

سرشناسه	: همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی (نخستین: ۱۳۹۱؛ تبریز)
عنوان و نام پدیدآور	: برگزیده‌ی مقالات اولین و دومین همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی.../ به کوشش مهدی رازانی، بهرام آجورلو.
مشخصات نشر	: تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۴۱۵ ص: مصور (رنگی)، جدول، نمودار: ۲۲×۲۹ س.م.
شابک	: 978-600-93946-8-5
وضعیت فهرست نویسی	: قیبا
موضوع	: باستان‌سنجی -- ایران -- کنگره‌ها
موضوع	: آثار فرهنگی -- ایران -- نگهداری و مرمت -- کنگره‌ها
شناسه افزوده	: آجورلو، بهرام، ۱۳۵۴ - گردآورنده
شناسه افزوده	: رازانی، مهدی، ۱۳۶۳ - گردآورنده
شناسه افزوده	: همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی (دومین: ۱۳۹۲؛ تبریز)
رده بندی کنگره	: ۸۱۳۹۳۸/۷۵/۷CC
رده بندی دیویی	: ۹۳۰/۱۰۲۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۷۵۶۵۵۲



برگزیده‌ی مقالات اولین و دومین همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی
در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی دانشگاه هنر اسلامی تبریز
۱۳۹۱-۱۳۹۲

مهدی رازانی و بهرام آجورلو (به ویرایش)

ناشر: دانشگاه هنر اسلامی تبریز، نشر الکترونیک

نوبت چاپ اول: ۱۳۹۳

تعداد صفحه و قطع: - وزیر

امور فنی و نظارت بر آماده سازی: مؤسسه فرهنگی میراث مهر آفرین
(با همکاری: سحر احمد خان بیگی، نگار کاظمی پور و سمیرا جعفری)

تبریز، خیابان آزادی، میدان حکیم نظامی، صندوق پستی، ۴۵۶۷-۵۱۳۸
کد پستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳۱؛ تلفن: ۰۴۱)۳۵۴۱۹۹۷۰
research@tabriziau.ac.ir

ارزیابی روش‌های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات مقاومتی سنگ‌های آهکی لوماشل

احسان محمدی*^۱؛ علیرضا باغبانان^۲، فرشاد رضانی فر^۱، حمید هاشم‌الحسینی^۲، مهدی رازانی^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشجوی دکتری مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی دانشگاه هنر اصفهان

(مکاتبات: mohammadi_iut@yahoo.com)

چکیده

در سواحل جنوبی ایران با توجه به نوع مصالح در دسترس، احداث سازه‌ها و بناهای سنگی با سنگ متخلخل لوماشل مرسوم بوده است. سنگ‌های لوماشل اغلب خواص فیزیکی و مکانیکی ضعیفی دارند و عموماً برای کاربردهای ساختمانی و سازه‌ای فاقد صلاحیت شمرده می‌شوند. از این رو استحکام بخشی و مقاوم‌سازی این سنگ‌ها می‌تواند آنها را در شرایطی مورد قبول جهت پایداری در سازه‌های موجود قرار دهد. در تحقیق حاضر که با عملیات صحرائی نمونه برداری از معدن هُلُر درگهان واقع در شمال شرقی جزیره قشم، صورت گرفت. سنگ به چهار دسته (۱) نمونه‌های درمان نشده و (۲) نمونه‌های درمان شده به روش استحکام بخشی شامل: الف) آب آهک، ب) رزین اپوکسی و ج) دوغاب بیولوژیکی تقسیم شدند. نتایج انجام آزمایش‌های مهندسی

سنجش دوام مشتمل بر ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی، دوام داری شیمیایی و مکانیکی نشان داد آب آهک، به علت داشتن مقدار زیاد آب، سبب تخریب بافت سنگ و باعث کاهش ۸/۵٪ خصوصیات مکانیکی سنگ نسبت به حالت اولیه شده است. استحکام بخشی با دوغاب بیولوژیکی، سبب کاهش جذب آب گردید و ۷٪ بهبود کیفیت در سنگ ایجاد نموده است. رزین اپوکسی، ۱۷٪ خصوصیات سنگ را بهبود بخشید. که نسبت به دو استحکام بخش دیگر مناسب‌تر ارزیابی گردید اما به علت داشتن خواص فیزیکوشیمیایی غیر همسان با سنگ و عمق نفوذ کم، یک استحکام بخش سطحی محسوب شده و بایستی به صورت دوره‌ای بر روی سطح تجدید شود.

واژه‌های کلیدی: سنگ لوماشل، استحکام‌بخش، آب آهک، رزین اپوکسی، میکرو ارگانسیم قلیایی.

۱. مقدمه

پدیده‌های تخریب و هوازدگی به‌عنوان عوامل مخرب چند بعدی و اجتناب ناپذیر در سنگ‌های به‌کار برده شده در سازه‌ها و یادمان‌های میراث فرهنگی که در مجاورت با آب و هوا و شرایط محیطی قرار دارند، از مهم‌ترین مسائل مورد توجه در حفاظت محسوب می‌گردند. سرعت هوازدگی و گونه آن در همه جا یکسان نیست و این امر به عواملی چون: (۱) جنس و مشخصات سنگ مادر شامل: ویژگی‌های ذاتی همانند ترکیب کانی شناختی، بافت و ساخت آن که در واقع خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سنگ محسوب می‌شوند در کنار (۲)، شرایط محیطی: شامل ویژگی‌های اقلیمی و آب و هوایی منطقه، توپوگرافی و محل قرارگیری اثر به‌همراه وضعیت آلودگی‌های هوا، کلونی‌های زیستی و حتی مداخلات انسانی را در بر می‌گیرد به‌علاوه (۳) عامل زمان می‌توان خلاصه نمود. در طی قرن گذشته روش‌های متعددی از جمله قطع مجاورت سنگ با عوامل هوازدگی همچون رطوبت، نور، دما، عوامل زیستی و آلودگی‌های محیطی جهت پیشگیری و متوقف نمودن روند تخریب‌ها انجام شده است (Doehne

ارزیابی روش های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات... (۲۷۱)

5: et al, 2010). اما در بسیاری از گونه‌های میراث سنگی امکان جلوگیری از مجاورت و دور نمودن منابع آسیب‌رسان وجود ندارد. از جمله روش‌های متداول برای جلوگیری از تخریب سنگ استحکام بخشی است. استحکام بخشی عبارت است از درمان عمقی سنگی که پیوستگی و انسجام آن آنقدر از دست رفته که موجودیت فیزیکی آن به خطر افتاده است. این درمان شامل اشباع کردن سنگ هوازده و همچنین بخش قابل توجهی از لایه محکم زیرین آن است (آموروسو و فاسینا، ۱۹۸۳/۱۳۷۰). استحکام بخشی سنگ از آنجا که تقریباً همیشه یک دخالت پر مخاطره محسوب می‌شود و به‌عنوان یک عمل برگشت‌ناپذیر اثرهای جانبی جدی دارد از این رو تصمیم برای انجام آن همیشه دشوار است اما وقتی جایگزینی یا خرابی کلی تنها گزینه‌های پیش‌رو هستند و استحکام بخشی به‌عنوان آخرین گزینه در نظر گرفته می‌شود، ساده است. به استحکام بخشی نیازمندیم زیرا سنگ‌های تخریب شده در قسمت‌های داخلی تا سطوح بیرونی‌شان چسبندگی مابین ذرات خود را از دست داده‌اند (Rodrigues, 2001). سنگ آهکی لوماشل یکی از منابع مهم سنگ برای ساخت برخی سازه‌های مهم همانند موج شکن‌های دریا و دیگر سازه‌ها در بنادر جنوبی ایران بوده است. که در کنار خواص ذاتی ضعیف این سنگ، عملکرد عوامل هوازده‌گی به‌صورت آسیب‌های پوسته پوسته شدن، شکستگی‌های بزرگ، گرد گوشه‌شدگی و انحلال شیمیایی نمایان شده است. از این رو ارائه راهکارهای حفاظتی جدید جهت افزایش کیفیت و مقاومت این سنگ‌های ضعیف، با بهسازی و استحکام بخشی آن‌ها، از اهمیت خاصی برخوردار است. در همین راستا تحقیق حاضر با هدف ارزیابی و انتخاب راهکار حفاظتی مناسب بر اساس درمان استحکام بخشی جهت بهبود خواص مقاومتی سنگ‌های آهکی لوماشل در مناطق جنوبی کشور انجام شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

۲-۱- ویژگی‌های سنگ‌های مورد مطالعه

با توجه به پتانسیل معادن سنگ در نواحی ساحلی کشور و به‌خصوص جزیره قشم، معمولاً امکان تهیه سنگ با کیفیت مناسب با وجود ندارد. لذا با توجه به فقر مصالح سنگی مرغوب، در موارد بسیاری از سنگ‌های لوماشل استفاده شده است که نمونه

(۲۷۲) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

شاخص آن بخش‌هایی از قلعه پرتغالی‌ها در جزیره قشم است. لوماشل‌ها که نوعی سنگ رسوبی تخریبی محسوب می‌شوند از جمله مصالحی هستند که با سهولت استخراج و فراوانی زیاد در رخنمون‌های سنگی واقع در نوار ساحلی جنوب ایران در سازندهای میشان، آجاجاری، برخی سازندهای محلی مانند سازند قشم و خارک در سواحل خلیج فارس و در تشکیلات میوسن تا پلیوسن نواحی جنوب شرقی ایران گسترش یافته‌اند (تلخابلو، ۱۳۸۶). این نوع سنگ بر خلاف سایر سنگ‌های آهکی که منشأ شیمیایی دارند، دارای منشأ تخریبی هستند. ذرات تخریبی تشکیل دهنده این سنگ از بقایای خرد شده پوسته جانداران دریایی تشکیل شده که اغلب دارای ترکیب کلسیت و یا آراگونیت هستند که با سیمان آهکی از نوع دریایی به هم متصل گردیده‌اند (حسینی و دیگران، ۱۳۸۵). لذا با توجه به موارد بیان شده، بهسازی مقاومتی و دوام داری سنگ‌های لوماشل می‌تواند دسته‌ای از آن‌ها که دارای خواص ضعیفی هستند را در شرایطی قرار دهد که قابل استفاده و دارای عمر طولانی‌تر گردند. در تحقیق حاضر، در قالب یک سفر تحقیقاتی به جزیره قشم و طی یک عملیات صحرایی از مصالح سنگی معدن هُلُر درگهان واقع در شمال شرق جزیره نمونه‌برداری انجام شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی این معدن را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معدن هُلُر درگهان در جزیره قشم (Google Earth, 2013)

ارزیابی روش های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات... (۲۷۳)



شکل ۲. نمونه سنگ لوماشلی معدن هُلر درگهان قشم (محمدی، ۱۳۹۲)

آنالیز XRF نمونه سنگ مورد مطالعه که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. نشان می‌دهد، میزان CaO در نمونه سنگ لوماشل بیش از ۵۴٪ است.

جدول ۱. نتیجه آنالیز XRF نمونه سنگ لوماشل معدن هُلر درگهان قشم											
لوماش ل هُلر	SiO_2	Al_2O_3	F_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO	Na_2O	K_2O	L.O.I
ترکیب ت (%)	۲۴	۰/۱۵۲	۰/۰۹	۴۳	۳۵۹	۰/۰۷	۱/۰۱۴	۰/۰۷	۱/۰۵۷	۱/۰۴۹	۳۶
	۱			۵۴	۰/		۰		۰	۰	۴۳

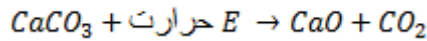
۲-۲- ویژگی های مواد مورد مطالعه

۲-۲-۱- استحکام بخشی با آب آهک

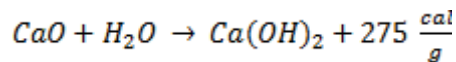
در ۳۰ سال گذشته، به طور معمول از تثبیت کننده‌های غیر ارگانیک برای استحکام بخشی سنگ، استفاده شده است که اوج آن در دهه ۷۰ میلادی و در کشور انگلیس بوده است. قدیمی ترین ماده استحکام بخش غیر آلی که جهت درمان و استحکام بخشی سنگ‌های کربناته مورد استفاده قرار گرفته آب آهک است. ماده اصلی تولید آهک، سنگ آهک (کربنات کلسیم) با فرمول شیمیایی $CaCO_3$ است که با حرارت دادن در انواع کوره‌های پخت، گاز CO_2 از آن خارج می‌شود و در نتیجه مطابق واکنش زیر

(۲۷۴) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

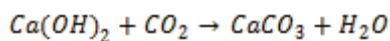
اکسید کلسیم CaO (آهک زنده) حاصل می‌گردد.



حضور آب سبب می‌شود اکسید کلسیم شکفته شده و تبدیل به کلسیم هیدروکسید (آهک هیدراته) شود که این امر با آزاد شدن انرژی حرارتی همراه است (رابطه ۲):



آب آهک یک نام معمول برای محلول اشباع هیدروکسید کلسیم با فرمول شیمیایی $Ca(OH)_2$ است از آنجا که کلسیم هیدروکسید به میزان بسیار کم در آب محلول است، محلول آن با آب، هیچ تفاوت بصری نداشته و تنها پس از دقت بسیار، می‌توان اندکی بوی خاک از آن احساس کرد. البته، با تست‌های شناسایی قلیا می‌توان به راحتی این محلول را از آب شفاف تشخیص داد. آب آهک حفاظتی از ترکیب کلسیم هیدروکسید با آب مقطر به دست می‌آید. این مخلوط باید به شدت مخلوط شده و تکان داده شود تا از اشباع بودن آن، اطمینان حاصل شود. پس از ته نشین کلسیم هیدروکسید اضافی که در آب حل نشده، محلول، تصفیه شده و مایع شفاف رویی جدا می‌شود. محلول آب آهک در تماس با دی‌اکسید کربن، شیری رنگ می‌شود. زیرا کربنات کلسیم تولید شده که طبق رابطه زیر، در آب نامحلول است (Ashurst & Ashurst 1988).



در این روند استحکام بخشی، ذرات کلسیم هیدروکسید درون منافذ و قسمت‌های متخلخل سنگ نفوذ می‌کنند و پس از واکنش با دی‌اکسید کربن هوا، تبدیل به کلسیم کربنات شده که هم سبب پر شدن حفره‌ها، ترک‌ها و درزها شده و هم سبب افزایش استحکام بافت سنگ می‌شود (زمانیان، ۱۳۸۸) در این تحقیق، برای استحکام بخشی نمونه‌ها با آب آهک، طبق روش ذکر شده، آب آهک تهیه و حدود ۴۰ بار بر سطح نمونه‌ها اسپری شده است، فاصله بین هر بار اسپری، به اندازه خشک شدن سطح نمونه بود. پس از استعمال استحکام بخش، نمونه‌ها تحت تأثیر گاز دی‌اکسید کربن قرار گرفته و به مدت ۲۰ روز در هوای آزاد قرار گرفت تا دی‌اکسید کربن هوا با کلسیم

ارزیابی روش های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات... (۲۷۵)

هیدروکسید موجود در آن‌ها واکنش دهد و سبب ایجاد کلسیم کربنات در سنگ شود.

۲-۲-۲- استحکام بخشی با اپوکسی‌ها

نویسندگان بسیاری، مهم‌ترین عامل تخریب و هوازگی سنگ‌ها را ناشی از رطوبت و نقش رطوبت در سازوکارهای تخریبی و هوازگی دانسته‌اند که این امر باعث کاهش دوام سنگ در طی فرآیندهای تخریبی گوناگون می‌گردد (Borgia et al. 2000). از این رو لزوم کاهش میزان جذب آب به علت پیامد ناشی از آن در منابع به مکرر ذکر شده است. امروزه مهم‌ترین راهکاری که خصوصاً در رابطه با آثار سنگی موجود در فضای باز گسترش جهانی یافته است استفاده از درمان‌های مبتنی بر حفاظت سطحی به‌وسیله رزین‌های پلیمری است (D'Arienzo et al. 2008). رزین‌های اپوکسی، پلیمرهای متراکمی هستند که انواع گوناگونی از مواد را تشکیل می‌دهند. تنوع زیاد این مواد، به‌علت ساختار فیزیکی و شیمیایی متمایز آن‌ها است. این مواد به ندرت، به‌تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند بلکه معمولاً با افزایش یک ماده عمل‌آور چند عملکردی یا سخت‌کننده، که ساختار شیمیایی و خواص فیزیکی رزین را تغییر داده و آن را به ماده سخت تبدیل می‌کند، به‌کار می‌روند. شرکت شیمیایی بین‌المللی BASF، سیستمی برای آب بند نمودن سطوح بتنی مخازن آب، استخرهای شنا، سدها و لوله‌های بتنی و کانال‌ها و فونداسیون، با نام تجاری Masterseal 551 ارائه داده است. این ماده علاوه بر مقاومت‌های خمشی و سایشی مناسب، دارای چسبندگی بسیار زیاد به سطح زیر است و اجرای آن نیز بسیار آسان می‌باشد. این سیستم از سه جز به شرح زیر تشکیل می‌گردد:

پرایمر: محلولی بر پایه آکرلیک جهت آماده سازی سطح،

چسب آب بندی: تشکیل دهنده لایه‌های متعدد آب بند بر پایه کوپلیمرهای استایرن آکریلات،

پودر پایه سیمانی: محتوی افزونی‌های شیمیایی جهت تقویت لایه‌های آب بند.

مهم‌ترین عامل برای نتیجه بخش بودن سیستم آب‌بندی، سالم بودن سطح زیر کار است. بدین ترتیب ابتدا بهتر است تمام سطح زیر کار تمیز گشته و ذرات جدا شده ماسه و پودر پاک شود. آنگاه، پرایمر را به‌وسیله قلم‌مو بر روی تمام سطح زده شد. این لایه پس از ۲۰ دقیقه خشک و آماده اجرای لایه‌های اصلی شد. برای تهیه ملات اصلی

۲۷۶) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

ابتدا یک پیمانۀ چسب آب بندی را با ۱/۵ پیمانۀ آب رقیق نموده و سپس ۴ پیمانۀ پودر به آن اضافه شد. این مایع را پس از ۱۰ دقیقه مجدد به‌طور کامل هم زده و به وسیله قلم مو آن را در دو دست به فاصله زمانی ۲ ساعت اجرا نموده شد. ضخامت دو لایه بر اساس دستور کار ارائه شده حدود یک میلی‌متر کافیسست (کاتالوگ شرکت شیمیایی بین‌المللی BASF). همان‌طور که در مقطع شکل ۴ دیده می‌شود، این رزین صرفاً استحکام‌بخش سطحی است که با توجه به اجزای تشکیل‌دهنده آن به‌صورت یک لایه محکم به سطح رویی سنگ چسبیده و خلل و فرج‌های آن را پوشش داده است. این ماده نفوذ خیلی کمی داشته و به لحاظ اقتصادی نیز نسبت به آب آهک بسیار گران‌تر است.



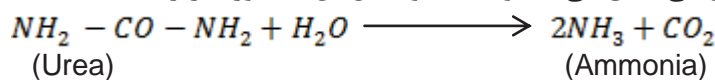
تصویر ۴. سطح مقطع سنگ لوماشل معدن هُلر در گهان استحکام بخشی با رزین اپوکسی

۲-۲-۳- استحکام بخشی با میکروارگانسیم‌های قلیایی

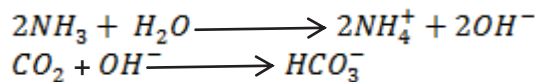
استفاده از میکروارگانسیم‌ها برای تولید سیمان کلسیتی، چندین دهه است که با کاربردهای صنعتی برای فرآیندهایی نظیر تولید سیمان در اطراف چاه‌های نفت برای افزایش میزان بازیابی از مخازن نفتی، غیر متحرک کردن کلسیم و سایر آلودگی‌ها در آب‌های زیر زمینی و سطحی و بهسازی و تعمیر مصالح سنگی آهکی به‌کار برده شده است (آقایاری، ۱۳۹۱). باکتری *Sporosarcina Pasteurii*، عمومی‌ترین و رایج‌ترین میکروارگانسیم قلیایی دوست خاک، نقش مهمی را در فرایند سیمانی کردن خاک، از

ارزیابی روش های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات... (۲۷۷)

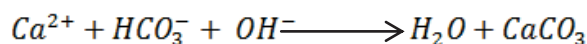
طریق تولید آنزیم اوره آز ایفا می کند و باعث هیدرولیز اوره به آمونیوم و دی اکسید کربن می شود. آمونیوم تولید شده باعث افزایش pH در محیط می شود و به دنبال آن کربنات کلسیم رسوب می کند. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، مهم ترین مواد غذایی لازم برای رشد باکتری ها و همچنین مهم ترین مؤلفه های شیمیایی برای سیمانی کردن خاک و تشکیل کربنات کلسیم، شامل مخمر، کلرید آمونیوم، کلرید کلسیم و اوره است. تحت شرایط مطلوب زیست محیطی، باکتری مذکور، اوره را به عنوان منبع انرژی مصرف کرده و باعث تولید آمونیا (NH_3) و دی اکسید کربن می شود که باعث افزایش pH در محیط مجاور می شود. این نوع واکنش هیدرولیزی آنزیمی اوره، در سطح سلول های باکتریایی اتفاق می افتد و معادله واکنش آن به صورت زیر است:



هم زمان با هیدرولیز شدن آنزیمی اوره، دو واکنش دیگر به طور طبیعی در حضور آب انجام می شود و باعث می شود که آمونیا و دی اکسید کربنی که به وسیله اوره آزاد شده است، به یون های آمونیوم (NH_4^+) و اسید کربنیک (HCO_3^-) تبدیل گردد.



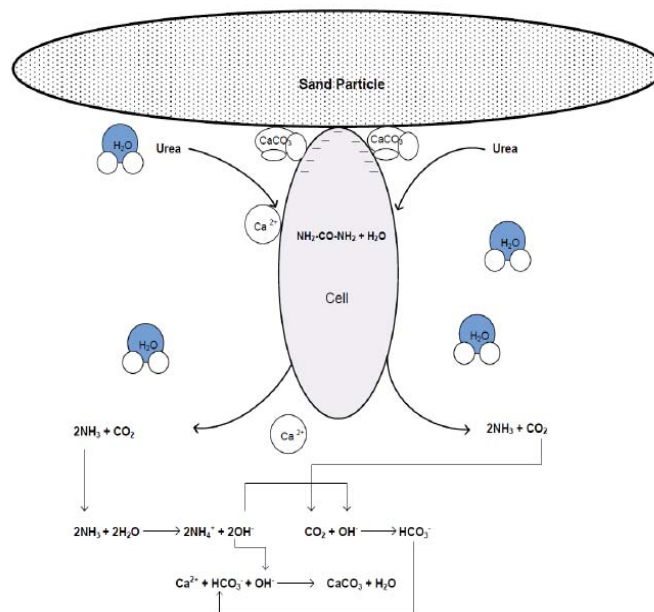
تولید یون های آمونیوم باعث افزایش pH محیط می گردد که این افزایش pH ناشی از افزایش میزان یون های هیدروکسید (OH^-) است و باعث می شود که بهترین و مناسب ترین شرایط محیطی برای رشد باکتری ها فراهم آید تا از اوره موجود تغذیه کرده و باعث رسوب کربنات کلسیم شوند. افزایش pH، که در محیط روی می دهد، باعث می شود که یون های کلسیم موجود در محلول که از طریق حل شدن کلرید کلسیم در آب حاصل شده اند، با یون های اسید کربنیک و یون های هیدروکسید موجود در محلول واکنش داده و منجر به رسوب سیمان کلسیتی شوند (آقایاری، ۱۳۹۱ و Whiffin, 2004). معادله کلی واکنش به صورت زیر است:



طی این واکنش ها، سلول های باکتریایی که به دلیل وجود یون های هیدروکسید (OH^-) در بیرون از دیواره سلولی خود، دارای بار منفی هستند، جذب سطح ذرات خاک که به طور نسبی غلظت های بالایی از مواد مغذی در مقایسه با محیط

۲۷۸) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

اطراف خود دارند، می‌شوند (Whiffin, 2004). به‌دنبال این فرآیند، باندهایی از سیمان کلسیتی در فضاهای خالی موجود بین دانه‌های خاک تشکیل می‌شوند و باعث چسبیدن ذرات خاک با یکدیگر و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می‌شوند. در شکل ۵ به‌طور شماتیک تمام واکنش‌های شیمیایی که در ماتریکس خاک به وقوع می‌پیوندند، نشان داده شده است.

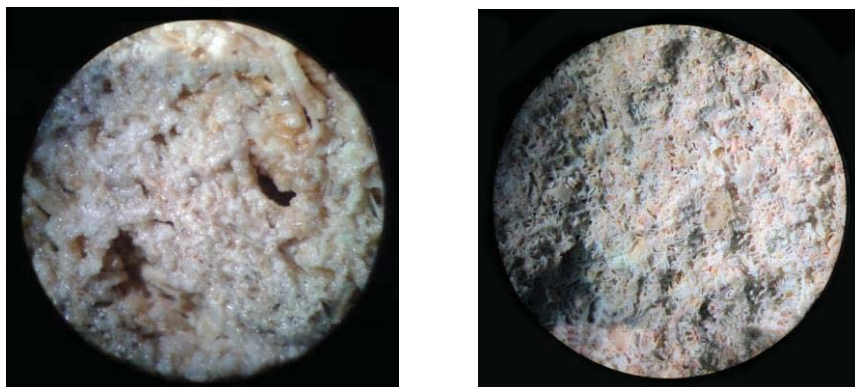


شکل ۵. تصویر شماتیک از واکنش‌های بیوشیمیایی در ماتریکس خاک (Ozdogan, 2010)

سردا و همکاران در سال ۲۰۰۹، رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم را در آجر به کار بردند و تأثیر مطلوبی را مشاهده کردند که به‌دلیل کاهش میزان جذب آب در آجرها ناشی از فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تشکیل سیمان کلسیتی بود. آن‌ها از باکتری موردنظر برای تشکیل سیمان کلسیتی استفاده کردند. در این تحقیق با استفاده از نتایج و تجربیات مطالعات قبلی (آقایاری، ۱۳۹۱؛ فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰) پس آماده سازی نمونه‌های آزمایش، سنگ‌ها را درون سطوحی محتوی محیط کشت با pH ۸ و ۹٪ حجمی باکتری، قرار داده شد تا اشباع شوند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، محلول ۰/۵ مولار اوره و کلرید کلسیم به محیط اضافه شد و محیط به مدت ۱۵ روز نگهداری شدند.

ارزیابی روش های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات... (۲۷۹)

پس از آن نمونه‌ها برداشته شده و بعد از خشک شدن، مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه سنگ بهسازی شده با میکروارگانسیم باکتریایی (راست) و نمونه شاهد (چپ). بزرگنمایی ۴ برابر

۳- آزمایشات مقاومت سنجی روش‌های استحکام بخشی نتایج و بحث

در این پژوهش سه روش استحکام بخشی برای بهسازی سنگ‌های لوماشل مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. بهسازی با آب آهک به‌عنوان یکی از مرسوم‌ترین روش‌های غیر آلی، بهسازی با اپوکسی به‌عنوان یکی از روش‌های مرسوم استحکام بخشی شیمیایی و بهسازی با دوغاب بیولوژیکی به‌عنوان یکی از جدیدترین راهکارها با استفاده از میکروارگانسیم‌های قلیایی، استفاده شده است. پس از استحکام‌بخشی نمونه سنگ‌ها، جهت بررسی تأثیرات این استحکام‌بخش‌ها بر نمونه‌های مورد نظر، آزمایش‌های فیزیکی، مقاومتی، دوام داری بر روی سنگ‌ها صورت گرفت و سه ماده مذکور با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

این آزمایش‌ها، هم روی نمونه‌های استحکام بخشی شده و هم روی نمونه سنگ اولیه فاقد استحکام بخش، صورت گرفت. هدف از انجام این آزمایش‌ها، بررسی تأثیر مواد به‌کار برده شده بر روی خواص فیزیکی، مقاومتی، دوام داری مکانیکی و شیمیایی نمونه سنگ‌های مورد نظر و مقایسه این سه ماده استحکام‌بخش با یکدیگر است. آزمایش‌های انجام شده بر اساس نقشی که در دوام داری سنگ دارند، به دو گروه پارامترهایی که رابطه مستقیمی با دوام داری سنگ دارند (دانسیته، مقاومت تک

(۲۸۰) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

محوری، شاخص بار نقطه‌ای و شاخص دوام) و پارامترهایی که رابطه معکوس با دوام داری سنگ دارند (جذب آب، تخلخل، سایش لس آنجلس، ارزش ضربه ای، درصد افت وزنی در برابر سولفات‌ها) تقسیم می‌شوند. در این تحقیق برای تعیین ۷ پارامتر مربوطه، بیش از ۸۰ آزمایش انجام گرفت. جدول ۲ خلاصه‌ی واحدی از نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای سه نمونه استحکام بخشی شده و نمونه سنگ شاهد بدون استعمال ماده استحکام بخش، ارائه نموده است.

جدول ۲. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده					
نتایج آزمایش بر روی نمونه سنگ‌ها				پارامتر	خصوصیات
بایو	رزین	آب آهک	نمونه شاهد		
۸	۳/۴	۱۱/۲	۹/۴	جذب آب (%)	فیزیکی
۱۶/۸	۱۷/۲	۱۵/۲	۱۶/۴	دانسیته (KN/m^3)	
۱/۸	۱/۴۵	۱/۲	۱/۵۵	شاخص بار نقطه‌ای	مقاومتی
۳۳/۵	۳۱	۳۰	۳۲	(MP) مقاومت تک محوری (MP)	
۱۸/۱۳	۹/۸۱	۲۵/۴۴	۲۰/۸۴	ارزش ضربه ای (%)	دوام داری مکانیکی
۸۰/۰۰۳	۹۵/۵۰۸	۷۲/۸۴۹	۷۹/۸۲۰	شاخص دوام (۱۵)	
۳۹/۸۹	۳۱/۷۵	۵۷/۴۸	۴۳/۹۶	سیکل (%) سایش لس آنجلس (%)	
۷/۱۱	۳/۵	۱۳/۱۲	۱۰/۳۵	سلامت سنگ (۱۰)	دوام داری شیمیایی
				سیکل (%)	

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش از سه روش استحکام بخشی توسط آب آهک، رزین اپوکسی و

دوغاب میکروبیولوژیکی برای بهبود خصوصیات فیزیکی، مقاومتی و دوام داری سنگ لوماشل استفاده شد. پس آماده سازی و استعمال هر یک از استحکام بخش‌های ذکر شده بر روی نمونه‌ها، آزمایش‌هایی بر سنگ‌های لوماشلی انجام گرفت و نتایج آن به صورت تفکیک شده برای هر آزمایش بیان شد. در مقایسه نمونه سنگ شاهد با نمونه سنگ استحکام بخشی شده با آب آهک مشاهده می‌شود که آب آهک سبب شده تا پارامترهایی که نسبت مستقیم با دوام داری سنگ دارند کاهش یابد. دانسیته ۰.۸٪، شاخص بار نقطه‌ای ۰.۲۲٪، مقاومت تک محوری ۰.۶٪ و شاخص دوام ۰.۹٪ کاهش یافته‌اند. همچنین پارامترهایی که نسبت معکوس با دوام‌داری دارند پس از استعمال آب آهک افزایش یافته‌اند. جذب آب ۰.۱۹٪ افزایش یافته و ارزش ضربه‌ای ۰.۲۱٪، سایش لس‌آنجلس ۰.۳۰٪ و سلامت سنگ در مقابل سولفات سدیم نیز ۰.۲۶٪ افزایش یافته‌اند. آب آهک سبب شده تا شاخص پوکی و تخلخل سنگ افزایش یافته و سبب افزایش جذب آب و کاهش ویژگی‌های مقاومتی و دوام‌داری شود. این در حالی است که در مقایسه نمونه استحکام بخشی شده با رزین اپوکسی و نمونه سنگ شاهد، دانسیته ۰.۴٪، شاخص دوام ۰.۲۰٪، ارزش ضربه‌ای ۰.۵۳٪، سایش لس‌آنجلس ۰.۲۸٪، سلامت سنگ در مقابل سولفات سدیم ۰.۶۶٪ و جذب آب ۰.۶۴٪ بهبود پیدا کرده‌اند و تنها شاخص بار نقطه‌ای ۰.۶٪ و مقاومت تک محوری ۰.۳٪ کاهش یافته‌اند و آن هم به خاطر خاصیت چسبندگی و الاستیکی است که این رزین به سطح سنگ می‌دهد. رزین سبب ایجاد یک لایه روی سطح سنگ می‌شود که به شدت به سنگ می‌چسبد و خلل و فرج سنگ را پُر کرده، باعث کاهش جذب آب و بهبود ویژگی‌های دوام داری مکانیکی و شیمیایی سنگ می‌شود. اما هنگامی که نمونه استحکام‌بخشی شده با دوغاب بیولوژیکی با نمونه سنگ شاهد مقایسه کردیم مشخص شد که این محلول جذب آب را ۰.۱۵٪، شاخص بار نقطه‌ای ۰.۱۶٪، مقاومت تک محوری ۰.۵٪، ارزش ضربه‌ای ۰.۱۳٪، سایش لس‌آنجلس ۰.۹٪ و سلامت سنگ در مقابل سولفات سدیم را تا ۰.۳۱٪ بهبود داده و در دانسیته و شاخص دوام بهبود ۰.۳٪ ایجاد کند. با توجه به نتایج حاصله مشخص است که محلول بیولوژیکی توانسته است تخلخل سنگ را کاهش داده، باعث کاهش جذب آب و بهبود پارامترهای مقاومتی و بخشی از پارامترهای دوام داری شود. کاهش تخلخل سبب شده تا سنگ در برابر سولفات سدیم نیز مقاوم‌تر عمل کند. واضح است که استفاده از روش آب‌آهک نه تنها سبب بهبود

(۲۸۲) همایش ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث فرهنگی

خصوصیات سنگ نشده، بلکه باعث کاهش امتیاز سنگ نیز شده است. به نظر می‌رسد در این روش ذرات ریز کلسیم هیدروکسید، همراه با آب در سنگ نفوذ کرده و عوامل مخرب را تشدید می‌کنند. آب از طریق فرآیند انحلال بلورها از مرز آنها، تأثیر مخربی روی سنگ گذاشته و سبب افزایش پوکی و افزایش فضاهای خالی و تخلخل سنگ و در نتیجه، افزایش جذب آب سنگ شده است. از این رو می‌توان گفت میزان تأثیر مفید آب آهک در نمونه سنگ‌های مذکور بسیار کم است و تأثیر چندان مناسبی روی خواص مکانیکی سنگ ندارد و نمی‌توان انتظار داشت استعمال این ماده استحکام‌بخش تغییر مثبتی در خواص مکانیکی سنگ ایجاد کند. از طرف دیگر، باید توجه داشت که گرچه مزیت استفاده از هیدروکسید کلسیم، وجود خواص فیزیکی و شیمیایی یکسان با ساختار سنگ آهک است، اما همین مسئله را می‌توان از نقاط ضعف این استحکام‌بخش نیز به حساب آورد. زیرا ماده استحکام‌بخش باید از سنگ در برابر عوامل مخرب و فرساینده محیطی محافظت کند و سرعت تخریب سنگ را کاهش دهد. ولی هنگامی که خواص فیزیکی و شیمیایی ماده استحکام‌بخش با سنگ، یکسان است، بنابراین، شرایط تخریب آن نیز همانند سنگ است و عواملی که سبب تخریب سنگ آهک می‌شود، روی این ماده استحکام‌بخش نیز اثر سوء دارند (Latham 1991). از طرفی استفاده از محلول‌های بیولوژیکی روشی جدید برای بهسازی خاک و نمونه‌های ماسه‌ای است که محققان نیز از آن نتایج مطلوبی بدست آورده‌اند. در این تحقیق سعی شد تا با بهره‌گیری از نتایج بررسی‌های قبلی برای ماسه و آجر، از رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم به‌منظور بهسازی سنگ‌های لوماشلی استفاده شود که نتیجه مناسبی به‌دست آمد. اما با توجه به ساختار متفاوت سنگ نسبت به ماسه و خلل و فرج‌های بزرگ و بسیار زیاد موجود در لوماشل، پر شدگی کامل همه منافذ موجود در سنگ انجام نگرفته است. لذا این روش بهسازی همچنان نیاز به بررسی‌های جامع‌تر در مورد گونه‌های مختلف باکتری‌های خانواده باسیلوس‌ها و اثر آنها روی سنگ‌ها و روش سنتز و نگهداری احساس می‌شود. گرچه استفاده از رزین‌های آلی و از جمله اپوکسی برای استحکام‌بخشی سنگ لوماشل، نسبت به استفاده از آب آهک و محلول بیولوژیکی ارجحیت دارند، اما به‌دلیل ساختار فیزیکوشیمیایی متفاوت این ماده نسبت به سنگ مورد مطالعه و نفوذپذیری بسیار ناچیز در سنگ، می‌توان اپوکسی را یک استحکام

ارزیابی روش های استحکام بخشی جهت بهبود مشخصات... (۲۸۳)

بخش سطحی موقت به حساب آورد که بایستی به طور دوره‌ای و تنها جهت استحکام بخشی سطح سنگ از آن استفاده نمود.

سپاسگزاری

کلیه مراحل سنتز و عمل‌آوری، همچنین استعمال و نگهداری در آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ، ژئوشیمی و زیست فناوری معدنی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفته است که بدین وسیله از آن مدیریت سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

آقایاری، ع؛ (۱۳۹۱) بررسی تغییرات خصوصیات بایو دوغاب‌ها (biogrout) در مقیاس آزمایشگاهی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان.

آموروسو، ج.ج و فاسینا؛ (۱۳۷۰)، فرسودگی سنگ و حفاظت از آن، آلودگی جوی، تمیز کردن، استحکام بخشی و حفاظت. مترجم: رسول وطن‌دوست، تهران: میراث فرهنگی. نسخه اصلی ۱۹۸۳.

تلخابلو، م؛ حسینی، ر؛ نیکودل، م.ر؛ ارومیه‌ای، ع؛ حافظی مقدس، ن؛ (۱۳۸۶، ج) ارزیابی عملکرد و طبقه بندی زوال سنگ‌های لوماشل در موج شکن‌های توده سنگی سواحل جنوبی ایران"، پنجمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران

حسینی، ر؛ نیکودل، م.ر؛ حافظی مقدس، ن؛ تلخابلو، م؛ (۱۳۸۵) ارزیابی صحرایی، آزمایشگاهی و پتروگرافی عملکرد سنگ‌های لوماشلی (مطالعه موردی موج‌شکن‌ها کنگ، استان هرمزگان)"، دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

زمانیان، م؛ (۱۳۸۸) مقایسه کاربرد دیسپرسیون نانو ذرات کلسیم هیدروکسید در الکل با روش شیر آهک در استحکام بخشی آثار سنگ آهکی، پایان نامه کارشناسی ارشد مرمت اشیا تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان.

فهمی فر، ا؛ سروش، ح؛ (۱۳۸۰) آزمایش‌های مکانیک سنگ (مبانی نظری و استانداردها)، جلد اول (آزمون‌های آزمایشگاهی)، چاپ اول، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک.

کاتالوگ شرکت شیمیایی بین‌المللی BASF، Masterseal 551.

ناصری، ع.ر؛ (۱۳۷۶) تعیین معیارهای مناسب برای کاربرد سنگ در احداث سازه‌های دریایی، جنوب شرق ایران (چابهار)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.

- Ashurst J, Ashurst N (1988) Practical building conservation. Vol. 1. Stone masonry. Gower Technical Press, Aldershot
- Borgia, G. C., Camaiti, M., Cerri, F., Fantazzini, P., & Piacenti, F. (2000). Study of water penetration in rock materials by Nuclear Magnetic Resonance Tomography: hydrophobic treatment effects. *Journal of cultural heritage*, 1(2), 127-132.
- D'Arienzo, L. Scarfato, P & Incarnato, L. (2008). New polymeric nanocomposites for improving the protective and consolidating efficiency of tuff stone. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 253-260
- Doehne, E & Price, C. A. (2010). *Stone conservation: an overview of current research*. Getty Publications.
- Google Earth., (2013). Gheshm Island," 26°41'43"N 55°37'06"E N.Google Earth. January 28, 2013. January 11, 2015
- Latham, J.P.,(1991), Degradation model for rock armour in coastal engineering", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, London, Vol.24, pp. 101-118,
- Ozdogan, A.,(2010) A study on the triaxial shear behavior and microstructure of biologically treated sand specimens. MSc thesis, University of Delaware, USA.,
- Rodrigues, J. D. (2001). Consolidation of decayed stones. A delicate problem with few practical solutions. *Historical Constructions*, 3-14.
- Whiffin, V.S.,(2004) Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement. Ph.D. thesis, School of Biological Sciences and Biotechnology, Murdoch University, Western Australia.

Evaluation of Consolidation Methods to Improve the Durability Properties of Carbonate Lomashell Stone

Ehsan Mohamadi*

Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

Alireza Baghbanan

Associated Professor, Faculty of Mining Engineering, Isfahan

University of Technology

Farshad Ramezani Far

Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

Hamid Hashem Alhosaini

Associated Professor, Faculty of Mining Engineering, Isfahan

University of Technology

Mehdi Razani

PhD candidate Art University of Isfahan / Instructor Tabriz

Islamic Art University

Abstract

According to accessible materials, porous Lomashell stone has been used in many structures and stone monuments in south coasts of Iran, this type of carbonate stone mostly has a poor physical and mechanical properties and it is generally unsuitable for building structures, since consolidation and retrofitting this stone is very important for application as a material in the buildings. this research was done with sampling as a field work from Holor mine in Dargahan from Northeast of Qeshm Island/Iran, Rock samples for bearing the consolidation process were divided into two categories: 1) untreated stone, 2) treatment stone with consolidations; include: A) Lime water, B) Epoxy resin, C) biogrout. the results of engineering durability tests include: physical properties, Slake durability (chemical and mechanical) shows that: lime water due to high water content causes the texture decay with decreasing %8.5 of mechanical properties then untreated samples, bio-consolidation with biogrout causes reducing the water absorption and %7 the

* Correspondent author: mohammadi_iut@yahoo.com