

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ملاطِ سازه پل تاریخی قره‌کوری (سیاه‌پل) ماکو

حامد یعقوب‌زاده* علی نعمتی بابایی**

چکیده

هدف از انجام این مقاله، ساختارشناسی ملاط اتصال‌دهنده سازه پل تاریخی قره‌کوری (سیاه‌پل) شهرستان ماکو است. جهت تعیین خواص هیدرولیکی یا غیرهیدرولیکی بست آهکی و در نهایت نسبت بست به سنگ‌دانه و اندازه سنگ‌دانه‌های استفاده‌شده در سازه مورد مطالعه است. این پل از آثار دوره صفوی است، به دلیل اصالتی که دارد و مرمت نشدن آن در طول زمان، و نیز ویژگی‌های ساختاری، می‌تواند به مطالعات مواد تاریخی کمک شایانی کند. پژوهش آن کمک شایانی به مطالعات مواد تاریخی می‌کند. اجزای اصلی ملاط‌های تاریخی بست و سنگ‌دانه است. هریک از این‌ها باعث می‌شوند، ویژگی‌هایی خاص و متفاوت در ملاط به وجود آید. بخش بست در ملاط‌های آهکی شامل دو گونه هیدرولیک و هوایی است، اما بخش سنگ‌دانه عموماً با انواع کانی‌های سیلیکاتی و گاه کربناتی، همراه است. وجه تمایز آهک هیدرولیک و آهک هوایی در نحوه کربناته شدن آن‌ها و همچنین حضور کانی‌های سیلیکاتی، آلومیناتی و آهن‌دار است. البته به‌طور عمده، انواع کانی‌های دارای سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم در آهک‌های هیدرولیک، حضور دارند. برای تحقق اهداف این پژوهش، از روش‌های FTIR، XRD، XRF و همچنین دانه‌بندی خاک استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که نوع آهک استفاده‌شده به‌صورت غیرهیدرولیک یا آهک هوایی است و نوع سنگ‌دانه‌های مورد استفاده غالباً کوارتز است. همچنین، بیشینه گروه اندازه سنگ‌دانه در نمونه ملاط شامل سنگ‌دانه‌های رسی و ریزماسه‌ها هستند که می‌تواند ناشی از ضعف ساختاری به دلیل در دسترس نبودن مواد مرغوب حین ساخت یا فرسایش ملاط طی زمان باشد.

واژگان کلیدی: سیاه‌پل (قره‌کوری) ماکو، ملاط، آهک، روش‌های آنالیز دستگاهی.

* کارشناس ارشد مرمت اشیای فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز (نویسنده مسئول).

ha.yagubzadeh@tabriziau.ac.ir

** استادیار، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز.

مقدمه

ملاط‌ها بخش جدایی‌ناپذیر بناهای تاریخی محسوب می‌شوند. کاربرد عمومی ملاط‌ها می‌تواند اتصال مصالح با یکدیگر، و اندود یا تزیین سطوح معماری باشد. شناخت آسیب و همچنین فنّ ساخت چنین مصالحی در حوزه حفاظت و مرمت، می‌تواند اقدامات حفاظتی و مرمتی را در رابطه ملاط‌ها دقیق‌تر کند چراکه مطالعه و شناخت ویژگی‌های ملاط‌های تاریخی، از مهم‌ترین اقدامات اولیه این حوزه است. با توجه به اینکه ساختار ملاط‌ها در بناها و به‌ویژه پل‌های تاریخی ایران به‌صورت جدی مطالعه نشده است، انجام چنین پژوهش‌هایی می‌تواند در حفاظت و مرمت مناسب و صحیح بناهای تاریخی، مؤثر واقع شود. عوامل متعددی در کیفیت و ماندگاری بنا نقش دارند. یکی از مهم‌ترین این عوامل، استفاده از ملاط مناسب در سازه‌های مختلف است. آهک، یکی از ملاط‌های سنتی است که طی تاریخ معماری بشر همواره از آن استفاده کرده است. برای مثال، ملاط‌های گچ-آهکی چتال هیوک ترکیه، قدمتی ده‌هزار ساله دارند (یعقوب‌زاده و رازانی، ۱۴۰۱: ۱۹۰)؛ (Artioli et al., 2019: 154). به همین منظور، بررسی ویژگی‌های ساختاری یک ملاط تاریخی می‌تواند دارای اهمیت باشد چراکه در حوزه باستان‌شناسی، اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با تکنولوژی مواد در زمان ساخت یک سازه، بیان می‌کند. از سویی، تعیین کیفیت ملاط نقش مهمی در ارزیابی علل پایداری یا تخریب بناهای تاریخی طی زمان، می‌تواند داشته باشد. در کل، در ساخت پل‌های تاریخی، به‌دلیل قرارگیری در معرض رطوبت، از ملاط‌های مقاوم به رطوبت استفاده شده است. از جمله گونه‌های مصالح که مقاومت مناسبی در مقابل رطوبت دارند، ملاط‌هایی بر پایه آهک هستند. علل زیادی در تعیین ویژگی‌های یک ملاط آهکی تأثیر می‌گذارد؛ بررسی این خصوصیات می‌تواند شناختی مناسب از فنّ ساخت و همچنین آسیب‌های احتمالی وارد بر ملاط‌های آهکی تاریخی، فراهم آورد. مهم‌ترین عواملی که بر کیفیت ملاط تأثیر می‌گذارد، از این قرار است: الف. نوع بست آهکی به‌کاررفته در ملاط، ب. نوع و اندازه سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در ملاط تاریخی، و ج. نسبت بست به سنگ‌دانه در ملاط مورد استفاده. بست ملاط‌های آهکی به دو گونه آهک هیدرولیک و آهک هوایی یافت می‌شود که هر کدام از این نوع آهک‌ها می‌توانند در فرایند ماندگاری بناها، نقش مهمی داشته باشند (Elsen, 2006: 1417)؛ (Rani et al., 2021: 5). نوع سنگ‌دانه‌های ملاط نیز، عموماً به سنگ‌دانه‌های در دسترس در منطقه ساخت بنا

وابسته است. البته در حالت کلی، از سنگ‌دانه ملاط‌های آهکی به‌صورت کوارتز و یا کربناتی استفاده می‌شود. همچنین، اندازه سنگ‌دانه‌ها در ملاط، نوع سنگ‌دانه‌های ملاط نیز، عموماً به سنگ‌دانه‌های در دسترس در منطقه ساخت بنا وابسته است. البته در حالت کلی، از سنگ‌دانه ملاط‌های آهکی به‌صورت کوارتز و یا کربناتی استفاده می‌شود. همچنین، اندازه سنگ‌دانه‌ها در ملاط‌ها وابسته به زیست‌بوم منطقه خاصه اثر می‌باشد. به عبارتی، خاک منطقه عاملی مهم و تعیین‌کننده در گستره اندازه‌ای سنگ‌دانه‌ها در یک ملاط است. طبق یافته‌های منابع تا به امروز، بهترین عملکرد را ملاط‌هایی^۱ دارند که سنگ‌دانه‌هایی که تمامی گستره اندازه‌ای را به نسبت وزنی، یکسان دارند، در آن‌ها به کار رفته باشد (Santos et Stefanidou & Papayianni, 2005: 912)؛ (Jayasingh et al., 2022: 686)؛ (918). علاوه بر این، اندازه سنگ‌دانه به کاربری بنا نیز بستگی دارد. بر این اساس، هر معمار متناسب با بنا و سازه آن، ملاط بنا را آماده و استفاده می‌کند. هدف این مقاله، ساختارشناسی ملاط سازه پل تاریخی قره‌کوری (سیاه‌پل) شهرستان ماکو، استان آذربایجان غربی، به‌منظور تعیین خواص آن است. همچنین در پی پاسخ به این سؤال است که در ساخت این پل چه نوع ملاطی به کار رفته است؟ پل‌ها به‌دلیل نوع کاربریشان از مهم‌ترین بناهای کاربردی هستند. به همین دلیل، ممکن است در طول زمان بارها مورد تعمیر یا مرمت قرار گیرند. از این‌رو در مطالعه این نوع بناها، حصول اطمینان از اصالت تاریخی مواد آن، اهمیت دارد. این پل از آثار دوره صفوی است. به‌دلیل اصالت آن و مرمت نشدن در طول زمان، و نیز ویژگی‌های ساختاری که دارد، پژوهش درباره آن کمک شایانی به مطالعات مواد تاریخی می‌کند. اجزای اصلی این پل از سنگ‌های سیاه آتش‌فشانی تشکیل شده است. با توجه به فراوانی این نوع سنگ‌ها در منطقه ماکو، به نظر می‌رسد مصالح، بوم‌آورد باشد. اجزای دیگر این پل شامل قلوه‌سنگ‌ها در سطح پل، و ملاط میان سنگ‌ها و لاشه‌سنگ‌ها است. در پژوهش حاضر، بررسی ملاط میان سنگ‌ها جزء هدف پژوهش است.

پیشینه تحقیق

بناهای تاریخی و حتی امروزی، ارتباط تنگاتنگی با ملاط‌ها به‌عنوان مصالح ساختمانی دارند؛ به‌طوری‌که بشر برای ساخت سرپناه برای خود، از طبیعت سنگ‌هایی را استخراج کرده و به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم در ساخت بناها، آن‌ها را به کار برده است. ملاط به ماده‌ای گفته می‌شود که دارنده دو یا چند جزء در ساختار فیزیکی خود است (Elert et al., 2002).

پوزالانی می‌باشد. ممکن است تا حدود ۵ درصد وزنی، اکسید منیزیم در این نوع آهک دیده شود. آهک دولومیتی عمدتاً از اکسید و هیدروکسیدهای کلسیم/منیزیم تشکیل شده است. در حالت کلی، آهک هوایی را می‌توان به دو شکل آهک زنده و آهک هیدراته^۲ یافت. آهک زنده به صورت اکسیدی است و هنگام ترکیب با آب واکنش گرمازا رخ می‌دهد. آهک هیدراته به صورت هیدروکسید کلسیم دیده می‌شود. این نوع آهک در ملاط‌هایی که کمتر در معرض رطوبت هستند، به کار می‌رود (Heritage, 2011: 256-261). آهک هیدرولیک نیز نوعی دیگر از خانواده آهک‌ها محسوب می‌شود که شامل هیدروکسید کلسیم، سیلیکات کلسیم و یا آلومینات کلسیم است (جدول ۱). این آهک، هنگامی که با آب و یا زیرآب ترکیب می‌شود، خاصیت گیرش و سخت شدن پیدا می‌کند. آهک هیدرولیکی مناسب‌بنمایی است که ارتباط مستقیمی با آب دارند. زیرا این نوع آهک، مقاومت مناسب‌تری در مقابل رطوبت نسبت به آهک‌های هوایی دارد. از این رو، احتمال دیده شدن این نوع آهک‌ها در پل‌ها، قنات و حمام‌ها بسیار است (Heritage, 2011: 58)؛ (Borges et al., 2014: 606). احتمالاً ملاطی به نام آهک خمیر که در گذشته از ترکیب سنگ آهک و خاک ساخته می‌شد و پخت آن در کوره در ایران بود، از نوع هیدرولیک بوده است. از این ملاط در بنادر قدیمی ایران مانند بندر سیراف و بوشهر استفاده شده است (زمرشیدی، ۱۳۸۱). به نظر می‌رسد دلیل این عمل، ترکیب فازهای موجود در خاک مانند سیلیکات‌ها و اکسیدهای آهن در آهک به منظور ایجاد فازهایی همانند سلیکات‌های کلسیم بوده است. بخش سنگ‌دانه ملاط شامل شن و ماسه^۳ است که عمدتاً به صورت کوارتز می‌باشد. ولی امکان دارد در ملاط‌ها،

به تعبیری هر ملاط، یک بست به عنوان اتصال‌دهنده و یک بخش دیگر تحت عنوان سنگ‌دانه با کاربرد پرکنندگی و تحکیم‌دهندگی، دارد. علاوه بر موارد گفته شده، ملاط می‌تواند اجزای دیگر، همچون پوزالان‌ها (Makhloufi et al., 2015: 649) و افزودنی‌های آلی (Veiga, 2017: 134) را در خود جای دهد؛ که بسته به نیاز هر بنا نسبت به محیط و همچنین مهارت معمار و سازنده بنا، به کار رفتن و به کار نرفتن این مواد تعیین می‌شود. بخش بست ملاط‌ها در گذشته عمدتاً موادی مانند آهک (CaO) و گچ (CaSO₄) بود. اما امروزه بست اصلی در ساخت ملاط در سازه‌های بنایی، سیمان است (Ahmadi, 2021: 1) و استفاده و کاربرد ملاط‌هایی با بست آهکی در ایران کم شده و در حال فراموشی است. انجام چنین پژوهش‌هایی می‌تواند در راستای حفظ کاربرد حداقلی ملاط‌های سنتی، ارزشمند باشد. تعریف آهک در استاندارد BSEN459-1-2010 چنین بیان شده است: اکسید یا هیدروکسید کلسیم و اکسید و هیدروکسید کلسیم/منیزیم طبیعی است که با یک تغییر حرارتی در کربنات کلسیم (CaCO₃)، شکل گرفته است. به طور کلی، خانواده آهک در دو حالت دیده می‌شود: ۱. آهک هوایی (Air Lime) (Elsen et al., 2012: 1417)، ۲. آهک با خاصیت هیدرولیکی (Hydraulic lime) (Posani et al., 2021: 808). آهک هوایی نوعی از آهک است که به دی‌اکسید کربن (CO₂) موجود در هوا واکنش می‌دهد و عملیات سخت‌شدگی بیش‌تر با این گاز موجود در هوا، انجام می‌شود. انواع این آهک‌ها شامل: آهک‌های کلسیتی (CaCO₃)، و آهک دولومیتی (CaMg(CO₃)₂) است. آهک کلسیتی دربرگیرنده اکسید یا هیدروکسید کلسیم بدون هیچ گونه افزودنی هیدرولیکی و

جدول ۱. راهنمای انواع مختلف آهک به کاررفته در بنا

نوع آهک اصلی	نوع آهک هم‌رده	ویژگی‌ها	نحوه تولید این نوع ملاط
آهک هوایی	آهک کلسیتی	یک هیدروکسید یا اکسید کلسیم است. در این نوع ملاط‌ها، افزودنی مواد پوزالانی و هیدرولیکی دیده نمی‌شود. این نوع می‌تواند در ساختار خود مقدار کمی اکسید منیزیم نیز داشته باشد. آهک دولومیتی در ساختار خود مقدار قابل توجهی منیزیم دارد.	حاصل واکنش اکسید کلسیم با کربن دی‌اکسید موجود کوره‌ها هنگام پخت و یا کربناته شدن طی استفاده به عنوان ملاط در هواست.
	آهک دولومیتی		
آهک هیدرولیک	آهک فرموله شده	این نوع آهک در اثر واکنش با آب، روند گیرش در آن شروع می‌شود. معمولاً مقاومت مناسبی نسبت به عامل رطوبت دارد.	این نوع آهک‌ها از پخت سنگ‌های آهک آرژیلوس یا سیلیسی (از جمله گچ نرم (chalk))، تولید می‌شود.
	آهک هیدرولیک		
	آهک طبیعی هیدرولیک		

(Borges et al., 2014; Heritage, 2011)

سنگ‌دانه‌هایی همانند دولومیت که ماهیت کربناتی دارند نیز، دیده شوند (Casadio et al., 2005: 673). این مواد می‌بایست از سنگ‌های خرده‌شده و یا به‌صورت طبیعی در اندازه استاندارد خود، تهیه شوند. همچنین، عاری از پوشش‌های چسبنده مانند خاک رس باشند، چراکه شن و ماسه‌هایی که رس در سطح خود داشته باشند، میزان چسبندگی را در ملاط کاهش می‌دهند (Fragata & Veiga, 2010: 649). علاوه بر موارد گفته‌شده که بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ملاط‌ها تأثیر گذارند، نسبت استفاده بست به سنگ‌دانه یک ملاط نیز بر کیفیت ملاط تأثیر گذار است. افزون بر وجود شن و ماسه در ملاط‌ها، رس نیز در ساختار ملاط‌ها به‌خصوص ملاط‌های تاریخی بوده است. حضور گسترده سنگ‌دانه‌های رس در ملاط‌های تاریخی، وابسته به دو عامل است: الف. ناآگاهی معمار در هنگام ساخت ملاط؛ چراکه این سنگ‌دانه بیشتر اوقات باعث تضعیف کیفیت ملاط می‌شود. ب. عامل فرسایش؛ این عامل در طول زمان باعث افزایش مقدار رس در ملاط می‌شود. همچنین موجب تضعیف ساختاری در طول زمان می‌گردد (Heritage, 2011: 260).

نسبت استفاده بست به سنگ‌دانه در یک ملاط، به عوامل مختلفی مانند نوع کاربری بنا، شرایط رطوبتی و برودتی و همچنین، اهداف سازنده و آگاهی وی از عملکرد ملاط‌ها بستگی دارد. از این رو گستره این نسبت می‌تواند بسیار متنوع باشد. به‌عنوان مثال، در پل‌های تاریخی مربوط به قرون وسطی در جمهوری چک، بست آهکی به‌طور متوسط ۵۹٪ وزنی کل ملاط را شامل می‌شد (Frankeová & Koudelková, 2020: 3). در حالی که در بنای تاریخی بلم دو پاراً در برزیل، میزان بست استفاده‌شده حدود ۲۶ درصد وزنی کل ملاط بوده است (Loureiro et al., 2020: 11). شایان ذکر است، اکسید کلسیم (آهک) استفاده‌شده در ملاط‌ها با گذر زمان به‌دلیل کربناته شدن، مقداری افزایش وزن خواهد داشت. این امر باعث ایجاد تفاوت در هنگام تعیین نسبت بست به سنگ‌دانه بعد از گذشت زمان طولانی در ملاط می‌شود. البته این مقدار جزئی است و به‌طور معمول می‌توان در محاسبه مقدار بست و سنگ‌دانه، این عامل را نادیده گرفت. گستره دانه‌بندی نیز می‌تواند در تعیین ویژگی‌های ملاط تأثیر گذار باشد. به‌بیان دیگر هرچه دانه‌بندی در ملاط‌ها، اندازه‌های متفاوت‌تری را در بر بگیرد و نسبت گستره دانه‌بندی نیز با یکدیگر متناسب باشد، ملاط می‌تواند به بهترین کیفیت خود نزدیک شود (Scannell et al., 2014: 81). به همین منظور در فرایند فن‌شناسی ملاط‌های آهکی بررسی این موضوع نیز اطلاعات مهمی را در رابطه با کیفیت ملاط‌ها

و نحوه آسیب‌های احتمالی، آشکار خواهد کرد. برای مثال، هرچه ذرات رس در ملاط بیشتر باشد، میزان چسبندگی سنگ‌دانه‌ها به بست و در حالت کلی میزان چسبندگی ملاط به سطح، کاهش خواهد یافت، و یا اگر در یک ملاط میزان سنگ‌دانه‌ها فقط شامل ذرات درشت باشد، درصد تخلخل نیز افزایش می‌یابد (Heritage, 2011: 256). خود این عوامل دلیلی بر تغییرات کیفیتی در ملاط است. برای تعیین چنین خصوصیات در ملاط‌های آهکی، می‌بایست جداسازی بین بست و سنگ‌دانه صورت گیرد. چندین روش مختلف برای جداسازی بست از سنگ‌دانه وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها: جداسازی به کمک اسیدها و جداسازی به کمک محلول EDTA است. هر کدام از این روش‌ها نقص‌هایی دارد که برای کاهش تأثیر این نقص‌ها می‌بایست روش انتخابی نسبت به هدف مطالعه، تعیین شود (Middendorf et al., 2005: 771; Dettmering & Dai, 2022: 2).

مواد و روش‌ها

نمونه‌ها

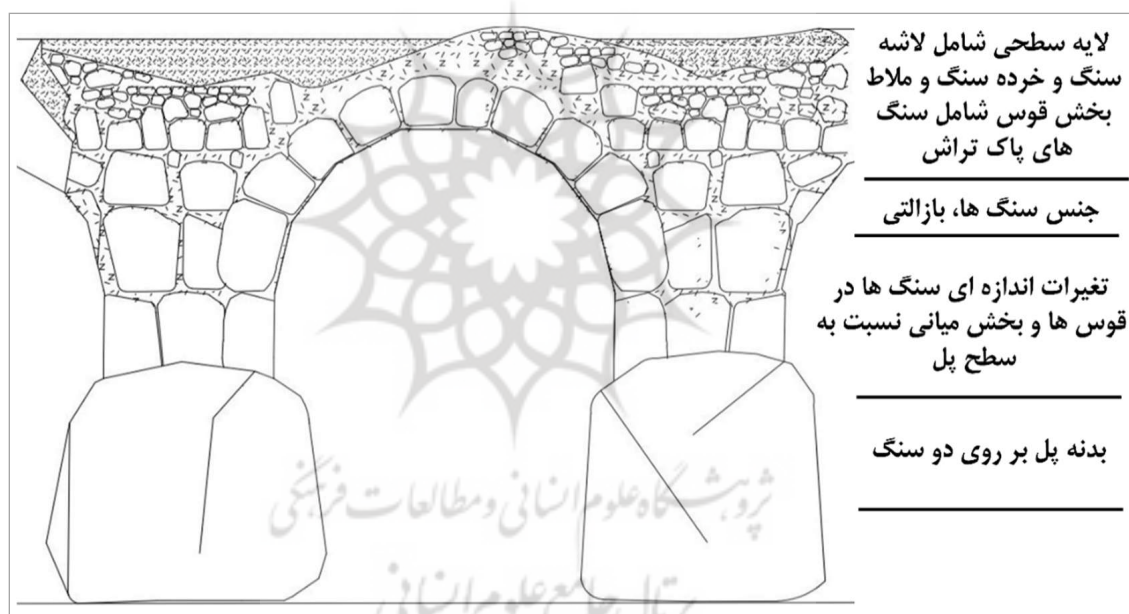
پل‌ها از مهم‌ترین استحکامات و راه‌های ارتباطی در گذشته بوده‌اند که با مصالح پایدار، ساخته می‌شدند. بررسی ساختار ملاط در پل‌های تاریخی یکی از اهداف مهم در شناسایی و طبقه‌بندی انواع ملاط در سازه‌های کهن است که می‌تواند دارای اهمیت باشد. از سویی، مطالعه ساختار و ترکیب ملاط نقش مهمی در تعیین میزان استحکام بنا در سازه‌های بنایی دارد. بدین منظور در این پژوهش، ملاط سازه پل قره‌کوری (سیاه‌پل) ماکو، مطالعه شده است. این پل صفوی - که در مرز میان رود قره‌سو و رودخانه زنگمار و حد وصله آن‌ها در بخش شمالی شهر ماکو به مختصات جغرافیایی ۳۹،۲۹۲۴۱۶، ۴۴،۴۷۲۴۶۸ قرار گرفته است - در سال ۱۳۸۱ شمسی با شماره ۶۴۰۵ در فهرست میراث ملی ایران ثبت شد. از رود زنگمار در سفرنامه‌های مختلف با عنوان تیگموت یاد شده است. این رود از کوه‌های زاگرس در مرز ایران و ترکیه نشأت گرفته است و در نهایت، به رود ارس متصل می‌شود (افتخاری بیات و احمدی، ۱۳۸۱). سازه قره‌کوری بر روی دو صخره طبیعی بنیان نهاده شده و از منظر چینش و ساختار مصالح از سنگ‌های آذرین پاک‌تراش، لاشه‌سنگ‌ها و ملاط میان آن‌ها، تشکیل شده است. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهند که سطح این پل، دو لایه اصلی دارد: لایه زیرین شامل سنگ‌های آذرین است که به‌وسیله ملاط به یکدیگر متصل شده‌اند. پایه‌های این پل

سطح تماس نمونه با محیط می‌تواند میزان کربناته شدن آن را افزایش دهد.

برای افزایش دقت در نتایج مطالعات آزمایشگاهی، سطح بیرونی نمونه‌ها کنار نهاده شده و آنالیزها بر روی بخش داخلی ملاط انجام شد؛ چراکه سطح بیرونی ملاط‌ها نسبت به قسمت داخلی، بیشتر در معرض هوازگی و فرسایش بودند. چراکه سطح بیرونی ملاط‌ها نسبت به قسمت داخلی، بیشتر در معرض هوازگی و فرسایش بودند. مطالب جدول ۲، کد نمونه‌ها و وزن دقیق نمونه‌ها را بیان می‌کند. مطالب جدول ۲، کد نمونه‌ها و وزن دقیق نمونه‌ها را بیان می‌کند. ابتدا نمونه‌ها در محل، تحت کدهای STG1، STG2 و STR1 دسته‌بندی و برای آزمون دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ملاط، نگهداری شدند. از آنجایی که مقدار نمونه STR1 ابتدا نزدیک به ۱۳ گرم وزن داشت و

دارای سنگ‌های آذرین و آتش‌فشانی نسبتاً بزرگی است که با افزایش ارتفاع در قوس این بنا، اندازه سنگ‌ها کوچک‌تر شده است. لایه رویی سطح این پل شامل لاشه‌سنگ‌هایی با اندازه و شکل‌هایی متنوع و احتمالاً مخلوط‌شده با ملاط است (شکل ۱). این بررسی‌ها، اصالت سازه و ملاط و عدم انجام مرمت در آن را تأیید می‌کند. بنابراین مطالعه آن، علاوه بر شناخت مقدماتی ویژگی‌های بنا، به شناخت تاریخی ملاط‌ها نیز کمک شایانی می‌کند.

از چهار قسمت سازه این پل جهت شناسایی ساختار و ماهیت ملاط، نسبت سنگ‌دانه به بست نمونه ملاط، تعیین شد (شکل ۲). نمونه‌ها بعد از جدا شدن از بنا و مستندنگاری، در پوشش‌های آلومینیومی نگهداری شدند تا تغییرات کربناته شدن بعد از جداسازی ملاط به حداقل برسد؛ چراکه افزایش



شکل ۱. تصویری شماتیک از سازه قره‌کوری ماکو و بررسی‌های ابتدایی از منظر فنّ ساخت اثر (نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی بنا و محل‌های نمونه‌برداری ملاط (نگارندگان، ۱۴۰۱)

ابزارها

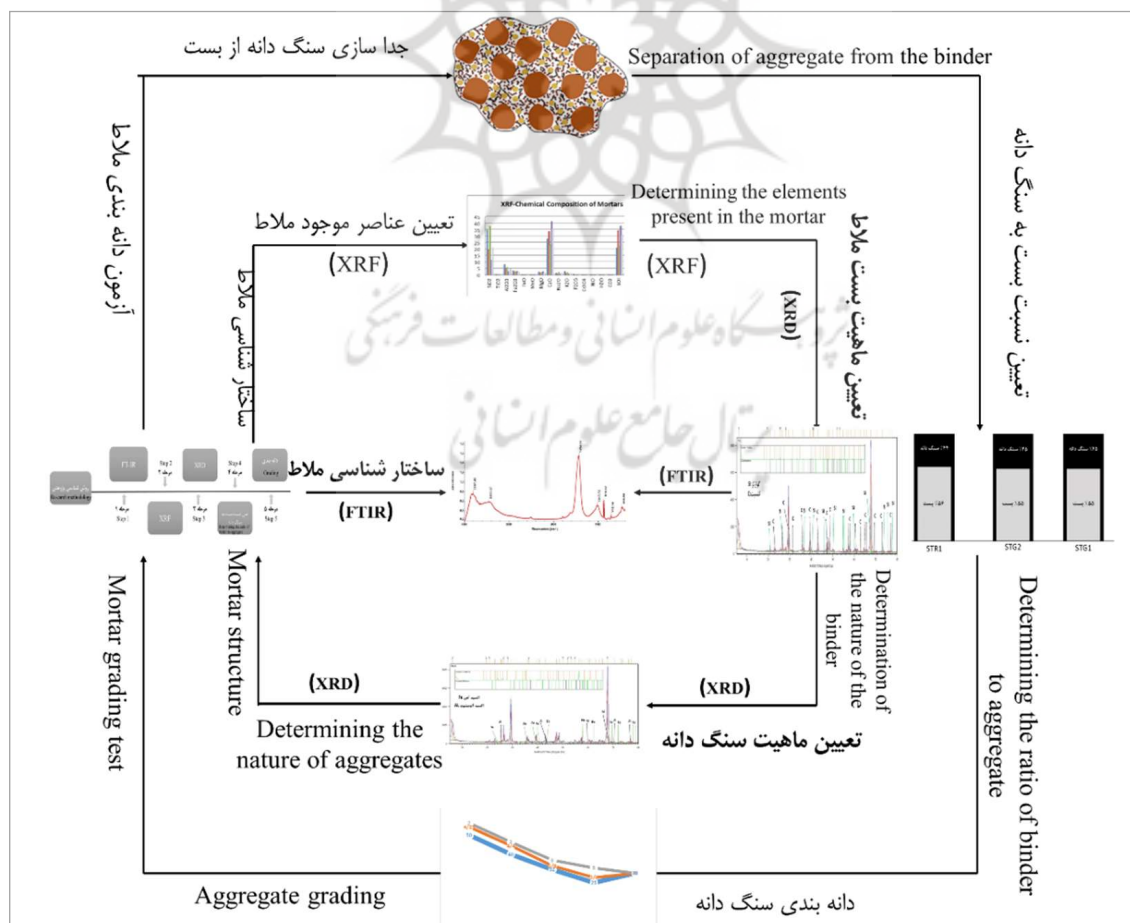
برای بررسی ماهیت ملاط از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، از طیف‌سنج JASCO مدل 680 Plus ساخت کشور ژاپن استفاده شد. نمونه به نسبت تقریبی یک به صد با KBr مخلوط شد و پس از قرص‌سازی طیف‌ها با قدرت تفکیک‌پذیری 4 cm^{-1} و 32 بار پیمایش، به دست آمد. پیش از فرایند طیف‌سنجی نمونه‌ها، دستگاه با طیف هوا کالیبره شد. جهت تکمیل نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه، بررسی و تحلیل عناصر و فازهای سازنده ملاط

به‌نوعی بزرگ‌ترین نمونه به‌دست‌آمده بود؛ از این نمونه برای آنالیزهای دستگاهی استفاده شد. به‌طوری‌که 5 گرم از نمونه یادشده جدا و برای آنالیز دستگاهی (Chauhan et al., 2014: 83) و XRF (Ager et al., 2020)، به آزمایشگاه بیم‌گستر تابان در جهت شناسایی فاز و عناصر موجود در ملاط، ارسال شد. 2 گرم از نمونه STR1 نیز برای انجام آنالیز FT-IR (Repacholi, 2012: 25) در دانشگاه هنر اسلامی تبریز نگهداری شد. در شکل ۳، روش‌شناسی پژوهش بیان شده است.

جدول ۲. کد نمونه‌های مورد مطالعه و وزن دقیق آن‌ها

کد نمونه	وزن و نوع آنالیز انجام‌گرفته	کد نمونه	وزن و نوع آنالیز انجام‌گرفته
STR1	$8,30\text{ گرم}$ دانه‌بندی	STG1	$10,34\text{ گرم}$ دانه‌بندی
STG2	$10,52\text{ گرم}$ دانه‌بندی	STR1	$3,20\text{ گرم}$ XRD
STR1	2 گرم XRF	STR1	$2,03\text{ گرم}$ FTIR

(نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۳. روش‌شناسی پژوهش و مراحل انجام آن در راستای پاسخ به اهداف (نگارندگان، ۱۴۰۱)

از آنالیز XRD کمک گرفت و در صورت نبود سنگ‌دانه‌های کربناتی، آزمون دانه‌بندی در کمترین حد خطا ثبت خواهد کرد (3: Arizzi, & Cultrone, 2021؛ Middendorf et al., 2005: 773؛ 2: Loureiro et al., 2020).

نتایج و بحث در یافته‌ها

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (RI-TF)

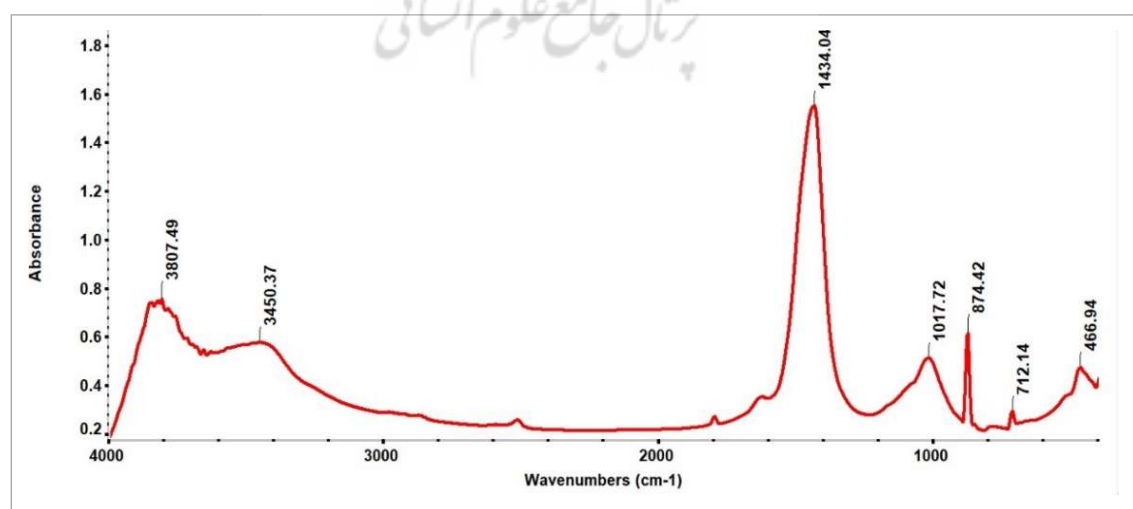
چنانچه طیف نمونه نشان می‌دهد (شکل ۳)، نوار جذب‌های 1434.04 ، 1017.72 ، 874.42 ، 712.14 و 466.94 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاش‌های کربنات کلسیم منتسب کرد. نوارهای جذبی 1016 و 466 cm^{-1} می‌توانند دلیلی بر حضور کانی‌های سیلیکاتی باشند ولی با توجه به هم‌پوشانی نوار جذبی فسفات‌ها با سیلیکات‌ها در این ناحیه، با انجام آنالیزهای دیگر از جمله XRD و XRF حضور آن‌ها را می‌توان اثبات کرد (Sagim et al., 2012: 845؛ 1: al., 2015؛ 48: Stoch et al., 2016). بنابراین با توجه به ویژگی‌های بیان‌شده از طیف مادون قرمز تبدیل فوریه نمونه، و حضور نداشتن نوار جذب‌های مرتبط با سولفات‌ها از جمله نوار جذب‌های نواحی 600 و 680 cm^{-1} ، می‌توان ماهیت ساختارهای کلسیتی همچون ملاط ماسه آهک را برای این اثر تاریخی تأیید کرد.

فلوئورسانس و پراش اشعه ایکس (XRF و XRD)

جهت تکمیل اطلاعات فن‌شناختی، ضروری است که عناصر سازنده و فازهای تشکیل‌دهنده ملاط، بررسی شوند. مطالب جدول ۳، نتایج آنالیز XRF نمونه STR1 را نشان می‌دهد. علاوه بر حضور مقدار قابل توجهی اکسید کلسیم

با استفاده از فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، انجام شد. بدین منظور از دستگاه PHILIPS- PW1410 ساخت کشور هلند برای انجام XRF و برای آنالیز ۲ گرم از نمونه STR1، استفاده شد. برای فازشناسی اثر مورد مطالعه نیز آنالیز دستگاهی XRD متعلق به شرکت PHILIPS و زمان مرحله‌ای یک ثانیه، طول موج لامپ اشعه ایکس مس = 1.54056 ، آنگسترم، ولتاژ = 40kV و جریان 30Ma در محدوده ۲ تا و شروع زاویه تماس از ۵ درجه، به کار برده شد. نتایج به کمک نرم‌افزار X,PERT High Score plus، تجزیه و تحلیل شد.

برای بررسی نسبت بست به سنگ‌دانه در ملاط جهت تعیین خصوصیات فیزیکی آن، می‌باید جداسازی بست از سنگ‌دانه انجام شود. بدین منظور، روش‌ها و متدهای مختلفی وجود دارد ولی در حالت کلی، این عمل به دو بخش جداسازی فیزیکی و شیمیایی محدود می‌شود. در این پژوهش، روش شیمیایی انتخاب شد. برای همین، هر کدام از نمونه‌های STR1، STG1 و STG2 در حدود 400 ML اسید هیدروکلریک در دمای 60 درجه سانتی‌گراد حل شدند. با توجه به اینکه بست ملاط در اسید حل می‌شود و سنگ‌دانه به صورت رسوب باقی می‌ماند، با عبور از صافی، بخش باقی‌مانده فقط سنگ‌دانه خواهد بود. با خشک کردن صافی و وزن کردن دوباره آن می‌توان نسبت سنگ‌دانه را به بست به دست آورد. ناگفته نماند که امکان حضور سنگ‌دانه‌های کربناتی همچون دولومیت در ملاط هست که با این روش از جداسازی، این نوع سنگ‌دانه‌ها نیز به همراه بست در اسید حل خواهد شدند. بنابراین این روش در تعیین سنگ‌دانه‌های کوارتز که در این اسید حل نمی‌شوند، کاربرد دارد. البته برای آگاهی از وجود سنگ‌دانه‌های کربناتی می‌توان



شکل ۳. طیف FTIR در جهت شناخت ماهیت ملاط (نگارندگان، ۱۴۰۱)

ندارد. استفاده از این نوع ملاط برای یک سازه آبی نوعی ضعف ساختاری محسوب می‌شود، چراکه در سازه‌هایی مانند پل‌ها مناسب‌ترین نوع بست آهکی، ملاطی از نوع هیدرولیک یا هیدرولیک طبیعی است. این امر به دلیل مقاومت پایین آهک هوایی نسبت به آهک هیدرولیکی در برابر رطوبت می‌باشد.

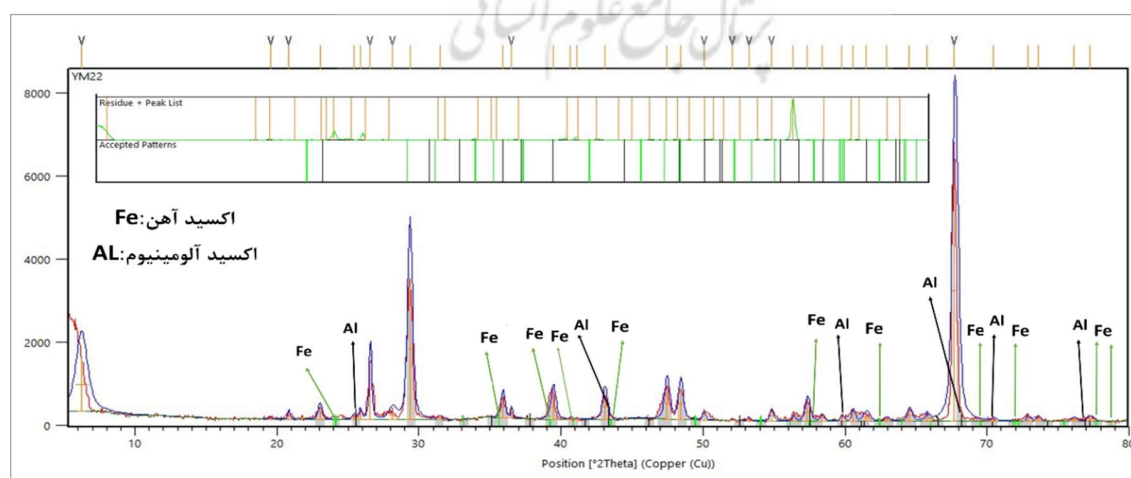
دیگر داده‌های مبهم در مطالعه فنّ ساخت اثر، وجود داشتن یا نداشتن کانی‌های کربناتی به عنوان سنگ‌دانه در ملاط است. چنین کانی‌هایی در ساختار ملاط - در صورت وجود- در حین جداسازی و تفکیک به وسیله اسید حل می‌شوند و در نتیجه، دانه‌بندی و تعیین نسبت سنگ‌دانه می‌تواند باعث ایجاد اختلال در دقت نتایج گردد. فازشناسی مبتنی بر XRD می‌تواند در آگاهی از حضور داشتن یا نداشتن این کانی‌ها در ساختار ملاط، کارایی داشته باشد. با توجه به نتایج XRD، فازهای شناسایی شده علاوه بر اکسیدهای آهن و آلومینیوم فقط فازهای کلسیت و اکسید سیلیسیم است (شکل ۵). در نتیجه کانی‌های کربناتی دیگری غیر از کلسیت در ملاط وجود ندارد. بدین ترتیب، نتیجه حاصل از نسبت بست به سنگ‌دانه و دانه‌بندی، با کمترین خطای محاسباتی ثبت شده است.

در نمونه، با توجه به اینکه در آهک‌های هیدرولیکی، برخی اکسیدهای فلزی به کلسیم واکنش نشان می‌دهند و فازهایی مانند سیلیکات‌های آلومینیوم را می‌سازند، حضور اکسیدهای منیزیم، آهن و آلومینیوم می‌تواند قابل توجه باشد. اما با توجه به مقدار کم آن‌ها (کمتر از ۴ درصد)، بدون بررسی‌های تکمیلی نمی‌توان درباره هیدرولیکی بودن ملاط آهکی آن نظر داد. همان‌طور که گفته شد، در ملاط‌های آهکی هیدرولیکی، بخشی از اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌بایست به صورت فازهایی از ترکیبات، سیلیکات‌های کلسیم و سیلیکات‌های آلومینیوم را ایجاد کند، اما نتایج XRD، وجود چنین فازهایی را در نمونه مورد نظر نشان نمی‌دهد (شکل ۴)؛ عناصر مذکور به صورت اکسیدی در ملاط حضور دارند. به همین دلیل این عناصر به احتمال زیاد در ساختار بست ملاط وجود نبوده و از سنگ‌دانه‌ها وارد ساختار ملاط شده‌اند. اکسیدهای منیزیم به دو صورت می‌توانند به ساختار ملاط وارد شده باشند: الف. وجود آن در ساختار آهک هوایی، همان‌طور که در بخش پیشینه مطالعات بیان شد، ب. همراه با سنگ‌دانه‌هایی که ماهیت دولومیتی یا کربناتی دارند. هرچند در نتیجه کلی ملاط مورد مطالعه خللی وارد نمی‌کند و نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نوع آهک استفاده شده به عنوان بست در ملاط از نوع آهک هوایی بوده است و خواص هیدرولیکی

جدول ۳. نتایج آنالیز عنصری به صورت اکسیدی به وسیله XRF

Sample	SiO _۲	Al _۲ O _۳	Fe _۲ O _۳	CaO	MgO	Na _۲ O	K _۲ O	TiO _۲	MnO	P _۲ O _۵	LOI
STR۱	۲۷,۷۷۵	۴,۰۲۶	۳,۷۲۸	۳۳,۰۱	۲,۹۳۴	۰,۸۴	۱,۵۰۲	۰,۲۰۳	۰,۰۷۱	۰,۱۵۱	۲۵,۱۳

(نگارندگان، ۱۴۰۱)



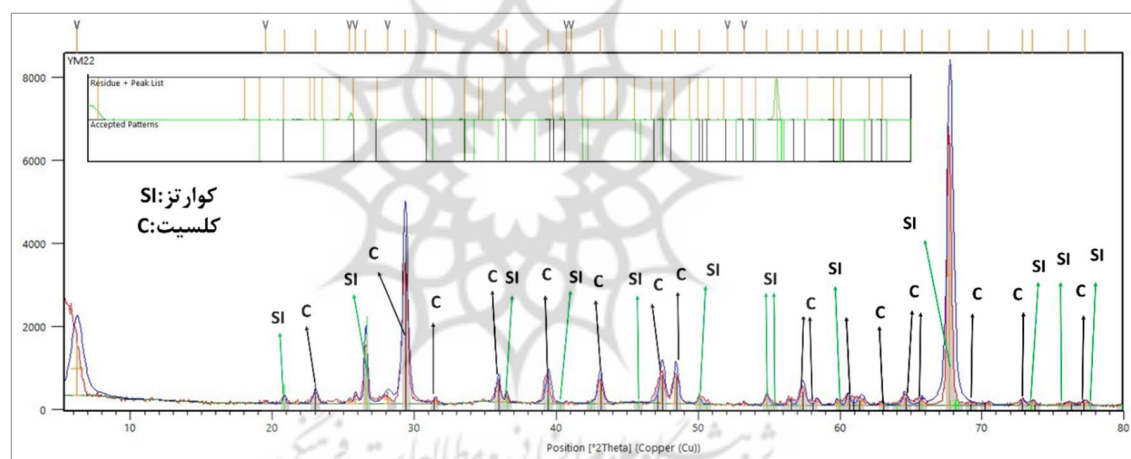
شکل ۴. اکسیدهای آهن و آلومینیوم نمونه مورد مطالعه در آنالیز xrd؛ فلش‌های سبزرنگ مربوط به اکسیدهای آهن، و فلش‌های سیاه مربوط به اکسیدهای آلومینیوم است (نگارندگان، ۱۴۰۱)

تفکیک و دانه‌بندی

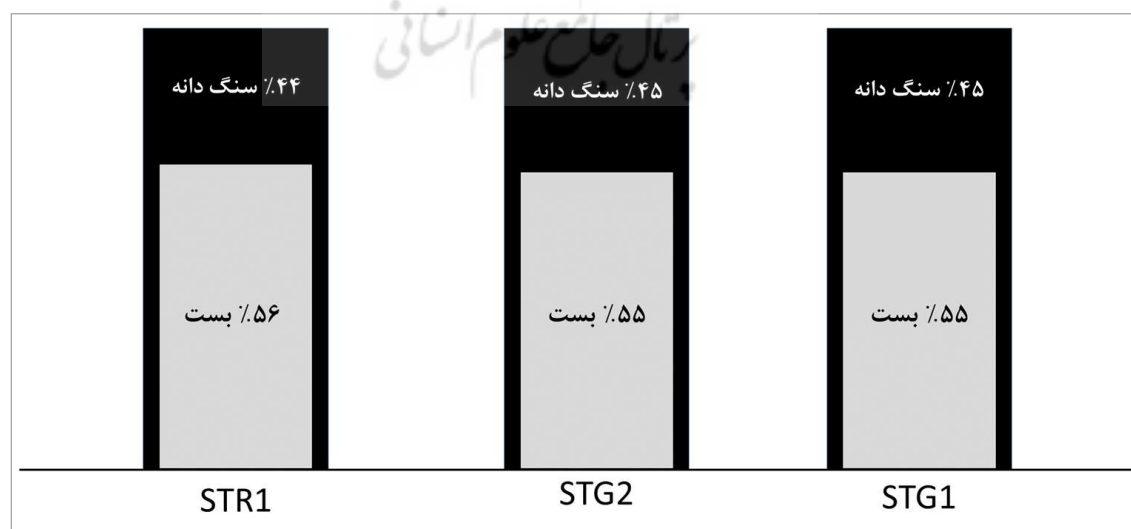
بیش از ۵۶٪ در نمونه‌های انتخابی نیست (شکل ۶). با توجه به نوع کاربری ملاط در بنا، بهره‌گیری از نسبت زیاد بست به سنگ‌دانه جهت ایجاد چسبندگی بهتر و قوی‌تر، اجزای سازه مناسب است.

با شناخت گستره دانه‌بندی در ملاط‌ها، بخشی از فن ساخت و آسیب‌های ساختاری به دست می‌آید. برای همین، سنگ‌دانه‌های حاصل از جداسازی برای انجام دانه‌بندی آماده شدند و دانه‌بندی مطابق با استاندارد ملی ایران با شماره استاندارد ۱۳۷۶۳، انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد، ملاط مورد نظر تمامی سنگ‌دانه‌ها را از نظر اندازه پوشش داده است (شکل ۷). ناگفته نماند سنگ‌دانه‌هایی با اندازه رس و ماسه‌ریز، حضور قابل توجهی دارند. این عامل می‌تواند نوعی ضعف در ساختار ملاط محسوب شود چراکه بیشتر بودن ذرات ریز، عامل مهمی در کاهش چسبندگی بست و سنگ‌دانه به یکدیگر است. به‌نوعی پودرشدگی و گسست ساختار ملاط

تعیین نسبت بست به سنگ‌دانه، مستلزم جداسازی سنگ‌دانه و بست به‌صورت فیزیکی و یا شیمیایی است. بعد از جداسازی و خشک کردن نمونه‌ها در بخش سنگ‌دانه و ثبت وزن آن‌ها، نسبت بین بست و سنگ‌دانه در سه نمونه ارزیابی شد. نتایج وزنی نمونه‌ها چنین است: نمونه STR1 دارای ۳،۳۵۶ گرم سنگ‌دانه بوده است. با توجه به وزن اولیه که ۸،۳ گرم بود، درصد جرمی این بخش از ملاط در حدود ۴۴٪ و بخش بست آن حدود ۵۶٪ بوده است. نمونه STG2 نیز دارای ۴،۷۷۰ گرم سنگ‌دانه بود که حدود ۴۵٪ وزنی ملاط را شامل می‌شد و مابقی به‌عنوان بست در نظر گرفته شد. در نمونه STG1 نیز همانند نمونه STG2، ۴۵٪ از وزن کل نمونه را سنگ‌دانه تشکیل داده بود. از نتایج چنین بر می‌آید که در ملاط مورد مطالعه، مقدار بست آهکی استفاده‌شده



شکل ۵. فاز کلسیت و کوارتز در فازشناسی نمونه مطالعاتی، فلش مشکی: کلسیت، فلش‌های سبز: کوارتز (نگارنگان، ۱۴۰۱)

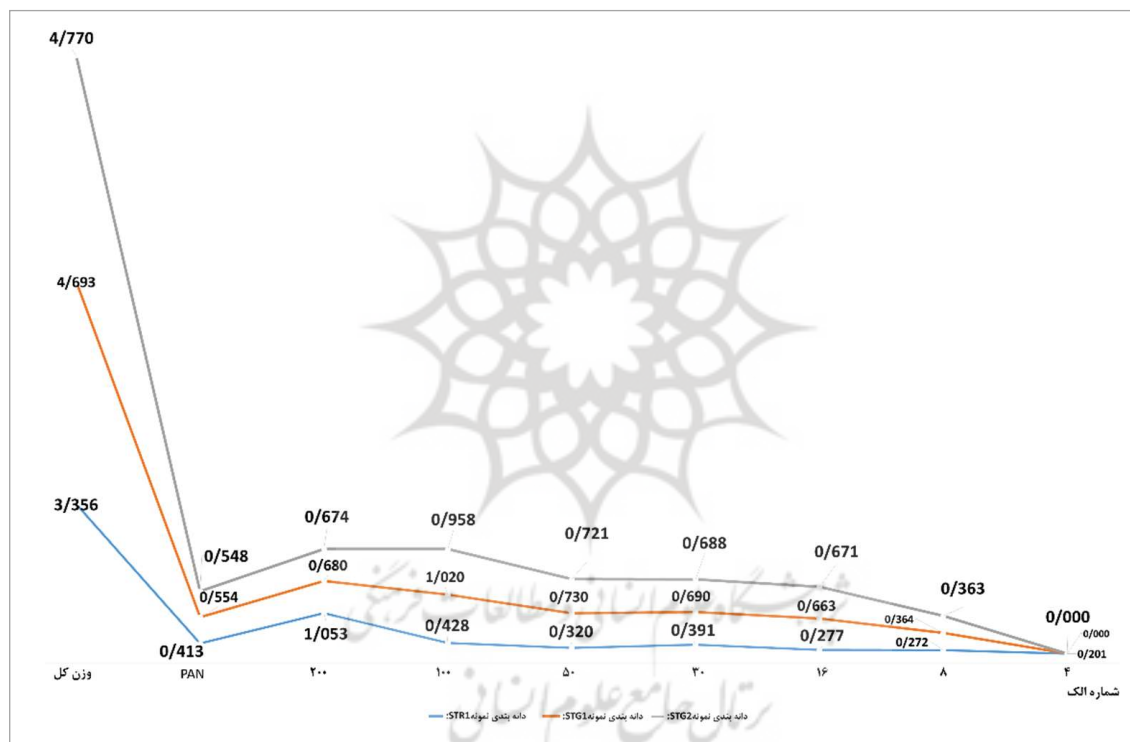


شکل ۶. نسبت سنگ‌دانه به بست در نمونه‌های مورد مطالعه (نگارنگان، ۱۴۰۱)

به حضور ذرات ریز سنگ‌دانه در ملاط که نشان‌دهنده نوع دیگری از آسیب سازه‌ای است، بیشتر بودن نسبت بست به سنگ‌دانه می‌تواند در پوشش این ضعف به کار آید. به همین منظور است که باوجود ضعف‌های ساختاری در ساختار ملاط آهکی در طول عمر چند صد ساله خود، در مقابل فرایندهای تخریب و فرسایش، تقریباً ماندگاری مناسبی داشته است. با این حال، ضعف‌هایی در ساختار ملاط وجود دارد که قابل چشم‌پوشی نیست و خطر نابودی سازه را به همراه دارد. ازاین‌رو، حین حفاظت و مرمت این سازه ارزشمند می‌بایست اقدامات تحکیم‌دهنده مناسب ملاط انجام گیرد تا سرعت فرایند تخریب آن کاهش یابد.

را افزایش می‌دهد که در بررسی‌های میدانی اثر آن به‌خوبی مشهود است. شایان گفتن است درصورت وجود ذرات ریز در ساختار ملاط، میزان تخلخل کاهش خواهد یافت. همچنین به‌دلیل کاربری ملاط به‌عنوان ملاط بین سنگ، می‌تواند امری مثبت تلقی شود.

نتایج را چنین می‌توان تحلیل کرد: آزمون‌ها گواهی بر استفاده از ملاط آهکی غیرهیدرولیکی هستند. با توجه به غیرهیدرولیکی بودن ملاط سازه پل که نوعی ضعف در هنگام ساخت پل به شمار می‌رفت، معمار با بیشتر کردن نسبت بست به سنگ‌دانه سعی بر جبران آن داشت به‌طوری‌که موجب افزایش چسبندگی ملاط می‌شد. نظر



شکل ۷. گستره دانه‌بندی نمونه‌های STR1، STG1 و STG2 (نگارندگان، ۱۴۰۱)

نتیجه‌گیری

نتایج ساختارشناسی ملاط سازه پل تاریخی قره‌کوری شهرستان ماکو در آذربایجان غربی نشان داد که نمونه مورد نظر بستی از نوع آهک هوایی داشته و حدود ۵۵٪ آن را بست آهکی تشکیل داده است. نتایج بررسی دانه‌بندی و نوع سنگ‌دانه بیانگر آن است که سنگ‌دانه مورد استفاده در ملاط مورد پژوهش، از نوع سنگ‌دانه‌های پایه سیلیسی (کوارتز) بوده است و سنگ‌دانه‌ها در سه اندازه مختلف با نسبت وزنی تقریباً یکسان در ملاط به کار رفته‌اند. شایان ذکر است بخش رسی سنگ‌دانه مقدار بیشتری را در بر گرفته بود. با توجه به تحلیل نتایج، چنین بر می‌آید که نمونه ملاط بنای مورد نظر ضعف‌هایی ساختاری در ملاط دارد. برای مثال با توجه کاربرد بنا به‌عنوان پل، استفاده از آهک‌های هوایی برای استفاده به‌عنوان بست کمی نامناسب است. در مقابل، عوامل رطوبتی مقاومت

کمتری را نسبت به آهک‌های هیدرولیکی از خود نشان می‌دهند. دیگر آسیب ساختاری ملاط در پل مورد مطالعه، از حضور فراتر از معمول سنگ‌دانه‌های رسی در ملاط ناشی می‌شود که این امر باعث کاهش چسبندگی میان بست و سنگ‌دانه خواهد شد. استفاده از بست با نسبت بالای ۵۰٪ در ملاط نیز می‌تواند به دلیل نوع کاربری ملاط باشد. از آنجایی که این ملاط در بین سنگ‌های پل به عنوان اتصال‌دهنده استفاده شده است، حضور چنین مقداری می‌تواند قدرت چسبندگی ملاط را افزایش دهد. در حالت کلی، بررسی چنین ویژگی‌های ساختاری در ملاط‌های آهکی در کشورمان، یکی از موضوع‌هایی است که توجه کمتری به آن شده است. بسزاست بررسی‌هایی همچون این پژوهش، در آینده بیشتر انجام شود.

سپاس‌گزاری

از دانشگاه هنر اسلامی تبریز جهت فراهم نمودن امکانات مادی و معنوی برای انجام این پژوهش و از اداره میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری شهرستان ماکو و شوط جهت فراهم کردن امکان نمونه‌برداری از اثر، تقدیر می‌شود. همچنین از دکتر علیرضا کوچکزی که برای بهبود کیفیت این پژوهش از هیچ کمکی دریغ نکردند، سپاس‌گزاری می‌کنیم.

پی‌نوشت

۱. در حالت کلی، سنگ‌دانه‌ها به دو صورت: سنگ‌دانه با دانه‌بندی خوب (Well Graded)، و سنگ‌دانه با دانه‌بندی بد، تقسیم می‌شوند. سنگ‌دانه با دانه‌بندی خوب شامل اندازه‌هایی است که از الک شماره ۴ تا ۲۰۰ دارای گستره باشد و همگی اندازه‌ها را شامل شود.
۲. هنجار جامعه معماری این نام را نهاده است.
۳. ماسه، به موادی اطلاق می‌شود که اندازه آن‌ها از حدود ۴٫۷۵ میلی‌متر بیشتر نباشد. کمترین مقدار اندازه‌ای ماسه ۰٫۷۵ میلی‌متر خواهد بود. شن نیز سنگ‌ریزه‌های درشت‌تر از ماسه و ریزتر از ریگ است.

4. Belam Doopara

فهرست منابع

- افتخاری بیات، حسین‌قلی و احمدی، حسین (۱۳۸۱). تاریخ ماکو. چاپ اول، تهران: شیرازه.
- زمرشیدی، حسین (۱۳۸۱). معماری ایران مصالح‌شناسی سنتی. چاپ دوم، تهران: دانشگاه تهران.
- یعقوب‌زاده، حامد و رازانی، مهدی (۱۴۰۱). مروری بر ساختار، کاربرد، فرایند تولید و تأثیر افزودنی‌ها در ملاط سنتی گچ. پژوهش باستان‌سنجی، ۸ (۱): ۲۰۵-۱۸۵.
- Ager FJ, Respaldiza MA, Scrivano S, Ortega-Feliu I, Kriznar A, Gómez-Tubío B (2020). Cultural heritage science at CNA (seville, Spain): Applications of XRF and IBA techniques to art and archaeological objects. *Radiation Physics and Chemistry*. Feb 1;167:108324.
- Ahmadi, S. (2021). Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review. *Advanced Ceramics Progress*, 7 (4): 1-9.
- Arizzi, A., & Cultrone, G. (2021). Mortars and plasters-How to characterise hydraulic mortars. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13 (9): 144.
- Artioli, G., Secco, M., & Addis, A. (2019). The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, 20, 1-72. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.20.1>

- Borges, C., Silva, A. S., & Veiga, R. (2014). Durability of ancient lime mortars in humid environment. *Construction and Building Materials*, 66, 606-620.
- Casadio, F., Chiari, G., & Simon, S. (2005). Evaluation of binder/aggregate ratios in archaeological lime mortars with carbonate aggregate: a comparative assessment of chemical, mechanical and microscopic approaches. *Archaeometry*, 47 (4): 671-689.
- Chauhan, A., Chauhan, P., & Powder, X. R. D. (2014). Technique and its Applications in Science and Technology. *J Anal Bioanal Tech*, 5, 212.
- Dettmering, T., & Dai, S. (2022). Types of lime binders in mortars used for the construction of the Ming Great Wall of China and their importance for the development of a conservation strategy. *Built Heritage*, 6 (1), 1.
- Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Pardo, E. S., Hansen, E., & Cazalla, O. (2002). Lime mortars for the conservation of historic buildings. *Studies in Conservation*, 47 (1): 62-75.
- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars—a review. *Cement and concrete research*. Aug 1;36(8):1416-1424.
- Elsen, J., Van Balen, K., & Mertens, G. (2012). Hydraulicity in historic lime mortars: a review. *Historic mortars: characterisation, assessment and repair*, 125-139.
- Fragata, A., & Veiga, R. (2010). Air lime mortars: the influence of calcareous aggregate and filler addition. In *Materials Science Forum* (Vol. 636, pp. 1280-1285). Trans Tech Publications Ltd.
- Frankeová, D., & Koudelková, V. (2020). Influence of ageing conditions on the mineralogical micro-character of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 264, 120205.
- Heritage, E. (2011). *Practical building conservation: mortars, renders and plasters*.
- Jayasingh, S., Selvaraj, T., & Raneri, S. (2022). Evaluating the Impact of Organic Addition and Aggregate Gradation on Air Lime Mortar: New Compatible Green Material for Heritage Application. *International Journal of Architectural Heritage*, 16 (5): 681-691.
- Jordá, J. D., Jordán, M. M., Ibanco-Cañete, R., Montero, M. A., Reyes-Labarta, J. A., Sánchez, A., & Cerdán, M. (2015). Mineralogical analysis of ceramic tiles by FTIR: A quantitative attempt. *Applied Clay Science*, 115, 1-8.
- Leslie, A. B., & Hughes, J. J. (2002). Binder microstructure in lime mortars: implications for the interpretation of analysis results. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35 (3):257-263.
- Loftus, E., Rogers, K., & Lee -Thorp, J. (2015). A simple method to establish calcite: aragonite ratios in archaeological mollusc shells. *Journal of Quaternary Science*, 30(8), 731-735.
- Loureiro, A. M. S., Paz, S. P. A. D., & Angelica, R. S. (2020). How to estimate the binder: aggregate ratio from lime-based historic mortars for restoration?. *Frontiers in Materials*, 7, 597411.
- Makhloufi, Z., Chettih, M., Bederina, M., Kadri, E. H., & Bouhicha, M. (2015). Effect of quaternary cementitious systems containing limestone, blast furnace slag and natural pozzolan on mechanical behavior of limestone mortars. *Construction and Building Materials*, 95, 647-657.
- Middendorf, B., Hughes, J. J., Callebaut, K., Baronio, G., & Papayianni, I. (2005). Investigative methods for the characterisation of historic mortars—part 2: chemical characterisation. *Materials and Structures*, 38, 771-780.





- Posani, M., Veiga, M. D. R., & de Freitas, V. P. (2021). Towards resilience and sustainability for historic buildings: A review of envelope retrofit possibilities and a discussion on hygric compatibility of thermal insulations. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(5): 807-823.
- Rani, S. D., Rahul, A. V., & Santhanam, M. (2021). A multi-analytical approach for pore structure assessment in historic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 272, 121905.
- Repacholi, M. H. (Ed.). (2012). *Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods*. Springer Science & Business Media.
- Sağın, E. U., Böke, H., Aras, N., & Yalçın, Ş. (2012). Determination of CaCO_3 and SiO_2 content in the binders of historic lime mortars. *Materials and Structures*, 45, 841-849.
- Santos, A. R., do Rosário Veiga, M., Silva, A. S., de Brito, J., & Álvarez, J. I. (2018). Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. *Construction and Building materials*, 187, 907-922.
- Scannell, S., Lawrence, M., & Walker, P. (2014). Impact of aggregate type on air lime mortar properties. *Energy Procedia*, 62, 81-90.
- Stefanidou, M., & Papayianni, I. (2005). The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27 (9-10): 914-919.
- Stoch, P., Stoch, A., Ciecinska, M., Krakowiak, I., & Sitarz, M. (2016). Structure of phosphate and iron-phosphate glasses by DFT calculations and FTIR/Raman spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 450, 48-60.
- Veiga, R. (2017). Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. *Construction and Building Materials*, 157, 132-140.



Determining the physical and chemical properties of the mortar of the historical Qara-Korpi (Black Bridge) Bridge in Maku

Hamed Yagubzadeh* Ali Nemati-Babaylou**

Abstract

In general, lime mortars have two parts: binder and aggregate; that each part of the mortar can be effective in creating various characteristics in the mortar. The binder part is divided into two types of hydraulic and air lime, and the mortar aggregates section mostly includes silicate minerals and sometimes carbonate aggregates. The difference between hydraulic lime and air lime is in the way they are carbonated, as well as the presence of silicate, aluminate and iron-bearing minerals, which are seen in hydraulic lime as calcium silicates and calcium aluminates in the structure of the lime binder. The goals of this article are: A: A brief overview of the properties of lime mortars in order to understand the effect of aggregates and aggregates in the mortar. B: Structural analysis of mortar in order to investigate the hydraulic properties of lime mortar of the case sample of the mortar of QaraKorpi (Black bridge) structure in maku. C: Determination of the size and grading of the historical case sample. According to the obtained results, it was found that the type of lime used is non-hydraulic or air lime and the type of aggregates used is mostly quartz and the maximum size group of aggregates in the mortar sample includes clay aggregates and fine sands, which can be attributed to the destruction of the mortar in Its lifespan or some kind of structural weakness during mortar construction. To achieve the goals of this research, FTIR, XRD, XRF and soil granulation machine were used.

6

Key words: Black Bridge (Qara-Korpi) mako, mortar, lime, mechanical analysis methods

* M.A. in the field of conservation of historical and cultural objects, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Arts University

** Assistant Professor, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University