

## ارزیابی کیفیت نمونه آجرهای محوطه میراث جهانی تخت سلیمان براساس آزمایش مقاومت فشاری و آزمون جذب آب

میلاد محسن‌زاده کریمی<sup>۱\*</sup>، سید مهدی موسوی کوهپر<sup>۲</sup>

### چکیده

در اغلب پژوهش‌های باستان‌شناختی ایران، بناهای باستانی بیشتر از نقطه نظر ساختارهای معماری و کارکرد، بررسی شده‌اند، اما از نقطه نظر دانش مهندسی کمتر به این سازه‌ها پرداخته شده است که بناهای دوران تاریخی نیز از این امر کلی مستثنی نبوده‌اند. از مهم‌ترین وجوهی که در راستای بررسی یک بنای باستانی می‌توان نام برد، مطالعات سازه‌ای آن اثر است. انجام مطالعات سازه‌ای در پیوند با مدل‌سازی رایانه‌ای و در نهایت تحلیل سازه‌ای بناها، بسیار مهم و حائز اهمیت است. یکی از جنبه‌های مهم در مطالعات سازه‌ای، شناخت و بررسی مواد و مصالح به کار رفته در بناهاست. در این راستا، باتوجه به اهمیت محوطه میراث جهانی تخت سلیمان به دلیل وجود آتشکده آذرگشنسب و مجموعه بناهای به هم پیوسته، دوره زمانی، در دسترس بودن و باقی ماندن بخش قابل توجهی از بناها و مصالح این مجموعه، به بررسی این محوطه پرداخته‌ایم. این پژوهش مبتنی بر ۱. مطالعات کتابخانه‌ای، ۲. بررسی‌های میدانی و ۳. مطالعات آزمایشگاهی به شیوه توصیفی-تحلیلی است. مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری و آزمون جذب آب بوده که روی چهار نمونه آجر محوطه تخت سلیمان صورت گرفته است. در مبحث مطالعات سازه‌ای، آزمایش مقاومت فشاری و آزمون جذب آب از مهمترین معیارهای ارزیابی کیفیت و تعیین استحکام و پایداری آجر است. نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب و مقایسه آن با آزمایش‌های مشابه در کشورهایی مانند ایتالیا و یونان، بیانگر کیفیت نسبتاً بالای آجرهاست که توسط معماران این محوطه باستانی استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** معماری، محوطه تخت سلیمان، آجر، آزمایش مقاومت فشاری، آزمون جذب آب

**ارجاع:** محسن‌زاده کریمی م.، موسوی کوهپر م.، ۱۴۰۱. ارزیابی کیفیت نمونه آجرهای محوطه میراث جهانی تخت سلیمان براساس آزمایش مقاومت فشاری و آزمون جذب آب. نشریه جستارهای باستان‌شناسی ایران پیش از اسلام. ۷(۱): ۱۲۹-۱۴۸.

۱- دانشجوی دکتری باستان‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد باستان‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس m\_mousavi@modares.ac.ir

\* نویسنده مسئول: mohsenzadeh2500@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

## مقدمه

تاکنون مباحث فراوانی در زمینه هنر معماری شاهنشاهی ایران ساسانی از سوی باستان‌شناسان و معماران مطرح شده، اما به ندرت، معماری و بناهای دوران باستان ایران از جمله دوره ساسانی از منظر دانش مهندسی و مطالعات سازه‌ای بررسی شده است. مطالعات سازه‌ای بناهای تاریخی در واقع پیش زمینه‌ای برای انجام تحلیل سازه‌ای بناهاست. تحلیل سازه‌ها به طور کلی شامل بررسی پایداری، تعیین واکنش‌های تکیه‌گاهی، تعیین نیروهای داخلی و محاسبه تغییر شکل‌های یک سازه می‌باشد (اخوان لیل‌آبادی و طاحونی، ۱۳۸۷: ۷-۸-۱۰). تحلیل سازه‌ای به ایجاد حفاظت و مرمت کارآمد و آبرومند بناهای تاریخی کمک می‌کند (Roca and Others, 2010: 2). استفاده از روش‌های پیشرفته رایانه‌ای برای تحلیل سازه‌های تاریخی با مطالعات گنبد برونلشی توسط Chiarugi و همکارانش در سال ۱۹۹۳ میلادی آغاز شد. برج پیزا توسط Macchi و همکارانش در سال ۱۹۹۳، بنای کولوستوم در رم توسط Croci در سال ۱۹۹۵، کلیسای جامع مکزیک توسط Sánchez Ramírez و Meli در سال ۱۹۹۵ و کاخ سلطنتی سن مارکو در ونیز توسط Mola و Vitaliani در سال ۱۹۹۵ از جمله بناهای تاریخی هستند که با استفاده از روش‌های رایانه‌ای مورد تحلیل سازه‌ای قرار گرفتند (Roca and Others, 2010: 2). در زمینه مطالعات و تحلیل سازه‌ای بناهای باستانی ایران، می‌توان به پژوهش‌های پژوهشگرانی مانند (ذکاو‌زاده، ۱۳۸۸)، (رضایی‌منفرد، ۱۳۹۰)، (احمدی، ۱۳۹۴) و (محسن‌زاده‌کریمی، ۱۳۹۴) که در بخش پی‌نوشت عناوین کارهای پژوهشی آنها ذکر شده، اشاره کرد. به طور مشخص در خصوص مبحث آزمایش‌های مقاومت فشاری و آزمون جذب آب روی آجرهای محوطه‌های باستانی که موضوع این پژوهش نیز هست، می‌توان به دو پژوهش شاخص که در دانشگاه‌های رم (Giavarini and others, 2006) و سالونیک (Stefanidou and others, 2014) صورت گرفته است، اشاره کرد.

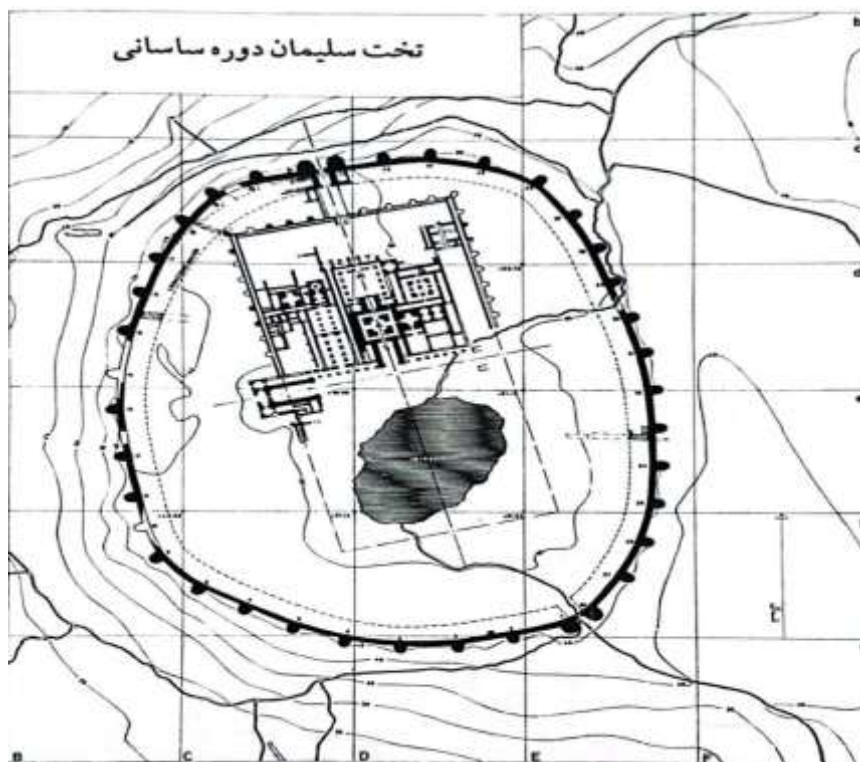
یکی از محوطه‌های شاخصی که با توجه به اهمیت کارکرد اجتماعی و آئینی در دوره ساسانی، بازتاب‌دهنده هنر معماری آن دوره نیز می‌باشد، محوطه تخت سلیمان است که برای مبحث مورد بررسی در پژوهش حاضر انتخاب شده است. از سوی دیگر وجود مجموعه بناهای به هم پیوسته که بخش‌های قابل توجهی از آنها باقی مانده و فراوانی مصالحی نظیر آجر در ساخت بناهای آن، از دلایل دیگر انتخاب محوطه تخت سلیمان برای انجام این پژوهش است. هدف از این پژوهش، فراهم آوردن پایه‌ای قابل اتکاء برای تحلیل سازه‌ای بناهای تخت سلیمان و در پی آن، ارائه طرح‌های حفاظت و مرمت مناسب و کارآمد از سوی پژوهشگران و متخصصان این حوزه است. از جمله پرسش‌هایی که در این پژوهش به آنها پاسخ داده شده است؛ عبارتند از: ۱. مقدار باری که نمونه آجرهای انتخابی از محوطه تخت سلیمان بر اساس آزمایش مقاومت فشاری می‌توانند تحمل کنند چه قدر است؟ ۲. بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته (مقاومت فشاری و جذب آب) کیفیت آجرهای به کار رفته در سازه‌های این محوطه چگونه است؟

## تخت سلیمان

محوطه تخت سلیمان در استان آذربایجان غربی، در ۳ کیلومتری شرق روستای نصرت‌آباد و ۴۳ کیلومتری شمال شرقی شهرستان تکاب بر روی صفه‌ای طبیعی و مرتفع قرار گرفته که از سطح زمین‌های اطراف خود در حدود ۲۰ متر ارتفاع دارد. دورادور این اثر گرانسنگ را یک رشته دیوارهای سنگ‌چین ضخیم با ملات‌های گچ و ساروج و جداری از سنگ‌های حجاری شده عظیم به طور منظم زینت داده و دو دروازه نعلی شکل در شمال و جنوب این محوطه تعبیه شده و آتشکده مشهور آذرگشنسب در آن واقع شده است (سرفراز و کیانی، ۱۳۴۷: ۱۰). نخستین کاوش‌های علمی باستان‌شناسی در این محوطه در سال ۱۹۵۹م از سوی یک هیأت مشترک سوئدی-آلمانی-ایرانی به سرپرستی «هانس هنینگ فون دراوستن» باستان‌شناس سوئدی و «رودلف ناومان» باستان‌شناس آلمانی انجام گرفت و تا سال ۱۹۷۹ ادامه یافت (هنینگ و ناومان، ۱۳۸۲: ۱۱). پژوهش‌های باستان‌شناختی محوطه تخت سلیمان پس از یک وقفه طولانی پس از انقلاب ۵۷ از سال ۱۳۷۲ شروع شد و در سه مرحله عمده از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۴ به سرپرستی ابراهیم حیدری و از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۰ به سرپرستی محمد مهریار و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ به سرپرستی یوسف مرادی ادامه داشت و در نهایت در سال ۱۳۸۸ دکتر علی‌رضا هژبری نویری در دو محل از این محوطه اقدام به کاوش کرد (امان‌اللهی، ۱۳۹۴: ۱۲-۱۳). همچنین طی سالیان گذشته پژوهش‌هایی در حوزه

زمین‌باستان‌شناختی، شناسایی کانی‌ها و معادن منطقه تخت سلیمان صورت گرفته (امان‌اللهی، ۱۳۹۴: ۱۳). روی صدفه تخت سلیمان از دوره هخامنشی، یک محوطه مسکونی در قالب یک دهکده کوچک به دست آمده و بررسی شده است (ناومان، ۱۳۸۲: ۲۲). وجود یک محوطه مسکونی دوره پارسی تاکنون در این محوطه به اثبات نرسیده است، همچنین ناومان معتقد است که وجود سفال‌های منفرد دوره پارسی چون از لایه باستان‌شناختی به دست نیامده و در بین بقایای ساختمانی دوره ساسانی قرار گرفته بودند، بنابراین احتمالاً همراه با مصالح ساختمانی به آنجا راه یافته‌اند. با اهمیت‌ترین بناها در محوطه تخت سلیمان، متعلق به دوره ساسانی است و ثابت شده است که آتش آذرگشنسب در اینجا قرار داشته و این آتش موقعیت جنگجویان را حفظ می‌کرده و به عنوان نماد وحدت کشور، احترامی والا و جایگاه ارزشمندی داشت (ناومان، ۱۳۸۲: ۲۲). همچنین مهر اصلی تخت سلیمان، یعنی مهر ۷۰۳ که نام آتشکده در آن حک شده، خود تأیید دیگری است بر محل قرار گرفتن آتشکده آذرگشنسب در محوطه تخت سلیمان (گویل، ۱۳۸۴: ۱۲۸). با توجه به یافته‌های باستان‌شناسی، پس از اسلام نیز استقرار در محوطه تخت سلیمان ادامه می‌یابد و در دوره عباسی هم یک محوطه مسکونی در آنجا به وجود آمد و در نهایت در دوره ایلخانان به عنوان کاخ شکار ایلخان آقاباخان پس از سال ۱۲۷۰ میلادی احیا شد، سرانجام این محل در سده چهاردهم میلادی اهمیت خود را از دست داد و بناهای آن فرو ریخت و تزیینات آن به سرقت رفت (ناومان، ۱۳۸۲: ۲۳). مجموعه تخت سلیمان با وسعت ۱۴۴۰۰۰ متر مربع، دارای آثار زیادی بوده که مهمترین بقایای آن عبارت است از، برج و باروی پیرامون شهر، حصار داخلی، آتشکده آذرگشنسب، معبد آناهیتا، کاخ و ایوان خسرو بوده است (مجیدی، ۱۳۹۸: ۱۵۵).

بیشتر بقایای سازه‌هایی که پا برجاست و اکنون در محوطه تخت سلیمان دیده می‌شود متعلق به دوره ساسانی است، بنابراین در این بخش از پژوهش به توصیف کلی سازه‌های اصلی تخت سلیمان که متعلق به همین دوره است، می‌پردازیم. تخت سلیمان در دو جهت شمالی- جنوبی ۳۸۰ متر و در جهت شرقی- غربی ۳۰۰ متر گسترش دارد، این محدوده به وسیله حصاری محصور است که در آن از سال ۱۹۵۹ حفاری‌هایی انجام گرفته است (ناومان، ۱۳۸۲: ۳۵). حصار محوطه تخت سلیمان با دو دروازه به شکل یک بیضی نامنظم از لاشه‌سنگ و ساروج با میانگین ضخامت حدود ۳/۸۰ متر بنا شده است. طول این حصار ۱/۱۲۰ کیلومتر است و ارتفاع حصار حداقل ۱۳ متر محاسبه شده است. حصار با برج- دروازه‌ها، ۳۸ برج داشته که جبهه بیرونی آنها قوس‌دار بوده است (ناومان، ۱۳۸۲: ۳۹-۴۰).

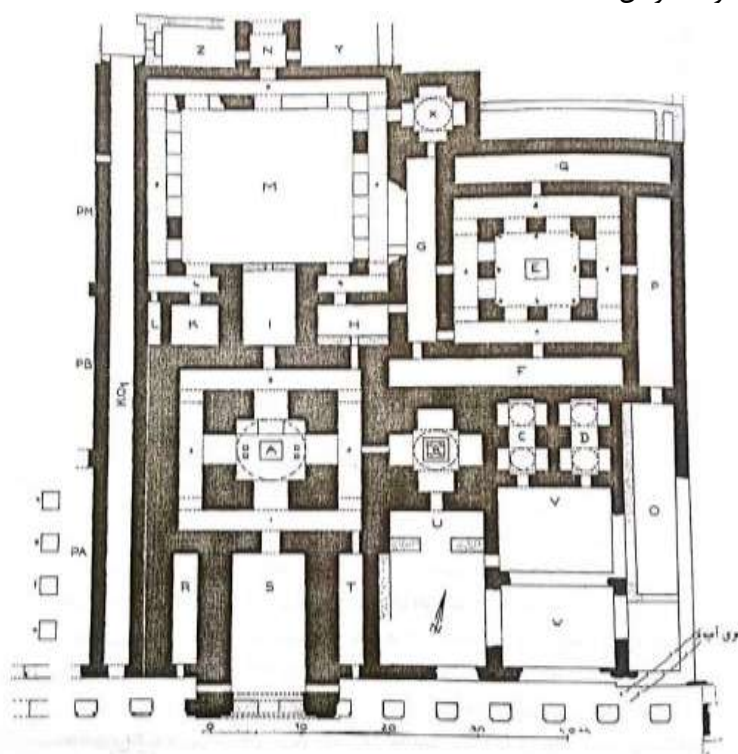


شکل ۱- پلان تخت سلیمان در دوره ساسانی (ناومان، ۱۳۸۲)



شکل ۲- تصویر دروازه جنوبی محوطه تخت سلیمان (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)

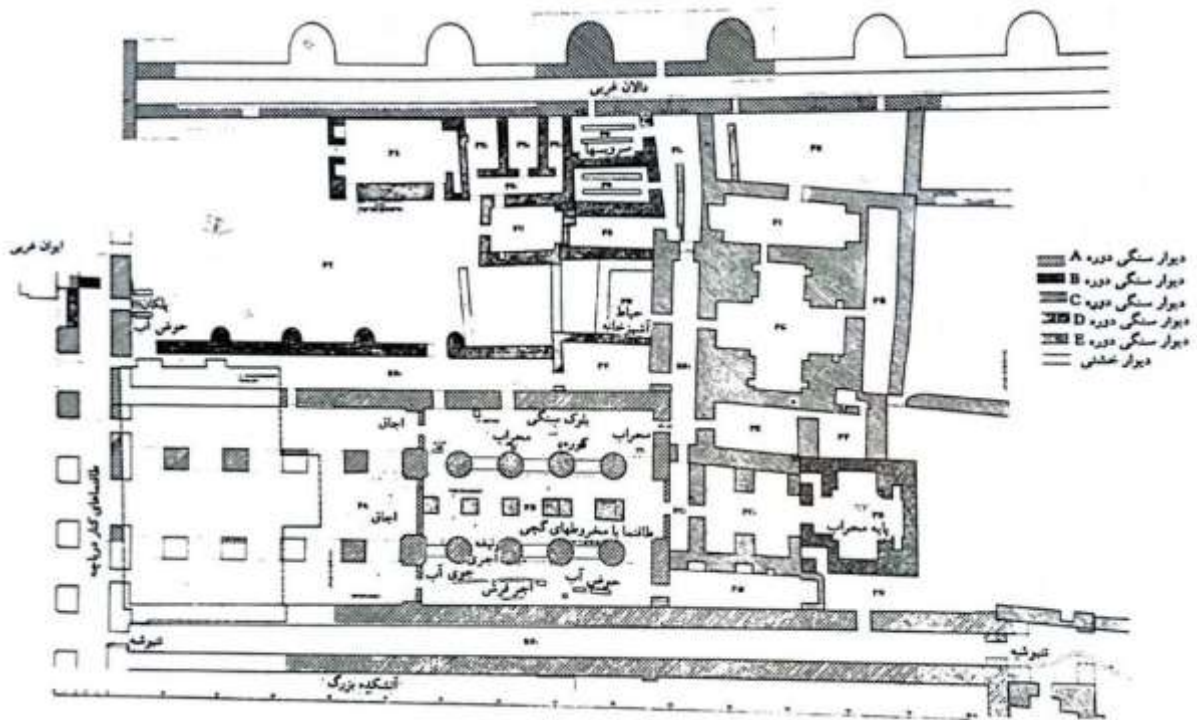
آتشکده‌هایی که در شمال مربع استحکامات قرار دارند به وسیله دالان  $KO_1$  که زمانی دارای اتاق بوده است در دو تأسیسات جداگانه به صورت مشخصی از هم مجزا شده‌اند: آتشکده بزرگ مغها در شرق با اتاق‌های A تا Z و در غرب تأسیسات یک تالار ستون‌دار با اتاق‌های PA تا PZ که بر اساس نظر کاوشگر مجموعه (ناومان) احتمالاً می‌توانند به عنوان بناهای مذهبی درباری و عمومی تعبیر و تفسیر شوند (ناومان، ۱۳۸۲: ۵۲).



شکل ۳- پلان آتشکده آذرگشنسب- مجموعه تأسیسات آتشکده شرقی (ناومان، ۱۳۸۲)



شکل ۴- تصویر اتاق A، مهم‌ترین بخش از مجموعه آتشکده شرقی (محسن‌زاده‌کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۵- پلان اصلی آتشکده غربی، مجموعه تالار ستون‌دار (ناومان، ۱۳۸۲)



شکل ۶- تصویر تالار ستون‌دار یا تالار PB در مجموعه آتشکده غربی تخت سلیمان (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)

### روش‌شناسی

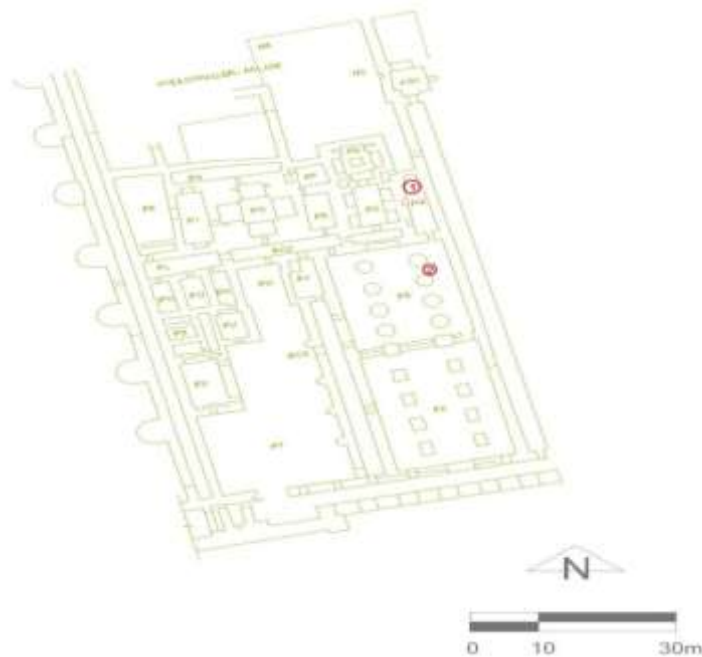
روش پژوهش در این مقاله بر اساس بررسی‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی استوار است. به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در بررسی میدانی محوطه تخت سلیمان و با توجه به محدودیت‌ها و شرایط موجود، موفق به برداشت چهار نمونه آجر از سه نقطه این محوطه شدیم. نمونه آجر شماره ۱ از قسمت شمالی تالار ستون‌دار (تالار PB)، اتاقی موسوم به PM برداشت گردید و نمونه آجر شماره ۲ نیز از تالار ستون‌دار اصلی (تالار PB) و نمونه آجرهای شماره ۳ و ۴ نیز از جبهه شرقی مجموعه بناهای اصلی (تأسیسات آتشکده‌ها) که محل انباشت آجرهایی از این محوطه بود، برداشت شد. از آنجایی که این نمونه آجرها در فرایند یک کاوش باستان‌شناختی و از لایه فرهنگی به دست نیامده، گاهنگاری دقیق آنها دشوار بود، بنابراین با بررسی‌های صورت گرفته توسط حمید امان‌اللهی (کارشناس مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان) و سرکوت احمدی (کارشناس مرمت و ابنیه تاریخی) و با توجه به مقایسه‌های تطبیقی با آجرهای تخت سلیمان، به ویژه آجرهای دوره ساسانی این مجموعه که نمونه‌های کامل آن در موزه تخت سلیمان نیز موجود است، تاریخی بودن این نمونه آجرها و اینکه احتمالاً متعلق به دوره ساسانی باشند، مشخص گردید. شایان ذکر است که اغلب آجرهای به کار رفته در بناهای ساسانی تخت سلیمان که برخی از نمونه‌های آن در موزه این مجموعه نیز نگهداری می‌شود به شکل مربع بوده و ابعاد آنها از  $۲۶ \times ۲۶ \times ۵$  سانتی‌متر تا  $۳۰ \times ۳۰ \times ۵$  سانتی‌متر متغیر می‌باشد.



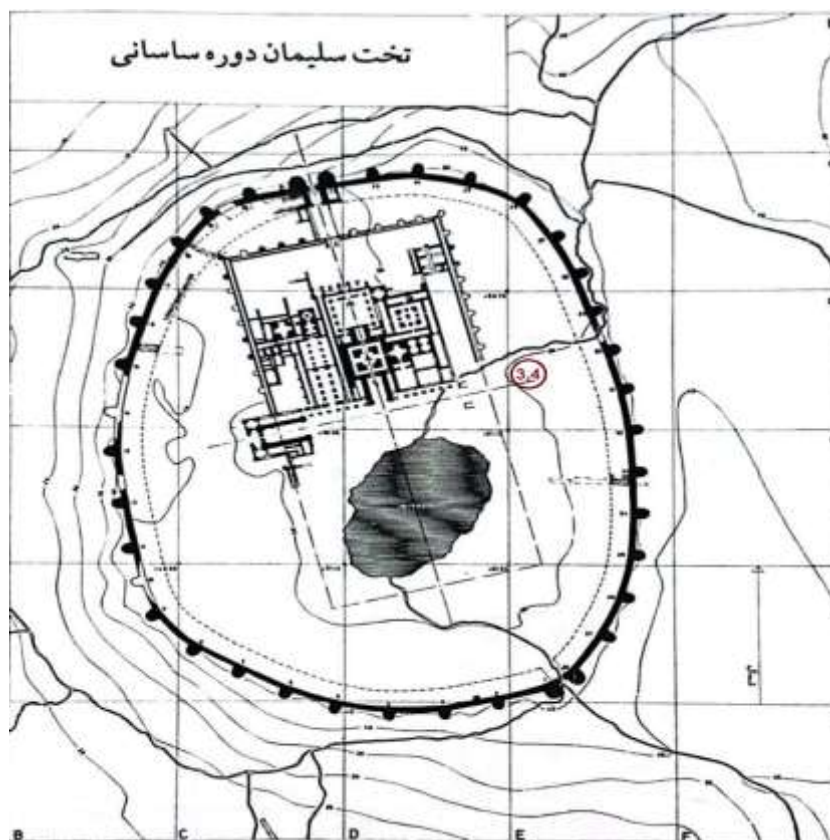
شکل ۷- نمونه آجر ساسانی موجود در موزه مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۸- محل برداشت نمونه آجر شماره ۱ از اتاق PM (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۹- جانمایی نقاط برداشت نمونه آجرهای شماره ۲۰۱ در پلان آتشکده غربی، مجموعه تالار ستون‌دار (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۱۰- جانمایی نقاط برداشت نمونه آجرهای ۴ و ۳ در پلان مجموعه تخت سلیمان (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)

### مبانی نظری

کلیه مصالح به کار رفته در کارهای ساختمانی دارای مجموعه ویژگی‌های معین هستند که این ویژگی‌ها را می‌توان در سه گروه عمده ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی دسته‌بندی کرد (رحیمی، ۱۳۹۲: ۲۵-۲۶). شایان ذکر است باتوجه به اینکه آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش، ذیل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح قرار می‌گیرند، بنابراین در ادامه فقط به توضیح این ویژگی‌ها، پرداخته و از بازگو کردن ویژگی‌های شیمیایی مصالح خودداری کرده‌ایم.

ویژگی‌های مکانیکی نشان دهنده واکنش مصالح نسبت به نیروهای اعمال شده در حالات مختلف است. واکنش مواد مختلف نسبت به نیروهای اعمال شده به صورت دو عامل تنش و تغییر شکل ( کرنش) نمود پیدا می‌کند (رحیمی، ۱۳۹۲: ۳۶). در واقع مهم‌ترین ویژگی مکانیکی مصالح، «مقاومت» است.

مقاومت عبارت است از توانایی مصالح برای مقابله با گسیختگی تحت تأثیر تنش ناشی از بار (فروتنی، ۱۳۹۶: ۲۶). برخلاف تنش و کرنش که ناشی از اثر اعمال نیرو بر ماده‌اند و با تغییر مقدار نیرو، مقدار این پارامترها نیز تغییر می‌کند، مقاومت ذاتی هر ماده و مقدار آن، تابع جنس و کیفیت ماده مذکور است، بنابراین صرف نظر از مقدار تنش اعمال شده، هر ماده در مقابل اعمال هر نوع نیرو در شرایط خاص، دارای مقداری مقاومت خواهد بود. بنابراین مشابه انواع تنش، مقاومت ماده نیز می‌تواند دارای انواع فشاری، کششی، برشی و پیچشی باشد (رحیمی، ۱۳۹۲: ۳۸). به تعبیری ساده‌تر می‌توان چنین گفت که مقاومت فشاری عبارت است از ظرفیت تحمل یک جسم، مصالح ساختمانی و یا سازه در مقابل نیروهای فشاری محوری مستقیم. هنگامی که حد مقاومت فشاری یک ماده فرا می‌رسد، آن ماده منهدم خواهد شد و یا بر اساس تعریفی دیگر، مقاومت فشاری برابر است با مقدار تنش فشاری تک محوری، هنگامی که اِلمان یا عضو مورد نظر کاملاً گسیخته می‌شود. مقدار مقاومت فشاری، معمولاً به وسیله آزمایش فشار و توسط جک‌هایی که برای این منظور ساخته شده، به دست می‌آید. لازم به یادآوری است که مقاومت فشاری مصالح با واحدهایی مانند  $(N/mm^2)$ ، مگاپاسکال (Mpa) و  $(Kg/cm^2)$  نشان داده می‌شود.

$$1 N/mm^2 = 1 Mpa = 10.197 Kg/cm^2$$



ویژگی‌های فیزیکی به آن دسته از خصوصیات مصالح که طبیعت و رفتار عمومی مصالح را تحت شرایط مختلف نشان می‌دهند، گفته می‌شود. مهم‌ترین مشخصه‌ها یا ویژگی‌های فیزیکی عمومی که در اغلب مصالح ساختمانی مشترک هستند، شامل جرم مخصوص (جرم واحد حجم)، رطوبت و جذب آب، ضریب نرم‌شدگی یا حساسیت به آب، مقاومت به یخ‌زدگی، هدایت حرارتی، ظرفیت و انبساط حرارتی، هدایت الکتریکی و دوام هستند (رحیمی، ۱۳۹۲: ۲۶). رطوبت هر ماده‌ای برابر نسبت جرم آب موجود در آن به جرم ماده خشک است و جذب آب نشان دهنده حداکثر مقدار آبی است که ماده می‌تواند در شرایط متعارف در خود نگه دارد، در نتیجه این کمیت برابر اختلاف رطوبت ماده در دو حالت کاملاً خشک و اشباع است. میزان جذب آب مواد، تابع حجم و بزرگی خلل و فرج، شکل، اندازه و طبیعت ذرات ماده است (رحیمی، ۱۳۹۲: ۲۸-۲۹).

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

$$W_{ab} = m_{sat} - m_d$$

$m_1$ : جرم ماده در حالت مرطوب

$m_2$ : جرم ماده در حالت خشک

$m_{sat}$ : جرم ماده در حالت اشباع

$m_2 = m_d$ : جرم ماده در حالت خشک شده در حرارت ۱۰۵ درجه سلسیوس

$W$ : میزان رطوبت

$W_{ab}$ : پتانسیل جذب آب

#### آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه آجرهای محوطه تخت سلیمان

باتوجه به اینکه نمونه آجرهای برداشت شده از محوطه، شکل و ابعاد آجرهای کامل را نداشتند، بنابراین لازم بود که برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، آنها را در قالب ابعاد معینی برش داده و سپس پرداخت نمائیم (سطوح ناصاف آنها را به منظور قرار دادن بین جک‌های دستگاه مقاومت، با دستگاه سنگ‌ساب صاف کردیم) نمونه شماره ۱ را توانستیم در قالب ابعاد معین مندرج در استاندارد ملی شماره ۷ (آجر رسی-ویژگی‌ها و روش‌های آزمون) برای انجام آزمایش مقاومت فشاری برش دهیم که اندازه‌های ۲۱×۱۰×۵ سانتی‌متر بود و نمونه آجرهای شماره ۲ و ۳ و ۴ را با توجه به شکل نامنظم و متفاوت بودن ابعاد آنها به ترتیب در اندازه‌های ۱۰×۱۰ و ۵×۵ و ۱۰×۱۰ سانتی‌متر برش زدیم. برش نمونه‌ها در آزمایشگاه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس انجام یافت.



شکل ۱۲

شکل ۱۱



شکل ۱۴

شکل ۱۳



شکل ۱۶

شکل ۱۵



شکل ۱۸

شکل ۱۷



شکل ۱۹

شکل ۲۰

پس از انجام برش و پرداخت سطوح آجرها، پیش از شروع آزمایش‌های مقاومت فشاری، لایه‌ای از پودر سیمان را روی دو وجه از سطوح آجرها کشیده تا برخی از قسمت‌های متخلل سطوح آجرها پر شده و صاف گردد، سپس دو ورق پلاستیکی از نوع «پلی پروپیلن» یا همان ورق‌های PP را روی دو سطح اصلی آجرها که در تماس با جک‌های دستگاه فشار قرار می‌گیرد به منظور به حداقل رساندن میزان اصطکاک، قرار دادیم و در نهایت آجرها را بین جک‌های دستگاه تعیین مقاومت فشاری بتن قرار داده و آزمایش‌های مقاومت فشاری را انجام دادیم. سرعت فشار وارده به آجرها 1mm/min بود. آزمایش‌های مقاومت فشاری این آجرها در آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه تربیت مدرس انجام شد.



شکل ۲۱

شکل ۲۲



شکل ۲۳

شکل ۲۴



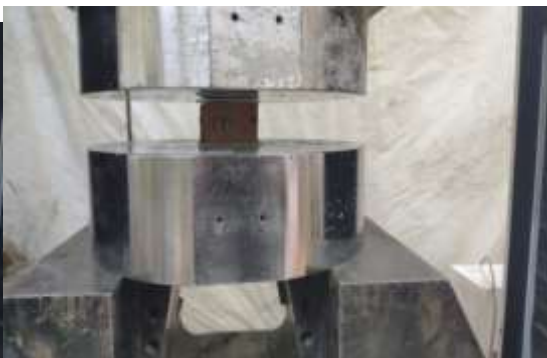
شکل ۲۶



شکل ۲۵



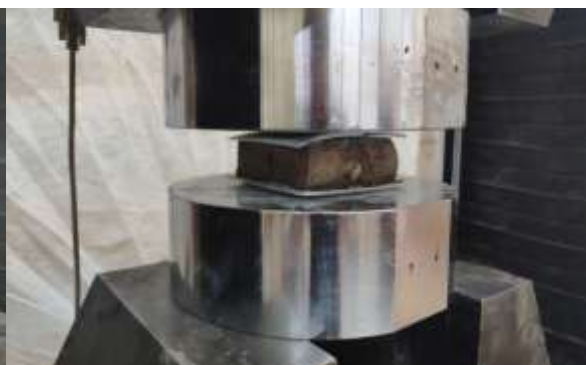
شکل ۲۸



شکل ۲۷



شکل ۳۰

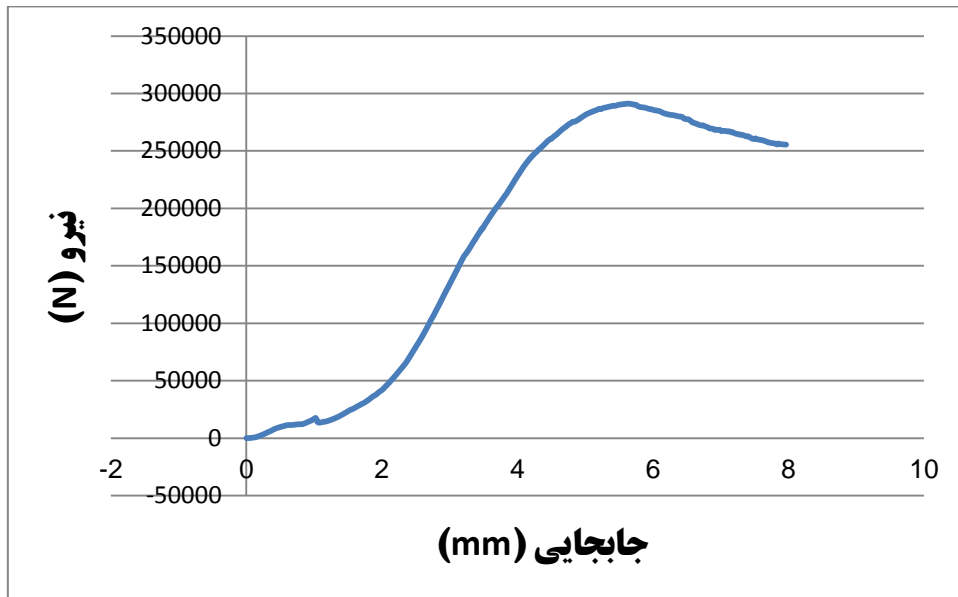


شکل ۲۹

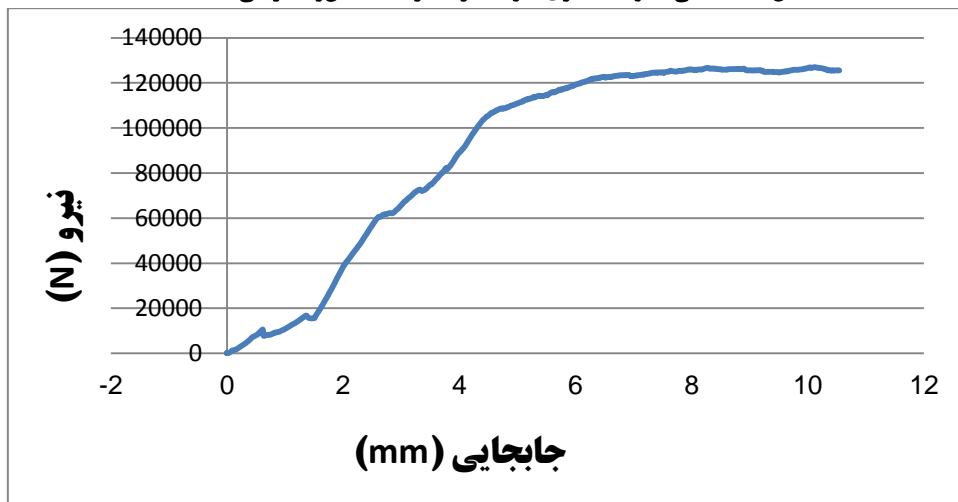
نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه آجرهای محوطه تخت سلیمان به قرار جدول زیر است:

جدول ۱- مقاومت فشاری نمونه آجرهای محوطه میراث جهانی تخت سلیمان (محسنزاده کریمی، ۱۳۹۹)

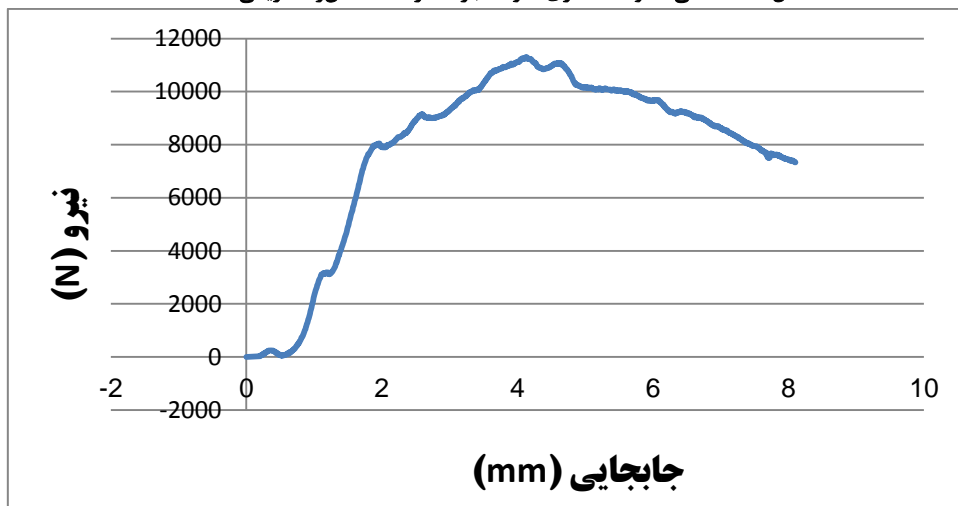
مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> )	مقاومت فشاری (N/mm <sup>2</sup> )	نمونه آجر
141.33	13.86	نمونه آجر شماره ۱
129.39	12.69	نمونه آجر شماره ۲
46.09	4.52	نمونه آجر شماره ۳
117.97	11.57	نمونه آجر شماره ۴



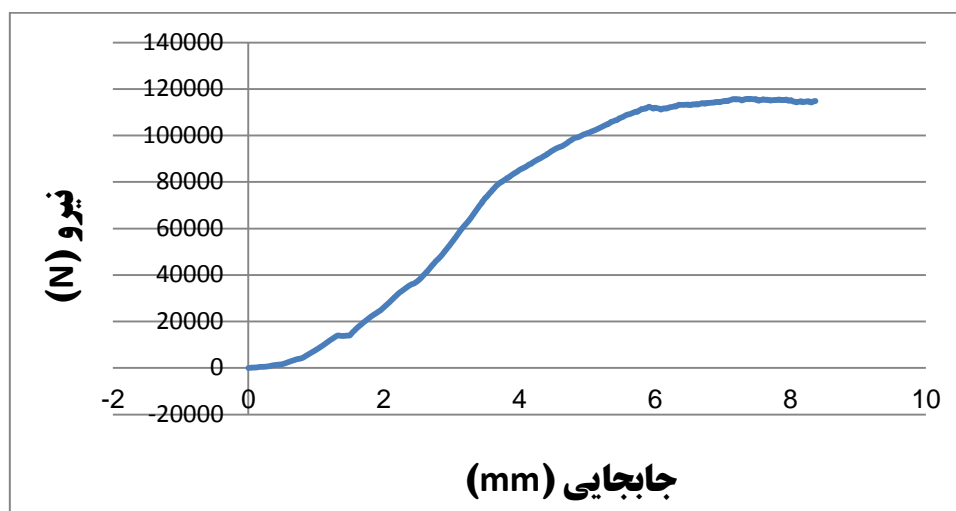
شکل ۳۱- منحنی مقاومت فشاری نمونه آجر شماره ۱ (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۳۲- منحنی مقاومت فشاری نمونه آجر شماره ۲ (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۳۳- منحنی مقاومت فشاری نمونه آجر شماره ۳ (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)



شکل ۳۴- منحنی مقاومت فشاری نمونه آجر شماره ۴ (محسن‌زاده‌کریمی، ۱۳۹۹)

شایان ذکر است که با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه آجرها که در شکل‌های بالا قابل مشاهده است، هر کدام از آجرها در طی فرآیند آزمایش مقاومت فشاری، یک نقطه اوج و پس از آن فرودی را طی می‌کند. آن نقطه اوج نشانگر تنش تسلیم یا به تعبیری ساده‌تر، بالاترین حد مقاومتی است که آجر پیش از شکستن، تحمل می‌کند و پس از رد شدن از آن نقطه، گسیختگی و شکسته شدن آجر آغاز می‌شود.

#### آزمون جذب آب روی نمونه آجرهای محوطه تخت سلیمان

روش آزمون جذب آب نیز بر اساس «استاندارد ملی شماره ۷» انجام گرفت (استاندارد ملی شماره ۷، بی‌تا: ۱۴-۱۵). شیوه انجام آزمایش بدین طریق بود که از قطعه یا تکه‌های باقی مانده نمونه آجرهای برش یافته برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، ۷ نمونه یا قطعه انتخاب کردیم که یک نمونه متعلق به آجر شماره ۱ و دو نمونه از هر کدام از آجرهای ۲ و ۳ و ۴ را برگزیدیم. نمونه‌ها را به مدت یک شبانه روز درون گرم‌خانه (دستگاه OVEN) در دمای ۱۱۵ درجه سانتیگراد قرار دادیم تا با از دست دادن رطوبت باقی مانده در خود، به طور کامل خشک شوند، پس از طی ۲۴ ساعت، نمونه‌ها را از دستگاه خارج و آنها را توزین کردیم. پس از این کار، نمونه‌ها را درون مخزنی پر از آب قرار داده، به گونه‌ای که آب در زیر سطوح نمونه‌ها نیز جریان یابد، سپس آب مخزن را به مدت حدود ۶ ساعت در حالت جوش نگه داشتیم و پس از این مدت، منبع حرارتی را قطع و مخزن آب حاوی نمونه آجرها را در دمای معمولی اتاق به مدت ۱۶ الی ۱۹ ساعت نگه داشته و پس از سپری شدن این مدت زمان، هر کدام از نمونه‌ها را از مخزن بیرون آورده و سطح آنها را با پارچه مرطوبی خشک و سپس توزین کردیم. لازم به یادآوری است در مورد آجرهای ۲ و ۳ و ۴ که از هر کدام، دو نمونه در آزمون جذب آب وجود داشت، یک نمونه از هر کدام را انتخاب و نتیجه همان را ذکر کرده‌ایم. در پایان، میزان جذب آب را از فرمول زیر که در «استاندارد ملی شماره ۷» قید شده بدست آوردیم.

$$\text{درصد جذب آب آجر} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100$$

$w_1$ : وزن نمونه خشک بر حسب گرم

$w_2$ : وزن نمونه پس از آزمون بر حسب گرم

جدول ۲- نتایج آزمون جذب آب نمونه آجرهای محوطه میراث جهانی تخت سلیمان (محسن‌زاده‌کریمی، ۱۳۹۹)

نمونه آجر	$W_1$ (گرم)	$W_2$ (گرم)	درصد جذب آب (%)
نمونه آجر شماره ۱	524.68	658.13	25.43
نمونه آجر شماره ۲	222.81	281.46	26.32
نمونه آجر شماره ۳	62.54	82.40	31.75
نمونه آجر شماره ۴	108.81	138.30	27.10



شکل ۳۴

شکل ۳۵

### بحث

امروزه مطالعات سازه‌های بناهای باستانی برای شناخت هرچه بیشتر جزئیات این بناها و همچنین ارائه طرح‌های حفاظت و مرمت کارآمد برای این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و عمدتاً کشورهایی که دارای سازه‌های باستانی قابل توجهی هستند، وارد پژوهش‌های جدی در این حوزه شده‌اند. از جمله کشورهایی که در آنها پژوهش‌های خوبی در این حوزه صورت گرفته است، می‌توان به ایتالیا و یونان اشاره کرد. برای مثال مقایسه نتایج پژوهش‌هایی که در دانشگاه‌های رم ایتالیا و سالونیک (تسالونیک) یونان در زمینه ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح به کار رفته در سازه‌های رومی و بیزانسی انجام شده است، با نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب در پژوهش حاضر، نکات جالب توجهی را در اختیار ما قرار می‌دهد. البته در پژوهشی که در دانشگاه رم صورت گرفته خاستگاه آجرها متفاوت و متعلق به بازه زمانی سده دوم الی چهارم میلادی بوده و تعداد نمونه آجرهای آزمایش شده نیز بیشتر از تعداد نمونه آجرهای پژوهش ما بوده است (۲۹ آجر). طبق آزمایش‌های صورت گرفته در دانشگاه رم، میانگین مقاومت فشاری نمونه آجرهای رومی  $17.02 \text{ N/mm}^2$  است (Giavarini and others, 2006: 110). در پژوهش دیگری که در مورد ویژگی‌های آجرهای دوران رومی و بیزانسی به دست آمده از یونان در دانشگاه سالونیک (تسالونیک) انجام شده، در مجموع ۱۰۵ نمونه آجر از بناهای مختلف رومی و بیزانسی یونان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (Stefanidou and others, 2014: 3). طبیعتاً این تعداد نمونه آجر که از بناهای گوناگونی هم به دست آمده، جامعه آماری نسبتاً بالایی است و از این نظر اطلاعات ارزشمندی را برای تحلیل ویژگی‌های آجرها در اختیار پژوهشگران این حوزه قرار می‌دهد. در خصوص ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آجرهای رومی، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به محوطه باستانی پالاتیانو متعلق به سده چهارم میلادی با مقاومت فشاری  $20.72 \text{ Mpa}$  و کمترین حد مقاومت فشاری مربوط به محوطه باستانی دیون متعلق به سده چهارم میلادی با مقاومت فشاری  $4.62 \text{ Mpa}$  است (Stefanidou and others, 2014: 5). در مورد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آجرهای دوره بیزانسی، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به Panagia Acheropiitos متعلق به سده هفتم میلادی با میانگین مقاومت فشاری  $16.08 \text{ Mpa}$  و کمترین حد مقاومت فشاری مربوط به کلیسای Hagia Aikaterini متعلق به سده چهاردهم میلادی با میانگین مقاومت فشاری  $4.50 \text{ Mpa}$  است (Stefanidou and others, 2014: 6). لازم به ذکر است که پراکندگی و متغیر بودن مقادیر مقاومت آجرها حتی در یک بنای مشخص مانند Panagia Acheropiitos که از ۱۱ تا ۱۸ مگاپاسکال و در بنای Hagia Sophia از ۱۴ تا ۱۷ مگاپاسکال را در بر می‌گیرد، قابل توجه است (Stefanidou and others, 2014: 8).

ناگفته نماند که جامعه آماری ما در پژوهش حاضر به دلیل برخی از محدودیت‌ها، بسیار کمتر از دو پژوهش ذکر شده در بالا است و همچنین در آن دو پژوهش، نمونه آجرهای مورد بررسی از محوطه‌ها و بناهای گوناگونی به دست آمده یعنی محدوده جغرافیایی گسترده‌تری را شامل می‌شود که مسلماً نتایج آشکارتری را در اختیار پژوهشگران این حوزه قرار می‌دهد، اما نمونه آجرهای مورد بررسی ما در این پژوهش، فقط از یک محوطه به دست آمده است.

از جمله معیارهای مهم در استحکام و پایداری آجر، مقاومت فشاری بالا و جذب آب آن است (حسینی و سیدین خراسانی، ۱۳۹۵: ۳۹۵). در واقع مقاومت فشاری آجر، یکی از مشخصه‌های فنی مهم آن است که با ویژگی مهمی چون پایداری آجر نیز در ارتباط مستقیم است. بعلاوه مقاومت فشاری آجر با توان باربری اجزای ساختمانی ساخته شده از آجر، مانند ستون یا دیوار باربر مرتبط است (رحیمی، ۱۳۹۲: ۲۱۸). مقاومت فشاری آجر به کیفیت مواد خام و دمای پخت آن بستگی داشته که امروزه با بهبود شرایط تهیه آجر و بالا رفتن سطح کیفی مواد اولیه آن، مقاومت فشاری نیز به نسبت مطلوبی افزایش یافته است (حسینی و سیدین خراسانی، ۱۳۹۵: ۳۹۵).

حداقل تاب یا مقاومت فشاری برای آجرهای رسی طبق استاندارد ملی شماره ۷ ایران برابر با جدول زیر است.

جدول ۳- حداقل مقاومت فشاری برای آجرهای رسی (استاندارد ملی شماره ۷)

نوع آجر	مقاومت فشاری کیلوگرم بر سانتی متر مربع
آجر دستی	80
	مقاومت بالا
	175
آجر ماشینی	مقاومت متوسط
	125
	مقاومت کم
	85

جدول زیر نیز کیفیت آجرها را بر اساس میزان مقاومت فشاری آنها دسته‌بندی کرده است (حسینی و سیدین خراسانی، ۱۳۹۵: ۳۹۵).

جدول ۴- کیفیت آجرها بر اساس میزان مقاومت فشاری (حسینی و سیدین خراسانی، ۱۳۹۵)

نوع آجر	مقاومت	میزان تحمل
آجر دست‌ساز	مرغوب	۸۰ kg/cm <sup>2</sup>
آجر ماشینی	کم	۸۵ kg/cm <sup>2</sup>
	متوسط	۱۵۰ kg/cm <sup>2</sup>
	زیاد	۲۰۰ kg/cm <sup>2</sup>

شایان ذکر است که میزان یا قابلیت جذب آب در آجرها، یکی دیگر از معیارهای مهم ارزیابی کیفیت و دوام آنهاست (رحیمی، ۱۳۹۲: ۲۱۵). همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در کنار مقاومت فشاری فاکتور دیگر در تعیین استحکام و پایداری آجر، جذب آب آن است. در ارتباط با ضریب جذب آب بر اساس آنچه در استاندارد ملی شماره ۷ (آجر رسی-ویژگی‌ها و روش‌های آزمون) آمده است؛ درصد وزنی جذب آب در آزمایش ۲۴ ساعته در مورد آجرهای ماشینی نباید از ۱۶ و در مورد آجرهای دستی از ۲۰ بیشتر شود و در هر دو نوع آجر از ۸ کمتر باشد (استاندارد ملی شماره ۷، بی تا: ۱۹). حسین زمرشیدی نیز در مورد مکش یا جذب آب آجر می‌گوید: «مکش آجر عبارت است از قدرت جذب آن در تماس با آب و در واقع این میزان، رابطه مستقیمی با عملکرد آجر در تماس با ملات دارد. به این معنی که آجر مرغوب نباید بعد از ۵ الی ۶ ساعت در داخل آب ماندن، ۴۰ درصد آب به خود جذب نماید، در غیر این صورت نامرغوب بودن آن را نشان خواهد داد که این عامل بر چسبندگی میان ملات و آجر و در نتیجه مقاومت نهایی آن تاثیر می‌گذارد» (زمرشیدی، ۱۳۸۷: ۱۶۷). نتایج پژوهش صورت گرفته در دانشگاه سالونیک



یونان در پیوند با آزمون جذب آب روی آجرهای رومی و بیزانسی در بازه ۱۳ الی ۳۰ درصد قرار گرفته (Stefanidou and others, 2014: 9) که با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، قابل مقایسه است.

### نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام گرفته در این پژوهش، میانگین مقاومت فشاری چهار نمونه آجر محوطه میراث جهانی تخت سلیمان ۱۰/۶۶ مگاپاسکال (Mpa) یا  $10.8/70 \text{ kg/cm}^2$  است که بر اساس میزان مقاومت فشاری آجر دست‌ساز مندرج در جدول‌های ۴ و ۳ در رده آجر با کیفیت مرغوب قرار می‌گیرد. همچنین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری چهار نمونه آجر محوطه تخت سلیمان که در جدول ۱ آمده، نشان‌دهنده این است که به غیر از نمونه آجر شماره ۳ که مقاومت فشاری آن کم است، سایر نمونه‌ها در مقایسه با میزان مقاومت فشاری آجر دست‌ساز مندرج در جدول‌های ۴ و ۳، در رده آجر با کیفیت مرغوب و حتی در مقایسه با میزان مقاومت فشاری آجر ماشینی، در رده آجر با کیفیت متوسط قرار دارند. با توجه به آزمون جذب آب انجام گرفته در پژوهش حاضر، میانگین درصد جذب آب نمونه آجرهای مورد بررسی ۲۷/۶۵ درصد است که از حداکثر میزان ذکر شده برای جذب آب در استاندارد ملی شماره ۷، بیشتر است، اما با در نظر گرفتن دیدگاه زمرشیدی و همچنین با مقایسه نتایج آزمون جذب آب آجرهای رومی و بیزانسی که در بالا به آن اشاره شد، همین میانگین درصد جذب آب در پژوهش حاضر نیز برای آجرهای محوطه تخت سلیمان، کیفیت قابل قبولی به شمار می‌رود و با توجه به رابطه مستقیم جذب آب آجر با ملات، چسبندگی ملات با آجرهای مورد نظر نیز با مشکل چندانی مواجه نمی‌شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب نمونه آجرهای محوطه میراث جهانی تخت سلیمان و مقایسه آن با نتایج چنین آزمایش‌هایی روی نمونه آجرهای رومی و بیزانسی و نیز استانداردهای ذکر شده برای ارزیابی کیفیت آجرهای امروزی، نشان‌دهنده این است که نمونه آجرهای مورد بررسی در پژوهش حاضر، در رده آجرهای نسبتاً مرغوب قرار می‌گیرند و به طور متوسط دارای استحکام نسبتاً زیاد و قابل توجهی هستند. این پژوهش به درک رفتار سازه‌های بناهای آجری تاریخی کمک می‌کند و همچنین اطلاعاتی را ارائه می‌دهد که مرمت‌گران و مهندسان می‌توانند بر اساس آن‌ها به مرمت و بهسازی سازه‌های باستانی اقدام کنند، تا از مشکلات ایجاد شده توسط ناسازگاری مصالح جدیدی که برای مرمت بناها استفاده می‌شود با مصالح اصلی سازه‌های تاریخی، جلوگیری شود.

### سپاسگزاری

نگارندگان از استاد گراندنر جناب آقای دکتر میثم لباف خانیکی به دلیل راهنمایی‌های ارزنده ایشان و از همیاری و همکاری‌های بی‌دریغ آقایان دکتر حسین صادق‌اوغلی، مهندس چنگیز محسن‌زاده کریمی، مهندس آرسام محمودی، مهندس سرکوت احمدی، مهندس طاهر کوچی و همچنین کارشناسان و مسئولین گرامی محوطه میراث جهانی تخت سلیمان از جمله آقایان مهندس قدرت علی‌نیا و مهندس حمید امان‌اللهی و مسئولین و پرسنل گرامی آزمایشگاه راه و ترابری و آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه تربیت مدرس کمال سپاسگزاری را دارند.

### پی‌نوشت

- ۱- ذکاوت‌زاده، یدالله، ۱۳۸۸. بررسی عناصر باربر و غیر باربر در معماری هخامنشی (بررسی موردی بناهای تخت جمشید)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- رضایی‌منفرد، مسعود، ۱۳۹۰، بازخوانی مهندسی سازه در محوطه میراث جهانی تخت جمشید با استفاده از تحلیل عددی (اجزاء محدود)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس.
- ۳- احمدی، سرکوت، ۱۳۹۴، تحلیل سازه‌های تکنیک‌های معماری ایران از آغاز دوره تاریخی تا پایان دوره قاجار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی.
- ۴- محسن‌زاده کریمی، میلاد، ۱۳۹۴، بررسی و تحلیل سازه‌ای و لرزه‌ای کاخ آپادانای تخت جمشید بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی.

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱۱- تصویر نمونه آجر شماره ۱ محوطه تخت سلیمان، پیش از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۲- تصویر نمونه آجر شماره ۱ محوطه تخت سلیمان، پس از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۳- تصویر نمونه آجر شماره ۲ محوطه تخت سلیمان، پیش از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۴- تصویر نمونه آجر شماره ۲ محوطه تخت سلیمان، پس از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۵- تصویر نمونه آجر شماره ۳ محوطه تخت سلیمان، پیش از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۶- تصویر نمونه آجر شماره ۳ محوطه تخت سلیمان، پس از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۷- تصویر نمونه آجر شماره ۴ محوطه تخت سلیمان، پیش از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۸- تصویر نمونه آجر شماره ۴ محوطه تخت سلیمان، پس از برش و پرداخت (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۱۹- تصویر برش نمونه آجرهای محوطه تخت سلیمان به وسیله دستگاه آسفالت‌بر (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۰- تصویر پرداخت یا صاف کردن سطوح نمونه آجرهای محوطه تخت سلیمان به وسیله دستگاه سنگ‌ساب (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۱- تصویر کشیدن پودر سیمان روی دو سطح اصلی آجرها (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۲- تصویر قرار دادن ورق‌های پلی پروپیلن روی دو سطح اصلی آجرها (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۳- تصویر نمونه آجر شماره ۱ محوطه تخت سلیمان در بین جک‌های دستگاه مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۴- تصویر نمونه آجر ترک خورده و شکسته شده شماره ۱ محوطه تخت سلیمان پس از اعمال بار و اتمام آزمایش مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۵- تصویر نمونه آجر شماره ۲ محوطه تخت سلیمان در بین جک‌های دستگاه مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۶- تصویر نمونه آجر ترک خورده و شکسته شده شماره ۲ محوطه تخت سلیمان پس از اعمال بار و اتمام آزمایش مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۷- تصویر نمونه آجر شماره ۳ محوطه تخت سلیمان در بین جک‌های دستگاه مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۸- تصویر نمونه آجر ترک خورده و شکسته شده شماره ۳ محوطه تخت سلیمان پس از اعمال بار و اتمام آزمایش مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۲۹- تصویر نمونه آجر شماره ۴ محوطه تخت سلیمان در بین جک‌های دستگاه مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۳۰- تصویر نمونه آجر ترک خورده و شکسته شده شماره ۴ محوطه تخت سلیمان پس از اعمال بار و اتمام آزمایش مقاومت فشاری (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۳۵- قرار دادن نمونه آجرها درون دستگاه OVEN جهت رطوبت زدایی و خشک شدن کامل (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)
- شکل ۳۶- توزین نمونه آجر شماره ۱ پس از خروج از مخزن آب (محسن‌زاده کریمی، ۱۳۹۹)

## کتابنامه

- ۱- استاندارد ملی شماره ۷ (آجر رسی-ویژگی‌ها و روش های آزمون)، بی تا.
- ۲- امان‌اللهی، حمید، ۱۳۹۴، «مروری بر پیشینه تاریخی، فرهنگی و پژوهشی محوطه تخت سلیمان». فصلنامه علمی، فنی، هنری اثر، شماره ۶۹، تابستان ۱۳۹۴، صص: ۲۰-۳.
- ۳- حسینی، باقر، سیدین خراسانی، زهرا، ۱۳۹۵، آجر در معماری «زیبایی‌ها و کارایی‌ها»، تهران: انتشارات دانشگاه تربیت دبیر رجائی، چاپ اول.

- ۴- رحیمی، حسن، ۱۳۹۲، مصالح ساختمانی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم.
- ۵- زمرشیدی، حسین، ۱۳۸۷، معماری ایران «اجرای ساختمان با مصالح سنتی»، تهران: انتشارات زمرد.
- ۶- سرفراز، علی اکبر، کیانی، محمد یوسف، ۱۳۴۷، تخت سلیمان، تبریز: انتشارات موسسه تاریخ و فرهنگ ایران (دانشکده ادبیات و علوم انسانی تبریز)، چاپ اول.
- ۷- فروتنی، سام، ۱۳۹۶، مصالح و ساختمان، تهران: انتشارات روزنه، چاپ هجدهم.
- ۸- گوبل، روبرت، ۱۳۸۴، گل‌مهرهای تخت سلیمان «جستاری در مَهرشناسی اواخر ساسانی»، ترجمه فرامرز نجد سمیعی، تهران: سازمان میراث فرهنگی و گردشگری، پایگاه پژوهشی مجموعه تاریخی تخت سلیمان، چاپ اول.
- ۹- مجیدی، حسین، ۱۳۹۸، ایرانشهر «شناخت شهرهای ایران باستان در دوران هخامنشیان، اشکانیان و ساسانیان»، تهران: انتشارات پازینه، چاپ دوم.
- ۱۰- ناومان، رودلف، ۱۳۸۲، ویرانه‌های تخت سلیمان و زندان سلیمان، ترجمه فرامرز نجد سمیعی، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، چاپ دوم.
- ۱۱- هنینگ، هانس، دراوستن، فون، ناومان، رودلف، ۱۳۸۲، تخت سلیمان، ترجمه فرامرز نجد سمیعی، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، چاپ دوم.
- 12- K. KOURKOULIS, STAVROS. Fracture and Failure of Natural Building Stones, Applications in the Restoration of Ancient Monuments. Carlo Giavarini, Alessandro Samuelli Ferretti, Maria Laura Santarelli. MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROMAN "OPUS CAEMENTICIUM". National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2006.
- 13- M. Stefanidou , I. Papayianni , V. Pacht. Analysis and characterization of Roman and Byzantine fired bricks from Greece, 2014.
- 14- Roca, pere. Cervera, Miguel. Gariup, Giuseppe and Pelà, Luca. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches, 2010.

