

The Role of Building Materials Selection on the Restoration of Historical Monuments of IRAN and Sustainable Environment

Erafaneh Sadat Ahmadi ¹, Najmeh Dashtaki ^{2*}, Peyman Pilehchiha³

1. Researcher in field of Urban Engineering, Department of urban Engineering, Faculty of Architecture and Urbanism, Soore International University, Tehran, Iran.
2. Assistant professor, Department of urban Engineering, Faculty of Architecture and Urbanism, Soore International University, Tehran, Iran.
3. Postdoctoral researcher, RWTH University, Aachen, Germany.

Abstract

The process of manufacturing and producing new materials by utilizing the recycling of mineral and ceramic materials and powders into cementitious materials and various application capabilities in the appropriate color and durability of bricks is of interest to construction, architecture and urban development projects. With the emergence of advanced technologies, the use of various types of mortars, powders and material pastes, and especially modern cements, transforms their physical and mechanical properties. In addition to modern façades and buildings, these mortars also serve protective and restorative functions in historic brick masonry. It is very important to investigate effective powdered minerals, permitted additives, the method of application and use of ceramic oxides and its effect on the properties of cement and mortar. Cement mortar containing ceramic pigment with a mixing design of stone powder and fine grains has yielded effective results in setting time tests, compressive strength tests and abrasion resistance tests. This research was conducted based on laboratory tests, workshop experiments, and microscopic observations and tests using an exploratory and comparative method. The results obtained indicate that most pigments in oxide-mineral ceramics, along with permitted additives, will cause color diversity in the environment, beautify cities, and increase compressive strength, abrasion resistance, and protection in the restoration process. These pigments not only harmonize with modern brick buildings for application for implementation, but also create a desirable and effective coexistence in historical buildings in Iran for restoration and increase compatibility with a sustainable environment.

Review History

Received: Aug 26, 2025

Accepted: Sep 21, 2025

Keywords

Manufacturing Process
Sustainable Environment
Construction Materials
Colored Cement
Restoration of Historic
Buildings
IRAN

This article is based on a research project conducted at the Research Institute of Cultural Heritage, entitled "Colored Cement for Pointing and Surface Coating of Brick Masonry."

* Corresponding Author Email: dashtaki@soore.ac.ir



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نقش انتخاب مواد و مصالح ساختمانی بر محیط زیست پایدار در مرمت بناهای تاریخی ایران مورد کاوی؛ ملات اتصال و بندکشی بناهای آجری[#]

عرفانه سادات احمدی^۱، نجمه دشتکی^{۲*}، پیمان پیله چی ها^۳

۱. پژوهشگر حوزه شهرسازی، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی سوره، تهران، ایران.
۲. استادیار، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی سوره، تهران، ایران.
۳. پژوهشگر پسادکتری، دانشگاه RWTH، آخن، آلمان.

چکیده

تاریخچه داوری

فرآیند ساخت و تولید مصالح نوین با بهره گیری از بازیافت مصالح و پودرهای معدنی و سرامیکی در مواد و مصالح تشکیل دهنده سیمان و قابلیت های کاربری متنوع در رنگ مناسب و دوام آجر، مورد توجه پروژه های عمرانی، معماری و شهرسازی است. با ظهور فناوری های برتر، استفاده از انواع ملات، پودر و خمیر مصالح و به ویژه سیمان های نوین، خواص فیزیکی و مکانیکی آن ها را متحول می سازد. انواع این ملات ها علاوه بر نما و بناهای امروزی، در بناهای آجری تاریخی نیز کاربردهای حفاظتی و ترمیمی دارد. بررسی مواد معدنی پودری اثربخش، افزودنی های مجاز، روش به کارگیری و استفاده از اکسیدهای سرامیکی و تأثیر آن بر خواص خمیر و ملات پایه سیمانی بسیار مهم است. ملات سیمانی حاوی رنگدانه سرامیکی با طرح اختلاط پودر سنگ و ریزدانه پاسخ های مؤثری در تست و آزمون زمان گیرش، آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت سایشی، ثبت و به انجام رسانده است. این تحقیق بر اساس مشاهدات و تست آزمایشگاهی، کارگاهی و تصاویر میکروسکوپی به روش کاوشی و مقایسه ای صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که اغلب رنگدانه ها در سرامیک های اکسیدی - معدنی همراه با افزودنی های مجاز موجب تنوع رنگی در محیط، زیبایی شهرها و افزایش مقاومت فشاری، مقاومت سایشی و حفاظت، در فرآیند مرمت خواهد شد. این رنگدانه ها نه تنها بر تناسبات با بناهای آجری امروزی جهت اجرا تأثیرگذار است بلکه در بناهای تاریخی ایران جهت مرمت، همزیستی مطلوب و مؤثر ایجاد می کند و سازگاری با محیط زیست پایدار را افزایش می دهد.

کلمات کلیدی

فرآیند ساخت
محیط زیست پایدار
مواد و مصالح
سیمان رنگی
مرمت بناهای تاریخی
ایران

۱- مقدمه

آثار تمدن امروزی که آلودگی و تخریب محیط زیست را با خود به ارمغان داشته، در همه جا مشاهده می گردد. (Ahmadi & Pilechiha, 2021) آلودگی خاک امروزه به یکی از مسائل مهم محیط زیست تبدیل شده و از این جهات که هم برای انسان و هم موجودات زنده می تواند خطرناک باشد و حیات آن ها را تهدید کند و

گسترش صنایع، پیشرفت فناوری و تغییر سبک زندگی منجر به تولید انواع پسماند توسط بشر و مشکلاتی روزافزون بدل شده است. تهیه مصالح ساختمانی، انرژی بسیار زیادی را به خود اختصاص داده و حتی روستاها و دشت ها نیز دیگر بکر نیستند و

[#] این مقاله بر پایه طرح پژوهشی پژوهشگاه میراث فرهنگی تحت عنوان «سیمان رنگی جهت بندکشی و پوشش نمای بناهای آجری» می باشد.

* رایانامه نویسنده مسئول: dashtaki@soore.ac.ir

استفاده‌ی هوشمندانه از آجر می‌تواند گفتگویی بین گذشته و حال ایجاد کند و بافت شهری را غنی سازد (Al-Mudhyan, 2022). چراکه آجرها را می‌توان در الگوها، رنگ‌ها و بافت‌های مختلف چید و به معماران اجازه داد تا نماهای بصری جذابی ایجاد کنند که با بافت تاریخی طنین‌انداز می‌شوند و درعین حال برای سلیقه‌های معاصر جذاب هستند. (Al-Koury, 2022). در گذشته نیز با استفاده از ساروج، ملات پایه آهکی، خمیر آجرهایی که نمونه‌اش در خانقاه بایزید بسطامی یافت می‌شود (pirnia, 2007) یا بنایی که از ترکیب آجر و کاشی به وجود می‌آمد و امروزه مرمت نیازمند مدیریت در چنین پروژه‌هایی می‌باشد (ahmadi, 2012) مطالعات بر تطبیق‌پذیری اشکال و چیدمان‌های آجری تأکید دارند و ارتباطات احتمالی با ملاحظات هندسی برای چیدمان و طراحی آجر را پیشنهاد می‌دهد. (Ainechi & Valibeig, 2020). اغلب در تفکر، مهارت و فرهنگ معماری ایران، تراش سنگ و سنگ نما و آجر به شکل‌ها و نقش‌های خاص و چینش آن‌ها برحسب سازماندهی‌های متنوع است. (Salehi kakhki & Taghavinejad, 2018) آجرها در رویکردهای ساخت و مرمت اخیر، بیشتر بر نظام‌مندی هندسی و نظم تأکید داشتند و بر اساس حرکت هندسی، جای دادن بلوک‌ها و آجرها در تناسبات هنری و در رسته‌های مختلف کاربری، شکل موردنظر را به وجود می‌آوردند؛ این‌گونه پروژه‌های تلفیقی - ترکیبی نیازمند مشاور حرفه‌ای برای اجرای پروژه‌های متنوع، ساخت و تولید صنعتی همراه با پایداری شهری، حفظ محیط‌زیست، نوآوری فنی و ثبت جهانی است (Ahmadi, 2012).

اسناد فراست به موضوع هویت‌بخشی به سیمای شهر و روستا و بازآفرینی و روزآمدسازی مواد و مصالح در معماری ایرانی اشاره دارد (law, 2016). فعالیت‌های معماری یکی از معیارهای تأثیرگذار عوامل محیطی است آنچنان‌که حتی کیفیت سنگ‌دانه‌ها مهم تلقی میگردد چرا که به‌طور قابل توجهی بر خواص فیزیکی و محیط‌زیستی ملات تأثیر می‌گذارد و سنگ‌دانه‌های طبیعی در ملات معمولاً از نظر کیفیت بر سنگ‌دانه‌های بازیافتی مخلوط برتری دارند و آن‌ها را برای ساخت‌وساز پایدار مناسب‌تر می‌سازند. (Piccinali et al., 2022) اما به دلیل کمبود سنگ‌دانه‌های طبیعی با کیفیت بالا، روند رو به رشدی به سمت استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در بتن و ملات که منجر به حفظ

همان‌طور که انسان می‌بایست از خاک استفاده ببرد آن را دچار مشکل می‌کند. (Ghiasi & Kamalabadi, 2025) به این خاطر که از برترین صفات معماری که برای انسان مطلوب است، ایجاد حس آگاهی و حضور در فضا است. (Naseri et al., 2024) در این راستا آدمی با انتخاب‌های مناسب در بهسازی و ترکیب مواد و ماندگاری مصالح ساختمانی با فناوری‌های نوین که نیاز و ضرورت امروز است، خود را مسئول می‌بیند. (Ahmadi et al., 2021) تا آنچه دیدنی است مفید و پایدار باشد. در این عصر که افزایش سطح رفاه و میزان جمعیت ازجمله عوامل ایجاد سیر صعودی در رشد نرخ و سرانه تولید پسماند در جهان بشمار می‌رود (Mokhtarani, 2025) مصالح ساختمانی سبز در ساخت‌وساز با فراهم کردن مزایای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی می‌توانند فرآیند انتخاب برای طراحی ساختمان پایدار را تسهیل نمایند (Yousif et al., 2023) با استفاده از پودرهای پایه مواد، سیمان و مشتقات آن می‌توان در فرآیند ساخت‌وساز نقش کلیدی ایفا نمود و بدین‌جهت، انواع سیمان‌های کاربردی محصول و کالایی استراتژیک در پیشبرد اهداف عمرانی کشورها به شمار می‌رود و از سیمان تولیدی در کشور به شکل بهینه استفاده‌شود تا از اتلاف آن جلوگیری شود. در ترکیب سیمان‌های نوین، تغییراتی از قبیل افزودن سرامیک‌های اکسیدی، میکرو ذرات، افزودنی‌های مختلف و رنگ‌دانه‌های سرامیکی لازم است (Ahmadi et al., 2021) مواد نانو به دلیل ماهیت فوق ریزدانه و سایر انواع نانومواد نو ترکیب، درپچه‌های جدیدی را برای فناوری‌های آینده می‌گشایند که پیشرفت‌های انقلابی در فناوری‌های کلیدی ایجاد می‌کنند. (Bemanian et al., 2021; Gholami 2012; Aliabadi et al., 2018; Aliabadi et al., 2021; Rostam et al., 2015; Mahdaveinejad et al., 2013) با روش‌های میکرو و نانو فناوری، انواع سیمان و ملات از نظر کیفیت، ماندگاری، بهبود مشخصات فنی مانند مقاومت و از نظر اقتصادی در صرفه‌جویی هزینه‌ها به عنوان یک گزینه کارآمد است. انتخاب این مصالح همچنین مستقیماً بر پایداری تأثیر می‌گذارد و ساخت‌وساز ساختمان، منابع طبیعی قابل توجهی مصرف می‌کند. (Kumar et al., 2021). انتخاب مصالح و کاهش تأثیر نامناسب محیط‌زیستی در طراحی ساختمان پایدار ضروری است و پارامترهای ارزیابی تأثیر چرخه حیات در انتخاب این مصالح محوری هستند. (Ahmad & Thaheem, 2022) در این راستا

منابع طبیعی، محافظت از محیط‌زیست و تشویق به ساخت‌وساز پایدار می‌شود به ارائه راه‌حل‌های پایدار پرداخته‌اند. (Zaben et al., 2021)

در حقیقت مواد و مصالح، آن‌چنان‌که بعضی می‌پندارند و عمل می‌کنند، یک عنصر اضافه شده یا فرعی و جزئی کم‌اهمیت که پس از وضوح یافتن طرح به آن توجه شود نیست. مواد و مصالح را همواره باید رکنی اساسی در طراحی معماری به شمار آورد (Falahat, 2006). سؤال اساسی این است که بر مبنای تحولات و دستاوردهای علمی، فناوری و تجربیات نوین چه مواد، مصالح و روشی‌هایی جهت حفاظت مؤثر و مرمت پایدار بناها و به‌ویژه بناهای قدیمی یا آجری معاصر، پیشنهاد می‌شود که پایداری شهری و معماری پایدار را از لحاظ محیط زیست افزایش دهد؟ چرایی انتخاب مواد و مصالح ساختمانی و تأثیر آن بر محیط‌زیست پایدار و چگونگی فرآیند آن در فرآیند مرمت بناهای تاریخی با استفاده از ملات اتصال و بندکشی بناهای آجری نیازمند پژوهش هستند. لذا در پژوهش پیش‌رو نتایج تست‌ها و آزمون‌های ویژه با کمترین آسیب برای محیط‌زیست ارائه شده است.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- آجر و جایگاه آن در معماری

این مهم که معماری کهن ایران با هویت و پیشینه غنی خود تابع الگوهایی است که از قواعدی خاص و مشخص پیروی می‌کند و همین امر موجب انسجام و ماندگاری این الگوها شده است (Hoseini et al., 2025) توجه را معطوف به روند تغییرات فنی از گذشته دور تا امروز می‌کند که جهت تولید آجر و هنر آجرکاری در مسیر تحولات فرهنگی ایران با تاریخ کهن و درخشان خود توانسته است در این مناطق و در عرصه‌های بین‌المللی الگویی مناسب و قدرتمند برای هنرمندان و معماران معاصر در جهان باشد و فضا را برای حضور موفق آن‌ها مهیا کند. علی‌رغم نبوغ، ذوق و هنر ذاتی هنرمندان و معماران این آب‌و‌خاک، گام‌های چندان مؤثری را در عرصه‌های شهرسازی و معماری معاصر این خطه مشاهده نشده است. نهادینه کردن الگوهای به‌غایت زیبا و هنرمندانه بناها و آجرکاری ایران، می‌تواند پیش‌زمینه‌ای برای نگاه نوین در فضای معماری شهرها باشد. (Vahdat-talab, 2014) آجر به‌عنوان سازه‌ای باقابلیت‌های بصری فراوان از نظر شکل، رنگ، اندازه و فرم، در

دوره‌های طولانی از تاریخ معماری ایران، بناهایی مستحکم و ماندگار را به وجود آورده است. زاینده‌گی فکری، روش‌های طراحی نوین امروزی، ابزار فنی متنوع، امکانات فراوانی را به دست معماران داده است که باوجود مدرن بودن، وسیله‌ای برای شکستن روح حساس و زیباشناس آن‌ها است. البته تنها آجر وسیله شناخت این زیبایی روحی نیست و عناصر بسیاری نیز این عمل را به خوبی انجام می‌دهند، ولی فرق بین آن‌ها در این است که آجر قابلیت ایفای هر منظوری را دارد و باوجود گذشت قرون متمادی هنوز کارا و مدرن است. آجر یکی از معدود نشانه‌های تداوم و تحول در میان فرآورده‌های ساختمانی است که می‌تواند بین خاطره آفرینی و کشف محصول، پل بزند (Afshar, 2012). مواد اولیه آجر و حتی یک ساختمان آجری جزئی از طبیعت است و هم‌آوایی آن را نه تنها به هم نمی‌زند بلکه رنگ و فرم بدیعی نیز به آن می‌بخشد. رنگ‌های متنوع خاک و بخصوص رنگ اخرازی آجر به‌ویژه در زمینه آسمان آبی و مجاورت سبزه‌زار، زیبایی چشمگیری خلق می‌کند که کمتر می‌توان مشابه آن را در سایر مصالح به کار گرفته در ساختمان و به‌ویژه مصالح جدید دید. همچنان که مطالعات اخیر دسته‌بندی چیدمان‌های آجری در بنا و اشکال مختلف هندسی و طراحی سرآمد و پایدار به‌وسیله آن‌ها را بررسی می‌کنند، اما به‌طور خاص به مواد سازنده پیچیده نما نمی‌پردازند (Ainechi, & Valibeig, 2020) با اینکه کمتر کسی را می‌توان سراغ داشت که از نمای آجری در کوچه‌های قدیمی به وجد نیاید (Bahreman, 2012) و از آنجا که الگوهای استفاده‌شده در هندسه نیز برگرفته از طبیعت هستند (kharazmi, 2013; Embi, 2012) به‌طور مثال هندسه فراکتال که رابطه بین طبیعت و معماری را آشکار می‌کند (Guan et al., 2024) آجر استفاده‌شده در بناها و در این تزیینات معماری، تلفیقی زیبا با طبیعت پیدا می‌کند. علاوه بر دوام، ارزانی و کارایی ساده، خاصیت مهم آجر را باید در قابلیت آن در ایجاد نقوش و بافت‌های گوناگون جستجو کرد. نماهای آجری ترکیب متعادلی از بافت‌های متنوع را ارائه می‌دهند که با حرکت‌های عمودی و افقی آجرها پدید آمده‌اند. پس‌و‌پیش نشستگی آجرها نیز هندسه و بازی خاصی از تنوع در سایه‌روشن‌ها ایجاد می‌کنند.

خودبستگی و تکیه بر مصالح بوم‌آورد یکی از اصول معماری ایرانی بوده و آجر از جمله مصالح بومی اقلیمی با میزان دسترسی بسیار بالا در ایران است. باگذشت زمان بناهای آجری به‌تدریج

طرح‌های پیچیده، مشکل به نظر برسد؛ که می‌توان پوشش‌های میکرو- نانو فناوری شده غبار گریز و آب‌گریز محافظت این نماهای پیچیده و مرمت آن‌ها را تضمین نمود. (Moradpour, 2014)

۲-۲- ملات اتصال و بندکشی آجرها و جایگاه آن در مرمت

به‌طور کلی سیمان بر پایه مواد معدنی نوعی ملات و خمیر سیمانی غالباً در معرض دید است که با افزودن رنگ، افزودنی‌های مجاز و بافت به نمای آن، برای کاربری‌های معماری و به‌ویژه بندکشی آجری مورداستفاده قرار می‌گیرد. لازم است به لحاظ جذابیت و زیبایی‌شناسی رنگ‌ها در شناسایی و انتخاب مواد اولیه، مصالح کاربردی، ترکیب ملات و پرداخت سطح آن دقت و توجه لازم اعمال شود تا ظاهر معماری دلخواه و موردنظر نیز به دست آید. به همین خاطر در آسیای شرقی سیمان رنگی به‌مثابه یک میراث دیده می‌شود و بر اساس این محدوده مقادیر به‌دست‌آمده، مجموعه‌ای از کروماتوگرام‌های توصیه‌شده ایجاد شدند تا مرجع بصری برای تنظیم رنگ‌های میراث معماری ارائه شود که برای حفاظت و توسعه رنگ‌ها و مناظر میراث معماری مفید است. (Dong & Kang, 2025). سیمان و ملات رنگی یکی از انواع تزئینی سطوح و بندکشی آجرها است. در این نوع ملات می‌توان انواع رنگ طیفی تیره و روشن ساخت و بافت ملات بندکشی به رنگ‌های مختلف تغییر طیف رنگی پیدا کند. از روش‌های تغییر رنگ طیفی ملات می‌توان به استفاده از رنگ‌دانه‌های داخلی در طرح اختلاط برای رنگ‌آمیزی حجم ملات، رنگ‌آمیزی رویه ملات سخت شده با رنگ‌های پایه سرامیکی و استفاده از روکش‌های رنگی سیمانی (Fallah, 2008) نخستین کاربرد رنگ‌دانه‌های داخلی در سیمانی به اوایل قرن بیستم میلادی بازمی‌گردد. در سال ۱۹۹۵ میلادی نخستین کارخانه تولید رنگ‌دانه‌های مورداستفاده در سیمان و ملات سیمانی با نام تجاری Scofield در شهر شیکاگو احداث گردید (Nasvik, 2004) رنگ‌دانه‌ها مواد جامد ریزدانه‌ای هستند که در گروه افزودنی‌های معدنی طبقه‌بندی می‌شوند، اگرچه میزان افزودن آن‌ها به مخلوط بین یک تا پنج درصد است که به‌مراتب کمتر از سایر افزودنی‌های معدنی است. رنگ‌دانه‌های مورداستفاده در ملات و محصولات سیمانی باید دارای ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاصی باشند. الزامات اساسی رنگ‌دانه‌های مورداستفاده در

نیازمند مقاوم‌سازی، تقویت، مرمت و بهسازی بوده است. (Prchebaf Motlagh, 2024) آجر ازجمله مصالحی است که با تغییر رنگ و ابعاد، ایجاد اشکال، نقوش و پیوندهای جدید، سطوحی متنوع ایجاد کرده است. یک ساختمان آجری همانند یک نقش هندسی دلخواه، ترکیب بدیعی از سلیقه‌های بی‌انتهای معماران هنرمند است. زیبایی‌شناسی آجرهای نمایان در نمای ساختمان‌ها برگرفته از راهبردهای خلاقانه برای چیدمان آجر هستند، درحالی‌که این روش ممکن است شامل چیدمان‌های هندسی نوآورانه باشد، اما به‌صراحت در مورد مفهوم نماهای پیچیده یا روش‌های تبدیل چنین اشکالی به پیکربندی‌های آجر بحث نمی‌کند. (Nugraha, & Murwonugroho, 2021) ناگفته نماند که طراحی الگو به‌صورت قالب‌های مجزا یا تکرارپذیر آجری از گذشته نیز وجود داشته اما اکنون به‌عنوان طراحی لانه‌زنبوری اجرا می‌گردد به این معنی که از یک سلول اولیه شروع می‌شود و به‌کل طرح تعمیم پیدا می‌کند (Nourijamshidi, 2019). تنوع هندسی و پذیرش ابزار شکل‌دهی هنگام تولید برای به‌کارگیری آجر نما، این امکان را به طراح می‌دهد که با کاهش چشمگیر وزن پوسته طرح، صداها و هزاران ایده و طرح مجرد یا مرکب جدید و منحصر به فرد ایجاد کند. این الگوها می‌توانند با بیرون‌زدگی و یا چرخش در زوایای مختلف ایجاد شوند و یا در ساده‌ترین حالت از بندکشی رنگی و از آجر نما در ضخامت‌های مختلف استفاده کرد تا این اختلاف ابعاد و سطح باعث سایه‌اندازی در ساعات مختلف روز شود. تمامی شکل‌های آجرکاری سنتی، الگوی هنرمندان دوره معاصر بوده و جلوه‌های از هویت فرهنگی را نمایان ساخته‌اند. (Habibi Lialestani et al., 2024) در این روش با خطاهای اجرایی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها مواجه هستیم. روش چیدن آجرها مبتنی بر الگوریتم‌های نقاط جذب^۱ که در این روش بسته به نوع الگوریتم نوشته شده، آجرها بر اساس فاصله خود با یک شیء که می‌تواند نقطه یا یک خط یا اجزای هندسی باشد واکنش‌هایی نشان داده و در سازماندهی خاصی شرکت می‌کنند. در حال حاضر و با پیشرفت مهارت‌های تولید و فناوری و بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته طراحی، پروژه‌هایی را مدل‌سازی کرد که تابه‌حال نمونه‌های آن اجرا نشده باشد. البته، مرمت محیط‌زیست و پاک‌سازی سطوح این

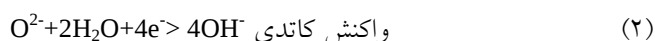
¹ Attractive points

ملات در استانداردها (ASTM, 2010) آورده شده است. بزرگ‌ترین مزیت استفاده از رنگ‌دانه‌های داخلی و رنگ کردن تمام حجم ملات این است که در صورت خراشیده شدن، ساییده شدن و حتی قلوه‌کن شدن بخشی از سطح ملات، رنگ ملات تغییر نکرده و تفاوت فراوانی با سایر مناطق رنگی مشاهده نمی‌شود. همچنین ساخت و اجرای ملات‌های رنگی کاملاً مشابه ملات‌های معمولی بوده و به ماشین‌آلات و افراد آموزش‌دیده یا تخصصی نیازی ندارد (Nasvik, 2004). استفاده از رنگ‌دانه‌ها بر روی خواص ملات تازه و سخت شده تأثیر می‌گذارد. در تحقیق حاضر خواص فیزیکی و شیمیایی رنگ‌دانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی ملات نیز موردبررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تمامی تست‌ها بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر داخلی و یا خارجی و در آزمایشگاه‌های سنگ و فراوری مصالح ساختمانی بخش معدن دانشگاه تربیت مدرس و پژوهشگاه میراث فرهنگی، با بهره‌گیری از مواد دوستدار محیط‌زیست انجام شده است. (Ahmadi & Pilechiha, 2021)

۲-۳- مکانیزم محافظت از خوردگی در سیمان و ملات

روش‌های پایدار در ساخت‌وساز با استفاده از مواد، مصالح و افزودنی‌ها برای ایجاد ترکیبات بتن و ملات دوستدار محیط‌زیست که با اصول پایداری همسو هستند (Varona et al., 2020) وقتی مصالح ساختمانی سیمانی در معرض حوادثی مانند آتش‌سوزی یا دمای بالا قرار می‌گیرند، کربناسیون یک نتیجه نهایی است و می‌تواند یکپارچگی ساختاری مصالح را به خطر بیندازد که پایش سطح pH در مصالح پایه سیمانی با استفاده از رنگ‌های رنگی، مانند فنول فتالین، می‌تواند بینش‌هایی در مورد پایداری شیمیایی و پتانسیل پیری زودرس آن‌ها ارائه دهد. (Alhakim et al., 2025) خوردگی سیمان و ملات رنگی در هر محیط خورنده، فرآیندی می‌باشد که در طی آن برداشت تصاعدی اتم‌های آهن موجود در سیمان، ملات و سایر افزودنی‌ها صورت می‌گیرد. آهن به‌وسیله یک واکنش الکتروشیمیایی برداشته می‌شود و در محیط اطراف حل می‌شود و یون Fe^{2+} ایجاد می‌نماید (Neville, 2002) در آهن موجود در سیمان و ملات، حل شدن یون‌ها در حجم محدودی از محلول آبی موجود در حفره‌های سیمان و ملات در اطراف آهن موجود صورت می‌گیرد. در اثر این فرآیند کاهش جرم آهن یا به

عبارتی کم شدن حجم آهن موجود در سیمان و ملات، ایجاد می‌شود. اگر آهن در ساختار سیمان و ملات تحت بار قرارگرفته باشد، تنش واردشده به سطح مقطع باقیمانده قطعه سیمانی یا ملات، افزایش خواهد یافت که ایجاد ریسک بالا و یا حتی تخریب در ساختار می‌نماید. همچنین یون‌های آهن حل شده در محلول‌های آبی موجود در حفره‌های سیمان و ملات معمولاً با هیدروکسیدها و مولکول‌های اکسیژن حل شده واکنش می‌دهند و ایجاد زنگ آهن می‌نمایند که یک محصول جامد می‌باشد. زنگ آهن معمولاً در فضای خالی در بین دانه‌ها رسوب می‌نمایند. تشکیل آن‌ها در این فضاها سبب اعمال تنش می‌شود که در نهایت موجب ایجاد ترک در پوشش سیمان و ملات می‌گردند (Ziazadeh, 2002). خوردگی آهن در سیمان و ملات یک فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد که شامل واکنش‌های شیمیایی و انتقال جریان الکتریکی می‌باشد. اصول فرآیند خوردگی خیلی پیچیده نمی‌باشد. فرآیند خوردگی شامل دو مرحله جدا، اما همراه هم می‌باشد که واکنش‌های شیمیایی به‌طور هم‌زمان در دو موقعیت جداگانه، ابتدا روی سطح سیمان و ملات رخ می‌دهد.



کاهش فلز در محصول عموماً در جایی صورت می‌گیرد که واکنش آندی در آن مکان صورت گرفته باشد. اتم‌های آهن در مکان‌های آندی یونیزه می‌شوند و به‌صورت Fe^{2+} در محلول وارد می‌شوند. تجمع الکترونی در این نقاط روی سطح سیمان و ملات ایجاد می‌شود و باعث ایجاد اختلاف پتانسیل می‌شود. در نتیجه الکترودها به سمت نقاط دیگر سطح حرکت می‌کنند و جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. یکی از عوامل مهم کنترل نرخ خوردگی در دسترس بودن اکسیژن حل شده در اطراف نواحی کاتدی می‌باشد. چون برای انجام واکنش کاتدی، مصرف اکسیژن لازم و ضروری می‌باشد. اگر سطح به‌وسیله یک لایه محافظ، برای مثال پوشش سیمان و سیمان رنگی احاطه شود، از نفوذ اکسیژن به‌صورت حل شده و یا گازی از محیط اطراف به سطح جلوگیری می‌شود و یا حداقل نفوذ آن به تعویق می‌افتد (همان). به دلیل پخت آجر در دمای بالا، فرسایش سطوح آجری بسیار کند انجام می‌شود. عامل مهم دیگر در نرخ خوردگی سرعت جریان یونی (و

مقاومت الکتریکی تأثیرگذار می‌باشد (Neville, 2002).

۲-۴- تهیه وسایل آزمایشگاهی ساخت و تولید سیمان رنگی

وسایل و تجهیزات موردنیاز جهت ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های سیمان رنگی، تست‌ها و آزمایش‌ها در زیر بیان گردیده است که عبارت‌اند از: قالب: برای تهیه نمونه احتیاج به قالب‌هایی با اندازه $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر بود. سعی شد قالب‌هایی تهیه شود که به‌صورت یکپارچه نباشد و اجزاء اصلی آن توسط پیچ و مهره به یکدیگر متصل شوند تا بتوان بعد از گیرش اولیه نمونه در قالب، آن‌ها را به سهولت و بدون آسیب‌رساندن خارج نمود و در نتیجه اطمینان و سرعت کار را می‌توان بالا برد. از این‌رو قالب‌هایی فلزی با خاصیت جداشوندگی اجزاء از یکدیگر تهیه شد. ترازو: از ترازوی دیجیتالی با قدرت یک‌صدم اعشار برای توزین مواد اولیه مصرفی استفاده شد. تشت: از دو عدد تشت فلزی با پوشش گالوانیکی جهت هم زدن مخلوط در آن‌ها استفاده گردید. دستکش: یک جفت دستکش پلاستیکی جهت کار با مخلوط سیمان استفاده شد تا از پوست دست در برابر سیمان و مواد دیگر محافظت گردد. ماله و کمچه: برای برداشتن مواد و مخلوط سیمان و همچنین صاف کردن سطح مخلوط در قالب‌ها از ماله و کمچه استفاده شد. گونی کفی: برای عمل‌آوری یکسری از نمونه‌ها از گونی کفی نازک استفاده گردید. بدین ترتیب که در طول مدت عمل‌آوری، نمونه‌ها لای گونی قرار گرفته بودند و به‌طور مداوم، گونی‌ها جهت نگهداری رطوبت در نمونه‌ها، خیس می‌شدند. ویراتور: برای لرزش مخلوط سیمان و قالب پس از قالب‌گیری جهت خارج‌ساختن حباب‌های هوا، از ویراتور استفاده گردید. حوضچه آب: از یک سطل بزرگ جهت عمل‌آوری نمونه‌ها بروش غوطه‌وری آن‌ها در زیر آب استفاده شد. دستگاه فشار: دستگاه استفاده‌شده جهت انجام آزمایش فشار دستگاه فشار الکترونیکی تک‌محوری از سری HEICOHL 592 می‌باشد. دستگاه سایش: در آزمایش سایش از دستگاه دیسک چرخان استفاده گردید. هرکدام از نمونه‌های شاهد و رنگی به مدت یک ساعت تحت سایش خراشان بر روی سنباده ۱۲۰ و ۲۴۰ قرار گرفت و کاهش وزن نمونه‌ها به‌طور مقایسه‌ای مدنظر قرار گرفت (Ziazadeh, 2002).

۲-۵- روش کار ساخت آزمایشگاهی و کارگاهی

بعد از آماده نمودن مواد اولیه و وسایل موردنیاز، در شروع کار با

نه الکترونی) از میان خطرات بین لایه‌های نزدیک به سطح یعنی نزدیکی آرماتورهای درون سازه با ملات و آجرهای نما می‌باشند. اگر نرخ جریان یون‌های حاوی بار کم شود، واکنش‌های خوردگی در نرخ پایین ادامه می‌یابند. این امر وقتی عملی می‌شود که مقاومت الکتریکی اطراف آرماتور فولادی بین نواحی آندی و کاتدی افزایش یابد. روش‌های دیگری نیز جهت محدود نمودن نرخ خوردگی وجود دارد. برخی فلزات مثل آهن می‌توانند با اکسیژن واکنش داده و تولید لایه نازک (0.1 میکرونی) اکسید فلز نامحلول روی سطح خود نمایند. اگر این لایه در تماس با محیط آبی پایدار باقی بماند، فلز از لحاظ الکتریکی غیرفعال می‌گردد (مثل فولاد زنگ‌نزن). پوشش سیمان و سیمان رنگی روی سطح ملات یکی از عوامل مهم در تعیین مکانیزم، میزان و نرخ خوردگی روی سطح ملات سیمانی می‌باشد.

ترکیب شیمیایی محلول حفره نیز از عوامل مهم تأثیرگذار روی خوردگی سیمان و ملات می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این حفرات میزان قلیایی بودن محلول داخل آن‌ها می‌باشد. این خاصیت قلیایی عامل مهم تأثیرگذار روی تشکیل لایه محافظ روی ملات می‌باشد. آزمایش‌ها نشان داده است که زمان شروع خوردگی در سیمان و سیمان رنگی موجود در ملات با افزایش میزان قلیاهای موجود در سیمان افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر افزایش غلظت قلیایی محلول حفرات موجب تعویق در شروع فرآیند خوردگی ملات می‌گردد. همچنین مقاومت خوردگی سیمان و سیمان رنگی نیز با افزایش میزان قلیای موجود در سیمان و سیمان رنگی معمولاً افزایش می‌یابد. وقتی که نرخ خوردگی ملات تحت کنترل مقاومت سیمان و سیمان رنگی باشد، سطح کلروآنیون‌های دیگر از قبیل یون سولفات روی مقاومت الکتریکی تأثیرگذار می‌باشد. میزان رطوبت موجود نیز مقدار مقاومت سیمان و سیمان رنگی را تغییر می‌دهد. نتایج تحقیقات نشان داده است که حضور یون سولفات موجب تشدید فعالیت کلر در ایجاد خوردگی ملات می‌شود. نتیجه یک تحقیقات میدانی نشان داده است که مقاومت بتن باید زیر محدوده ۱۰۰۰۰ اهم-سانیمتر باشد تا خوردگی صورت گیرد. همچنین نرخ خوردگی بعد از شروع آن به‌وسیله در دسترس بودن محصولات واکنش کاتدی و مقاومت کاتدی و مقاومت الکتریکی سیمان و ملات تعیین می‌شود (Ziazadeh, 2002; Neville, 2002) تحقیقات مرکز بتن برلین نشان داد که میزان حضور سولفات به‌شدت روی

اتمام مرحله قالب‌گیری و تهیه نمونه اولیه، نمونه‌ها با اتاق عمل‌آوری انتقال داده شدند. برای عمل‌آوری یکسری از نمونه‌ها از غوطه‌وری در حوضچه آب و برای سری دیگر از گونی‌های مرطوب استفاده گردید و در تمام مدت طول عمل‌آوری سعی شد که نمونه‌ها مرطوب نگهداری شوند. دمای محیط کار در تمام مراحل، دمای اتاق بوده و تمام کار در کارگاه انجام گرفته است (Ahmadi, 2021).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تفسیر تست‌ها و آزمایش‌های ساخت

با توجه به هدف پژوهش که پی بردن به نقش رنگ‌دانه‌های سرامیکی بر خواص سیمان رنگی و در نتیجه استفاده از آن در بازسازی و بهسازی پوشش‌های ساختمانی و بندکشی آجرهای بناها و ... است، نیاز به نمونه‌هایی از سیمان رنگی و غیر رنگی می‌باشد که تحت شرایط یکسان از مواد اولیه، ساخت و عمل‌آوری، تهیه شده باشند. با تهیه نمونه‌های غیر رنگی که به عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته می‌شوند و نمونه‌های رنگی با درصدهای مختلف پیگمنت (معمولاً ۳ درصد، ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۲۰ درصد) سعی شد که تحت یک دسته از آزمایش‌ها بر روی آن‌ها (نمونه‌های رنگی و غیر رنگی) و مقایسه بین نتایج، اثر پیگمنت را بر روی خواص مکانیکی سیمان رنگی نشان داد. با توجه به آنکه از مهم‌ترین خواص مکانیکی کاربردی برای سیمان، مقاومت فشاری و مقاومت سایشی است از این‌رو آزمایش بر روی نمونه‌ها به ترتیب زیر انجام گردید. (Ahmadi, 2021).

در مرحله تست‌ها و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مواد اولیه مصرفی شامل سیمان سفید، سنگ‌دانه‌هایی با دانه‌بندی آب و افزودنی روان کننده بود. همچنین از دو نمونه شاهد، یکی بدون افزودنی روان کننده (شاهد ۱) و دیگری با افزودنی روان کننده (شاهد ۲) استفاده گردید و نمونه‌های رنگی نیز با سه پیگمنت سبز، قهوه‌ای و زرد در مقادیر ۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد ساخته شدند تا بتوان به نتیجه بهتری دست یافت. از آنجایی که میزان مصرف افزودنی‌ها طبق مطالعات انجام شده، به دلیل احتمال اثر منفی آن‌ها بر رنگ سیمان محدود می‌باشد؛ در نتیجه مقدار افزودن روان کننده در نمونه‌های شاهد ۲ و رنگی، یک درصد وزنی سیمان مصرفی در نظر گرفته شد. عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه آب تا یک روز قبل از انجام آزمایش فشار نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه می‌باشد.

توجه به اهمیت تمیز بودن وسایل قالب‌گیری و عاری بودن آن‌ها از مواد زائد همچون اکسیدهای سطحی، تمام آن‌ها بازرسی ظاهری گردید و در صورت وجود آلودگی تمیز شدند. همچنین بدنه قالب‌ها برای سهولت خارج شدن نمونه‌ها، با روغن چرب گردیدند. این عمل قبل از قالب‌گیری تمام نمونه‌ها انجام می‌شد. سپس مقادیر لازم مواد اولیه مصرفی (سنگ‌دانه یا خاک‌سنگ، سیمان، آب، افزودنی و پیگمنت) با توجه به ترکیب هر نمونه توسط یک ترازوی دیجیتالی وزن گردید و در ظروف جداگانه ریخته شد. با توجه به تعداد قالب‌ها و اندازه آن‌ها، در هر مرتبه قالب‌گیری امکان تهیه ۹ نمونه وجود داشت. از این‌رو طی محاسبه مقادیر لازم از هر کدام از اجزاء سازنده سیمان را برای این تعداد نمونه تعیین کرده و در تمام آزمایش‌ها رعایت گردید. در نمونه شاهد مقادیر وزن شده سیمان و سنگ‌دانه به صورت خشک در یک ظرف ریخته و به مدت یک الی دو دقیقه باهم مخلوط شدند به طوری که از توزیع یکنواخت ذرات سیمان در بین ذرات سنگ‌دانه اطمینان نسبی حاصل شد. سپس همراه با هم زدن مخلوط سیمان و سنگ‌دانه، آب به طور یکنواخت به آن اضافه گردید. با اضافه شدن کامل آب مورد نیاز، مخلوط حاصل به مدت ۵ دقیقه تا اطمینان نسبی از توزیع یکنواخت مواد و خیس شدن کامل آن‌ها مخلوط شده و این چنین مخلوط آماده قالب‌گیری گردید. در نمونه‌های رنگی، تهیه مخلوط مانند نمونه‌های غیر رنگی است تنها در ابتدا سیمان و پیگمنت به مدت یک الی دو دقیقه، برای توزیع ذرات در بین یکدیگر، مخلوط شدند و سپس با سنگ‌دانه‌ها مخلوط گردیدند. در نمونه‌هایی که از افزودنی روان کننده استفاده گردید، این افزودنی همراه آب به مخلوط اضافه شد. با آماده شدن مخلوط اولیه سیمان، قالب‌گیری در دو مرحله انجام می‌گردید: در ابتدا یک سوم قالب با مخلوط پر می‌شد و سپس توسط سیخک در گوشه‌ها و وسط قالب عمل سیخ زدن انجام می‌گرفت همچنین تکان‌هایی آرام به قالب داده می‌شد تا مخلوط بتواند به خوبی گوشه‌ها و کف قالب را از ملات سیمانی پر کند. با پر شدن قالب، سطح نمونه‌ها با یک ماله صاف می‌شد و سپس قالب‌ها بر روی ویراتور قرار گرفته تا هوای محبوس شده در مخلوط خارج گردد. جهت خارج سازی نمونه‌ها با توجه به نوع قالب‌ها لازم بود که آن‌ها حداقل سه ساعت جهت گیرش اولیه و سهولت جداسازی از بدنه قالب، درون قالب و در هوای آزاد قرار گیرند. بعد از اطمینان از گیرش نمونه‌ها سعی شد که با دقت زیاد نمونه‌ها از درون قالب خارج گردند تا آسیبی به نمونه‌ها وارد نگردد. با

جدول ۱: نتایج مقاومت فشارهای نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه
(منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

ردیف	مشخصه پیگمنت	درصد وزنی پیگمنت به وزن سیمان موجود	میانگین مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال	عمر سیمان (۷ روزه)	عمر سیمان (۲۸ روزه)
۱	شاهد ۱	-	-	۵۶	۶۷/۱۲
۲	شاهد ۲	-	-	۵۶	۶۷/۱۲
۳	پیگمنت سبز	۳ درصد	۵ درصد	۵۳/۵	۶۵/۱
		۱۰ درصد	۵۳/۲۴	۶۳/۲	
		۱۵ درصد	۴۸/۸	۳۸/۴۸	
		۲۰ درصد	۲۶/۷	۲۹/۴	
		۲۵ درصد	۲۱/۴	۲۷/۵	
۴	پیگمنت قهوه‌ای	۳ درصد	۵۵/۳	۶۶/۷	
		۵ درصد	۵۳/۲	۶۴	
		۱۰ درصد	۵۱/۴	۶۰/۳	
		۱۵ درصد	۴۷/۶	۵۰/۷	
		۲۰ درصد	۳۶/۵	۴۱/۴	
۵	پیگمنت زرد	۳ درصد	۵۵/۵	۶۷/۸	
		۵ درصد	۵۴/۹	۶۷/۲	
		۱۰ درصد	۵۲	۶۲/۰۴	
		۱۵ درصد	۴۸/۱۲	۵۵/۸	
		۲۰ درصد	۳۵/۶	۴۶/۲	

با گذشت زمان و آزمایش نمونه‌های ۲۸ روزه مشاهده می‌گردد که نمونه‌های رنگی سبز و قهوه‌ای با افزایش میزان پیگمنت نسبت به شاهد ۲ کاهش مقاومت را نشان می‌دهند و این کاهش برای درصدهای بالاتر، بیشتر می‌باشد؛ اما در نمونه رنگی زرد تا ۵ درصد پیگمنت افزایش جزئی در مقاومت نسبت به نمونه شاهد ۲ مشاهده می‌گردد؛ اما در مقادیر پیگمنت بالاتر، این افزایش به کاهش مقاومت تبدیل شده است. از نتایج به‌دست‌آمده در تست‌ها و آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که افزودن پیگمنت باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های رنگی نسبت به نمونه‌های غیر رنگی می‌گردد. علت اصلی کاهش مقاومت را نمی‌توان به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد اما یکی از دلایل احتمالی کاهش مقاومت در اثر افزایش پیگمنت به مخلوط سیمان را می‌توان چنین بیان کرد که پیگمنت‌های معدنی به دلیل اینکه تحت واکنش قرار نمی‌گیرند و هیچ‌گونه خاصیت چسبندگی ایجاد نمی‌کنند در نتیجه به‌طور مکانیکی در بین ذرات خمیر سیمان و بر سطح سنگ‌دانه‌ها پخش

می‌گردند و در صورت مخلوط شدن ضعیف در مناطقی نیز به‌صورت تجمعی قرار می‌گیرند و از چسبندگی خمیر سیمان با سنگ‌دانه‌ها در فصل مشترکشان جلوگیری می‌کنند، ازاین‌رو این مناطق به‌عنوان عیب عمل کرده و در نهایت باعث ترک و شکست نمونه‌ها در تنش‌های کمتر می‌گردند. با در نظر گرفتن نتایج حاصل‌شده در تست‌ها و آزمایش‌ها می‌توان به‌طور تقریبی دامنه مجاز افزودن پیگمنت‌ها را به سیمان رنگی جهت رنگی کردن سیمان و به دست آوردن مقاومت فشاری مطلوب تعیین نمود. در رنگ سبز دامنه مجاز پیگمنت را می‌توان در مقایسه با شاهد ۱ و شاهد ۲ کمی بالاتر از ۵ درصد وزنی سیمان موجود تعیین نمود زیرا در درصدهای بالاتر میزان کاهش مقاومت شدیدتر می‌گردد. با این نوع پیگمنت در این دامنه مجاز نمی‌توان به رنگی با شدت مطلوب دست‌یافت و برای دستیابی به این امر نیاز به پیگمنت بیشتری می‌باشد. در رنگ قهوه‌ای دامنه مجاز پیگمنت را در مقایسه با شاهد ۱ و شاهد ۲ می‌توان با ۱۰ درصد وزنی سیمان تعیین نمود که در مقادیر نزدیک به ۱۰ درصد می‌توان به‌شدت و وضوح رنگ مطلوب دست‌یافت. برای رنگ زرد دامنه مجاز پیگمنت در مقایسه با شاهد ۱ می‌توان تا ۱۵ درصد وزنی سیمان موجود و در مقایسه با شاهد ۲ این دامنه تا کمی بالاتر از ۱۰ درصد (بین ۱۰ تا ۱۵ درصد) تعیین می‌گردد. این پیگمنت در دامنه تعیین‌شده می‌تواند رنگ‌های مطلوبی را ارائه دهد که شدت رنگ در درصدهای بالاتر افزایش می‌یابد. در نتایج آزمون‌ها مشاهده گردید که تا حدود ۵ درصد پیگمنت مقاومت نمونه‌های رنگی در مقایسه با یکدیگر (برای عمر ۷ روزه و ۲۸ روزه) اختلاف جزئی دارند اما در مقادیر بالاتر نمونه‌های سبز بیشترین کاهش و نمونه‌های زرد کمترین کاهش را نشان می‌دهند و نمونه‌های قهوه‌ای نیز حالتی بینابین دارند. یکی از دلایل احتمالی اختلاف در کاهش را می‌توان اختلاف در شکل و اندازه ذرات پیگمنت‌ها دانست، زیرا همان‌طور که مشاهده می‌گردد ذرات پیگمنت سبز به‌صورت کروی می‌باشد و اندازه آن‌ها نسبت به ذرات پیگمنت قهوه‌ای و زرد، بزرگ‌تر هستند و این مورد می‌تواند بر مقاومت تأثیرگذار باشد. همچنین طبق مطالعات انجام‌شده بزرگ بودن ذرات پیگمنت از پخش شدن آن‌ها و پوشاندن سطح سنگ‌دانه به‌طور کامل و در نتیجه شدت رنگ سیمان رنگی می‌کاهد که این مسئله در آزمایش‌ها برای نمونه سبز کاملاً مشهود بود زیرا با پیگمنت سبز تا مقادیر بالای ۱۵ درصد

امکان دستیابی به شدت رنگ مطلوب وجود نداشت؛ اما برای نمونه‌های زرد با مقادیر ۳ الی ۵ درصد شدت رنگ مطلوب حاصل می‌گردد و برای رنگ قهوه‌ای نیز حالتی بینابین وجود داشت.

۳-۲- تأثیر افزودنی روان کننده بر مقاومت

با مقایسه نمونه‌های شاهد ۱ و شاهد ۲ مشاهده گردید شاهد ۲ که حاوی افزودنی روان کننده می‌باشد تا حدی دارای مقاومت بالاتری نسبت به شاهد ۱ است که این مقاومت اضافی نشان‌دهنده اثر روان کننده بر کارایی و در نتیجه افزایش مقاومت سیمان می‌باشد. از طرفی با مقایسه یک‌به‌یک نمونه‌های رنگی با نمونه شاهد ۱ (بدون افزودنی روان کننده) در عمر ۷ روزه مشاهده می‌گردد که در نمونه‌های سبزرنگ تا ۳ درصد، در نمونه‌های قهوه‌ای رنگ تا ۵ درصد و در نمونه‌های زردرنگ تا ۱۰ درصد به مقاومتی بالاتر و یا برابر با مقاومت فشاری نمونه شاهد ۱ دست‌یافته شده است؛ اما نمونه سبزرنگ با افزایش پیگمنت کاهش سریع مقاومت را نشان می‌دهد و نمونه‌های قهوه‌ای و زرد نیز افت مقاومت را در مقادیر بالای پیگمنت نشان می‌دهند ولی این افت نسبت به نمونه سبز کمتر است. همچنین با توجه به چنین وضعیتی نیز برای نمونه‌های ۲۸ روزه حاصل شده است و همان‌طور که مشاهده می‌گردد مشابه عمر ۷ روزه نمونه‌های زردرنگ تا ۱۰ درصد پیگمنت مقاومت نزدیک‌تری را نسبت به نمونه شاهد ۱ نشان می‌دهد و نمونه‌های سبزرنگ نیز افت سریع مقاومت را در مقادیر بالای پیگمنت دارند. در نتیجه با توجه به مقایسه‌هایی که صورت گرفت می‌توان گفت که با استفاده از یک درصد افزودنی روان کننده در نمونه‌های رنگی تا حدودی از افت مقاومت تا نزدیک به ده درصد پیگمنت کاسته می‌شود و با بعضی از پیگمنت‌ها (با توجه به شکل، اندازه ترکیب آن‌ها) می‌توان به مقاومت بالاتری نیز دست‌یافت. با چنین نتیجه‌ای می‌توان گفت احتمال دارد پیگمنت‌های سرامیکی از طریق کاهش کارایی سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردند که با استفاده از افزودنی روان کننده می‌توان این اثر را کمتر یا جبران کرد. با گذشت زمان از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت نمونه‌ها (شاهد ۱، شاهد ۲ و رنگی) افزایش یافته است. مشاهده گردید، تمام نمونه‌ها نسبتاً به یک اندازه افزایش مقاومت نشان می‌دهند و در نتیجه می‌توان گفت که پیگمنت‌ها بر هیدراتاسیون سیمان که باعث افزایش مقاومت با

گذشت زمان می‌گردد تأثیر چندانی نداشته‌اند. ولی همچنان با افزایش عمر، افت مقاومت در نمونه‌های رنگی در درصدهای بالای پیگمنت نسبت به نمونه‌های شاهد نشان داده شده است. در مقایسه‌ای دیگر بین ملات نمونه شاهد ۱ و نمونه رنگی ۳ درصد و ۵ درصد سری اول آزمایش‌ها با همین نمونه‌ها در سری دوم آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که در سری دوم مقاومت بالاتری حاصل شده است. از آنجاکه در یک دانه‌بندی خوب، مقدار سنگ‌دانه‌های ریزتر از $\frac{0}{3}$ میلی‌متر بین ۱۰ تا ۳۰ درصد از کل حجم سنگ‌دانه تعیین شده است و توصیه می‌شود که ۱۵ درصد کل سنگ‌دانه در نظر گرفته شود (در صورتی که کمتر از ۱۰ درصد باشد مخلوط سیمان خشن شده و کار کردن با آن مشکل می‌شود) و همچنین برای الک ۱۰۰ به میزان حداقل ۳ درصد سنگ‌دانه عبور کرده داشته باشیم. از این‌رو با رجوع به منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی مشاهده می‌گردد که دانه‌بندی استفاده شده در سری دوم آزمایش‌ها منحنی دانه‌بندی دارای منحنی بهتری است و به همین دلیل این پارامتر را می‌توان یکی از عوامل بالا رفتن مقاومت در سری دوم آزمایش‌ها دانست.

۳-۳- تأثیر پیگمنت‌های سرامیکی بر مقاومت سایشی ملات

برای اندازه‌گیری مقاومت سایشی ملات حاوی سیمان رنگی، سطح نمونه‌های ساخته شده با پیگمنت سرامیکی، تحت تست سایش با سمباده (P۱۲۰) و (P۲۴۰) واقع شد. در این تست که به صورت سایش خراشان روی سطح نمونه انجام گردید، تعداد ۳ عدد از هر نمونه $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری با میزان سه و پنج درصد پیگمنت سرامیکی به صورت افزودنی مورد استفاده قرار گرفتند تا میانگین کاهش وزن در زمان تعیین شده (ثابت) ثبت گردد. تنوع نمونه‌ها عبارت بودند از نمونه شاهد، نمونه زرد، نمونه سبز و نمونه قهوه‌ای که مواد اولیه هریک از آن‌ها طبق جدول اختلاط مورد استفاده واقع شد. مجموعه تست‌های انجام شده با دو نوع سمباده ۱۲۰ و ۲۴۰ عیناً تکرار شد. خصوصیات تست انجام شده برای زمان مصروفه معادل یک ساعت (۶۰ دقیقه) با دستگاه دیسک چرخان و گردشی معادل ۷۲۰۰ دور در ساعت، برای تمام نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت سایشی به شرح ذیل ارائه می‌شود. ابتدا نمونه اول شاهد با وزن اولیه $256/35$ گرم در دستگاه دیسک چرخان قرار گرفت و تحت سایش

با توجه به نتایج به دست آمده از این دسته آزمایش ها یعنی بهره گیری از سمباده ۲۴۰ مشاهده می شود با ترتیب کاهش وزن نمونه های حاوی پیگمنت قهوه ای کمترین مقدار کاهش وزن را دارا است. به دنبال آن کمترین کاهش وزن متعلق به نمونه های سبز، زرد و شاهد می باشد. البته، میزان افزودنی بر سیمان رنگی علاوه بر تغییر در مقاومت، دوام و سایش می تواند روی فرسایش آن نیز اثر بگذارد. به طوری که کنترل سایش و فرسایش مستقیماً بر دوام ملات و سیمان اثرگذار خواهد بود و از طرف دیگر اثر دوام با نفوذپذیری نیز رابطه مستقیم بر دوام ملات و سیمان اثرگذار خواهد بود که اکنون در حد موضوعات این مبحث نیست. از دیگر دستاوردهای این مبحث ارائه تصاویر میکروسکوپ الکترونی است که تأثیر مواد و مصالح افزودنی پودری بر ریزساختار را نشان داده است (تصاویر شماره ۱ تا شماره ۶).

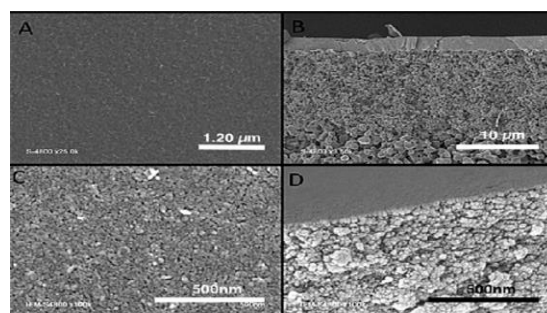
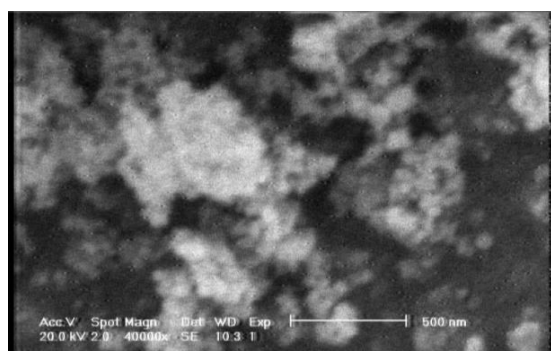
۴- نتیجه گیری

مطالعات در حوزه های مطالعات عمرانی، معماری، شهرسازی، مهندسی محیط زیست و مرمت آثار تاریخی نشان داده است که علاوه بر ملاحظات و مشاهدات در توسعه پایدار شهرها؛ در روش های ساخت و تولید مواد و مصالح در معماری سنتی ایرانی و معماری معاصر ایران و در تنوع آرایه های آجری نیز بی مثال است. آجر از جمله مصالحی است که قابلیت ایفای هر نقشی را برای طراح دارد و با وجود گذشت قرون متمادی هنوز مدرن است. آجر در معماری ایران نه تنها به عنوان عنصری اصلی در معماری نمود دارد، بلکه هدف، نشان دادن اهمیت یک عنصر در معماری است و دوام و پایداری عنصر آجر، کمترین تأثیر بر محیط زیست را داشته است. خاک و به تبع آن آجر از عناصر چهارگانه است و نگاه به آجر تنها در حد یک مصالح ساختمانی متوقف نمی شود، بلکه در نگاه فناورانه، آجر به عنوان یک موضوع کاملاً مستقل مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش چهارچوب به کارگیری پودرهای معدنی، انواع سیمان و بهره گیری از آجرها، فناوری نوین در روش های ساخت سیمان، سیمان رنگی، ملات ها و رنگ های معدنی محافظ سیمان و دستاورد طرح های اجرایی و نتایج تست ها و آزمون های ویژه با کمترین آسیب برای محیط زیست ارائه شد. میزان افزودنی های مجاز بر سیمان رنگی و در ساخت و تولید ملات ویژه بندکشی، علاوه بر تغییر در مقاومت، دوام و سایش

خراشان با سمباده (۱۲۰) کاهش وزنی معادل ۱۴/۴۲ گرم به دست آمد. به این ترتیب وزن نمونه اول پس از کاهش وزن به ۲۵۱/۱۵ گرم رسید. نمونه های دوم و سوم شاهد نیز به همین ترتیب تحت آزمایش قرار گرفتند که مقدار آن ارائه شده است. میانگین حاصل از یک ساعت سایش برای نمونه های شاهد معادل ۱۴/۰۳ می باشد. سپس نمونه اول با افزودن ۳ درصد پیگمنت زرد مورد آزمایش قرار گرفت. وزن اولیه آن معادل ۲۸۰/۰۹ گرم بود و تحت سایش خراشان با سمباده (۱۲۰) به کاهش وزن معادل ۱۲/۳۱ گرم رسید. نمونه های دوم و سوم زرد ۳ درصد نیز به همین ترتیب تحت آزمایش قرار گرفتند که مقدار آن مطابق جدول ارائه شده است. میانگین حاصل از یک ساعت سایش برای نمونه های زرد ۳ درصد معادل ۱۰/۹۴ گرم می باشد. به دنبال آن نمونه اول با افزودن ۳ درصد پیگمنت سبز مورد آزمایش قرار گرفت که مطابق با کاهش وزنی معادل ۶/۶۲ گرم روبرو گردیده این آزمایش برای نمونه های دوم و سوم با ۳ درصد پیگمنت سبز نیز انجام شد و در نهایت پس از محاسبه میانگین کاهش وزن به عدد ۵/۲۴ گرم رسیده سپس این آزمایش برای نمونه اول با افزودن ۳ درصد پیگمنت قهوه ای تکرار شد و با توجه به نمونه های دوم و سوم با ۳ درصد افزودن پیگمنت قهوه ای به میانگین کاهش وزنی معادل ۴/۸۲ گرم رسید. مجموعه آزمایش های فوق تحت سایش خراشان با سمباده (۱۲۰) برای پیگمنت های زرد، سبز، قهوه ای با افزودن ۵ درصد پیگمنت مطابق جدول به کاهش وزن میانگین ۳ به ترتیب برابر با ۷/۰۵، ۴/۶۷، ۲/۹۶ گرم رسید. با توجه به مقایسه نتایج حاصله از آزمایش پیگمنت های زرد، سبز، قهوه ای با نمونه شاهد، مشاهده گردید که و سپس کمترین مقدار کاهش برای رنگ های سبز و زرد مشاهده گردید. ۵ درصد متعلق به رنگ قهوه ای این میزان کاهش در مقایسه با مقدار کاهش وزن نمونه های شاهد در وضعیت بهتری بود. کمترین کاهش وزن برای افزایش پیگمنت به میزان ۳ درصد بوده همین آزمایش ها عیناً برای سه نمونه از رنگ های زرد، سبز، قهوه ای در کنار نمونه شاهد تحت سایش خراشان با سمباده (۲۴۰) نیز انجام گردید و مطابق جدول برای میانگین نمونه های شاهد وزنی معادل ۷/۳۳ گرم، برای میانگین نمونه های زرد ۳ درصد و ۵ درصد به ترتیب به کاهش وزنی معادل ۵/۰۷ گرم و ۳/۳۲ گرم رسید. برای میانگین نمونه های سبز ۳ درصد و ۵ درصد به ترتیب به کاهش وزنی معادل ۲/۱۵ گرم و ۱/۳۶ گرم رسید.

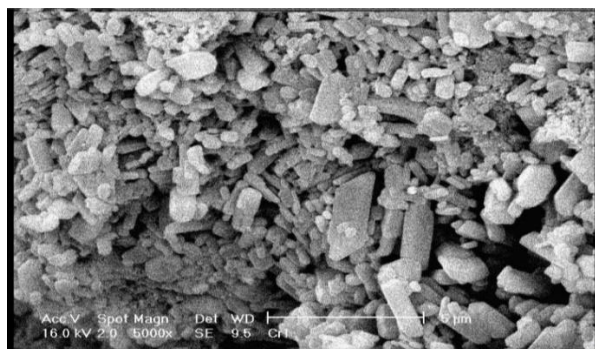
جدول ۲: نتایج آزمایش‌های مقاومت سایشی (سایش خراشان) نمونه‌های ۹۰ روزه (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

ردیف	نام نمونه	وزن اولیه نمونه (gr)	میزان کاهش وزن برحسب (gr)	وزن ثانویه نمونه برحسب (gr)	میانگین کاهش وزن در ساعت به (gr)
۱	نمونه اول	۲۵۶/۳۵	۱۴/۴۲	۷/۸۳	سمپاده ۱۲۰
	شاهد	۲۷۵/۱۵	۱۳/۸۱	۷/۲۵	سمپاده ۲۴۰
	نمونه دوم	۲۵۷/۰۷	۱۳/۸۷	۶/۹۲	سمپاده ۱۲۰
	نمونه سوم	۲۸۰/۰۹	۱۲/۳۱	۵/۴۰	سمپاده ۲۴۰
	نمونه اول	۲۷۶/۵۴	۹/۶۵	۴/۷۱	سمپاده ۱۲۰
	نمونه دوم	۲۷۷/۰۳	۱۰/۸۷	۵/۱۱	سمپاده ۲۴۰
۲	درصد	۲۷۱/۱۹	۶/۱۱	۲/۸۴	سمپاده ۱۲۰
	نمونه اول	۲۷۵/۴۴	۷/۸۱	۳/۷۱	سمپاده ۲۴۰
	نمونه دوم	۲۷۳/۳۲	۷/۲۵	۳/۴۱	سمپاده ۱۲۰
	نمونه سوم	۲۷۴/۰۵	۶/۶۲	۳/۱۱	سمپاده ۲۴۰
	نمونه اول	۲۶۷/۷۱	۳/۶۸	۲/۱۲	سمپاده ۱۲۰
	نمونه دوم	۲۶۵/۱۵	۵/۴۳	۲/۳۳	سمپاده ۲۴۰
۳	درصد	۲۷۷/۵۱	۴/۶۱	۱/۷۵	سمپاده ۱۲۰
	نمونه اول	۲۶۷/۰۹	۵/۴۷	۱/۷۰	سمپاده ۲۴۰
	نمونه دوم	۲۷۳/۸۱	۳/۹۴	۱/۱۲	سمپاده ۱۲۰
	نمونه سوم	۲۸۱/۰۵	۳/۰۶	۱/۴۴	سمپاده ۲۴۰
	نمونه اول	۲۷۱/۱۲	۶/۶۲	۳/۱۱	سمپاده ۱۲۰
	نمونه دوم	۲۷۸/۱۵	۴/۸۰	۱/۹۲	سمپاده ۲۴۰
۴	درصد	۲۸۰/۷۶	۳/۰۹	۱/۲۱	سمپاده ۱۲۰
	نمونه اول	۲۷۰/۸۱	۲/۵۵	۱/۵۱	سمپاده ۲۴۰
	نمونه دوم	۲۷۹/۰۵	۳/۲۴	۱/۷۳	سمپاده ۱۲۰
	نمونه سوم	۲۷۹/۶۱	۲۷۷/۹۹	۱/۴۴	سمپاده ۲۴۰
	نمونه اول	۲۶۸/۰۱	۲۶۴/۵۰	۳/۱۱	سمپاده ۱۲۰
	نمونه دوم	۲۷۶/۳۳	۲۷۳/۳۵	۱/۹۲	سمپاده ۲۴۰

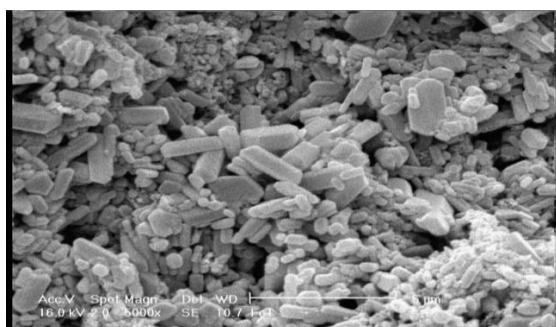


شکل ۱: تصاویر میکروسکوپی از سطوح سیمانی با بهره‌گیری از رنگ‌دانه‌های سرامیکی؛ مشاهده می‌شود با تغییر رنگ‌دانه‌ها به‌عنوان افزودنی در سیمان، بافت سطح سیمانی نیز تغییر می‌کند. تصاویر A, B, C, D (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر ریزساختار اکسید آلومینیوم در مقیاس نانومتری به‌عنوان افزودنی پودری که بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی و نفوذپذیری تأثیر مستقیم می‌گذارد. (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

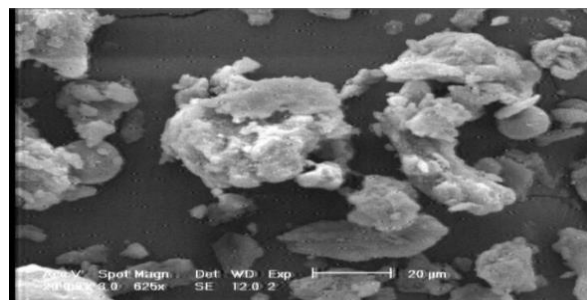


شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر ریزساختار اکسید آهن قرمز در مقیاس میکرومتری به عنوان افزودنی پودری که بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی و نفوذپذیری تأثیر مستقیم می‌گذارد. (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

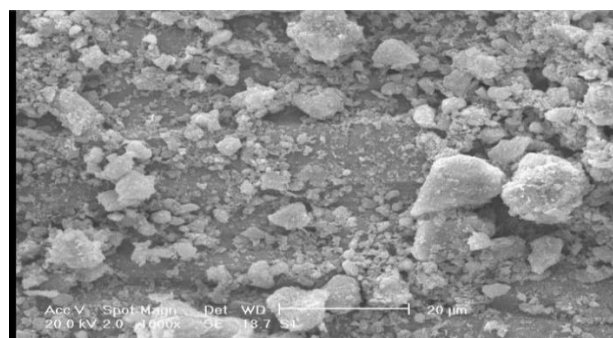


شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر ریزساختار اکسید آهن قهوه‌ای در مقیاس میکرومتری به عنوان افزودنی پودری که بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی و نفوذپذیری تأثیر مستقیم می‌گذارد. (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

طراحان سازه می‌توانند به مفاهیم مهارتی، مهندسی، فنی و هنری در معماری شهر و حفاظت و مرمت بناهای آجری تاریخی دست یابند و نگاه موشکافانه معماران و مهندسان شهرساز و مهندسان محیط‌زیست به اجرای آثار آجری مدرن در نمای ساختمان‌ها با تنوع رنگ و چیدمان آجرها در توسعه شهر پایدار جلب خواهد شد.



شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر ریزساختار اکسید کروم در مقیاس میکرومتری به عنوان افزودنی پودری که بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی و نفوذپذیری تأثیر مستقیم می‌گذارد. (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)



شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر ریزساختار اکسید آهن زرد در مقیاس میکرومتری به عنوان افزودنی پودری که بر مقاومت فشاری و مقاومت سایشی و نفوذپذیری تأثیر مستقیم می‌گذارد. (منبع: نگارندگان، ۲۰۲۱)

مطابق نتایج تست‌ها و آزمایش‌ها متعدد واقعی که در این پژوهش انجام گرفت، می‌تواند روی کنترل فرسایش آن نیز اثر بگذارد؛ به‌طوری‌که مهار سایش و فرسایش مستقیماً بر افزایش دوام سیمان اثرگذار خواهد بود. از طرف دیگر اثر دوام بر نفوذپذیری نیز رابطه مستقیم دارد و مرز آجرها را سیمان رنگی حاوی رنگدانه‌های معدنی و ملات ترکیبی، مقاوم می‌سازد. معماران، مرمت‌کاران و

References

1. Afshar Naderi, K., Bricks from the beginning of the industry until today, Architect Magazine, No. 25, 2012. <https://www.memarmagazine.com/fa>
2. Ahmad, T. and Thaheem, M. (2022). Lcia parameters and the role of bim towards sustainability: regional and temporal trends. Buildings, 12(5), 700. <https://doi.org/10.3390/buildings12050700>
3. Ahmadi E. S., Afshinmehr V., Ahmadi S. B., Pilechiha P.a. Evaluation of Mortar Containing Micro-nano Ceramic Pigments in Construction and Conservation to Landscape Beauty and Urban Development. Urban Design Discourse a Review of Contemporary Litreatures and Theories 2021; 2 (2):63-84.
4. Ahmadi, E. S.; P. Pilechiha, Research project: Construction of colored ceramic cement, for binding and covering the facades of brick historical buildings, Cultural Heritage and Tourism Research Institute, Iran, 2021.[Project]
5. Ahmadi, S., Moradpour, Z., Liaghat, G. (2012), 'Study of the Effect of Project Management on Manufacturing and Production Projects', World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 62, International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering, 6(2), 470 - 477. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1332932>
6. Ainechi, S. and Valibeig, N. (2020). Comparative and

URL: <http://udd.modares.ac.ir/article-40-54027-fa.html>

- contrast study of karbandie's masonry ribs brick arrangements. *Curved and Layered Structures*, 7(1), 166-177 /cdn_sentry?url= <https://doi.org/10.1515/cls-2020-0013>
7. Alhakim, A., Chen, S.E., Braxtan, N.L., Tempest, B., Sun, Q., Almakhadmeh, W.A. and Zhang, Y., 2025. Burnt Building Material Carbonation Evaluation Using Primary Color Analysis. *CivilEng*, 6(2), p.29. <https://doi.org/10.3390/civileng6020029>
 8. Aliabadi, Morteza, Afsaneh Zarkesh, and Mohammadjavad Mahdavinejad. "Bioware fog collectors: the Texas horned lizard as a model for a biomimetic fog-harvesting." *Materials Research Express* 5, no. 11 (2018): 115502. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadab4>
 9. Aliabadi, Morteza, Afsaneh Zarkesh, Hossein Siampour, Sara Abbasian, Mohammadjavad Mahdavinejad, and Ahmad Moshaii. "Bioinspired azimuthally varying nanoscale Cu columns on acupuncture needles for fog collection." *ACS Applied Nano Materials* 4, no. 9 (2021): 8733-8743. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsanm.1c01288?got_o=supporting-info
 10. Al-Koury, H A. The role of local councils and administrative bodies of decentralization in spatial planning and the obstacles in Irbid Governorate / Jordan year 2021" (2022) *Journal of Humanities & Social Sciences*, 6(10), pp. 48-67. <https://doi:10.26389/AJSRP.R280222>
 11. Al-Mudhyan, A. (2022) "Housing policies and its impact on urban development in the Kingdom of Saudi Arabia during the period 1957-2021" (2022) *Journal of Humanities & Social Sciences*, 6(15), pp. 1-45. <https://doi:10.26389/AJSRP.D050922>
 12. ASTM C 979-05, 2010, Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concr.
 13. Bemanian, Mohammad Reza, Mohammad Javad Mahdavinejad, Ali Karam, and Shahabeddin Ramezani. "Application of Combined-Scale Smart Structures as a Necessity for Multifunctional Spaces." *Advanced Materials Research* 403 (2012): 4132-4136. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.403-408.4132>
 14. Dong, L. and Kang, M., 2025. Quantitative Comparison of Geographical Color of Traditional Village Architectural Heritage Based on K-Means Color Clustering—A Case Study of Southeastern Hubei Province, China. *Buildings* (2075-5309), 15. <https://doi.org/10.3390/buildings15050748>
 15. Embi, M.R. and Abdullahi, Y., 2012. Evolution of Islamic geometrical patterns. *Global Journal Al-Thaqafah*, 2(2), pp.27-39. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.03.002>
 16. Falahat, M. S. The concept of sense of place and its shaping factors, *Journal of Fine Arts*, Tehran, No. 26, 2006, <http://noo.rs/MQ2xu>.
 17. Fallah, F., Functional study of the properties of decorative concrete in different climatic environments, Master Thesis in Civil-Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran, 2008, [Thesis in Tehran University, in Persian]
 18. Ghiasi, V., Kamalabadi Farahani, M. (2024). 'Feasibility Study of Soil Pollution Removal Using the Electrokinetic Method', *Road*, 32(119), pp. 507-528. <https://doi:10.22034/road.2022.323983.2018>
 19. Gholami Rostam, N., M. J. Mahdavinejad, and M. Gholami Rostam. "Commercializing usage of nano-insulating materials in building industry and future architecture." *Procedia Materials Science* 11 (2015): 644-648. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.004>
 20. Guan, Y., Liu, S., & Zhang, Y. (2024). The origin, development, and application of fractal geometry theory in architecture. *Theoretical and Natural Science*, 31(1), 41-48. /cdn_sentry?url= <https://doi.org/10.54254/2753-8818/31/20240914>
 21. Habibi Lialestani, M., Na'eemi, M. R., Pour-mand, H., Afhami, R. (2024). 'The Aesthetic of Modern Brickwork Facades of Residential Apartments in Tehran in the Last Two Decades from the Perspective of Critical Regionalism', *Journal of Iranian Architecture Studies*, 12(24), pp. 243-261. <https://doi:10.22052/jias.2024.246673.1085>
 22. Hosseini, S. A., Fathi, S., Bemanian, M., Mahdavinejad, M. (2025). 'Decoding Architectural Design Elements Throught Shape Grammar (Typology of 64 traditional houses of Kashan, Yazd, and Isfahan)', *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 21(141), pp. 5-14. <https://doi:10.22034/bagh.2025.424282.5497>
 23. Kharazmi, M., Sarhangi, R.; Geometric Analysis of Forumad Mosques' Ornament. *Proceedings of Bridges*, 199-206, 2013. <http://archive.bridgesmathart.org/2013/bridges2013-199.html>
 24. Kumar, R., Aggarwal, V., & Surinder, M. (2021). Sustainable materials and techniques in affordable high-rise buildings - a case study. *E3s Web of Conferences*, 309, 01080. /cdn_sentry?url= <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901080>
 25. Law of the Sixth Five-Year Development Plan of the Islamic Republic of Iran, (cases approved in the open court of the Islamic Consultative Assembly), 2016. [Low]
 26. Mahdavinejad, Mohammad Javad, Marzieh Nazari, and Sina Khazforoosh. "Commercialization strategies for industrial applications of nanomaterials in building construction." *Advanced materials research* 829 (2014): 879-883. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.829.879>
 27. Mokhtarani N. Supplementary treatment of landfill leachate by combined microwave-persulfate process. *Eesd*, 2025; 1 (2):7-18.

- url: <http://jhs.modares.ac.ir/article-35-81003-fa.html>
28. Moradpour, R., Taheri-Nassaj, E., Parhizkar, T. and Ghodsian, M., 2013. The effects of nanoscale expansive agents on the mechanical properties of non-shrink cement-based composites: The influence of nano-MgO addition. *Composites Part B: Engineering*, 55, pp.193-202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.033>
 29. Neville, A. M., Propertise of concrete, translate by H. Fili, 2002. [Book]
 30. Nourijamshidi, Z., Valibeig, N., Kiani, M. (2019). 'Comparison study of Isfahan and Tehran Pahlavid Contemporary brickwork in the filed of Urban Facade', *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning*, 24(4), pp. 49-59. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2021.257780.672036>
 31. Nugraha, L. and Murwonugroho, W. (2021). Contemporary aesthetics of exposed bricks for buildings' façade and interior. *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*, 1098(6), 062048. /cdn_sentry?url=<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1098/6/062048>
 32. Piccinali, A., Diotti, A., Plizzari, G., & Sorlini, S. (2022). Impact of recycled aggregate on the mechanical and environmental properties of concrete: a review. *Materials*, 15(5), 1818. /cdn_sentry?url=<https://doi.org/10.3390/ma15051818>
 33. Pirnia, M. K.; Memarian, G. H., Tehran, Danesh Research Publishing, 2007. [Book]
 34. Prchebaf Motlagh F, Sadeghpour A, Alemi B. (2024). Analysis of Technical Chara cteristics of Bricks in Kashan Historial Buildings. *JHRE*. 43(186), 73-88. <https://doi.org/https://doi.org/10.22034/43.186.6>
 35. Salehi kakhki, A., Taghavinejad, B. (2017). 'The Study of Architectural Decorations of Ghaznavid Period', *Historical Researches*, 9(4), pp. 91-118. <https://doi.org/10.22108/jhr.2017.22088>
 36. Vahdat Talab, M., Ahadnejad Ebrahimi and F. Nir Mohammadzadeh Fazel, Indicators of Desirability in Contemporary Brick Art for Contemporary Architecture, 2nd International Congress on Structure, Architecture and Urban Development, Tabriz, 2014, <https://civilica.com/doc/353720>.
 37. Varona, F., Baeza-Brotons, F., Tenza-Abril, A., Baeza, F., & Bañón, L. (2020). Residual compressive strength of recycled aggregate concretes after high temperature exposure. *Materials*, 13(8), 1981. /cdn_sentry?url=<https://doi.org/10.3390/ma13081981>
 38. Zaben, A., Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O., & Al-Dulaijan, S. (2021). Influence of mix composition on the properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 22(5), 2939-2951. /cdn_sentry?url=<https://doi.org/10.1002/suco.202000062>
 39. Ziazadeh, S. A., & Ahmadi, S.B., Shahrabi Farahani, T., Use of ceramic pigment for making color concrete to reduce corrosion of reinforcements id (COI), *Tarbiat modares university*, 2002, <https://civilica.com/doc/34670>.
 40. Yousif, Y., Misnan, M., & Ismail, M. (2023). The influence of labelled green building materials on the performance of green construction projects. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1274(1), 012028. /cdn_sentry?url=<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1274/1/012028>