



ارزیابی کارایی رزین‌های پارالوئید و اپوکسی در استحکام بخشی سنگ تراکیت: مطالعه موردی کارخانه چرم خسروی تبریز

مهدی رازانی^۱

دانشیار، عضو هیئت علمی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

نوشین بنس‌لو

کارشناس مرمت آثار تاریخی دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

 <https://doi.org/10.22034/ciom.2025.2054186.1040>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی، صص ۲۷-۵۱

چکیده

تشخیص نوع و نحوه عملکرد رزین، چسب و استحکام بخش‌های سنگ از جمله مسائل قابل توجه در مطالعات حفاظت و مرمت آثار معماری و اشیاء سنگی است. تحقیق پیش رو با هدف دستیابی به روش پربازده اعمال استحکام بخش برای مرمت سنگ‌های تراکیت پردیس مرکزی دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام شد. از پارالوئید و اپوکسی (آرال‌دئیت دو جرئی ۲۰۱۱) به علت نتیجه مثبت، کم بودن معایب و آسیب‌های احتمالی، در دسترس بودن و به صرفه بودن به نسبت دیگر مواد برای استحکام بخشی نمونه سنگ استفاده شد. جهت مطالعات استحکام بخشی سنگ‌های تراکیت به کار گرفته شده در ازاره‌ها و دیواره‌های پردیس دانشگاه هنر اسلامی دو روش استحکام بخشی با روش اشباع و قلم‌موزنی بر روی نمونه سنگ‌های تراکیتی اعمال شد تا در نهایت با مقایسه تغییرات مثبت و منفی ایجاد شده در خواص سنگ، مناسب‌ترین روش استحکام بخشی حاصل شود. به این منظور روش‌ها و آنالیزهای دستگاهی XRF و XRD برای شناسایی ساختار نمونه سنگ‌ها به کار رفت. مضافاً از آزمون‌های خواص فیزیکی

سنگ (جذب موینگی آب، جذب و اشباع آب و تخلخل و چگالی سنجی) و آزمون‌های پیرسازی سه‌گانه تسریعی (مقاومت در برابر شوک حرارتی، مقاومت در برابر یخ‌زدگی-وارفتگی، مقاومت در برابر تبلور نمک) و چرخه دوام‌داری برای سنجش مقاومت سنگ‌ها پیش و پس از استحکام‌بخشی نیز بهره گرفته شد. با توجه به اینکه روش قلم‌موزنی با پارالوئید BV۲ بهترین نتیجه حاصل از آزمون‌های انجام‌شده را به دست داد؛ لذا پس از تقسیم‌بندی دیواره و ازاره پردیس مرکزی دانشگاه هنر اسلامی و تمیزکاری به‌منظور حفاظت پیشگیرانه و عمل استحکام‌بخشی این روش تحت عنوان بهترین شیوه و مناسب‌ترین ماده استحکام‌بخش در مناسب‌ترین فصل سال (بر اساس نمودارهای اقلیمی هواشناسی تبریز، ماه مرداد بهترین فصل کار عملی مرمت شناخته شد) به مرحله اجرا درآمد.

واژگان کلیدی: استحکام‌بخشی، رزین و چسب، سنگ تراکیت، مرمت، حفاظت پیشگیرانه.

مقدمه

مجموعه چرم‌سازی خسروی واقع در استان آذربایجان شرقی شهرستان تبریز به نشانی: خیابان آزادی، ضلع جنوبی چهارراه حکیم نظامی در سال ۱۳۱۰ ه.ش هم‌زمان با شرکت کبریت‌سازی صدقیان و ممتاز تأسیس شد و در سال ۱۳۱۱ به بهره‌برداری رسید و مساحت آن بالغ بر سی‌وشش هزار مترمربع است. در داخل سوله‌ها، تأسیسات مکانیکی کارخانه و نیز اولین ژنراتور برق تبریز باقی‌مانده است (احمدخان بیگی و دیگران، ۱۳۹۳). این مجموعه که هم‌اکنون پس از تعمیرات و بازسازی‌های صورت گرفته به محوطه دانشگاه هنر اسلامی تبریز تغییر کاربری داده، همچنان تا به امروز در حال توسعه فیزیکی است. گسترده‌سازی روزافزون محوطه‌های اطراف دانشکده پردیس و خریداری مجموعه ساختمان‌ها و کاشانه‌های دورتادور و افزودن این زمین‌ها به ابعاد دانشکده پردیس از برنامه‌های آتی دانشگاه است. آنچه در این میان حائز اهمیت است، جنس سنگ‌هایی است که در ساخت این مجموعه به کار رفته است. این موضوع اهمیت بالا و کاربری زیاد این دسته سنگ‌ها را نشان داده و بر نقش حفاظت پیشگیرانه، تأکیدی دوچندان می‌کند. برگرداندن یکپارچگی مکانیکی سنگ هوازده از اهداف اصلی استحکام‌بخشی است. استحکام‌بخشی برای مقاوم‌سازی و تضمین پایداری اثر صورت می‌گیرد. این مفهوم را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: مجموعه عملیاتی که سبب تقویت قوای مکانیکی، افزایش دوام اثر و درنهایت موجب بازگرداندن انسجام ساختار سنگ گردد، به نحوی که یا توانایی رویارویی با عملیات حفاظت و مرمت را پیدا کند یا در طولانی‌مدت پایدار بماند (شکفته و دیگران، ۱۳۹۶). هدف درمان استحکام‌بخشی تجدید پیوندها میان ذراتی است که



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام‌بخشی
سنگ تراکیت



تضعیف و دچار ریزترک شده یا به وسیله دیگر مکانیسم‌های تخریبی و هوازگی از دست رفته باشند. درمان باید میزان طول عمر و بقای سنگ را بدون ایجاد پیامدهای مضر افزایش دهد. در این امر به ماده استحکام‌بخشی نیاز است که عمق نفوذ زیادی در سنگ‌ها داشته باشد و سپس سخت شود. در کاربرد، غلظت اولین و مهم‌ترین عامل به شمار می‌آید، زیرا گرانروی بر سرعت و عمق نفوذ اثر می‌گذارد. انعطاف‌پذیری پس از عمل‌آوری، نفوذپذیری در برابر آب، فراریت، قابلیت اشتعال و سمی بودن از جمله موارد قابل توجه است.

از آنجا که استحکام‌بخشی برگشت‌ناپذیر است، صرفاً باید از موادی استفاده شود که پایداری آن‌ها به اثبات رسیده باشد. باید مقدار استحکام‌بخش مورد استفاده حداقل باشد. عاقلانه است فرض کنیم شیئی که آن قدر ضعیف است که نیاز به استحکام‌بخشی دارد، موقع زدودن استحکام‌بخش مقاومت خیلی کمتری نیز خواهد داشت (اسلامی، ۱۳۸۸). استحکام‌بخشی درواقع کاربرد موادی است که در عمق سنگ نفوذ می‌کنند و استقامت و خواص مکانیکی و چسبندگی بخش‌های پوسیده را بهبود می‌بخشند درمان نمونه‌های سنگی با استحکام‌بخش‌ها، رزین‌ها و چسب‌ها غالباً با کاهش تخلخل همراه است و در توزیع اندازه منافذ تغییراتی ایجاد می‌کند که هدف و انگیزه اصلی هرگونه استحکام‌بخشی روی سطوح مواد معدنی است. بسته به جنس سنگ میزان تخلخل و سختی و شکنندگی متفاوت است. مواد استحکام‌بخش را می‌توان به شیوه‌های مختلفی روی اثر اعمال کرد که با توجه به جنس و نوع اثر و قدمت و پیرشدگی اثر تحت شرایط مختلف متفاوت است. روش‌های رایج به شرح زیر است (دوئن و دیگران، ۱۳۹۴، ۸۹-۹۱).

مواد تجاری شیمیایی ضدآب و عوامل حفاظت‌کننده از سنگ، سال‌هاست که در بازار به فروش می‌رسد. وظیفه اصلی آن‌ها پر کردن منافذ و سوراخ‌های سنگ با مواد نامحلول در آب است. برای این کار از روغن بزرگ، موم‌ها و استعارات فلزی استفاده شده است. روغن بزرگ و موم ظاهر سنگ را تغییر می‌دهند و چرک‌ها را جذب می‌کنند. دفع‌کننده‌های آب سیلیکونی با حلال‌ها یا بازهای آلی نیز به‌طور وسیع در بازار به فروش می‌رسد اما نتایج رضایت‌بخشی به دنبال نداشته است. سیلیکون‌ها در بهترین حالت، اثر موقتی دارند و در بدترین حالت، ممکن است مشکل رطوبت را دوچندان کنند (دوئن و دیگران، ۱۳۹۴، ۹۶-۹۹). استحکام‌بخش‌های سنگ را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی نمود.

استحکام‌بخش‌های پلیمری آلی (ازجمله آکریلیک‌ها، سیلیکون‌ها، وینیل‌ها، پلی‌استرها، یورتان‌ها و اپوکسی) هدفشان تقویت سنگ از طریق دو سازوکار است؛ یکی از طریق شکل‌گیری مولکول‌هایی که هنگام تبخیر حلال سخت می‌شوند (پلیمرهای گرمانرم) و دو آن‌هایی که هنگام اتصال متقابل با رزین (پلیمرهای گرماسخت) نیاز به پخت دارند که بدین ترتیب با ایجاد یک شبکه جامد موجب پیوند دانه‌ها با یکدیگر می‌گردند (شکفته و دیگران، ۱۳۹۶). استحکام‌بخش‌های متنوع و گوناگونی برای امر استحکام‌بخشی شیء سنگی استفاده می‌شود که به برخی از رایج‌ترین‌ها در زیر اشاره

شده است. از میان این اسامی دو استحکام بخش پارالوئید و اپوکسی که به ترتیب زیرشاخه رزین های آکریلیک و رزین های اپوکسی اند برای مقیاس کلی معیارهای تحقیق استفاده شده است. رزین ها در امر مرمت برای مقاصد استحکام بخشی، چسبانیدن، پوشش دهی، قالب گیری، نگه دارندگی و امر نمایش و انبار مواد کاربرد دارند و به دو شاخه اصلی رزین های آکریلیک و رزین های اپوکسی تقسیم می شوند (حدادی و محمدی، ۱۳۸۸). معمولاً استحکام بخش های پلیمری با دو هدف استحکام بخشی و نقش دافع آب بودن مورد استفاده قرار می گیرند یک تثبیت کننده مناسب را می توان چنین تعریف کرد که شامل یک چسب به علاوه عامل نفوذکننده است که پس از ترکیب شدن دارای دوام و پایداری مناسب بوده و در صورت لزوم برگشت پذیر باشد (کا کوئی، ۱۳۸۹).

با توجه به سردسیر بودن منطقه آذربایجان شرقی، شهر تبریز واجد شرایط آب و هوایی سرد و یخبندان بوده و مطالعات چندین دهه اخیر در مورد آب و هوای این شهر ما را به این نتیجه می رساند که باید اقداماتی جهت محافظت از آثار در مقابل این شرایط آب و هوایی انجام داد تا آسیب های ناشی از یخ بر شدن در آثار سنگی و پودر شدن در اثر سرد و گرم شدن متناوب را به حداقل رساند. این پژوهش به صورت کتابخانه ای، میدانی، مشاهده ای و آزمایشگاهی صورت گرفته است.

معرفی نمونه ها

برای اقدامات مربوط به آماده سازی نمونه سنگ ها از قطعات بزرگ سنگ اسپراخون به کار برده شده در پله های درحال ساخت بخش شرقی پردیس مرکزی دانشگاه هنر اسلامی استفاده شد. قطعات سنگ به مکعب هایی در ابعاد $5 \times 5 \times 7$ سانتی متر به تعداد بیست و شش عدد برش داده شد و شماره گذاری گردید و کامل خشک و عاری از رطوبت گردید. نمونه ها شش به شش برای اعمال مواد تقسیم شد؛ شش شماره اول با اپوکسی (آرالدیت دو جری ۲۰۱۱) در استون با غلظت ۷٪ اشباع شد.



شش نمونه از شماره هفتم تا دوازدهم خالی از اعمال هرگونه ماده ای (با خود نمونه سنگ کار می شود) و شش نمونه از شماره سیزدهم تا هجدهم سنگ ها با پارالوئید ۷٪ محلول در استون اشباع شد. سنگ های اشباع شده یک الی دو ماه استراحت دیدند و عملیات یک ماه پس از اشباع کردن سنگ ها انجام شد (شکل ۱).

■ تصویر ۱: بارکدگذاری نمونه های مکعبی شکل سنگ تراکیت مورد استفاده در پله سازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز



ارزیابی کارایی رزین های پارالوئید و اپوکسی در استحکام بخشی سنگ تراکیت



استحکام بخشی از مهم ترین مراحل حفاظت و مرمت مصالح معماری و بخصوص سنگ ها و آثار سنگی است، استفاده از استانداردهای بین المللی می تواند به قابل اعتماد و ارزیابی شدن نتایج بینجامد. با در نظر گرفتن انجام اقدامات علمی و آزمایشگاهی برای بررسی استحکام بخش بهینه جهت حفاظت و مرمت سطوح معماری و خصوصاً سنگ ها ابتدا با معرفی نمونه ها و روش آماده سازی آن ها پرداخته شده و در ادامه به روش هایی به کاررفته گرفته شده است. در راستای راهبرد انجام دادن مرحله ای این تحقیق آزمایش ها در قالب سه آزمایش ساختارشناسی، شناخت خواص فیزیکی و ارزیابی خواص استقامتی و دوام داری (Slake Durability) نمونه های خام و نمونه های استحکام بخشی تقسیم بندی شده که در این مقاله به صورت اجمالی به آن پرداخته شده است.

روش های استحکام بخشی قلم موزنی و اشباع

شیوه اشباع سنگ ها: از استون به عنوان حلال رزین ها استفاده شد. ۷٪ اپوکسی به معنای حل کردن هفت گرم اپوکسی در صد میلی لیتر (استون) است. این نسبت به علت زیاد بودن حجم نمونه سنگ ها پنج برابر شد و به ازای ۵۰۰ میلی لیتر (نیم لیتر) استون؛ ۳۵ گرم ماده اپوکسی وزن و در استون حل شد. اپوکسی از دو جزء سخت شونده و رزین تشکیل شده که به نسبت یک به دو از آن تهیه گردید. سنگ ها به مدت دو ساعت درون حلال ساخته شده غوطه ور گشته و به مدت یک ماه و یک هفته روی توری نگهداری و استراحت داده شد.

شیوه غوطه وری نمونه ها با پارالوئید ۵-۷٪ محلول در استون نیز به همین شیوه انجام شد و نمونه های غوطه وری شده با این حلال نیز به مدت یک ماه استراحت داده شد تا واکنش کامل شود و نمونه ها کاملاً خشک گردند.

شیوه قلم موزنی سنگ ها: مواد استحکام بخش پارالوئید و اپوکسی به مانند روش بالا با غلظت ۷٪ تهیه شده و چندین بار به صورت متوالی با قلم موی نرم با ضخامت مناسب مواد به سطح سنگ تثبیت شد، طوری که تمامی جهات مکعب های سنگی را پوشش دهد. این کار سه الی چهار بار ادامه یافت تا سطح به طور کامل پوشش دهی شود و همچنین از تشکیل فیلمی غلیظ که امکان جدایی اش از سطح سنگ در آن به وجود آید، ممانعت به عمل آید (رازانی و نعمانی خیای، ۱۴۰۲).

روش های آزمایشگاهی

ساختارشناسی

در مورد ساختارشناسی سنگ های مورد مطالعه از دو روش پراش پرتو ایکس و فلورسانس اشعه ایکس به صورت مستقیم استفاده شده و اطلاعات ساختارشناسی با پتروگرافی مقطع نازک از مطالعات مرتبط استخراج شده است. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی کیفی انواع کانی ها

و فازهای موجود در مواد به کار می‌رود. از انواع نمونه‌هایی که به‌وسیله این روش می‌توانند مورد آزمایش قرار گیرند، می‌توان سنگ‌ها، سرامیک‌ها، محصولات خوردگی فلزات، خاک، انواع ملاط و اندود را نام برد (حدادی و محمدی، ۱۳۸۸).

این روش در مطالعات میراث فرهنگی به‌منظور شناسایی و تشخیص فازهای بلوره‌ای موجود در نمونه‌ها و همچنین تعیین وجود یا عدم وجود فازهایی که در مقاطع نازک قابل مشاهده نیستند و از طریق آنالیز پراش پرتوایکس بر روی نمونه سنگ سالم با روش پودری به‌وسیله دستگاه دیفراکتومتر مدل PW۱۸۰۰، ساخت شرکت PHILIPS هلند در شرکت بیم‌گستر انجام گرفت. از آنالیز فلورسانس پرتوایکس (XRF) که روشی غیر تخریبی برای اندازه‌گیری ترکیب عنصری مواد است و برای شناسایی سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس برای آنالیز عنصری و به‌طور نیمه کمی استفاده شده است. هنگامی که اتم‌های ماده‌ای از سوی ذرات پراثری بمباران می‌شوند، امکان کنده شدن الکترون از لایه‌های داخلی وجود دارد.

این جای خالی بلافاصله با یک الکترون از لایه بالاتر پر می‌شود. اختلاف سطح انرژی این انتقال الکترونی، منجر به نشر پرتوهای ایکس می‌شود. این پرتوها که تحت عنوان پرتوهای اشعه ایکس مشخصه نام برده می‌شوند، برای هر عنصر مخصوص به آن هستند؛ بنابراین انرژی‌های نشر شده پرتوهای ایکس به‌عنوان مبنایی برای تجزیه کیفی مواد قرار می‌گیرند. این دستگاه در کنار روش‌های کانی‌شناسی، مانند پراش پرتوایکس و پتروگرافی به‌صورت مکمل استفاده می‌شود. از انواع نمونه‌هایی که از طریق این روش می‌توانند مورد آزمایش قرار گیرند، می‌توان سنگ‌ها، سرامیک‌ها، آلیاژهای فلزی و محصولات خوردگی آن‌ها، خاک، انواع ملاط و اندود را نام برد (استوارت، ۱۳۹۳: ۳۱۴-۳۳۲).

برای آماده‌سازی نمونه این آنالیز باید به مقداری که دستگاه مورد نظر دقت داشته باشد، نمونه به شکل پودری درآید. سنگ تراکیت مورد استفاده در پله‌های در حال ساخت بخش شرقی پردیس مرکزی دانشگاه هنر اسلامی تبریز برای این کار به شکل پودر مانند درآورده شد و به‌وسیله دستگاه با مدل PW۱۴۱۰ ساخت شرکت PHILIPS هلند آنالیزی به‌منظور شناسایی آزمون درصد عناصر موجود در نمونه پودری سنگ در بازه سدیم تا اورانیوم از ۰,۰۰۱ تا ۹۹,۹۹٪ صورت گرفت.

خواص فیزیکی

الف: آزمون جذب موینگی آب

رطوبت موجود در سنگ به علت برهم‌کنشی که با سطوح کانی‌های تشکیل‌دهنده دارد و تغییراتی که در مشخصات این سطوح و طبیعت پیوند بین آن‌ها ایجاد می‌کند، مقاومت سنگ را کاهش می‌دهد. این کاهش ممکن است به‌سبب افزایش فشار آب موینه یا کاهش اصطکاک داخلی و



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام بخشی
سنگ تراکیت



چسبندگی ذرات باشد. از طرفی واکنش‌های شیمیایی که بین آب و سنگ اتفاق می‌افتد موجب تغییر فرمول شیمیایی کانی‌ها شده و اکثر این تغییرات درجهت تضعیف مقاومت سنگ عمل می‌کنند. به دلیل اینکه روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری سنگ در استانداردهای موجود برای قطعات سنگی تحت فشار اندازه‌گیری می‌شود و نمی‌توان نفوذپذیری سنگ را در فشار اتمسفری به دست آورد، از این روش به‌طور غیرمستقیم برای اندازه‌گیری نرخ جذب آب اولیه (میزان آب جذب‌شده به‌وسیله منافذ مرتبط سنگ)، ثانویه (میزان آب جذب‌شده به فضاهای درون‌دانه‌ای سنگ) و ارتفاع وزن مویینه سنگ در فشار اتمسفری مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس آزمایش محاسبه نرخ جذب آب از سوی یک نمونه سنگ، به‌واسطه افزایش وزن آن در نتیجه جذب آب به صورت تابعی از زمان است. در حالتی که فقط یک سطح از نمونه در معرض جذب آب قرار گرفته باشد، برای اندازه‌گیری این ویژگی از استاندارد ۱۵۸۵، ASTM D-۲۰۰۴ استفاده شده است (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷) این آزمون از جمله آزمون‌های انجام‌شده به‌منظور شناسایی خواص فیزیکی ساختار سنگ است که برای شناسایی خصوصیات درونی و برونی فیزیکی-مکانیکی سنگ طی چند ماه انجام شد. آزمایش بدین صورت است که یک ماه بعد از غوطه‌وری، نمونه‌ها دوباره وزن می‌شود تا تغییرات زمانی در وزن آن‌ها لحاظ شود. آزمون مویینه‌گی برای نمونه سنگ‌ها در دو جهت افقی و عمودی انجام شد تا میزان جذب آب از هر دو سمت نامعلوم سنگ به دست آید. رسم نمودارها و جدول‌های مربوط به آزمایش‌های فیزیکی و دوام‌داری با استفاده از نرم‌افزار Sigma Plot سیگما پلات نسخه ۲۰۱۶ صورت گرفت.

ب: آزمون جذب آب و اشباع

جذب آب عبارت است از افزایش وزن نمونه سنگ‌ها در اثر آبی که در خلل و فرج آن‌ها در اثر اشباع آن‌ها در آب به مدت چند ساعت نفوذ می‌کند (ASTM C127-88) (جینل، ۲۰۰۸). کمیت جذب آب برای محاسبه تغییرات وزن سنگ در اثر جذب آب در حفرات درونی آن (هنگامی که نمونه‌ها به‌اندازه کافی در مجاورت آب قرار داده می‌شوند) و مقایسه با شرایط خشک، به کار می‌رود. در آزمایشگاه برای تعیین میزان جذب آب و اشباع، نمونه‌های خشک را به مدت ۲ الی ۳ ساعت در آب قرار می‌دهند و پس از نم‌گیری میزان از دست دادن آب نمونه‌ها را طی ساعات مشخصی از کمترین زمان برحسب دقیقه تا ماکزیمم زمان برحسب روز تا زمانی که نمونه‌ها کاملاً خشک شوند، هر بار وزن می‌شود. تعداد روز و میزان از دست رفتن آب در این آزمون ملاک کار است.

درصد جذب آب را می‌توان با فرمول زیر محاسبه کرد: $M\%W = 100 \times W_{SAT} - W_S / W_S$

درصد جذب آب $M_{\%W} / W_S$ وزن خشک / وزن اشباع W_{SAT}

ج: آزمون دوام‌داری

یکی از ویژگی‌های قابل توجه سنگ میزان وارفتگی و تأثیرپذیری آن در فرایندهای هوازدگی مانند اکسیداسیون، هیدراسیون، وارفتگی، سایش، پوسته‌شدن و انحلال است که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ شده و قابلیت باربری آن‌ها را کاهش می‌دهد. این روش آزمایش برای تعیین میزان مقاومت یک نمونه سنگی تحت تأثیر دو مرحله تر و خشک شدن متوالی به کار می‌رود. مقدار درصد وزنی باقی‌مانده نمونه پس از این دو مرحله تر و خشک شدن را شاخص دوام گویند که این نشانگر میزان پایداری سنگ در برابر هوازدگی طبیعی است. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدگی کمتر است.

شاخص دوام، معیاری بسیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در برابر سایش و تر و خشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی آب است که روش تعیین آن را فرانکلین و چاندرا ارائه کردند و در سال ۱۹۷۹ از سوی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ به صورت استاندارد درآمد (امینی و دیگران، ۱۳۹۴).

هدف این آزمایش تعیین دوام سنگ در برابر هوازدگی و وارفتگی ناشی از تر و خشک شدن براساس استاندارد ASTM D 4644 است. ده قطعه نمونه به وزن کلی ۴۵۰ تا ۵۵۰ گرم برای کار در نظر گرفته شد. مراحل انجام دادن آزمایش به ترتیب زیر است:

۱- تعیین رطوبت اولیه نمونه

۲- خشک کردن نمونه و استوانه در گرمخانه با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و توزین آن‌ها

۳- قرار دادن استوانه مشبک و نمونه در تشت و اتصال به موتور

۴- پر کردن تشت از مایع و دَوَران استوانه به تعداد ۲۰۰ دور در ۱۰ دقیقه

۵- خشک کردن نمونه و استوانه مشبک و توزین آن‌ها

۶- مرحله دوم: تکرار مراحل ۳ تا ۵ و توزین نهایی استوانه و نمونه خشک (فهمی فر، ۱۳۸۰ و

۱۳۸۹)

۷- محاسبه درصد وزنی بر اساس فرمول زیر

$$Id_p = \frac{C - D}{A - D} \times 100 (\%)$$



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام بخشی
سنگ تراکیت

مقاومت سنجی و پیرسازی تسریعی

جهت شناسایی رفتار سنگ و سنجش میزان استقامت سنگ در برابر آب، یخبندان، تغییرات حرارتی و غیره سه دسته آزمون کلی پیرسازی که مرتبط با تر و خشک شدن، حمله نمکی و یخ زدگی است، با استانداردهای گوناگون انجام شد. جدول وینکلر (جدول ۱) بر اساس نتایج حاصل از آزمایش ها، داده ها را قابل تفسیر می سازد.

■ جدول ۱- تنظیم شده به وسیله وینکلر (بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴)

وضعیت	باقیمانده %
خوب و سالم	۹۰-۸۰ %
نیاز به آزمایش های بیشتر	۸۰-۷۰ %
ناسالم و مقاومت کم	۷۰-۶۰ %
بسیار ضعیف	کمتر از ۶۰ %



فصلنامه بنیان هنر
شماره ششم
بهار ۱۴۰۴

۳۵

الف-مقاومت در برابر شوک حرارتی (تر و خشک شدن متوالی)

انبساط در برابر رطوبت معادل انبساط در ۵۰ درجه سانتی گراد دما است (جینل، ۲۰۰۸). سنگ به دلیل جذب آب و انبساط و انقباض در اثر چرخه های تر و خشک شدن دچار تنش هایی می شود که باعث متلاشی شدن بافت و تخریب آن می شود که با انجام دادن این آزمایش در زمانی حدوداً یک ماهه (۲۸ روز کامل) میزان دوام سنگ در برابر تر و خشک شدن متوالی تخمین زده می شود. به این منظور این چرخه بر روی سه نمونه سنگ طی ساعات و روز مشخص بر اساس استاندارد ASTM D5313، ۲۰۰۴ صورت پذیرفت. وزن نمونه سنگ ها پس از هر چرخه در جدول ثبت و با استفاده از نمودار، روند کاهش وزن نمونه ها درج و درصد وزنی نمونه های نهایی (تقسیم وزن نهایی بر وزن اولیه ضرب در ۱۰۰) محاسبه شد.

نکته: برای به حداقل رساندن خطاهای آزمایش در چرخه های پیرسازی سه نمونه مورد استفاده قرار گرفت. (استثنائاً برای نمونه هایی که با قلم موزنی استحکام بخشی شده اند، از دو نمونه استفاده شد)

ب-مقاومت در برابر یخ زدگی-ذوب شدگی متوالی

این آزمایش به دوباره سازی تنش های ایجاد شده در سنگ به هنگام شکل گیری بلورهای یخ در منافذ آن توجه دارد و به طور کلی به وسیله تغییرات دما زیر و بالای صفر درجه سانتی گراد کنترل می شود. دوام در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی همانند دوام تر و خشک شدن به درجه اشباع سنگ، تخلخل

مؤثر سنگ، نحوه توزیع و اندازه حفرات و همچنین به دامنه تغییرات دمای محیط بستگی دارد (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷). آزمایش مذکور طبق استاندارد (ASTM، ۲۰۰۴) (ASTMD5۳۱۲، ۲۰۰۴) صورت پذیرفت.

ج-مقاومت در برابر حمله و تبلور نمک

نمک سدیم سولفات ده برابر حجم خود افزایش حجم پیدا کرده، لذا سرعت و شدت تخریب با این نوع نمک بسیار زیاد است. سنگ به دلیل جذب آب حاوی نمک منبسط شده و دچار نهان شکستگی می شود. انبساط و انقباض در اثر چرخه های تر و خشک شدن این تنش را تشدید می کند که در نهایت منجر به متلاشی شدن بافت سنگ و تخریب و پودری شدن آن می شود. با انجام دادن چرخه حمله نمک (تبلور نمک) با استفاده از نمک سولفات سدیم می توان میزان دوام نمونه سنگ ها در برابر مقاومت در مقابل این نوع نمک قوی به همراه چرخه تر و خشک شدن متوالی به تقریب یک ماه (۲۸ روز کامل) تخمین زد. به این منظور این چرخه بر روی سه نمونه سنگ طی ساعات و روز مشخص بر اساس استاندارد ASTM D 5312، ۲۰۰۴ صورت پذیرفت. نکته: به منظور به حداقل رساندن خطاهای آزمایش در چرخه های پیرسازی سه نمونه مورد استفاده گرفته است (استثنائاً برای نمونه هایی که با قلم موزنی استحکام بخشی شده اند از دو نمونه استفاده شد). نمک سولفات سدیم به مقدار ۳۵ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر براساس استاندارد ASTM برای چرخه پیرسازی تبلور نمک مورد نیاز بود. در صورتی که بی آب باشد، بلوری سفید با فرمول Na_2SO_4 تشکیل می دهد که آن را تنار دیت نیز می نامند.

نتایج و یافته پژوهش

براساس تحقیقات و مطالعات پتروگرافی بیشتر انجام شده سنگ های به کاررفته در ازاره های مجموعه چرم سازی خسروی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان جنس سنگ ها مورد شناسایی قرار گرفت. بر این اساس نمونه سنگ خاکستری به کاررفته در ازاره دارای اجزای شکل داری است که عمدتاً از کانی های پلاژیوکلاز فلدسپار تشکیل شده است. این فاز بیش از ۳۵٪ سنگ را تشکیل داده است. سنگ دارای بافتی متراکم است. اجزای شکل دار و درشت این نمونه سنگی از اپال و آلبیت و زمینه نیز اساساً از ماتریکس شیشه ای، کانی های، کائولن و کلسیت تشکیل شده است؛ کلسیت بسیار ریزدانه، در زمینه تشکیل دهنده سنگ قرار گرفته است (احمدخان بیگی و رازانی، ۱۳۹۳).

الف-پراش پرتو ایکس XRD و XRF

نتایج به دست آمده از دو آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و فلورسانس پرتو ایکس (XRF) بیانگر ترکیب کانی شناسی و شیمیایی مشخصی برای نمونه های سنگ تراکیت مورد بررسی هستند. در بررسی کانی شناسی، فازهای اصلی شناسایی شده شامل کوارتز، آنورتیت و گروه فلدسپات های آلکالن



ارزیابی کارایی رزین های پارالوئید و اپوکسی در استحکام بخشی سنگ تراکیت



است. حضور فراوان کوارتز، با ساختار بلوری هرمی و ویژگی‌های نوری مشخص، نشان‌دهنده میزان بالای سیلیس در ساختار کانی‌شناختی این سنگ است. همچنین، آنورتیت (Ndimofor, 2018) به‌عنوان یکی از فلدسپات‌های کلسیک سنگ‌ساز، در کنار فازهای پتاسیم‌دار گروه آلکان، گوبای طبیعت آذرین با ترکیب حد واسط و ساختار پورفیری سنگ است (جدول ۲- تصویر ۲).

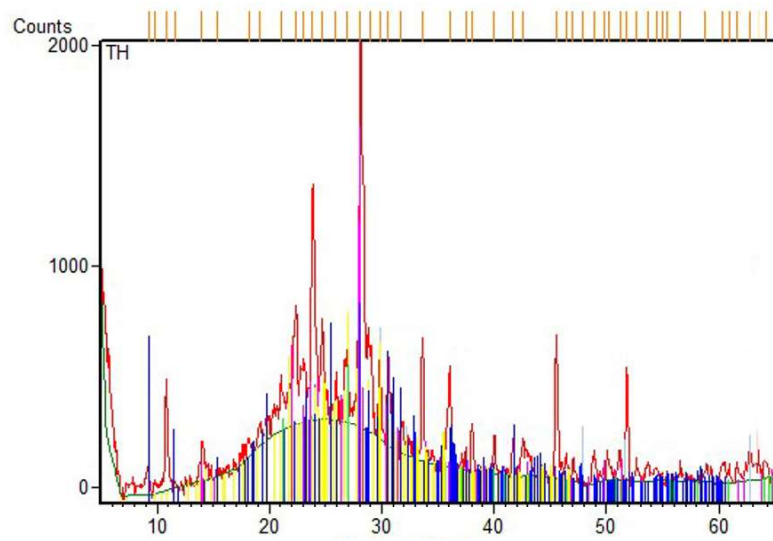
تحلیل شیمیایی عناصر اصلی نشان می‌دهد که اکسید سیلیسیم با بیش از ۷۰٪، ترکیب غالب در تمامی نمونه‌هاست که تأییدکننده زمینه‌ای بسیار سیلیسی در بافت سنگ است. پس از آن، اکسید آلومینیوم نیز با سهمی بالا حضور دارد که با محتوای بالای فلدسپات‌ها و حضور آلومینیوم در ساختار بلوری آن‌ها همخوانی دارد. همچنین غلظت قابل توجه K_2O , CaO , Na_2O در ترکیب سنگ، تنوع و نسبت اختلاط سدیک، کلسیک و پتاسیک را در زمینه‌های فلدسپاری بازتاب می‌دهد. اکسیدهای آهن، منیزیم و تیتانیوم نیز در مقادیر کمتر اما مؤثر، ترکیب شیمیایی سنگ را تکمیل می‌کنند.

در بررسی عناصر کمیاب، غلظت بالای استرانسیم و مس در مقیاس ppm به‌طور برجسته مشاهده شد. همچنین عناصر دیگری مانند باریوم، روی و زیرکونیم نیز در مقادیر قابل توجهی حضور دارند که می‌توانند به خاستگاه ماگمایی سنگ و همچنین تأثیرپذیری آن از فرایندهای سیالاتی یا دگرسانی اشاره داشته باشند. حضور هم‌زمان عناصر نادر و پراکنده، به‌ویژه در مقادیر ناچیز اما معنادار، نشانه‌ای از پیچیدگی زمین‌شناختی و شرایط خاص تبلور این سنگ است.

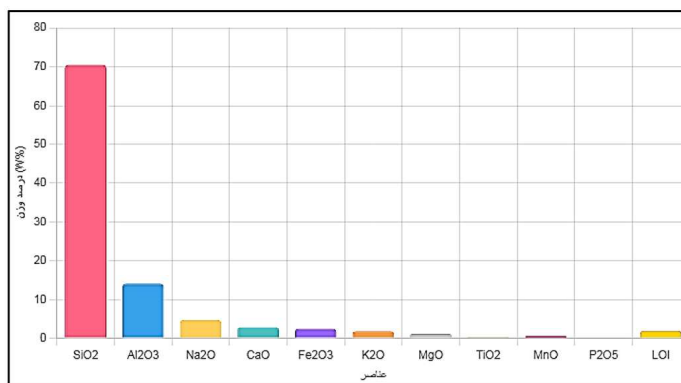
در مجموع، نتایج هر دو آزمون تصویری از یک سنگ آذرین سیلیسی با بافت بلوری متراکم، تنوع فلدسپاتی و محتوای عنصری غنی از عناصر اصلی و ردیاب ارائه می‌دهد؛ ویژگی‌هایی که برای ارزیابی پایداری، منشأ و کاربردهای این سنگ در زمینه‌های باستان‌شناسی، مرمت یا زمین‌ساخت منطقه‌ای ارزش بالایی دارد.

■ جدول ۲- پراش پرتو ایکس XRD

Compound Name	Ref. Code	Chemical Formula
Quartz	01-078-1257	SiO_2
Albite, calcian, ordered	00-041-1480	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$
Anorthite	01-084-0750	$(Ca_{0.94}Na_{0.06})(Al_{1.94}Si_{2.06}O_8)$
Potassium sodium lithium iron magnesium titanium tecto-silicate	01-081-0032	$KNa_2Li(Fe_{1.63}Mg_{0.37})Ti_2(Si_8O_{24})$



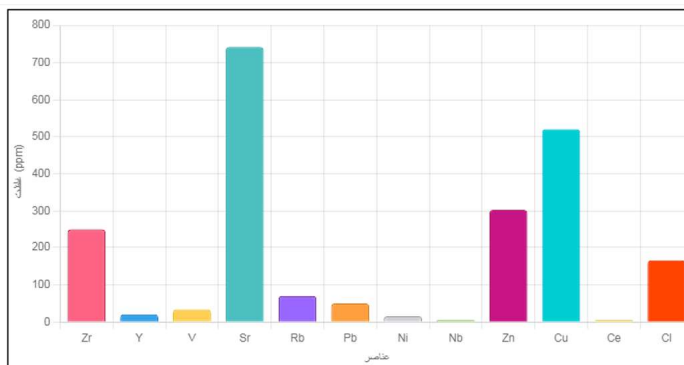
■ تصویر ۲- نمودار پراش پرتو ایکس XRD



■ نمودار ۱- درصد عناصر اصلی اکسیدی موجود در نمونه سنگ‌های تراکیت فلورسانس اشعه ایکس

■ جدول ۳- درصد عناصر موجود در نمونه سنگ‌های تراکیت فلورسانس اشعه ایکس

Elms W%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI
Sample- TH	70.51	14.14	2.34	3.01	4.88	1.00	1.64	0.44	0.08	1.8



■ نمودار ۲- عناصر کمیاب موجود در نمونه سنگ‌های تراکیت فلورسانس اشعه ایکس



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام بخشی
سنگ تراکیت

■ جدول ۴- عناصر موجود در نمونه سنگ‌های تراکیت فلورسانس اشعه ایکس

Elms(ppm)	Cl	Ce	Cu	Zn	Nb	Ni	PB	Rb	Sr	V	Y	Zr
TH	166	5	521	303	5	15	50	70	743	34	21	248

آزمون جذب موینگی آب

نتیجه آزمایش که در نمودارها نشان داده شده، بیانگر آن است که روند جذب آب در نمونه‌های بکر سنگ در جهت افقی و عمودی از دقیقه ۱۸۰ به بعد (سه ساعت) روند صعودی شکسته‌واری به خود می‌گیرد که این زمان جذب آب صعودی وار را نشان می‌دهد. این روند شکستگی صعودی در نمونه سنگ‌های اشباع با پارالوئید و اپوکسی در هر دو جهت افقی و عمودی به ۳۰۰ دقیقه (پنج ساعت) فزونی یافته که این زمان در سنگ‌های استحکام‌بخشی شده با روش قلم‌موزنی با پارالوئید و اپوکسی در هر دو جهت افقی و عمودی به ماکزیمم دقایق خود ۱۴۴۰ دقیقه که معادل یک روز کامل است ارتقا یافته است.

این امر نشان‌دهنده آن است که استحکام و مقاومت سنگ در مقابل جذب آب و رطوبت در حالت استحکام‌بخشی به شیوه قلم‌موزنی با دو ماده استحکام‌بخش اشاره شده بسیار زیاد و رضایت‌بخش است، زیرا هرچه جذب آب کم شود و موینگی کم شود، نشان‌دهنده موار زیر است: لایه استحکام‌بخش عملکرد مؤثرتری دارد. روش قلم‌موزنی در مرحله اول لوله‌های موبین را بسته است و فیلم و لایه‌ای در سطح تشکیل داده که چندان جاذب آب نیست و ارتباط جذب آب را با محیط اطراف تا حد زیادی قطع می‌کند و روش اشباع در مرحله دوم مناسب‌ترین روش استحکام‌بخشی است (جدول ۵).

■ جدول ۵- آزمون‌های مربوط به جذب و موینگی آب با سنگ‌های استحکام‌بخشی شده متفاوت تراکیتی

شکل (نمودار)	شیوه اعمال استحکام‌بخش	نوع ماده استحکام‌بخش	جهت	کدگذاری	تعداد نمونه	زمان برحسب روز
۷	-	سنگ خالی	افقی	S/M.O	۶	۴
۸	-	سنگ خالی	عمودی	S/M.A	۶	۴
۹	اشباع شده	پارالوئید	افقی	SEP/M.O	۶	۴
۱۰	اشباع شده	پارالوئید	عمودی	SEP/M.A	۶	۴
۱۱	اشباع شده	اپوکسی	افقی	SEE/M.O	۶	۴
۱۲	اشباع شده	اپوکسی	عمودی	SEE/M.A	۶	۴
۱۳	قلم‌موزنی	پارالوئید	افقی	SGP/M.O	۴	۴
۱۴	قلم‌موزنی	پارالوئید	عمودی	SGP/M.A	۴	۴
۱۵	قلم‌موزنی	اپوکسی	افقی	SGE/M.O	۴	۴
۱۶	قلم‌موزنی	اپوکسی	عمودی	SGE/M.A	۴	۴



آزمون جذب و دفع آب و اشباع

با توجه به اینکه این روش برعکس آزمون موینگی است و هدف این آزمون تشخیص مدت زمان از دست دادن آب جذب شده به وسیله سنگ و پاسخ به این پرسش که در چه فصلی آب از دست می‌دهد و پی بردن به این مسئله است که آیا در پاییز و زمستان این پدیده می‌تواند منجر به عدم خشک شدن و خیس ماندن سنگ شود یا خیر؛ لذا نتیجه آزمایش که در نمودارها نشان داده شده است بیانگر آن است که روند از دست دادن آب به حالت شکستگی نزولی در نمونه‌های خالی سنگ در جهت افقی و عمودی از دقیقه ۱۲۰ شروع شده و طی پنج روز کامل آب از دست داده است. روند از دست دادن کامل آب در نمونه‌های سنگ استحکام بخشی شده به چهار روز کاهش یافته است. این مسئله نشان دهنده این است که عمل استحکام بخشی عملکرد مثبتی نسبت به سنگ بکر درمان نشده دارد و با انجام دادن این درمان لوله‌های موینه سنگ، بسته شده و عمل جذب آب به وسیله آن کم می‌شود؛ در نتیجه مقدار آب کمتری به خود جذب کرده که در روند از دست دادن آب سریع‌تر به وزن اولیه و خشک خود بر می‌گردد (جدول ۶).

■ جدول ۶- آزمون‌های مربوط به جذب آب و اشباع با سنگ‌های استحکام بخشی شده متفاوت تراکیتی

شکل	شیوه اعمال استحکام بخشی	نوع ماده استحکام بخشی	کدگذاری	تعداد نمونه سنگ‌ها	زمان روز
۱۷	-	سنگ خالی	S/L	۶	۵
۱۸	اشباع سازی	پارالوئید	SEP/L	۶	۴
۱۹	اشباع سازی	پارالوئید	SEE/L	۶	۴
۲۰	(قلم موزنی) مالش	پارالوئید	SGP/L	۴	۴
۲۱	(قلم موزنی) مالش	پارالوئید	SGE/L	۴	۴



ارزیابی کارایی رزین‌های پارالوئید و اپوکسی در استحکام بخشی سنگ تراکیت

آزمون مقاومت سنجی پیرسازی تسریعی^۱

آزمون‌های پیرسازی تسریعی بر روی نمونه‌های سنگ تراکیت با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف استحکام بخشی بر مقاومت سنگ در برابر شرایط محیطی نامطلوب انجام گرفت. در این آزمون‌ها، نمونه‌های سنگ پس از تیمار با مواد استحکام بخشی مختلف (پارالوئید و اپوکسی) تحت چرخه‌های متعدد پیرسازی شامل حمله نمک، تر و خشک شدن و یخ زدگی قرار گرفته‌اند (جدول ۷).

۱. خطی که از نیمه دوم سده دوم هجری به مدت سیصد سال استفاده شده و خصوصیت آن کشیدگی افقی و عمودی، خاتمه الفات افقی و مایل به راست، اضلاع حروف موازی با کمترین فاصله است و قلم جلی آن پهنای مساوی بیشتر و کناره‌ها صاف و بریده است (جباری و معصوم زاده، ۱۳۸۹: ۳۵-۳۴).

■ جدول ۷- خلاصه نتایج آزمون مقاومت سنجی پیرسازی تسریعی

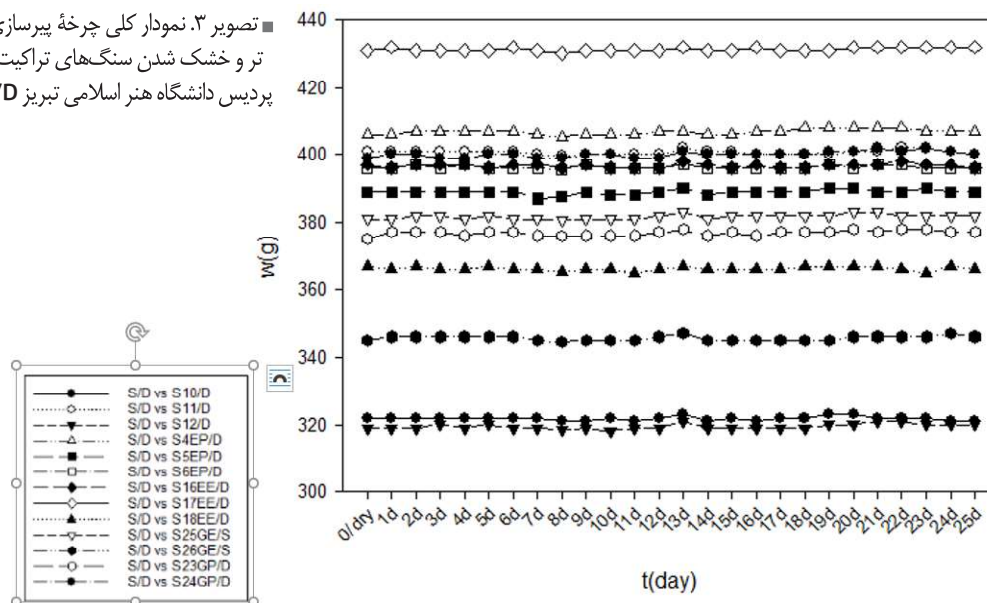
چرخه‌های پیرسازی	کدگذاری	نوع دسته بر اساس شیوه اعمال استحکام‌بخش	نوع استحکام‌بخش اعمال شده	کدگذاری	تعداد نمونه	تعداد چرخه برحسب روز	شکل (نمودار)	
تر و خشک شدن	S/D	سنگ اصلی	-	S ^{۱۰} /D	۳	۲۵	۲۲	
				S ^{۱۱} /D				
				S ^{۱۲} /D				
		اشباع‌سازی شده	پارالوئید	S ^۴ EP/D	۳	۲۵	۲۲	
				S ^۵ EP/D				
				S ^۶ EP/D				
		قلم‌موزنی شده	پارالوئید	S ^{۱۶} EE/D	۳	۲۵	۲۲	
				S ^{۱۷} EE/D				
				S ^{۱۸} EE/D				
	قلم‌موزنی شده	پارالوئید	S ^{۲۳} GP/D	۲	۲۵	۲۲		
			S ^{۲۴} GP/D					
			S ^{۲۵} GE/D					
اپوکسی	اپوکسی	S ^{۲۶} GE/D	۲	۲۵	۲۲			
		S ^۷ /F				۳	۶۳	۲۳
		S ^۸ /F						
خود سنگ	-	S ^۹ /F	۳	۶۳	۲۳			
		S ^۱ EP/F				۳	۶۳	۲۳
		S ^۲ EP/F						
اشباع‌سازی شده	پارالوئید	S ^۳ EP/F	۳	۶۳	۲۳			
		S ^{۱۳} EE/F						
		S ^{۱۴} EE/F						
قلم‌موزنی شده	پارالوئید	S ^{۱۵} EE/F	۲	۶۳	۲۳			
		S ^{۱۹} GP/F						
		S ^{۲۰} GP/F						
قلم‌موزنی شده	پارالوئید	S ^{۲۱} GE/F	۲	۶۳	۲۳			
		S ^{۲۲} GE/F						
		S ^{۱۰} /S				۳	۲۸	۲۴
S ^{۱۱} /S								
S ^{۱۲} /S								
حمله و تبلور نمک بانمک‌سدیم سولفات	SGE/S	خود سنگ		S ^۴ EP/S	۳	۲۸	۲۴	
				S ^۵ EP/S				
				S ^۶ EP/S				
		اشباع‌سازی شده	پارالوئید	S ^{۱۶} EE/S	۳	۲۸	۲۴	
				S ^{۱۷} EE/S				
				S ^{۱۸} EE/S				
		قلم‌موزنی شده	پارالوئید	S ^{۲۳} GP/S	۲	۲۸	۲۴	
				S ^{۲۴} GP/S				
				S ^{۲۵} GE/S				
	قلم‌موزنی شده	پارالوئید	S ^{۲۶} GE/S	۲	۲۸	۲۴		
			S ^{۲۷} GE/S					
			S ^{۲۸} GE/S					



الف-مقاومت در برابر شوک های حرارتی (تر و خشک شدن متوالی)

برای این کار ابتدا نمونه سنگ های تهیه شده مکعبی شکل به صورت دقیق وزن شده و در جدول تنظیم شده ثبت شد. رأس ساعت ۹ صبح تا ساعت ۱۲ به مدت سه ساعت در دمای اتاق قرار داده شد و بعد از این مرحله وزن شد. از ساعت ۱۲ تا ۱۶ معادل چهار ساعت درون آب گذاشته شد و در ادامه از ۱۶ تا ۹ صبح فردا برابر با هفده ساعت در آون با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت. مجدداً از ۹ تا ۱۲ در دمای محیط و وزن کردن و ۱۲ تا ۱۶ در آب و ۱۶ تا ۹ صبح فردا در آون قرار داده شد. این چرخه ۲۵ روز تکرار و وزن تک تک نمونه سنگ ها پس از هر چرخه ثبت شد تا مقایسه و محاسبه نهایی صورت پذیرد (تصویر ۳- جدول ۸).

■ تصویر ۳. نمودار کلی چرخه پیرسازی
تر و خشک شدن سنگ های تراکیت
پردیس دانشگاه هنر اسلامی تبریز S/D



■ جدول ۸- محاسبه درصد وزنی حاصل از چرخه های پیرسازی شوک حرارتی (تر و خشک شدن)

کد سنگ	شماره	مشخصات	درصد وزنی	شکل
S/D	۱۲-۱۱-۱۰	سنگ خالی	۹۹,۸۱	۲۲
SEP/D	۶-۵-۴	سنگ اشباع شده با پارالوئید	۱۰۰	۲۲
SEE/D	۱۸-۱۷-۱۶	سنگ اشباع شده با اپوکسی	۱۰۰	۲۲
SGP/D	۲۴-۲۳	سنگ قلم موزنی شده با پارالوئید	۱۰۰	۲۲
SGE/D	۲۶-۲۵	سنگ قلم موزنی شده با اپوکسی	۱۰۰	۲۲



ارزیابی کارایی رزین های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام بخشی
سنگ تراکیت



روش محاسبه به این صورت است که با توجه به فرمول زیر با تقسیم آخرین وزن سنگ بر وزن اولیه، درصد وزنی به دست می‌آید. برای دقیق‌تر بودن نتیجه درصد وزنی سه نمونه سنگ به صورت مستقل به دست آورده (البته برای سنگ‌های قلم‌موزده شده دو نمونه استفاده شد) و میانگین درصد وزنی سه سنگ اعمال می‌شود. نتیجه آزمایش که در نمودارها نشان داده شده است، نشان می‌دهد که با توجه به نتایج حاصل شده و انطباق با جدول وینکلر می‌توان به این نتیجه دست یافت که مقاومت کلی سنگ تراکیت به کاربرده شده در دیواره‌های دانشکده از میزان مقاومت بالایی برخوردار است که با اعمال هر نوع ماده استحکام‌بخش به هر شیوه استحکام و مقاومت صد در صدی برای سنگ تخمین زده می‌شود که عملکرد مثبت و بهینه‌ای دارد.

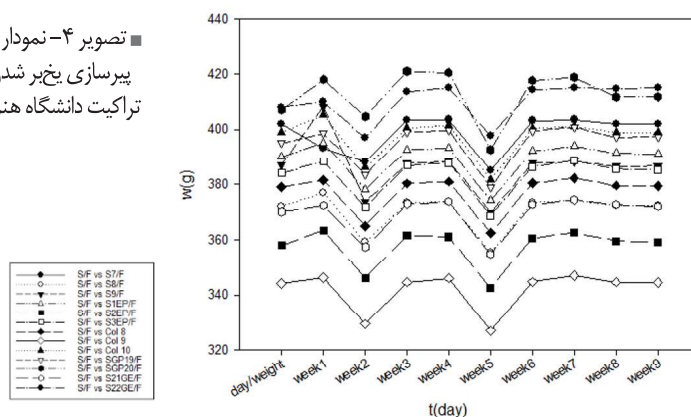
ب- مقاومت در برابر یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی

برای این کار ابتدا نمونه سنگ‌های تهیه‌شده مکعبی شکل به صورت دقیق وزن شده و در جدول تنظیم شده ثبت شد. ساعت ۹ صبح تا ۱۴ در فریزر و از ۱۴ تا ۱۶ در دمای اتاق و بعد از آن از ۱۶ تا ۹ صبح فردا در آب گذاشته شد. در این آزمایش وزن مراحل اولیه و آخری نیاز است تا با فرمول پیش رو بتوان میانگینی از مقاومت سنگ در برابر اقلیم‌های سرد و یخبندان به دست آورد. با توجه به میانگین روزهای یخبندان تبریز (۸،۸۳) که معادل ۹ سال یخبندان در معادله میانگین ۷۰ سال اخیر آب‌وهوای تبریز است؛ اگر هر چرخه هفت‌روزه عملیات پیرسازی یخ‌بر شدن، یک سال در نظر گرفته شود، ۹ چرخه (معادل ۶۳ روز) برای به دست آوردن نتایج مد نظر انجام شده است (شکل ۴- جدول ۹).

■ محاسبات تعداد چرخه مورد نیاز برای چرخه یخ‌بر شدن

۷ روز چرخه = ۱ سال در نظر گرفته شد
۹ سال میانگین روزهای یخبندان ۷۰ سال اخیر آب و هوای تبریز
$۶۳ = ۷ \times ۹$ روز

■ تصویر ۴- نمودار کلی چرخه
پیرسازی یخ‌بر شدن سنگ‌های
تراکیت دانشگاه هنر اسلامی تبریز S/F



جدول ۹- محاسبه درصد وزنی حاصل از چرخه‌های پیرسازی مقاومت در برابر یخ‌زدگی-ذوب‌شدگی

نمودار	درصد وزنی	مشخصات	شماره	کد سنگ
۲۳	۹۹,۹۱	سنگ خالی	۹-۸-۷	S/F
۲۳	۱۰۰	سنگ اشباع‌شده با پارالوئید	۳-۲-۱	SEP/F
۲۳	۹۹,۹۷	سنگ اشباع‌شده با اپوکسی	۱۵-۱۴-۱۳	SEE/F
۲۳	۱۰۰	سنگ قلم‌موزنی شده با پارالوئید	۲۰-۱۹	SGP/F
۲۳	۱۰۰	سنگ قلم‌موزنی شده با اپوکسی	۲۲-۲۱	SGE/F

با توجه به فرمول زیر با تقسیم آخرین وزن سنگ بر وزن اولیه، درصد وزنی به دست می‌آید. برای دقیق‌تر بودن نتیجه درصد وزنی سه نمونه سنگ، مستقلاً به دست آورده (البته برای سنگ‌های قلم‌موزده شده دو نمونه استفاده شد) و میانگین درصد وزنی آن سه سنگ اعمال می‌شود. با در نظر گرفتن نمودارها نتیجه آزمایش بیانگر آن است که عملکرد روش اعمال ماده استحکام‌بخش با قلم‌موز میزان صد درصد مقاومت برای این نوع سنگ را نشان می‌دهد و پس از روش قلم‌موزنی با هر دو نوع استحکام‌بخش، در روش اشباع با پارالوئید، نتیجه مشاهده شده کاملاً رضایت‌بخش بود. روش اشباع با اپوکسی در مقایسه با سایر روش‌ها عملکرد ضعیف‌تری دارد.

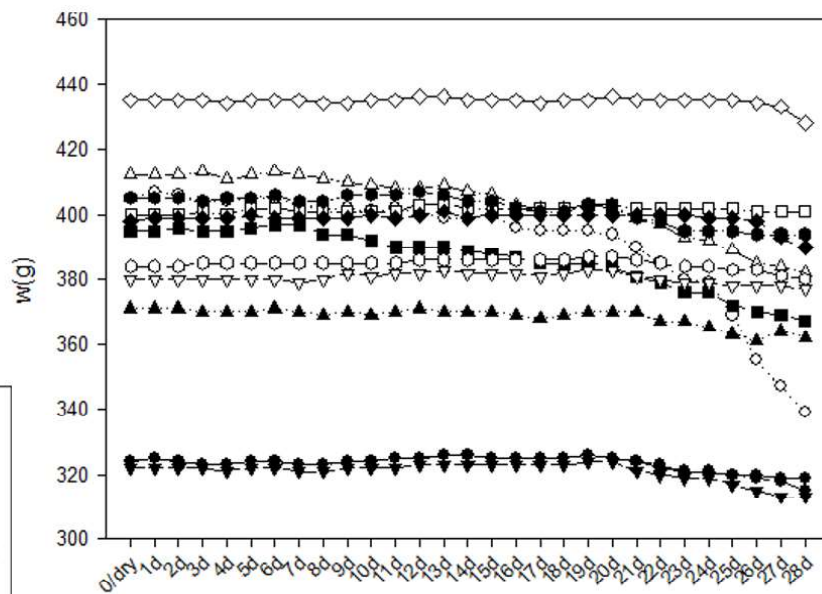
ج- مقاومت در برابر تبلور نمک

برای این کار نمونه سنگ‌های ساخته شده ابتدا به صورت دقیق وزن شده و در جدول تنظیم شده ثبت گردید. رأس ساعت ۹ صبح تا ساعت ۱۲ در دمای اتاق قرار داده شد (سه ساعت) و بعد از این مرحله وزن شد. از ساعت ۱۲ تا ۱۶ معادل چهار ساعت درون آب‌نم و در ادامه از ۱۶ تا ۹ صبح فردا معادل هفده ساعت در آون با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بار دیگر از ۹ تا ۱۲ در دمای محیط و وزن کردن و ۱۲ تا ۱۶ در آب‌نمک و ۱۶ تا ۹ صبح فردا در آون قرار گرفت و این چرخه ۲۸ بار تکرار و وزن تک‌تک نمونه سنگ‌ها پس از هر چرخه ثبت شد تا مقایسه و محاسبه نهایی صورت پذیرد. شایان ذکر است که در حدود دو هفته این چرخه‌ها ابتدا با نمک سدیم انجام شد که در آن پایان‌نامه اشاره‌ای به این مطلب نشده و تنها مستندات مربوط به نمک سولفات سدیم که تقریباً یک ماه بر روی نمونه‌ها انجام گرفته، لحاظ شده است. وزن نمونه سنگ‌ها پس از هر چرخه در جدول ثبت و با استفاده از نمودار روند کاهش وزن نمونه‌ها درج شد. با محاسبه درصد وزنی نمونه‌های نهایی (تقسیم وزن نهایی بر وزن اولیه ضرب در ۱۰۰) جدولی تنظیم شد تا مقایسه روش‌ها انجام شود (شکل ۵- جدول ۱۰).



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام‌بخشی
سنگ تراکیت

تصویر ۵- نمودار کلی پیرسازی تبلور نمک سنگ‌های تراکیت دانشگاه هنر اسلامی تبریز S/S



جدول ۱۰- محاسبه درصد وزنی حاصل از چرخه‌های پیرسازی مقاومت در برابر شوک حرارتی

نمودار	درصد وزنی	تعداد چرخه	مشخصات	شماره	کد سنگ
۲۴	۹۳,۱۱	۵۰	سنگ خالی	۱۲-۱۱-۱۰	S/S
۲۴	۹۵,۰۶	۵۰	سنگ اشباع شده با پارالوئید	۶-۵-۴	SEP/S
۲۴	۹۷,۹۸	۵۰	سنگ اشباع شده با اپوکسی	۱۸-۱۷-۱۶	SEE/S
۲۴	۹۸,۲۴	۵۰	سنگ قلم‌موزنی شده با پارالوئید	۲۴-۲۳	SGP/S
۲۴	۹۸,۰۸	۵۰	سنگ قلم‌موزنی شده با اپوکسی	۲۶-۲۵	SGE/S

شیوه محاسبه به این صورت است که با توجه به فرمول زیر با تقسیم آخرین وزن سنگ بر وزن اولیه، درصد وزنی به دست می‌آید. برای دقیق‌تر بودن نتیجه درصد وزنی سه نمونه سنگ به‌طور جداگانه به دست آورده (البته برای سنگ‌های قلم‌موزده شده دو نمونه استفاده شد) و میانگین درصد وزنی سه سنگ اعمال می‌شود. با در نظر گرفتن نمودارها نتیجه آزمایش بیانگر آن است که با توجه جدول استحکام بخشی نمونه سنگ به روش قلم‌موزنی با پارالوئید با ۹۸,۲۴٪ بهترین عملکرد را داراست و استحکام بخشی به شیوه قلم‌موزنی با اپوکسی ۹۸,۰۸٪ بعد از پارالوئید بهترین عملکرد را داشته و اشباع با پارالوئید نیز کیفیت لازم برای انتخاب شدن روش استحکام بخشی در مقایسه با سنگ خالی بدون ماده استحکام بخش را داراست.

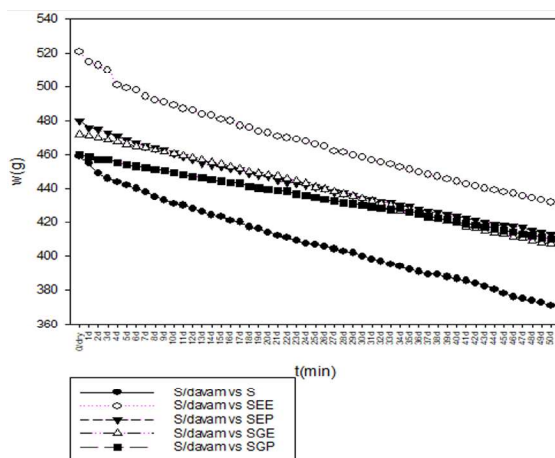
نتایج آزمون دوام‌داری

این روش آزمایش برای تعیین میزان مقاومت یک نمونه سنگی تحت تأثیر دو مرحله تر و خشک شدن متوالی به کار می‌رود. شاخص دوام وارفنگی، مقدار درصد وزنی باقی‌مانده نمونه پس از این دو مرحله تر و خشک شدن است که نشانگر میزان پایداری سنگ در برابر هوازدگی طبیعی است. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدگی کمتر است. شیوه انجام آزمایش به شرح زیر است: برای انجام دادن این آزمایش تعداد ۱۱ قطعه سنگ به وزن کلی ۵۰۰ تا ۵۵۰ گرم نیاز است. نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در داخل سبد توری فلزی که در ظرفی شیشه‌ای حاوی آب مقطر جای‌سازی شده است داخل آب می‌چرخند (شکل ۶- جدول ۱۱-۱۲). با مشخص بودن وزن خشک نمونه‌ها قبل و بعد از هر چرخه آزمایش، شاخص دوام در چرخه از رابطه زیر به دست می‌آید: N

$$Id(N) = ((C-D)/(A-D)) \times 100$$

در این رابطه A وزن اولیه نمونه و سبد، C وزن ثانویه خشک و سبد و D وزن سبد است.

جدول ۱۱- رده بندی شاخص دوام‌داری (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰) ■ تصویر ۶- نمودار کلی چرخه دوام‌داری



شاخص دوام وارفنگی دومین مرحله (%)	رده‌بندی
۳۰-۰	خیلی ضعیف
۶۰-۳۰	ضعیف
۸۵-۶۰	متوسط
۹۵-۸۵	کمی مقاوم
۹۸-۹۵	مقاوم
۱۰۰-۹۸	خیلی مقاوم



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام بخشی
سنگ تراکیت

جدول ۱۲- محاسبات تعیین درصد دوام قطعه سنگ‌های تراکیت

کد	مشخصات	وزن اولیه گرم	آخرین وزن گرم	دوام سنگ برحسب درصد	شکل
S	خرده سنگ‌های سنگ خالی	۴۵۹,۰۰۰	۳۷۱,۰۰۰	۸۰,۸۲	۲۵
SEE	خرده سنگ‌های اشباع شده با اپوکسی	۵۲۱,۰۰۰	۴۳۱,۰۰۰	۸۲,۷۲	۲۵
SEP	خرده سنگ‌های اشباع شده با پارالوئید	۴۸۰,۰۰۰	۴۱۲,۷۱۳	۸۵,۹۸	۲۵
SGE	خرده سنگ‌های قلم‌موزنی شده با اپوکسی	۴۷۲,۰۰۰	۴۰۷,۰۰۰	۸۶,۲۲	۲۵
SGP	خرده سنگ‌های قلم‌موزنی شده با پارالوئید	۴۶۰,۰۰۰	۴۱۰,۰۰۰	۸۹,۱۳	۲۵



براساس مقایسه نتایج نمودارها می‌توان به این نتیجه دست یافت که بر اساس محاسبات دوام‌داری برحسب درصد و مقایسه با جدول وینکلر می‌توان همه دسته‌ها را در وضعیت خوب و سالم قرار داد اما براساس مقایسه خرده‌سنگ‌های قلم‌موزنی شده با پارالوئید بیشترین درصد با تقریب ۹۰٪ دارا بوده که با توجه به جدول شاخص دوام‌داری، نشان‌دهنده بهترین عملکرد در مقایسه با سایر موارد است. عملکرد مقایسه‌ای بهترین‌ها را می‌توان با توجه به جدول ذیل از پایین به بالا طبقه‌بندی کرد که روش قلم‌موزنی با پارالوئید دارای مطلوب‌ترین نتایج است و در ادامه اشباع‌سازی نتایج مطلوبی دارد.

کاربرد فراوان مصالح سنگی با توجه به اقلیم آب و هوایی تبریز

اقلیم کوهستانی شمال غرب منجر به شکل‌گیری معماری صخره‌ای در اقصی نقاط آذربایجان گردیده است در این منطقه تعداد بسیاری ابنیه سنگی وجود دارد و در معماری دوره‌های مختلف آن، کاربرد سنگ را می‌توان مشاهده کرد. مهم‌ترین سازه‌ها و بناهای واقع در تبریز که سنگ در خود سازه یا ازاره‌ها و سنگفرش‌های مجموعه به کار رفته - چه در زمان ساخت اثر و چه در زمان تعمیرات و بازسازی‌های اخیر- عبارت‌اند از ائل‌گلی، حمام نویر، عمارت شهرداری تبریز، مجموعه چرم‌سازی خسروی، دروازه خیابان، مسجد کبود، مسجد صاحب‌الامر، مسجد جامع تبریز، بقعه عون ابن علی (عینالی)، مقبره الشعرا، مقبره دو کمال، پل آجی چای، پل قاری، پل سنگی، برج آتش‌نشانی، برج یادمان شهدای گمنام، خانه قدکی، خانه بهنام، مرکز اسناد، خانه صحتی، خانه مجتهدی، خانه رستگار، خانه علوی، خانه امیرنظام و ... که در همگی این آثار تاریخی از سنگ تراکیت بنا به وفور، مقاومت و استحکام مناسب آن‌ها استفاده شده است و این امر نشان‌دهنده استفاده و کاربرد زیاد سنگ تراکیت در منطقه تبریز است.

با توجه به سردسیر بودن منطقه آذربایجان شرقی، شهر تبریز واجد شرایط آب‌وهوایی سرد و یخبندان است و مطالعات چندین دهه اخیر در ارتباط با آب‌وهوای تبریز ما را به این نتیجه می‌رساند که باید اقداماتی جهت محافظت از آثار در مقابل این شرایط آب‌وهوایی انجام داد تا آسیب‌های ناشی از یخ‌بر شدن در آثار سنگی و پودر شدن در اثر سرد و گرم شدن متناوب را به حداقل رساند.

بحث در نتایج و یافته‌ها

از گذشته‌های دور، جایگزینی و تعمیر سنگ آسیب‌دیده به منظور کاهش خرابی ساختمان‌ها و بناهای تاریخی به اجرا درآمده است. امروزه، هدف حفاظت از سنگ، حفظ این اشیاء تاریخی و هنری برای نسل‌های آینده به همان شیوه‌ای که ما آن‌ها را دریافت کرده‌ایم، است (Siegfried و دیگران، ۱۹۷۳) مشکل استحکام‌بخشی اشیاء سنگی با محلول رزین‌هایی که لایه نازکی را بر روی

شیء تشکیل می‌دهند، این است که هر حلالی که به درون سنگ نفوذ می‌کند، باید نهایتاً تبخیر و از آن خارج گردد و هم‌زمان با این کار بخش اعظمی از رزین را با خود به سطح یا لایه زیر سطح سنگ می‌آورد (پدرام و دیگران، ۱۳۹۰). با توجه به نتایج داده‌ها و آنالیزهای صورت گرفته از میان دو نوع روش متفاوت اشباع و قلم‌موزنی ماده استحکام‌بخش پارالوئید B-۷۲ و رزین اپوکسی آرال‌دئیت در مقابل شرایط بدون اعمال ماده استحکام‌بخش روش قلم‌موزنی شرایط رضایت‌بخشی نسبت به سایر حالت‌ها داشته و از این میان اعمال پارالوئید با این روش نیز کیفیت کار را تا حد زیادی مطلوب ساخته است؛ لذا این روش به‌عنوان نتیجه کار چندین ماهه و نیز دستاورد این پروژه در بخشی از دیواره و ازاره دانشکده پردیس دانشگاه هنر اسلامی تبریز با رعایت شرایط آب‌وهوای مناسب برای زمان اعمال ماده استحکام‌بخش انجام شد.

شناسایی جنس سنگ‌ها به‌منزله گامی فراتر در راستای سنجش میزان کیفیت این نوع سنگ آذرین بود؛ لذا با برش سنگ‌های تراکیتی که برای پله‌سازی استفاده می‌شود، نمونه‌هایی مکعبی شکل تهیه شد. بخشی از خرده‌های سنگ نسبتاً درشت با میزان وزن مشخص برای چرخه‌های دوام‌داری نیز لحاظ گردید. آنالیزهای دستگاهی XRF و XRD مربوط به ساختارشناسی سنگ تراکیت و شناسایی عناصر و فازها انجام شد. بخشی از نمونه‌های مکعبی به شیوه اشباع و بخشی به شیوه قلم‌موزنی و بخشی دیگر با خود سنگ خالی کار شد. دو نوع ماده استحکام‌بخش در این کار مورد استفاده قرار گرفته که عبارت‌اند از اپوکسی آرال‌دئیت و پارالوئید B۷۲.

آزمایش‌های مکانیکی که برای شناسایی خواص فیزیکی صورت گرفت، در وهله اول به ترتیب زیر انجام شد. ابتدا چرخه موبینگی به مدت یک هفته برای سری‌های مختلف سنگ انجام شد؛ در ادامه چرخه از دست دادن آب و پس از اتمام این آزمون چرخه‌های پیرسازی سه‌گانه به مدت چند ماه صورت گرفت. نتایج حاصل از وزن‌هایی که روزانه از سنگ‌ها به دست آمد با محاسبات و رسم گراف مطابق با استاندارد ASTM ما را به این نتیجه رساند که روش قلم‌موزنی با پارالوئید بهترین پایداری و مقاومت را داراست. سنگ تراکیت استفاده‌شده در ابنیه دانشگاه هنر اسلامی تبریز دارای بافت و تراکم فشرده و سختی است. کوارتز، پلاژیوکلاز و آنورتیت فازهای اصلی و سیلیسیم اکسید و آلومنیوم اکسید نیز اکسید اصلی آن را تشکیل می‌دهد.

عملکرد ماده استحکام‌بخش بر روی این دسته سنگ‌های آذرین عملکرد مثبتی به نسبت سنگ خالی فاقد ماده استحکام‌بخش دارد. پلیمرهای آلی سنتزی عملکرد رایج‌تر و بهتری بر روی مواد معدنی داشته و زیرشاخه رزین‌های آکریلیک و رزین‌های اپوکسی مناسب‌ترین و پرکاربردترین مواد هستند. پارالوئید بی ۷۲ و اپوکسی آرال‌دئیت به‌ترتیب از زیرشاخه آکریلیک‌ها و اپوکسی‌ها هستند که برای این پروژه لحاظ شده و پاسخ مثبت و بهینه‌ای داشتند. از مزایای استفاده از این دسته رزین‌های آلی به حداقل رساندن عوامل آسیب‌رسانی است؛ با این حال امکان بازگشت و زدایش اپوکسی از اثر



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام‌بخشی
سنگ تراکیت



یا نمونه نیست و امکان پوسته‌پوسته شدن سطح رویی سنگ با استفاده از پارالوئید زیاد است و در هر دو ماده نیاز به تجدید عمل استحکام‌بخشی وجود دارد، زیرا هر دو حداقل به مدت ده سال توانایی حفظ و جلوگیری از تخریب سنگ را دارا بوده و بعد از این بازه زمانی خواص عملکردی و پوشندگی خود را از دست داده و دچار تغییر رنگ و زردی می‌شود.

همچنان که می‌دانیم تغییر رنگ در رزین‌های اپوکسی معمولاً به دلیل ترکیب مواد شیمیایی و در کنار عوامل اقلیمی و شرایط قرارگیری می‌تواند رخ داده و تسریع شود. این تغییرات ممکن است به علت فعالیت‌های شیمیایی، تابش نور، تأثیر دما یا تماس با مواد شیمیایی دیگر شکل بگیرد. برخی از عواملی که ممکن است باعث تغییر رنگ رزین‌های اپوکسی شوند، عبارت‌اند از:

۱. اکسایش (واکنش مواد رزینی با اکسیژن هوا)، ۲. تابش UV، ۳. تأثیر دمایی و گرمایی بر روی مواد رزین، ۴. تماس با مواد شیمیایی. به طور کلی بررسی تغییر رنگ رزین‌ها بخصوص اپوکسی و رزینی‌های پایه‌اکرلیکی نفوذ داده شده در مصالح متخلخل، ایده پژوهشی مناسبی برای تحقیقات علوم میراثی محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

هدف پروژه پیش رو دستیابی به استحکام‌بخشی مناسب سنگ‌های به‌کاررفته در محوطه پردیس دانشکده هنر اسلامی تبریز از طریق سنجش میزان مقاومت و دوام‌داری و خصوصیات و ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های تراکیت که از دسته سنگ‌های آذرین‌اند، در نظر گرفته شده است. مؤثرترین شیوه استحکام‌بخشی روی سنگ‌های تراکیت با توجه به شرایط اقلیمی تبریز روش استحکام‌بخشی به شیوه قلم‌موزنی در مقایسه با روش اشباع‌سازی است.

با توجه به شرایط اقلیمی تبریز و در مقایسه با اپوکسی، پارالوئید مؤثرترین ماده استحکام‌بخش روی سنگ‌های تراکیت بود. شیوه قلم‌موزنی با پارالوئید در وهله اول، قلم‌موزنی با اپوکسی در وهله دوم، اشباع با پارالوئید در سومین مرحله و درنهایت اشباع با اپوکسی نتایج حاصل از مقایسه عملکرد روش‌ها و مواد استحکام‌بخشی به‌کار برده شده در این پروژه بود. بهترین نتیجه در مناسب‌ترین فصل سال (مردادماه براساس نمودارهای ترسیم‌شده مربوط آب‌وهوای تبریز بهترین فصل کار عملی مرمت است) پس از پانل‌بندی دیواره و ازاره و تمیزکاری، به‌منظور حفاظت پیشگیرانه و عمل استحکام‌بخشی سنگ تراکیت در پردیس مرکزی دانشگاه هنر اسلامی تبریز اعمال شد که به‌منظور پایش و اطمینان از عملکرد مناسب و بهینه طی چند ماه آینده آزمون‌های جذب آب و سنجش میزان نفوذ بر روی آن انجام می‌شود.

با توجه به شرایط اقلیم آب‌وهوای تبریز و نتیجه‌ای که از نمودارها حاصل شد، ماه مرداد به‌عنوان بهترین زمان برای انجام دادن کار عملی تصویب شد. در اول مردادماه سال ۱۳۹۸ در بخش شمال

غربی حیاط دانشکده پردیس دیواره‌ای که سرتاسر دانشگاه را محاصره کرده است، بخشی در حدود ابعاد یک در یک متر مربع از دیواره سنگی با چسب نواری مطابق با تصویر زیرکادربندی و پانل‌بندی شد و پس از تمیزکاری خشک و رفع تمامی گرد و غبار و زوائد با استفاده از برس و مسواک، استحکام بخشی پانل انتخاب شده با ماده پارالوئید ۷٪ حلال در استون (رقیق‌ترین حالت ممکن برای تثبیت و استحکام بخشی مدنظر است که ۵-۷٪ مناسب‌ترین غلظت با ویسکوزیته پایین است). صورت گرفت. روش اعمال پارالوئید با قلم‌موی مناسب نرم بدین گونه است که باید چندین بار در جهات افقی و عمودی و در یک جهت به شیوه‌ای که رد قلم‌موی پس از پریدن استون روی سنگ باقی نماند، انجام شود. همین شیوه در بخش ضلع جنوب غربی پردیس دانشگاه دیواره غربی ساختمان شماره یک براساس تصویر پلان دانشگاه در بخش ازاره دانشکده انجام شد.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از ریاست محترم دانشکده هنرهای کاربردی جناب آقای دکتر باقرزاده کثیری، مسئولان کارگاه‌ها آقای شکوری و آقای حسن زاد، مهندس دلخواه، مهندس خلقی، دکتر رنجبرزاده، مدیر و مسئول سازمان آب‌وهوای تبریز و در نهایت از خانم نعمانی خیاوی که همکار و همراه بودند تشکر و قدردانی کرده و از درگاه خداوند متعال موفقیت روزافزون برای این عزیزان خواستارند.

منابع

- احمدخان بیگی، سحر و رازانی، مهدی. (۱۳۹۳). ساختارشناسی سنگ‌های تراکیت در ازاره کارخانه چرم‌سازی خسروی. تبریز، دوفصلنامه دانش مرمت و میراث فرهنگی. ۳۰، (۲)، ۴۳-۲۹.
- استوارت، باربارا، (۱۳۹۳) روش‌های تجربی مواد در مرمت و حفاظت آثار تاریخی، ترجمه مسعود باقرزاده کثیری، تهران: دانشگاه هنر اسلامی تبریز
- اسلامی، معین. (۱۳۸۸). بررسی آخرین دستاوردهای علمی در زمینه حفاظت و مرمت مصالح خاکی، دو فصلنامه تخصصی دانش مرمت و میراث فرهنگی، ۵(۳)، ۲۸-۱۸.
- امینی بیرامی، فریده، رازانی، مهدی و دیگران. (۱۳۹۴). تحلیل ساختارشناسی سنگ‌های آذرآواری در معماری صخره کند روستای تاریخی کندوان، دوفصلنامه پژوهش باستان‌سنجی، ۱(۱)، ۲۵-۱.
- پدرام، بهنام، زمانی، نرجس. (۱۳۹۰). نگاهی به حفاظت شیرهای سنگی در قبرستان‌های تاریخی، دوفصلنامه مرمت و پژوهش، ۵(۱۰)، ۱۰-۵۳.
- جینل، دبلیو. اس و ویسل. دی و سرلس، سی، (۲۰۰۸م)، استاندارد ASTM راهنمای استاندارد برای انتخاب و استفاده از استحکام‌بخش، ترجمه مهدی رازانی، دوفصلنامه دانش مرمت و میراث فرهنگی، ۲(۴)، ۱۰۸-۹۳.



ارزیابی کارایی رزین‌های
پارالوئید و اپوکسی در
استحکام بخشی
سنگ تراکیت



-حدادی، محسن و محمدی، محسن. (۱۳۸۸). ارزیابی ساختاری پارالوئید B-۷۲ و تأثیر استفاده از آن در مرمت، نشریه الکترونیکی دانش و مرمت و میراث فرهنگی، بهار ۴(۳)، ۸-۱.

-دوئن، اریک فرگوسن و پرایس، کلیفورد. (۱۳۹۴). حفاظت سنگ: مروری بر آخرین پژوهش‌های علمی، مترجمان: مهدی رازانی و هادی زندکریمی، تهران: فضا.

-رازانی، مهدی و نعمانی خیاوی، لیلی. (۱۴۰۲). ارزیابی روش‌های تخمین عمق نفوذ ماده استحکام‌بخش در مصالح متخلخل یادمان‌های تاریخی. مطالعات در دنیای رنگ، ۱۳(۴)، ۳۵۸-۳۴۳.

-رازانی، مهدی، سید محمد امین امامی، علیرضا باغبانان، خوزه دلگادو رودریگوئیز (۱۳۹۷) بهینه‌سازی ملات‌های سنتی پایه آهکی برای جایگزینی سیمان در راستای حفاظت سازگار از معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان، معماری مسکن و محیط روستا (علمی-پژوهشی). س. ۳۷. ش. ۱۶۱. صص ۱۲۵-۱۳۸.

-شکفته، عاطفه، احمدی، حسین و یزدی، مهدی. (۱۳۹۶). مروری بر مواد پوشش‌دهنده (استحکام‌بخش‌های سطحی) در حفاظت سنگ‌های تاریخی و فرهنگی، مطالعات در دنیای رنگ، ۶(۲)، ۶۴-۶۳.

-فهیمی‌فر، احمد و حامد سروش. (۱۳۸۰). آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد اول، تهران: شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران.

-کاکوئی، مهشید. (۱۳۸۹). بررسی آزمایشگاهی استحکام بخش‌ها بر روی چوب‌های تاریخی منطقه گیلان، دوفصلنامه مرمت و پژوهش، ۵(۱۰)، ۱۴۲-۱۲۹.

Siegfried Sigismund and Rolf Snethlage. (1973). Stone in Architecture-Properties. Durability. Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

ASTM. (2004) Standard Test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions (D5312). Annual book of ASTM standards.

Ndimofor, A.N. (2018). The Fundamentals of Crystallography & Mineralogy.

Denver: Spears Media Press. p. 68. ISBN 978-1-942876-24-3