

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

محدثه میردیریکوندی\* 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 به طوری که، سازه آن وحدت و یک‌پارچگی خود را از دست 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 مورد استفاده 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 مورد استفاده در پایه‌های پل را ملات گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب، ملات به‌کاررفته در پی پل را ملات آهکی و ملات مورد استفاده 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 در معرض 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.

## مقدمه

تعداد بسیاری از پل‌های تاریخی دوران ساسانی و اوائل اسلامی، در استان لرستان وجود دارند. پل شاپوری با نام محلی شکسته از جمله 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 ساخته شده در لرستان می‌دانند و احتمال می‌دهند با الهام از سبک بنای این پل، پل‌های عظیم دیگری مانند کشکان ساخته شده است (ایزدینا، ۱۳۶۳: ۱۰۶ و ۱۰۷). عده‌ای از باستان‌شناسان، این پل را تنها بازمانده از شهر کهن شاپورخواست می‌دانند. *ارنست هرتسفلد*، سال ۱۹۲۹ میلادی پل را مطالعه کرده و طاق‌های پل را از نوع ایرانی و اوائل اسلامی دانسته و اظهار داشته این بنا به صورت کاملاً واضح و روشنی می‌تواند متعلق به دوره و زمان شهر همجواری [شاپورخواست] باشد (Herzfeld, 1929: 73).

در هر صورت، 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 برجایماند. پل شاپوری در حال حاضر 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، *مامی شوستر* ۳۰ طاق و حمید/ایزدینا 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 ... در حال حاضر این پل را در شرایطی قرار داده که نیاز به مراقبت و مرمت دارد. از این رو، 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 مورد استفاده در مرمت است. ملات به کاررفته باید مقاومت‌های مکانیکی لازم جهت حفظ یک پارچگی پل را داشته باشد از طرفی، نباید اصالت بنا را خدشه‌دار کرده و به مصالح اصیل آن آسیب رساند. گچ نیم‌پخته - نیم کوب از ملات‌های باستانی ایران است که استفاده از آن در بناهایی سنگی مانند قلاع و پل‌ها در گذشته متداول بوده است. این ملات از سنگ گچ پخته شده 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 مورد استفاده در ساخت پل شاپوری

ملات گچ نیم‌پخته - نیم کوب باشد. بنابر این ضرورت‌ها، در این پژوهش، سعی بر آن بوده تا به وسیله آزمایش و آنالیز دستگامی ملات‌های پل، به ماهیت ملات مورد استفاده در ساخت پل شاپوری پی برده و همچنین، به امکان‌سنجی استفاده از آنها در مرمت اقدام شده است.

## پیشینه پژوهش

با وجود پل‌های تاریخی فراوان در استان لرستان، تاکنون پژوهش‌های چندانی در زمینه شناسایی ملات‌های پل‌های تاریخی صورت نگرفته است. اولین و تنها پژوهش انجام شده در این زمینه را *سودابه دورعلی* (۱۳۷۶) با عنوان "شناسایی ملات به کاررفته 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 - نیم کوب در کوره‌های سنتی بازتولید و در مرمت از آنها استفاده می‌شود. از همین رو، در پژوهش حاضر برای نخستین بار ویژگی‌های علمی ملات قسمت‌های مختلف پل شاپوری مورد آنالیزهای XRD و XRF و مطالعات مکانیکی قرار می‌گیرند.

## روش پژوهش

باتوجه به ماهیت موضوع تحقیق، شیوه پژوهش ترکیبی از شیوه‌های کیفی و کمی مبتنی بر روندی تحلیلی است. روش‌های جمع‌آوری اطلاعات به صورت اسنادی و مدارک: بررسی پرونده‌ها و سوابق بایگانی، بررسی اسناد تاریخی، گزارشات مرمت‌ها و تحقیق‌های صورت گرفته 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 انجام شده استنتاج و نتیجه‌گیری می‌گردند.

## معرفی عمومی پل شاپوری

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

کرانه شرقی ۱۱۴ متر و در کرانه غربی ۱۹۸ متر طول دارد (تصویرهای ۳-۱).

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

- برای شناسایی پایه‌ها، شماره‌های ۱ تا ۲۵ و حرف P1 تا P25 به کار 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.

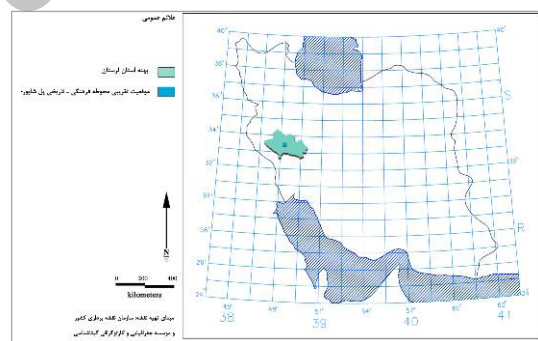
### شناسایی ملات به کاررفته در پی پل شاپوری

- آزمایش ملات پی پل شاپوری به وسیله دستگاه XRD<sup>۱</sup>؛ 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 اولین بار، فرصت آنالیز ملات آن ایجاد شد. قسمتی از ملات پی در پایه شماره ۴، در اثر حفاری بیرون افتاده بود که از این قسمت، ملات جهت آنالیز XRD<sup>۲</sup> برداشت شد (تصویرهای ۷-۵).

با تحلیل نتایج به دست آمده از آنالیز XRD ملات پی، در ترکیبات آن مشاهده شد اصلی‌ترین ماده معدنی به کاررفته 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 استفاده شده 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. باتوجه به اینکه در نتایج آنالیز XRD، آلومینیوم

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 به تدریج، بر اثر وقوع حوادث از تعداد آنها کاسته شده است (پرویز، ۱۳۸۰: ۱۵۵).

از میان پایه‌های موجود، یازده پایه که در نیمه شرقی ساختمان قرار گرفته‌اند، بدون موج‌شکن (آب‌بر) بوده و عموماً به شکل چهارضلعی ساخته شده‌اند. بقیه دارای موج‌شکن دوزنقه‌ای شکل هستند. از فاصله میان پایه‌ها (اندازه دهانه طاق‌ها)، به تدریج به طرف شرق کاسته می‌شود به گونه‌ای 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. در حال حاضر، 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 به طول ۳۱۲ متر است. بستر کبیر در



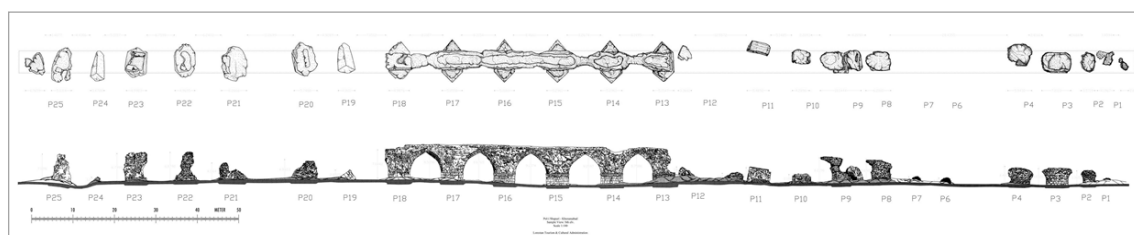
تصویر ۱. جانمایی پل شاپوری بر نقشه ایران (نگارندگان)<sup>۲</sup>



تصویر ۳. پل شاپوری در سال ۱۳۹۲ (نگارندگان)



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



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

اکسید دیده نمی‌شود، وجود خاک رس در آن منتفی است. در نتیجه، احتمال دوم به‌نظر صحیح‌تر می‌آید. به‌نظر می‌رسد، اضافه کردن گچ نیم‌پخته - نیم کوب 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. در نتیجه، 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

از آنجایی که پل شاپوری روی رودخانه خرم‌آباد ساخته شده، این رودخانه در گذشته 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 به‌طوری که امروزه پی پل در معرض فاضلاب‌های شهر و مواد مضر موجود در آن قرار دارد. براین اساس، 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. با اینکه آزمایش اخیر آب در دسترس نیست اما، می‌توان حدس زد با توسعه روزافزون ساختمان‌سازی مقدار آلودگی و اسیدی شدن آب

نیز روندی روبه افزایش دارد. بنابراین، می‌تواند پی و پایه پل را تحت تأثیر مستقیم و مداوم قرار دهد. به‌این دلیل، 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.<sup>۶</sup>

هنگامی که چند قطره کلریدریک اسید (HCl) یا جوهر نمک نرمال<sup>۷</sup> 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 در برابر کلریدریک اسید آسیب‌پذیر است (حامی، ۱۳۵۹: ۹۳). به‌منظور بررسی علمی تأثیر مخرب کلریدریک اسید و قرارگیری طولانی دائمی پی پل در برابر 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).

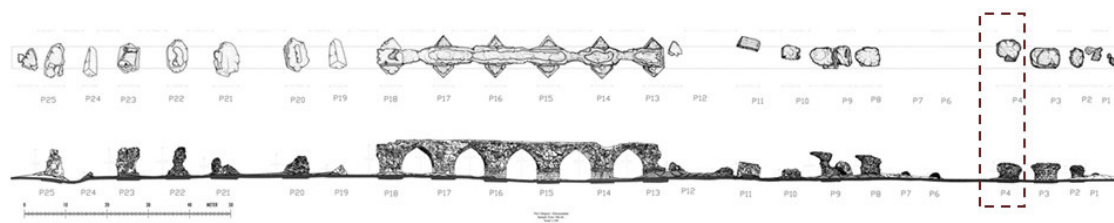
با بررسی آنالیز XRD ملات پس از قرارگیری در معرض کلریدریک اسید مشاهده شد این ملات، به‌شدت در برابر کلریدریک اسید و در نتیجه آلودگی آب رودخانه، آسیب‌پذیر است (تصویر ۱۰). همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، از ۷۷٪ کلسیم کربنات موجود در ملات تنها ۲۶٪ باقی مانده است و مابقی آن، تبدیل به کلسیم کلرید شده است.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



تصویر ۶. موقعیت برداشت ملات پی (نگارندگان)



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



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

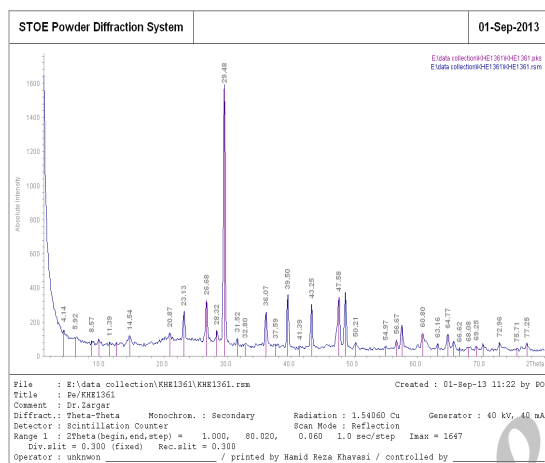
پیشگیری‌های لازم جهت حفظ ساختار پل شاپوری به عمل آید.

### شناسایی ملات عرشه پل شاپوری

#### - مشاهدات اولیه و نمونه برداری

انتخاب نمونه جهت برداشت از پل شاپوری با توجه به ابعاد و وسعت آن، مستلزم دقت بالایی است. بسیاری از قسمت‌های بنا طی سالیان طولانی و سیلاب‌های سهمگین آسیب‌های فراوانی دیده‌اند به طوری که، بسیاری از پایه‌ها به گونه‌ای جدی دچار آسیب شده و قسمت‌هایی از کالبد خویش را از دست

این اسید مقاومت کند. با مقایسه نمودار آنالیز XRD ملات قبل و بعد از قرارگیری در معرض اسید، به وضوح از بین رفتن اکثر مواد معدنی در ترکیبات ملات مشاهده می‌گردد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت هر مقدار 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. در نتیجه، قبل از وقوع این رخداد باید جدول ۱. نتیجه آنالیز XRD، ملات پی پل شاپوری



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

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Calcium Carbonate	CaCO <sub>3</sub>	49
2	Gypsum	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	10
3	Calcium silicate	CaO.SiO <sub>2</sub>	22
4	Quartz	SiO <sub>2</sub>	12
5	Carbon	C	7

(نگارندگان)

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در آب رودخانه خرم‌آباد

ردیف	شماره نمونه	میزان سولفات آب (ppm)	میزان کلر آب (ppm)	اسیدیته آب (pH)	قلیائیت فنل فتالین بر حسب کربنات‌ها (mg/l)	قلیائیت متیل اورانژ بر حسب 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)



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

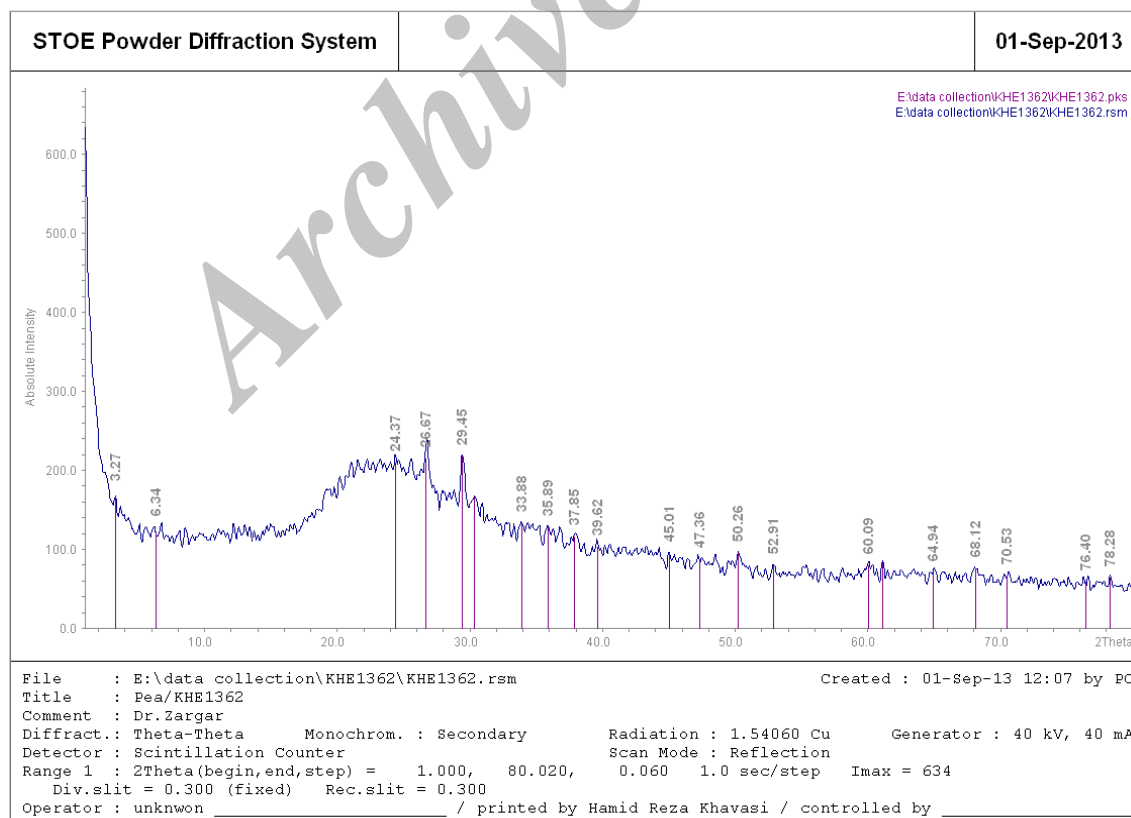
جدول ۳. نتایج آنالیز XRD، ملات پی بعد از قرارگیری در اسید

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Calcium Carbonate	CaCO <sub>3</sub>	26
2	Quartz	SiO <sub>2</sub>	45
3	Calcium chloride	CaCl <sub>2</sub>	29

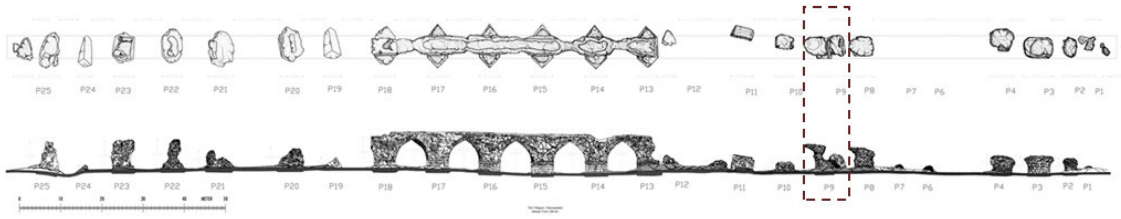
(نگارندگان)

خاکستر به کاررفته 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<sup>A</sup> XRF گرفته شد. در این آزمایش، ترکیبات ملات برآثر درصد حضورشان بدین ترتیب، مشاهده شدند: آهک CaO بیشترین درصد وزنی را دارد و بعد از آن سیلیس SiO<sub>2</sub>. سیلیس می‌تواند نشان‌دهنده ماسه یا خاکستر در ملات باشد. نظریه 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<sub>3</sub> نشان‌دهنده استفاده از مقدار کمی گچ یا گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب در این ملات باشد. اضافه کردن 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 مورد استفاده ترکیب آهک، خاکستر، خاک و مقدار کمی گچ یا گچ نیم‌پخته- نیم‌کوب است. استفاده از گچ جهت تسریع زمان گیرش آن و خاکستر اضافه‌شده به منظور تولید کلسیم کربنات و افزایش مقاومت ملات پایه آهکی پی، بوده است.

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 به کار رفته است. آلومینیوم کلسیم سیلیکات نشانگر وجود مقداری کمی خاک در این ملات است. کربن هم از



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



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

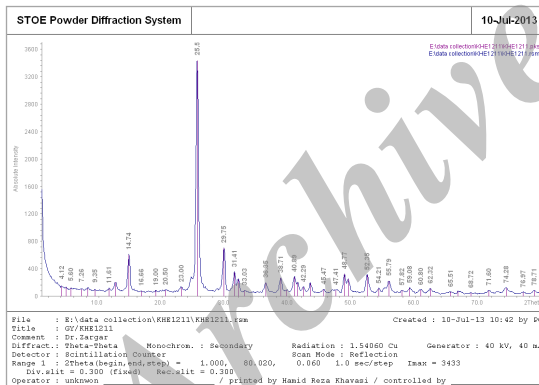


تصویر ۱۳. نمای پایه شماره ۹ (نگارندگان)



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

جدول ۴. نتایج آنالیز XRD براساس درصد کمی ترکیبات معدنی



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

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Calcium Carbonate	CaCO <sub>3</sub>	۷۵
2	Carbon	C	۱۴
3	Quartz	SiO <sub>2</sub>	۱۲
4	Aluminum Calcium Silicon	Al <sub>7</sub> Ca <sub>3</sub> Si <sub>7</sub>	۹

(نگارندگان)

جدول ۵. نتایج حاصل از آنالیز دستگاهی XRF<sup>۹</sup>، نمونه ملات عرشه پل شاپوری

ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
Na <sub>2</sub> O	۰,۶	MgO	۱,۱۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱,۷۴
SiO <sub>2</sub>	۲۴,۴۶	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰,۳۷	SO <sub>3</sub>	۱,۵۲
Cl	۰,۰۷	K <sub>2</sub> O	۰,۳۵	CaO	۵۴,۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱,۷۹	TiO <sub>2</sub>	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 در حین 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. از این رو، این نمونه انتخاب شد (تصویر ۱۵).

با تحلیل آنالیز XRD مشاهده شد، در ترکیبات ملات پایه پل، ۴۳٪ ژئیس (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

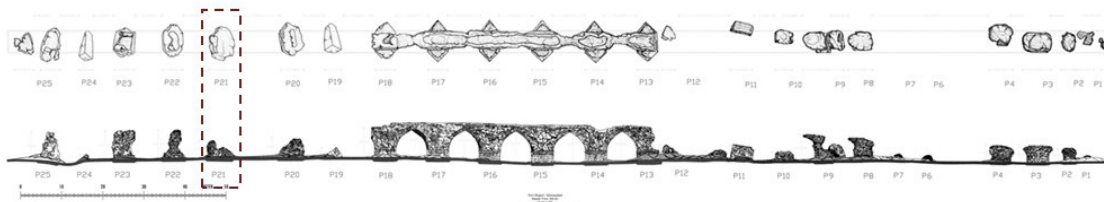
برای تکمیل آنالیز XRD از نمونه برداشت‌شده پایه شماره ۲۱، آنالیز XRF گرفته شد تا نوع ملات به‌صورت علمی و با اطمینان مشخص شود. نتیجه حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه پایه پل به‌وسیله دستگاه XRF براساس درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل‌دهنده نشان داد، بیشترین درصد حضور در ترکیبات ساخت این ملات مربوط به  $SO_3$  (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). با توجه به 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 به‌عمل آمده دارای جنس همگنی نیست زیرا نزدیک ۲۰٪ آن، گچ پخته ساختمانی با نیم مولکول آب و مانده آن، سوخته یا نیخته است (حامی، ۱۳۵۹: ۸۱).

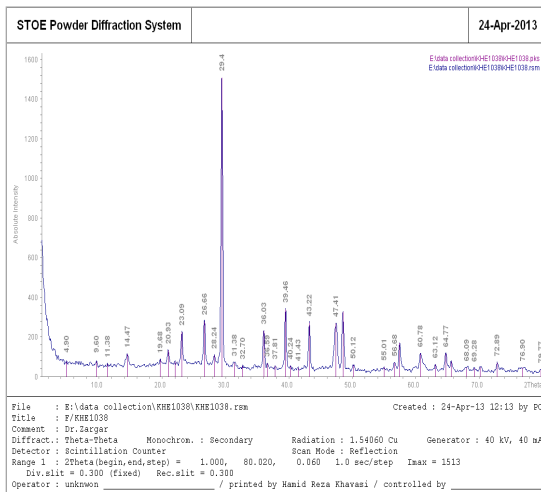


تصویر ۱۶. محل برداشت نمونه شماره یک از عرشه پایه شماره ۹ (نگارندگان)



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





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

جدول ۶. نتایج آنالیز XRD بر اساس درصد کمی ترکیبات معدنی

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Gypsum	CaSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	43
2	Calcium Carbonate	CaCO <sub>3</sub>	30
3	Carbon	C	14
5	Aluminum Oxid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14

(نگارندگان)

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

ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
Na <sub>2</sub> O	۵,۹	MgO	۱,۲۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۲
SiO <sub>2</sub>	۱,۴۵	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰,۰۳	SO <sub>3</sub>	۳۷,۶
Cl	۰,۱۱	K <sub>2</sub> O	۰,۱۸	CaO	۳۱,۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳	La&Lu	<۱	L.O.I	۲۱,۵

(نگارندگان)

تند گذشته، در گرمای ۱۴۰۰ درجه و فشار یک‌بار، با گرفتن ۱۱۶۸ cal/g گرما، تمام کلسیم سولفات به CaO و SO<sub>3</sub> تجزیه و گاز سولفور خود به SO<sub>2</sub> و O تجزیه و بخار می‌شود (همان). در این هنگام، فقط آهک زنده یا CaO باقی می‌ماند. میزان آهک تولیدشده در این کوره‌ها به دلیل غیرقابل تنظیم بودن حرارت، متفاوت است (حامی، ۱۳۵۹:۸۱).

در کوره‌های سنتی از سنگ گچ، انواع گچ‌ها و آهک به دست می‌آید و از همه این ترکیبات، ملات گچ نیم‌پخته - نیم کوب تولید می‌شود. سنگ گچ‌هایی که در بالاترین قسمت کوره قرار دارند، خام می‌ماند و پخته نمی‌شوند. آنها را خرد کرده و به عنوان مواد پرکننده در این ملات استفاده می‌کردند. در این نمونه مشاهده شد، از سنگ رس خردشده نیز در ترکیبات استفاده کرده‌اند. خاکستر چوب‌هایی که به عنوان 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.

### مراحل پخت سنگ گچ

بخار کردن 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 به تدریج آب متبلور آن از دست می‌رود. به گونه‌ای که سنگ گچ در دمای پخت حدود ۱۸۰ درجه سلسیوس به CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O و در دمای حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس به CaSO<sub>4</sub>.0,3H<sub>2</sub>O تبدیل می‌شود.

سنگ گچ در دمای حدود ۳۰۰ سلسیوس به CaSO<sub>4</sub> تبدیل می‌شود. همچنین، در دمای بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس ضمن از دست دادن 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<sub>4</sub> کم‌کم تجزیه می‌گردد. در گرمای ۱۲۳۰ درجه، تجزیه گچ خشک

### آنالیز گچ نیم‌پخته - نیم کوب باز تولید شده

پایگاه پل‌های تاریخی استان لرستان در سال ۱۳۸۸، براساس این احتمال که ملات پل‌های تاریخی استان، ملات گچ نیم‌پخته - نیم کوب است، به باز تولید ملات گچ نیم‌پخته - نیم کوب به روش سنتی اقدام نمود. همچنین، از این ملات در مرمت پل‌های تاریخی، مخصوصاً پل کشکان استفاده کرد. برای شناخت ویژگی‌های ملات باز تولید شده از نمونه‌ای که مدیر پایگاه پل‌های تاریخی در اختیار نگارندگان قرار داد، آزمایش شیمیایی و مکانیکی به عمل آمد. نتایج آن در ادامه 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 تولید شده و موجود در کوره سنتی است تا بتوان مقدار خاکستر لازم را مشخص کرد. ضمن اینکه، پرداختن به این موضوع خود نیازمند آزمایش و پژوهش‌های دیگری است.

### آنالیز XRD گچ نیم کوب - نیم پخته باز تولید شده

گچ نیم کوب - نیم پخته باز تولید شده، به صورت پودر و قبل از ترکیب با آب مورد آزمایش XRD قرار گرفته است. با تحلیل آنالیز مشاهده شد به دلیل حرارت 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، به دلیل متفاوت بودن حرارت و نوع سنگ گچ استفاده شده، متفاوت خواهد بود. پس از بررسی نتایج آنالیز ملات باز تولید شده گچ نیم‌پخته - نیم کوب، مشاهده شد: ۵۸٪ انیدریت، ۱۴٪ ژپس، ۸٪ کلسیم اکسید، ۱۰٪ کربن و ۱۵٪ آلومینیوم اکسید وجود دارد.

جدول ۸. نتایج آنالیز XRD براساس درصد کمی ترکیبات ملات باز تولید شده گچ نیم پخته - نیم کوب

No.	Compound Name	Chemical Formula	Semi Quant[%]
1	Gypsum	CaSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	14
2	Calcium Oxide	CaO	8
3	Carbon	C	10
4	Anhydrite	CaSO <sub>4</sub>	58
5	Aluminum Oxid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15

(نگارندگان)

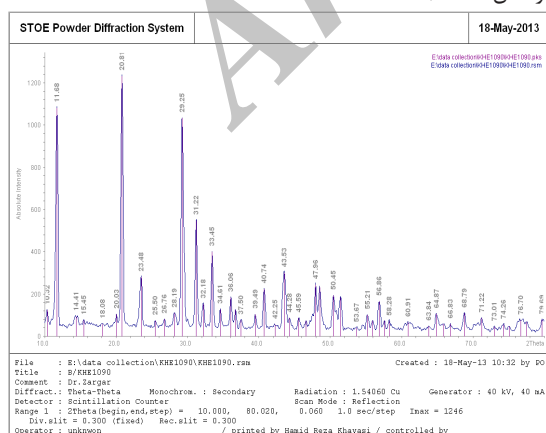
وجود آلومینیوم اکسید در این ترکیب، به علت اضافه شدن سنگ رس پودر شده حین ساخت ملات است. با این تصور که ملات قوی‌تر می‌شود ولیکن به علت اینکه ملات، ترکیبی از گچ و آهک است وجود خاک رس احتمال به وجود آمدن اثرات مضر را در دراز مدت می‌دهد. از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت، ملات تولید شده حاوی ترکیبات مورد 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 - نیم کوب

برای مشاهده خصوصیات گیرشی (تندگیا یا کندگیر بودن) ملات باز تولید شده گچ نیم‌پخته - نیم کوب، آزمایش زمان گیرش، از آن به عمل آمد. زمان گیرش گچ نیم‌پخته - نیم کوب 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 نیم کوب باز تولید شده (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 مورد آزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. این نمونه‌ها از پایه شماره ۲۰ و ۲۱ برداشت شده‌اند. به دلیل آسیب‌رسیدن به پل، امکان برداشت در عمق کالبد پل وجود نداشت. نمونه‌های نوع دوم، نمونه‌های بازتولیدشده ملات گچ نیم‌پخته - نیم‌کوب بود.

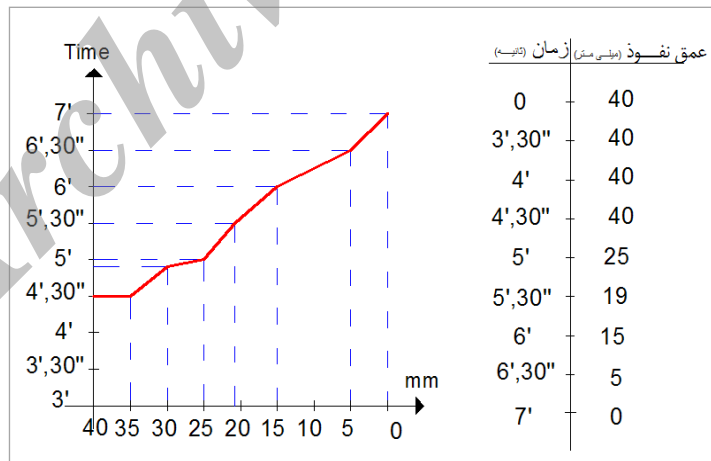
### آزمایش مقاومت فشاری ملات برداشت‌شده

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

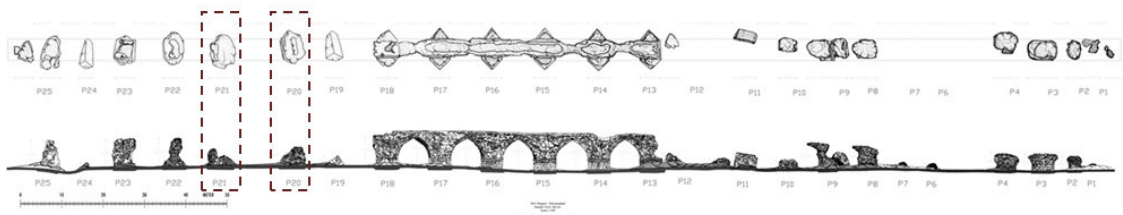
### آزمایش مقاومت فشاری ملات بازتولیدشده

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 (نگارنگان)

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

#### آزمایش مقاومت کششی ملات بازتولیدشده

برای انجام آزمایش مقاومت کششی، از ملات بازتولیدشده گچ نیم‌پخته- نیم کوب، ۶ نمونه در قالب پایونی ساخته شد. ۳ عدد از این نمونه‌ها با حفظ رطوبت و ۳ عدد در محیط خشک به مدت 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- نیم کوب می‌گردد.



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



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



تصویر ۲۶. نمونه‌ها در حال آزمایش مقاومت کششی (نگارندگان)



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

## نتیجه گیری

پس از بررسی ها 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 به کاررفته 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 نیم پخته- نیم کوب وجود دارد. با توجه به اینکه در نتایج آنالیز XRD، آلومینیوم اکسید دیده نمی شود بنابراین، وجود خاک رس در آن منتفی است. در نتیجه، احتمال دوم به نظر صحیح تر می آید. به نظر می رسد، اضافه کردن گچ نیم پخته- نیم کوب به خاکستر به دلیل افزایش سرعت گیرش آن و به منظور مقاومت بیشتر آهک و تولید کلسیم کربنات بوده است. خاکستر حاوی کربن نیز هست در نتیجه، وجود خاکستر در ملات هم باعث تشکیل کلسیم سیلیکات و هم کلسیم کربنات می شود. بنابراین ملات بسیار قوی تر و مقاوم تر می گردد.

ملات استفاده شده در عرشه پل ترکیب آهک، خاکستر، خاک و مقدار کمی گچ یا گچ نیم پخته- نیم کوب است. استفاده از گچ برای تسریع زمان گیرش آن و خاکستر اضافه شده برای تولید کلسیم کربنات و کلسیم سیلیکات و افزایش مقاومت ملات پایه آهکی پی بوده است. ملات به کاررفته در قسمت های مختلف پایه های پل، ملات گچ نیم پخته- نیم کوب است.

آنالیزهای آزمایشگاهی ملات بازتولید شده گچ نیم پخته، نیم کوب با ویژگی های گچ نیم پخته- نیم کوب اصیل پایه های پل مطابقت دارد. آزمایش زمان گیرش نشان داد، ملات گچ نیم پخته- نیم کوب ملاتی بسیار زود گیر است و توجه به این نکته هنگام استفاده از آن، بسیار مهم است. نمونه بازتولید شده ملات گچ نیم پخته- نیم کوب ۵۴ روزه با حفظ رطوبت، دارای مقاومت بالاتری نسبت به نمونه های نگهداری شده در محیط خشک بوده است. این آزمایش ثابت کرد که این ملات با حفظ رطوبت، از مقاومت فشاری و کششی بیشتری برخوردار است و در صورت استفاده از این ملات در محیط مرطوب با گذشت زمان، مقاومت فشاری و کششی آن افزایش پیدا می کند.

آزمایشات مکانیکی نشان داد، ملات بازتولید شده مقاومت فشاری و کششی بسیار مناسب و قابل قبولی نسبت به ملات های امروزی دارد. به دلیل ساخت این ملات از مصالح بومی، از لحاظ رنگ و جنس با پل هم خوانی بسیار دارد و در واقع، از جنس کالبد خود پل شاپوری است. ملات گچ نیم پخته- نیم کوب طی گذشت زمان اثبات کرده، می تواند 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 نیم پخته- نیم کوب استفاده گردد.

## پی نوشت

۱. شاپورخواست یکی از شهرهای دوره ساسانی بوده است. بقایای این شهر در جنوب شهر خرم آباد و نزدیکی پل شاپوری یافت شده است (ایزدپناه، ۱۳۶۳: ۹۸).
2. Ernest Emil Herzfeld
۳. تصاویر پل شکسته و جدول های آزمایش ملات های پل را نگارندگان طی سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ تهیه کرده اند.
۴. یکی از تکنیک های مهم برای آنالیز ساختاری پلیمرهای معدنی و آلی، مواد معدنی، ژئولیت ها، فازهای سیمان، انواع ترکیبات معدنی مانند سیلیکات ها و کاتالیزورهای مختلف است. این دستگاه از قابلیت های فراوانی جهت پردازش و مقایسه داده ها برخوردار است.
۵. (X Ray Diffraction)، در آزمایشگاه کریستالوگرافی گروه شیمی دانشگاه شهید بهشتی انجام شد. سپس، نگارندگان آن را با نرم افزار X'Pert HighScore Plus تحلیل کردند.
۶. این آزمایش، برگرفته از کتاب احمد حامی (۱۳۵۹)، "مصالح ساختمان" است.
۷. جوهر نمک استفاده شده با نام تجاری بریج و محتوی کلریدریک اسید بوده است.
۸. (X-ray fluorescence)؛ این روش، طیفسنجی فلورسان پرتو ایکس است که رایج ترین روش تجزیه برای تعیین شیمی عناصر اصلی و کمیاب نمونه های سنگی است. روش مذکور، کارآمد و مفید بوده و می تواند بیشتر از ۸۰ عنصر را در گستره ای وسیع از حساسیت تجزیه کرده و غلظت هایی 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. افزون بر 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 بدر بن 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](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 Beobachtungen Im sulichen Kurdistan und in Luristan, dans archaologisch Mitteilungen aus. 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