امکان‌سنجی بهره‌برداری از فرآورده‌های بوم‌آورد در بهینه‌سازی مصالح مرمتی؛ نمونهٔ مطالعه‌شده: زیگورات چغازنبیل[1]

افشین ابراهیمی
عضو هیئت علمی پژوهشگاه میراث فرهنگی
ebrahimi.resercher@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۲۵

چکیده

زیگورات چغازنبیل در ۲۵ کیلومتری جنوب غربی سایت باستانی هفت‌تپهٔ خوزستان، حجم خشتی عظیم و کوه‌پیکری با جدارهٔ آجری بوده است تا بنا را در برابر باران‌های سیل‌آسای منطقه محافظت کند. در حال حاضر، بخش‌های زیادی از این جدارهٔ آجری از بین رفته و حجم خشتی آن در معرض عوامل مخرب محیطی به‌ویژه باران، رطوبت محیطی زیاد، و تغییرات دمایی مکرر قرار گرفته است. تدابیر حفاظتی معمول، به تنهایی پاسخگوی نیازهای متعارف بنا و در امان نگه داشتن آن از گزند عوامل اقلیمی و محیطی نیست و ضرورت توسل به ایده‌های جدید حفاظتی کاملاً احساس می‌شود. در حقیقت، پرسش اصلی این است که آیا می‌توان با بهره‌گیری از منابع طبیعی موجود، به ارائهٔ راهکاری منطقی در حفاظت پایدار از این اثر تاریخی ارزشمند دست یازید. پر واضح است که هرچه ایده‌های حفاظتی جدید، سازگاری بیش‌تری با اثر و محیط پیرامون آن داشته باشند، نتیجهٔ کار نیز مطلوب‌تر خواهد بود. سابقهٔ اتخاذ چنین تدابیری به قرن‌ها پیش بازمی‌گردد و شاید پیشینه‌ای همپای ساخت ابنیهٔ خشتی داشته باشد. ایلامیان برای حفاظت سازه‌های خشتی، جداره‌های محافظ آجری را به کار می‌گرفته اند، تدبیری که در شرایط فعلی کارساز نیست و علی‌رغم تلاش‌های صورت‌گرفته، توفیقی به دنبال نداشته است. زیرا آجرهای تولیدشده برای این منظور، جدا از مشکلات عدیده در بحث تولید انبوه، از لحاظ رنگ و بافت و سایر ویژگی‌های بصری، همخوانی مناسبی با نمونه‌های تاریخی ندارند، تفاوت‌های نامأنوس و آزاردهنده‌ای را نشان داده اند. اندیشه‌های حفاظتی معماران ایلامی صرفاً کالبد بنا را در بر نمی‌گیرد، بلکه ایضاً، بهره‌برداری از فرآورده‌های بوم‌آورد برای بهینه‌سازی مواد و مصالح در فرهنگ معماری ایشان تبلور یافته است. نمونهٔ بارز آن، استفاده از پوستهٔ برنج در ترکیب خشت‌های سازنده بنا است. چنین بینشی سرمشق تفکرات حفاظتی ما نیز قرار گرفته است. این پژوهش به دنبال آن است تا با شیوه و روشی توصیفی/ تجربی و رویکردی کاربردی با تمسک به ابزار تحقیق کتابخانه‌ای، آزمایشگاهی و میدانی، از فرآورده‌های قابل بهره‌برداری موجود در منطقه برای حفاظت بهتر از آثار معماری ایلامیان در برابر عوامل جوی استفاده کند. جدا از پوستهٔ برنج و برخی افزودنی‌های دیگر که ایلامیان مبتکرانه آن‌ها را به کار برده اند، فرآورده‌های دیگری نیز در منطقه وجود دارند (باگاس، ملاس، و لجن آهک) که اغلب، ضایعات کارخانه‌های وابسته به صنایع قند و شکر هستند. مطالعات و تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی به تهیهٔ ماده‌ای از این ضایعات منجر شده که علاوه بر توفیق در امر بهینه‌سازی مصالح مرمتی و حفاظت بهتر از میراث، از جهات دیگری نیز راهگشا می‌نمایند و آن، بازیافت منابع آلوده‌کنندهٔ محیط زیست و همچنین کمک به پاکسازی مسیرهای گردشگری از وجود ضایعات کارخانه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: باگاس، ملاس، لجن آهک، خشت، زیگورات، چغازنبیل، بهینه‌سازی، حفاظت.

مقدمه

چغازنبیل، محوطه‌ای است تاریخی که در چهل کیلومتری جنوب شرقی شهر باستانی شوش، در ٤٨ درجه و ٣٠ دقیقهٔ طول جغرافیایی و ٣٢ درجهٔ عرض جغرافیایی قرار گرفته و ارتفاع بلندترین نقطه آن از سطح دریا حدود ٩٠ متر است (گیرشمن، ١٣٧٣: ٩). این مجموعهٔ شهری آیینی که در حال حاضر بزرگ‌ترین اثر معماری شناخته شده از تمدن ایلام میانه است، در قرن ١٣ قبل از میلاد به دستور پادشاه مقتدر این سلسله، «اونتاش نپیریشا» (Untash Napirisha) ساخته می‌شود و برای خدایان بزرگ ایلامی، «نپیریشا» و «اینشوشیناک» وقف می‌شود (همان: ٩). باستان‌شناسان برای این مجموعهٔ تاریخی، عملکرد دفاعی قائل نشده اند (همان: ١٠). در ساخت این اثر، امتیازات مساعد محیطی کاملاً به خدمت گرفته شده اند. مکان‌یابی، شکل معماری، و انتخاب مصالح مورد مصرف، دقیقاً بر اساس شناخت عناصر طبیعی منطقه صورت گرفته است. در سواحل رودی که مقدار آب آن نامحدود نشان می‌دهد، چوب برای سوزاندن (به‌ویژه کوره‌های آجرپزی) و مصارف مختلف و خاک مناسب برای تولید خشت و آجر و ملات در اختیار بوده است. کما این‌که امروزه نیز چنین نشان می‌دهد (همان: ٢١). برای حفاظت هستهٔ خشتی بناها از گزند رطوبت و باران‌های سیل‌آسای منطقه، از پوشش آجری بر بدنه‌های خشتی استفاده شده است. به‌ویژه در زیگورات که ساختار خشتی آن با یک جدارهٔ آجری به ضخامت تقریبی دو متر پوشیده بوده (همان: ٢١) و با تکنیک هشت و گیر به هم متصل می‌شدند. زیگورات، بنای مطبقی بوده در پنج طبقه، با ارتفاعی بالغ بر ٥٠ متر و پلانی مربع‌شکل که طول هر ضلع آن بیش از صد متر است (همان: ١٤). به استثنای طبقهٔ پنجم که بر روی طبقهٔ چهارم ساخته شده، سایر طبقات مستقیماً و مستقلاً از روی زمین برپا شده اند (همان: ١٤). در مرمت‌های ضمن حفاری و پس از آن، جدارهٔ محافظ آجری زیگورات به سبب کمبود مصالح قابل مصرف، بسیار نازک‌تر از اندازهٔ واقعی آن اجرا شده است و به کم‌تر از نیم متر تقلیل یافته است (تصویر ١). این مسئله از یک سو و فقدان پوشش حفاظتی مناسب بر سطح قلهٔ زیگورات باعث شده تا خشت‌های سازندهٔ بنا تحت تأثیر عوامل جوی و بارندگی‌های سیل‌آسای منطقه به شدت دچار فرسایش شوند. شواهدی در دست است که نشان می‌دهد معماران ایلامی از ابتدا با مشکل فرسایش سطوح خشتی مواجه بوده اند و با ارائهٔ راهکارهایی، سعی در تعدیل فرسایش کرده اند. از جملهٔ این راهکارها می‌توان به استفاده از مواد افزودنی (خرده‌آجر، پودر آجر، و سبوس برنج) در ترکیب خشت‌های زیگورات اشاره کرد. مشخصاً، بهره‌گیری از مواد افزودنی با هدف بهینه‌سازی و استحکام‌بخشی مصالح گلین، پدیده جدیدی نیست و از پیشینه‌ای کهن برخوردار است. از قرن‌ها پیش که اساس زندگی بشر بر محور طبیعت استوار بوده است، هر آنچه را که در پیرامون‌شان می‌یافتند و مناسب با خواسته‌شان می‌دیدند، برای پایداری بیش‌تر مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌دادند. موادی همچون؛ سفیدهٔ تخم‌مرغ، زردهٔ تخم‌مرغ، صمغ حیوانی، صمغ گیاهی به‌ویژه رُزین، وینسول، لیگنین، جو، آبجو، جو خیسانده، موم‌ها، روغن‌ها، چربی‌ها، خون، کره، سرشیر، کازئین، پنیر، پنبه، شیر دلمه‌شده، پوست درختان (به‌ویژه نارون)، ژلاتین، صمغ عربی، انجیر تازه، میوه تازه، سبزیجات، مو و پشم حیوانات، شیر، مالت، کراتین، پیه خوک، پیه گاو و گوسفند، ملاس، پوستهٔ برنج، زعفران، شلاک، شکر، تانین، ادرار، شراب، خمیر گیاه تلخه، کلسترول، صمغ ماستیک، تالک، ساکارین، گلوکز، دانه‌های کنف، کلاژن، براکس، دوغاب پِهِن، الیاف محکم درختی، رس، ماسه، آهک، شن‌ریزه، خاک آجر، پودر سفال، لوخ، لویی، شیرهٔ انگور، کاه، خاکستر، قیر معدنی، شیرهٔ گیاه کاکتوس، برگ درخت موز و... با هدف

بهینه‌سازی مصالح گلین، به کار گرفته شده اند و برخی هنوز هم رواج دارند. در حقیقت آنچه باعث شده موضوع بهینه‌سازی مصالح گلین، حداقل در ایران پدیده‌ای بدیع جلوه کند، این است که به‌ندرت با نگاه علمی بدان نگریسته شده است. با توجه به پیشینهٔ کاربرد مواد افزودنی، می‌توان این فرضیه را مطرح کرد که آیا امکان انجام تجربه-ای مشابه با استفاده از فرآورده‌های بوم‌آورد موجود در منطقهٔ چغازنبیل برای حفاظت مطلوب از ساختار خشتی زیگورات وجود دارد؟ برای این منظور لازم است ابتدا مشکلات و معضلات حفاظتی محوطه، بررسی و خشت-های سازنده بنا به دقت مطالعه شوند تا نقاط ضعف و قوت آن‌ها مشخص شود و در مرحلهٔ بعد با توجه به ضعف یا ضعف‌های مشاهده‌شده و نیز نحوهٔ اثرگذاری عوامل محیطی، نسبت به انتخاب یا تهیهٔ مادهٔ افزودنی مناسب برای رفع معایب اقدام کرد تا مصالح حفاظتی و مرمتی تهیه‌شده، به نحو مطلوب از عهدهٔ حفاظت بقایای معماری خشتی زیگورات برآیند (جدول ۱).

جدول ۱. تنوع مصالح به‌کاررفته در محوطهٔ تاریخی چغازنبیل.

مصالح	معرفی
خشت	بیش‌ترین حجم مصالح مصرفی به خشت اختصاص دارد. ابعاد اغلب آن‌ها ۱۰×۴۰×۴۰ سانتی‌متر است. در ساخت برخی از آن‌ها خرده‌آجر و یا پودر آجر استفاده شده است. از قطعات شکسته و دورریز خشت برای پر کردن برخی از فضاها استفاده شده است.
آجر	برخلاف خشت‌ها ابعاد و اشکال متنوعی دارند مثل مستطیل، مربع، مثلث، و ذوزنقه. اغلب آجرها هم‌اندازه با خشت‌ها و یا نصف آن (۱۰×۲۰×۴۰ سانتی‌متر) هستند. آجرها سه نوع ساده و لعابدار و کتیبه‌دار هستند. از قطعات شکسته‌شده آجر نیز برای پرکردن برخی از فضاها استفاده شده است.
ملات	در بین خشت‌ها و آجرها از ملات گل استفاده شده است. در نواحی مرطوب و در مسیر حرکت آب (ناودان‌ها) از قیر و گچ به مثابه ملات بین آجرها استفاده شده است.
اندود	بر اساس گزارش‌های حفاری، از اندود کاهگل، اندود گچ، اندود ساروج، و اندودی مرکب از گل اخرا با پودر صدف (؟) در قسمت‌های مختلف مجموعه استفاده شده است. امروزه تنها می‌توان آثاری از اندود گچ را مشاهده کرد.
سنگ	از سنگ برای پوشش برخی از پلکان‌ها و ساخت پاشنه و کلون درها استفاده شده است.
چوب	از الوارهای چوب برای ساخت درها و از تنه‌های قیراندودشدهٔ درختان برای اتصال بهتر نمای آجری زیگورات با بدنهٔ خشتی آن استفاده شده است.
شیشه	از میله‌های شیشه‌ای برای تزیین درهای چوبی استفاده شده است.
سفال	از تنبوشه‌های سفالی برای هدایت آب باران و از گل‌میخ‌های سفالی به مثابه عنصری تزیینی استفاده شده است.

ریخت‌شناسی خشت‌های زیگورات

هدف از انجام این مطالعه، شناخت و درک بهتر معماری خشتی مجموعه به منظور مستندسازی انواع خشت‌های به-کاررفته در بنا است تا بستر مناسبی برای مطالعات فن-شناسی و آسیب‌شناسی فراهم شود. در این مطالعه، به سوابق باستان‌شناسی، گزارش مرمت‌های انجام‌گرفته، اسناد و مدارک مربوط به حفاظت‌های ضمن حفاری و ویژگی‌های ماکروسکوپیک مصالح، اعم از رنگ، بافت، ابعاد، مواد افزودنی، و نوع ملات‌های به‌کار رفته با خشت‌ها رجوع شده است (جدول ۲).

تصویر ۱. زیگورات چغازنبیل و بقایای معماری معابد پیرامونی (مأخذ: نگارنده).

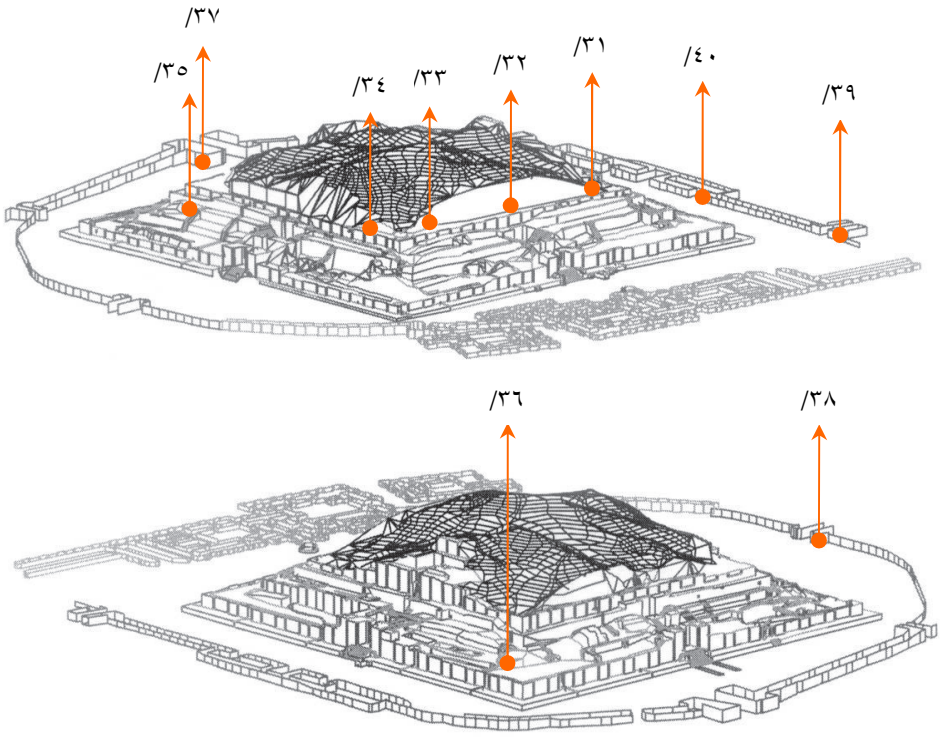
جدول ۲. ریخت‌شناسی خشت‌های چغازنبیل.

مشخصات	خشت‌های تاریخی	خشت‌های مرمتی
ابعاد (cm)	(۱۰×۴۱×۴۱)، (۱۰×۴۰×۴۰)، (۸/۵×۳۹×۳۹)، (۸×۳۸×۳۸)، (۸×۳۳×۳۳)	(۱۰×۴۰×۴۰)، (۱۰×۲۰×۴۰)، (۸×۳۹×۳۹)، (۸×۱۸×۲۵)، (۷×۲۱×۲۱)
بافت	● همگن و یکدست بدون مواد افزودنی (با آثار استفاده از کاه). ● ناهمگن و همراه با خرده‌آجر.	● استفاده از کاه با مقدار زیاد در ساخت خشت. ● استفاده از خرده سنگ و خرده سفال در ساخت خشت.
رنگ	● متمایل به قرمز. ● زرد مایل به قهوه‌ای. ● قهوه‌ای روشن با ته‌رنگ سبز. ● قهوه‌ای روشن با ته رنگ خاکستری.	● زرد مایل به قهوه‌ای روشن
فرم	● توده‌های فرسایش‌یافته با فرم معماری نامشخص و بعضاً همراه با قطعات آجر. ● نمای هشت و گیر خشتی و آجری به صورت ردیف‌های یک در میان.	● سطوح فرسایش‌یافته و از هم پاشیده شده. ● نمای خشتی و آجری به صورت ردیف‌های یک در میان. ● نمای خشتی و آجری مرکب از سه، چهار یا پنج ردیف خشت در بین یک ردیف آجر تاریخی.
کاربرد	● ساخت هستهٔ بنا در قالب سازه‌های تخت و بعضاً قوس‌دار.	● پر کردن حفره‌ها و شیارها. ● احداث مسیرهای اضطراری دفع آب. ● احداث دیوارهٔ محافظ در مقابل هستهٔ تاریخی رو به فرسایش. ● وضوح‌سازی پلان‌های معماری. ● تعدیل شیب‌های تند که بر اثر فرسایش به وجود آمده اند.

فن‌شناسی خشت‌های زیگورات

برای بررسی و شناخت خصوصیات فنی خشت‌های تاریخی، در اختیار داشتن اطلاعات پایه که تعریفی جامع از ساختمان فیزیکی ـ شیمیایی آن‌ها ارائه دهند، اساسی است. پیچیدگی رفتاری چنین مصالحی نیاز به انجام آزمایش‌های متنوع را اجتناب‌ناپذیر کرده است. انجام برخی از این آزمایش‌ها، تکنیک‌های ابزاری ویژه و امکاناتی خاص را می‌طلبد تا نمونه‌ها خصلت‌های ذاتی خود را کامل‌تر بروز دهند. برای مثال، ویژگی‌هایی مانند تعیین تخلخل ساختمانی، با همان شیوه‌ای که برای آجر و انواع مختلف ملات عمل می‌شود در مورد خشت، به سبب ضعف مفرط این مصالح در تماس با آب قابل اجرا نبوده و نیازمند روش‌های اصولی دیگری است (ام. جی، ۱۳٦۰: ٤۱). به همین علت در کنار اطلاعات به دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌گرفته روی نمونه خشت‌های تاریخی در آزمایشگاه‌های پروژه حفاظت و مرمت چغازنبیل، پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی و نیز سازمان زمین‌شناسی کشور، به نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته در دانشگاه سایتامای ژاپن نیز رجوع شده است، به ویژه آنکه در این آزمایش‌ها بر شناخت خصوصیات هیدرولوژیکی نمونه‌ها تأکید شده است. برای تعیین هرچه دقیق‌تر خصلت‌های فیزیکی ـ شیمیایی خشت‌های تاریخی در شرایطی که تعداد نمونه‌ها اندک نشان می‌دهد، باید ترتیبی منطقی برای اجرای علمی آزمایش‌ها در نظر گرفته شود و اولویت‌بندی خاصی رعایت شود. برای مثال نمونه‌ای که روی آن آزمایش استقامت و تعیین ثبات فیزیکی انجام گرفته، پس از خرد شدن نمی‌تواند برای آزمون نفوذپذیری استفاده شود. همچنین بسیار دشوار است که آزمایش نفوذپذیری را پیش از آزمون‌های استحکامی انجام داد (نفیسی، ۱۳٥٤: ۳۳). در آزمایش نفوذپذیری، نمونه باید در تماس با آب قرار گیرد که در این حالت، پایداری آن بر اثر انحلال و یا سیال شدن بعضی از مواد در آب تغییر می‌کند و حتی دگرگونی‌هایی در جریان خشک شدن نمونه پدید می‌آید. در مورد خشت‌های فرسایش‌یافته، به نظر می‌رسد جمع‌آوری اطلاعات پیرامون ویژگی‌های هیدرولوژیکی، بسیار مهم‌تر از مقایسه داده‌ها در خصوص وضعیت استحکامی آن‌ها باشد. چرا که ساختار آن‌ها پیش‌تر بر اثر نفوذ آب باران تا حدود زیادی تضعیف شده است (جی. آر، ۱۳۵۸: ۱۵). بنابراین باید برای جمع‌آوری اطلاعات کامل‌تر، در انتخاب محل‌های نمونه‌برداری دقت لازم به عمل آید تا خشت‌هایی با حداقل فرسایش برای آزمایش‌های مورد نیاز در اختیار قرار گیرند. به همین منوال، در محوطهٔ چغازنبیل از ۱۰ محل اقدام به نمونه‌برداری شد که موقعیت آن‌ها روی نقشه مشخص شده است (شکل ۱). این نمونه‌ها از «۱/۳۱ـ ۷۸ چ . ز» تا «۱/٤۰ـ ۷۸ چ . ز» نامگذاری شده اند. اهم آزمایش‌های انجام گرفته بر نمونه‌ها عبارت اند از: شناسایی ترکیبات شیمیایی، شناسایی کانی‌های رسی، اندازه‌گیری حدود آتربرگ، اندازه‌گیری مقاومت فشاری، توزیع دانه‌بندی و توزیع اجزای ساختاری (تصویر ۲)(شکل ۱).

تصویر ۲. تهیهٔ نمونه‌های مطالعاتی خشت از قطعهٔ اصلی (مأخذ: نگارنده).



شکل ۱ : موقعیت محلهای نمونه برداری خشت (ماخذ: مرکز اسناد پایگاه چغازنبیل)

نتایج آزمایشگاهی و بررسی‌های میدانی، موارد زیر را در بارهٔ ساختار خشت‌ها آشکار نموده اند:

خشت‌های استفاده‌شده در بنا از تنوع رنگی قابل ملاحظه‌ای برخوردار اند. الگوهای ترک‌خوردگی و فرسایش نیز در آن‌ها متنوع نشان می‌دهد. در توزیع دانه-بندی خشت‌ها همچنین تفاوت‌های آشکاری به چشم می-خورد. این گستردگی می‌تواند به نوعی نشان‌دهندهٔ بهره‌گیری از خاک‌های مختلف از لحاظ جنس و ساختار و یا پراکندگی محل تأمین خاک برای ساخت خشت‌ها باشد. حجم زیادی از مصالح به‌کاررفته در بنا را خشت‌هایی تشکیل داده اند که در ساخت آن‌ها از خرده‌آجر استفاده شده است. ابتکار ساخت چنین خشت‌هایی می‌تواند چند دلیل داشته باشد. نخست، اصلاح رفتار خشک شدن و کنترل ترک‌خوردگی خشت‌ها. دوم، سرعت بخشیدن به فرآیند خشک شدن. سوم، کاستن از مقدار کاه برای تهیهٔ خشت‌ها. چهارم، صرفه‌جوئی قابل ملاحظه در مصرف خاک و استفاده از ضایعات تولیدات آجری و پنجم، کیفیت پذیرش، انتقال و توزیع نیرو در این‌گونه خشت‌ها که ظاهراً آن‌ها را برای مقابله با نشست‌های احتمالی در حجم‌های وسیع، مناسب ساخته است. برای بهبود رفتار خشک شدن خشت‌ها از الیاف گیاهی (مثل کاه گندم و سبوس برنج) و ماسه که در مجاورت با رطوبت دستخوش تغییرات ابعادی قابل ملاحظه نمی‌شوند، استفاده شده است. گرچه تعیین حجم نسبی الیاف به‌کاررفته در خشت‌ها به علت پوسیدگی آن‌ها مقدور نیست (این امر می‌تواند ناشی از تولید اسید لاکتیک در ساختمان خشت باشد)، اما در مورد ماسه امکان‌پذیر است. میزان مرغوبیت خشت‌ها بسته به محل مورد استفاده در بنا تفاوتی آشکار و به همان اندازه هدفدار را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد نابرابری ارزش‌های کاربردی واحدهای تشکیل‌دهنده مجموعه، باعث شده است از چند نمونه خشت با کیفیت‌های متفاوت استفاده شود. در ساختمان خشت‌ها و به‌ویژه بافت داخلی آن‌ها

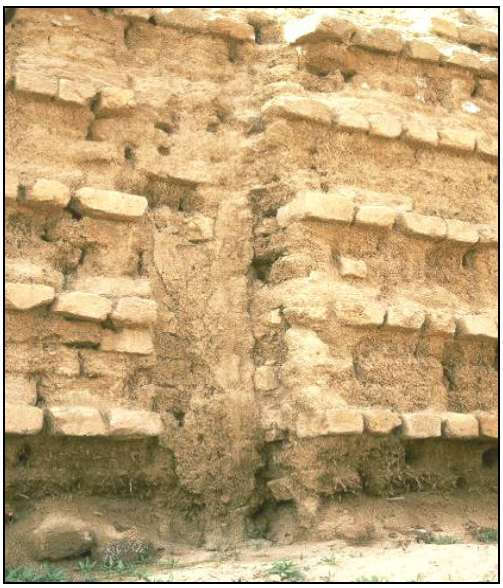
تخلخل زیادی دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از ضخامت زیاد و تراکم کم (که ناشی از سرعت عمل در تهیهٔ حجم انبوهی خشت برای ساخت هرچه سریع‌تر بنا بوده) باشد. هرچند باید پذیرفت که پوسیدگی الیاف گیاهی به‌کاررفته در خشت‌ها و همچنین اضمحلال برخی از اجزای ساختمانی آن‌ها بر اثر انحلال، در بالا بردن نسبت تخلخل مؤثر واقع شده است. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری مقاومت فشاری خشت‌ها با ساختمان دانه‌بندی آن‌ها نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که توزیع دانه‌بندی متناسب‌تر است، مقاومت فشاری نیز افزایش یافته است. نتایج مربوط به اندازه‌گیری حدود آتربرگ (حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری) برای خشت‌ها نشان می‌دهد که در همهٔ نمونه‌ها درصد ذرات رس (کوچک‌تر از ۲ میکرون) بسیار اندک است و در عوض، مقدار زیادی ماسه وجود دارد. پتانسیل تورم نیز دستِ کم در خشت‌های نمونه‌برداری‌شده ناچیز است. اجزای اصلی خشت‌ها را کلسیت و کوارتز تشکیل داده و کانی‌های هالیت و ژیپس به وفور در نمونه‌ها یافت می‌شوند. کانی‌های رسی مرغوب و فلدسپات به میزان ناچیزی در نمونه‌ها وجود دارند. نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که برای ساخت خشت‌ها هم از خاک‌های رودخانه‌ای و هم از خاک‌های سازندی (که عمل‌آوری آن‌ها به خوبی انجام نگرفته) استفاده شده است.

آسیب‌شناسی خشت‌های زیگورات

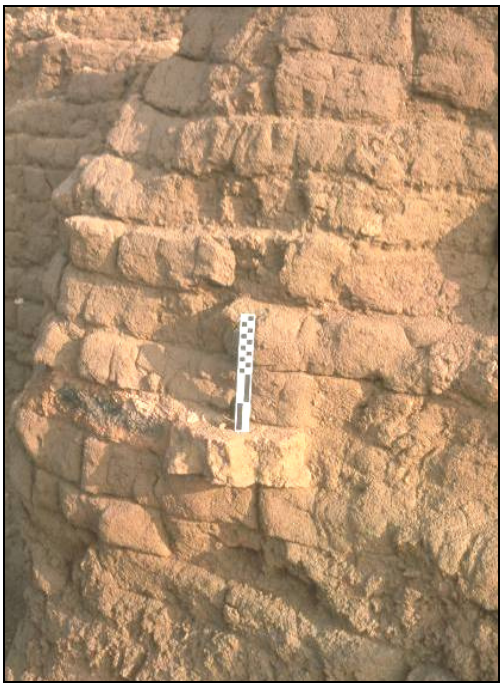
بناهای خشتی همچون چغازنبیل همان‌قدر که ساده و بی‌تکلف برپا شده اند، به همان نسبت ممکن است آسان و پرشتاب متحمل آسیب‌های جبران‌ناپذیر شوند. در مورد آثار و ابنیه خشتی، کم‌تر پدیدهٔ فرساینده‌ای را می‌توان یافت که پس از تأثیرگذاری در بخش معینی از کالبد اثر، حوزهٔ عملکردش محدود بماند و به مرور به نواحی همجوار رسوخ نکند (فلامکی، ۱۳۵۵، هنر و معماری: ۳۹). در کنار عوامل مخرب و آسیب‌رسانی همچون باد، باران، رطوبت، دما، و پدیده‌های ارگانیک، لازم است به آن دسته عوامل فرساینده نیز توجه شود که ماهیت فرهنگی و اجتماعی دارند و مستقیماً از رفتار، سلیقه و تفکری ریشه می‌گیرند که هنوز جایگاه آن‌ها مشخص نشده، نارسا و ناسنجیده شمرده می‌شوند (فلامکی، ۱۳٦۷: ٤٤). در این راستا باید توجه داشت که انجام تعمیرات دوره‌ای و فصلی در آثار و ابنیهٔ خشتی امری است که با خود بنا زاده می‌شود و اصولاً در تفکر معماری شکل‌دهنده به این آثار، به عنوان بخشی تفکیک‌ناپذیر از ساختمان بنا به شمار می‌رود. از این رو سهل‌انگاری در انجام آن دسته اقدامات حفاظتی که می‌باید مرتب و به موقع در بناهای خشتی به اجرا درآید، روند پایداری ساختمان را متوقف کرده و زمینه را برای فعالیت پدیده‌های فرساینده هموار می‌سازد (فلامکی، ۱۳۵۵: ۱۸). در محوطهٔ چغازنبیل مهم‌ترین آسیب‌های وارده به خشت‌های زیگورات، بسته به شدت و وسعت و به ترتیب اهمیت عبارت اند از: نخست، آب‌شستگی (ناشی از نیروی مکانیکی باران و سیلابی بودن بارش که عدم رسیدگی دائم و فرم معماری برجای مانده از بنا، تأثیر آن را فزونی بخشیده است). دوم، پوسته شدن و پودره شدن (ناشی از پدیدهٔ مکث رطوبت و مرطوب ماندن ساختمان خشت برای مدت زمان طولانی. در این شکل از آسیب، تأثیر عوامل محیطی در کنار ویژگی‌های فنی مصالح کاملاً محرز است). سوم، ترک‌خوردگی (ناشی از تکرار چرخه‌های متناوب‌تر و خشک شدن و نوسان زیاد دما و رطوبت). چهارم، از هم پاشیدگی (ناشی از شکل خاص مکش مویینگی و تخلخل در ساختمان خشت‌ها توأم با ضربات مکانیکی باران در پای دیواره‌ها). پنجم، شوره‌زنی (ناشی از وفور نمک‌های محلول در ساختار خشت‌ها و قرار گرفتن مصالح در محیط مرطوب).

در این میان پدیده آب‌شستگی به سبب فرم کلی برجای مانده از بنا و همه‌جانبه بودن بارندگی، در تمام خشت‌های نمایان، مشهود است. گرچه در ارتفاعات به خاطر حضور مداوم‌تر باد، آب‌شستگی شدت بیش‌تری از خود نشان می‌دهد. پدیدهٔ ترک‌خورگی خشت‌ها اغلب در جبهه‌های جنوب شرقی و جنوب غربی بنا که تبخیر از سرعت زیاد و شدت نامتعادل برخوردار است، دیده می‌شود. برخلاف پدیدهٔ ترک‌خوردگی، پوسته شدن و پودره شدن خشت‌ها، بیش‌تر مختص به جبهه‌های شمال شرقی و شمال غربی بناست که از تابش پرتو خورشید کم‌تر بهره‌مند اند و رطوبت برای مدت زمان طولانی‌تری در ساختار خشت‌ها باقی می‌ماند. در گوشهٔ شمالی زیگورات و مشرف به ضلع شمال شرقی، یعنی جایی که از حداقل تابش پرتو خورشید و حداکثر رطوبت برخوردار است، بیش‌ترین وسعت شوره‌زدگی خشت‌ها را می‌توان مشاهده کرد. البته تأثیر مخرب شوره‌ها بر ساختمان خشت چندان به خاطر فشارهای مکانیکی ناشی از تغییر حجم آن‌ها در جریان پدیدهٔ تبلور نیست زیرا خاصیت انعطاف‌پذیری و شکل تخلخل در بافت خشت‌ها آن‌چنان است که می‌تواند فشارهای ناشی از تورم را در خود مستهلک کند، بی آنکه آسیبی جدی متوجه ساختار مصالح شود. پدیدهٔ از هم پاشیدگی خشت‌ها که عموماً در نواحی سایه‌گیر بنا و در قسمت‌های پایینی دیوارها رخ داده است، در نتیجهٔ نوع عملکرد لوله‌های مویین، ساختمان آن‌ها، و شکل تخلخل در این مصالح به وقوع می‌پیوندد (ویسه، ۱۳۷۳: ٦٦). پیامد آن نیز، ازدحام و مکث رطوبت در ساختار مصالح است که به کاهش قابل توجه استحکام خشت‌های پای دیوارها منجر شده است. رویش گیاهان بر سطح و در مجاورت مصالح، هم تخریب مکانیکی و هم تخریب شیمیایی را در پی خواهد داشت. وقوع پدیدهٔ تبادل یونی بین ریشه‌ها و بافت معدنی خشت‌ها (ساختمان کلوئیدی رس‌ها) و نیز ترشح محلول‌های اسیدی، به خروج برخی از یون‌ها از شبکهٔ آلومینوسیلیکاتی مصالح منجر شده و ضعف ساختمانی آن‌ها را شدت می‌بخشد (ماجدی اردکانی، ۱۳۷۸: ٤٨). حجم قابل توجهی از عملیات‌های مرمتی بنا با استفاده از ملات‌های آهکی انجام شده است. آهک با جذب رطوبت محیط، روند فرسایش خشت‌ها را شدت می‌بخشد. پدیدهٔ شوره‌زنی در خشت‌هایی که با ملات‌های آهکی و گچی به کار رفته اند، شدت بیش‌تری را نشان می‌دهد که می‌تواند به خاطر انتقال یون‌ها در محیط مرطوب از ساختار ملات به بافت خشت باشد (خدابنده، ۱۳۷۰: ٦٦). در مورد خشت‌های نمونه‌برداری‌شده حتی با استناد به نتایج ***XRD***، به دو دلیل نمی‌توان بحث تورم را به عنوان عامل عمدهٔ آسیب‌رسان مطرح کرد: نخست، کمیت ناچیز کانی‌هایی با پتانسیل تورم زیاد، و دوم، درصد قابل توجه کلسیت در نمونه‌ها که با محبوس کردن رطوبت در منافذ، تماس آن را با کانی‌های رسی متورم‌شونده به حداقل رسانده و در نقش یک عامل بازدارنده تورم عمل می‌کند (تصویر ۳ تا ۵).

تصویر ۳. پدیدهٔ مکث رطوبت در خشت‌های تاریخی (مأخذ: نگارنده).



تصویر ٤. فرسایش خشت‌های مرمتی (مأخذ: نگارنده).



تصویر ٥. فرسایش خشت‌های تاریخی (مأخذ: نگارنده).

مطالعهٔ فرآورده‌های قابل بهره‌برداری بوم‌آورد برای تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح گلین

در ناحیه‌ای که مراکز کهن ایلامی، شوش، هفت‌تپه و چغازنبیل از سه طرف آن را احاطه کرده اند، بزرگ‌ترین قطب صنعت نیشکر کشور شکل گرفته است. به هر سو می‌نگریم، مزارع انبوه نیشکر را می‌بینیم که شهد آن‌ها حلاوت زندگی مردم این دیار است و برکت وجودشان، نبض حیات‌بخش اقتصاد منطقه. با یک چشم تاریخ غبارگرفته را نظاره‌گر ایم و با چشم دیگر، روند ناگزیر صنعتی شدن را که نیاز گریزناپذیر زندگی انسان امروزی است. به موازات تپه‌های تاریخی، کارخانه‌ها شکل گرفته اند و هم وسعت با محوطه‌های باستانی، زمین‌های مستعد کشاورزی دامن گسترده اند. از دور دست چیزی جز دود به هوا خواسته کارخانجات و تصویری از زندگی گذشته در شمایل تپه‌های تاریخی که در حلقه‌ای از مزارع نیشکر گرفتار آمده اند به چشم نمی‌آید. با رسیدن فصل برداشت، برگ‌های نیشکر سوزانده می‌شوند تا تیغ‌زنی ساقه‌ها آسان‌تر انجام گیرد. ساقه‌های عریان و دودزده روانهٔ کارخانه می‌شوند تا پس از شستشو، شهد آن‌ها استحصال گردد و به مصرف قند و شکر برسد. تفاله گیاه (باگاس) نیز که همه‌ساله صدها تُن از آن تولید می‌شود به کارخانه‌های همجوار فرستاده می‌شود تا از آن‌ها نئوپان، کاغذ، دستمال کاغذی و خوراک دام تهیه شود. البته از فعالیت کارخانه‌های موجود، محصولات جانبی و ضایعاتی دیگری نیز به دست می‌آید که «ملاس» و «لجن آهک» عمده‌ترین آن‌ها است. ملاس که نوعی فرآورده آلدئیدی شکر است در حالت طبیعی، مایعی نسبتاً چسبناک به رنگ قهوه‌ای سوخته است که پس از خشک شدن در آفتاب به توده‌های سخت، شکننده و سیاه‌رنگ بدل می‌شود. این محصول جانبی، در حوضچه‌های بسیار وسیع با گنجایش هزاران لیتر ذخیره می‌شود و بخش عمدهٔ آن در تثبیت جاده‌های شنی حد فاصل مزارع نیشکر به مصرف می‌رسد تا عبور و مرور وسائل نقلیه کشاورزی آسان‌تر انجام شود. البته نوع مرغوب ملاس با رنگ قهوه‌ای مایل به زرد برای مصارف مختلف به خارج از کشور صادر می‌شود.

لجن آهک نیز که هر ساله ده‌ها تن از آن به دست

می‌آید، مخلوط فشرده‌شده‌ای از آهک کربناتی همراه با ناخالصی‌های رنگی و غیر رنگی موجود در قند و شکر و کاغذ است. این محصول، ته‌مانده همان شیرهٔ آهکی است که در کارخانه‌ها از آن برای تلخیص و سفیدگری دیگر فرآورده‌ها استفاده می‌کنند و آنچه باقی می‌ماند در دشت وسیعی، بی مصرف رها می‌شود. بنابراین همان‌گونه که مشخص است، باگاس و ملاس و لجن آهک، سه فرآوردهٔ جانبی صنایع وابسته به نیشکر هستند که با توجه به پیشینهٔ مطالعات، امکان بهره‌برداری از آن‌ها در راستای تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح گلین وجود دارد، گرچه ماهیت موضوع، به لحاظ برخورداری از جایگاهی ویژه در زمینهٔ پاکسازی محیط زیست از ضایعات صنعتی نیز قابل ارزش‌گذاری و توجه خواهد بود. بی گمان، مطالعه تجربه‌های مشابه پیرامون موضوعات مربوط به انتخاب و شکل بهره‌برداری از منابع به‌ویژه ضایعات صنعتی و کشاورزی حاصل از فعالیت کارخانجات، با هدف به‌کارگیری در امر تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح مرمتی، نقشی بسیار اساسی و تعیین‌کننده در شکل‌دهی به این ساختار پژوهشی داشت (تصویر ٦ تا ٨).

تصویر ٦. ساقه‌های نیشکر در فصل برداشت که تفالهٔ آن‌ها باگاس نامیده می‌شود (مأخذ: نگارنده).

تصویر ٧. ملاس، یکی از ضایعات صنایع قند و شکر هفت تپه (مأخذ: نگارنده).

تصویر ٨. لجن آهک، یکی از ضایعات صنایع قند و شکر هفت‌تپه (مأخذ: نگارنده).

آماده‌سازی مواد اولیه برای استحکام‌بخشی

بهره‌برداری از ضایعات و محصولات جانبی صنایع کشاورزی با هدف ساخت فرآورده‌های جدید و قابل مصرف در امر تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح ساختمانی، سال‌هاست با علاقه‌مندی بسیار توسط برخی از پژوهشگران مشتاق به بازیافت دورریزهای صنعتی و با نیت کمک به پاکسازی محیط زیست و جلوگیری از هدر رفتن سرمایه‌های ملی دنبال می‌شود. پژوهش‌های برخی محققان، حاکی از آن است که از مخلوط کردن و پختن بعضی زائده‌های گیاهی با ضایعاتی که پایهٔ آهکی دارند، می‌توان

فرآورده جدیدی تهیه کرد کـه عملکـرد مـؤثـری در بهبـود رفتـار مصـالح خواهـد داشـت (رمضـانیانپور، ١٣٧٤: ١١). بدیهی است که خاکستر گیاهی در ایـن مـاده ماننـد نـوعی پوزولان عمل می‌کند و طبیعتاً هـر چقـدر درصـد سـیلیس فعال موجـود در آن بـیش‌تـر باشـد از کـارایی بهتـری نیـز برخوردار خواهـد بـود (همـان: ١١). در اسـتاندارد ***ASTM*** شمارهٔ ***C-618***، پوزولان‌ها چنین تعریف شده انـد: مـوادی سیلیسی یا سیلیسی ـ آلـومینی غیـر بلـوری و فعـال کـه در حضـور رطوبـت بـا هیدروکسـید کلسـیم واکـنش داده و ترکیبـاتی تولیـد مـی‌کننـد کـه از نـوعی خاصـیت سـیمانی برخوردار اند (همان: ١٣). بـه ایـن ترتیـب، دسـتاوردهای علمی حاصل از مطالعه تجربه‌های مشابه، ما را بر آن داشت تا با اسـتفاده از ضـایعات موجـود در منطقـه و بـر اسـاس دستورالعمل زیر به تهیهٔ مادهٔ مورد نظر اقدام کنیم:

١. تأمین مواد اولیه شامل تفاله‌های باگاس و ضایعات لجن آهکی، به ترتیب از محل کارخانـهٔ نیشـکر هفـت‌تپـه و محل تخلیهٔ زباله‌های کارخانه‌های منطقه در فواصل ٣٠ و ١٥ کیلومتری از محوطهٔ تاریخی چغازنبیل.

٢. شستشـوی تفالـه‌هـای باگـاس بـا آب و سـرند کـردن ضایعات لجن آهکی برای جدا کردن ناخالصی‌ها تا حد ممکن.

٣. خشک کردن تفاله‌های باگاس و ضایعات لجـن آهکـی، ابتدا در برابر آفتاب و هوای آزاد و سپس در گرم‌خانـه به مدت ٢٤ ساعت در دمای تقریبی ١١٠ درجه سانتی-گراد (این کار به خاطر جدا شدن آب فیزیکی نمونه‌هـا و رسیدن به وزن ثابتی برای محاسبهٔ دقیق نسـبت‌هـای اختلاط صورت می‌گیرد).

٤. آسیاب کردن تفاله‌های باگاس تا اندازه‌ای که همهٔ آن‌هـا از الک شمارهٔ١٠ (با منافذ ٢ میلی‌متری) عبور کنند.

٥. مخلوط کردن تفاله‌های آسیاب‌شده باگاس بـا ضـایعات لجن آهکی در نسبت وزنی مشخص بسته بـه عملکـرد مورد انتظار.

٦. افزودن مقدار کمی آب به مخلوط و ساخت بریکـت از آن‌ها به قطر ١٠ سانتی‌متر.

٧. خشک کردن کامل نمونه‌های تهیه‌شده در برابر آفتاب.

٨. پخت نمونه‌ها در کورهٔ آزمایشگاهی (تعیین دما و زمـان پخت بهینه، الزامی است).

٩. سرد کردن ملایم نمونه‌های پخته‌شده.

١٠. آسیاب کردن کامل نمونه‌ها تا اندازه‌ای که حد نرمی آن به حداکثر مقدار ممکن برسد (میـزان نرمـی یـا سـطح مخصوص با استفاده از دسـتگاه ***Blaine*** انـدازه‌گیـری می‌شود).

١١. نگهداری ماده به‌دست‌آمده در محیط خشـک تـا زمـان استفاده.

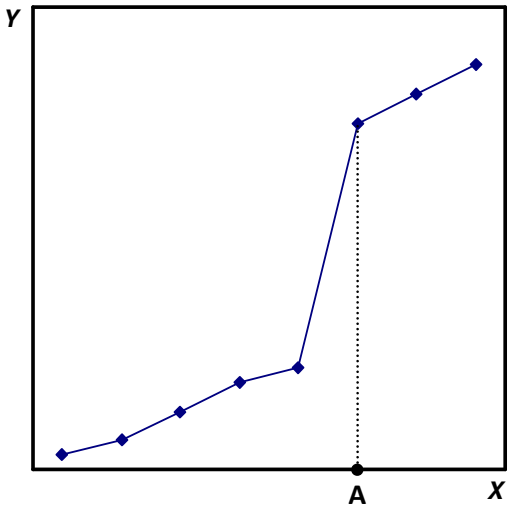
در مورد استفاده از ملاس، دیگر محصول جـانبی صـنایع وابسته به نیشکر، فرآیند آماده‌سازی فقط بـه تعیـین غلظـت قابل مصرف آن خلاصه می‌شود. بنابراین زمانی کـه مـلاس در حالت جامد و خشک وجود داشته باشد، ابتدا باید پـیش از مصرف، از راه جوشاندن در آب به حالت مایع آن رسـید و سپس عمل صاف کردن محلول را انجام داد. البته پیشنهاد می‌شود تا جایی که امکان دارد از ملاس بـه شـکل طبیعـی (مایع) استفاده شود تا جوشانده توده‌هـای خشـک‌شـدهٔ آن، زیرا در این حالت از عملکرد بهتری برای اسـتحکام‌بخشـی مصالح برخوردار است. با این وجود آنچه در بـه کـارگیری ملاس حائز اهمیت است این است کـه در کـدام مرحلـه از ساخت مصالح و با چه غلظتی از آن استفاده شـود. ایـن دو پارامتر از آنجا که مستقیماً بر رنگ، میزان مقاومت، و حجـم مصرف تأثیر می‌گذارند، بسیار قابـل توجـه اند(تصـویر ٩و ١٠).

تصویر ۹. ساخت بریکت از باگاس و لجن آهک (مأخذ: نگارنده).

تصویر ۱۰. تودهٔ جامد ملاس و نمونهٔ خشت‌های تثبیت‌شده با آن (مأخذ: نگارنده).

تعیین حد بهینه مصرف مواد استحکام‌بخش

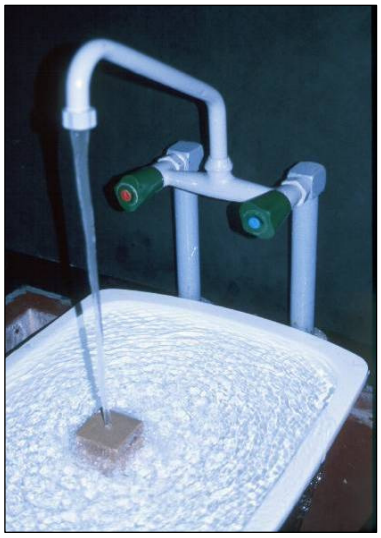
آنچه معرف حد بهینه مصرف مادهٔ تثبیت‌کننده برای تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح گلین است، میزان توقع و انتظار ما از عملکرد تثبیت در وضعیت خشک و خیس با در نظر گرفتن شرایط محیطی حاکم بر بنا خواهد بود. نظر به وسعت محوطهٔ تاریخی و گستردگی اقدامات حفاظتی و مرمتی، دست‌یابی به اقتصادی‌ترین حد مصرف مواد استحکام‌بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی‌های مقدماتی بر روی نمونه‌های ساخته‌شده در مقیاس آزمایشگاهی نشان دادند که می‌توان اولین جهش قابل ملاحظه در رسم نموداری آزمون‌های کنترل کیفیتِ انجام‌گرفته روی نمونه‌ها را به عنوان شاخصی برای گزینشِ درصد مصرف مناسبِ مواد تثبیت‌کننده در نظر گرفت. نتایج اولیه در پی انجام آزمون‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی، حکایت از آن داشتند که استفاده از ۷ درصد وزنی مادهٔ تثبیت‌کننده باگاس و ۱۰ درصد حجمی ملاس برای افزایش مقاومت نمونه‌ها، کفایت می‌کند. در مورد استفاده از ملاس و مادهٔ تثبیت‌کنندهٔ تهیه‌شده از باگاس و لجن آهک، ذکر این نکته لازم است که هر یک قابلیت‌های خاص و توانایی‌های محدود و مشخصی برای تحکیم خشت و اندود کاهگل دارند و به ترتیب، عامل بهبود رفتار مصالح در وضعیت خشک و خیس هستند (گرچه ملاس تا حدودی مقاومت خیس مصالح را نیز بهبود می‌بخشد). گذشته از این، آزمایش نشان داده است که بسته به نوع دانه‌بندی خاک، دامنهٔ کارایی مواد تثبیت‌کننده نیز تغییر خواهد کرد. اما از آنجا که در شرایط متعارف، از خاک‌های رسی ـ ماسه‌ای برای تهیهٔ خشت و اندود کاهگل استفاده می‌شود، بنابراین بهترین نتیجهٔ ممکن زمانی به دست می‌آید که مواد تثبیت‌کنندهٔ مورد نظر، همراه یکدیگر به کار گرفته شوند (شکل ۲).



شکل ۲. نمودار فرضی از تعیین حد بهینه اقتصادی با توجه به اولین جهش قابل ملاحظه در رسم نموداری داده‌ها (مأخذ: نگارنده).

بعد از مطالعهٔ نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده خشت در شرایط آزمایشگاهی و بررسی عملکرد مواد استحکام‌بخش در جریان آزمون‌های کنترل کیفیت، ضرورت داشت قبل از اقدام به تولید انبوه مصالح، نمونه‌ها در شرایط میدانی امتحان شوند و تأثیرپذیری آن‌ها از محیط طبیعی پیرامون نیز بررسی شود. پس از تهیهٔ نمونه‌های مطالعاتی در اندازهٔ واقعی و سپری شدن دورهٔ عمل‌آوری بین ۲ تا ۳ هفته (با به تأخیر انداختن سرعت خشک شدن مصالح و فرصت دادن به مواد تثبیت‌کننده برای اثربخشی)، آزمون‌های کنترل کیفیت شامل: بررسی وضعیت ترک‌خوردگی، آزمون مقاومت فشاری، آزمون مقاومت خمشی، آزمون مقاومت سایشی، آزمون مقاومت ضربه‌پذیری، آزمون سرعت جذب آب، آزمون غوطه‌وری، آزمون آب‌فشانی، آزمون شوره‌زنی، و مقاومت بیولوژیکی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. تفسیر نموداری نتایج، حاکی از آن بود که نمونه‌های تثبیت‌شده نسبت به نمونه‌های تثبیت‌نشده در وضعیت پایدارتری قرار دارند (شکل ۱۱ تا ۱۳).

تصویر ۱۱. نمونهٔ تثبیت‌نشدهٔ خشت در حین اجرای آزمون آب‌شستگی (مأخذ: نگارنده).



تصویر ۱۲. نمونهٔ تثبیت‌شدهٔ خشت در حین اجرای آزمون آب‌شستگی (مأخذ: نگارنده).

تصویر ۱۳. وضعیت نمونهٔ تثبیت‌شده خشت (سمت راست) و نمونهٔ تثبیت‌نشده خشت (سمت چپ) بعد از آزمون آب‌شستگی (مأخذ: نگارنده).

تولید انبوه مصالح تثبیت‌شده

پس از مشخص شدن نوع مواد استحکام بخش و تعیین حد بهینهٔ مصرف آن‌ها و نیز اطمینان از عملکرد مناسب مواد افزودنی در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی، بحث تولید انبوه مصالح تثبیت‌شده در دستور کار قرار گرفت. تشکیلات معماری مجموعهٔ تاریخی چغازنبیل نشان می‌دهد که بسته به محل مصرف، شکل مصرف و حجم مصرف مصالح، بهتر است از چند روش برای تهیهٔ خشت‌های تثبیت‌شده با عملکردهای ویژه بهره گرفته شود تا بدین طریق، هم در مصرف ماده تثبیت‌کننده صرفه‌جویی شود و هم بتوان نیاز

کارگاه به حجم مـورد نیـاز خشـت را بـرآورده سـاخت. از همین رو، طرح تولید سه نمونه خشت تثبیتی با قابلیت‌های متفـاوت از طریـق تغییـر دادن نسـبت‌هـای اخـتلاط مـواد افزودنی و نوع خاک مصرفی به مرحلهٔ اجرا درآمد. با این‌که خشت‌های تثبیت‌شده هم در شرایط آزمایشگاهی و هـم در شرایط میدانی، عملکرد مناسب خود را نشان دادنـد، لـیکن پیش از آنکه به شکل گستره در زیگورات به کار روند، ابتدا هر یک از نمونه‌ها به طـور آزمایشـی در مقیـاس خـرد بـه مدت یکسال در بنا مورد استفاده قرار گرفتند و پس از این مدت، با مشخص شدن و محرز شدن توانایی خشـت‌هـای تثبیت‌شده در مواجهه با عوامل فرساینده، مجـوز لازم بـرای کاربرد در سطح وسیع را به دست آوردند. بر همین اسـاس مقرر شد از خشت‌های دستهٔ اول (A) برای مصارف توکـار (مغز کار)، از خشت‌های دستهٔ دوم (B) برای دیوارچینی‌هـا و پـی‌بنـدی‌هـا، و از خشـت‌هـای دسـتهٔ سـوم (C) بـرای سـردیواره‌هـا و آبراهـه‌هـا و سـطوح شـیبدار اسـتفاده شود(تصویر ١٤ و ١٥)(جدول ٣).

تصویر ١٤ و ١٥. بررسی نمونه‌های آزمایشی خشت در شرایط میدانی (مأخذ: نگارنده).

جدول ٣. تنوع خشت‌های تثبیت‌شده.

نمونه	ویژگی	کاملاً مطلوب	مطلوب	نسبتاً مطلوب
خشت‌های گروه A	مقاومت در برابر فشار (در وضعیت خشک)		•	
	مقاومت در برابر فشار (در وضعیت خیس)			•
	مقاومت در برابر سایش		•	
	مقاومت در برابر ضربه		•	
	مقاومت در برابر رطوبت و بارندگی			•
خشت‌های گروه B	مقاومت در برابر فشار (در وضعیت خشک)	•		
	مقاومت در برابر فشار (در وضعیت خیس)		•	
	مقاومت در برابر سایش	•		
	مقاومت در برابر ضربه	•		
	مقاومت در برابر رطوبت و بارندگی		•	
خشت‌های گروه C	مقاومت در برابر فشار (در وضعیت خشک)		•	
	مقاومت در برابر فشار (در وضعیت خیس)	•		
	مقاومت در برابر سایش		•	
	مقاومت در برابر ضربه		•	
	مقاومت در برابر رطوبت و بارندگی	•		

نتیجه‌گیری

در کاوش‌های باستان‌شناسی، نمودار شدن ساختارهای خشتی و گلین به سبب گرفتاری‌ها و ابهامات حفاظتی در اندیشیدن و اتخاذ تدابیر منطقی، بیش‌تر از آن که مایهٔ هیجان باشد، عامل هراس و تشویش حفاظتگران است. حلاوت و اشتیاق ناشی از به نمایش گذاشتن چنین یافته‌هایی که گاه مرز بین شور و شعور و احساس و منطق را درمی‌نوردد، بدون در نظر گرفتن نیازمندی آن‌ها به مراقبت دائم، بیش از آن که به دل بنشیند، کام را تلخ می‌کند. این حقیقت ناشی از آن است که جامعهٔ حفاظتگران در کل و بنا به عللی، تلاشی بسیار کندتر از شتاب عوامل فرساینده و تأثیرگذار محیطی برای حفاظت اثر و گاه اندیشه‌های نامعقول و مخرب انسانی داشته و دارند. در چنین وضعیتی است که روی آوردن به تکنیک‌های استحکام‌بخشی برای جبران بخشی از خسارت‌های ناشی از عقب‌ماندگی مطرح می‌شود. باید توجه داشت که حفاظت در علمی‌ترین تعریف آن، بدون مراقبت، حتی در ساده‌ترین شکل ممکن دوام نخواهد آورد. تجربه نشان داده است که بناهای خشتی بیش‌تر به نگهداری و مواظبت نیازمند اند تا دخالت‌های کالبدی. با این وجود همواره و در همه حال، علل پنهان و پیدای بسیاری وجود دارند که مانع انجام مراقبت‌های دائم از بناهای خشتی می‌شوند. در این وضعیت لازم است تدبیری اندیشید تا بدون نیاز به رسیدگی مداوم و با فواصل زمانی طولانی‌تر بین دفعات بازرسی، شرایط به گونه‌ای فراهم شود که کم‌ترین آسیب متوجه بنا شود. در این میان، تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح مرمتی یکی از آخرین راهبردهای حفاظتی است که می‌توان در صورت فراهم بودن شرایط، آن را به اجرا گذاشت. باید توجه داشت مواردی مانند دسترسی آسان به منابع اولیه، سادگی روش تهیه و کاربرد مصالح، سادگی تکنیک اجرایی اقدامات مرمتی و حفاظتی، صرفهٔ اقتصادی و ارزش‌های زیست‌محیطی، هم‌چنان که اساس معماری خشتی را بنیان نهاده اند، برای تأمین و به‌کارگیری مواد قابل استفاده در تحکیم و استحکام‌بخشی مصالح نیز اساسی‌ترین فاکتورهایی هستند که باید مد نظر قرار گیرند.

پاره‌ای حساسیت‌ها در وجود مصالح و ابنیهٔ گلین، این ذهنیت را تداعی کرده که هر اقدامی در جهت توانمندسازی این دسته مصالح و مصنوعات معماری برای مواجهه با عوامل فرساینده محیطی، عملی سزاوارانه است. چنین بینشی بر خلاف تصور، واقع‌بینانه نیست. زیرا ممکن است آن‌قدر در این فرآیند افراط شود که مبانی حفاظت و منطق حاکم بر شکل‌گیری این‌گونه آثار معماری، به حاشیه رانده شود. آن‌چنان که دیگر نتوان به این سؤال پاسخ داد که آیا آنچه پیش رو داریم هنوز هم یک اثر معماری خشتی و پاگرفته بر بنیاد عناصر هویت‌دهنده به آن است؟ تجربه نشان داده است در گزینش شیوهٔ مناسب برای بهینه‌سازی و استحکام‌بخشی، روی آوردن به سیستم‌های تدافعی مسالمت‌آمیز، همواره نتایجی به مراتب مؤثرتر و رضایت‌بخش‌تر از توسل به روش‌های خشک و انعطاف‌ناپذیر به دنبال داشته است.

نتایج به‌دست‌آمده از مشاهدات میدانی، مطالعات آزمایشگاهی، بررسی سوابق حفاظت و مرمت، کیفیت مراقبت و روند فرسایش در محوطهٔ تاریخی چغازنبیل، این ضرورت را نشان می‌دهد که باید در مورد تهیه و به‌کارگیری مصالح به‌ویژه خشت‌های مرمتی و اندود کاهگل حفاظتی که بیش‌ترین حساسیت و گسترده‌ترین حجم مصرف را در این مجموعه دارند، تحول و دگرگونی ایجاد کرد. در این باره، بهینه‌سازی و استحکام‌بخشی مصالح گلین با استفاده از مواد افزودنی بوم‌آورد، ایده‌ای بود که اجرای آن توانست تا حدود زیادی تضمین‌کننده قوام و ثبات تدابیر حفاظتی باشد. این مهم زمانی اهمیتی ویژه‌تر یافت که مواد افزودنی مورد مصرف برای تحکیم و استحکام‌

بخشی مصالح، از طریق بازیافت ضایعات صنعتی و کشاورزی همان منطقه تهیه شد. ملاس، باگاس، و لجن آهک پس از فرآوری و عمل‌آوری برای این منظور مورد استفاده قرار گرفتند. افزودن درصد مشخصی از محصول تهیه‌شده به خاک، کیفیت و پایداری مصالح را بهبود بخشید و به شکل تأثیرگذاری در کاهش فرسایش بنا توفیق حاصل شد. بدین طریق، علاوه بر تأمین هدف اصلی (حفاظت بهتر از بقایای معماری از طریق تثبیت و استحکام‌بخشی مصالح مرمتی)، با پاکسازی پیرامون اثر و مسیرهای گردشگری منتهی به محوطه از دورریزهای کارخانجات صنایع قند و شکر که مواد اولیه برای تهیهٔ محصول استحکام‌بخش هستند، ارزش‌های زیست‌محیطی طرح نیز نمودار شد(جدول ٤ تا ١٤).

جدول ٤تا ٨ . نتایج آنالیزهای کانی‌شناسی برای نمونهٔ ١/٣١ـ٧٨ـ چ. ز.

جدول ٤.

کد نمونه	نتایج XRD
١/٣١ـ٧٨ـ چ. ز	*Gypsum, Calcite, Quartz, Feldespat, Halite (Clay minerals, Dolomite)*
کد نمونه	نتایج FT-IR
١/٣١ـ٧٨ـ چ. ز	*Gypsum, Calcite, Quartz, Feldespat, Halite (Clay minerals, Dolomite)*

جدول ٥.

کد نمونه	کانی رسی
١/٣١ـ٧٨ـ چ. ز	*Chlorite , Illite , Montmorillonite*

جدول ٦.

اکسید	درصد جرمی اکسید	نسبت مولی اکسید
SiO2	٣٦/٨٧	٠/٦١٣
Al2O3	٦/٠٧	٠/٠٥٩
Fe2O3	٣/٧٥	٠/٠٢٣
K,Na2O	٢/٥	٠/٠٣٢
CaO	١٨/١٥	٠/٣٢٣
MgO	٢/٩٩	٠/٠٧٤
SO3	٦/٠١	٠/٠٧٥

جدول ۷.

جرم معادل کانی	نسبت مولی اکسید						
	۰/۶۱۳ SiO_2	۰/۰۵۹ Al_2O_3	۰/۰۳۲ (K,Na_2O)	۰/۰۲۳ Fe_2O_3	/۳۲۳ ۰ CaO	۰/۰۷٤ MgO	۰/۰۷۵ SO_3
جرم معادل فلدسپات	۰/۱۹۲	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	–	–	–	–
تفاضل	۰/٤۲۱	۰/۰۲۷	۰	۰/۰۲۳	/۳۲۳ ۰	۰/۰۷٤	۰/۰۷۵
جرم معادل کانی رسی	۰/۰۵٤	۰/۰۲۷		–	–	–	–
تفاضل	۰/۳٦۷	۰		۰/۰۲۳	/۳۲۳ ۰	۰/۰۷٤	۰/۰۷۵
جرم معادل کوارتز	۰/۳٦۷			–	–	–	–
تفاضل	۰			۰/۰۲۳	/۳۲۳ ۰	۰/۰۷٤	۰/۰۷۵
جرم معادل اکسید فریک				۰/۰۲۳	–	–	–
تفاضل				۰	/۳۲۳ ۰	۰/۰۷٤	۰/۰۷۵
جرم معادل دولومیت					/۰۷٤ ۰	۰/۰۷٤	–
تفاضل					/۲٤۹ ۰	۰	۰/۰۷۵
جرم معادل ژیپس					/۰۷۵ ۰		۰/۰۷۵
تفاضل					/۱۷٤ ۰		۰
جرم معادل کلسیت					/۱۷٤ ۰		
تفاضل					۰		

جدول ۸.

کانی	نسبت مولی	جرم نسبی	درصد جرمی
کانی رسی	۰/۰۲۷	٦/۹۷۱	۷/۹٤۲
فلدسپات	۰/۰۳۲	۱۷/۲۹	۱۹/۷۱۰
کوارتز	۰/۳٦۷	۲۲/۰۵	۲۵/۱۲۲
هماتیت	۰/۰۲۳	۰/۷۵	٤/۲۷۲
کلسیت	۰/۲٤۸	۲٤/۸	۲۸/۲۵۵
دولومیت	۰/۰۷٤	۱۳/٦۳۸	۱٤/۵۲
ژیپس	۰/۰۷۵	۱۲/۹	۱٤/٦۹۷

جدول ۹. آنالیز کمی یون‌های شناسایی‌شده.

کد نمونه	درصد کمی CL^-		درصد کمی K^+	درصد کمی Na^+	درصد کمی SO_4^{--}
	اندازه‌گیری اول	اندازه‌گیری دوم			
۱/۳۱_ ۷۸_ چ. ز	۱/۳۵	۳/٤۵۷	۰/۲٤۹	۱/۲۲۰	۲/٤۷۲

جدول۱۰. آنالیز کیفی یون‌های شناسایی‌شده.

کد / یون	۱/۳۱	۱/۳۲	۱/۳۳	۱/۳٤	۱/۳۵	۱/۳٦	۱/۳۷	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/٤۰
سولفات	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
کربنات	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
کلرور	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

جدول ۱۱. اندازه‌گیری حدود آتربرگ.

کد نمونه	حد روانی LL	حد خمیری PL	شاخص خمیری PI	مقاومت برشی در حد روانی FI	مقاومت برشی در حد خمیری TI	عدد اکتیویته A
۱/۳۱_ ۷۸_ چ. ز	۲۷/۰۰	۲٤/۲۹	۲/۷۱	۷/۱۸	۰/۳۷	۰/۱٦

جدول۱۲. توزیع دانه‌بندی بخش ماسه‌ای.

کد نمونه	درصد وزنی ماسه روی مش ۳۰	درصد وزنی ماسه روی مش ۵۰	درصد وزنی ماسه روی مش ۱۰۰	درصد وزنی ماسه روی مش ۲۰۰
۱/۳۱_ ۷۸_ چ. ز	۰/۸	۲/۹۵	۷/۳	۱۰/٦٥

جدول۱۳. توزیع اجزای ساختاری.

کد نمونه	درصد وزنی بخش غیرماسه	درصد وزنی بخش ماسه	درصد وزنی بخش گچی	درصد وزنی بخش ترکیبات کربناتی + مواد آلی + ...
۱/۳۱_ ۷۸_ چ. ز	٤۲/٥	۲۲	۱/۰٥	۳٤/٤٥

جدول۱٤. اندازه‌گیری مقاومت فشاری (Kg/cm^2).

کد	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
۱/۳۱_ ۷۸_ چ. ز	۲۸	۲۸	۳٦	۳۰/٦

پانوشت‌ها:

۱. گزارش اولیهٔ این طرح تحقیقاتی تحت عنوان «مطالعات متمرکز بر خشت خام و اندود کاهگل در محوطه میراث جهانی چغازنبیل» در نهمین کنفرانس بین‌المللی مطالعه و حفاظت معماری خشتی/ یزد/ آبان ۱۳۸۲، ارائه شده است و آنچه اکنون با عنوان «امکان‌سنجی بهره‌برداری از فرآورده‌های بوم‌آورد در بهینه‌سازی مصالح مرمتی؛ نمونهٔ مطالعه‌شده: زیگورات چغازنبیل» ارائه شده، گزارشی از نسخهٔ تکمیل شده همان تحقیق است. این نوشتار دربردارندهٔ مباحثی است که در زمان نگارش نسخهٔ اولیه، هنوز در مورد آنها اطلاعات کافی در اختیار نبوده و یا در مرحلهٔ پژوهش و نتیجه‌گیری بوده است. جدا از تصاویر، جداول و نقشه‌های جدید و نیز ارائه نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی شامل: XRD ، FT-IR ، کانی‌شناسی، آنالیز کمی و کیفی یون‌ها، حدود آتربرگ، توزیع دانه‌بندی، توزیع اجزای ساختاری و مقاومت فشاری، مباحث و سرفصل‌های تازه‌ای از قبیل: مراحل آماده‌سازی مواد استحکام بخش، نحوهٔ تعیین حد بهینه مواد استحکام بخش، تولید انبوه مصالح تثبیت‌شده، جمع-بندی نهایی و منابع، به این گزارش اضافه شده اند. در این نوشته تلاش شده تا حد امکان از بازگویی مباحث مشابه با گزارش اولیه پرهیز شود.

منابع:

- ام. جی، لانت، (۱۳٦۰)، *خشت‌های تثبیت شده برای ساختمان*، ترجمهٔ فروز روشن‌بین، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ش ۱۳، تهران.
- جی. آر، کد، (۱۳٥۸)، *خشتهای تثبیت شده با آهک*، ترجمهٔ فروز روشن‌بین، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ش ۳، تهران.

- خدابنده، ناهید، (۱۳۷۰)، *تثبیت خاکهای مناطق گیلان و زنجان، بهبود عملیات بنائی با آجر و بررسی ملاتهای متداول در ایران و تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- رمضانیانپور، علی اکبر، (۱۳۷٤)، *پوستهٔ برنج و خاکستر آن در صنعت ساختمان*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ش ۲۱۸، تهران.
- فلامکی، محمدمنصور، (۱۳۵۵)، «موقعیت مسئله مجموعهٔ معماری خشتی گلی ایران»، *در هنر و معماری*، ش ۳۸ و ۳۷، ص ۳۸ـ ٤٤.
- فلامکی، محمدمنصور، (۱۳٦۷)، «هماهنگی‌های دیروز و نارسائی‌های امروز»، *در مجلهٔ ساختمان*، ش ۷، ص ٤۱ـ ٤۹.
- فلامکی، محمدمنصور، (۱۳۵۵)، «در جستجوی تداوم اندیشه و تبادل تجربه/ از اولین تا دومین مجمع جهانی خشت خام»، *در هنر و معماری*، ش ۳۷ و ۳۸، ص ۱۵ـ ۲٦.
- گیرشمن، رمن، (۱۳۷۳)، *چغازنبیل (جلد اول: زیگورات)*، ترجمهٔ اصغر کریمی، سازمان میراث فرهنگی کشور، تهران.
- ماجدی اردکانی، محمدحسین، (۱۳۷۸)، *آجر رسی (از تولید تا مشکلات مصرف)*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- نفیسی، مهدی، (۱۳۵٤)، «خشت آسفالتی»، در *نشریهٔ انجمن ملی نفت ایران*، ش ٦۰ ، ص ۲۳ـ ۳۵.
- ویسه، سهراب، (۱۳۷۳)، *آجر رسی (خواص و تولید)*، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ش ۲۰٦، تهران.