

بررسی ویژگی‌های فیزیکی - مکانیکی سنگ‌های استفاده شده در ساخت بناهای باستانی استان لرستان با تاکید بر دوام‌پذیری (مطالعه موردی: پل کشکان)

یاسین عبدی^{۱*} و موسی سبزی^۲

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

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

نویسنده مسئول: * abdi.ya@lu.ac.ir

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

دریافت: ۱۴۰۲/۷/۸

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آهکی مورد استفاده در ساخت پل تاریخی کشکان (استان لرستان) و ارزیابی رفتار آن‌ها در مقابل هوازدهی نمک می‌باشد. بر همین اساس، دو نوع از سنگ‌آهک‌های استفاده شده در ساخت پل کشکان شامل سنگ‌آهک آسماری (ASR) و تله‌زنگ (TLZ) انتخاب و در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج مطالعات سنگ‌شناسی نشان داد که سنگ‌آهک آسماری، یک نوع مادستون آهکی و نمونه سنگ‌آهک تله‌زنگ گریستون می‌باشد. در مرحله اول خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه تعیین شدند و در ادامه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم در ۳۰ چرخه بر روی نمونه‌های انتخاب شده انجام شد. به منظور بررسی تأثیر هوازدهی نمک بر روی دوام و پایداری سنگ‌های انتخاب شده، در پایان هر ۱۰ چرخه تغییرات ظاهری، سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها ارزیابی و تعیین شد. بر اساس نتایج، مشخص شد که سولفات سدیم تأثیر به مراتب بیش‌تری بر روی فرسودگی و تخریب سنگ‌های آهکی مورد مطالعه دارد. همچنین، نتایج نشان داد که سنگ‌آهک آسماری در پایان ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم دچار فرسودگی و زوال بیش‌تری در مقایسه با سنگ‌آهک تله‌زنگ شده است. علاوه بر این، مطالعات SEM به منظور بررسی تغییرات ساختاری نمونه‌ها ناشی از هوازدهی نمک نیز انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، سنگ‌آهک، هوازدهی نمک، پل کشکان، لرستان

۱- پیشگفتار

تخریب مصالح ساختمانی در سرتاسر جهان باعث آسیب اقتصادی قابل توجه و همچنین از بین رفتن بناهای باستانی می‌شود. بخش قابل توجهی از این آسیب‌ها ناشی از تبلور نمک در منافذ سنگ‌ها و آجرهای مورد استفاده در ساخت بناهای باستانی است (گاید و وایلز، ۱۹۹۷). بر این اساس، ارزیابی دوام سنگ‌ها در مقابل فرآیند تبلور نمک موضوع جالب و حائز اهمیتی است، زیرا معمولاً به عنوان مصالح اصلی ساختمانی به ویژه در بناهای تاریخی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پدیده به عنوان یک فرآیند هوازدهی گسترده شناخته شده است و یکی از عوامل اصلی تخریب سنگ‌های به کار گرفته شده در ساختمان‌ها و بناهای تاریخی است (ایوانز، ۱۹۷۰؛ وینکلر، ۱۹۷۳؛ کوک، ۱۹۹۴؛ پرایس، ۱۹۹۶؛ کاردل و همکاران، ۲۰۰۳؛ گومز هراس و فورت، ۲۰۰۷؛ گونکالوز و بریتو، ۲۰۱۴؛ رافولو و همکاران، سلیک و آیگان، ۲۰۱۸؛ سلیک و اوزکان، ۲۰۲۲).

هوازدهی نمک زمانی اتفاق می‌افتد که نمک‌هایی مانند سولفات سدیم (Na_2SO_4)، کلرید سدیم (NaCl)، سولفات منیزیم (MgSO_4) و سولفات کلسیم (CaSO_4) به ساختار متخلخل سنگ نفوذ کرده و پس از تبخیر یا خشک شدن، متبلور شوند. این فرآیند بر روی سنگ فشار وارد می‌کند و منجر به تنش‌های داخلی و در نهایت باعث تخریب، فرسودگی و زوال سطح سنگ می‌شود (کاردل و همکاران، ۲۰۰۳؛ کاستلازی و همکاران، ۲۰۱۳؛ گریمنیری و همکاران، ۲۰۱۷). تجمع نمک در سنگ‌های ساختمانی و بناهای تاریخی به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. نمک‌هایی که از خود سنگ سرچشمه می‌گیرند نیز احتمالاً به عنوان منبع نمک در فضاهای خالی سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (مک کینلی و همکاران، ۲۰۰۱؛ لویز آرسه و همکاران، ۲۰۰۹). زوال و فرسودگی سنگ در اثر نفوذ نمک محلول ممکن است به طرق مختلفی مانند فشارهای تبلور، فشار هیدراتاسیون، احتباس آب

بعد از ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک مشاهده نمودند که تأثیر محلول نمک آزمایشگاهی بیش‌تر از آب شور جاری و آب چشمه است. همچنین آن‌ها گزارش کرده‌اند که نمونه‌های ماسه‌سنگ بعد از ۳۰ چرخه آزمایش، فرسودگی و تخریب بیش‌تری را در مقایسه با سنگ‌آهک تجربه کرده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، جمشیدی و همکاران (۱۳۹۹) دوام تراورتن‌ها را در برابر هوازدهی نمک مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها ۶ نوع تراورتن را از مناطق آذرشهر و محلات انتخاب کردند و در معرض ۶۰ چرخه آزمایش سولفات سدیم قرار دادند و در پایان هر ۵ چرخه، تغییرات ظاهری، تغییرات خصوصیات مکانیکی و افت وزنی نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت کششی برزلی و سرعت موج در مقایسه با سایر پارامترهای کمی، ارزیابی دقیق‌تری از وضعیت نمونه‌ها بعد از چرخه‌های هوازدهی نمک ارائه می‌کند.

سنگ‌آهک یک سنگ ساختمانی رایجی است که برای ساختمان‌ها و بناهای تاریخی مورد استفاده قرار گرفته است و یکی از سنگ‌های مورد علاقه معماران و سازندگان بناهای باستانی در ادوار مختلف ایران بوده و آثار تاریخی بر جای مانده متعددی با استفاده از این مصالح در ایران و لرستان ساخته شده است. مزیت اصلی استفاده از سنگ‌آهک به عنوان یک سنگ ساختمانی، عملکرد طولانی مدت آن است، زیرا به‌طور کلی به‌عنوان یک سنگ بادوام در نظر گرفته می‌شود. اگرچه، در برابر پدیده هوازدهی نمک آسیب‌پذیر است و در نهایت نیز همین عوامل باعث تخریب و فرسودگی آن می‌شوند (کاردل و همکاران، ۲۰۰۳). خسارات ناشی از تبلور نمک خطر رایجی است که نقش عمده‌ای در زوال و فرسودگی سنگ‌های طبیعی مورد استفاده در ساختمان‌ها و بناهای تاریخی در شرایط آب و هوایی مختلف ایفا می‌کنند. بنابراین، تعیین پارامترهای کنترل‌کننده هوازدهی سنگ‌آهک بسیار مهم است. مطالعات مختلف تأثیر متقابل عوامل فیزیکی، شیمیایی و محیطی را که بر میزان و سرعت هوازدهی نمک تأثیر می‌گذارند، بررسی کرده‌اند (اردونز و همکاران، ۱۹۹۷؛ پیرکل و همکاران، ۲۰۰۳؛ بنوانته و همکاران، ۲۰۰۴؛ یو و گوچی، ۲۰۱۰؛ دی بندتو و همکاران، ۲۰۱۵). درک این عوامل برای توسعه راه‌کارهای حفاظتی موثر و حفاظت از بناهای باستانی در معرض خطر هوازدهی نمک بسیار مهم است. به عنوان مثال، ترکیب کانی‌شناسی و ساختار منافذ

هیگروسکوپی، و انبساط-انقباض نمک‌ها به دلیل نوسانات دما و رطوبت ایجاد شود (وینکلر، ۱۹۶۶؛ فوکس و همکاران، ۱۹۸۸). مطالعات زیادی درباره تأثیر تبلور نمک بر روی سنگ‌های استفاده شده در بناهای تاریخی انجام شده است (یاوز و توپال، ۲۰۰۸؛ زدف و همکاران، ۲۰۰۷؛ آکین و اوزکان، ۲۰۱۱؛ کاردنس و همکاران، ۲۰۱۴؛ قبادی و بابازاده، ۲۰۱۵؛ یاوز و همکاران، ۲۰۱۵). مومنی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر هوازدهی نمک بر روی تخریب سنگ‌های گرانیتوئیدی پرداخته‌اند. آن‌ها با انجام ۹۰ چرخه آزمایش هوازدهی نمک به بررسی تأثیر سولفات سدیم و منیزیم بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ۳ نوع گرانیتوئید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر تخریبی سولفات منیزیم بر روی کاهش وزن نمونه‌ها به مراتب بیش‌تر از سولفات سدیم است. این در حالی است که تأثیر سولفات سدیم بر روی تخریب ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی نمونه، بسیار بیش‌تر از سولفات منیزیم گزارش شده است. همچنین مومنی و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای دیگر به بررسی اثرات هوازدهی نمک در ۶۰ چرخه با استفاده از سولفات سدیم و منیزیم بر روی گرانیت‌های استفاده شده در بناهای باستانی استان همدان پرداخته‌اند. بر اساس نتایج آن‌ها، مشخص شد که تأثیر ناشی از سولفات سدیم بر روی تخریب خصوصیات مهندسی گرانیت‌های مورد مطالعه بیش‌تر از سولفات منیزیم است. ترابی کاوه و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از چرخه‌های انجماد-ذوب، سرد و گرم، و هوازدهی نمک به بررسی نقش خصوصیات پتروگرافی بر روی دوام‌پذیری سنگ‌های آهکی استفاده شده در ساخت بنای یادبود پرسپولیس در شیراز پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از تأثیر بیش‌تر چرخه‌های انجماد-ذوب بر روی تخریب خصوصیات فیزیکی-مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه در مقایسه با گرم و سرد شدن و هوازدهی نمک است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که تخلخل عامل اصلی کنترل‌کننده دوام‌پذیری سنگ‌های مورد مطالعه است. رضائیان و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر آب‌های شور بر روی هوازدهی برخی از سنگ‌های منطقه رباط نمکی خرم‌آباد پرداخته‌اند. آن‌ها در این مطالعه با انتخاب دو نوع سنگ شامل ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک، مقایسه‌ای بین تأثیر محلول‌های جاری شور، آب چشمه و محلول نمک تهیه شده در آزمایشگاه بر روی شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل نمونه‌ها انجام داده‌اند. آن‌ها

تقسیمات سیاسی، این پل امروزه در محدوده دهستان تشکن از توابع شهرستان دوره چگنی و در فاصله ۳۵ کیلومتری کوه‌دشت و ۵۲ کیلومتری شرق خرم‌آباد قرار دارد (شکل ۱). طول پل ۲۸۵ متر و عرض راه عبور آن به ۸ متر می‌رسد، با احتساب پایه‌های فرعی و دنباله‌های شرقی و غربی پل، در مجموع طول پل به ۳۴۰ متر می‌رسد که تمامی عرض دره‌ای که بستر طبیعی رودخانه بوده را در بر می‌گیرد (پرویز، ۲۰۰۱). در متون تاریخی از این پل به عنوان کژکی نام برده شده است. پل در سمت شرق به بدنه سنگی صخره تکیه دارد و در ساحل غربی هم به تپه‌ای خاکی منتهی می‌شود. موقعیت انتخاب شده برای احداث پل بهترین نقطه ممکن است چرا که دنباله‌های پل در دو طرف به صخره و کوه‌های مستحکم تکیه دارد، در سمت شرقی و در محل جریان امروزی رودخانه یکی از پایه‌ها بر روی سفره سنگی بستر رودخانه سوار شده است. در مجموع پل دارای ۱۱ پایه اصلی و دو پایه فرعی در سمت غربی است. هدف از این دو پایه فرعی این بوده که با استفاده از آن‌ها یک رمپ نزولی به سمت جنوب ایجاد و از طریق آن پایه مجاور به تپه سمت غرب متصل شود. بیش‌ترین طول پایه در پایه شماره ۵ با اندازه‌ای در حدود ۲۰ متر اندازه‌گیری شد. پایه شماره ۷ با بیش‌ترین عرض ۱۱ متر و کم‌ترین عرض هم در پایه شماره ۱ به اندازه ۸ متر بوده است. فاصله پایه‌ها نسبت به هم متفاوت است و از ۲۷/۵ متر در انتهای شرقی تا ۴/۸۰ در پایه‌های فرعی ضلع غربی متغیر است. روش ساخت پایه‌ها به این صورت است که جداره بیرونی با سنگ تراش خورده در ابعاد متفاوت ناماسازی شده و فضای داخل آن‌ها با حجم زیادی از ملات و سنگ‌لاشه و قلوه‌سنگ به‌صورت رگ‌چین ساخته شده است. جداره بیرونی پایه‌ها تا محل پاکار قوس با استفاده از سنگ‌های تراش‌خورده ساخته شده است (پرویز، ۲۰۰۱). در حال حاضر با احتساب دو تاق فرعی در ضلع غربی، هشت چشمه تاق از ۱۳ چشمه تاق پل سالم باقی مانده است و ۵ تاق دیگر فرو ریخته‌اند. مصالح به‌کار رفته در ساخت تاق‌ها سنگ، آجر و ملات گچ است، در بخش‌های پایین پایه‌ها و در بندکشی پایه‌ها ملات ساروج استفاده شده است. قسمت پاکار قوس تا شکنج‌گاه از سنگ‌های قواره‌بری به روش رومی یا هره ساخته شده و بخش شکنج‌گاه با آجر و به شیوه ضربی کار شده است.

سنگ، و همچنین حضور میکروارگانیسم‌ها، نقش مهمی در میزان دوام و پایداری سنگ‌ها در مقابل هوازدگی ناشی از تبلور نمک دارند. علاوه بر این، شرایط آب و هوایی، از جمله نوسانات دما، میزان رطوبت، و الگوهای بارش، به‌طور قابل توجهی بر وقوع و شدت هوازدگی نمک تأثیر می‌گذارد.

با توجه به ویژگی‌های طبیعی استان لرستان و کوهستانی بودن آن و همچنین وجود رودخانه‌های خروشان از قبیل کشکان و سیمره از یک طرف و عبور راه‌های متعدد از این منطقه از طرف دیگر، همواره در طول دوره‌های مختلف تاریخی پل و پل‌سازی و دیگر ابنیه وابسته امری ضروری به شمار می‌رفته است. شایان ذکر است که شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه لرستان سبب استفاده از مصالح بوم آورد از قبیل سنگ (به شکل‌های مختلف مانند سنگ‌لاشه، سنگ تراش خورده، قلوه‌سنگ و ...)، ساروج، ملات گچ و غیره در ساخت این پل‌ها شده است. بیش‌تر پل‌های باستانی استان لرستان در طول زمان به‌دلیل عوامل طبیعی و انسانی تخریب گشته‌اند و به دفعات نیز تعمیر و مرمت شده‌اند، چرا که ساخت و حفاظت از پل‌ها در منطقه کوهستانی و صعب‌العبور لرستان با توجه به کارکرد و اهمیت‌شان همواره مورد اهتمام و توجه حکومت‌ها بوده‌اند. استان لرستان با بیش از ۸۰ پل ثبت شده از دوره‌های مختلف تاریخی ایران، از دوره هخامنشی تا قاجار، به‌عنوان پایتخت پل‌های تاریخی ایران شناخته می‌شود. این پل‌ها از مهم‌ترین آثار باستانی لرستان و از شاخص‌ترین آثار معماری باستانی ایران به‌شمار می‌روند.

در این پژوهش، نقش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در دوام‌پذیری سنگ‌آهک‌های استفاده شده در ساخت پل تاریخی کشکان در مقابل پدیده هوازدگی نمک مورد بررسی قرار گرفته است. به‌همین منظور، در مرحله اول خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آهکی استفاده شده در ساخت پل کشکان مورد بررسی قرار گرفته است و در مرحله دوم، نقش و تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در رفتار این دسته از سنگ‌ها در مقابل هوازدگی نمک مطالعه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت و مشخصات پل کشکان

این پل بر روی رودخانه کشکان و در مسیر باستانی شهر شاپورخواست به ولایت طرهان ساخته شده است. بر اساس

سنگ در کوه میل اشاره کرده و فاصله آن‌ها تا پل کشکان را ۱۵ کیلومتر دانسته است. پرویز (۲۰۰۱) نیز به وجود معدن سنگ مرغوبی در روستای کی‌پرافتاو که به گفته ایشان به روستای کردیا (کردها) معروف است، به‌عنوان منبع احتمالی سنگ‌های استفاده شده در پل کشکان اشاره کرده است.

در گزارشات موجود به معادن سنگ کوه‌های اطراف پل کشکان به‌عنوان منبع اصلی استخراج سنگ مورد نیاز در ساخت پل کشکان اشاره شده است؛ کریمی (۱۹۵۰) با اشاره به وجود قطعات سنگ‌های نیمه حجاری شده در محل‌هایی بنام باغ افراسیاب، تخت منیژه و چاه بیژن در کوه میل معتقد است که سنگ‌های پل کشکان را از کوه میل استخراج کرده‌اند. ایزدپناه (۱۹۸۴) نیز به این معادن



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی پل کشکان و نمایی از وضعیت کنونی پل
Fig. 1. Location Keshkan bridge and a picture of its current condition

عظمت معماری پل کشکان و ویژگی‌هایی چون دهانه‌های بزرگ تا عرض ۲۸ متر و ارتفاع زیاد آن سبب شده که بیش‌تر پژوهشگران بدون توجه به کتیبه کوفی در کنار پل، تاریخ ساخت آن را به دوره ساسانی منتسب کنند (راولینسون، ۱۹۸۳). برخی نیز این بنا را از آثار معماری قرن چهارم هجری به شمار می‌آورند (مخلص، ۲۰۰۰؛ پرویز، ۲۰۰۱؛ سجادی، ۲۰۰۳). پژوهشگرانی همچون دمورگان (۱۹۶۰)، راولینسون (۱۹۸۳) و اشتاین (۱۹۴۰) به وجود این کتیبه در کنار پایه‌های غربی پل کشکان اشاره کرده‌اند. این کتیبه امروزه در موزه قلعه فلک‌الافلاک نگهداری می‌شود. کتیبه بر روی قطعه سنگی به ابعاد ۱۰۹ در ۹۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲۸ سانتی‌متر به خط کوفی نوشته شده است. این کتیبه دارای ۷ سطر است (شکل ۲).

شایان ذکر است که به‌دلیل عظمت پل کشکان و قرار داشتن آن در کنار راه ارتباطی خرم‌آباد به کوه‌دشت از دوره قاجار تاکنون پژوهشگران متعددی از آن دیدن کرده و مطالب مختلفی درباره ویژگی‌های معماری آن بیان کرده‌اند. برخی از محققین از جمله سرهنری راولینسون این پل را بهترین و بزرگ‌ترین اثر تاریخی لرستان کوچک برشمرده و تاریخ اولیه ساخت آن را دوره ساسانی گزارش کرده‌اند (راولینسون، ۱۹۸۳). ژاک دمورگان توصیف دقیق‌تر و مفصل‌تری از پل ارائه می‌کند و آن را پلی عربی می‌داند (دمورگان، ۱۹۶۰) اما کامل‌ترین گزارش از پل کشکان را اشتاین در سال ۱۹۴۰ ارائه کرده است. وی ضمن بازدید از پل، نقشه و پلان آن را برداشت و کتیبه پل را کپی‌برداری کرده است (اشتاین، ۱۹۴۰).

می‌توان گفت که بنایی که بدر دستور ساخت آن را داده همین پل کشکان بوده است. جدای از کتیبه کوفی که به صراحت ساخت پل در سده ۴ هجری را نشان می‌دهد، نکته‌ای که در تاریخ‌گذاری پل قابل توجه است، ویژگی‌های معماری پل همچون تاق‌های جناقی، استفاده از کنوبندی برای سبک‌سازی و پایه‌های بیضوی است. در پایان بایستی گفت که شواهد متعدد بکار رفته در این بنا بیانگر این مهم است که ساخت بنا در سده ۴ هجری بوده است.

این کتیبه در فاصله ۳۰ متری جنوب آخرین پایه ضلع غربی پل به‌دست آمده است و از محل اولیه آن در ساختمان پل اطلاعی در دست نیست. از ترجمه کتیبه مشخص است که ابونجم بدر ابن حسنویه دستور ساخت بنایی در سال ۳۸۹ هجری را داده که در سال ۳۹۹ هجری و پس از ۱۰ سال به اتمام رسیده است. در کتیبه به‌طور مشخص اشاره نشده که این بنا چه بوده است و با این وجود با توجه به کشف آن در کنار پل کشکان و شباهت آن با کتیبه پل کلهر به تاریخ ۳۷۴ هجری به‌طور قابل اطمینانی



شکل ۲. کتیبه کوفی پل کشکان

Fig. 2. Kufic inscription of Kashkan bridge

مکانیکی سنگ‌های آهکی استفاده شده در ساخت پل کشکان مورد بررسی قرار گرفته است و در مرحله دوم، نقش و تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در رفتار این دسته از سنگ‌ها در مقابل هوازگی نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم مطالعه شده است.

۲-۲- سنگ‌های مورد مطالعه

مشاهده سنگ‌های مورد استفاده در ساخت پل تاریخی کشکان نشان می‌دهد که عمدتاً دو نوع سنگ‌آهک مورد استفاده قرار گرفته است. نوع اول سنگ آهک سفید رنگی است که در ابعاد بزرگ (تقریباً ۳۰ در ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متر) عمدتاً در پایه‌های پل استفاده شده است (شکل ۳). این سنگ‌آهک به سازند آسماری با سن الیگومیوسن تعلق دارد. نوع دوم سنگ‌آهک عمدتاً خاکستری رنگ با ضخامت حداکثر ۲۰ سانتی‌متر و در تاق پل استفاده شده

علاوه بر این، مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که در حوزه بالادست پل کشکان سازند تبخیری گچساران از گسترش قابل توجهی برخوردار است. گسترش این سازند تبخیری در منطقه طوری است که در برخی نقاط بالادست پل کشکان مردم بومی با تشکیل حوضچه‌های طبیعی اقدام به جمع‌آوری نمک می‌کنند. به همین دلیل می‌توان منشأ اصلی تأمین کننده نمک و در نهایت هوازگی سنگ‌های آهکی پل تاریخی کشکان را سازند گچساران در نظر گرفت. بنابراین، با توجه به اهمیت و عظمت این پل تاریخی و همچنین گسترش سازند تبخیری گچساران در بالادست پل، لزوم مطالعه دوام‌پذیری مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت آن در مقابل پدیده مخرب هوازگی نمک به منظور شناخت بهتر رفتار سنگ‌ها و جلوگیری از تخریب و آسیب بیش‌تر پل، ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، در این مطالعه در مرحله اول خصوصیات فیزیکی و

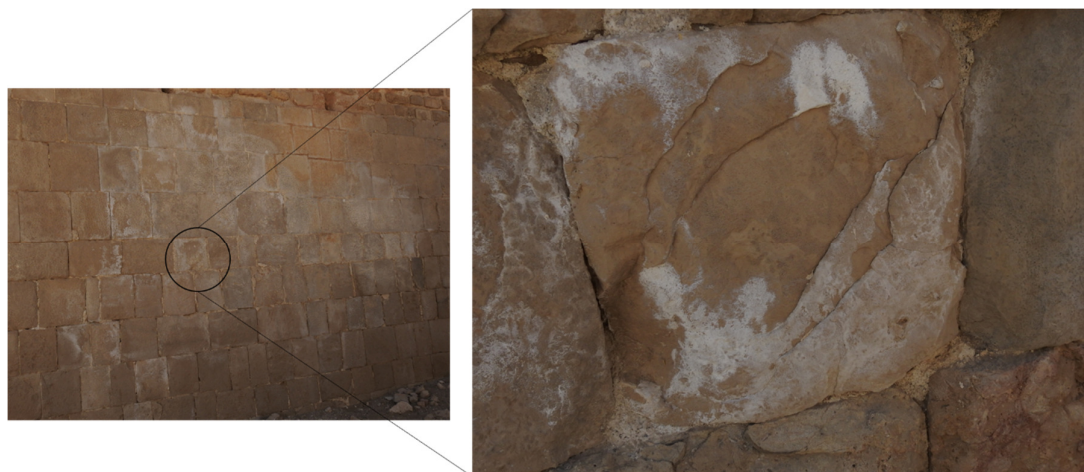
آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک دانشگاه لرستان انتقال داده شد. در آزمایشگاه از بلوک‌های جمع‌آوری شده، تعداد ۷۶ نمونه مکعبی در ابعاد ۳ در ۳ در ۳ سانتی‌متر تهیه شد. در تهیه نمونه‌ها سعی شده است که عاری از هر گونه ترک و شکستگی باشند (شکل ۵).

است. بر اساس مشاهدات انجام شده این نوع سنگ‌آهک متعلق به سازند تله‌زنگ با سن پالئوسن-ائوسن می‌باشد. شکل ۴ آثار تبلور و تجمع نمک در سطح نمونه سنگ‌های استفاده شده در پل کشکان و آثار تخریب ناشی از هوازدگی نمک را نشان می‌دهد. به منظور انجام مطالعه حاضر، از هر نوع سنگ‌آهک چندین بلوک در ابعاد مختلف انتخاب و به



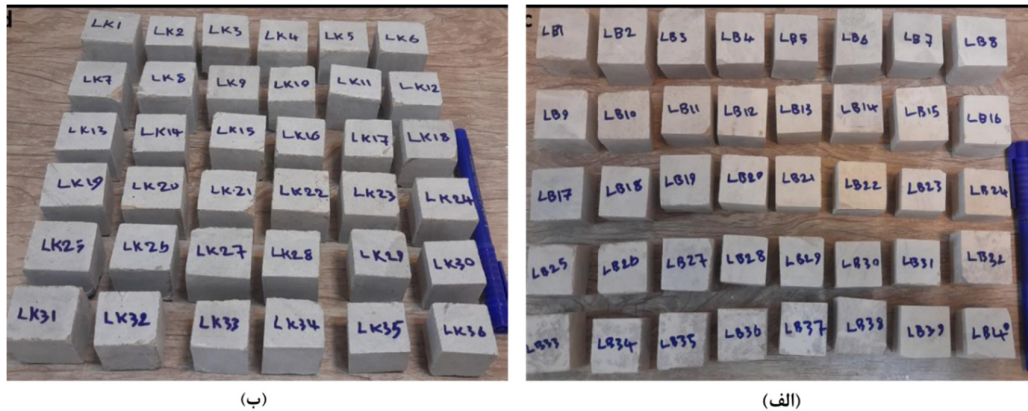
شکل ۳. نمایی از پل کشکان و سنگ‌آهک‌های مورد مطالعه

Fig. 3. A view of the Kashkan bridge and the studied limestone

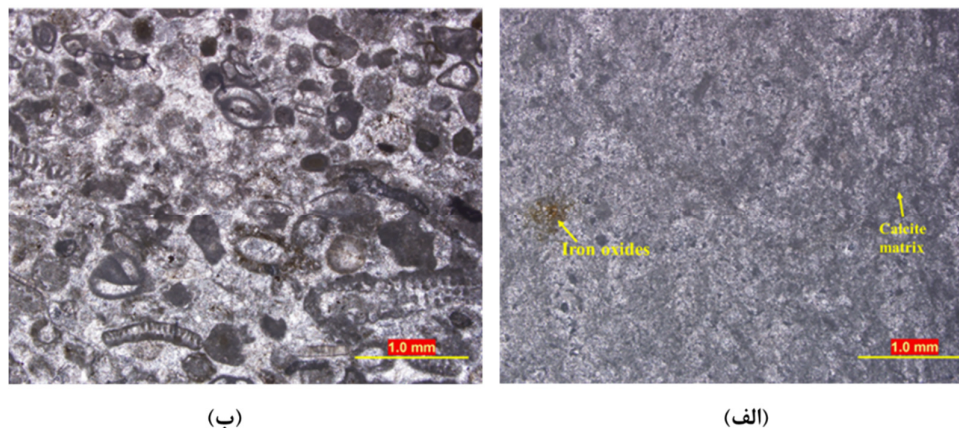


شکل ۴. آثار هوازدگی نمک در سنگ‌های آهکی استفاده شده در ساخت پل کشکان

Fig. 4. Effects of salt weathering on limestones used in the construction of Kashkan bridge



شکل ۵. نمونه‌های مکعبی (الف) سنگ‌آهک آسماری و (ب) سنگ‌آهک تله‌زنگ
Fig. 5. The cubic samples (a) Asmari limestone, (b) Talezang limestone



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از (الف) سنگ‌آهک آسماری، (ب) سنگ‌آهک تله‌زنگ
Fig. 6. Thin section images of (a) Asmari limestone, (b) Talezang limestone

۳- بحث و نتایج

۳-۱- مطالعات پتروگرافی

قبل از اینکه نمونه‌های تهیه شده برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد آزمایش قرار گیرند، از هر نمونه یک مقطع نازک به‌منظور تعیین خصوصیات پتروگرافی تهیه شده است. شکل ۶ تصاویری از مقاطع نازک تهیه شده برای هر دو نوع سنگ‌آهک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه لرستان و با کمک کارشناس مربوطه، ویژگی‌های سنگ‌شناسی شامل ترکیب کانی‌شناسی و بافت هر کدام از سنگ‌ها تعیین شده است. بر اساس مشاهدات مقاطع نازک تهیه شده مشخص شد که نمونه سنگ‌آهک آسماری دارای بافت ماتریکس پشتیبان است و اجزاء تشکیل دهنده آن حدود ۴۷ درصد گل میکربیتی، ۵۰ درصد میکرواسپارایت، و حدود ۳ درصد اکسید آهن می‌باشد. بر اساس طبقه‌بندی

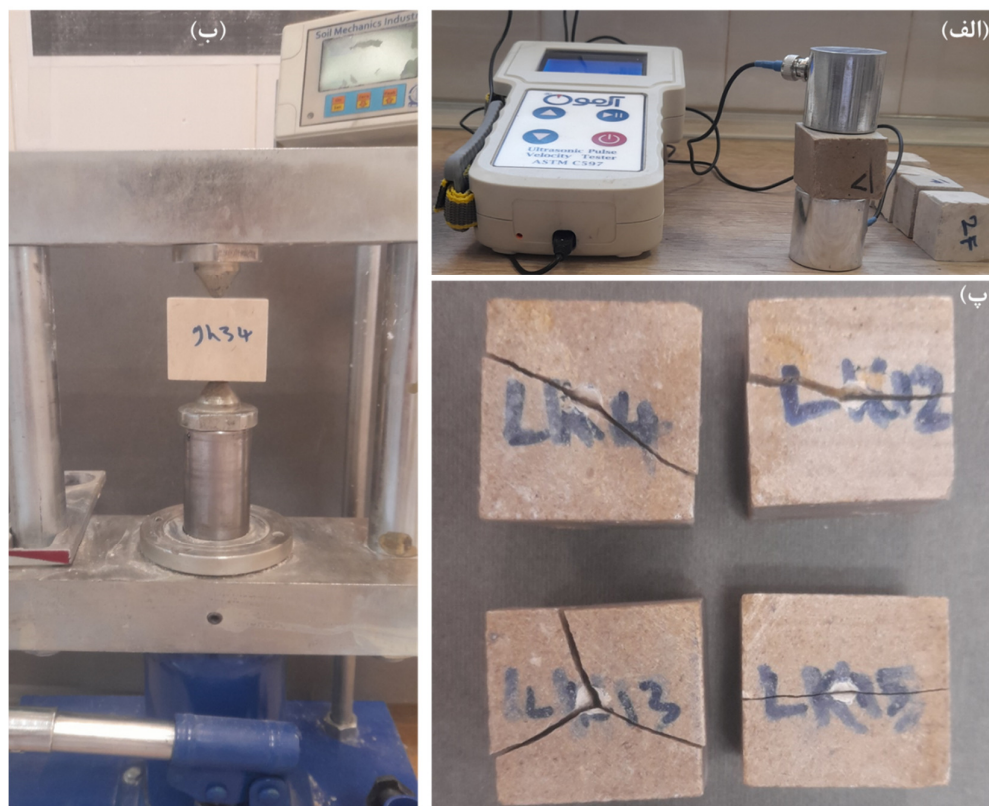
دانهام (۱۹۶۲)، سنگ‌آهک آسماری مادستون آهکی نام‌گذاری می‌شود. نتایج این بررسی نشان داد که آهک تله‌زنگ دارای بافت دانه‌پشتیبان است که متشکل از ۷۵ تا ۸۰ درصد اینتراکلاست، شامل خرده‌های آهکی و قطعات فسیلی می‌باشد. خرده‌های فسیلی متشکل از نومولیت‌ها، میلیولیدها و فرامینفرها بین ۱۵ تا ۲۰ درصد دانه‌های تشکیل دهنده سنگ را شامل می‌شوند. فضاهای بین دانه‌ای با میکرایت‌هایی که به‌صورت محلی تبدیل به نئواسپارایت شده‌اند، پر شده است. بر اساس طبقه‌بندی دانهام (۱۹۶۲)، سنگ‌آهک تله‌زنگ را می‌توان گرینستون نام‌گذاری کرد.

۳-۲- خصوصیات فیزیکی - مکانیکی

به منظور ارزیابی رفتار سنگ‌آهک‌های انتخاب شده در مقابل هوازگی ناشی از چرخه‌های تبلور نمک، لازم است که ابتدا درک جامعی از خصوصیات فیزیکی - مکانیکی این

است. نتایج آزمایش سرعت موج حاکی از این است که میانگین سرعت موج نمونه‌های سنگ‌آهک آسماری ۵ کیلومتر بر ثانیه، و میانگین سرعت موج برای نمونه‌های تله‌زنگ معادل $6/40$ کیلومتر بر ثانیه است. شکل ۷-الف آزمایش سرعت موج را بر روی نمونه‌های مکعبی در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه لرستان نشان می‌دهد. در نهایت و بعد از تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه، آزمایش بار نقطه‌ای مطابق با شکل ۷-ب برای تعیین شاخص بار نقطه‌ای، بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شده است. ملاحظه می‌گردد که شاخص بار نقطه‌ای نمونه سنگ‌آهک آسماری بین $9/21$ تا $12/65$ مگاپاسکال متغیر است، در حالی که نمونه تله‌زنگ دارای شاخص بار نقطه‌ای بین $12/56$ تا $15/41$ مگاپاسکال است. همچنین میانگین این شاخص برای نمونه آسماری $11/25$ مگاپاسکال و برای نمونه تله‌زنگ $13/45$ مگاپاسکال است. شکل ۷-پ برخی از نمونه‌های شکسته شده بعد از آزمایش بار نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

سنگ‌ها داشته باشیم. بر همین اساس، بعد از آماده‌سازی نمونه‌های مکعبی، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی جامعی شامل تعیین تخلخل، دانسیته، سرعت موج، و شاخص بار نقطه‌ای بر روی آن‌ها انجام شده است. به‌منظور اندازه‌گیری هر یک از خصوصیات اشاره شده، از هر نوع سنگ‌آهک، حداقل ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج میانگین برای هر نمونه گزارش شده است. جدول ۱ مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های آزمایش شده را ارائه می‌کند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، مقدار تخلخل نمونه سنگ‌آهک آسماری بین $2/25$ تا $8/79$ درصد است، در حالی که این مقدار برای سنگ‌آهک تله‌زنگ بین $1/00$ تا $1/82$ درصد متغیر است. بر اساس نتایج، میانگین تخلخل نمونه آسماری $4/92$ درصد و سنگ‌آهک تله‌زنگ $1/34$ درصد می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که تخلخل سنگ‌آهک آسماری به‌مراتب بیشتر از تله‌زنگ است. همچنین، میانگین دانسیته خشک برای نمونه سنگ‌آهک آسماری و تله‌زنگ به ترتیب $2/56$ و $2/90$ گرم بر سانتی‌متر مکعب



شکل ۷. الف) آزمایش سرعت موج، ب) آزمایش بار نقطه‌ای، پ) نمونه‌های شکسته شده بعد از آزمایش بار نقطه‌ای

Fig. 7. (a) P-wave velocity test, (b) Point load test, (c) the failed samples after point load test

جدول ۱. نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آهکی مورد مطالعه

Table 1. Results of physico-mechanical properties of studied limestones

نام سنگ	تخلخل (درصد)	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	سرعت موج طولی (کیلومتر بر ثانیه)	شاخص بار نقطه‌ای (مگاپاسکال)
ASR	۲/۲۵ - ۸/۷۹ (۴/۹۲)	۲/۱۱ - ۳/۰۹ (۲/۵۶)	۴/۸۰ - ۵/۶۰ (۵/۰۰)	۹/۲۱ - ۱۲/۶۵ (۱۱/۲۵)
TLZ	۱/۰۰ - ۱/۸۲ (۱/۳۴)	۲/۶۷ - ۳/۱۵ (۲/۹۰)	۵/۵۰ - ۶/۶۵ (۶/۴۰)	۱۲/۵۶ - ۱۵/۴۱ (۱۳/۴۵)

۳-۳- ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه

به‌منظور بررسی ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌های سنگ‌آهک انتخاب شده، آنالیز رگرسیون خطی بین ویژگی‌های فیزیکی شامل تخلخل، دانسیته و سرعت موج با مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌ها انجام شده است. نتایج آنالیز رگرسیون ساده بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک‌های مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ - الف نشان داده شده است، ارتباط بسیار خوبی بین شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل نمونه‌های سنگ‌آهک مورد مطالعه با ضریب رگرسیون 0.803 ($R^2 = 0.803$)، همچنین معادله شماره ۱ ارتباط بین تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌های مورد مطالعه را بیان می‌کند:

$$PLI = -0.5901n + 14.173 \quad (R^2 = 0.803) \quad (۱)$$

در این رابطه، PLI شاخص بار نقطه‌ای، و n تخلخل نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد. علاوه بر این، معادلات ۲، ۳، و ۴ نیز ارتباط بسیار خوب بین دانسیته - شاخص بار نقطه‌ای، سرعت موج - شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل - سرعت موج را با ضرایب رگرسیون بالا نشان می‌دهد.

$$PLI = 4.5202\gamma_d + 0.0175 \quad (R^2 = 0.817) \quad (۲)$$

$$PLI = 1.5606V_p + 3.4969 \quad (R^2 = 0.751) \quad (۳)$$

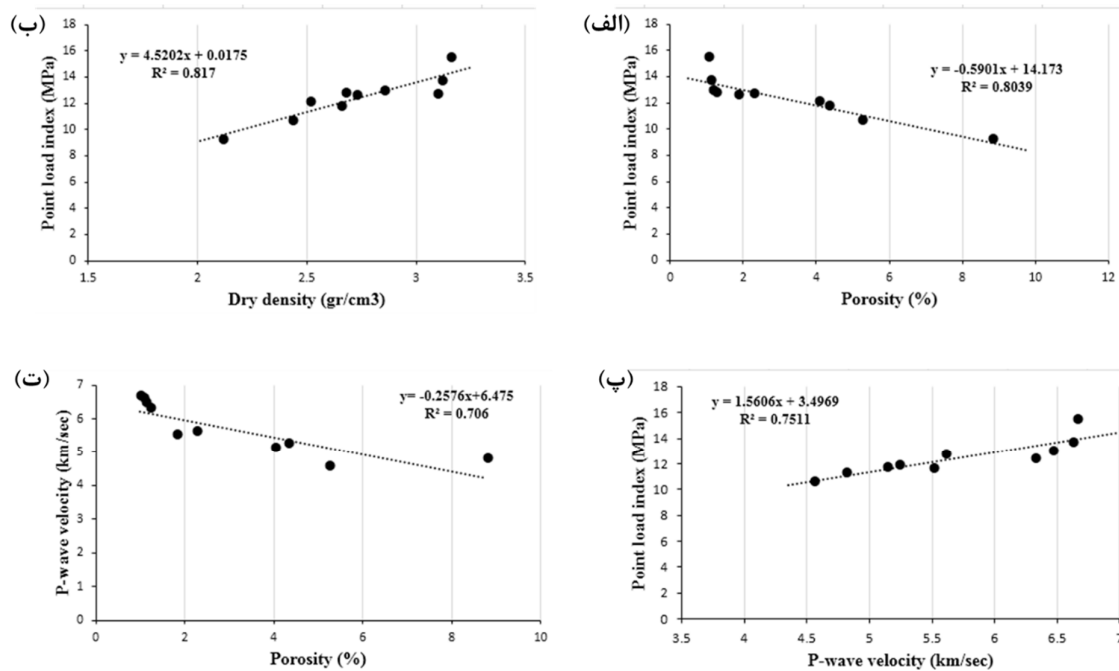
$$V_p = -0.2576n + 6.475 \quad (R^2 = 0.706) \quad (۴)$$

در این روابط، PLI شاخص بار نقطه‌ای، γ_d دانسیته خشک، V_p سرعت موج و n تخلخل نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد.

۳-۴- آزمایش تبلور نمک

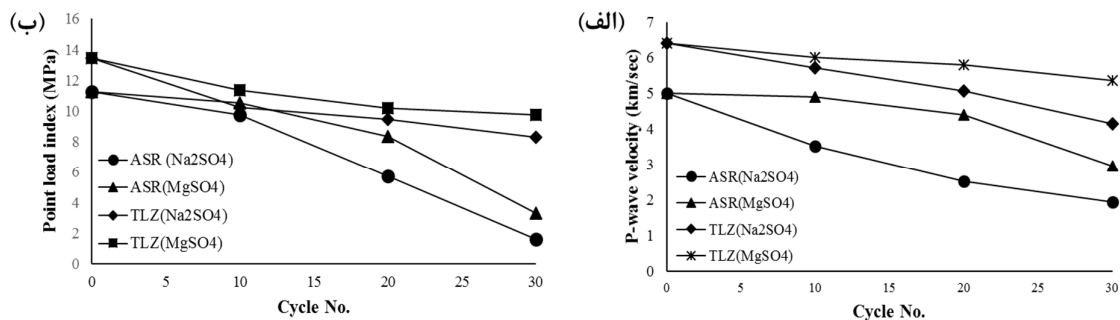
به‌منظور بررسی رفتار سنگ‌آهک‌های مورد نظر در مقابل هوازگی نمک، آزمایش تبلور نمک در محلول ۱۴ درصد وزنی سولفات سدیم و سولفات منیزیم بر روی نمونه‌های مورد نظر مطابق با آئین‌نامه (EN 12370 (1399) تا ۳۰

چرخه انجام شده است. یک چرخه کامل آزمایش هوازگی نمک شامل سه مرحله می‌باشد. مرحله اول یا مرحله غوطه‌ورسازی، در این مرحله نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در استخر محلول ۱۴ درصد سولفات سدیم و منیزیم قرار گرفته‌اند. مرحله دوم یا مرحله خشک شدن، نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در گرم‌خانه و در دمای 10.5 درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند تا کاملاً خشک شوند. مرحله سوم یا مرحله سرد شدن، در این مرحله به مدت ۶ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار داده شده‌اند تا به طور کامل سرد شوند. در پایان هر ۱۰ چرخه آزمایش هوازگی نمک، تغییرات تخلخل، سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که در پایان هر ۱۰ چرخه، حداقل ۳ نمونه مورد آزمایش بار نقطه‌ای قرار گرفته است. شکل ۸ تغییرات سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها را در چرخه‌های مختلف هوازگی نمک نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ - الف نشان داده شده است، با افزایش چرخه‌های آزمایش تبلور نمک، سرعت موج نمونه‌های مورد آزمایش روندی کاهشی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که این روند کاهشی هم برای نمونه‌های آهک آسماری (ASR) و هم برای نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ (TLZ) در محلول سولفات سدیم از شدت بیش‌تری در مقایسه با سولفات منیزیم برخوردار است. علاوه بر این، شکل ۹ - ب تغییرات شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها را در اثر افزایش چرخه‌های هوازگی نمک نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای هر دو نمونه سنگ‌آهک مورد مطالعه چه در محلول سولفات سدیم و چه سولفات منیزیم، با افزایش تعداد چرخه‌های آزمایش هوازگی نمک، شاخص بار نقطه‌ای کاهش پیدا می‌کند. مشابه با آزمایش سرعت موج، در اینجا نیز تاثیر سولفات سدیم بر کاهش شاخص بار نقطه‌ای در هر دو نوع آهک به مراتب بیش‌تر از سولفات منیزیم است. در این بین، شدیدترین روند کاهش مقاومت برای نمونه سنگ‌آهک ASR در محلول سولفات سدیم اتفاق افتاده است.



شکل ۸. ارتباط بین (الف) تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای، (ب) دانسیته و شاخص بار نقطه‌ای، (پ) سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای، و (ت) تخلخل و سرعت موج

Fig. 8. The correlation between (a) porosity-point load index, (b) Density-point load index, (c) P-wave velocity-point load index, and (d) Porosity-P-wave velocity



شکل ۹. تغییرات (الف) سرعت موج و (ب) شاخص بار نقطه‌ای در اثر چرخه‌های مختلف هوازدگی نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم

Fig. 9. Variations of (a) P-wave velocity, and (b) point load index in different cycles of salt weathering in sodium and magnesium sulfate solution

جدول ۲: تغییرات سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای سنگ آهک‌های مورد مطالعه بعد از ۳۰ چرخه آزمایش هوازدگی نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم

Table 2. Variations of P-wave velocity and point load index of studied limestones at the end of 30 cycles of salt weathering test

TLZ		ASR		شماره چرخه	نام ویژگی فیزیکی/امکانیکی
MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄		
۶/۴۰	۶/۴۰	۵/۰۰	۵/۰۰	نمونه غیرهوازده	سرعت موج (کیلومتر بر ثانیه)
۵/۳۶	۴/۱۵	۲/۹۵	۱/۹۴	بعد از چرخه ۳۰	
۱۶/۲۵	۳۵/۱۵	۴۱/۰۰	۶۱/۲۰	میزان کاهش سرعت موج (%)	
۱۳/۴۵	۱۳/۴۵	۱۱/۲۵	۱۱/۲۵	نمونه غیرهوازده	شاخص بار نقطه ای (مگاپاسکال)
۹/۷۸	۸/۲۸	۳/۳۲	۱/۶۱	بعد از چرخه ۳۰	
۲۷/۳۸	۳۸/۴۳	۷۰/۴۶	۸۵/۶۱	میزان کاهش شاخص بار نقطه‌ای (%)	

جدول ۲ نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه برای شرایط قبل از شروع آزمایش هواز دگی نمک، و بعد از ۳۰ چرخه هواز دگی نمک را نشان می‌دهد. علاوه بر این، میزان کاهش (DR) سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای ناشی از ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$DR = \left(\frac{X_0 - X_{cn}}{X_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

در این رابطه، DR میزان کاهش و تخریب ناشی از ۳۰ چرخه تبلور نمک، X_0 ویژگی فیزیکی یا مکانیکی اندازه‌گیری شده نمونه غیرهوازده یا قبل از شروع آزمایش تبلور نمک، و X_{cn} ویژگی اندازه‌گیری شده بعد از چرخه nم آزمایش تبلور نمک است. در این مطالعه منظور از X_{cn} ، سرعت موج و شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌ها بعد از ۳۰ چرخه آزمایش هواز دگی نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، میزان کاهش سرعت موج نمونه‌های آهک ASR در محلول سولفات سدیم و منیزیم، به ترتیب معادل ۶۱/۲۰ و ۴۱ درصد است. در حالی که میزان شاخص DR سرعت موج برای سنگ‌آهک تله‌زنگ (TLZ) به ترتیب ۳۵/۱۵ و ۱۶/۲۵ درصد می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که کاهش شاخص بار نقطه‌ای برای هر دو نوع سنگ‌آهک، در مقایسه با سرعت موج به مراتب بیشتر است. با توجه به نتایج حاصل شده، میزان کاهش شاخص بار نقطه‌ای بعد از ۳۰ چرخه آزمایش هواز دگی نمک هم در محلول سولفات سدیم و هم سولفات منیزیم، برای نمونه سنگ‌آهک آسماری به مراتب شدیدتر و بالاتر از سنگ‌آهک تله‌زنگ است. بر این اساس، شاخص بار نقطه‌ای نمونه سنگ‌آهک آسماری (ASR) در پایان ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم ۸۵/۶۱ درصد کاهش نشان داده است. در حالی که این مقدار کاهش برای سنگ‌آهک آسماری در محلول سولفات منیزیم معادل ۷۰/۴۶ درصد است که باز هم میزان تخریب و فرسودگی بالایی را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش شاخص بار نقطه‌ای برای نمونه سنگ‌آهک تله‌زنگ در محلول سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب ۳۸/۴۳ و ۲۷/۲۸ درصد است که در مقایسه با سنگ‌آهک آسماری، میزان تخریب و آسیب بسیار کمتری را تحمل کرده‌اند. به منظور مقایسه تأثیر محلول سولفات سدیم و منیزیم، و به صورت کلی تأثیر هواز دگی نمک بر روی سنگ‌آهک‌های مورد مطالعه، تصاویری از نمونه‌های مورد مطالعه، در شرایط قبل

از شروع آزمایش هواز دگی نمک و همچنین در پایان ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، در مقایسه آسیب‌پذیری نمونه‌های سنگ‌آهک در مقابل هواز دگی نمک چه در محلول سولفات سدیم و چه سولفات منیزیم، سنگ‌آهک آسماری به مراتب بیشتر دچار آسیب و فرسودگی شده است. به‌طوری‌که آثار هواز دگی نمک در سنگ‌آهک‌های آسماری به صورت ترک‌های کششی و تورم نمونه سنگ، تخریب گوشه‌های تیز نمونه‌ها و گردشدگی آن‌ها و همچنین کنده شدن بخش‌هایی از نمونه در اثر فشار تورمی و گسترش ترک قابل مشاهده است. این در حالی است که نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ عمدتاً فاقد آثار انحلال و شسته‌شدگی و تخریب گوشه‌ها می‌باشند و فقط در برخی نمونه‌ها ترک‌هایی ایجاد و باعث تخریب نمونه‌ها و حذف آن‌ها از ادامه آزمایش شده است. مشاهده نمونه‌ها بعد از ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک هم در محلول سولفات سدیم و هم سولفات منیزیم مشخص کرد که در هر دو نوع سنگ‌آهک مورد مطالعه، آثار فرسودگی سطحی به صورت پوسته پوسته شدن نمایان می‌شود.

تخلخل سنگ‌ها نقش حیاتی در مقاومت و پایداری آن‌ها در برابر فرآیند هواز دگی نمک دارد. سنگ‌هایی که تخلخل بیشتری دارند، فضای بیشتری برای شکل‌گیری و گسترش بلورهای نمک فراهم می‌کنند که می‌تواند منجر به افزایش فشار و خسارت بالقوه به ساختار سنگ شود. بنابراین، تخلخل سنگ‌ها یک عامل حیاتی در تعیین مقاومت آن‌ها در برابر هواز دگی نمک است و تخلخل بیش‌تر به‌طور کلی آسیب‌پذیری سنگ را در برابر تخریب و فرسودگی ناشی از هواز دگی نمک افزایش می‌دهد. بر این اساس، با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که دلیل اصلی میزان فرسودگی و خسارت بیش‌تر نمونه سنگ‌آهک آسماری در مقایسه با سنگ‌آهک تله‌زنگ، میزان تخلخل بالاتر آن می‌باشد. همان‌طور که در بخش خصوصیات فیزیکی بیان شد (جدول ۱) میانگین تخلخل سنگ‌آهک آسماری ۴/۹۲ درصد است در حالی که این میزان برای سنگ‌آهک تله‌زنگ ۱/۳۲ درصد است. حتی در برخی از نمونه‌های سنگ‌آهک آسماری، تخلخل بالای ۸ درصد نیز مشاهده شد که به طور قابل توجهی بیش‌تر از سنگ‌آهک تله‌زنگ است. تخلخل بالاتر نمونه سنگ‌آهک

نیز به ساختار درونی سنگ و فرسودگی بیش‌تر این دسته از سنگ‌ها خواهند شد.

آسماری امکان نفوذ محلول نمک بیش‌تر در منافذ سنگ را فراهم نموده و در نتیجه بلورهای نمک بیش‌تری نیز در منافذ تشکیل شده که در نهایت باعث اعمال فشار بیش‌تری

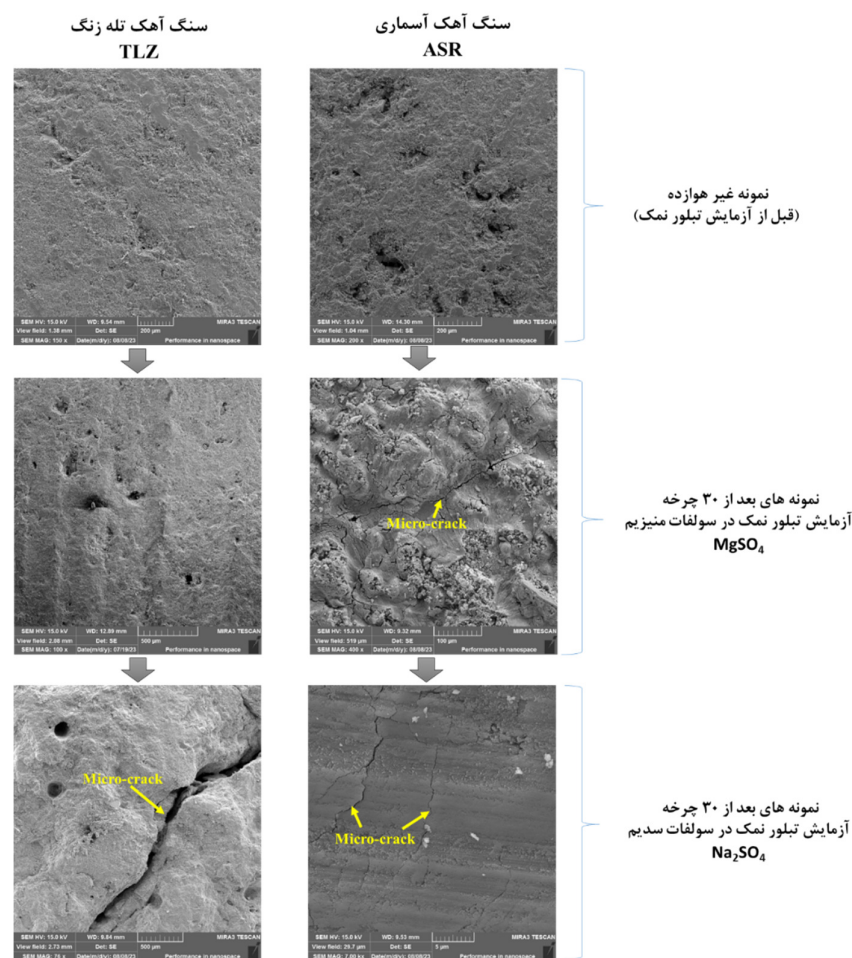


شکل ۱۰. مقایسه تاثیر سولفات سدیم و منیزیم بر روی سنگ‌آهک‌های مورد مطالعه

Fig. 8. Comparing the effect of sodium and magnesium sulfate on the studied limestones

مبنی بر فرسودگی و تخریب بیش‌تر سنگ‌آهک آسماری بعد از ۳۰ چرخه آزمایش هوازدگی نمک در محلول سولفات سدیم را تایید می‌کند. به عبارت دیگر، نمونه‌ای که بیش‌ترین میزان تخریب ظاهری (شکل ۱۰) و بالاترین کاهش در ویژگی‌های مکانیکی (جدول ۲) را نشان داده است، بیش‌ترین میزان ریزترک را نیز دارا بوده است. در ارتباط با مکانیسم تخریب نمونه‌ها باید بیان نمود که به علت ویسکوزیته کم‌تر سولفات سدیم نسبت به سولفات منیزیم، محلول سولفات سدیم راحت‌تر در منافذ سنگ نفوذ کرده و هسته‌زایی بلورهای سولفات سدیم در سیستم منافذ سنگ باعث می‌گردد تا سنگ دچار ترک گردد. در نتیجه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها از قبیل سرعت سیر موج و شاخص بار نقطه‌ای به شدت تحت تأثیر ترک‌های ایجاد شده قرار گرفته و کاهش پیدا می‌کنند. این در حالی است محلول سولفات منیزیم به‌خصوص در نمونه سنگ‌آهک تله‌زنگ که تخلخل کم‌تری دارد، بیش‌تر در منافذ سطحی متبلور می‌گردد و نتیجه هوازدگی نیز عمدتاً به صورت پوسیدگی سطح نمونه است.

به‌منظور مقایسه تأثیر محلول سولفات سدیم و منیزیم بر روی میزان هوازدگی و فرسودگی سنگ‌آهک آسماری و تله‌زنگ، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی SEM و در سه شرایط مختلف غیرهوازده، بعد از ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم و منیزیم، تصاویری از سطح نمونه‌ها گرفته شده است (شکل ۱۱). که نشان می‌دهد که در سطح نمونه‌های آزمایش شده با محلول سولفات سدیم، هم نمونه سنگ‌آهک آسماری و هم تله‌زنگ، ریزترک‌های متعددی ایجاد شده است. با این تفاوت که تعداد این ریزترک‌ها برای سنگ‌آهک آسماری آزمایش شده بعد از ۳۰ چرخه هوازدگی نمک در محلول سولفات سدیم از همه نمونه‌های دیگر بیش‌تر است. این در حالی است که نمونه سنگ‌آهک آسماری آزمایش شده در محلول سولفات منیزیم و سنگ‌آهک تله‌زنگ آزمایش شده در محلول سولفات سدیم در رده‌های بعدی قرار دارند. نمونه سنگ‌آهک تله‌زنگ آزمایش شده در محلول سولفات منیزیم فاقد ترک‌های سطحی بوده است. بنابراین، نتایج مطالعات SEM نیز به نوعی، یافته‌های قبلی این مطالعه



شکل ۱۱. تصاویر SEM از سطح نمونه‌های مورد مطالعه

Fig. 11. SEM images of the surface of the studied samples

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و دوام‌پذیری در مقابل هوازدگی نمک دو نوع سنگ‌آهک آسماری و سنگ‌آهک تله‌زنگ به عنوان مصالح ساختمانی استفاده شده در ساخت پل کشکان (استان لرستان) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه به صورت خلاصه به شرح ذیل می‌باشد:

- ✓ مطالعات سنگ‌شناسی نشان داد که سنگ‌آهک آسماری مادستون آهکی و سنگ‌آهک تله‌زنگ یک گرینستون است.
- ✓ بررسی ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی حاکی از رابطه بسیار خوب و با ضرایب رگرسیون بالا بین این ویژگی‌ها می‌باشد. بر این اساس، ملاحظه شد که ضریب رگرسیون بین تخلخل- شاخص بار نقطه‌ای، دانسیته- شاخص بار نقطه‌ای و سرعت موج- شاخص بار نقطه‌ای به ترتیب ۰/۸۰۳، ۰/۸۱۷ و ۰/۷۵۱ است.

✓ نتایج نشان داد که میزان کاهش سرعت موج نمونه‌های

آهک ASR در محلول سولفات سدیم و منیزیم، به ترتیب معادل ۶۱/۲۰ و ۴۱ درصد است. در حالی که میزان کاهش سرعت موج برای سنگ‌آهک تله‌زنگ (TLZ) به ترتیب ۳۵/۱۵ و ۱۶/۲۵ درصد می‌باشد.

✓ براساس نتایج، مشخص شد که شاخص بار نقطه‌ای نمونه سنگ‌آهک آسماری در پایان ۳۰ چرخه آزمایش تبلور نمک در محلول سولفات سدیم ۸۵/۶۱ درصد کاهش نشان داده است. در حالی که این مقدار کاهش برای سنگ‌آهک آسماری در محلول سولفات منیزیم معادل ۷۰/۴۶ درصد است که باز هم میزان تخریب و فرسودگی بالایی را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش شاخص بار نقطه‌ای برای نمونه سنگ‌آهک تله‌زنگ در محلول سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب ۳۸/۴۳ و ۲۷/۲۸ درصد است که در

- Çelik, M. Y., Ozkan, O. Geotechnical characterization of low-porous limestones (beige-cream marble, Turkey) and evaluation of durability by salt crystallization experiments. *Bull Eng Geol Environ*, 81: 56. doi.org/10.1007/s10064-021-02560-4.
- Cooke, R. U (1994) Salt weathering and the urban water table in deserts. In: Robinson DA, Williams RBG (eds) *Rock weathering and landform evolution*. Wiley, Chichester, 193–205. doi.org/10.1007/978-94-011-5228-0_6.
- De Morgan, J (1960) *Geography Studies of Western Iran*. Chehr press (in persian).
- Di Benedetto, C., Cappelletti, P., Favaro, M (2015) Porosity as key factor in the durability of two historical building stones: Neapolitan Yellow Tuff and Vicenza Stone. *Eng Geol*, 193: 310–319. doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.006.
- Dunham, R. J (1962) Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In: Ham, W.E., Ed., *Classification of Carbonate Rocks*, AAPG, Tulsa, 108–121.
- Evans, I. S (1970) Salt crystallization and rock weathering: a review. *Rev Géomorphol Dynam*, 19: 153–177.
- Fookes, P. G., Gourley, C. S., Ohikere, C (1988) Rock weathering in engineering time. *Q J Eng Geol*, 21: 33–57.
- 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 Mech Rock Eng*, 48: 1001–1016. doi.org/10.1007/s00603-014-0609-6.
- Gomez-Heras, M., Fort, R (2007) Patterns of halite (NaCl) crystallization in building stone conditioned by laboratory heating regimes. *Environ Geol*, 52: 259–267. doi.org/10.1007/s00254-006-0538-0.
- Gonçalves, T. D., Brito, V (2014) Alteration kinetics of natural stones due to sodium sulfate crystallization: can reality match experimental simulations? *Environ Earth Sci*, 72: 1789–1799. doi.org/10.1007/s12665-014-3085-0.
- Goudie, A., Viles, H (1997) *Salt weathering hazards*. Wiley, Chichester.
- Grementieri, L., Daghighi, F., Molari, L (2017) A multi-scale approach for the analysis of the mechanical effects of salt crystallisation in porous media. *Int J Solids Struct*, 126 (127): 225–239.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamsehchiyan, M., Sarikhani, R (2019) Durability assessment of travertenes against salt weathering: an experimental study. *New Findings in Applied Geology*, 14 (27): 1–15 (In persian).
- Karimi, B (1950) ancient ways and old capitals of western Iran, Bija, (in persian).
- ISRM (1981) suggested: rock characterization,

مقایسه با سنگ‌آهک آسماری، میزان تخریب و آسیب بسیار کم‌تری را تحمل کرده‌اند.

- ✓ با توجه به میانگین تخلخل بالاتر سنگ‌آهک آسماری (۴/۹۲ درصد) در مقایسه با سنگ‌آهک تله‌زنگ (۱/۳۲ درصد)، می‌توان نتیجه گرفت که دلیل اصلی میزان فرسودگی و زوال بیش‌تر نمونه سنگ‌آهک آسماری، میزان تخلخل بالاتر آن می‌باشد.
- ✓ نتایج مطالعات و مشاهدات SEM نشان داد که نمونه‌های دارای بیش‌ترین میزان فرسودگی و کاهش در خصوصیات مکانیکی، دارای بیش‌ترین توسعه ریزترک‌ها در سطح نمونه می‌باشند.

References

- Ahmad, P (2001) The bridge and its transformation in Badrban Hasanweh territory. Master's thesis, Tehran University (in persian).
- Akin, M., Ozsan, A (2011) Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bull Eng Geol Environ*, 70: 100–114.
- Benavente, D., García del Cura, M. A., Fort, R., Ordóñez, S (2004a) Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Eng Geol*, 74: 113–127. doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.005.
- Benavente, D., García del Cura, M. A., García-Guinea, J., Sánchez-Moral, S., Ordóñez, S (2004b) The role of pore structure in salt crystallization in unsaturated porous stone. *J Cryst Growth*, 260: 532–544. doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2003.09.004.
- Cardell, C., Rivas, T., Mosquera, M. J., Birginie, J. M., Moropoulou, A., Prieto, B., Silva, B., Van Grieken, R (2003) Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. *Earth Surf Process Landf*, 28: 1–14. doi.org/10.1002/esp.408.
- Cardenes, V., Mateos, F. J., Fernandez-Lorenzo, S (2014) Analysis of the correlations between freeze-thaw and salt crystallization tests. *Environ Earth Sci*, 71: 1123–1134. doi.org/10.1007/s12665-013-2516-7.
- Castellazzi, G., Colla, C., De Miranda, S (2013) A coupled multiphase model for hygrothermal analysis of masonry structures and prediction of stress induced by salt crystallization. *Constr Build Mater*, 41: 717–731. doi.org/10.1016/j.conbu.ildma.2012.12.045.
- Çelik, M. Y., Aygün, A (2018) The effect of salt crystallization on degradation of volcanic building stones by sodium sulfates and sodium chlorides. *Bull Eng Geol Environ*, 78: 3509–3529. doi.org/10.1007/s10064-018-1354-y.

- (in persian).
- Stein, A (1940) .Old Routes of Western Iran, London.
- Torabi-Kaveh, M., Heidari, M., Mohseni, H (2019) Role of petrography in durability of limestone used in construction of Persepolis complex subjected to artificial accelerated ageing tests. *Environ Earth Sci*, **78**: 297. doi.org/10.1007/s12665-019-8308-y.
- Wilson, A (1992) Wilson's travel book or the political and economic history of southwestern Iran.
- Winkler, E. M (1966) Important agents of weathering for building and monumental stone. *Eng Geol*, **1**: 381-400. doi.org/10.1016/0013-7952(66)90003-2.
- Winkler, E. M (1973) Stone: Properties, Durability in Man's Environment. Springer-Verlag, 230p.
- Yavuz, A. B., Akal, C., Türk, N., Çolak, M., Tanyu, B. F (2015) Investigation of discrepancy between tuff used as building stones in historical and modern buildings in western Turkey. *Constr Build Mater*, **93**: 439-448. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.017.
- Yavuz, A. B., Topal, T (2007) Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: examples from Western Anatolia, Turkey. *Eng Geol*, **90**: 30-40.
- Yu, S., Oguchi, C. T (2010a) Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. *Eng Geol*, **115**: 226-236. doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.007.
- Zedef, V., Kocak, K., Doyen, A., Ozsen, H., Kekec, B (2007) Effect of salt crystallization on stones of historical buildings and monuments, Konya, Central Turkey. *Build Environ*, **42**: 1453-1457. doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.010.
- testing and monitoring methods, In: Brown ET (ed) Pergamon, Oxford.
- Izadpanah, H (1984) Ancient and historical works of Lorestan. Tehran: Agah press (in persian).
- Lopez-Arce, P., Garcia-Guinea, J., Benavente, D., Tormo, L., Doehne, E (2009) Deterioration of dolostone by magnesium sulfate salt: an example of incompatible building materials at Bonaval Monastery, Spain. *Constr Build Mater* **23**: 846-855.
- McKinley, J. M., Curran, J. M., Turkington, A. V (2001) Gypsum formation in non-calcareous building sandstone: a case study of Scrabo sandstone. *Earth Surf Process Landf*, **26**: 869-875. doi.org/10.1002/esp.232.
- Mokhlessi, M (2000) Polhayeh Qadimi Iran, Iranian Culture Heritage Organization, Tehran, Iran (in persian).
- Momeni, A., Khanlari, G. R., Heidari, M., Bagheri, R., Bazvand, E (2015) Assessment of physical weathering effects on granitic ancient monuments, Hamedan, Iran. *Environ Earth Sci*, doi, 10.1007/s12665-015-4536-y.
- Momeni, A., Khanlari, G. R., Heidari, M., Hashemi, S. S (2018) The effect of cyclic salt weathering test on deterioration potential of granitoid rocks. *Geopersia*, **8** (2): 143-156.
- Ordóñez, S., Fort, R., García del Cura, M. A (1997) Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quart J Eng Geol*, **30**: 221-230.
- Parviz, A (2001) The bridge and its transformation in the territory of Abul-Najm Badr ibn Hasnawieh, Department of Archeology, Faculty of Literature, University of Tehran.
- Price, C. A (1996) Stone conservation: an overview of current research. Research in Conservation. Getty Conservation Institute, Santa Monica.
- Prikryl, R., Lokajicek, T., Svobodova, J., Weishauptova, Z (2003) Experimental weathering of marlstone from Predni Kopanina (Czech Republic) - historical building stone of Prague. *Build Environ*, **38** (9-10): 1163-1171.
- Rawlinson, S (1983) Rawlinson's travel book (passing from Zahab to Khuzestan), translated by Sikander Amanalehi Baharond, Tehran: Agah Publications.
- Rezaian, M., Sarikhani, R., Jamshidi, A., Ghasemi-Dehnavi, A., Abdi, Y (2018) Experimental study of the effect of saline water on weathering of rocks in Robat Namaki region of Khorramabad. *Journal of Engineering Geology*, **16** (1): 25.
- Ruffolo, S. A., La Russa, M. F., Ricca, M (2017) New insights on the consolidation of salt weathered limestone: the case study of Modica stone. *Bull Eng Geol Environ*, **76**: 11-20. doi.org/10.1007/s10064-015-0782-1.
- Sajadi, A (2003) Bridge builders along the historical roads of Lorestan. *Athar Journal*, **35**: 246-270

Investigating the physico-mechanical characteristics of rocks used in the construction of ancient buildings in Lorestan province with an emphasis on durability (case study: Kashkan Bridge)

Y. Abdi^{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

* abdi.ya@lu.ac.ir

Recieved: 2023.9.30 Accepted: 2023.12.31

Abstract

The purpose of this study is to investigate the physical and mechanical properties of limestone used in the construction of the historical bridge of Kashkan (Lorestan province) and to evaluate their behavior against salt weathering. Based on this, two types of limestone used in the construction of Kashkan bridge, including Asmari limestone (ASR) and Talezang (TLZ) were selected and studied in the laboratory. Based on the petrographic analysis results, Asmari stone can be classified as a lime mudstone, while Talezang stone can be classified as a grainstone. In the first stage, the lithological, physical and mechanical characteristics of the studied rocks were determined, and then salt crystallization test was performed in sodium and magnesium sulfate solution in 30 cycles on the selected samples. In order to investigate the effect of salt weathering on the durability and stability of the selected stones, at the end of every 10 cycles, the changes in appearance, P-wave velocity and point load strength of the samples were evaluated. Based on the results, it was found that sodium sulfate has a much greater effect on the decay and degradation of the studied limestones. Also, the results showed that at the end of 30 cycles of salt crystallization test in sodium and magnesium sulfate solution, Asmari limestone has experienced more damage compared to Talezang limestone. In addition to these, SEM studies have been conducted to investigate the structural changes of the samples due to salt weathering.

Keywords: Physico-mchanical properties, Limestone, Salt weathering, Kashkan Bridge, Lorestan

Introduction

The deterioration of building materials worldwide causes significant economic losses and the degradation of ancient structures. A substantial portion of this damage results from salt crystallization within the pores of stones and bricks used in historical constructions. Consequently, evaluating the durability of stones against salt crystallization is a critical and compelling research topic, as these materials are often primary construction components, particularly in heritage buildings. This phenomenon is recognized as a widespread weathering process and a major contributor to the decay of stones in historical structures. Salt weathering occurs when salts such as sodium sulfate (Na_2SO_4), sodium chloride (NaCl), magnesium sulfate (MgSO_4), and calcium sulfate (CaSO_4) penetrate the porous structure of the stone and crystallize upon evaporation or drying. This process exerts pressure on the stone, inducing internal stresses that ultimately lead to surface deterioration, decay, and breakdown. Salt accumulation in building stones and historical

monuments can occur through various mechanisms. Salts originating from the stone itself may also contribute to the deposition of salts within its voids. This study investigates the role of physical and mechanical properties in the durability of limestones used in the construction of the historic Kashkan Bridge against salt weathering. To this end, the first stage examines the physical and mechanical characteristics of the limestones employed in the bridge's construction. The second stage explores the influence of these properties on the stones' resistance to salt weathering.

Materials and methods

This bridge was constructed over the Kashkan River along the ancient route connecting Shapurkhvast to the Tarhan region. Politically, it is currently located within the Teshkan Rural District of Dowreh Chegeni County, approximately 35 km from Kuhdasht and 52 km east of Khorramabad. The bridge spans 285 meters in length, with a passage width of 8 meters. Including its subsidiary piers and

eastern/western extensions, the total length reaches 340 meters, fully covering the width of the valley that forms the river's natural bed. Geological studies indicate that the upstream basin of the Kashkan Bridge is significantly influenced by the Gachsaran evaporite formation. The distribution of this formation is such that local inhabitants in some upstream areas collect salt from natural salt pans. Consequently, the Gachsaran Formation can be considered the primary source of salt contributing to the weathering of the limestone used in the historic Kashkan Bridge. Given the bridge's historical significance and the extensive presence of the Gachsaran evaporite formation upstream, it is essential to study the durability of its construction materials against destructive salt weathering. Such research will improve understanding of the stones' behavior and help prevent further deterioration. Accordingly, this study first examines the physical and mechanical properties of the limestones used in the bridge's construction. Second, it investigates the role of these properties in the stones' resistance to salt weathering when exposed to sodium and magnesium sulfate solutions.

The studied rock samples: Examination of the stones used in the construction of the historic Kashkan Bridge reveals that two main types of limestone were predominantly employed. The first type is a white limestone, typically used in large blocks (approximately 30×30×40 cm) for the bridge piers. This limestone belongs to the Asmari Formation of Oligo-Miocene age. The second type consists of predominantly gray limestone slabs with a maximum thickness of 20 cm, used in the bridge arches. Field observations indicate that this limestone variety originates from the Taleh-Zang Formation of Paleocene-Eocene age. For the present study, several blocks of each limestone type were collected in various dimensions and transported to the Engineering Geology and Geotechnics Laboratory at Lorestan University. From these collected blocks, 76 cubic specimens measuring 3×3×3 cm were prepared. Special care was taken to ensure the samples were free from any cracks or fractures.

Results and discussions

Petrographic properties: Thin-section observations revealed that the Asmari limestone sample exhibits a matrix-supported texture, composed of approximately 47% micritic mud, 50% microsparite, and about 3% iron oxides. According to Dunham's classification (1962), the Asmari limestone is classified as a lime mudstone. The analysis showed that the Taleh-Zang limestone displays a grain-supported

texture, consisting of 75-80% intraclasts (including limestone fragments and fossil pieces). Fossil fragments, comprising nummulites, miliolids, and foraminifera, account for 15-20% of the rock's grains. The intergranular spaces are filled with micrite that has locally transformed into neosparite. Based on Dunham's classification (1962), the Taleh-Zang limestone can be classified as a grainstone.

Physical-mechanical properties: To evaluate the behavior of the selected limestones against salt crystallization weathering cycles, it is essential to first develop a comprehensive understanding of their physico-mechanical properties. Accordingly, following sample preparation, a series of thorough physical and mechanical tests were conducted on the cubic specimens, including porosity determination, density measurement, wave velocity analysis, and point load index assessment.

Salt crystallization test: To evaluate the limestone's resistance to salt weathering, salt crystallization tests were conducted using 14% weight solutions of sodium sulfate and magnesium sulfate, following the EN 12370 standard (2020) for 30 cycles. Each complete salt weathering cycle consisted of three phases:

1. Immersion phase: Samples were submerged in the 14% sulfate solution for 2 hours.
2. Drying phase: Samples were oven-dried at 105°C for 16 hours until completely dry.
3. Cooling phase: Samples were cooled at room temperature for 6 hours.

After every 10 cycles, we measured changes in porosity, wave velocity, and point load index. Notably, at each 10-cycle interval, a minimum of 3 samples underwent point load testing. The results demonstrate that as salt crystallization cycles increased, the mechanical-physical properties (wave velocity and porosity) showed an increasing trend.

In this study, the damage ratio (DR) caused by 30 salt crystallization cycles was calculated using the following equation:

$$DR = ((X_0 - X_{cn})/X_0) \times 100$$

Where:

- DR = Damage ratio after 30 salt crystallization cycles
- X_0 = Measured physical/mechanical property of intact samples (pre-weathering)
- X_{cn} = Measured property after n weathering cycles (here, wave velocity and point load index after 30 cycles in $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{MgSO}_4$ solutions)

Key Findings:

1. Wave Velocity Reduction:

- ✓ ASR limestone: 61.20% (Na_2SO_4) and 41% (MgSO_4)
- ✓ TLZ limestone: 35.15% (Na_2SO_4) and 16.25% (MgSO_4)
- 2. Point Load Index Reduction (more severe than wave velocity):
 - ✓ ASR limestone:
 - ✓ 85.61% reduction in Na_2SO_4
 - ✓ 70.46% reduction in MgSO_4
 - ✓ TLZ limestone:
 - ✓ 38.43% reduction in Na_2SO_4
 - ✓ 27.28% reduction in MgSO_4

Based on the results, ASR limestone showed significantly higher deterioration than TLZ in both solutions. Sodium sulfate caused more damage than magnesium sulfate for both lithologies. Also, Point load index proved more sensitive to salt weathering than wave velocity measurements.

Conclusions

This study evaluated the physical-mechanical properties and salt weathering durability of two limestone types (Asmari and Taleh-Zang) used as construction materials in the historic Kashkan Bridge (Lorestan Province). The key findings are summarized as follows:

- Petrographic analysis identified the Asmari limestone as a lime mudstone and the Taleh-Zang limestone as a grainstone.

- Physical-mechanical correlations revealed strong relationships with high regression coefficients: Porosity vs. point load index: $R^2 = 0.803$, Density vs. point load index: $R^2 = 0.817$, Wave velocity vs. point load index: $R^2 = 0.751$.
- Salt weathering resistance showed significant differences: ASR limestone exhibited wave velocity reductions of 61.20% (Na_2SO_4) and 41% (MgSO_4). TLZ limestone demonstrated lower reductions of 35.15% (Na_2SO_4) and 16.25% (MgSO_4).
- Key findings regarding point load index reduction after 30 salt crystallization cycles:
- **Asmari limestone** exhibited:
 - 85.61% reduction in sodium sulfate (Na_2SO_4) solution
 - 70.46% reduction in magnesium sulfate (MgSO_4) solution (indicating severe deterioration in both environments)
- **Taleh-Zang limestone** showed significantly lower reduction:
 - 38.43% reduction in Na_2SO_4 solution
 - 27.28% reduction in MgSO_4 solution