دوفصلنامه علمی- پژوهشی مرمت و معماری ایران
سال پنجم، شماره نهم، بهار و تابستان ۱۳۹۴

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۰۶
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰

شناسایی ملات‌های باستانی پل شاپوری خرم‌آباد و امکان‌سنجی استفاده از آنها در مرمت پل ازطریق روش‌های آزمایشگاهی

محدثه میردِریکوندی* اکبر حاج‌ابراهیم زرگر داریوش حیدری بنی*****

چکیده

پل شاپوری (طاق پیل اشکسته)، از آثار به‌جای‌مانده از دوران ساسانی در جنوب شهر خرم‌آباد مرکز استان لرستان است. گذر زمان و عوامل طبیعی باعث رساندن آسیب‌های بسیار به این پل عظیم باستانی شده به‌طوری‌که، سازه آن وحدت و یک‌پارچگی خود را ازدست داده و مرمت آن را ضرورتی اجتناب‌ناپذیر کرده است. از مسئله‌های مهم در مرمت این پل، استفاده از ملات مناسب است. برای دست‌یافتن به چنین موقعیتی، ابتدا باید به این سؤال‌ها پاسخ داد که ملات اصیل موردِاستفاده در این پل چیست. آیا می‌توان این ملات را بازسازی نموده و در مرمت پل آن را به‌کاربرد. هدف این پژوهش، شناسایی ملات‌های این پل و امکان‌سنجی استفاده از ملات اصیل آن به‌جای ملات‌های نوین جهت مرمت است. برای دست‌یابی به این هدف، ابتدا نمونه‌هایی از ملات پل در قسمت‌های مختلف مانند: پی، پایه و عرشه انتخاب و با دقت برداشت شدند.

از نمونه‌های برداشت‌شده، آنالیز XRD و XRF به‌عمل آمد. بررسی نتایج، ملات موردِاستفاده در پایه‌های پل را ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، ملات به‌کاررفته در پی پل را ملات آهکی و ملات موردِاستفاده در اندود عرشه را ترکیب آهک و خاکستر نشان داد. سپس از ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب بازتولیدشده آنالیز XRD و آزمایشات مکانیکی به‌عمل آمد و با ملات موجود پل مقایسه شد. نتیجه این آزمایش‌ها نشان دادند، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب یک ملات زودگیر و از مقاومت فشاری و کششی مناسبی برخوردار است. این ملات، هنگامی که درمعرض رطوبت قرار می‌گیرد، مقاومت کششی و فشاری آن افزایش پیدا می‌کند. باتوجه‌به این نتایج و ماندگاری این ملات بیش از هزار و چهارصد سال روی پل شاپوری، استفاده از آن برای مرمت پل توصیه می‌شود.

کلیدواژگان: پل شاپوری خرم‌آباد، آنالیز XRD و XRF، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، آزمایش‌های مکانیکی.

* کارشناس‌ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشگاه شهید بهشتی. m.mirderikvandi@yahoo.com
** استاد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
*** استادیار، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

مقدمه

تعداد بسیاری از پل‌های تاریخی دوران ساسانی و اوائل اسلامی، در استان لرستان وجود دارند. پل شاپوری با نام محلی شکسته ازجمله پل‌های معروف استان لرستان است. درباره تاریخ شناخت این پل نظرهای گوناگونی از باستان‌شناسان و محققین ارائه شده است. عده‌ای از محققان این پل را اولین پل عظیم ساخته‌شده در لرستان می‌دانند و احتمال می‌دهند با الهام از سبک بنای این پل، پل‌های عظیم دیگری مانند کشکان ساخته شده است (ایزدپناه، ۱۳۶۳: ۱۰۶ و ۱۰۷). عده‌ای از باستان‌شناسان، این پل را تنها بازمانده از شهر کهن شاپورخواست[1] می‌دانند. *ارنست هرتسفلد*،[2] سال ۱۹۲۹میلادی پل را مطالعه کرده و طاق‌های پل را از نوع ایرانی و اوائل اسلامی دانسته و اظهار داشته این بنا به‌صورت کاملاً واضح و روشنی می‌تواند متعلق به دوره و زمان شهر همجوارش [شاپورخواست] باشد (Herzfeld, 1929: 73).

درهرصورت، این پل چه متعلق به دوره ساسانی و چه اوائل اسلام باشد، تفاوت چندانی در قدمت و ارزش معماری آن وجود ندارد. نوع معماری، ملات و مصالح پل باعث شده این بنا حدود ۱۴۰۰ سال تا زمان حال پا برجا بماند. پل شاپوری درحال‌حاضر دارای ۳۱۲ متر طول، ۵٫۳۰ متر عرض و ۱۱ متر ارتفاع است. گزارش‌های قبلی نشان می‌دهد، پل حدود ۲۹ یا ۳۰ پایه داشته است؛ هرتسفلد ۲۹ چشمه طاق، *امامی شوشتری* ۳۰ طاق و *حمید ایزدپناه* ۲۸ طاق را گزارش داده‌اند. هم‌اکنون ۲۸ پایه از آن تشخیص داده شده که ممکن است دو عدد از پایه‌ها به کوله‌های کناری پل یا پایه‌های جناحی آن تعلق داشته باشند (پرویز، ۱۳۸۰: ۱۵۴).

آسیب‌های ناشی از قدمت، شرایط محیطی، انسانی و ...، درحال‌حاضر این پل را در شرایطی قرار داده که نیاز به مراقبت و مرمت دارد. ازاین‌رو، در امر مرمت، حفظ ارزش معماری، قدمت و اصالت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از مسئله‌های مهم در این زمینه، انتخاب نوع ملات موردِاستفاده در مرمت است. ملات به‌کاررفته باید مقاومت‌های مکانیکی لازم جهت حفظ یک‌پارچگی پل را داشته باشد ازطرفی، نباید اصالت بنا را خدشه‌دار کرده و به مصالح اصیل آن آسیب رساند. گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب از ملات‌های باستانی ایران است که استفاده از آن در بناهایی سنگی مانند قلاع و پل‌ها درگذشته متداول بوده است. این ملات از سنگ گچ پخته‌شده در کوره‌های سنتی تهیه می‌شده است. براساس گزارش‌های باستان‌شناسی، استفاده از این ملات در بناهای سنگی دوره ساسانی در منطقه لرستان رایج بوده است. این احتمال وجود دارد ملات موردِاستفاده در ساخت پل شاپوری ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب باشد. بنابر این ضرورت‌ها، در این پژوهش، سعی برآن بوده تا به‌وسیله آزمایش و آنالیز دستگاهی ملات‌های پل، به ماهیت ملات موردِاستفاده در ساخت پل شاپوری پی‌برده و همچنین، به امکان‌سنجی استفاده از آنها در مرمت اقدام شده است.

پیشینه پژوهش

باوجود پل‌های تاریخی فراوان در استان لرستان، تاکنون پژوهش‌های چندانی در زمینه شناسایی ملات‌های پل‌های تاریخی صورت نگرفته است. اولین و تنها پژوهش انجام‌شده در این زمینه را *سودابه دورعلی* (۱۳۷۶) باعنوان "شناسایی ملات به‌کاررفته در پل‌های دوره ساسانی" نگاشته است. در این پژوهش، از پایه و چشمه طاق پل شاپوری نمونه‌برداری و عنوان شده: ماده موجود در پایه و چشمه طاق گچ (Gypsum)، توده سفید رنگ داخل ملات را انیدریت، گچ و توده‌های قهوه‌ای رنگ داخل ملات کلسیت، کوارتز و گچ است. در پژوهش مذکور، صرفاً ترکیبات پایه معرفی می‌شوند و از عرشه و پی، نمونه‌برداری نشده و درباره نوع ملات و نحوه ساخت آن هم بحثی نمی‌شود. در بعضی از پایگاه‌های میراث فرهنگی کشور مانند پایگاه پل‌های تاریخی لرستان و تخت سلیمان، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب در کوره‌های سنتی بازتولید و در مرمت از آنها استفاده می‌شود. ازهمین‌رو، در پژوهش حاضر برای نخستین‌بار ویژگی‌های علمی ملات قسمت‌های مختلف پل شاپوری مورد آنالیزهای XRD و XRF و مطالعات مکانیکی قرار می‌گیرند.

روش پژوهش

باتوجه‌به ماهیت موضوع تحقیق، شیوه پژوهش ترکیبی از شیوه‌های کیفی و کمّی مبتنی‌بر روندی تحلیلی است. روش‌های جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت اسنادی و مدارک: بررسی پرونده‌ها و سوابق بایگانی، بررسی اسناد تاریخی، گزارشات مرمت‌ها و تحقیق‌های صورت‌گرفته تاکنون است. بررسی‌های میدانی شامل: تهیه عکس‌ها، نمونه‌برداری از ملات و مطالعات آزمایشگاهی (آنالیز شیمیایی با دستگاه XRD و XRF) و آزمایشات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی و زمان گیرش ملات) است که براساس مطالعات انجام‌شده استنتاج و نتیجه‌گیری می‌گردند.

معرفی عمومی پل شاپوری

ساختمان پل شاپوری با نام محلی پل‌شکسته در جنوب شهر خرم‌آباد، مرکز استان لرستان و درامتداد مستقیم به جهت شرقی-غربی، با انحراف ۱۸ درجه‌ای به سمت شمال، در

بستر پایدار رودخانه خرم‌آباد با طول تقریبی ۳۱۲ متر احداث شده است. ساختمان این پل، کاملاً از سنگ آهک ساخته شده است. امروزه بقایای ۲۵ پایه این ساختمان سنگی عظیم، پنج طاق و قسمت‌هایی از کوله (نیم‌پایه یا پایه جناحی) ساختمان برجای مانده اما پیشینه بررسی‌های آن حاکی است در گذشته ۲۹ یا حتی ۳۰ پایه یا بیشتر داشته که به‌تدریج، براثر وقوع حوادث از تعداد آنها کاسته شده‌است (پرویز، ۱۳۸۰:۱۵۵).

ازمیان پایه‌های موجود، یازده پایه که در نیمه شرقی ساختمان قرار گرفته‌اند، بدون موج‌شکن (آب‌بُر) بوده و عموماً به شکل چهارضلعی ساخته شده‌اند. بقیه دارای موج‌شکن ذوزنقه‌ای‌شکل هستند. از فاصله میان پایه‌ها (اندازه دهانه طاق‌ها)، به‌تدریج به طرف شرق کاسته می‌شود به‌گونه‌ای که کمترین اندازه در فاصله میان کوله شرقی پل و پایه اول ساختمان، برابر با ۲/۵ متر و بزرگ‌ترین اندازه دهانه طاق در فاصله میان پایه‌های میانی پل، قریب به ۷/۸۰ متر اندازه‌گیری شده است. درحال‌حاضر، بستر صغیر (خیس) پل شاپوری که جریان دائمی رودخانه خرم‌آباد از آن می‌گذرد، طولی برابر با ۲۱ متر دارد و از بین دهانه‌های ۱۳ و ۱۴ پل می‌گذرد. بستر کبیر یا طغیانی به‌طول ۳۱۲ متر است. بستر کبیر در کرانه شرقی ۱۱۴ متر و در کرانه غربی ۱۹۸ متر طول دارد (تصویرهای ۳-۱).

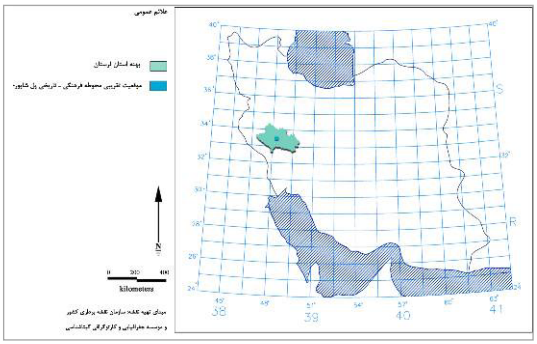
در این پژوهش، برای تدقیق مطالعات و نشان‌دادن مکان‌های نمونه‌برداری، عناصر معماری ساختمان پل شاپوری به‌ترتیب از شرق به غرب شماره‌گذاری شده‌اند (تصویر ۴).

- برای شناسایی پایه‌ها، شماره‌های ۱ تا ۲۵ و حرف P1 تا P25به‌کار رفته است. براساس این شناسه، اولین پایه پل از کرانه شرقی رودخانه آغاز می‌شود و آخرین پایه قابل رؤیت (نزدیک به ساحل غربی)، پایه شماره ۲۵ است.

شناسایی ملات به‌کاررفته در پی پل شاپوری

- آزمایش ملات پی پل شاپوری به وسیله دستگاه XRD[۴]؛ مشاهدات اولیه و نمونه‌برداری در حفاری‌های سازمان میراث فرهنگی استان لرستان (مرداد ۱۳۹۲)، پی پایه‌های شماره یک تا شماره پنج پل نمایان شد و برای اولین‌بار، فرصت آنالیز ملات آن ایجاد شد. قسمتی از ملات پی در پایه شماره ۴، دراثر حفاری بیرون افتاده بود که از این قسمت، ملات جهت آنالیز XRD[۵] برداشت شد (تصویرهای ۷-۵).

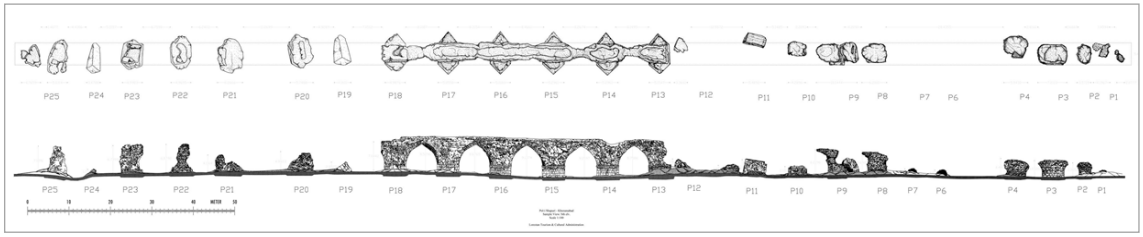
با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز XRD ملات پی، در ترکیبات آن مشاهده شد اصلی‌ترین ماده معدنی به‌کاررفته ترکیبات ملات پی پل شاپوری با ۴۹ % حضور وزنی کلسیم کربنات بوده و کلسیم سیلیکات ۲۲ % ، کوارتز، ۱۲% گچ ۱۰% و کربن ۷% حضور وزنی دارند. درباره ترکیبات این ملات، چند احتمال را می‌توان بیان کرد: اول اینکه، ملات استفاده‌شده در پی پل شاپوری شفته‌آهک است که در خاک آن مقدار کمی گچ وجود دارد. دیگر اینکه، در ترکیبات آن آهک، خاکستر، ماسه و مقدار کمی گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب وجود دارد. باتوجه‌به اینکه در نتایج آنالیز XRD، آلومینیوم



تصویر ۱. جانمایی پل شاپوری بر نقشه ایران (نگارندگان)[۳]

تصویر ۲. پل شاپوری در سال ۱۳۵۴ (سازمان میراث فرهنگی لرستان)

تصویر ۳. پل شاپوری در سال ۱۳۹۲ (نگارندگان)



تصویر ۴. پلان و نمای وضعیت موجود و شماره‌گذاری پایه‌های پل شاپوری خرم آباد (سازمان میراث فرهنگی استان لرستان)

اکسید دیده نمی‌شود، وجود خاک رس در آن منتفی است درنتیجه، احتمال دوم به‌نظر صحیح‌تر می‌آید. به‌نظر می‌رسد، اضافه‌کردن گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب و گچ به این ترکیب برای افزایش سرعت گیرش آن و به‌منظور مقاومت بیشتر آهک و تولید کلسیم کربنات به خاکستر بوده است (تصویر ۸). خاکستر حاوی مقدار زیادی سیلیس غیرمتبلور است (رحیمی، ۱۳۹۲: ۱۱۰). همچنین، خاکستر حاوی کربن نیز هست. درنتیجه، وجود خاکستر در ملات هم باعث تشکیل کلسیم سیلیکات و هم کلسیم کربنات می‌شود. بنابراین، ملات بسیار قوی‌تر و مقاوم‌تر می‌گردد.

آزمایش قرارگیری پی در محیط اسیدی

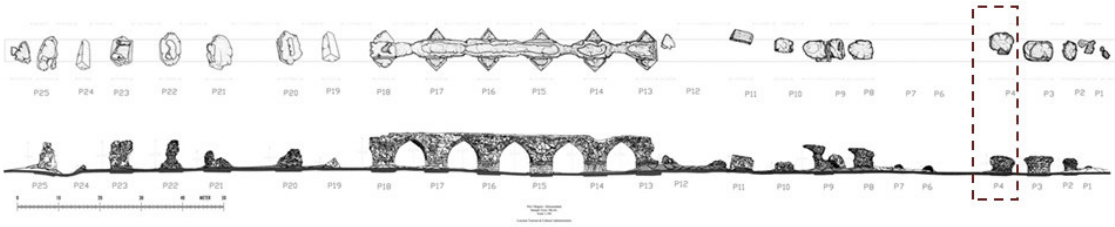
ازآنجایی‌که پل شاپوری روی رودخانه خرم‌آباد ساخته شده، این رودخانه درگذشته دارای آب پاکیزه چشمه‌های موجود در شهر یا آب باران و سیلاب‌های فصلی بوده است. با توسعه شهرنشینی خرم‌آباد فاضلاب‌های شهری نیز به این رودخانه انتقال یافت به‌طوری‌که امروزه پی پل در معرض فاضلاب‌های شهر و مواد مضر موجود در آن قرار دارد. براین‌اساس، این احتمال وجود دارد مقدار اسید موجود در آب رودخانه افزایش یابد. در این رابطه، از آزمایش شیمیایی- فیزیکی آب رودخانه که در سال ۱۳۸۸ انجام گرفته، استفاده شده است. این آزمایش، pH آب رودخانه را تقریباً خنثی نشان می‌دهد. بااینکه آزمایش اخیر آب در دسترس نیست اما، می‌توان حدس زد با توسعه روزافزون ساختمان‌سازی مقدار آلودگی و اسیدی‌شدن آب نیز روندی روبه افزایش دارد. بنابراین، می‌تواند پی و پایه پل را تحت تأثیر مستقیم و مداوم قرار دهد. به‌این‌دلیل، پیش‌بینی رفتار ملات پی در این شرایط جهت بررسی آسیب‌هایی که آلودگی آب اسیدی به پی پل وارد خواهد کرد، لازم است. لذا مقداری از ملات در محیط اسیدی قرار گرفت و مجدداً نمونه با دستگاه XRD آنالیز شد.[۶]

هنگامی که چند قطره کلریدریک اسید (HCl) یا جوهر نمک نرمال[۷] روی ملات برداشت‌شده از پی پل ریخته شد، ملات به‌سرعت به کلریدریک اسید واکنش نشان داد و شروع به جوشیدن کرد و نشان داد، ملات آهکی پی دربرابر کلریدریک اسید آسیب‌پذیر است (حامی، ۱۳۵۹: ۹۳). به‌منظور بررسی علمی تأثیر مخرب کلریدریک اسید و قرارگیری طولانی دائمی پی پل دربرابر این آلودگی، ملات ۱۰ ساعت در محیط اسیدی (جوهر نمک نرمال) قرار گرفت. مشاهدات اولیه نشان داد، ملات حالت ژله‌ای پیدا کرده و تنها اجزای سخت باقی مانده در آن، دانه‌های کوارتز هستند (تصویر ۹).

با بررسی آنالیز XRD ملات پس از قرارگیری درمعرض کلریدریک اسید مشاهده شد این ملات، به‌شدت در برابر کلریدریک اسید و درنتیجه آلودگی آب رودخانه، آسیب‌پذیر است (تصویر ۱۰). همان‌طورکه در جدول ۳ دیده می‌شود، از ۷۷ % کلسیم کربنات موجود در ملات تنها ۲۶ % باقی مانده است و مابقی آن، تبدیل به کلسیم کلرید شده است. ۱۰ % گچ موجود هم کاملاً ازبین رفته و تنها کوارتز توانسته دربرابر

تصویر ۵. محل برداشت نمونه ملات پی پل (نگارندگان)

تصویر ۶. موقعیت برداشت ملات پی (نگارندگان)



تصویر ۷. جانمایی پایه شماره ۴، محل برداشت نمونه ملات پی، روی نقشه پل شاپوری (نگارندگان)

این اسید مقاومت کند. با مقایسه نمودار آنالیز XRD ملات قبل و بعد از قرارگیری درمعرض اسید، به‌وضوح ازبین‌رفتن اکثر مواد معدنی در ترکیبات ملات مشاهده می‌گردد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت هرمقدار درصد اسیدی و آلودگی رودخانه خرم‌آباد بیشتر شود، آسیب بیشتری به ملات پی پل وارد و موجب انحلال تدریجی آن می‌گردد. این اتفاق می‌تواند برای تمام پل‌های تاریخی که رودخانه بستر آن‌ها با فاضلاب شهری آلوده می‌شود، نیز رخ دهد. درنتیجه، قبل از وقوع این رخداد باید پیشگیری‌های لازم جهت حفظ ساختار پل شاپوری به‌عمل آید.

شناسایی ملات عرشه پل شاپوری

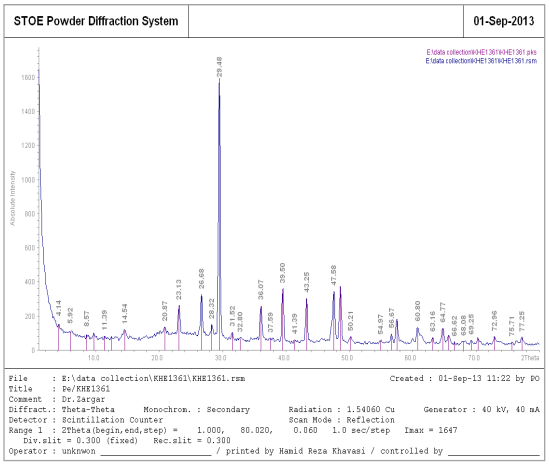
- مشاهدات اولیه و نمونه‌برداری

انتخاب نمونه جهت برداشت از پل شاپوری باتوجه‌به ابعاد و وسعت آن، مستلزم دقت بالایی است. بسیاری از قسمت‌های بنا طی سالیان طولانی و سیلاب‌های سهمگین آسیب‌های فراوانی دیده‌اند به‌طوری‌که، بسیاری از پایه‌ها به‌گونه‌ای جدی دچار آسیب شده و قسمت‌هایی از کالبد خویش را ازدست

جدول ۱. نتیجه آنالیز XRD، ملات پی پل شاپوری

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[٪]
1	Calcium Carbonate	$CaCO_3$	49
2	Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	10
3	Calcium silicate	$CaO.SiO_2$	22
4	Quartz	SiO_2	12
5	Carbon	C	7

(نگارندگان)



تصویر ۸. پیک‌های آنالیز XRD، ملات پی پل شاپوری (نگارندگان)

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده در آب رودخانه خرم‌آباد

ردیف	شماره نمونه	میزان سولفات آب (ppm)	میزان کلر آب (ppm)	اسیدیته آب (pH)	قلیائیت فنل فتالئین برحسب کربنات‌ها (mg/l)	قلیائیت متیل اورانژ برحسب بی‌کربنات‌ها (mg/l)	مواد آلی (ppm)
۱	۰۸۱۳۷	۲۲۵	۱۹۲	۷,۰۸	NIL	۲۶۲	۱۹,۲
۲	۰۸۱۲۱	۲۵۰	۲۰۴	۶,۹۵	NIL	۲۵۴	۱۹,۹

(مهندسین مشاور پیرنیا، ۱۳۸۸)

جدول ۳. نتایج آنالیز XRD، ملات پی بعد از قرار گیری در اسید

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Calcium Carbonate	$CaCO_3$	26
2	Quartz	SiO_2	45
3	Calcium chloride	$CaCl_2$	29

(نگارندگان)

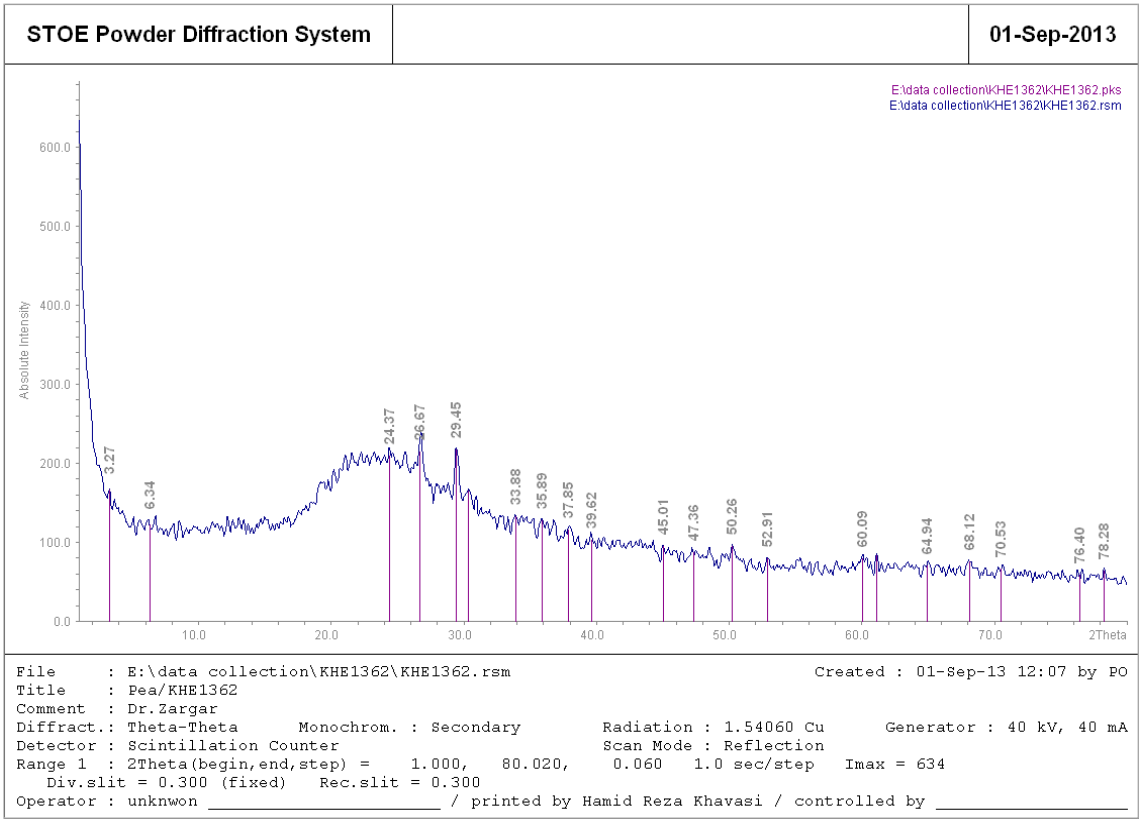
تصویر ۹. ملات پی بعد از قرارگیری در اسید (نگارندگان)

داده‌اند. از ۲۵ پایه موجود تنها ۵ پایه دارای طاق و عرشه هستند. این ۵ پایه، اخیراً مرمت شده و تمام قسمت‌های عرشه در زیر لایه‌ای جدید از سنگ مدفون شده است. با این وضعیت، دسترسی به عرشه اصیل این پایه‌ها غیرممکن است. خوشبختانه، تنها مقداری از اندود عرشه پل در طاق فروافتاده و پایه ۹ موجود است (تصویر ۱۱). بنابراین، از اندود عرشه این پایه جهت آنالیز ترکیبات آن، نمونه‌برداری شد. در نگاه اول، اندود خاکستری رنگ به‌سختی همراه با دانه‌های ریز خوردشده سنگ و ماسه مشاهده گردید (تصویرهای ۱۲ و ۱۳).

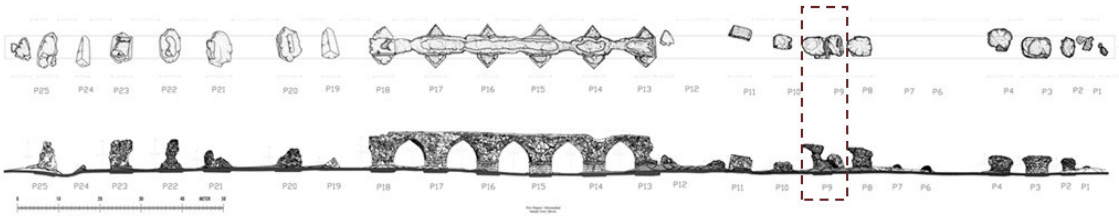
از نمونه برداشت‌شده از عرشه پل، آزمایش‌هایی به‌عمل آمد؛ اولین آزمایش، آنالیز ترکیبات ملات توسط دستگاه XRD بود. پیک‌های به‌دست‌آمده از آزمایش تحلیل شدند (تصویر ۱۴). تحلیل این آزمایش، نشان داد در ترکیبات معدنی ملات عرشه پل ملات ۷۵%، کلسیم کربنات ۱۴%، کربن ۱۱%، کوارتز و آلومینیوم کلسیم سیلیکات به مقدار ۹% وجود دارند (جدول ۴). کلسیم کربنات نشان‌دهنده وجود درصد بالای حضور آهک (۷۵%) در این ملات و وجود ملاتی با پایه آهکی است. کوارتز نشان‌دهنده جنس خرده‌سنگ‌های موجود در ملات است. این خرده‌سنگ‌ها به‌عنوان ماده پرکننده ملات و برای ایجاد اصطکاک در سطح نهایی به‌کار رفته است. آلومینیوم کلسیم سیلیکات نشانگر وجود مقداری کمی خاک در این ملات است. کربن هم از خاکستر به‌کاررفته در ترکیبات ملات باقی مانده است. تعیین نوع خاکستر استفاده‌شده در این ملات، نیاز به پژوهش دیگری دارد.

بعد از شناسایی ترکیبات معدنی نمونه موردنظر برای تکمیل آزمایش از نمونه ملات عرشه پل، آنالیز XRF[۸] گرفته شد. در این آزمایش، ترکیبات ملات براثر درصد حضورشان بدین‌ترتیب، مشاهده شدند: آهک CaO بیشترین درصد وزنی را دارد و بعد از آن سیلیس SiO_2. سیلیس می‌تواند نشان‌دهنده ماسه یا خاکستر در ملات باشد. نظربه مشاهدات میدانی و مشاهده ذغال در قسمت‌هایی از ملات پل و وجود کربن در آنالیز XRD، وجود سیلیس می‌تواند حاکی از استفاده خاکستر در ملات آهکی عرشه و SO_3 نشان‌دهنده استفاده از مقدار کمی گچ یا گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب در این ملات باشد. اضافه‌کردن گچ برای تسریع زمان گیرش ملات بوده است.

با نتیجه‌گیری از دو آنالیز مذکور از ملات عرشه پل شاپوری، می‌توان گفت در زمان ساخت این پل عظیم برای اندود سطح نهایی عرشه، ملات موردِاستفاده ترکیب آهک، خاکستر، خاک و مقدار کمی گچ یا گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است. استفاده از گچ جهت تسریع زمان گیرش آن و خاکستر اضافه‌شده به‌منظور تولید کلسیم کربنات و افزایش مقاومت ملات پایه آهکی پی، بوده است.



تصویر ۱۰. پیک‌های آنالیز XRD ملات اسیدی‌شده، پی پل شاپوری (نگارندگان)



تصویر ۱۱. جانمایی پایه شماره ۹ روی نقشه پل شاپوری (نگارندگان)

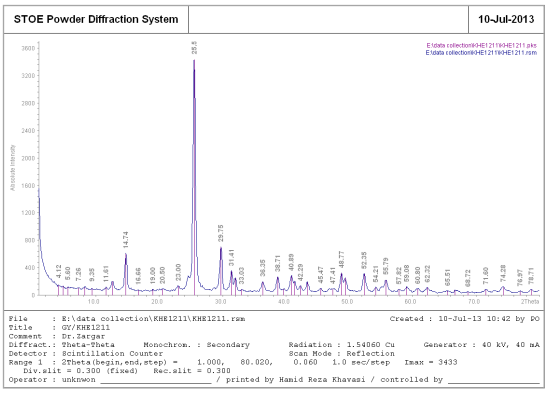
تصویر ۱۲. محل برداشت نمونه شماره یک از عرشه، پایه شماره ۹ (نگارندگان)

تصویر ۱۳. نمای پایه شماره ۹ (نگارندگان)

جدول ۴. نتایج آنالیز XRD براساس درصد کمّی ترکیبات معدنی

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[٪]
1	Calcium Carbonate	$CaCO_۳$	۷۵
2	Carbon	C	۱۴
3	Quartz	$SiO_۲$	۱۲
4	Aluminum Calcium Silicon	$Al_۲Ca_۲Si_۲$	۹

(نگارندگان)



تصویر ۱۴. پیک‌های آنالیز XRD ملات، عرشه پل شاپوری (نگارندگان)

جدول ۵. نتایج حاصل از آنالیز دستگاهی XRF[۹]، نمونه ملات عرشه پل شاپوری

ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
Na_2O	۰,۶	MgO	۱,۱۲	Al_2O_3	۱,۷٤
SiO_2	۲٤,٤٦	P_2O_5	۰,۳۷	SO_3	۱,۵۲
Cl	۰,۰۷	K_2O	۰,۳۵	CaO	۵۴,۶
Fe_2O_3	۱,۷۹	TiO_2	۰,۳۴	L.O.I	۱۳,۰۴
La&Lu	<۱	-	_	-	_

(نگارندگان)

شناسایی ملات به‌کاررفته در پایه‌های پل شاپوری

- مشاهدات اولیه و نمونه‌برداری

به‌جز پایه‌های ۱۳ تا ۱۸ که در مرمت‌های صورت‌گرفته نمای آنها با سنگ روکش شده و امکان دسترسی به ملات‌شان وجود نداشت، از قسمت‌های مختلف دیگر پایه‌های پل (حدود ۲۰ پایه)، نمونه‌برداری و به‌وسیله دستگاه XRD آنالیز شدند. بعد از تحلیل داده‌های XRD مشخص شد، نوع ملات به‌کاررفته در تمام قسمت‌های پایه پل مشابه است. به‌عنوان نمونه، برای معرفی این ملات، قسمتی انتخاب شد که درحین ساخت پایه شماره ۲۱ نقش نگهدارنده‌ای داشته است (قسمت قرارگیری چوب داربست). در پایه شماره ۲۱، دسترسی به ملات داخل بدنه و اصیل به‌دلیل نشست پایه امکان‌پذیر بود که منجر به اطمینان‌یافتن از اصالت ملات گردید. ازاین‌رو، این نمونه انتخاب شد (تصویر ۱۵).

با تحلیل آنالیز XRD مشاهده شد، در ترکیبات ملات پایه پل، ٪ ۴۳ ژیپس (گچ) و ٪ ۳۰ کلسیم کربنات (آهک)، ۱۴٪ کربن و ٪ ۱۴ آلومینیوم اکسید وجود دارد. این آزمایش نشان داد، ملات استفاده‌شده در ساخت پایه پل ترکیبی از گچ و آهک است. این ترکیب، درواقع ملات مشهور ساسانی با نام ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است.

تصویر ۱۵. نمای پایه شماره ۹ (نگارندگان)

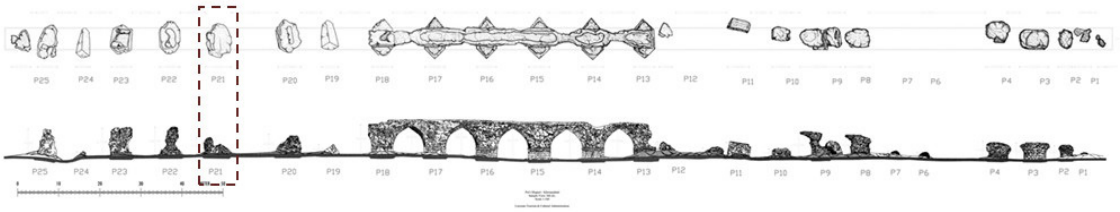
آزمایش XRF از نمونه ملات پایه شماره ۲۱ پل

برای تکمیل آنالیز XRD از نمونه برداشت‌شده پایه شماره ۲۱، آنالیز XRF گرفته شد تا نوع ملات به‌صورت علمی و با اطمینان مشخص شود. نتیجه حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه پایه پل به‌وسیله دستگاه XRF براساس درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل‌دهنده نشان داد، بیشترین درصد حضور در ترکیبات ساخت این ملات مربوط به SO_3 (گچ) با ٪ ۳۷٫۶ حضور وزنی و بعد از آن، CaO (آهک) با ٪ ۳۱٫۷ حضور وزنی است که ترکیبات اصلی این ملات را تشکیل داده‌اند (جدول ۷). باتوجه‌به اینکه ترکیبات ملات باستانی، گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است بنا براین، می‌توان گفت به‌طور یقین، ملات استفاده‌شده در ساخت پایه‌های پل، گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است.

روش تولید گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب

در نتایج آنالیز شیمیایی XRD و XRF مشخص شد، ملات به‌کاررفته در ساخت پایه‌های پل شاپوری ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است. این ملات در کوره‌های تنوره‌ای باستانی ایران که استوانه‌ای شکل بوده‌اند، به‌عمل می‌آمد. سنگ گچ را درون این کوره‌ها می‌چیدند و تون کوره را آتش می‌زدند تا سنگ گچ بپزد. گچ به‌عمل‌آمده دارای جنس همگنی نیست زیرا نزدیک ٪ ۲۰ آن، گچ پخته ساختمانی با نیم مولکول آب و مانده آن، سوخته یا نپخته است (حامی، ۸۱:۱۳۵۹).

تصویر ۱۶. محل برداشت نمونه شماره یک از عرشه پایه شماره ۹ (نگارندگان)

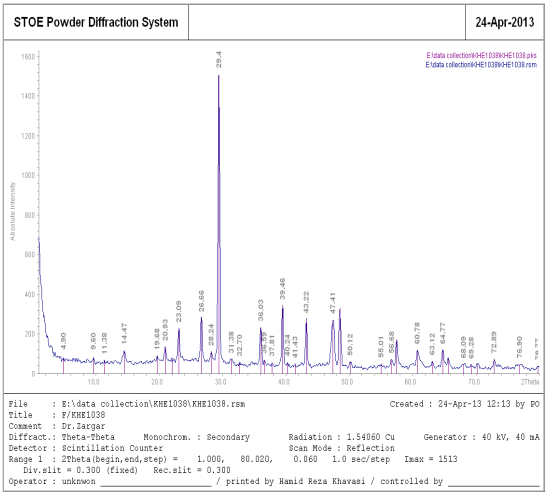


تصویر ۱۷. جانمایی پایه شماره ۲۱، محل برداشت نمونه ملات پایه روی نقشه پل شاپوری (نگارندگان)

جدول۶. نتایج آنالیز XRD بر اساس درصد کمّی ترکیبات معدنی

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Gypsum	$CaSO_4(H_2O)_2$	43
2	Calcium Carbonate	$CaCO_3$	30
3	Carbon	C	14
5	Aluminum Oxid	Al_2O_3	14

(نگارندگان)



تصویر ۱۸. پیک‌های آنالیز XRD ملات، پایه پل شاپوری (نگارندگان)

جدول ۷. نتایج حاصل از آنالیز XRF، نمونه ملات پایه شماره ۲۱

ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
Na_2O	۵,۹	MgO	۱,۲۷	Al_2O_3	۰,۰۲
SiO_2	۱,۴۵	P_2O_5	۰,۰۳	SO_3	۳۷,۶
Cl	۰,۱۱	K_2O	۰,۱۸	CaO	۳۱,۷
Fe_2O_3	۰,۳	La&Lu	<۱	L.O.I	۲۱,۵

(نگارندگان)

مراحل پخت سنگ گچ

بخارکردن همه آب شیمیایی سنگ گچ یا بخشی از آن را گچ‌پزی می‌گویند. سنگ گچ در دمای کم می‌پزد. هرچه گرمای پختن سنگ گچ کمتر باشد، ملات گچ آن زودتر می‌گیرد. چونکه برای دوباره سنگ گچ شدن، کمتر آب می‌خواهد. جنس گچ بستگی دارد به درجه گرمای پختن آن که در ادامه آورده شده است (حامی، ۱۳۵۹: ۸۰):

هنگامی که سنگ گچ در دمای ۱۰۷ درجه سلسیوس حرارت ببیند، عموماً آب آزاد گچ تبخیر شده و در دماهای بیشتر به‌تدریج آب متبلور آن از دست می‌رود. به‌گونه‌ای که سنگ گچ در دمای پخت حدود ۱۸۰ درجه سلسیوس به $CaSO_4.1/2H_2O$ و در دمای حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس به $CaSO_4.0,3H_2O$ تبدیل می‌شود.

سنگ گچ در دمای حدود ۳۰۰ سلسیوس به $CaSO_4$ تبدیل می‌شود. همچنین، در دمای بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس ضمن ازدست‌دادن کلیه آب متبلور خود به سنگ گچ سوخته تبدیل شده و دیگر در شرایط عادی با آب ترکیب نمی‌شود (رحیمی، ۱۳۹۲: ۱۲۸).

در گرمای ۸۰۰ درجه به بالا، گچ خشک $CaSO_4$ کم‌کم تجزیه می‌گردد. در گرمای ۱۲۳۰ درجه، تجزیه گچ خشک تند گشته، در گرمای ۱۴۰۰ درجه و فشار یک‌بار، با گرفتن ۱۱۶۸ cal/g گرما، تمام کلسیم سولفات به CaO و SO_3 تجزیه و گاز سولفور خود به SO_2 و O تجزیه و بخار می‌شود (همان). در این هنگام، فقط آهک زنده یا CaO باقی می‌ماند. میزان آهک تولیدشده در این کوره‌ها به‌دلیل غیرقابل تنظیم‌بودن حرارت، متفاوت است (حامی، ۱۳۵۹: ۸۱).

در کوره‌های سنتی از سنگ گچ، انواع گچ‌ها و آهک به‌دست می‌آید و از همه این ترکیبات، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب تولید می‌شود. سنگ گچ‌هایی که در بالاترین قسمت کوره قرار دارند، خام می‌ماند و پخته نمی‌شوند. آنها را خرد کرده و به‌عنوان مواد پرکننده در این ملات استفاده می‌کردند. در این نمونه مشاهده شد، از سنگ رس خردشده نیز در ترکیبات استفاده کرده‌اند. خاکستر چوب‌هایی که به‌عنوان سوخت در کوره استفاده شده نیز به این ترکیب اضافه شده است. به این علت خاکستر اضافه می‌شده تا با مقدار آهک تولیدشده ترکیب شود، کلسیم کربنات و کلسیم سیلیکات تولید و مقاومت ملات بالا رود.

آنالیز گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب بازتولیدشده

پایگاه پل‌های تاریخی استان لرستان در سال ۱۳۸۸، براساس این احتمال که ملات پل‌های تاریخی استان، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است، به بازتولید ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب به‌روش سنتی اقدام نمود. همچنین، از این ملات در مرمت پل‌های تاریخی، مخصوصاً پل کشکان استفاده کرد. برای شناخت ویژگی‌های ملات بازتولیدشده از نمونه‌ای که مدیر پایگاه پل‌های تاریخی دراختیار نگارندگان قرار داد، آزمایش شیمیایی و مکانیکی به‌عمل آمد. نتایج آن درادامه آورده خواهد شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها، مطالعه فیزیکی شرایط موجود و نه طراحی مقدار بهینه اختلاط مواد است. زیرا آن نیازمند دانستن مقدار آهک تولیدشده و موجود در کوره سنتی است تا بتوان مقدار خاکستر لازم را مشخص کرد. ضمن‌اینکه، پرداختن به این موضوع خود نیازمند آزمایش و پژوهش‌های دیگری است.

آنالیز XRD گچ نیم‌کوب- نیم‌پخته بازتولیدشده

گچ نیم‌کوب- نیم‌پخته بازتولیدشده، به‌صورت پودر و قبل از ترکیب با آب مورد آزمایش XRD قرار گرفته است. با تحلیل آنالیز مشاهده شد به‌دلیل حرارات متفاوت در قسمت‌های مختلف کوره، انواع متفاوتی از گچ و مقداری هم آهک تولید شده است. دوباره شایان ذکر است که این ترکیبات و درصدهای آنها در کوره‌های مختلف، به‌دلیل متفاوت‌بودن حرارت و نوع سنگ گچ استفاده‌شده، متفاوت خواهد بود. پس از بررسی نتایج آنالیز ملات بازتولیدشده گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، مشاهده شد: ۵۸% انیدریت، ۱۴% ژیپس، ۸% کلسیم اکسید، ۱۰% کربن و ۱۵% آلومینیوم اکسید وجود دارد.

جدول ۸. نتایج آنالیز XRD براساس درصد کمّی ترکیبات ملات بازتولیدشده گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Gypsum	$CaSO_4(H_2O)_2$	14
2	Calcium Oxide	Ca O	8
3	Carbon	C	10
4	Anhydrite	$CaSO_4$	58
5	Aluminum Oxid	Al_2O_3	15

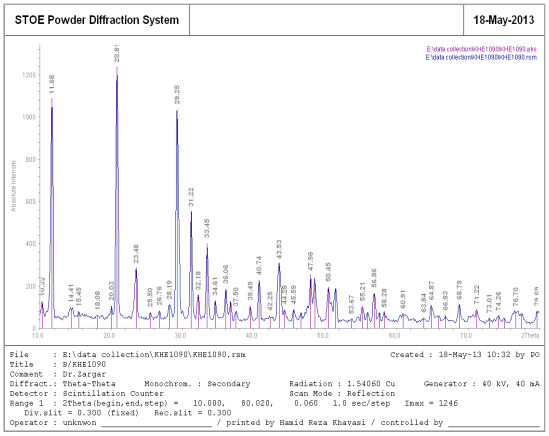
(نگارندگان)

وجود آلومینیوم اکسید در این ترکیب، به‌علت اضافه‌شدن سنگ رس پودرشده حین ساخت ملات است. با این تصور که ملات قوی‌تر می‌شود ولیکن به‌علت اینکه ملات، ترکیبی از گچ و آهک است وجود خاک رس احتمال به‌وجودآمدن اثرات مضر را در دراز مدت می‌دهد. از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت، ملات تولیدشده حاوی ترکیبات مورد انتظار بوده است اما برای شناخت بهتر ویژگی‌های این ملات، انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری و کششی این نمونه لازم می‌نماید.

آزمایش زمان گیرش ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب

برای مشاهده خصوصیات گیرشِ (تندگیر یا کندگیربودن) ملات بازتولیدشده گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، آزمایش زمان گیرش، از آن به‌عمل آمد. زمان گیرش گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب با استفاده از دستگاه ویکات و غلظت نرمال ۱۰۴۴% آب اندازه‌گیری شد. براساس نتایج این آزمایش، زمان گیرش اولیه این ملات ۴ دقیقه و ۳۹ ثانیه و زمان گیرش نهایی آن

تصویر ۱۹. کوره استوانه‌ای پخت سنگ گچ (پایگاه پل‌های تاریخی لرستان، ۱۳۸۸)



تصویر ۲۰. پیک‌های آنالیز XRD ملات، گچ نیم‌کوب بازتولیدشده (نگارندگان)

۷ دقیقه است (تصویر ۲۱). بنابراین، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب یک ملات بسیار زودگیر است و توجه به این نکته، حین استفاده از آن نکته بسیار مهمی است.

آزمایش تعیین مقاومت فشاری و کششی ملات موجود پل شاپوری

این آزمایش روی دو نوع نمونه انجام شد: نوع اول، نمونه‌های برداشت‌شده از ملات اصیل پل است که پس از بررسی‌های کارشناسی و باستان‌شناسی، از قسمت‌هایی انتخاب شدند که کمترین آسیب را به ساختار پل می‌رساندند. سپس با احتیاط برداشت شده و در ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر برش داده شدند و موردِآزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. این نمونه‌ها از پایه شماره ۲۰ و ۲۱ برداشت شده‌اند. به‌دلیل آسیب‌رسیدن به پل، امکان برداشت در عمق کالبد پل وجود نداشت. نمونه‌های نوع دوم، نمونه‌های بازتولیدشده ملات گچ نیم‌پخته – نیم‌کوب بود.

آزمایش مقاومت فشاری ملات برداشت‌شده

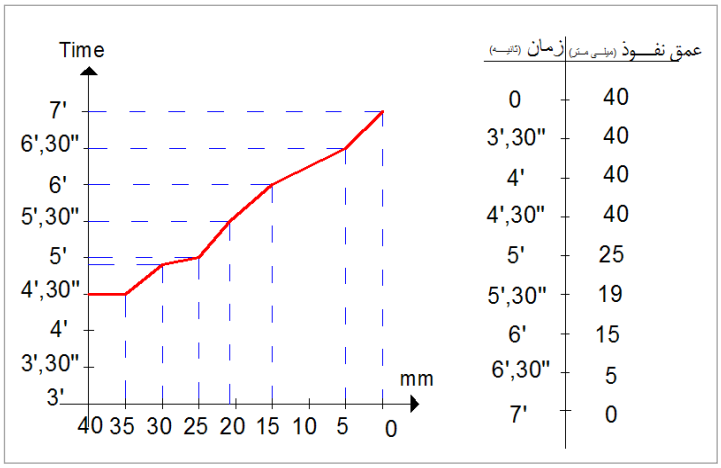
برای مشاهده مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی برداشت‌شده از ملات موجود پل، توسط دستگاه جک هیدرولیکی تحت آزمایش قرار گرفتند. این آزمایش، مقاومت فشاری نهایی نمونه برداشت‌شده از پایه ۲۰ پل شاپوری را ۴۹/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و مقاومت فشاری نمونه برداشت‌شده از پایه ۲۱ را ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داد. باتوجه‌به اینکه برداشت ملات فقط از سطح بنا امکان‌پذیر بود و این ملات، تحت‌تأثیر عوامل فرساینده جوی قرار داشته، همچنین کهولت و پیرشدگی آن، امکان پیش‌بینی مقاومت پائین فشاری وجود داشت. بنابراین، برای دستیابی به مشخصات مکانیکی ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، از نمونه بازتولیدشده ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب ملات ساخته و آزمایش شد.

آزمایش مقاومت فشاری ملات بازتولیدشده

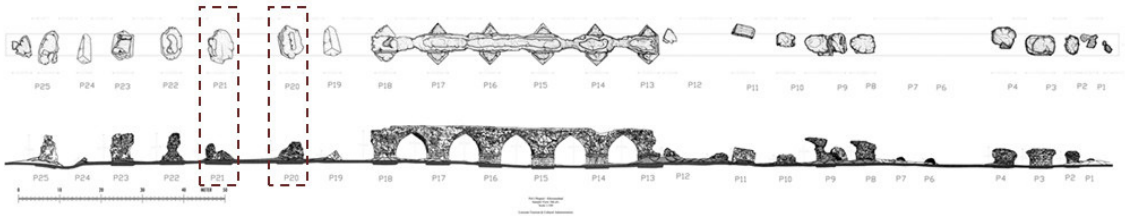
به‌منظور انجام این آزمایش، از ملات موردنظر ۶ نمونه در ابعاد ۵ ×۵ سانتی‌متر مربع ساخته شد. ۳ نمونه ساخته‌شده با حفظ رطوبت و ۳ نمونه در محیط خشک نگهداری شدند. این نمونه‌ها، ۴۵ روز در این شرایط نگهداری شدند. پس از ۴۵ روز، از آنها تست مقاومت فشاری گرفته شد.

در نمونه‌ای که رطوبت آن حفظ شده بود، میانگین مقاومت فشاری: ۱۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در نمونه خشک: ۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داده شد.

نتیجه این آزمایش از دو جهت درخور توجه است: ۱. مقدار مقاومت نمونه ساخته‌شده ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، بسیار مناسب و قابل قبول نسبت به ملات‌های امروزی بود. ۲. تفاوت در مقدار مقاومت نمونه ملات با حفظ رطوبت، نسبت به نمونه‌ای



تصویر ۲۱. نتایج آزمایش زمان گیرش ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب (نگارنگان)



تصویر ۲۲. محل برداشت نمونه ملات از پایه ۲۰ و ۲۱ پایه روی نقشه پل شاپوری (نگارندگان)

که در محیط خشک قرار داشت، اثبات نمود رطوبت باعث افزایش مقاومت فشاری ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب می‌گردد.

آزمایش مقاومت کششی ملات بازتولیدشده

برای انجام آزمایش مقاومت کششی، از ملات بازتولیدشده گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، ۶ نمونه در قالب پاپیونی ساخته شد. ۳ عدد از این نمونه‌ها با حفظ رطوبت و ۳ عدد در محیط خشک به‌مدت ۴۵ روز در این شرایط قرار گرفتند. میانگین مقاومت کششی در نمونه‌ها با حفظ رطوبت: ۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و میانگین مقاومت کششی

در نمونه خشک: ۸٫۵۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. با مقایسه مقاومت کششی نمونه‌ها با حفظ رطوبت و نمونه‌های خشک مشاهده می‌شود، نمونه‌ها با حفظ رطوبت مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های خشک دارند. این آزمایش ثابت نمود، رطوبت باعث افزایش مقاومت کششی ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب می‌گردد.

تصویر ۲۳. ملات برداشت‌شده از پایه شماره ۲۰ (نگارندگان)

تصویر ۲۴. ملات برداشت‌شده از پایه شماره ۲۱ (نگارندگان)

تصویر ۲۵. نمونه‌های بازتولیدشده بعد از آزمایش مقاومت فشاری (نگارندگان)

تصویر ۲۶. نمونه‌ها درحال آزمایش مقاومت کششی (نگارندگان)

نتیجه‌گیری

پس از بررسی‌ها و مطالعات آزمایشگاهی ملات پل شاپوری، ملات پل در سه قسمت: پی، پایه و عرشه شناسایی گردید. همچنین، مشاهده شد ملات پی پل شاپوری پایه آهکی است و درباره ترکیبات آن چند احتمال بیان شد: ملات به‌کاررفته در پی پل شاپوری شفته آهک است که در خاک آن مقدار کمی گچ وجود دارد. احتمال دیگر این است که در ترکیبات آن آهک، خاکستر، ماسه و مقدار کمی گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب وجود دارد. باتوجه‌به اینکه در نتایج آنالیزXRD، آلومینیوم اکسید دیده نمی‌شود بنابراین، وجود خاک رس در آن منتفی است. درنتیجه، احتمال دوم به‌نظر صحیح‌تر می‌آید. به‌نظر می‌رسد، اضافه‌کردن گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب به خاکستر به‌دلیل افزایش سرعت گیرش آن و به‌منظور مقاومت بیشتر آهک و تولید کلسیم کربنات بوده است. خاکستر حاوی کربن نیز هست درنتیجه، وجود خاکستر در ملات هم باعث تشکیل کلسیم سیلیکات و هم کلسیم کربنات می‌شود. بنابراین ملات بسیار قوی‌تر و مقاوم‌تر می‌گردد.

ملات استفاده‌شده در عرشه پل ترکیب آهک، خاکستر، خاک و مقدار کمی گچ یا گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است. استفاده از گچ برای تسریع زمان گیرش آن و خاکستر اضافه‌شده برای تولید کلسیم کربنات و کلسیم سیلیکات و افزایش مقاومت ملات پایه آهکی پی بوده است. ملات به‌کاررفته در قسمت‌های مختلف پایه‌های پل، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است.

آنالیزهای آزمایشگاهی ملات بازتولیدشده گچ نیم‌پخته، نیم‌کوب با ویژگی‌های گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب اصیل پایه‌های پل مطابقت دارد. آزمایش زمان گیرش نشان داد، ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب ملاتی بسیار زودگیر است و توجه به این نکته هنگام استفاده از آن، بسیار مهم است. نمونه بازتولیدشده ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوبِ ۵۴ روزه با حفظ رطوبت، دارای مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های نگهداری‌شده در محیط خشک بوده است. این آزمایش ثابت کرد که این ملات با حفظ رطوبت، از مقاومت فشاری و کششی بیشتری برخوردار است و درصورت استفاده از این ملات در محیط مرطوب با گذشت زمان، مقاومت فشاری و کششی آن افزایش پیدا می‌کند.

آزمایشات مکانیکی نشان داد، ملات بازتولیدشده مقاومت فشاری و کششی بسیار مناسب و قابل قبولی نسبت به ملات‌های امروزی دارد. به‌دلیل ساخت این ملات از مصالح بومی، ازلحاظ رنگ و جنس با پل هم‌خوانی بسیار دارد و درواقع، از جنس کالبد خود پل شاپوری است. ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب طی گذشت زمان اثبات کرده، می‌تواند بیش از ۱۴۰۰ سال ماندگاری خویش را حفظ کند. بنابراین، باید به هوش و ذکاوت معماران باستانی در استفاده از این ملات احترام گذارد و شایسته است در مرمت و حفظ اصالت پل شاپوری، از ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب استفاده گردد.

پی‌نوشت

۱. شاپورخواست یکی از شهرهای دوره ساسانی بوده است. بقایای این شهر در جنوب شهر خرم‌آباد و نزدیکی پل شاپوری یافت شده است (ایزدپناه، ۱۳۶۳: ۹۸).

2. Ernest Emil Herzfeld

۳. تصاویر پل شکسته و جدول‌های آزمایش ملات‌های پل را نگارندگان طی سال‌های ۱۳۹۱و ۱۳۹۲ تهیه کرده‌اند.

۴. یکی از تکنیک‌های مهم برای آنالیز ساختاری پلیمرهای معدنی و آلی، مواد معدنی، زئولیت‌ها، فازهای سیمان، انواع ترکیبات معدنی مانند سیلیکات‌ها و کاتالیزورهای مختلف است. این دستگاه از قابلیت‌های فراوانی جهت پردازش و مقایسه داده‌ها برخوردار است.

۵. (X Ray Diffraction)، در آزمایشگاه کریستالوگرافی گروه شیمی دانشگاه شهید بهشتی انجام شد. سپس، نگارندگان آن را با نرم‌افزار X'Pert HighScore Plus تحلیل کردند.

۶. این آزمایش، برگرفته از کتاب احمد حامی (۱۳۵۹)، "مصالح ساختمان" است.

۷. جوهر نمک استفاده‌شده با نام تجاری بریج و محتوی کلریدریک اسید بوده است.

۸. (X-ray fluorescence)؛ این روش، طیف‌سنجی فلورسان پرتو ایکس است که رایج‌ترین روش تجزیه برای تعیین شیمی عناصر اصلی و کمیاب نمونه‌های سنگی است. روش مذکور، کارآمد و مفید بوده و می‌تواند بیشتر از ۸۰ عنصر را در گستره‌ای وسیع از حساسیت تجزیه کرده و غلظت‌هایی از % ۱۰۰ تا چند ppm (قسمت در میلیون) را تعیین کند. همچنین این روش، سریع

بوده و تعداد زیادی تجزیه دقیق را در زمانی به نسبت کوتاه انجام می‌دهد. افزون‌بر اینها، به‌عنوان مکمل مطالعات کانی‌شناسی و متالوگرافی کاربرد بسیاری در بررسی‌های باستان‌شناسی و حفاظت از آثار دارد.

۹. این آزمایش، در پژوهشکده نانو دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است.

۱۰. طی آزمایش اندازه‌گیری غلظت نرمال، غلظت نرمال % ۴۴ به‌دست آمد.

منابع و مآخذ

- ایزدپناه، حمید (۱۳۶۳). **آثار باستانی و تاریخی لرستان**. ج اول، چاپ دوم، تهران: آگاه.
- پرویز، احمد (۱۳۸۰). **پل و تحول آن در قلمرو بدربن حسنویه**. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، باستان‌شناسی، تهران: دانشگاه تهران.
- تیتونیکو، جین (۱۳۸۵). **راهنمای آزمایشگاهی برای حفاظتگران بنا**. ترجمه منیژه هادیان دهکردی، چاپ اول، تهران: هادیان.
- حامی، احمد (۱۳۵۹). **مصالح ساختمان**. چاپ سوم، تهران: دانشگاه تهران.
- دورعلی، سودابه (۱۳۷۶). **شناسایی ملات به‌کاررفته در پل‌های دوره ساسانی**. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.
- سورل، چارلز (۱۳۶۰). **کانی‌های جهان**. ترجمه محمود بهزاد، تهران: سازمان محیط زیست.

- Young, M. E. (2001). Using Conductivity for Assessing Chemical Residues in Stone. In: Prikryl, R. & Viles, H. eds. (2002).
- Arkles, B. (1997). Silicon Esters. **Encyclopedia of Chemical Technology,** 4th Edition (22).
- British Lime Association. (2012). Education: Lime Cycle. http://www.britishlime.org/edu_lime01.php (access date: 08.03.12).
- Engel, J. (2006). Saving Stone. **Natural Stone** Specialist May, pp 13-14.
- Fidler, J. (1995). Lime Treatments: Lime Watering and Shelter Coating of Friable .
- Herzfeld , (1929). Bericht uber archaologische Beobachtunjen Im sulichen Kurdistan und in Luristan, dans archaologisch Mitteilungenaus. Iran. Vol I .
- Strachey, S. (2006). Isle Abbots: Lime Technology in the 21st Century. Building
- Kitaigorodskii, A. I. (1952). **X-ray Structure Analysis of Fine-Grained and Amorphous Materials.** Moscow-Leningrad
- http://www.buildingconservation.com/articles/standards/standards.htm [access date 31.5.2011].

Received: 2014/01/26
Accepted: 2015/06/20

A Study of the Ancient Mortars Used in Shapouri Bridge of Khorramabad and the Feasibility of Using them in the Restoration of Bridges through Laboratory Methods

Mohaddeseh Mirderikvandi* Akbar Hajebrahim Zargar Dariush Heidari Bani*****

Abstract

Shapouri Bridge (Tagh-e-Pil-e-Eshkastah) is one of the remnants of Sasanian dynasty which is located in the south of Khorramabad, capital city of Lorestan. The great ancient bridge of Shapouri has undergone many damages due to the passage of time and natural factors so that it has lost its solidarity and integration which makes its restoration inevitable. To choose the appropriate mortar is a significant challenge for the restoration of bridges. Therefore, the main question is to identify the employed mortars in the construction of this bridge and, consequently, to study the feasibility of using the original mortar instead of the modern ones. To do so, first, some mortars of the bridge were removed as samples from different parts such as the foundation, the bridge truss, and the deck. These samples, then, were analyzed using XRD and XRF methods. The results of the analysis indicate that the type of the mortar used in the bridge truss is Gache Nim Pokhte-Nim Kob whereas lime mortar and a compound of lime and ash are used in its foundation and deck overlay respectively. In the next step, the reproduced mortar of Gache Nim Pokhte-Nim Kob was analyzed using XRD analysis and mechanical experiments. The results were then compared with the bridge mortar indicating that Gache Nim Pokhte-Nim Kob is an easily stiffened mortar with suitable compressive and tensional resistance. Once exposed to humidity, the compressive and tensional resistance of the mortar increases. Considering these results and the survival of the mortar upon Shapouri Bridge for more than a thousand and four hundred years, it is recommended to use such mortar in the restoration of Shapouri Bridge.

Keywords: Khorramabad Shapouri Bridge, XRD and XRF analysis, Gache Nim Pokhte-Nim Kob mortar, mechanical experiments

* MA, Shahid Beheshti University, Tehran
** Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran
*** Assistant Professor, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan