.

بافتی و همچنین فواصل متفاوت سطوح لامیناسیون، رفتار متفاوتی در مقابل چرخه‌های گرم- سرد شدن از خود نشان داده‌اند. به هر حال، در تمامی پنج نمونه ماسه‌سنگ مختلف

جدول ۱. پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با تأثیر عوامل هوازدگی بر فرسودگی مصالح ساختمانی

Table 1: Researches conducted in related to the effects of weathering agents on deterioration of building materials

عامل هوازدگی					مصالح ساختمانی	محقق/محققین
گرم- سرد شدن	تر- خشک شدن	واکنش با اسید	تبلور نمک	انجماد-آب شدن		
	√				شیل، گل‌سنگ، سیلتسون	مارکز و همکاران (۲۰۰۵)
√				√	سنگ‌های کربناته	یاووز و همکاران (۲۰۰۶)
	√				ژپس	کایابالی و همکاران (۲۰۰۶)
	√	√			سنگ آهک	گوپتا و احمد (۲۰۰۷)
	√		√	√	تراورتن	آکین و اوزان (۲۰۱۱)
√				√	تراورتن	دمیرداغ (۲۰۱۳)
	√			√	ایگنمیریت	اوزیک (۲۰۱۴)
√			√	√	ماسه‌سنگ	قبادی و بابازاده (۲۰۱۵)
√	√			√	ماسه‌سنگ	خانلری و عبدی‌لر (۲۰۱۵)
√					شیل	چها و همکاران (۲۰۱۶)
	√	√			سنگ‌آهک	تقی‌پور و همکاران (۲۰۱۶)
		√			ماسه‌سنگ	هوو و همکاران (۲۰۱۶)
			√		مرمر	یاووز و توپال (۲۰۱۶)
			√		تراورتن	ذلولی و همکاران (۲۰۱۷)
	√				سنگ‌های پیروکلاستیک	قهرمان و همکاران (۲۰۱۷)
	√	√			ماسه‌سنگ	فو و همکاران (۲۰۱۸)
	√				ماسه‌سنگ شیلی	لیو و همکاران (۲۰۱۸)
				√	سنگ‌های کربناته	هاشمی و همکاران (۲۰۱۸)
	√	√			سنگ‌آهک، تراورتن	یاگیز (۲۰۱۸)
				√	ماسه‌سنگ	عبدی و خانلری (۱۳۹۷)
√					ماسه‌سنگ	لیو و همکاران (۲۰۱۹)
√			√	√	سنگ‌آهک	ترابی کاوه و همکاران (۲۰۱۹)
	√	√			کنگومرا، ماسه‌سنگ	فریدونی و خاجه‌وند (۲۰۱۹)
√			√	√	آندزیت	چلیک و سرت (۲۰۲۰)
	√				گرانیت	ژاو و همکاران (۲۰۲۰)
√					ونگ و همکاران (۲۰۲۰)	ونگ و همکاران (۲۰۲۰)
			√		تراورتن	جمشیدی و همکاران (۱۳۹۹)
√					گرانیت	خان و همکاران (۲۰۲۲)
	√		√	√	ماسه‌سنگ	پیری‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)
		√			تراورتن	پرویزپور و همکاران (۲۰۲۲)
	√				سنگ‌آهک، مارن	ترابی‌کاوه و همکاران (۲۰۲۲)
√					ماسه‌سنگ	ژ و همکاران (۲۰۲۲)

ساختمانی در برابر عوامل مختلف هوازدگی شده است (جدول ۱). علاوه بر سنگ‌های ساختمانی، انواع ملاط‌ها مانند ملاط‌های سیمانی، گچی، آهکی، ساروجی و... نیز جزء لاینکف مصالح ساختمانی استفاده شده در بناهای باستانی هستند. به هر حال در مطالعات گذشته، توجه کم‌تری به تأثیر عوامل هوازدگی روی فرسودگی ملاط‌ها به عنوان یکی از مصالح ساختمانی پرکاربرد در بناهای باستانی شده است. ارزیابی فرسودگی ملاط‌ها در مقابل عوامل هوازدگی می‌تواند راهنمای مفیدی در برنامه‌ریزی و طراحی اقدامات حفاظتی برای ممانعت یا کاهش فرسودگی آن‌ها در بلندمدت باشد. در پژوهش پیش‌رو، فرسودگی ملاط آهکی استفاده شده در راه باستانی گاشمار در شهرستان نورآباد (استان لرستان) با بررسی خصوصیات کیفی و کمی آن در مقابل عوامل هوازدگی تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

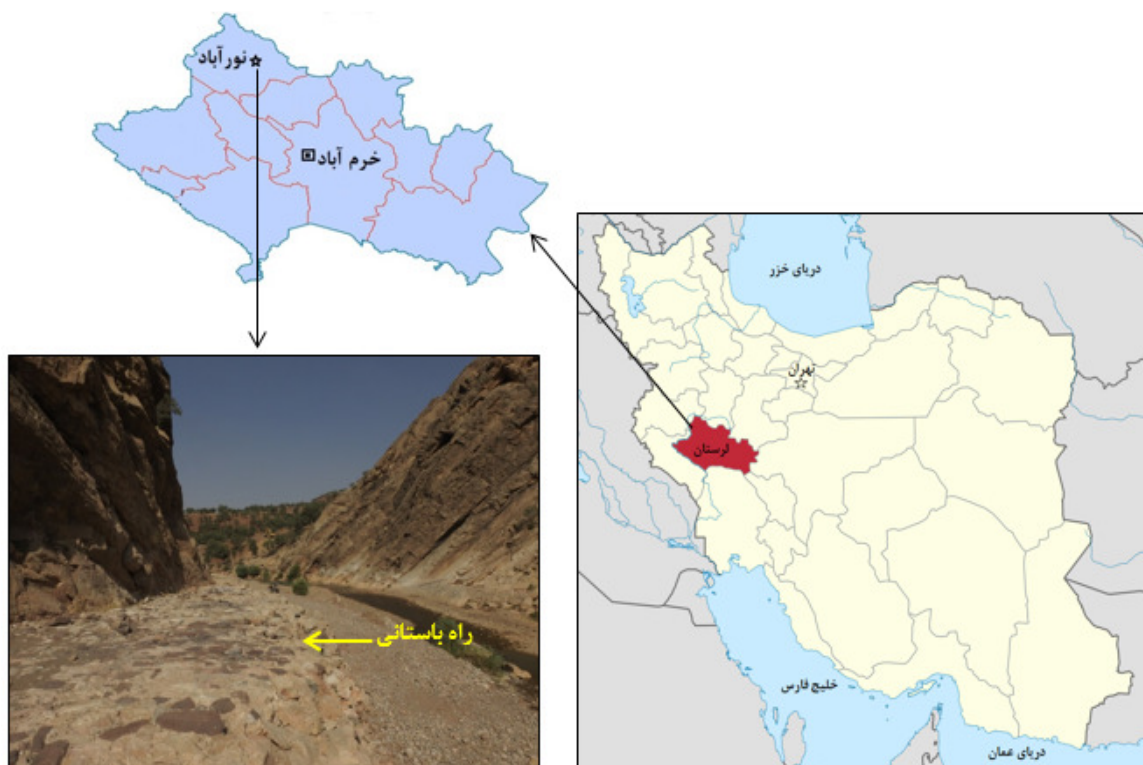
۲- موقعیت و پیشینه راه باستانی گاشمار

راه باستانی گاشمار در ۵۴ کیلومتری جنوب غربی شهرستان نورآباد (استان لرستان)، روستای گنجره (دهستان میریگ جنوبی)، واقع شده است (شکل ۱). نام این راه باستانی از دو کلمه گاو و شمار تشکیل شده که بنا بر روایات محلی به واسطه این که گاوها در زمان‌های قدیم به صورت تک‌تک از این تنگه عبور می‌کردند به گاوشار (در زبان لکی "گاشمار") مشهور شده است. امروزه، اهالی بومی از این راه به نام "گوری" (به معنی "قدیمی") نیز یاد می‌کنند. این راه باستانی در سال ۱۳۸۲ با شماره ثبت ۱۰۰۱۶ به عنوان یکی از آثار ملی ایران با قدمت دوران تاریخی به ثبت رسیده است. به هر حال شواهد و مدارک کافی برای این تاریخ‌گذاری ارائه نشده و واقعیت امر این است که در حال حاضر با توجه به تخریب و آسیب‌های وارده بر آن اظهارنظر در مورد تاریخ ساخت این بنا باستانی مشکل می‌باشد؛ هر چند برخی از پژوهشگران این مسیر را بخشی از راه باستانی شوش به همدان در دوره هخامنشی می‌دانند (سجادی، ۱۳۷۷). این اثر ارزشمند باستانی در یکی از زیباترین تنگه‌های استان لرستان با نام تاریخی تنگه گاشمار واقع شده است. در محل این تنگه زیبا، رودخانه‌های رضاویس و کاکارضا به هم می‌پیوندند و رودخانه معروف کشکان را بوجود می‌آورند. راه باستانی گاشمار به صورت یک جاده سنگ‌فرش است که در کم

تغییرات چگالی، تخلخل، سرعت امواج التراسونیک و هدایت حرارتی شیل در چرخه‌های گرم- سرد شدن توسط چها و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه شد. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی این محققین نشان داد که با افزایش دمای گرم شدن (۲۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد)، تخلخل افزایش و چگالی، سرعت امواج التراسونیک و هدایت حرارتی نمونه کاهش داشته‌اند. این تغییرات به ایجاد ترک‌های جدید و گسترش ترک‌های پیشین موجود در نمونه به دلیل شوک‌های حرارتی نسبت داده شد. ترابی‌کاوه و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه‌ای در ارتباط با تأثیر چرخه‌های گرم- سرد شدن روی سنگ‌آهک استفاده شده در بنای باستانی پرسپولیس واقع در شهرستان مرودشت (استان فارس) پرداختند. این محققین با اندازه‌گیری برخی خصوصیات مکانیکی سنگ‌آهک به این نتیجه رسیدند که چرخه‌های گرم- سرد شدن نسبت به سایر عوامل هوازدگی اثرات فرسودگی شدیدتری بر سنگ‌آهک داشته‌اند. اثر چرخه‌های گرم- سرد شدن روی ایجاد و گسترش میکرو و ماکرو ترک‌ها در گرانیت توسط ونگ و همکاران (۲۰۲۰) بررسی شد. این محققین همچنین سرعت امواج التراسونیک، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نمونه را قبل و بعد از چرخه‌های گرم- سرد شدن ارزیابی کردند. نتایج حاکی از این بود که با افزایش چرخه‌های گرم- سرد شدن، تغییرات ساختاری در میکرو و ماکرو ترک‌ها نمونه شدیدتر شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که تغییرات سرعت امواج التراسونیک نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل چرخه‌های گرم- سرد شدن ملموس‌تر بوده است. با ارزیابی‌های صورت گرفته روی تغییرات مدول الاستیسیته و نسبت پواسون، با افزایش چرخه‌های گرم- سرد شدن رفتار شکنندگی و خمیری نمونه به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. خان و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی برخی خصوصیات فیزیکی مکانیکی گرانیت در طی چرخه‌های گرم- سرد شدن پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که بعد از اعمال چرخه‌های گرم- سرد شدن، تخلخل کاهش و در مقابل وزن خشک، سرعت امواج التراسونیک، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش یافته‌اند. این محققین دلیل این تغییرات را با استفاده از مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی مورد بحث قرار دادند. در پژوهش‌های پیشین توجه زیادی به ارزیابی فرسودگی سنگ‌های

آلات سنگین آسیب دیده و بخش‌هایی از آن نیز در زیر خاک و آوار مدفون گردیده است. عرض این راه باستانی بین ۴ تا ۷ متر بوده که با توجه به موقعیت تنگه متغیر است. در برخی قسمت‌ها ارتفاع این راه باستانی به بیش از ۲ متر هم می‌رسد. برای ساخت راه باستانی گاشمار، از ترکیب بلوک‌های سنگی تراش‌خورده، قلوه‌سنگ‌های رودخانه‌ای، سنگ‌لاشه و ملاط آهکی استفاده شده است. از سنگ‌های تراش‌خورده عموماً در بدنه و نمای بیرونی راه استفاده شده است (شکل ۲).

عرض‌ترین قسمت تنگه احداث شده است به طوری که از سمت شرق و غرب به ترتیب به رودخانه کشکان و دامنه کوه منتهی می‌شود (شکل ۲). طول دقیق این راه باستانی با توجه به تخریب بخشی از آن بر اثر سیلاب‌های گذشته مشخص نیست. به هر حال با توجه به شواهد موجود طول این اثر ارزشمند تاریخی به حدود ۵۰۰ متر می‌رسد. در سال‌های اخیر به دلیل احداث سد معشوره و تأسیسات مرتبط با آن بخش زیادی از این اثر مهم باستانی تخریب شده و بخش باقی‌مانده آن هم در اثر رفت و آمد ماشین

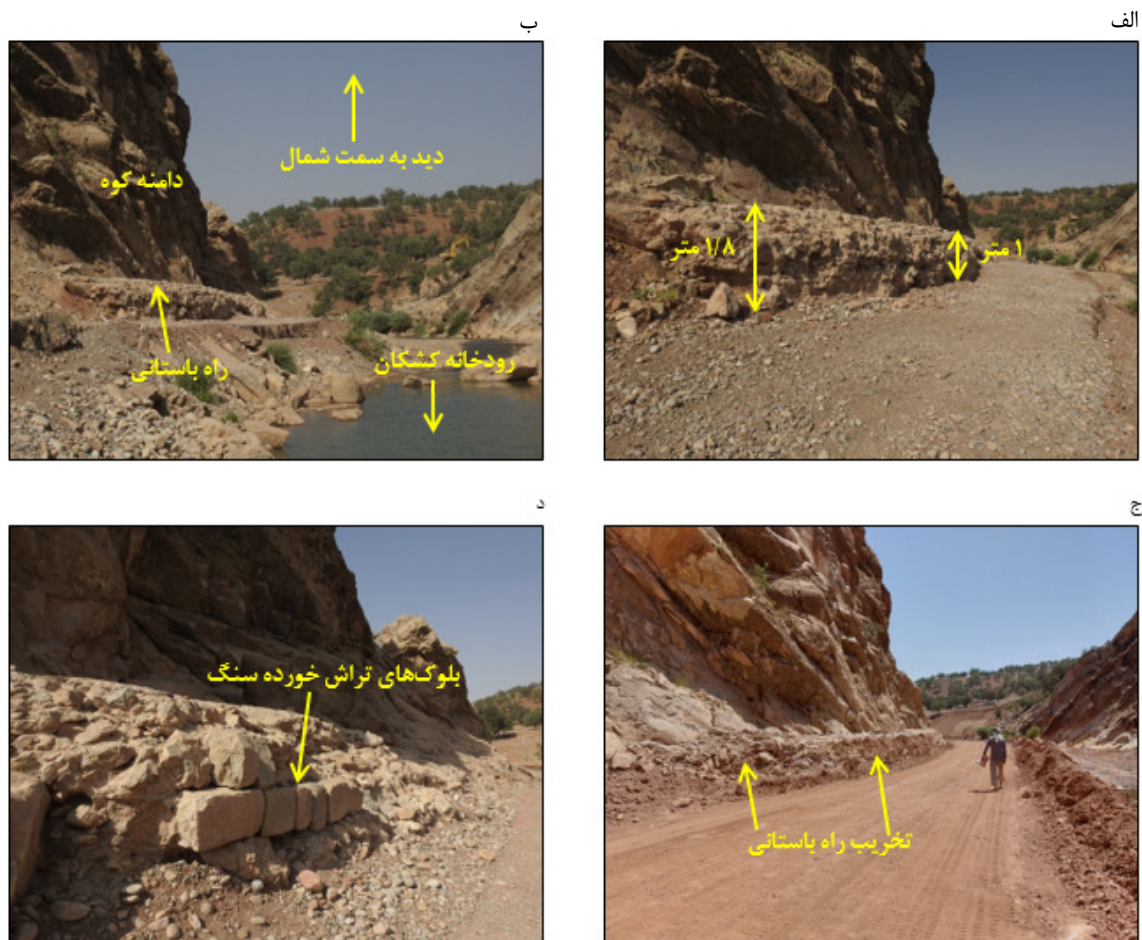


شکل ۱. نمایی از راه باستانی گاشمار و موقعیت جغرافیایی آن

Fig. 1. A view of the ancient Gashmar road and its geographical location

نزولات جوی در منطقه مورد مطالعه بیشتر از نوع باران و در برخی مواقع به صورت برف در فصل زمستان است. به هر حال به دلیل خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر، میزان نزولات جوی به شدت کاهش یافته است. از سوی دیگر، منطقه‌ای که راه باستانی گاشمار در آن قرار دارد، در فصل تابستان روزهای گرم و شب‌های تقریباً خنک دارد. با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، می‌توان بخشی از فرسودگی ملاط استفاده شده در راه باستانی گاشمار را به چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن مرتبط دانست.

بر اساس بازدیدهای میدانی، میزان فرسودگی ملاط اتصال دهنده قطعات سنگی در راه باستانی گاشمار از شدت کم تا زیاد قابل مشاهده بود. در شکل (۳) بخشی از فرسودگی ملاط نمایش داده شده است. منطقه مورد مطالعه از لحاظ شرایط اقلیمی از مناطق با نزولات جوی قابل توجه در استان لرستان می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان لرستان، ۱۴۰۱). بر اساس آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی استان لرستان، نزولات جوی در شهرستان نورآباد (که راه باستانی گاشمار در آن واقع است) تقریباً از مهر ماه آغاز و تا تقریباً تا پایان فروردین ماه ادامه دارد.



شکل ۲. نماهایی مختلف از راه باستانی گاشمار: الف) ارتفاع برخی از قسمت‌های راه باستانی، ب) موقعیت مکانی راه باستانی گاشمار نسبت به رودخانه و دامنه کوه، ج) تخریب راه باستانی گاشمار به دلیل جاده‌سازی و د) بلوک‌های تراش خورده سنگ استفاده شده در ساخت راه باستانی

Fig. 2. Different views of the ancient road of Gashmar a) height of some parts of the ancient road b) location of the ancient road of Gashmar in relation to the river and the mountain slope c) destruction of the ancient road of Gashmar due to road construction d) cut stone blocks used in the construction of the ancient road



شکل ۳. فرسودگی و تخریب راه باستانی گاشمار به دلیل عوامل هوازدگی (برخی از آثار فرسودگی با فلش آبی نشان داده شده‌اند)
Fig. 3. Deterioration and decay of the ancient road of Gashmar due to weathering agents (some signs of deterioration are shown with blue arrows)

۳- مواد و روش‌ها

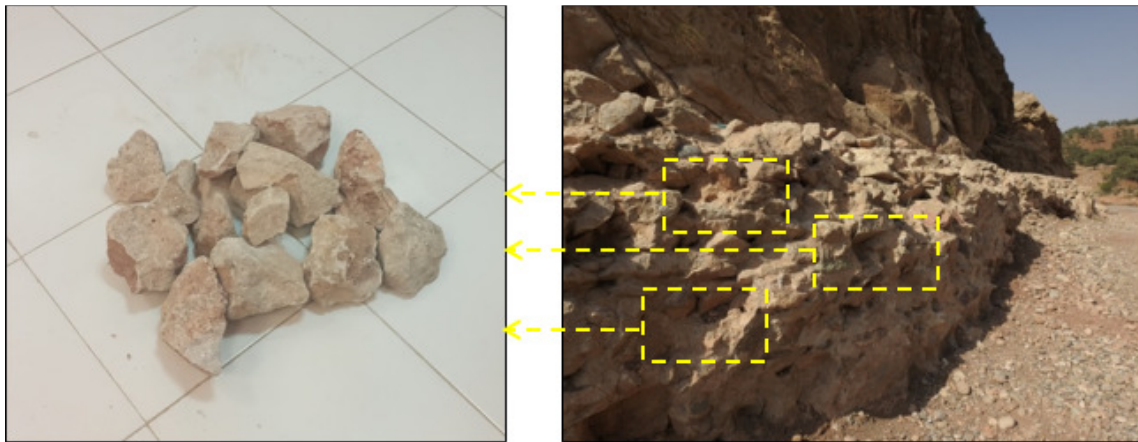
۳-۱- نمونه‌برداری صحرایی و آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

در طی چندین مرحله بازدید صحرایی، تعدادی قطعه بلوک از ملاط آهکی استفاده شده در راه باستانی گاشمار جمع‌آوری شد. در جمع‌آوری قطعه‌های بلوک به گونه‌ای عمل شد که بتوان نمونه‌های با ابعاد استاندارد برای آزمون‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی شده از آن‌ها تهیه کرد. در شکل (۴) تعدادی از قطعه‌های بلوک ملاط بعد از انتقال به محل آزمایشگاه نشان داده شده است. از قطعه‌های بلوک ملاط، نمونه‌هایی برای تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه و به کارگاه تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی انتقال

داده شدند. در مرحله بعد، نمونه‌های با ابعاد استاندارد برای آزمون‌های تعیین وزن خشک، تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج P در طی چرخه‌های مختلف تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن تهیه شد. در شکل (۵) تعدادی از نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده‌اند.

۳-۲- آزمون‌های آزمایشگاهی

برای رسیدن به اهداف پژوهش، آزمون‌های آزمایشگاهی مختلفی بر روی ملاط انجام شد. در شکل (۶) برنامه آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. در ادامه، جزئیات هر کدام از این آزمایش‌ها ارائه شده است.



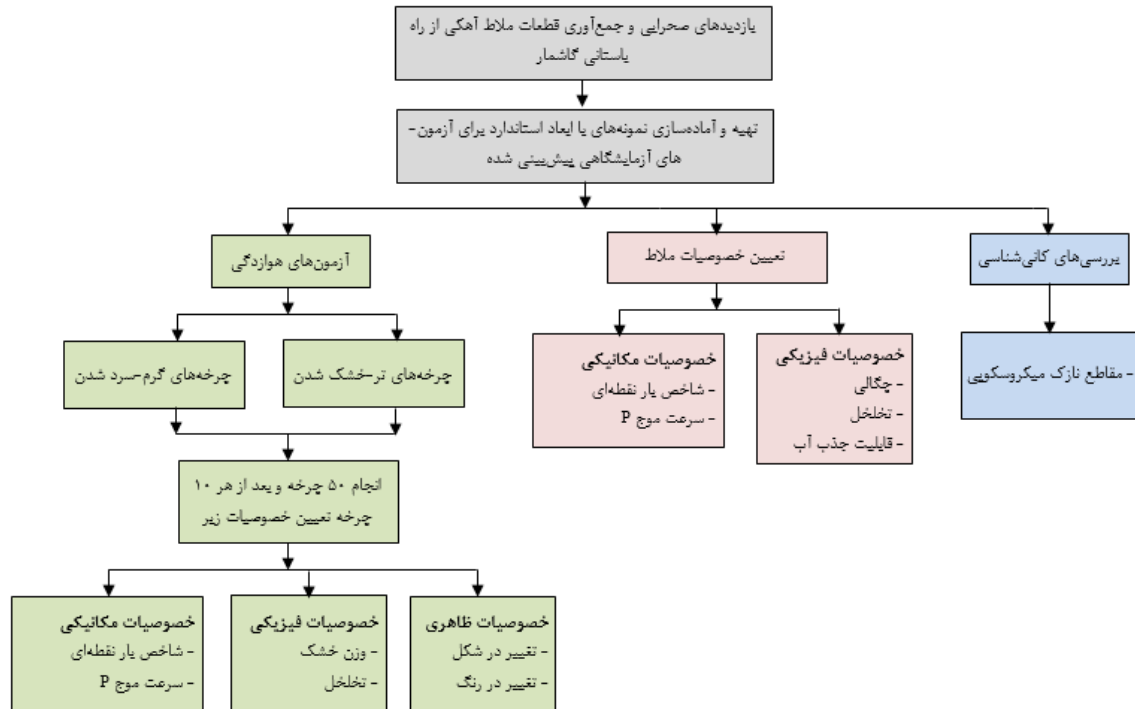
شکل ۴. تعدادی از بلوک‌های ملاط جمع‌آوری شده از راه باستانی گاشمار

Fig. 4. A number of mortar blocks collected from the ancient road of Gashmar



شکل ۵. تعدادی از نمونه‌های بلوکی تهیه شده برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات در طی آزمایش‌های تر-خشک شدن (W-D) و گرم-سرد شدن (H-C)

Fig. 5. A number of block specimens prepared to determine the physical and mechanical properties of mortar during wet-dry (W-D) and heat-cool (H-C) tests



شکل ۶. برنامه آزمون‌های آزمایشگاهی
Fig. 6. Flowchart of the laboratory tests

با استفاده از روابط زیر، به ترتیب چگالی خشک (ρ_d)، تخلخل (n) و قابلیت جذب آب (W_a) نمونه محاسبه شد:

$$\rho_d = \frac{m_d}{v} \quad (1)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (2)$$

$$W_a = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (3)$$

در این روابط، m_d و m_w به ترتیب جرم خشک نمونه و جرم آب جذب شده توسط نمونه هستند. همچنین V_v و V به ترتیب حجم فضای خالی و حجم کل نمونه است که از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$V_v = \frac{m_{sat} - m_d}{\rho_w} \quad (4)$$

$$V = \frac{m_{sat} - m_{sub}}{\rho_w} \quad (5)$$

در این روابط، m_{sub} و m_{sat} به ترتیب جرم اشباع و غوطه‌ور نمونه هستند و ρ_w چگالی آب که معادل با 1 g/cm^3 می‌باشد.

خصوصیات مکانیکی: در پژوهش حاضر، شاخص بار نقطه‌ای به عنوان یکی از روش‌های ساده، سریع و ارزان برای تعیین مقاومت نمونه‌ها تعیین شد. آزمایش شاخص بار نقطه‌ای روی ۵ نمونه مکعبی مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) انجام شد. در شکل ۸ دستگاه شاخص بار نقطه‌ای و تعدادی از نمونه‌های

مطالعات کانی‌شناسی: تعداد پنج مقطع نازک میکروسکوپی از ملاط برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی آن تهیه و توسط میکروسکوپ نوری پلاریزه مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به ناهمگن بودن ملاط، از بخش‌های مختلف قطعه‌های آن نمونه‌های لازم برای آماده‌سازی مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شد.

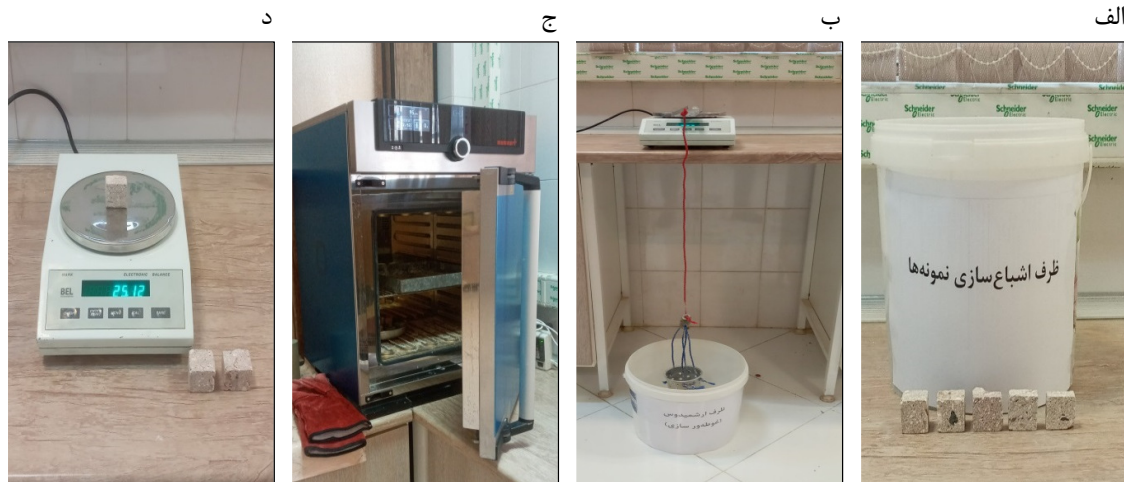
خصوصیات فیزیکی: چگالی، تخلخل و قابلیت جذب آب ملاط مطابق با دستورالعمل پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) تعیین شدند. به این منظور، تعداد ۵ نمونه برش خورده توسط تیغ‌اره با ابعاد $3 \times 3 \times 3$ سانتی‌متر مکعب از ملاط تهیه شدند. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در ظرف پر از آب غوطه‌ور شدند و در پایان جرم اشباع آن‌ها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است برای جلوگیری از خطای آزمایش، در بازه‌های زمانی مختلف ظرف تکان داده شد تا حباب‌های هوای به تله افتاده در فضای خالی نمونه‌ها آزاد شوند. در مرحله بعد، وزن غوطه‌ور نمونه‌ها به روش غوطه‌ورسازی (ارشمیدوس) اندازه‌گیری شد. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای 110°C درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و جرم خشک آن‌ها تعیین شد. در شکل ۷ تعدادی از ابزار و وسایل استفاده شده برای تعیین خصوصیات فیزیکی نشان داده شده است.

گرفت. از مزیت‌های آزمایش سرعت موج P، غیر مخرب بودن و سریع بودن آن است که باعث شده پژوهشگران توجه ویژه‌ای به این آزمایش داشته باشند. تعداد ۵ نمونه مکعبی شکل برای آزمایش سرعت موج P مطابق با دستورالعمل پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۱) مورد استفاده قرار گرفت. میانگین نتایج ۵ نمونه آزمایش شده، به عنوان مقدار نهایی سرعت موج P ملاط در نظر گرفته شد.

گسیخته شده بعد از انجام آزمایش نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش شاخص بار نقطه‌ای برای نمونه با قطر ۵۰ میلی‌متر مطابق با رابطه زیر اصلاح شد:

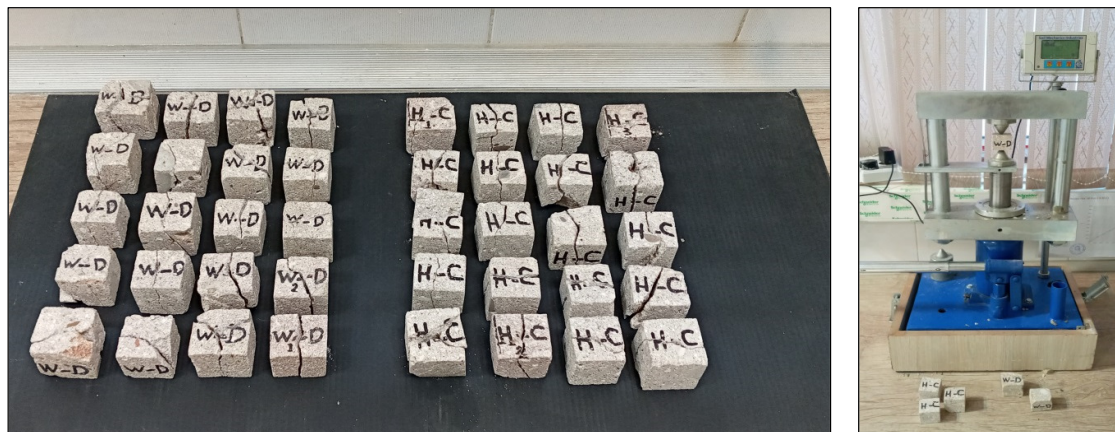
$$PLI_{(50)} = F \left(\frac{P}{D_e^2} \right) \quad (6)$$

که در آن، $PLI_{(50)}$ شاخص بار نقطه‌ای، P بار وارده شده بر نمونه در زمان گسیختگی، D_e قطر معادل نمونه و F ضریب اصلاح است. علاوه بر شاخص بار نقطه‌ای، سرعت موج P به عنوان یکی دیگر از خصوصیات مکانیکی استفاده قرار



شکل ۷. ابزار و وسایل آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها، الف) ظرف اشباع‌سازی، ب) ظرف ارشمیدوس (غوطه‌ورسازی)، ج) آون و د) ترازوی دیجیتال

Fig. 7. Test tools and devices to determine the physical properties of the samples, a) saturation container, b) Archimedes container, (submerging container), c) oven, d) digital scale



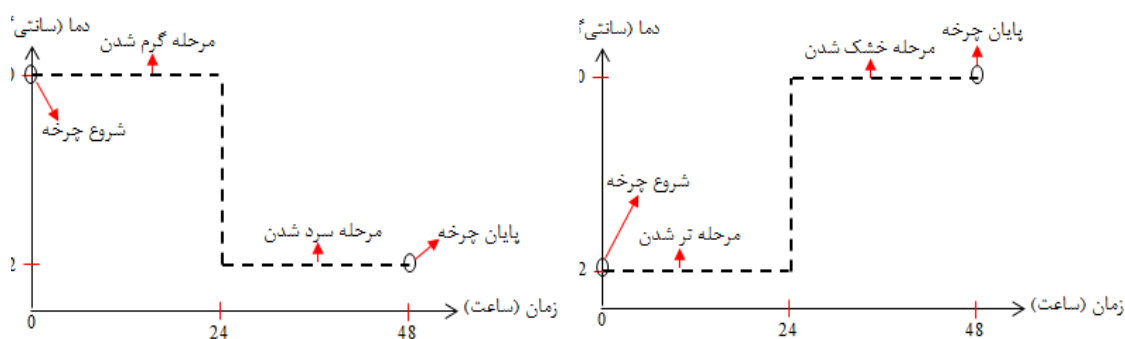
شکل ۸. دستگاه شاخص بار نقطه‌ای استفاده شده در پژوهش حاضر و تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده بعد از انجام آزمایش
Fig. 8. The point load index device used in the present study and a number of raptured specimens after test

از قرار دادن نمونه‌ها در ظرف آب شرب با دمای 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت و سپس خشک کردن آن‌ها در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴

چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن: آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن تا ۵۰ چرخه روی نمونه‌ها اعمال شد. هر چرخه تر- خشک شدن

نشان داده شده است. بعد از هر ۱۰ چرخه تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن، خصوصیات ظاهری (رنگ، شکل)، خصوصیات فیزیکی (وزن خشک، تخلخل) و خصوصیات مکانیکی (شاخص بار نقطه‌ای، سرعت موج P) نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند.

ساعت تشکیل شده است. از سوی دیگر، هر چرخه گرم-سرد شدن مرکب از قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و در ادامه سرد شدن نمونه‌ها در فضای آزمایشگاه با دمای 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت است. در شکل ۹ یک چرخه تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن به صورت شماتیک



شکل ۹. طرح شماتیک یک چرخه تر-خشک شدن (شکل سمت راست) و گرم-سرد شدن (شکل سمت چپ)
Fig. 9. Schematic plan of a wet-dry cycle (right figure) and heat-cool cycle (left figure)

نمونه‌های ملاط نشان داده شده است. تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده رفتارهای مختلف انواع مصالح بنایی است به طوری که میزان و نوع تخلخل از عوامل اصلی کنترل کننده خصوصیات مقاومتی و دوام آن‌ها در برابر عوامل هوازدگی مرتبط با حضور آب محسوب می‌شوند. علاوه بر این، تخلخل فاکتور مهمی در جذب و انتقال سیالات در داخل مصالح بنایی است. به نظر بناونته و همکاران (۲۰۰۷) زمانی که تخلخل مصالح بنایی، به ویژه تخلخل مؤثر، زیاد باشد عوامل مختلف مخرب سنگ مانند چرخه‌های تر-خشک شدن با شدت بیشتری عمل می‌کنند و دوام مصالح بنایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به عبارت دیگر هر چه تخلخل مؤثر بیشتر باشد، حفره‌های موجود در مصالح بنایی به هم پیوسته‌تر هستند و در نتیجه جذب آب بیشتر خواهد شد. با توجه به میزان تخلخل و قابلیت جذب آب ملاط، پتانسیل فرسودگی آن در برابر چرخه‌های تر-خشک شدن وجود دارد که این موضوع در بخش‌های بعدی بررسی شده است.

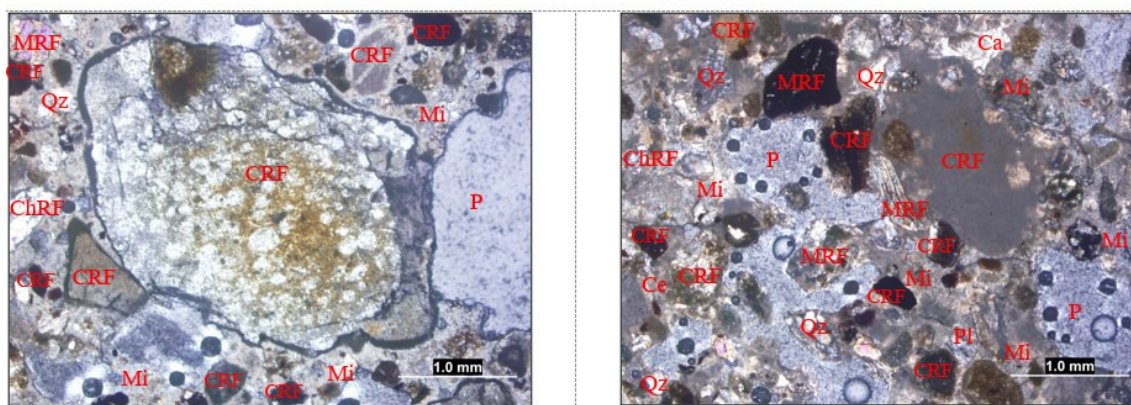
بر اساس نتایج، مقدار شاخص بار نقطه‌ای ملاط معادل با $1/57$ مگاپاسکل است. مطابق با طبقه‌بندی بروچ و فرانکلین (۱۹۷۲)، ملاط در رده سنگ‌های با مقاومت بالا (شاخص بار نقطه‌ای ۱-۳ مگاپاسکل) قرار می‌گیرد. هر چند بر اساس این طبقه‌بندی توصیفی، نمونه در رده

۴. نتایج و بحث

در شکل ۱۰ تصویری از مقطع نازک میکروسکوپی مطالعه شده به وسیله میکروسکوپ نوری پلاریزان ملاط نمایش داده شده است. بر اساس بررسی‌های مقاطع نازک میکروسکوپی، قطعات خرده‌سنگ کلسیتی، چرتی و دگرگونی (به ترتیب ۴۵، ۱۵ و ۳ درصد)، کانی‌های کوارتز، کلسیت، و فلدسپات (به ترتیب ۵، ۵ و ۲ درصد) که در یک خمیره کلسیت ریز بلور (۲۵ درصد) به هم متصل شده‌اند، اجزاء تشکیل دهنده ملاط هستند. بر اساس نتایج، بخش زیادی از اجزاء تشکیل دهنده نمونه ملاط قطعات خرده‌سنگ کلسیتی، کانی کلسیت و خمیره کلسیت ریزبلور (در مجموع ۷۵ درصد کل اجزاء تشکیل دهنده ملاط) هستند. در برخی قطعات خرده‌سنگی کلسیتی، اکسید آهن به صورت پوششی آن‌ها را محاط کرده است. بر اساس ترکیب کانی‌شناسی نمونه ملاط، از نوع ملاط آهکی می‌باشد. با توجه به نتایج خصوصیات فیزیکی، ملاط چگالی $1/47$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تخلخل $29/37$ درصد و قابلیت جذب آب $23/96$ درصد دارد. بر اساس طبقه‌بندی سنگ‌ها توسط آنون (۱۹۷۹) (جدول ۲)، ملاط در رده سنگ‌های با چگالی خیلی کم ($1-1/5$ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و تخلخل زیاد ($15-30$ درصد) قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱ فضای خالی موجود در تعدادی از

اجزاء تشکیل دهنده آن ساختاری کم‌تر منسجم‌تر و پیوسته‌تر دارند. از سوی دیگر، بر اساس مطالعات پیشین روی دامنه‌ای از انواع سنگ‌های مختلف، شاخص بار نقطه‌ای با چگالی و تخلخل به ترتیب روابطی مستقیم و معکوس دارد (گوپتا و راو، ۱۹۹۸؛ لشکری‌پور، ۲۰۰۲؛ پالچیک و هاتزر، ۲۰۰۴؛ ایلماز و یوکسک، ۲۰۰۹؛ پاپالاردو، ۲۰۱۵). ملاط چگالی پایین (۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و تخلخل بالا (۲۹/۳۷ درصد) و دارد. بنابراین یکی دیگر از دلایل پایین بودن شاخص بار نقطه‌ای ملاط به چگالی پایین و تخلخل بالا آن مرتبط است.

سنگ‌های با مقاومت بالا تعلق می‌گیرد، اما در واقع شاخص بار نقطه‌ای ۱/۵۷ مگاپاسکال مقدار پایینی در مقایسه با داده‌های منتشر شده توسط پژوهشگرانی همچون طغرل و ظریف (۱۹۹۹)، فخر و همکاران (۲۰۰۵)، حیدری و همکاران (۲۰۱۲)، سینگ و همکاران (۲۰۱۲)، عظیمیان و اجل‌لوئیان (۲۰۱۵) و جمشیدی (۲۰۲۲) است. این موضوع به دلیل این است که سنگ‌ها مصالح زمین‌شناسی طبیعی هستند و ساختاری منسجم و پیوسته در اجزاء تشکیل‌دهنده‌شان دارند، در صورتی که ملاط یکی از مصالح بنایی است که به صورت مصنوعی (ساخته شده توسط بشر) تولید شده است. بنابراین در مقایسه با سنگ،



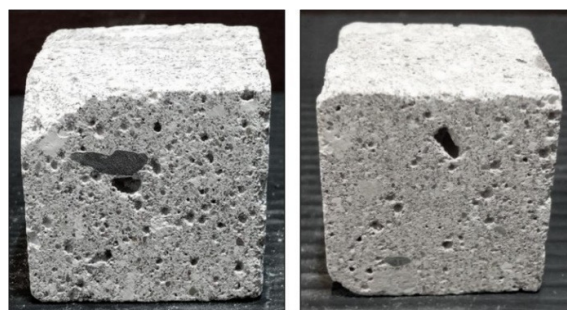
شکل ۱۰. تصویر مقطع نازک میکروسکوپی ملاط، (CRF خردسنگ کلسیتی، ChRF خردسنگ چرتی، MRF خردسنگ دگرگونی، Qz کوارتز، Pl پلاژیوکلاز، Mi میکریت (میکروکلسیت)، P فضای خالی)

Fig. 10. Image of microscopic thin section of mortar (CRF calcite rock fragment, ChRF chert rock fragment, MRF metamorphic rock fragment, Qz Quartz, Pl plagioclase, Mi micrite (microcrystalline calcite), P pore space)

جدول ۲. طبقه‌بندی ملاط بر اساس چگالی و تخلخل (آنون، ۱۹۷۹)

Table 2. Mortar classification based on its density and porosity (Anon, 1979)					
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	< 1/8	1/8-2/2	2/2-2/5	2/5-2/7	> 2/7
توصیف کیفی سنگ	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
تخلخل (%)	> 30	15-30	5-15	1-5	< 1
توصیف کیفی سنگ	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم

* هاشور خاکستری موقیعت نمونه ملاط را نمایش می‌دهد.

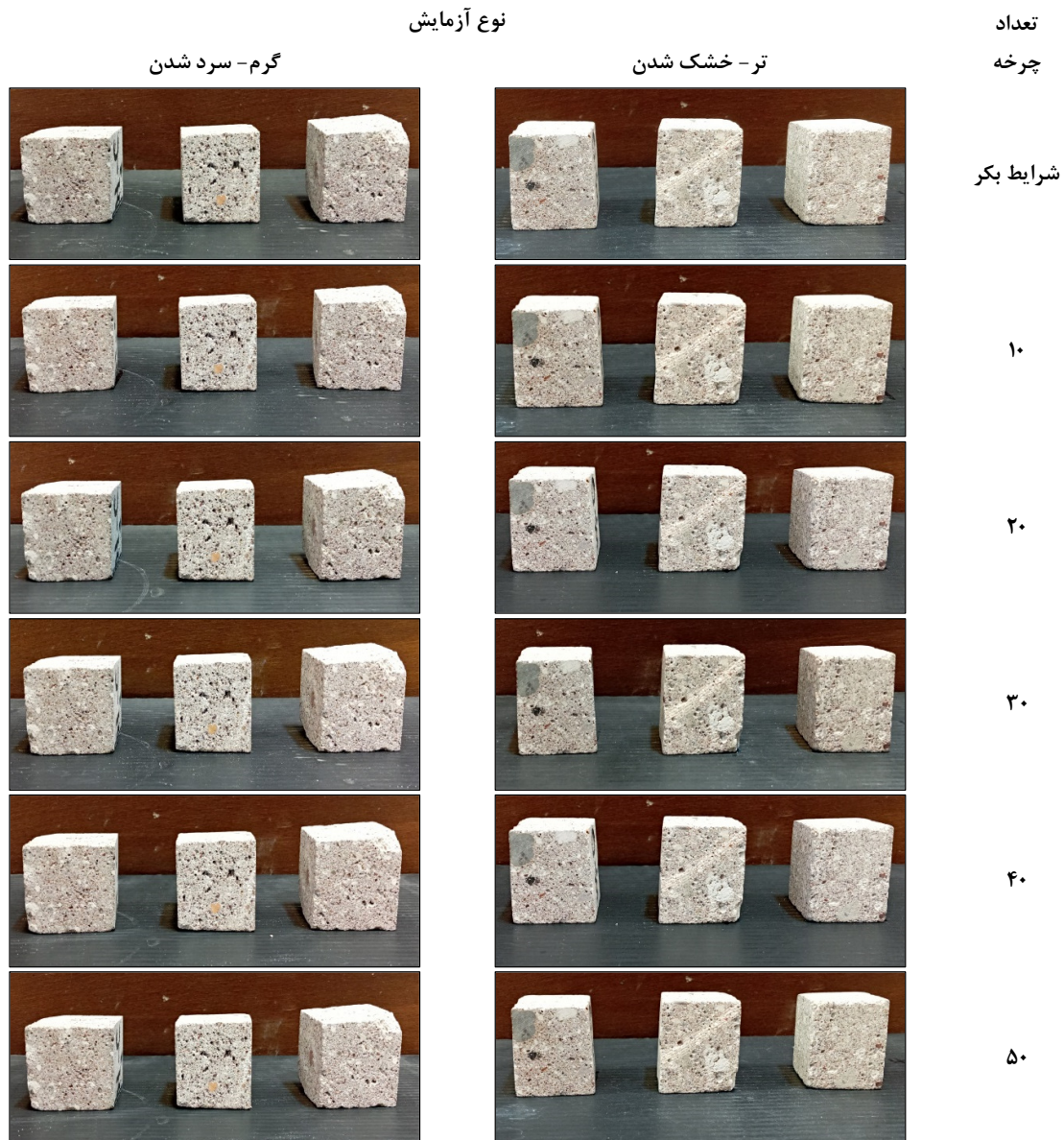


شکل ۱۱. توزیع فضای خالی در برخی نمونه‌های ملاط

Fig. 11. Distribution of pore space in some mortar specimens

متر بر ثانیه از خود نشان داده است که تفاوت قابل توجهی با سرعت موج P اجزاء تشکیل دهنده اصلی آن دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از چگالی پایین (۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و تخلخل بالا (۲۹/۳۷ درصد) ملاط باشد. به منظور ارزیابی فرسودگی ملاط در برابر چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن از سه نوع خصوصیت شامل ظاهری، فیزیکی و مکانیکی استفاده شده است. در شکل ۱۲ تغییرات خصوصیات ظاهری ملاط بعد از هر ۱۰ چرخه آزمایش نشان داده شده است.

سرعت موج P ملاط، ۱۹۴۰ متر بر ثانیه است که متعلق به رده‌سنگ‌های با سرعت خیلی پایین (سرعت موج P < ۲۵۰۰ متر بر ثانیه) است (آنون، ۱۹۷۹). سرعت موج P به شدت متأثر از ترکیب اجزاء تشکیل دهنده و همچنین خصوصیات فیزیکی است. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، کانی‌های تشکیل دهنده اصلی نمونه ملاط، کلسیت (۷۵ درصد) و کوارتز (۲۰ درصد) به ترتیب با سرعت موج P معادل با ۶۶۰۰ و ۶۲۵۰ متر بر ثانیه هستند (گودمن، ۱۹۸۹). به هر حال، ملاط سرعت موج P معادل با ۱۹۴۰



شکل ۱۲. تغییرات خصوصیات ظاهری ملاط (رنگ و شکل) در طی آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن
 Fig. 12. Changes in the appearance of the mortar (color and shape) during the wet-dry and heat-cool tests

جدایش قطعات گرد شده از ملاط، گسترش ترک در حجم ملاط، گسترش ترک در مرز بین قطعات و خمیره ملاط و در نهایت تخریب گوشه‌های ملاط چهار نوع اصلی فرسودگی رخ داده بودند. همه انواع این فرسودگی‌ها، در هر دو آزمایش‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن مشاهده شد.

مطابق با بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌ها، هیچ‌گونه آثار تغییر رنگ در آن‌ها در طی چرخه‌های مختلف آزمایش‌ها مشاهده نشد. مشاهده دقیق شکل ظاهری نمونه‌ها نشان دهنده فرسودگی فیزیکی برخی از آن‌ها در طی چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن است. فرسودگی رخ داده در ملاط به چند صورت قابل مشاهده بود. شکل ۱۳ انواع فرسودگی بعد از آزمایش‌ها نمایش داده شده است.

گسترش ترک در حجم ملاط

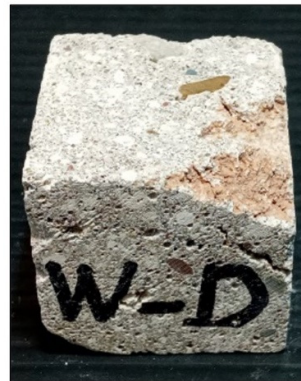


جدایش قطعات گرد شده از ملاط



گسترش ترک در مرز بین قطعات و خمیره ملاط

تخریب گوشه‌های ملاط



شکل ۱۳. چهار نوع اصلی فرسودگی در ملاط در طی چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن

Fig. 13. Four main types of deterioration in mortar during the wet-dry and heat-cool cycles

که در آن، W_i وزن خشک ملاط در شرایط بکر یا به عبارت دیگر قبل از اعمال چرخه‌های آزمایش و W_a وزن خشک ملاط بعد از تعداد چرخه معینی از آزمایش‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن (چرخه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰). بر اساس شکل (۱۴ الف)، با افزایش چرخه‌های آزمایش‌ها، کاهش وزن خشک ملاط بیشتر شده است. در پایان چرخه ۵۰ آزمایش‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن به ترتیب ۱/۳۳ و ۱/۱۷ درصد کاهش وزن خشک در

تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط در چرخه‌های مختلف تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند. تغییرات وزن خشک ملاط به عنوان تابعی از افزایش چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن در شکل (۱۴ الف) نشان داده شده است. تغییر وزن خشک از رابطه زیر تعیین شده است؛

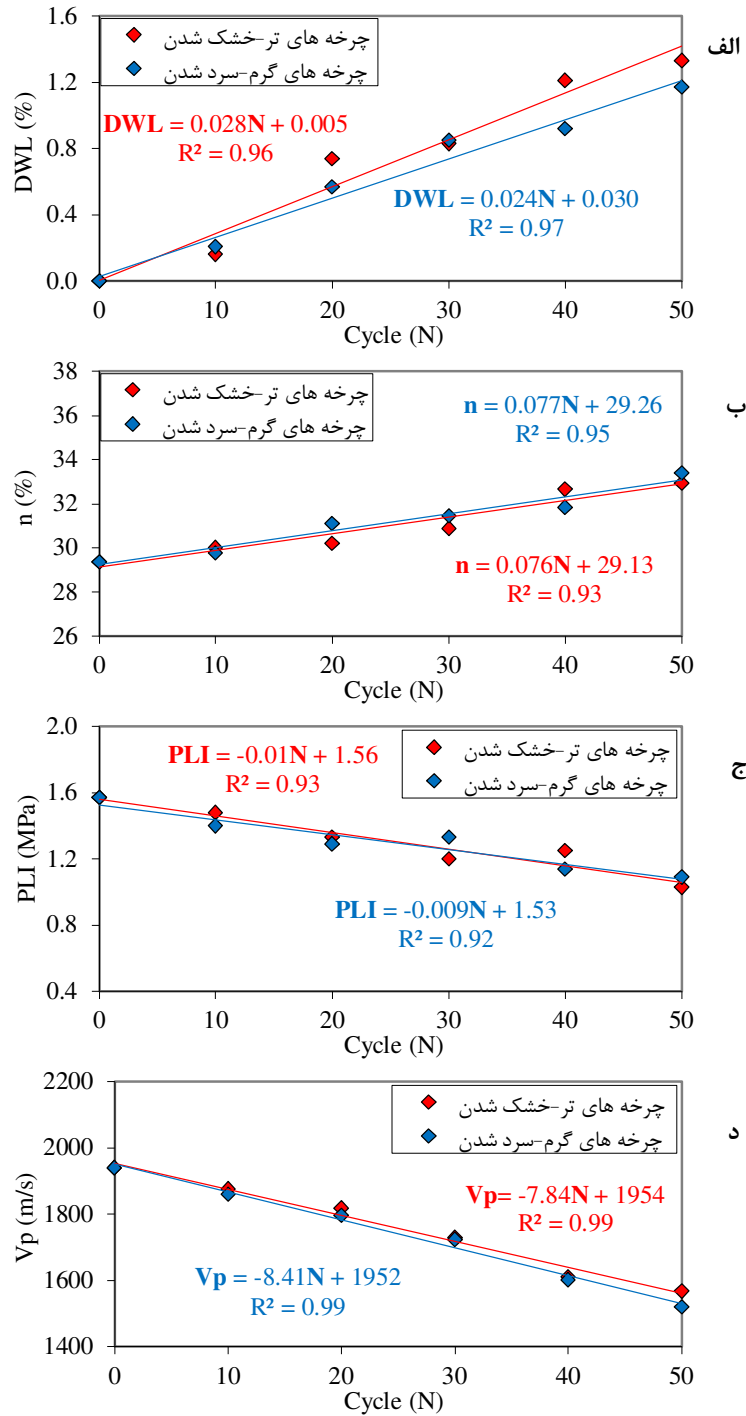
$$DWL = \frac{W_i - W_a}{W_i} \times 100 \quad (7)$$

با ضرایب تعیین (R^2) ۰/۹۳ و ۰/۹۵ وجود دارد. در شکل (۱۴ج) تغییرات شاخص بار نقطه‌ای در طی چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش چرخه‌ها، شاخص بار نقطه‌ای به طور کلی روند کاهشی داشته است. بر اساس بهترین خط برازش بر داده‌ها، روابط خطی به ترتیب با ضرایب تعیین (R^2) ۰/۹۳ و ۰/۹۲ بین تغییرات شاخص بار نقطه‌ای با چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن وجود دارد. به هر حال آنومالی‌های در مقادیر شاخص بار نقطه‌ای در برخی چرخه‌ها مشاهده شد. برای مثال، شاخص بار نقطه‌ای در چرخه ۴۰ آزمایش تر- خشک شدن مقدار بیشتری نسبت به چرخه ۳۰ داشته است. این حالت برای چرخه‌های ۳۰ و ۲۰ آزمایش گرم- سرد شدن نیز قابل مشاهده است. چگونگی اعمال بار روی مصالح سنگی در آزمایش شاخص بار نقطه‌ای به صورت نقطه‌ای است که توسط دو مخروط با زاویه رأس ۶۰ درجه صورت می‌گیرد. از سوی دیگر ملاط مورد مطالعه از منظر اجزاء تشکیل دهنده همگن نبوده و از یک خمیره ریز دانه تا قطعات کم‌تر از یک میلی‌متر تا ۱ سانتی‌متر تشکیل شده است. همچنین بخش قابل توجهی از ملاط را فضای خالی (تخلخل ۲۹/۳۷ درصد) تشکیل داده است. در طی اعمال بار (که به صورت نقطه‌ای است) در آزمایش شاخص بار نقطه‌ای، ممکن است بارگذاری روی یک بخش ناهمگن ملاط، مانند بخشی که حفره‌ها در آن توسعه بیشتری دارند، صورت گیرد. این منجر خواهد شد که ملاط در یک بار کم‌تری دچار گسیختگی شود و بنابراین شاخص بار نقطه‌ای آن کم‌تر از مقدار واقعی آن شود. این شرایط منجر به ایجاد آنومالی در نتایج شاخص بار نقطه‌ای در برخی چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن شده است. همان‌طور که از شکل (۵۱۴) می‌توان مشاهده کرد، سرعت موج P ملاط یک روند کاهشی خطی با افزایش چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن با ضرایب تعیین (R^2) به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۹ از خود نشان داده است. کاهش سرعت موج P، ناشی از گسترش و توسعه ریزترک‌ها در ملاط در طی چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن است. تغییر در ساختار ریزترک‌ها با افزایش چرخه‌ها، منجر به افزایش تخلخل در ملاط خواهد شد. در پژوهش‌های پیشین، محققین نشان داده‌اند که سرعت موج P رابطه معکوسی با تخلخل دارد (الحارثی و همکاران،

ملاط رخ داده است. با توجه به شکل (۱۴الف)، داده‌های مربوط به کاهش وزن خشک ملاط پراکندگی نسبتاً زیادی در چرخه‌های مختلف تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن نشان می‌دهند. این موضوع به این صورت قابل توجیه است که تا یک چرخه معینی از آزمایش‌ها، ممکن است تخریب فیزیکی در ملاط رخ ندهد. به هر حال مرز بین اجزاء تشکیل دهنده ملاط (قطعات و کانی‌ها) با افزایش چرخه‌ها سست و ضعیف می‌شود تا این‌که در چرخه معینی یک قطعه یا کانی از سطح ملاط جدا می‌شود و باعث کاهش وزن خشک آن خواهد شد. بنابراین، تا تعداد چرخه‌ای از آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن ممکن است تغییری در وزن خشک ملاط رخ ندهد، تا این‌که در یک چرخه معینی به دلیل جدا شدن یک قطعه یا کانی، کاهش وزن خشک محسوسی رخ دهد. برای مثال در شکل (۱۳)، تصاویر مربوط به عناوین "جدایش قطعات گردشده از ملاط" و "گسترش ترک در مرز بین قطعات و خمیره ملاط" در ارتباط با موضوع توضیح داده شده هستند. به طور کلی، کاهش وزن خشک ملاط به عنوان یک خصوصیت کمی با مشاهدات میکروسکوپی تطابق تقریباً خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، تخریب فیزیکی در ملاط بعد از چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن منجر به کاهش وزن خشک آن شده است. تخلخل ملاط یک روند افزایشی با افزایش چرخه‌های آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن از خود نشان می‌دهد (شکل ۱۴ب). اعمال چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن منجر به سست‌شدگی در مرز بین اجزاء تشکیل دهنده ملاط و گسترش و توسعه ریزترک در آن‌ها خواهد شد. این موضوع به دلیل جذب و دفع آب و شوک‌های حرارتی ناشی از چرخه‌های آزمایش‌ها است. در شکل ۱۵ تصویر مقطع نازک میکروسکوپی ملاط بعد از چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن نشان داده شده است. از این شکل می‌توان مشاهده کرد که بعد از چرخه‌های آزمایش‌ها، ریزترک‌ها در ملاط گسترش و توسعه یافته‌اند. تغییر در ساختار ریزترک‌ها منجر به بیشتر شدن فضای خالی ملاط و در نتیجه بالا رفتن تخلخل آن با افزایش چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن خواهد شد. همبستگی‌های خوبی بین تغییرات تخلخل ملاط با تعداد چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن به ترتیب

شدن مقدار تخلخل ملاط افزایشی بوده است (شکل ۱۴ب)، سرعت موج P روندی کاهشی از خود نشان داده است (شکل ۱۴د).

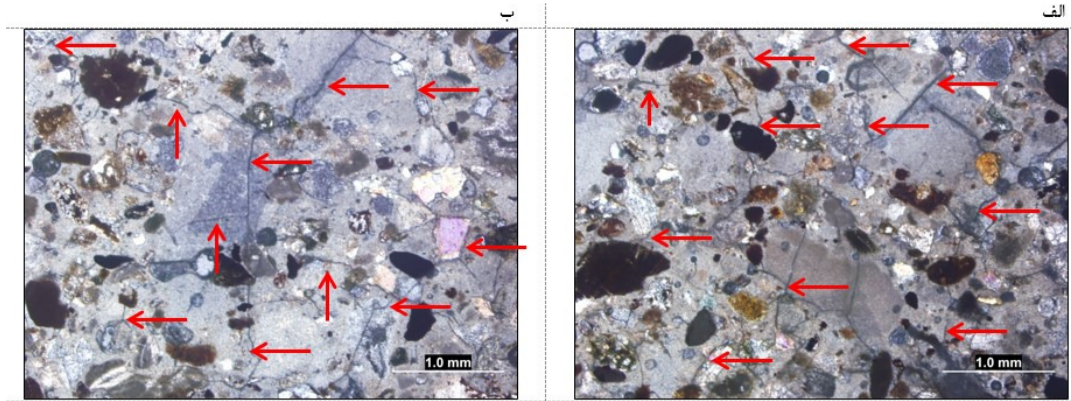
۱۹۹۹؛ سوسا و همکاران، ۲۰۰۵؛ یاگیز، ۲۰۱۱؛ عظیمیان و اجل‌لوئیان، ۲۰۱۵؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بهرامی و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین از آنجایی که با افزایش چرخه‌های آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد



شکل ۱۴. تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط در طی چرخه‌های مختلف تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن

* تعداد چرخه (N)، وزن خشک (DWL)، تخلخل (n)، شاخص بار نقطه‌ای (PLI)، سرعت موج P (Vp)

Fig. 14. Changes in the physical and mechanical properties of mortar during the various wet-dry and heat-cool cycles
* Number of cycles (N), dry weight (DWL), porosity (n), point load index (PLI), P wave velocity (Vp)



شکل ۱۵. مقاطع نازک میکروسکوپی، الف) بعد از ۵۰ چرخه تر- خشک شدن و ب) بعد از ۵۰ چرخه گرم- سرد شدن
 Fig. 15. Microscopic thin sections a) after 50 of cycles wet-dry b) after 50 cycles heat-cool

اقلیمی با نزولات جوی بالا، استراتژی شیوه حفاظت از مصالح بنایی استفاده شده در بنای باستانی باید به گونه‌ای باشد که در برابر مرطوب شدن و نفوذ آب عایق شوند. از این‌رو، در این بخش به مقایسه تأثیر چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن روی شدت فرسودگی ملاط پرداخته شده است. به این منظور، از درصد تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط (Total Loss; TL) در چرخه ۵۰ نسبت به شرایط بکر مطابق با رابطه زیر استفاده شده است؛

$$TL = \frac{|C_i - C_{50}|}{C_i} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، C_i خصوصیت ملاط (تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای یا سرعت موج P) در شرایط بکر یا به عبارت دیگر قبل از اعمال چرخه‌های آزمایش و C_{50} خصوصیت ملاط (تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای یا سرعت موج P) بعد از ۵۰ چرخه آزمایش تر- خشک شدن یا گرم- سرد شدن است. درصد تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط بعد از آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن در شکل ۱۶ ارائه شده‌اند. تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج P ملاط بعد از آزمایش تر- خشک شدن به ترتیب ۱۲/۲، ۳۴/۴ و ۱۹/۲ درصد تغییر داشته‌اند و این تغییرات بعد از آزمایش گرم- سرد شدن به ترتیب معادل با ۱۳/۸، ۳۰/۶ و ۲۱/۶ درصد بوده‌اند. مقادیر تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در آزمایش تر- خشک شدن تقریباً مقادیری مشابه با آزمایش گرم- سرد شدن دارند یا به عبارت دیگر اختلاف فاحشی ندارند. این نتایج دلالت بر این دارد که چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن تأثیر تقریباً یکسانی بر شدت فرسودگی ملاط داشته‌اند.

در جدول (۳) ضرایب تعیین (R^2) به دست آمده از منحنی‌های برازش بر داده‌های خصوصیات فیزیکی و مکانیکی با چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن ارائه شده است. مقایسه ضرایب تعیین (R^2) دلالت بر این دارد که سرعت موج P مناسب‌ترین پارامتر (بالاترین R^2) برای ارزیابی فرسودگی ملاط است. یکی از بارزترین مزایای تعیین سرعت موج P به غیر مخرب بودن آزمایش آن برمی‌گردد. این باعث می‌شود که نمونه‌های ملاطی که در شرایط بکر (به عبارت دیگر چرخه صفر) برای تعیین سرعت موج P استفاده شده‌اند در چرخه‌های بعدی آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن نیز مورد استفاده قرار بگیرند. این شرایط منجر به حذف اثر ناهمگنی و نامتناسج بودن نمونه‌ها بر نتایج آزمایش خواهد شد. به هر حال، برای تعیین سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، آزمایش‌های مربوط به آن‌ها بر روی نمونه‌های ملاط متفاوت در شرایط بکر و چرخه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن انجام می‌شود. این به طبیعت مخرب بودن این آزمایش‌ها برمی‌گردد به طوری که نمونه‌های استفاده شده در یک چرخه معین، قابلیت استفاده در چرخه‌های بعدی آزمایش‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن را نخواهند داشت.

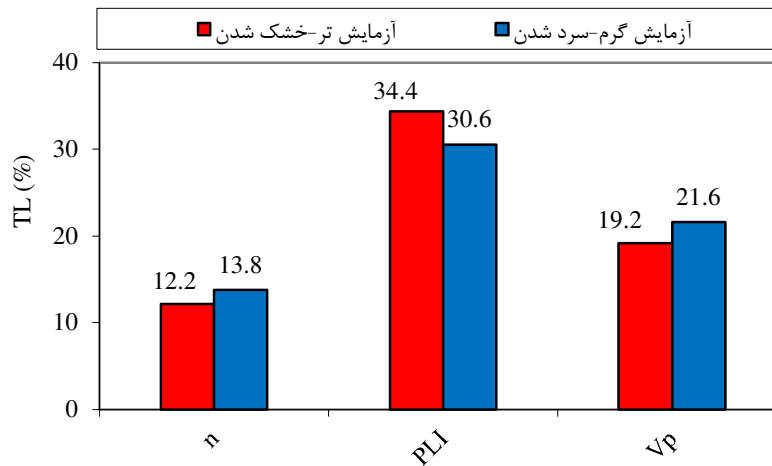
در زمینه ارزیابی فرسودگی مصالح بنایی در برابر عوامل مختلف هوازدگی، تعیین عامل غالب هوازدگی برای کارشناسان مرمت و حفاظت بناهای باستانی بسیار حائز اهمیت است. تعیین عامل غالب هوازدگی در فرسودگی مصالح بنایی می‌تواند در برنامه‌ریزی و استراتژی شیوه حفاظت آن‌ها سودمند باشد. برای مثال، در یک شرایط

جدول ۳. روابط همبستگی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی با چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن

Table 3. Correlation relationships of physical and mechanical properties with the cycles of wet-dry and heat-cool

R ²	رابطه همبستگی	نوع آزمایش هوازدگی
0.96	DWL=0.028N+0.005	تر-خشک شدن
0.93	n=0.076N+29.13	
0.93	PLI=-0.01N+1.56	
0.99	Vp=-7.84N+1954	
0.97	DWL=0.024N+0.030	گرم-سرد شدن
0.95	n=0.077N+29.26	
0.92	PLI=-0.009N+1.53	
0.99	Vp=-8.41N+1952	

* تعداد چرخه (N)، وزن خشک (DWL)، تخلخل (n)، شاخص بار نقطه‌ای (PLI)، سرعت موج P (Vp)



شکل ۱۶. تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط بعد از آزمایش‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن
Fig. 16. Changes in physical and mechanical properties of mortar after wet-dry and heat-cool tests

۵- نتیجه‌گیری
در پژوهش حاضر، تأثیر عوامل هوازدگی تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن بر فرسودگی ملاط آهکی استفاده شده در راه باستانی گاشمار در شهرستان نورآباد (استان لرستان) بررسی شد. برای این هدف، بعد از اعمال هر ۱۰ چرخه تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن (در مجموع ۵۰ چرخه)، خصوصیات ظاهری (رنگ و شکل)، فیزیکی (وزن خشک و تخلخل) و مکانیکی (شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج P) ملاط تعیین شد. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش‌های مختلف نتایج زیر حاصل شدند؛

با افزایش چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن، رنگ نمونه تغییر از خود نشان نداد در صورتی که شکل ظاهری نمونه بر اثر فرسودگی فیزیکی دستخوش تغییرات محسوسی شد. جدایش قطعات گرد شده از ملاط، گسترش ترک در حجم ملاط، گسترش ترک در مرز بین قطعات و خمیره ملاط و در نهایت تخریب گوشه‌های ملاط چهار نوع اصلی فرسودگی بودند. همه انواع این فرسودگی‌ها، در هر دو آزمایش‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن مشاهده شد.

بر اساس ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملاط، وزن خشک، شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج P روند کاهشی و در مقابل تخلخل روند افزایشی با بیشتر شدن تعداد چرخه‌های تر-خشک شدن و گرم-سرد شدن از خود نشان دادند.

بر اساس مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی، نمونه ملاط از نوع آهکی می‌باشد به طوری که در مجموع ۷۵ درصد اجزاء تشکیل دهنده آن را خرده‌سنگ کلسیتی، کانی کلسیت و خمیره کلسیت ریزبلور تشکیل داده است.

- accelerated weathering tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70: 101–114. doi.org/10.1007/s10064-010-0287-x.
- Al-Harthi, A. A., Al-Amri, R. M., Shehata, W. M (1999) The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 54: 313–320. doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00050-2.
- Anon (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part 1: Rock and soil materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 19: 355–371. doi.org/10.1007/BF02600503.
- Azimian, A., Ajalloeian, R (2015) Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 2069–2079. doi.org/10.1007/s12517-013-1235-4.
- Bahrami, Sh., Sarikhani, R., Jamshidi, A., Ghassemi Dehnavi, A., Emami Mybodi, M.R (2023) A comparative study of the effects of sodium and magnesium sulfates on the physico-mechanical characteristics of Abasabad travertine, Mahallat, Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt, Iran. *Environmental Earth Science*, 82: 92. doi.org/10.1007/s12665-023-10757-x.
- Benavente, D., Martinez, J., Cueto, N., Cura, M. A (2007) Salt weathering in dual-porosity building dolostones. *Engineering Geology*, 94: 215–226. doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.08.003.
- Broch, E., Franklin, J. A (1972) The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 6: 669–676. doi.org/10.1016/0148-9062(72)90030-7.
- Celik, M. Y., Sert, M (2020) Accelerated aging laboratory tests for the evaluation of the durability of hydrophobic treated and untreated andesite with respect to salt crystallization, freezing–thawing, and thermal shock. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79: 3751–3770. doi.org/10.1007/s10064-020-01776-0.
- Demirdag, S (2013) Effects of freezing–thawing and thermal shock cycles on physical and mechanical properties of filled and unfilled travertines. *Construction and Building Materials*, 47: 1395–1401. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.045.
- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A., Gunaydin, O (2005) A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38: 329–343. doi.org/10.1007/s00603-005-0061-8.
- Fereidooni, D., Khajevand, R (2019) Utilization of the accelerated weathering test method for evaluating the durability of sedimentary rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79: 3751–3770. doi.org/10.1007/s10064-020-01776-0.
- نتایج نشان داد که چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن منجر به توسعه و گسترش ریزترک‌ها در ملاط شده‌اند. این به نوبه خود بر تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شامل وزن خشک، تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج P ملاط بعد از چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن تأثیر گذاشته است.
- مقایسه ضرایب تعیین (R^2) به دست آمده از منحنی‌های برازش بر داده‌های خصوصیات فیزیکی و مکانیکی با چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن نشان داد که سرعت موج P مناسب‌ترین پارامتر (بالاترین R^2) برای ارزیابی فرسودگی ملاط است.
- بر اساس مقایسه مقادیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، چرخه‌های تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن تأثیر تقریباً یکسانی بر شدت فرسودگی ملاط داشته‌اند. بنابراین، لازم است که راهکار حفاظتی برای جلوگیری از فرسودگی ملاط آهکی استفاده شده به عنوان مصالح بنایی در راه باستانی گاشمار واقع در شهرستان نورآباد (استان لرستان)، بر اساس هر دو عامل هوازدگی تر- خشک شدن و گرم- سرد شدن انتخاب و طراحی شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره "۱۴۰۳۱۵۱۱۴۰۳" با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه لرستان انجام شده است. نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از آقای مصطفی صداقت‌نیا دانشجوی دوره دکتری رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان بابت مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی دارند. اداره کل میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان لرستان همکاری لازم را با نویسندگان در زمینه نمونه‌برداری از ملاط آهکی راه باستانی گاشمار (شهرستان نورآباد، استان لرستان) داشتند، از اینرو از مسئولین مربوطه آن اداره تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- Abdi, Y., Khanlari, G. R (2018) Investigation of effect of freeze-thaw on mechanical properties of Upper Red Formation sandstones based on measurement of P-wave velocity and porosity. *New Finding in Applied Geology*, 12: 75–91. doi.org/10.22084/nfag.2017.13399.1254 (in persian).
- Akin, M., Özsan, A (2011) Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using

- and physical-chemical characteristic of sandstone subjected to acid rain. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*, 48:165-170. doi.org/10.15986/j.1006-7930.2016.02.003.
- ISRM (1981) Rock characterization testing and monitoring. In: Brown ET (ed) ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford.
- Jamshidi, A (2022) A comparative study of point load index test procedures in predicting the uniaxial compressive strength of sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55: 4507-4516. doi.org/10.1007/s00603-022-02877-w.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamsehchiyan, M., Sarikhani, R (2020) Durability assessment of travertenes against salt weathering: an experimental study. *New Finding in Applied Geology*, 14: 1-15. doi.org/10.22084/nfag.2019.17907.1347 (in persian).
- Jamshidi, A., Zamanian, H., Zarei Sahamieh, R (2018) The effect of density and porosity on the correlation between uniaxial compressive strength and P-wave velocity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51: 1279-1286. doi.org/10.1007/s00603-017-1379-8.
- Jha, M. K., Verma, A. K., Maheshwar, S., Chauhan, A (2016) Study of temperature effect on thermal conductivity of Jhiri shale from Upper Vindhyan, India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75: 1657-1668. doi.org/10.1007/s10064-015-0829-3.
- Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O (2017) Estimating the uniaxial compressive strength of pyroclastic rocks from the slake durability index. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76: 1107-1115. doi.org/10.1007/s10064-016-0893-3.
- Kayabali, K., Beyaz, T., Kolay, E (2006) The effect of the pH of the testing liquid on the slake durability of gypsum. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 65: 65-71. doi.org/10.1007/s10064-005-0027-9.
- Khan, N. M., Ma, L., Cao, K. Hussain, S., Ali, A., Liu, W., Alarifi, S. S., Sultan shah, K., Khan, S., Yang Xiaoxu, Y., Xu, Y (2020) Evaluating the thermal-cooling induced effects on the Ambela granite properties (from Pakistan) using experimental and image processing techniques. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 81: 506. doi.org/10.1007/s10064-022-03019-w.
- Khanlari, G., Abdilor, Y (2015) Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 74: 1287-1300. *Environment*, 78: 2697-2716. doi.org/10.1007/s10064-018-1267-9.
- Fu, Y., Yuan, W., Liu, X (2018) Deterioration rules of strength parameters of sandstone under cyclical wetting and drying in acid-based environment. *Rock and Soil Mechanics*, 39: 3331-3339. doi.org/10.16285/j.rsm.2016.2711.
- Ge, S., Shi, B., Zhang, S., Zhai, X., Chunlei Wu, C (2022) Thermal damage and mechanical properties of high temperature sandstone with cyclic heating-cooling treatment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81: 284. doi.org/10.1007/s10064-022-02781-1.
- Ghobadi, M. H., Babazadeh, R (2015) Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48: 1001-1016. doi.org/10.1007/s00603-014-0609-6.
- Goodman, R. E (1989) *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley, New York.
- Gupta, A. S., Rao, K. S (1998) Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57: 161-172. doi.org/10.1007/s100640050032.
- Gupta, V., Ahmed, I (2007) The effect of PH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. *Engineering Geology*, 95: 79-87. doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.09.004.
- Hashemi, M., Bashiri Goudarzi, M., Jamshidi, A (2018) Experimental investigation on the performance of Schmidt hammer test in durability assessment of carbonate building stones against freeze-thaw weathering. *Environmental Earth Science*, 77, 684. doi.org/10.1007/s12665-018-7874-8.
- Heidari, M., Khanlari, G. R., Torabi-Kaveh, M., Karegarian, S (2012) Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45: 265-273. doi.org/10.1007/s00603-011-0196-8.
- Heidari, M., Torabi-Kaveh, M., Mohseni, H (2016) Artificial weathering assessment of Persepolis stone due to heating to elucidate the effects of the burning of Persepolis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75: 979-992. doi.org/10.1007/s10064-016-0887-1.
- Hu, X., Sun, Q., Wang, S., Wei, S., Ding, X., Zhao, X (2022) Study on deterioration characteristics of combustion metamorphic rocks under dry-wet cycling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81: 467. doi.org/10.1007/s10064-022-02966-8.
- Huo, R., Li, J., Xin, H.W., Wang, B (2016) Regularity analysis on corrosion progressive

- types. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45: 259–264. doi.org/10.1007/s00603-011-0192-z.
- Sousa, L. M. O., Del Rio, L. M. S., Calleja, L., de Argandona, V. G. R., Rey, A. R (2005) Influence of microfractures and porosity on the physio-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77: 153–168.
- Taghipour, M., Nikudel, M. R., Farhadian, M. B (2016) Engineering properties and durability of limestones used in Persepolis complex, Iran, against acid solutions. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 75: 967–978. doi.org/10.1007/s10064-015-0821-y.
- Torabi-Kaveh, M., Heidari, M., Mohseni, H., Menendez, B (2019) Role of petrography in durability of limestone used in construction of Persepolis complex subjected to artificial accelerated ageing tests. *Environmental Earth Sciences*, 78: 297. doi.org/10.1007/s12665-019-8308-y.
- Torabi-Kaveh, M., Mehrnahad, H., Morshedi, S., Jamshidi, A (2022) Investigating the durability of weak rocks to forecast their long-term behaviors. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 81: 8. doi.org/10.1007/s10064-021-02504-y.
- Tugrul, A., Zarif, I. H (1999) Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51:303–317. doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4.
- Weng, L., Wu, Z., Liu, Q (2020) Influence of heating/cooling cycles on the micro/macroc cracking characteristics of Rucheng granite under unconfined compression. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 79: 1289–1309. doi.org/10.1007/s10064-019-01638-4.
- Yagiz, S (2011) P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials. *Bulletin of Materials Science*, 34: 947–953. doi.org/10.1007/s12034-011-0220-3.
- Yagiz, S (2018) The effect of pH of the testing liquid on the degradability of carbonate rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36: 2351–2363.
- Yavuz, A. B., Topal, T (2016) Effects of different drying temperatures on the physical and mechanical properties of some marbles (Mugla, Turkey) during salt crystallization tests. *Environmental Earth Sciences*, 75: 982. doi.org/10.1007/s12665-016-5806-z.
- Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I., Sengun, N (2006) Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*
- Lashkaripour, G. R (2002) Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 61: 73–77. doi.org/10.1007/s100640100116.
- Liu, Q., Qian, Z., Wu, Z (2019) Micro/macro physical and mechanical variation of red sandstone subjected to cyclic heating and cooling: an experimental study. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 78: 1485–1499.
- Liu, X., Jin, M., Li, D. Zhang, L (2018) Strength deterioration of a Shaly sandstone under dry-wet cycles: a case study from the Three Gorges Reservoir in China. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 77: 1607–1621. doi.org/10.1007/s10064-017-1107-3.
- Lorestan Meteorological Organization (2023). <http://www.lorestanmet.ir> (in persian)
- Marques, E. A. G., Vargas, E. D. A., Antunes, F. S (2005) A study of the durability of some shales, mudrocks and siltstones from Brazil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23: 321–348. doi.org/10.1007/s10706-004-1605-5.
- Özbek, A (2014) Investigation of the effects of wetting–drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 73: 595–609. doi.org/10.1007/s10064-013-0519-y.
- Palchik, V., Hatzor, Y. H (2004) Influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37: 331–341. doi.org/10.1007/s00603-003-0020-1.
- Pappalardo, G (2015) Correlation between P-wave velocity and physical–mechanical properties of intensely jointed dolostones, Peloritani Mounts, NE Sicily. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48: 1711–1721. doi.org/10.1007/s00603-014-0607-8.
- Parvizpour, S., Jamshidi, A., Sarikhani, R., Ghassemi Dehnavi, A (2022) The pH effect of sulfuric acid on the physico-mechanical properties of Atashkuh travertine, Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 81: 159. doi.org/10.1007/s12665-022-10282-3.
- Pirizadeh, S., Sarikhani, R., Jamshidi, A., Ghassemi Dehnavi, A (2022) Physico-mechanical properties of the sandstones and effect of salt crystallization on them: A comparative study between stable and unstable slopes (a case study of the Khorramabad-Zal highway in Iran). *Case Studies in Construction Materials*, 17: e01375. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01375.
- Sajadi, A (1998) Lorestan Pajohi. 1: 89–103 (in persian).
- Singh, T. N., Kainthola, A., Venkatesh, A (2012) Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock

- Sciences, 43: 767–775.
doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.12.004.
- Yilmaz, I., Yuksek, G (2009) Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46: 803–810. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.09.002.
- Zalooli, A., Khamehchiyan, M., Nikudel, M. R., Jamshidi, A (2017) Deterioration of travertine samples due to magnesium sulfate crystallization pressure: examples from Iran. Geotechnical and Geological Engineering, 35: 463–473. doi.org/10.1007/s10706-016-0120-9.
- Zhao, F., Sun, Q., Zhang, W (2020) Combined effects of salts and wetting–drying cycles on granite weathering. Bulletin Engineering Geology and the Environment, 79: 3707–3720. doi.org/10.1007/s10064-020-01773-3.

Deterioration assessment of the lime mortar against wet-dry and heat-cool cycles: a case study from the Gashmar ancient road, Nourabad city, Lorestan Province

A. Jamshidi^{1*} and M. Sabzi²

1- Assoc. Prof., Dept. of Geology, Faculty of sciences, Lorestan University, Khoramabad, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of History and Archaeology, Lorestan University, Khoramabad, Iran

* jamshidi.am@lu.ac.ir

Received: 2023.3.17 Accepted: 2023.5.3

Abstract

The weathering agents in the nature are diverse, which can lead to the deterioration of an ancient monument and even its decay and destruction. In the present study, the deterioration of the lime mortar used in the ancient Gashmar road located in Nourabad city (Lorestan province) has been evaluated against weathering factors caused by wet-dry and heat-cool cycles. To achieve this goal, wet-dry and heat-cool tests up to 50 cycles were applied on mortar samples. After every 10 cycles, the appearance (color and shape), physical (dry weight and porosity) and mechanical (point load index and P wave velocity) characteristics were determined. The results indicate that the mortar has undergone minor changes in its appearance as a result of wet-dry and heat-cool cycles. On the contrary, the data analysis showed that with the increase of cycles, the values of the physical and mechanical properties of the samples have changed more significantly. Based on the study of microscopic thin sections, the change in the physical and mechanical properties of the mortar has been closely related to the development and propagation of microcracks after the test cycles. The comparison of the results reveals that the weathering agents caused by wet-dry and heat-cool cycles had almost the same effect on the deterioration intensity of the mortar sample. P-wave velocity is a more suitable and accurate parameter to evaluate mortar deterioration compared to other physical, physical and mechanical properties, while the appearance properties cannot be a suitable parameter in this context. According to the results, it is suggested that the protective solution to prevent from the mortar deterioration used as masonry materials in the ancient Gashmar road located in Nourabad city should be selected and designed based on both wet-dry and heat-cool weathering agents.

Keywords: Lime mortar deterioration, Gashmar ancient road, Wet-dry, Heat-cool, Nourabad city

Introduction

The conservation of ancient monuments is very important in terms of a wide range of cultural, social and economic benefits; it supports the cultural and social well-being of the residents of the region, promotes the civic pride of the communities, and can equally be a means to achieve economic goals such as the growth and revitalization of cities, small businesses, and providing housing. In order to design and plan conservation measures and solutions for building materials used in an ancient monument, it is necessary to identify type of "deterioration agent" or from the geological point of view "weathering agents". This issue is considered one of the primary and basic requirements, which is very important in providing the conservation plan. In fact, the correct and efficient measures for the

conservation of an ancient monument should be based on the identification and knowledge of the type of weathering agent affecting the deterioration of the building materials. This can lead to long-term stability and durability of building materials used in an ancient monument against weathering agents.

In the present study, the deterioration of the lime mortar used in the Gashmar ancient road in Nourabad city (Lorestan Province) has been evaluated by investigating its qualitative and quantitative characteristics against the weathering agents of wet-dry and heat-cool.

The location and history of the Gashmar ancient road

The Gashmar ancient road is located 54 km southwest of Nourabad city, Lorestan

Province. Based on the field visits, the degree of deterioration of the mortar in the Gashmar ancient road was from low to high intensities. In terms of climatic conditions, the study site is one of the areas with significant precipitation in Lorestan Province (Lorestan Meteorological Organization 2023). Besides, the study area has hot days and almost cool nights in the summer season. According to the climatic conditions of the area, part of the deterioration of the mortar may be related to the wet-dry and heat-cool cycles.

Results and Discussion

Based on the studies of microscopic thin sections, constituent components of lime mortar are calcite, chert, and metamorphic rock fragments (45, 15, and 3%, respectively), quartz, calcite, and feldspar minerals (5, 5, and 2% respectively), which all are supported in a fine-grained calcite matrix (25%).

Results showed that the mortar has a density (ρ) of 1.47 g/cm³, porosity (n) of 29.37% and water absorption (W_a) of 23.96%. According to the classification of rocks by Anon (1979), mortar fall into in the class of rocks with very low ρ (1.0-1.5 g/cm³) and high n (15-30 %).

The point load index (PLI) of mortar is equal to 1.57 MPa. Based on the classification suggested by Broch and Franklin (1972), mortar is categorized as a high-strength rock (PLI 1-3 MPa). The P wave velocity (V_p) of mortar is 1940 m/s, which belongs to the rocks class with very low V_p ($V_p < 2500$ m/s) (Anon 1979).

The changes of physical and mechanical characteristics of mortar in various cycles of the wet-dry and heat-cool are presented in Fig. 2. As can be seen from this figure, with the increasing in the cycles of the tests, the dry weight loss (DWL) of the mortar has increased. Mortar shows an increasing trend with increasing cycles of wet-dry and heat-cool tests. Also, present the changes of PLI during cycles of wet-dry and heat-cool tests. The results revealed that with the increase of tests cycles, the PLI has generally decreased. As can be seen from Fig. 2, the V_p of the mortar has a decreasing trend with the increase of wet-dry and heat-cool cycles, both with coefficient of determination (R^2) equal to 0.99.

Conclusions

The results revealed that the weathering agents of wet-dry and heat-cool cycles had almost the same effects on the deterioration of the lime mortar. P-wave velocity is a more suitable and accurate parameter to evaluate mortar deterioration compared to other physical and mechanical characteristics. According to the results, it is suggested that the conservation measures to prevent from the mortar deterioration used as masonry materials in the Gashmar ancient road (Nourabad city, Lorestan Province) should be designed based on both wet-dry and heat-cool agents.