



دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۴/۱۹

مطالعه و استحکام بخشی سنگ آهک در سنگ نوشته خرم آباد لرستان

عاطفه شکفته* امیدعودباشی** ملیحه بکرانی*** مسعودسیا پوش**** بهنودسیا پوش*****

چکیده

استحکام بخشی آثار سنگی یکی از موارد در عملیات حفاظت و مرمت است که طی سال‌های گذشته بسیار مورد توجه متخصصان حفاظت و مرمت آثار تاریخی بوده است. یکی از روش‌های مورد استفاده در حفاظت و مرمت آثار سنگی ساخته شده از سنگ آهک، به کاربردن روش آهک است. بخشی از این روش، کاربرد آب آهک در استحکام بخشی سنگ است. این روش در طول سال‌های گذشته در مناطق مختلف دنیا به ویژه انگلستان استفاده شده و نتایج مناسبی هم با کاربرد این ماده در استحکام بخشی سنگ در بعضی پژوهش‌ها به دست آمده است. در مقاله پیش رو، نخست روش‌های مختلف استحکام بخشی سنگ معرفی و دسته بندی شده و پس از آن، روش آهک و مکانیزم استحکام بخشی سنگ آهک با استفاده از آب آهک معرفی گردیده است. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی کاربردی روش آهک جهت استحکام بخشی به آثار سنگی قرار گرفته در فضای باز است. پرسش اصلی مقاله حاضر، ارزیابی کارایی و قابلیت روش آهک در استحکام بخشی سنگ آهک تشکیل دهنده اثر سنگ نوشته خرم آباد است. نتایج مطالعه و آزمایش روی اثر سنگ نوشته خرم آباد متعلق به قرن ششم (ه.ق.) ارائه شده است. برای این مطالعه از روش‌های میدانی و آزمایشگاهی که شامل پتروگرافی، XRF، XRD و SEM-EDS است، استفاده شد. نتایج مطالعات نشان دهنده وقوع هوازدگی فیزیکی و شیمیایی در ساختار سنگ آهک این اثر و از بین رفتن بخشی از کتیبه آن به سبب هوازدگی است. در پایان عملیات حفاظت و مرمت انجام شده روی اثر با توجه به نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی و میدانی ارائه شده است. عملیات اصلی حفاظت روی اثر، استحکام بخشی سنگ با استفاده از روش آهک است. نتایج به دست آمده پس از پنج سال، بیانگر تأثیر مثبت روش یاد شده در کنترل روند فرسایش در سنگ نوشته خرم آباد است.

کلیدواژگان: سنگ نوشته خرم آباد، سنگ آهک، هوازدگی، استحکام بخشی، روش آهک.

* دانشجوی دکتری، رشته مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

** دانشجوی دکتری، رشته مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان (نویسنده مسئول).

o.oudbashi@au.ac.ir

*** کارشناس ارشد، رشته مرمت بناها و بافت‌های تاریخی.

**** دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز.

***** کارشناس ارشد، رشته مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی.

مقدمه

فرسایش آثار سنگی و حفاظت از آنها، یکی از موضوعات مورد توجه و مهم در زمینه حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری است که طی دهه‌های گذشته مرمت‌گران، متخصصان و دانشمندان حوزه‌های مختلف آن را بازبینی و مطالعه کرده‌اند (Schaffer, 1932; Ashurst et al, 1988; Selwitz, 1992; Price, 1996; Ashurst et al, 1998; Delgado Rodrigues et al, 2008; Doehne et al, 2010).

گونه‌های مختلفی از فرسایش سنگ شناسایی و ثبت شده است که شامل تغییر رنگ، فرسایش ماده و تغییرات مشخصات و شرایط فیزیکی و شیمیایی در سطح آثار است (Etymezian et al, 1998: 187). عوامل گوناگونی مانند آلاینده‌های جوی، رشد عوامل بیولوژیک بر سطح سنگ، تغییرات دما، رطوبت، باد و ... بر آثار سنگی تأثیر گذاشته و سبب رخ دادن فرسایش در آنها شده‌اند (Haneef et al, 1992: 105-106; Doehne et al, 2010: 9-26). این عوامل را به دو گونه درونی و بیرونی می‌توان تقسیم‌بندی کرد (Delgado Rodrigues, 2001: 4).

حفاظت از آثار سنگی همواره موردی پیچیده و حساس بوده است. متغیرهای مختلفی جهت شناخت مشکلات، تعیین عملیات حفاظتی مورد نظر و انتخاب روش‌ها و درمان‌های مورد نیاز باید مد نظر قرار گیرند (Ferreira Pinto et al, 2008a: 38). عملیاتی همچون پاک‌سازی، استحکام بخشی، بازسازی و پوشش دهی از مواردی هستند که بسته به شرایط و وضعیت آثار سنگی ممکن است روی اثر اعمال شوند. یکی از این موارد، استحکام بخشی است که در طول قرن گذشته بسیار به آن توجه شده است. افزون بر این، پژوهش‌های متعددی برای شناخت مواد مناسب جهت استحکام بخشی، تأثیر آنها روی سنگ و شرایط آنها در دراز مدت در محیط‌های مختلف انجام شده است.

یکی از مواد قابل کاربرد در استحکام بخشی سنگ، آب آهک (روش آهک) است که در بعضی نقاط جهان مانند انگلستان بسیار استفاده شده است. در این مقاله نخست، استحکام بخش‌های مورد استفاده در حفاظت و مرمت آثار سنگی بررسی شده و پس از آن، روش آهک در استحکام بخشی سنگ معرفی شده است. در نهایت، مطالعات فنی انجام شده روی اثر سنگ‌نوشته خرم‌آباد و عملیات استحکام بخشی آن ارزیابی شده است.

پرسش اساسی پژوهش حاضر این است که آیا روش آهک از نقطه نظر کاربرد و تأثیر گذاری، روشی مناسب برای استحکام بخشی آثار سنگی قرار گرفته در فضای باز است؟ بر همین اساس، مطالعه و استحکام بخشی روی اثر تاریخی سنگ‌نوشته خرم‌آباد صورت پذیرفته است.

استحکام بخشی سنگ

طی دهه‌های گذشته، مواد شیمیایی مختلفی برای تقویت و حفظ آثار سنگی هوازده در برابر اضمحلال و فرسایش‌های بعدی از سوی مرمت‌گران و دانشمندان مرمت به‌وسیله یک فرایند شناخته شده به نام استحکام بخشی^۱ استفاده شده است (Selwitz, 1992: 2). استحکام بخشی، یکی از مهم‌ترین و مورد توجه‌ترین عملیات مداخله‌ای مرمتی در سنگ‌های ساختمانی، مجسمه‌ها، اشیاء و تزئینات سنگی در آثار تاریخی و فرهنگی است (Theoulakis et al, 2008: 279). این عملیات، برای بهبود بخشی به چسبندگی سنگ هوازده صورت می‌پذیرد، زمانی که، الگوهای آسیب جدی در سنگ دیده شود یا چسبندگی در ساختار سنگ از بین رود (Ferreira Pinto et al, 2008a: 39; Delgado Rodrigues, 2001: 3). در مرحله ابتدایی، فرایند فرسایش سطح خارجی سنگ را تحت تأثیر قراردادده و لایه‌ای را با ضخامت متغیر ایجاد می‌کند. خواص سنگ به تدریج از مغز سنگ سالم به لایه سطحی کاملاً آسیب دیده تغییر خواهد کرد. ویژگی اصلی این لایه فرسایش یافته، ازدست دادن ماده، افزایش ناهمواری و تخلخل است که به سبب انحلال سیمان طبیعی‌ای چسباننده ذرات تشکیل دهنده سنگ یا شکست اتصالات بین دانه‌ای به دلیل فشارهای داخلی بوجود می‌آید (Theoulakis et al, 2008: 279; Clifton, 1984; Delgado Rodrigues, 2001: 4). به بیان دیگر، زمانی که ساختار سنگ به دلیل فرسایش ضعیف شود، ماده استحکام بخش^۲ جهت مرمت و بازگرداندن استحکام به سطح بیرونی و جلوگیری از فرسایش، استفاده خواهد شد (Doehne et al, 2010: 35; Theoulakis et al, 2008: 279). فرایند استحکام بخشی، باید اجازه دهد تا رطوبت از بین بافت سنگ عبور کند و در عین حال، سنگ را هم در برابر تأثیر رطوبت و عوامل شیمیایی حفظ کند (Selwitz, 1992: 3). بهترین حالت این است که سنگ به حالت اولیه خود پیش از آسیب بازگردد و از آسیب‌های بعدی در امان بماند. با این همه، بازگرداندن استحکام تاحدی که بقای اثر را به حداکثر برساند نیز مورد تأیید است. استحکام بخشی سنگ، آسان به نظر می‌رسد و معمولاً به استفاده از یک ماده گفته می‌شود که در سنگ آسیب دیده نفوذ کرده، ذرات آن را دوباره به هم بچسباند و بخش‌های سالم سنگ را نیز در برابر آسیب‌های بعدی محافظت کند (Ginell et al, 2001). زمانی تصمیم‌گیری برای استفاده از استحکام بخش‌ها مورد توجه است که از بین رفتن لایه سطحی سنگ، موجب ازدست دادن ارزش‌ها و جنبه‌های تاریخی و هنری اثر شده یا فرسایش ماده، سبب در معرض خطر قرار گرفتن پایداری ساختاری کلی اثر شود (Delgado Rodrigues, 2001: 4).

تقسیم‌بندی کرده‌اند (Öztürk, 1992: 3-19). با این حال، بر اساس منابع مختلف و تقسیم‌بندی‌های انجام‌شده، استحکام‌بخش‌های مورد کاربرد در مرمت آثار سنگی را از نقطه نظر شیمیایی می‌توان به دو دسته اصلی؛ استحکام‌بخش‌های معدنی^۶ و آلی^۷ تقسیم کرد (Delgado Rodrigues, 2001: 5; Filder, 2004: 33; Ferreira Pinto et al, 2008a: 39; Doehne et al, 2010: 36).

استحکام بخش‌های معدنی دو گروه اصلی استحکام‌بخش‌های سیلیسی، هیدروکسیدهای قلیایی خاکی و استحکام بخش‌های معدنی متفرقه و استحکام‌بخش‌های آلی سه گروه اصلی آلکوکسی‌سیلان‌ها، پلی‌مرهای آلی سنتزی و موم‌ها هستند (نمودار ۱).

الف. استحکام‌بخش‌های معدنی

استفاده از مواد معدنی‌ای همچون شیشه محلول^۸، آب آهک، هیدروکسید باریم و موادی از این دست، از قرن نوزدهم میلادی برای استحکام‌بخشی سنگ انجام شده است (Öztürk, 1992: 3; Weber, 1985: 16). برخلاف زمان به نسبت طولانی مطالعه و استفاده از مواد معدنی در استحکام‌بخشی آثار سنگی، میزان نتایج مثبت در استفاده از این مواد جالب توجه نبوده است. با این همه، استفاده از بعضی مواد معدنی برای استحکام‌بخشی سبب کاهش فرسایش در برخی از انواع سنگ‌ها شده است. به ویژه اینک، نتایج مثبت در استفاده از موادی مانند هیدروکسید باریم^۹ و هیدروکسید کلسیم^{۱۰} موجب توجه بسیار به این دسته از مواد در سال‌های اخیر شده است (Doehne et al, 2010). استفاده از استحکام‌بخش‌های معدنی جهت تولید یک فاز

استحکام‌بخش‌ها، به سبب برگشت‌ناپذیری و تأثیرات نامطلوبی که ممکن است بر آثار سنگی وارد کنند، موادی بسیار حساس و مخاطره‌آمیز هستند (Ferreira Pinto et al, 2008: 39). از این رو، مطالعات گوناگونی درباره نوع استحکام‌بخش‌ها و شیوه استفاده از آنها در حفاظت و مرمت آثار سنگی انجام شده است (e.g.: Kotlik et al, 1983; Price et al, 1988; Schnabel, 1992; Kumar et al, 1997; Lanterna et al, 2000; Wheeler, 2005).

یک ترکیب استحکام‌بخش مناسب برای حفاظت آثار سنگی باید از شرایط و معیارهای زیر برخوردار باشد (Weber, 1985: 16; Theoulakis et al, 2008: 282-285):

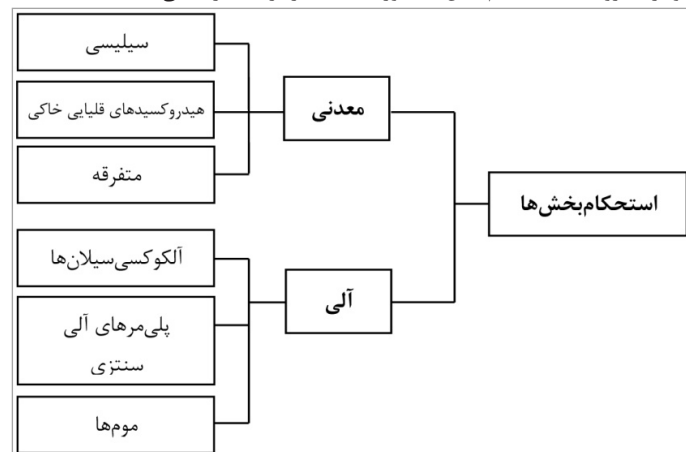
- ماده چسباننده مقاوم در برابر هوازدگی تولید کند (ترجیحاً معدنی).

- به خوبی در عمق بافت سنگ نفوذ کند؛ دست کم از لایه هوازده و تغییر شکل یافته سنگ تا زیر لایه سالم.
- بدون ایجاد لایه قابل تشخیص، در مقطع عرضی سنگ یک لایه استحکام‌بخش صاف در بافت ایجاد کند.
- سبب ایجاد محصولات ثانویه همچون نمک‌های محلول مخرب در بافت سنگ نشود.
- هیچ‌گونه تغییر رنگی در سطح سنگ ایجاد نکند.
- سبب دگرگونی شرایط فیزیکی اصلی سنگ همچون: نفوذ بخار آب، انبساط حرارتی و از این دست نشود.
- قابلیت جذب آب و دیگر مواد فرساینده را کاهش دهد.

انواع استحکام‌بخش‌ها

در برخی منابع، استحکام‌بخش‌های قابل استفاده در آثار سنگی را به چهار گروه استحکام‌بخش‌های معدنی، آلکوکسی‌سیلان‌ها^{۱۱}، پلی‌مرهای آلی سنتزی^{۱۲} و موم‌ها^{۱۳}

نمودار ۱. گروه‌بندی استحکام‌بخش‌های مورد استفاده در مرمت آثار سنگی.



(نگارندگان)

کربنات کلسیم در بافت آسیب دیده سنگ است (Tiano et al, 2006).

ب. استحکام بخش های آلی

یکی از گروه های عمده مواد قابل کاربرد در استحکام بخشی آثار سنگی، مواد آلی هستند. مواد آلی گوناگونی در مرمت آثار سنگی استفاده شده اند. با این همه، استحکام بخش های آلی شامل سه دسته اصلی آلکوکسی سیلان ها، پلی مرها و موم ها هستند. آلکوکسی سیلان ها و آلکیل آلکوکسی سیلان ها، یا به اختصار سیلان ها، بی شک پر استفاده ترین مواد استحکام بخش در آثار سنگی بوده و در دهه های اخیر توجه به نسبت گسترده ای به استفاده از آنها در استحکام بخشی آثار سنگی شده است (Doehne et al, 2010: 39-40; Ferreira Pinto et al, 2008b: 131; Oliver, 2002: 39; Brus et al, 1996;). کاربرد این گروه مواد در استحکام بخشی سنگ به نیمه دوم قرن ۱۹ میلادی بازمی گردد (Wheeler, 2008: 41; Öztürk, 1992: 10). مواد متیل تری متوکسی سیلان^{۱۹} (MTMOS)، تترا اتوکسی سیلان^{۲۰} (TEOS) یا اتیل سیلیکات^{۲۱} و متیل تری اتوکسی سیلان^{۲۲} (MTEOS) از استحکام بخش های آلکوکسی سیلان استفاده شده در حفاظت سنگ هستند (Wheeler, 2008: 43; Ferreira Pinto et al, 2008b: 131-132; Öztürk, 1992: 31-33). پلی مری سنتزی را می توان گروه بزرگی از مواد قابل کاربرد در حفاظت و مرمت دانست. این دسته از مواد، در عملیات گوناگون مرمت مانند پوشش دهی، بازسازی و استحکام بخشی استفاده می شوند. رزین های اپوکسی و اکریلیک، از جمله پلی مرهای سنتزی استفاده شده در استحکام بخشی آثار سنگی هستند (Öztürk, 1992: 12-17; Doehne et al, 2010: 41-42). رزین های اپوکسی، طی دهه های اخیر بسیار مورد توجه بوده اند و کاربرد آنها نتایج مثبت و منفی ای را در برداشته است (Selwitz, 1992; Selwitz, 1974; Doehne et al, 2010; Gauri, 1974). این نتایج به حلال مورد استفاده، روش کاربرد و شرایط پس از اعمال آنها بر آثار سنگی بستگی دارد (Ferreira Pinto et al, 2008a; Koltik et al, 1983: 75).

کاربرد رزین های اکریلیک در استحکام بخشی سنگ نیز، در طول سال های گذشته چشمگیر بوده است. مونومرهای متیل متاکریلات^{۲۳} و بوتیل متاکریلات^{۲۴}، رزین های اکریلیکی هستند که در استحکام بخشی از آنها استفاده شده است. پلیمریزاسیون این مواد نیز با استفاده از روش های مختلفی مانند حرارت دهی با یک آغاز کننده، اشعه ماورای بنفش، اشعه گاما و ... صورت گرفته است (Öztürk, 1992: 13-14). البته،

مقاوم در برابر فرسایش از محلول آبی در خلل و فرج سنگ هوا زده است (Öztürk, 1992: 3). ته نشینت ماده به دست آمده در حفره های سنگ می تواند به دلیل تبخیر حلال یا واکنش شیمیایی با سنگ ایجاد شود که موجب چسبیدن ذرات سنگ به یکدیگر می شود. فرض بر این است که ماده چسباننده ای که از استحکام بخش به دست می آید، باید مشابه با سیمان اصلی چسباننده سنگ باشد.

استحکام بخش های سیلیسی برای استحکام بخشی سنگ آهک و ماسه سنگ استفاده شده اند. کاربرد این استحکام بخش ها، بر اساس تشکیل اکسید سیلیسیوم (سیلیس^{۱۱}) یا سیلیکات های نامحلول در حفره های سنگ و ایجاد لایه ای محافظ در دانه ها و چسباندن آنها به هم دیگر است. استحکام بخش های سیلیسی شامل ترکیبات آلکالی سیلیکات^{۱۲} و فلورو سیلیکون^{۱۳} (Ibid: 4) و هیدروکسید های قلیایی خاکی شامل هیدروکسید باریم (باریتا) و هیدروکسید کلسیم (آب آهک) هستند (Delgado Rodrigues, 2001; Theoulakis et al, 2008: 281; Drdácý et al, 2008: 299). به دلیل اینکه استحکام بخش های متفرقه معدنی، دارای ترکیبات مختلفی مانند اکزالات های کلسیم^{۱۴}، باریم^{۱۵} و آمونیوم^{۱۶} و آلومینات های باریم^{۱۷} هستند، نمی توان آنها را در دو گروه دیگر جای داد (Doehne et al, 2010: 38; Bracci et al, 2008: 81-82).

استفاده از استحکام بخش های معدنی در مقیاس نانو نیز، یکی از روش های جدید مورد استفاده در استحکام بخشی آثار سنگی است. برای نمونه، نانوذرات هیدروکسید کلسیم در الکل به عنوان ماده استحکام بخشی در سنگ های آهکی به کار رفته است (Doehne et al, 2010: 37). با این حال، به سبب جدید بودن این روش، میزان تأثیر آن در دراز مدت هنوز به اثبات نرسیده است.

به کاربرد مینرالیزاسیون تحریک شده باکتریایی^{۱۸} هم، به تازگی و طی دهه گذشته برای استحکام بخشی و حفاظت آثار و تزیینات سنگی توجه شده است. این روش، برای ایجاد ته نشینت کربنات کلسیم در بافت سنگ های آسیب دیده با استفاده از انواعی از باکتری ها، صورت پذیرفته است. در حقیقت، کربنات کلسیم از طریق فعالیت های زیستی این موجودات تولید شده و به دلیل ریز بودن ذرات آن، قابلیت نفوذ در بافت آسیب دیده سنگ را دارد (Jimenez-Lopez et al, 2007: 1929-1930). البته، روش های دیگری همچون استفاده از مواد آلی طبیعی و سنتزی مانند پروتئین (پلی پپتیدها) برای کنترل تبلور ذرات ماده معدنی استحکام بخش در بافت سنگ نیز پیشنهاد شده است. نتایج، بیانگر تأثیر به کارگیری پروتئین در کنار میکرو یا نانو ذرات هیدروکسید کلسیم در نفوذ و تبلور



کرد (Honeyborne, 1998: 166). به مجموع این روش‌ها در مرمت آثار سنگی، روش آهک^{۲۹} گفته می‌شود (Ashurst, 1998: 172; Doehne et al, 2010: 37).

استحکام بخشی با آب آهک

یکی از تکنیک‌های مورد استفاده در حفاظت آثار سنگی ساخته شده از سنگ آهک، استحکام بخشی با استفاده از آب آهک است. آب آهک، محلول بسیار رقیق هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) است. پس از اعمال آب آهک روی سنگ (سنگ آهک)، این ماده دی‌اکسید کربن را از هوا جذب کرده و به کربنات کلسیم تبدیل می‌شود که ماده اصلی ترکیب سنگ‌های آهکی است. ایده اصلی استفاده از روش یادشده این است که کربنات کلسیم تولید شده از آب آهک، در نواحی ضعیف شده و بین حفره‌های سنگ هوازده متبلور شده و سبب تقویت ساختار سنگ می‌شود. به سبب حلال بودن کم هیدروکسید کلسیم، نیاز به اعمال آب آهک به شکل مکرر روی سطح سنگ هست تا حفره‌ها و بخش‌های آسیب دیده سنگ تحت نفوذ هیدروکسید کلسیم حل شده در آب قرار گیرند (Honeyborne, 1998: 157; Hansen et al, 2003: 14).

آب آهک در حقیقت، آهک (CaO) خوابانده شده در آب است که به Ca(OH)_2 تبدیل می‌شود. هر لیتر از این محلول، حاوی ۱/۷-۱/۴ گرم ماده جامد است. دی‌اکسید کربن موجود در هوا، بر اساس واکنش زیر با هیدروکسید کلسیم ترکیب شده و کربنات کلسیم تولید می‌کند (Honeyborne, 1998: 166; Hansen et al, 2003: 14; Ashurst, 1998: 172):

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

بنابر آنچه گفته شد، هر ۱/۷ گرم هیدروکسید کلسیم، ۲/۳ گرم کربنات کلسیم تولید خواهد کرد. معمولاً، سنگ آهک حدود ۲۰٪ تخلخل دارد که بیانگر این است که هر ۵ لیتر حجم سنگ، حدود یک لیتر فضای حاوی هوا دارد. بنابراین، به ازای هر پنج لیتر سنگ، یک لیتر محلول نیاز است. چگالی جامد نرمال سنگ آهک 2720 kg/m^3 است ازین رو، ۲/۳ گرم کربنات کلسیم رسوب یافته از محلول آب آهک پس از تبخیر کامل، تنها ۰/۰۲ درصد از وزن سنگ آهک جامد است. این بیانگر این است که تعداد بسیار زیاد اعمال آب آهک برای استحکام بخشی به سنگ نیاز است که واحدی غیر عملی به نظر می‌رسد (Honeyborne, 1998: 166). لیکن، باید در نظر داشت که هدف استحکام بخشی تنها پر کردن فضای خالی موجود در بافت سنگ نیست

مشکلاتی مانند ترک خوردن سنگ هنگام پلی‌مریزاسیون را می‌توان به عنوان معضلات استفاده از این مواد به شمار آورد. استفاده از مخلوطی از دو یا چند مونومر اکریلیک به شکل کاپلی مر هم یکی دیگر از روش‌های به کارگیری اکریلیک‌ها در استحکام بخشی است (Öztürk, 1992: 14-15; Tabasso, 1995: 17). پارالوئید B72 (آکرلوئید B72) که کاپلی مر متیل متاکریلات و اتیل متاکریلات است، بیشتر به عنوان یک استحکام بخش سطحی در آثار سنگی استفاده شده‌اند (Öztürk, 1992: 15; Doehne et al, 2010: 42). در کنار آنها، کاپلی مرهای اکریلیک-سیلان، اکریلیک-سیلیکون و اکریلیک-فلوئوروکربن نیز مواردی از کاربرد این گونه مواد در استحکام بخشی آثار سنگی هستند (Charola et al, 1986; Öztürk, 1992: 16; Doehne et al, 2010: 42).

موم‌ها، به ویژه موم‌های طبیعی مانند موم زنبور عسل و موم پارافین، یکی دیگر از گروه‌های مواد آلی در استحکام بخشی آثار سنگی هستند. این مواد، در برابر نفوذ آب به بافت سنگ مؤثر بوده و از سوی دیگر، مقاومت را در سنگ‌های متخلخل بالایی برنند. موم میکروکریستالی، که نوع جدید و مشابهی از موم پارافین است نیز، دارای همین خواص است با این تفاوت که دارای بلورهای ریزتری از موم پارافین است. استفاده از موم‌ها به شکل مواد پوشش دهنده‌ای همچون موم کازمولوئید 80H^{26} نیز، یکی دیگر از مواد کاربرد این مواد به ویژه در سنگ‌های غیرمتخلخل و منسجم است. از موم‌ها هم به شکل محلول و هم مذاب استفاده می‌شود (Öztürk, 1992: 18-19; Amoroso et al, 1983: 31).

روش آهک

بسیار ذکر شده که ترکیب درمان سطحی در سنگ باید به ترکیب خود سنگ نزدیک باشد. امروزه نیز، توجه زیادی به استفاده از روش‌های استحکام بخشی همخوان با ساختار و ماهیت سنگ شده است. با این حال، رسیدن به چنین ترکیبی در انواع سنگ‌ها با ترکیبات متفاوت بسیار سخت به نظر می‌رسد.

یکی از این روش‌های مرمت سنگ، استفاده از محصولات به دست آمده از آهک در سنگ‌های آهکی است که در مراحل مختلفی از حفاظت و مرمت سنگ مانند استحکام بخشی و پر کردن بخش‌های کمبود، استفاده می‌شوند. در کل، روش آهک را می‌توان به سه بخش کلی؛ استحکام بخشی سطحی سنگ آهک با آب آهک، ثابت کردن قطعه‌های جدا شده و پر کردن درزها و کمبودهای کوچک با ملات آهک^{۲۷} و پوشش دهی به سطح سنگ با دوغاب آهک^{۲۸} تقسیم بندی

آهک اضافی را باید با اسفنج‌های فشرده شده در آب تمیز از سطح سنگ جمع‌آوری کرد چراکه، سنگ خشک قبل از درمان، قدرت جذب بیشتری دارد (Filder, 2002: 22).

استحکام بخشی سنگ نوشته خرم آباد

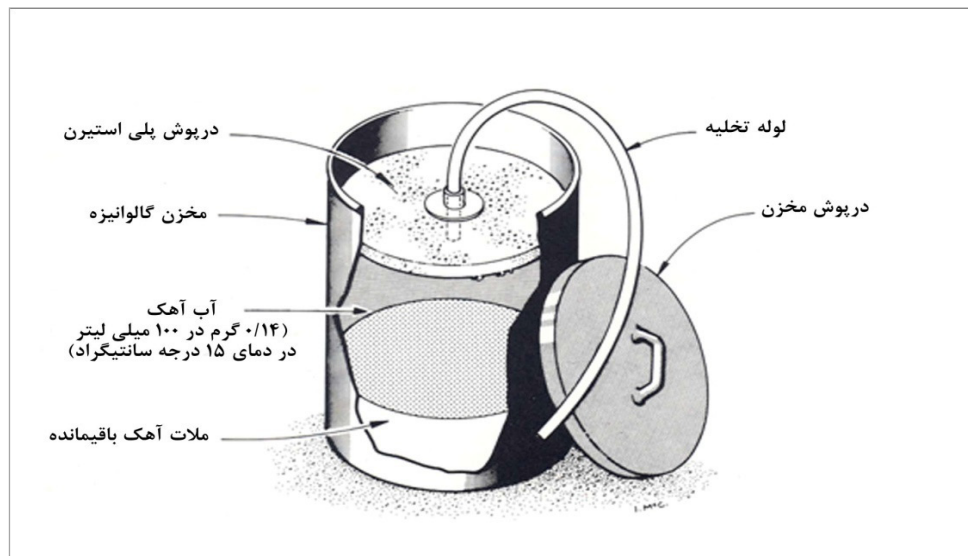
معرفی اثر

سنگ نوشته خرم آباد، یک ستون مکعب مستطیل سنگی است که از دل صخره‌ای سنگی تراشیده شده و به شکل ستونی کتیبه‌دار درآمده است. روی چهار سطح عمودی آن، کتیبه‌ای به خط کوفی و زبان فارسی نقر شده است.^{۳۰} تاریخ کتیبه نگاشته شده روی این سنگ، سال ۵۱۳ (ه.ق.) است که زمان حکومت سلجوقیان در ایران، به دستور حاکم شهر شاپورخواست، امیر اسفهلار کبیر ظهیر الدین و الدوله معین الاسلام طغرلتکین ابوسعید برسق بن برسق بن حسنویه، نگاشته شده است. این کتیبه دورتادور بخش میانی این ستون مکعبی را فرا گرفته است. به سبب وجود کتیبه، این اثر را سنگ نوشته می‌نامند. در گذشته، این اثر به نام‌های بردنوشته^{۳۱} و زرسنگ نیز معروف بوده است. این اثر، در جبهه شرقی خیابان شریعتی خرم آباد و دامنه کوه سنگ سوراخ که ادامه رشته کوه مدبه است، قرار گرفته است (تصویر ۲). موضوع کتیبه، بخشش مالیات چراگاهی در منطقه شاپورخواست است (ایزدپناه، ۱۳۷۶: ۵۷-۵۶).

پائین این ستون مکعبی شکل، دو ردیف پله در هر چهار وجه به شکل متصل و یکپارچه تراشیده شده که حالت سکوی دوپله‌ای را دارد که مکعب مستطیلی به شکل عمودی روی آن قرار گرفته است (تصویرهای ۵-۳). ارتفاع هر یک از دو پله

بلکه، پرکردن بخش‌های سطحی آسیب دیده مورد نظر است. نتایج بررسی‌ها نیز، نشان دهنده تأثیر این روش در استحکام بخشی آثار سنگی آسیب دیده البته با تعداد دفعات بسیار زیاد اعمال درمان است (Doehne et al, 2010: 37; Ashurst, 1998: 172).

برای آماده سازی آب آهک مورد نیاز جهت استحکام بخشی، از آهک زنده آب دهی شده استفاده می‌شود. وقتی که آهک زنده به یک تانک کم عمق حاوی آب افزوده شود، اکسید کلسیم به هیدروکسید کلسیم تبدیل می‌شود و محصولات آن استفاده‌های مختلفی دارند. سنگ آهک بیش از حد سوخته، دور ریخته می‌شود. ملات آهک، در ته ظرف جمع‌آوری شده و برای پر کردن قطعات و به عنوان چسب و پرکننده به شکل ملات و به گونه رقیق برای پوشش‌های حفاظتی نهایی روی سطح اثر استفاده می‌شود. باقی مانده شیری جمع شده روی آن به عنوان آب آهک شیره گیری می‌شود. روشی ساده برای تولید آب آهک (تصویر ۱)، ریختن پودر آهک در یک ظرف آب، تکان دادن و رها کردن آن با قرار گرفتن زیر یک درپوش مهر و موم شده با چوب پنبه یا پلی استیرن جهت جلوگیری از کربناته شدن است (Ashurst et al, 1988: 82). روش کار، صاف کردن محلول روشن تشکیل شده در بالای ظرف حاوی آب و پودر آهک و اسپری کردن آن روی سنگ آسیب دیده است. برای این کار چندین بار، اسپری نیاز است به گونه‌ای که، به نظر می‌رسد در مدت چندین روز به بیش از چهل بار نیاز باشد. کاربرد آن می‌تواند تا وقتی که سطح آب آهک را جذب کند، ادامه یابد. لیکن، به آب آهک اضافی نباید اجازه داد تا روی سطح سنگ جاری شود. آب



تصویر ۱. روش تهیه آب آهک (Ashurst et al, 1988: 82; Filder, 2002: 22)

نسبت به جای اصلی اش منتقل شده است (جوادی و همکاران، ۱۳۷۹).

روش پژوهش

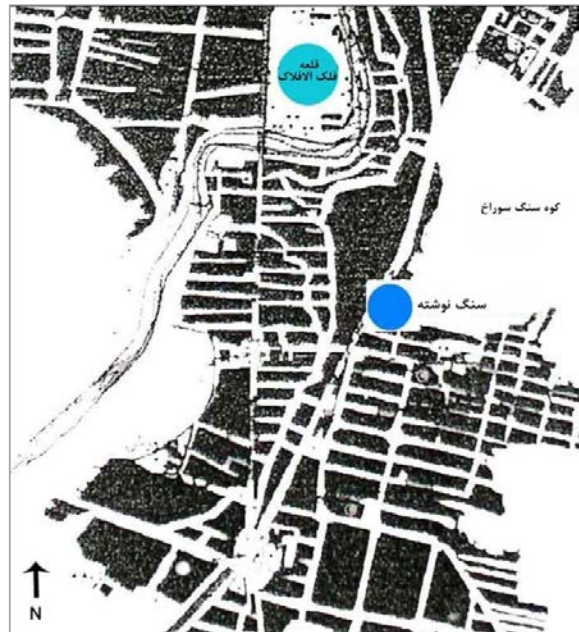
جهت مطالعه وضعیت سنگ‌نوشته خرم‌آباد، از روش پژوهش میدانی و آزمایشگاهی استفاده شد. بر این اساس، داده‌های مورد نیاز با استفاده از مشاهدات مستقیم اثر و روش‌های آنالیز پتروگرافی، XRF، XRD و SEM-EDS روی نمونه‌های سنگ سالم و هوازده تشکیل‌دهنده اثر و مطالعه محیط قرارگیری اثر باتوجه به نتایج بررسی‌های هواشناسی به‌دست‌آمدند. در پایان

۲۸ سانتیمتر و عرض بخش افقی آنها، بین ۲۸ تا ۳۲ سانتیمتر در تغییر است. ارتفاع ستون مکعبی کتیبه‌دار تا سطح پله‌ها در جبهه غربی، ۲۹۱ سانتیمتر و ارتفاع کلی ستون همراه پله‌ها ۳۴۷ سانتیمتر است. عرض چهار جبهه کتیبه‌دار بدین ترتیب است: جبهه شمالی ۱۹۱/۵، جبهه جنوبی ۲۱۲، جبهه غربی ۲۵۲ و جبهه شرقی ۲۵۰ سانتیمتر.

سنگ‌نوشته، سال ۱۳۷۲ (ه.ش.)، به‌دلیل انجام عملیات تعریض خیابان شریعتی و قرارگیری آن در وسط خیابان، از سوی کارشناسان فنی سازمان میراث فرهنگی از جای اصلی خود جابه‌جا شده است. این عملیات، پس از ۸۰ روز فعالیت در تاریخ ۷۲/۷/۲۴ پایان‌یافته و اثر حدود ۱۴ متر به سمت شرق



تصویر ۳. منظره سنگ‌نوشته خرم‌آباد از جنوب غرب (نگارندگان).



تصویر ۲. نقشه شهر خرم‌آباد و قرارگیری سنگ‌نوشته در شرق آن (نگارندگان).



تصویر ۵. نمای جنوبی سنگ‌نوشته. آغاز کتیبه کوفی اثر در این جبهه دیده می‌شود (نگارندگان).



تصویر ۴. نمای سنگ نوشته از بالا. محل جدید اثرکنار خیابان شریعتی و محوطه‌سازی اطراف آن همراه محل قرارگیری میله‌ها در جبهه غربی (نگارندگان، ۱۳۸۴).

شناسایی سنگ

برای شناسایی ماهیت سنگ تشکیل دهنده اثر، سه نمونه از سه ناحیه مختلف پایه اثر، مورد مطالعات آزمایشگاهی و میکروسکوپی شامل پتروگرافی و آنالیز شیمیایی کمی و کیفی با استفاده از روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و پراش پرتو ایکس (XRD) قرار گرفتند. جهت آنالیز شیمیایی از دو نمونه 1/61 و 1/64 استفاده شد. مطالعات میکروسکوپ پلاریزان نیز، روی نمونه شماره 1/60 انجام گرفت. در جدول ۱ نتایج آنالیز کمی با استفاده از روش XRF ارائه شده است. بنابر نتایج آنالیز می‌توان دریافت که عنصر اصلی تشکیل دهنده این سنگ، کلسیم است. در عین حال، میزان بالای مواد فرار (L.O.I) در هر دو نمونه، نشان دهنده وجود عناصر سبک به میزان بالا در سنگ است. باین همه، نتایج آنالیز در دو نمونه، تقریباً با یکدیگر مشابه است. البته، میزان قابل توجه SO_3 در نمونه 1/61 و MgO در نمونه 1/64 می‌تواند مهم باشد. در کنار آنالیز کمی، برای شناسایی فازهای تشکیل دهنده

برای عملیات حفاظتی روی اثر باتوجه به نتایج به دست آمده از مشاهدات و آنالیزهای یادشده تصمیم‌گیری شد.

نتایج و بحث

مشاهدات

در نگاه نخست به ساختار زمین‌شناسی منطقه و ظاهر سنگ، به نظر می‌رسد که سنگ از نوع سنگ آهک باشد. همچنین آسیب‌ها، فرسایش‌ها و مداخلات گوناگونی بر روی سطح سنگ‌نوشته دیده می‌شود. آثار این اتفاقات، به خوبی روی این اثر دیده می‌شود. این اتفاقات شامل پوسته‌شدگی شدید در بخش‌هایی از کتیبه (تصویر ۶)، جدا شدن و افتادن بخش‌هایی از سنگ به صورت تکه‌های به نسبت بزرگ (تصویر ۷)، ترک‌های بزرگ در اثر، تخلخل و فرسایش سطحی سنگ، آسیب‌های عمده از سوی انسان (تصویر ۸)، آلودگی‌های سطحی عمده و شکل گرفته به صورت طبیعی، مرمت‌های انجام شده با استفاده از میله‌های فلزی در عمق و سیمان (تصویر ۴) و رزین در سطح (تصویر ۹) و از این دست است.



تصویر ۷. شکستگی و جدا شدن قطعه‌هایی از سنگ و جدایش لایه‌های زیرین در پایه اثر (نگارندگان).



تصویر ۶. بخشی از کتیبه که به شدت پوسته شده و از بین رفته است. بخش‌های زیرین نیز در حال پوسته شدن هستند (نگارندگان).



تصویر ۹. رزین استفاده شده برای مرمت در حال جدا شدن از سنگ (نگارندگان).

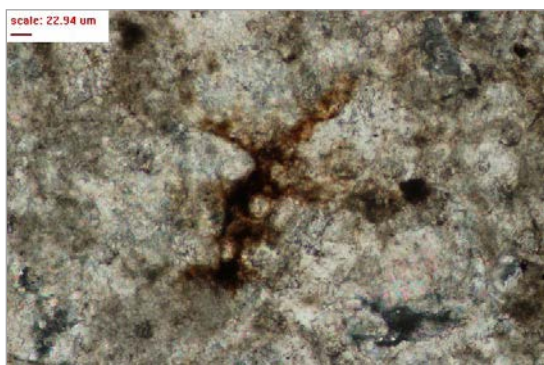


تصویر ۸. آسیب عمده شدید ایجاد شده با یک جسم تیز و سخت در بخش کتیبه (نگارندگان).

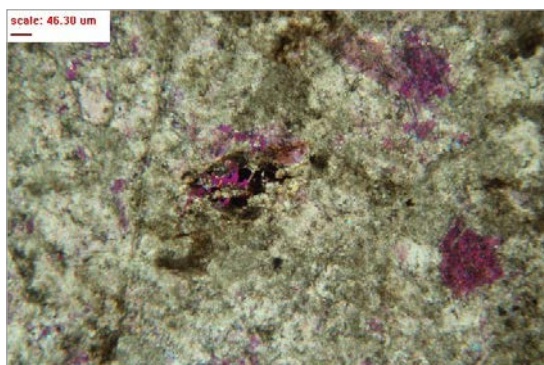
جدول ۱. نتایج آنالیز XRF از دو نمونه متعلق به ساختار سنگ تشکیل دهنده اثر.

	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cl	SrO	La&Lu	L.O.I
1/61	0.016	55.8	0.44	0.89	0.041	0.00	0.017	0.061	0.012	43.51
1/64	0.029	55.4	0.9	0.09	0.095	0.08	0.015	0.069	0.012	43.33

(نگارندگان)



تصویر ۱۰. مقطع نازک نمونه 1/60 که نشان دهنده وجود کلسیت و مقدار کمی تغییرات رنگی است. بافت سنگ، کاملاً فشرده بوده و تخلخل بسیار کمی دارد.



تصویر ۱۱. مقطع نازک نمونه 1/60 که مشابه با تصویر ۱۰ است و کنار کلسیت به عنوان ترکیب اصلی، مقدار کمی تغییرات رنگی قرمز در بافت دیده می شود.

آزمایش درصد تخلخل قرار گرفت. این آزمایش هم بیانگر شرایط و وضعیت سنگ مورد مطالعه بوده و هم در عملیات حفاظت و استحکام بخشی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. آزمایش درصد تخلخل نشان داد که درصد تخلخل سنگ مورد مطالعه حدود ۰/۴ درصد است.

محصولات فرسایش

برای بررسی سطحی اثر از دیدگاه فرسایش و شناخت تغییرات ایجاد شده در ترکیب آن بر اثر فرآیندهای شیمیایی، قشر سطحی تغییر یافته نمونه های 1/62 و 1/66 انتخاب شدند. نمونه های یاد شده، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) EDS، تحت آنالیز عنصری و تهیه تصویر میکروسکوپی

جدول ۲. نتایج آنالیز (XRD) از دو نمونه متعلق به ساختار سنگ تشکیل دهنده اثر.

	Major Phase	Trace Phase
1/61	Calcite (CaCO ₃)	-
1/64	Calcite (CaCO ₃)	Dolomite (MgCO ₃)

(نگارندگان)

سنگ دو نمونه یاد شده نیز، نمونه ها مورد آنالیز کیفی قرار گرفتند (جدول ۲). نتایج آنالیز نشانگر آن است که تنها فاز تشکیل دهنده نمونه 1/61، کلسیت (CaCO₃) است. نمونه شماره 1/64 نیز حاوی فاز کلسیت و مقدار بسیار کمی فاز دولومیت (MgCO₃) است. وجود مقدار قابل ملاحظه منیزیم هم در آنالیز عنصری، وجود فاز دولومیت را در نتیجه آنالیز تأیید می کند.

با توجه به نتایج آنالیزها می توان نتیجه گرفت که سنگ تشکیل دهنده اثر، نوعی سنگ کربناته حاوی کلسیت بسیار زیاد است و ناخالصی های بسیار کمی دارد. در عین حال، وجود مقدار کمی کانی دولومیت نیز در سنگ دیده می شود. در حقیقت، بنابر میزان CaO در نمونه ها (حدود ۵۵ درصد) و نیز نتایج XRD می توان دریافت که میزان کلسیت در بافت سنگ بیش از ۹۰ درصد است. با این بیان، به نظر می رسد که سنگ تشکیل دهنده اثر از نوع سنگ کربناته آهکی (کلسیتی) است (فیض نیا، ۱۳۷۷: ۱).

تصویرهای ۱۰ و ۱۱ ریزساختار مقطع نازک نمونه 1/60 را زیر نور پلاریزان نمایش می دهند. مقطع نازک سنگ نیز، نشانگر این است که این نمونه شامل کلسیت و مقداری آهک به صورت CaO است. به طور کلی، ترکیبات و ناخالصی هایی مانند کوارتز و موارد دیگر در آن دیده نمی شود. تنها، مقداری تغییرات رنگی در بافت سنگ مشاهده می گردد که می تواند ناشی از وجود یون های منیزیم و آهن باشد. سنگ، دارای بافت فشرده ای بوده و تخلخل کمی دارد. کلسیت تشکیل دهنده سنگ حل نشده است. در مجموع، می توان بیان داشت که سنگ تشکیل دهنده اثر نوعی سنگ آهکی معمولی است که بیشتر متشکل از کلسیت بوده و ناخالصی بسیار کمی دارد.

برای شناسایی درصد تخلخل سنگ، نمونه 1/60 مورد

بررسی‌های اقلیمی

براساس مشاهدات و بررسی‌های انجام‌شده، این چنین می‌توان دریافت که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر فرسایش سنگ‌نوشته، تغییرات دما و رطوبت نسبی آلاینده‌های جوی و میزان بارندگی در منطقه است. این تغییرات، سبب می‌شود تا سنگ تحت تأثیر تنش‌های فیزیکی و درعین حال شیمیایی قرار گرفته و دچار فرسایش شود.

برای شناسایی اقلیم منطقه و شرایط آب و هوایی محل قرارگیری اثر، بررسی‌های اقلیمی براساس آمار هواشناسی موجود منطقه صورت گرفت. این مطالعات، بیانگر وضعیت فعلی اثر در رابطه با محیط و عوامل محیطی تأثیرگذار بر سنگ است. از دیگر سو، آمار وضعیت اقلیمی ناحیه می‌تواند هم به انتخاب روش استحکام‌بخشی و حفاظت اثر یاری‌رساند و هم طی زمان پس از عملیات حفاظت و مرمت، در ارزیابی شرایط اثر و تأثیر شیوه درمان و استحکام‌بخشی موثر باشد. نمودار ۲ میانگین درصد رطوبت نسبی (بین حدافل و حداکثر) را در طول ماه بین سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۲ مقارن با ۱۹۸۵



تصویر ۱۳. تصویر SEM از نمونه 1/66 که مشابه با نمونه 1/62 بوده و بیانگر تخلخل و هوازدگی در سطح سنگ است (نگارندگان).

قرار گرفتند.

تصویر میکروسکوپی نمونه شماره 1/62، نشانگر ساختار متخلخل و به شدت هوازده سنگ است (تصویر ۱۲). آنالیز عنصری نمونه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که نمونه، حاوی مقدار قابل توجهی از عناصر اکسیژن، کلسیم و گوگرد است. ضمن اینکه، در جدول شماره ۳ نتیجه آنالیز نمونه ذکر شده ارائه شده است. آنالیز و ساختار نمونه شماره 1/66، مشابه با نمونه 1/62 است. این نمونه نیز، حاوی عناصر اصلی اکسیژن، کلسیم و گوگرد است. در تصویر ۱۳ هوازدگی و تخلخل در بافت میکروسکوپی سنگ دیده می‌شود.

بنابر نتایج آنالیز ارائه شده در جدول ۳، می‌توان دریافت که سطح سنگ در نقطه‌های مختلف دچار فرسایش و هوازدگی شدید شده است. وجود درصد بالای گوگرد در نمونه‌های 1/62 و 1/66، بیانگر تأثیر گازهای اکسید گوگرد موجود در منطقه شهری بر روی اثر است که سبب تشکیل فازهای حاوی گوگرد شده است.



تصویر ۱۲. تصویر SEM نمونه 1/62. که هوازدگی و تخلخل در سطح سنگ دیده می‌شود (نگارندگان).

جدول ۳. نتایج آنالیز (SEM-EDS) رویدو نمونه متعلق با لایه‌های سطحی سنگ

	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1/62	2.04	52.23	0.09	0.84	2.20	18.14	0.17	23.97	0.02	0.32
1/66	0.90	52.00	0.00	0.71	1.10	19.55	0.00	25.62	0.00	0.13

(نگارندگان)



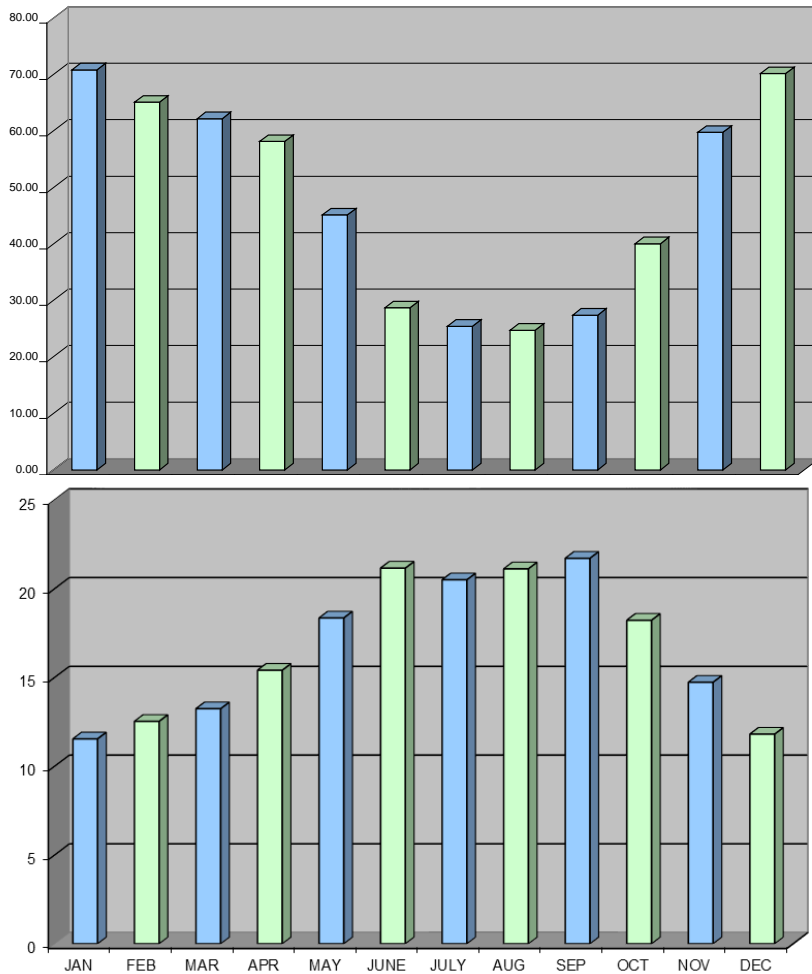
منطقه خرم‌آباد در مجموع، از آب و هوایی معتدل و نیمه مرطوب برخوردار است که در فصل‌های سرد سال درجه حرارت به زیر صفر رسیده و هوا سرد و مرطوب می‌شود. میانگین بارندگی ۳۰ سال گذشته در منطقه خرم‌آباد ۱۳۹/۴ میلی‌متر بوده که میزان قابل توجهی را در برمی‌گیرد (Ibid).

بر اساس آمارهای اقلیمی، سنگ‌نوشته خرم‌آباد در محیطی قرار گرفته که از نظر تغییرات دمایی و تفاوت میانگین دمای شب و روز دارای نوسان به نسبت بالایی است. از سوی دیگر، با توجه به دمای نسبتاً بالای منطقه در تابستان، بسیاری از مواد استحکام‌بخش در این محیط از طول عمر حدوداً کوتاهی برخوردار خواهند بود. همچنین، میزان بارندگی و رطوبت نسبی نیز در این ناحیه هم روی اثر و هم مورد استفاده در استحکام‌بخش‌ها می‌تواند تاثیرگذار باشد.

حفاظت و مرمت

پس از انجام مطالعات و با توجه به نتایج به دست آمده، مراحل زیر برای انجام عملیات حفاظت و مرمت سنگ‌نوشته

تا ۲۰۰۳ میلادی را نمایش می‌دهد (www.weather.ir). این نتایج، نشانگر آن است که در فصل‌های بهار، پاییز و زمستان میانگین رطوبت نسبی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد متغیر بوده در صورتی که، در دیگر مواقع سال بین ۲۰ تا ۴۰ درصد است. در عین حال، میانگین رطوبت نسبی سالانه منطقه در سال‌های یادشده حدود ۵۰ درصد است. نمودار ۳ نیز، میانگین تفاوت حداکثر و حداقل دما را در بازه زمانی بیان شده نشان می‌دهد. نتایج، بیانگر آن است که در فصل تابستان، تفاوت میانگین درجه حرارت بین سردترین و گرم‌ترین زمان شب و روز به بیش از ۲۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. در حالی که، در فصل زمستان این تفاوت، به حدود ۱۰ تا ۱۵ درجه می‌رسد. میانگین سالانه تفاوت درجه حرارت بین روز و شب در منطقه خرم‌آباد نیز، بین ۱۶ تا ۱۸ درجه سانتیگراد است. بنابر نتایج ارائه شده می‌توان گفت که تفاوت دما در منطقه، در ماه‌های سرد و گرم سال و نیز هنگام شب و روز به نسبت بالاست. با توجه به نتایج آماری هواشناسی منطقه می‌توان دریافت که



نمودار ۳. میانگین تفاوت حداکثر و حداقل دما در ماه‌های سال در شهر خرم‌آباد، بین سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۲ شمسی (نگارندگان).

خرم‌آباد برگزیده شد:

- پاک‌سازی و تمیزکاری آلودگی‌ها،
- استحکام بخشی ساختار سنگ،
- تثبیت و پوشش دهی نهایی.

این مراحل، براساس شرایط اثر انتخاب شدند. چون سطح اثر با گرد و غبار محیطی آلوده شده بود و این آلودگی‌ها، از کارکرد مناسب و نفوذ استحکام بخش به درون بافت اثر تاحدی جلوگیری می‌کرد، تصمیم گرفته شد تا پیش از انجام استحکام بخشی، سطح اثر از گرد و غبار پاک شود. از دیگر سو، وجود لکه‌های آلودگی مانند رنگ، روغن و موادی از این قبیل هم سبب شدند تا به مرحله پاک‌سازی اثر توجه شود. پس از آن، عملیات استحکام بخشی با روش آهک (آب آهک) انجام گرفت و در نهایت، سطح اثر پوشش داده شد. دلیل استفاده از استحکام بخش معدنی و طبیعی، شرایط اقلیمی ناحیه و سازگاری و کاربرد آسان آن در شرایط موجود اثر بود.

پاک‌سازی

عملیات پاک‌سازی اثر از آلودگی‌ها به چند منظور انجام پذیرفت؛ نخست اینکه، سطح اثر را گرد و غبار بسیاری فرا گرفته بود و موجب شده بود تا لایه‌ای از این آلودگی، سطح آن را فراگیرد و جلوه سطحی را تاحدی مخدوش کند. بنابراین، برای یافتن جلوه بهتر عملیات پاک‌سازی گرد و غبار انجام شد. افزون بر این، این اثر در کنار یک منطقه پر رفت و آمد بوده و بخشی از گرد و غبار مربوط به ذرات و آلودگی‌های حاصل از آن است. بنابراین، برای زدودن سطح اثر از ذرات آلاینده‌ها قبل از استحکام بخشی و تثبیت پاک‌سازی سطحی صورت پذیرفت. مرحله اول پاک‌سازی اثر، استفاده از اسپری آب مقطر با فشار کم از بالا به پایین بود. بدین منظور، آب مقطر با یک دستگاه

اسپری بر سطح سنگ پاشیده شد تا گرد و غبار سطحی از روی اثر پاک‌شود.

مرحله دوم پاک‌سازی، جدا کردن و از بین بردن لایه‌های رنگ حاوی اسامی اشخاص، واژگان، خط‌ها و بقایای چسب‌های استفاده شده در مرمت‌های پیشین بود که افزون بر آسیب منطری برای تسهیل نفوذ مواد استحکام بخش نیز، باید پاک‌سازی می‌شدند (تصویر ۱۴). پس از شستشوی کامل سنگ با آب مقطر، لایه‌های رنگ و تکه‌های چسب و روغنی که بر سطح اثر بودند، با استفاده از تیغ جراحی، الکل، استن و رنگ‌برهای صنعتی از سطح آن برداشته شدند (تصویر ۱۵).

استحکام بخشی

نتایج مطالعات نشان داد که سنگ‌نوشته خرم‌آباد از سنگ آهک ساخته شده و به دلیل عوامل مختلف محیطی، تحت تأثیر فرایند هوازدگی فیزیکی و شیمیایی قرار گرفته است. بنابر شرایط بیان شده اثر و هوازدگی شدید رخ داده در آن، عملیات استحکام بخشی برای جلوگیری از روند فرسایش و بازگرداندن بخشی از مقاومت ساختاری اثر انتخاب شد. برای استحکام بخشی سنگ‌نوشته از روش آب آهک استفاده شد. این تصمیم، هم به دلیل ماهیت سنگ و هم همخوان بودن روش با سنگ، اجرای آسان، عدم نیاز به برگشت پذیری و عدم ایجاد آسیب در ساختار سنگ به مرور زمان برگزیده شد. درباره این روش، بسته به شرایط خاص هر اثر نظریه‌های متفاوتی وجود دارد. بعضی نتایج بیانگر این است که این روش، روی سنگ‌های آهکی متراکم مؤثر نبوده و روی سنگ‌هایی همچون ماسه‌سنگ‌ها که تخلخل بالاتری دارند، مناسب‌تر عمل می‌کند (Price et al, 1988). حال آن‌که برخی نتایج، بیانگر عدم توفیق استفاده از آب آهک در استحکام بخشی ماسه‌سنگ‌ها است (Ashurst et al, 1988). استحکام بخشی با آب آهک برای سنگ‌های آهکی، اندودها و درکل، آثاری که آهک و یا کربنات کلسیم



تصویر ۱۴. سطح اثر پس از پاک‌سازی رنگ‌ها با استفاده از استن و رنگ‌بر صنعتی (نگارندگان).



تصویر ۱۵. اثر رنگ قرمز و سیاه روی سطح سنگ‌نوشته پیش از پاک‌سازی (نگارندگان).

رخ دهد و هم سنگ، کاملاً خشک شود. قرارگیری اثر در محیط شهری می تواند به فرایند کربناته شدن یاری رساند. در نهایت، سطح اثر با استفاده از محلول ۵% پارالوئید B72 در استن پوشش داده شد. این عملیات، برای جلوگیری از تأثیر رطوبت بر اثر انجام شد زیرا، در کنار تأثیر تغییرات دما، رطوبت نیز چه به شکل باران و چه به صورت رطوبت نسبی بر سطح اثر تأثیرگذار است (تصویر ۱۷).

مطالعات و عملیات حفاظت و مرمت تابستان سال ۱۳۸۶ روی سنگ نوشته خرم آباد انجام شده است، برای ارزیابی تأثیر کاربرد روش آهک در استحکام بخشی، این اثر دوباره سال ۱۳۹۱ بازبینی شد. به دلیل نداشتن مجوز برای نمونه برداری و مطالعات آزمایشگاهی روی اثر، تنها به مشاهدات ماکروسکوپی و مقایسه وضعیت قبلی و فعلی اثر بسنده شد. مشاهدات نشانگر آن است که اثر، در وضعیت مناسبی قرار دارد و پس از گذشت ۵ سال، در کتیبه و سطح اثر تغییر قابل مشاهده ای رخ نداده است (تصویرهای ۲۰-۱۸). البته، باید خاطر نشان نمود که جهت ارزیابی بهتر شرایط اثر و کارآیی روش آهک، مطالعات میکروسکوپی و روش های دقیق تر می توانند نتایج بهتری را ارائه کنند.

نتیجه گیری

جزء اصلی تشکیل دهنده آنهاست، پیشینه طولانی ای دارد. برای استحکام بخشی سنگ نوشته با استفاده از آهک زنده آزمایشگاهی، با روش ذکر شده آب آهک تهیه شد. سپس، با یک دستگاه اسپری، آب آهک حاصل شده، بر سطح اثر پاشیده شد. این عملیات، تا زمانی ادامه می یابد که دیگر آب آهک در ساختار سنگ نفوذ نکرده و سنگ، آب آهک اسپری شده را جذب نکند. بنا بر میزان بالای جذب آب آهک توسط لایه سطحی سنگ تشکیل دهنده اثر، اسپری آب آهک حدود ۷۰ بار، تا پیش از اینکه سنگ دیگر آب آهک جذب نکند، تکرار شد (تصویر ۱۶). با توجه به تخلخل بسیار پایین سنگ (حدود ۰/۴ درصد)، میزان بالای جذب آب آهک توسط سنگ را می توان به دلیل تخلخل سطحی اثر در نتیجه هوازدگی دانست. این امر، در مطالعات انجام شده با میکروسکوپ الکترونی هم، آشکارا دیده شد (تصویرهای ۱۲ و ۱۳). ساختار متخلخل ناحیه سطحی سنگ و وجود میزان بالای خلخل و فرج منتج از هوازدگی، دلیل اصلی میزان جذب بالای ماده استحکام بخش در ساختار سنگ بود. همچنین، در مشاهدات ماکروسکوپی نیز، سطح سنگ به شدت هوازده و لایه لایه به نظر می رسید که این امر می تواند در جذب استحکام بخش مؤثر باشد (تصویرهای ۶ و ۷). پس از آن، اثر ۱۵ روز رها شد تا هم فرایند کربناته شدن Ca(OH)_2



تصویر ۱۷. سنگ نوشته خرم آباد پس از استحکام بخشی با آب آهک و پوشش دهی با پارالوئید B72 (نگارندگان).



تصویر ۱۶. استحکام بخشی اثر با استفاده از اسپری آب آهک (نگارندگان).



تصویر ۱۹. نمای جنوبی سنگ نوشته پس از گذشت ۵ سال از عملیات حفاظت و مرمت، خرداد ۱۳۹۱ (نگارندگان).



تصویر ۱۸. نمای جنوبی سنگ نوشته قبل از انجام عملیات حفاظت و مرمت (نگارندگان).



تصویر ۲۰. سطح سنگ از نمایی نزدیک که نشان دهنده حالت ثابت سطح اثر و عدم تغییر و فرسایش قابل توجه پس از گذشت ۵ سال از عملیات حفاظت و مرمت است. خرداد ۱۳۹۱ (نگارندگان).

مطالعه و آزمایش بر روی اثر سنگ نوشته خرم آباد، بیانگر رخ دادن هوازدگی فیزیکی و شیمیایی تحت تأثیر تغییرات رطوبت و دما و درعین حال، آلاینده های محیطی است. در سال های گذشته، استفاده از مواد و روش های مختلف به عنوان استحکام بخشی در آثار سنگی، یکی از موضوعات مورد توجه مرمت گران آثار تاریخی بوده است. یکی از روش هایی که در استحکام بخشی آثار ساخته شده از سنگ آهک مورد استفاده قرار گرفته، روش آهک است. در این روش، آب آهک گرفته شده از آهک زنده برای استحکام بخشی سنگ به کار می رود. عملیات استحکام بخشی روی سنگ نوشته خرم آباد نیز، با استفاده از آب آهک انجام شد. میزان بالای جذب آب آهک توسط سنگ، بیانگر نفوذ میزان بالای استحکام بخش به درون ساختار آسیب دیده سنگ بود. پس از اجرای استحکام بخشی روی اثر، جهت پوشش دهی و تثبیت سطحی اثر نیز از پارالوئید B72 استفاده شد. در نهایت، چنین به دست آمد که روش آهک به دلیل همخوانی با ماهیت سنگ و نیز نداشتن تأثیر منفی مانند ایجاد



نمک‌های محلول روی سنگ، می‌تواند روشی مناسب در استحکام‌بخشی آثار سنگی باشد. هر چند آزمایش‌های مختلف، نتایج مشابه و یکسانی در زمینه تاثیر و میزان استحکام‌بخشی این ماده ارائه نمی‌دهند، نتایج مشاهدات نیز نشان داد که پس از گذشت ۵ سال از انجام استحکام‌بخشی با روش آهک، سطح سنگ‌نوشته خرم‌آباد تغییر و فرسایش قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد و اثر در حالتی پایدار به نظر می‌رسد. باین‌همه، بنابر قابلیت‌های بالقوه روش آهک در استحکام‌بخشی آثار سنگی و گستردگی آثار ساخته‌شده از سنگ آهک در ایران، مطالعات بیشتر و گسترده‌تر در زمینه‌های مختلف و جنبه‌های متفاوت روش آهک در استحکام‌بخشی سنگ‌های آهکی در آثار ایران پیشنهاد می‌گردد.

سپاس‌گزاری

نگارندگان، بر خود لازم می‌دانند تا از استادان و همکاران محترم، آقایان و خانم‌ها، مهندس حمید فدایی، پژوهشگرده حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، مهندس داریوش حیدری، دانشکده مرمت دانشگاه هنر اصفهان، دکتر سید محمدمبین امامی، دانشکده مرمت دانشگاه هنر اصفهان، مهندس مریم احمدی، اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان آذربایجان شرقی، مهندس مسعود دارابی، اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان لرستان و مهندس سیروس ابراهیمی رئیس وقت اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان لرستان سپاس‌گزاری خود را اعلام دارند.

پی‌نوشت

- 1- Consolidation
- 2- Consolidant
- 3- Alkoxysilanes
- 4- Synthetic Organic Polymers
- 5- Waxes
- 6- Inorganic
- 7- Organic
- 8- Soluble Glass
- 9- Barium Hydroxide
- 10- Calcium Hydroxide
- 11- Silica
- 12- Alkali Silicate
- 13- Fluorosilicon
- 14- Calcium Oxalates
- 15- Barium Oxalates
- 16- Ammonium Oxalates
- 17- Barium Aluminates
- 18- Bacterially Induced Mineralization
- 19- Methyltrimethoxysilane(MTMOS)
- 20- Tetraethoxysilane(TEOS)
- 21- Ethyl Silicate
- 22- Methyltriethoxysilane(MTEOS)
- 23- Methyl Methacrylate
- 24- Butyl Methacrylate

۲۵- پارالوئید B72 در ایالات متحده آمریکا به نام آکرولوئید B72 شناخته می‌شود.

۲۶- نام تجاری موم میکروکریستالی

27- Lime Mortar

28- Lime Wash or Lime Shelter

29- Lime Technique

۳۰- جهت مطالعه متن کتیبه و اطلاع از جزییات آن رجوع شود به:

ایزدپناه، حمید(۱۳۷۶)، آثار باستانی و تاریخی لرستان (جلد دوم)، گنجینه ایران ۳۲، تهران: انجمن آثار و مفاخر فرهنگی ایران، صص: ۶۰-۵۷.

۳۱- در لهجه محلی خرم‌آباد، برد به معنای سنگ است.

منابع

- ایزدپناه، حمید(۱۳۷۶)، آثار باستانی و تاریخی لرستان (جلد دوم)، گنجینه ایران ۳۲، انتشارات انجمن آثار و مفاخر فرهنگی ایران.
- جوادی، محمدرضا و همکاران(۱۳۷۹)، شناسایی مقدماتی تپه‌ها و معرفی غارهای دره خرم‌آباد، مرکز اسناد اداره کل میراث فرهنگی استان لرستان، منتشر نشده.
- فیض‌نیا، سادات(۱۳۷۷)، سنگ‌های رسوبی کربناته، مشهد: دانشگاه امام‌رضا.
- Amoroso, G. G. & Fassina, V. (1983). **Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution-Cleaning, Consolidation and Protection**, (Materials Science Monographs, 11). New York: Elsevier Science Publishers.
- Ashurst, J. (1998). The Cleaning and Treatment of Limestone by the Lime Method, In **Conservation of Building and Decorative Stone**, Ashurst, J. & Dimes, F. G. (Eds.), Vol. II, London : Butterworth-Heinemann, , 169-176.
- Ashurst, J. & Ashurst, N.. (1988). **Practical Building Conservation, Vol. 1, Stone Masonry**, English Heritage Technical Handbook, New York : Halsted Press,.
- Ashurst, J. & Dimes, F. G. (Eds.). (1998). **Conservation of Building and Decorative Stone**. London: Butterworth-Heinemann.
- Bracci, S. Sacchi, B. Ferreira Pinto, A. P. Delgado Rodrigues, J. (2008). Inorganic Consolidation on Stone Artefacts: Optimisation of Application Procedures for Marble and Limestones, in **Proceedings of the International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage- Research and Practice**, Lisbon, 6-7 May 2008, Delgado Rodrigues, J. & Mimoso, J. M. (Eds.), LNEC Publication, 81-90.
- Brus, J. & Kotlik, P. (1996). Consolidation of Stone by Mixtures of Alkoxysilane and Acrylic Polymer, **Studies in Conservation** 41: 109-119.
- Charola, A. E. Tucci, A. Koestler, R. J. (1986). On the Reversibility of Treatments with Acrylic/Silicone Resin Mixtures, **Journal of the American Institute for Conservation**, Vol. 25, No. 2: 83-92.
- Clifton, J. R., (1984), Laboratory Evaluation of Stone Consolidants, in Adhesives and Consolidants, **Proceedings of IIC Congres**, Brommelle, N. S., Pye, E. M., Smith, P., Thomson, G., (Eds.), Paris, IIC Publications, pp: 151-155.
- Delgado Rodrigues, J. & Mimoso, J. M. (Eds.). (2008). **Stone Consolidation in Cultural Heritage- Research and Practice**, Proceedings of the International Symposium, 6-7 May 2008, Lisbon: LNEC Publication.
- Delgado Rodrigues, J. (2001). Consolidation of Decayed Stones. A Delicate Problem with Few Practical Solutions, in **Historical Constructions**, Lourenço, P. B. Roca, P. (Eds.), Guimarães, 3-14.
- Doehne, E. & Price, C. A. (2010). **Stone Conservation: An Overview of Current Research**,





- (Second Edition), Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- Drdácý, M. & Sližková, Z. (2008). **Calcium Hydroxide Based Consolidants of Lime Mortars and Stone**, in Proceedings of the International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage- Research and Practice, Lisbon, 6-7 May 2008, Delgado Rodrigues, J., Mimoso, J. M., (Eds.), LNEC Publication, pp: 299-308.
 - Etymezian, V., Davidson, C. I., Finger, S., Striegel, M. F., Barabas, N., Chow, J. C., (1998), **Vertical Gradients of Pollutant Concentrations and Deposition Fluxes on a Tall Limestone Building**, Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 37, No. 2, pp: 187-210.
 - Ferreira Pinto, A. P. & Delgado Rodrigues, J. (2008 a). Stone Consolidation: The Role of Treatment Procedures, **Journal of Cultural Heritage** 9: 38-53.
 - Ferreira Pinto, A. P. & Delgado Rodrigues, J. (2008 b). Hydroxylating Conversion Treatment and Alkoxysilane Coupling Agent as Pre-Treatment for the Consolidation of Limestones with Ethyl Silicate, in **Proceedings of the International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage- Research and Practice**, Lisbon, 6-7 May 2008, Delgado Rodrigues, J. & Mimoso, J. M., (Eds.), LNEC Publication, 131-140.
 - Fidler, J. (2004). Stone Consolidants: Inorganic Treatments, **Conservation Bulletin** 45: 33-35.
 - Filder, J. (2002). Lime Treatments: An Overview of Lime Watering and Shelter Coating of Friable Historic Limestone Masonry, In **Stone: Stone Building Materials, Construction and Associated Component Systems: Their Decay and Treatment**, J. Filder. (Ed.), English Heritage Research Transactions, Vol. 2, London: English Heritage , 19-28
 - Gauri, K. L. (1974). Efficiency of Epoxy Resins as Stone Preservatives, **Studies in Conservation**, Vol. 19, No. 2: 100-101.
 - Ginell, W. S. Wessel, D. Searles, C. (2001). **Standard Guide for Selection and Use of Stone Consolidants**, ASTM E2167-01, West Conshohocken, PA: ASTM International.
 - Haneef, S. J. Dickinson, C. Johnson, J. B. Thompson, G. E. Wood, G. C. (1992). Simulation of the Degradation of Coupled Stones by Artificial Acid Rain, **Studies in Conservation** 37: 105-112.
 - Hansen, E. Doehne, E. Filder, J. Larson, J. Martin, B. Matteini, M. Rudriguez-Navarro, C. Sebastián Pardo, E. Price, C. de Tagle, A. Teutonico, J. M. Weiss, N. (2003). A Review of Selected Inorganic Consolidants and Protective Treatments for Porous Calcareous Materials, **Reviews in Conservation**. 4: 13-25.
 - Honeyborne, D. (1998). Surface Treatments in General, in **Conservation of Building and Decorative Stone**, Ashurst, J. & Dimes, F. G. (Eds.), Vol. II, London: Butterworth-Heinemann, 156-169.
 - Jimenez-Lopez, C. Rodriguez-Navarro, C. Piñar, G. Carrillo-Rosúa, F.J. Rodriguez-Gallego, M. Gonzalez-Muñoz, M.T. (2007). Consolidation of Degraded Ornamental Porous Limestone by Calcium Carbonate Precipitation Induced by the Microbiota Inhabiting the Stone, **Chemosphere** 68: 1929-1936.
 - Kotlik, P. Justa, P. Zelinger, J. (1983). The Application of Epoxy Resins for the Consolidation of Porous Stone, **Studies in Conservation** 28: 75-79.
 - Kumar, R. & Ginell, W. S. (1997). A New Technique for Determining the Depth of Penetration of Consolidants into Limestone Using Iodine Vapor, **Journal of the American Institute for Conservation**, Vol. 36, No. 2: 143-150.
 - Lanterna, G. Mairani, A. Matteini, M. Rizzi, M. Scuto, S. (2000). Mineral Inorganic Treatments for the Conservation of Calcareous Artefacts, in **Proceedings of the 9th International Congress**

- on **Deterioration and Conservation of Stone**, Venice, Vol. 2, Fassina, V. (Ed.), 387-394.
- Oliver, A. B. (2002). The Variable Performance of Ethyl Silicate: Consolidated Stone at Three National Parks, **APT Bulletin**, Vol. 33, No. 2/3: 39-44.
 - Öztürk, I. (1992), Alkoxysilanes Consolidation of Stone and Earthen Building Materials. Unpublished MSc Thesis: University of Pennsylvania,.
 - Price, C. A. (1996). **Stone Conservation: An Overview of Current Research**. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
 - Price, C. A. Ross, K. White, G. (1988). A Further Appraisal of the Lime Technique for Limestone Consolidation, Using a Radioactive Tracer, **Studies in Conservation** 33: 178-186.
 - Schaffer, R. J. (1932). **The Weathering of Natural Building Stones**, His Majesty's Stationery Office, Reprinted 1972, Watford, London: Building Research Establishment,.
 - Schnabel, L. (1992). Evaluation of the Barium Hydroxide-Urea Consolidation Method, in **Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone**, Lisbon, Vol. 3, Delgado Rodrigues, J. Henriques, F. Jeremias, F. T. (Eds.), 1063-1072.
 - Selwitz, C. (1995). The Use of Epoxy Resins for the Stabilization of Deteriorated Masonry, **APT Bulletin**, Vol. 26, No. 4, Preservation of Historic Masonry: 27-34.
 - Selwitz, C. (1992). **Epoxy Resins in Stone Conservation**. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
 - Tabasso, M. L. (1995). Acrylic Polymers for the Conservation of Stone: Advantages and Drawbacks, **APT Bulletin** Vol. 26, No. 4, Preservation of Historic Masonry: 17-21
 - Theoulakis, P. Karatasios, I. Stefanis, N. A. (2008). Performance Criteria and Evaluation Parameters for the Consolidation of Stone, in **Proceedings of the International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage: Research and Practice**, Lisbon, 6-7 May 2008, Delgado Rodrigues, J. Mimoso, J. M. (Eds.), LNEC Publication, 279-288.
 - Tiano, P. Cantisani, E. Sutherland, I. Paget, J. M. (2006). Biomediated Reinforcement of Weathered Calcareous Stones, **Journal of Cultural Heritage** 7: 49-55.
 - Wheeler, G. (2005). **Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone**. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
 - Wheeler, G. (2008). Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone: Where We Are Now, in **Proceedings of the International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage: Research and Practice**, Lisbon, 6-7 May 2008, Delgado Rodrigues, J. Mimoso, J. M. (Eds.), LNEC Publication, 41-52.
 - Weber, H., (1985), Conservation and Restoration of Natural Stone in Europe, **Bulletin of the Association for Preservation Technology** Vol. 17, No. 2, Masonry: 15-23.
 - www.weather.ir (Access Date: 17.05.2006).





Received:2011/12/31

Accepted:2012/07/09

Study and Consolidation of limestone in Sangnavashteh of Khorramabad

Atefeh Shekofteh* Omid Oudbashi** Malihe Bakrani***
Masoud Siapoosh**** Behnood Siapoosh*****

Abstract

Consolidation of stone monuments and artefacts is a conservation operation that has considered by conservators and conservation scientists in last years. One of the methods in conservation of lime stone monuments and artefacts is Lime method. One part of this method is consolidation by lime water. The method has used in last years, especially in England, and some suitable results have achieved in some cases.

In this paper, first the stone consolidation methods are introduced and classified and then, the lime method and mechanism of limestone consolidation by lime water have reviewed. The aim of this method is assessing the application of Lime method in consolidation of limestone in air exposed stone monuments.

The main question is assessing the lime water consolidation in Sangneveshteh stone monument of Khorramabad (6th century A. H.). For this purpose, the stone has investigated by field and laboratory methods consisting of petrography, XRF, XRD and SEM-EDS. The results show occurrence of physical and chemical weathering in stone surface and loss of some parts in kufic inscription. Finally, the conservation process selected based on results and has presented. The main conservation operation is consolidation by lime water. The stone condition is suitable and show control of stone weathering after five years of conservation.

Keywords: Sangneveshteh of Khorramabad, Limestone, weathering, consolidation, lime method.

* Ph.D. Candidate, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran.

** Ph.D. Candidate, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran.

*** M.A. in Conservation, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran.

**** M.A. student in Conservation, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Iran.

***** M.A. in Conservation, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Iran.