بررسی نقش مصالح بومی در بناهای سنتی شهر کاشان از منظر پایداری زیست‌محیطی

علمی‌پژوهشی

بابک عالمی*
مهدی ممتحن**
مرضیه نادری‌قمی***

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

چکیده

معماری سنتی کاشان، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی در ابعاد مختلف است که یکی از مهم‌ترین این ابعاد، مصالح به‌کاررفته در آن هستند. با توجه به اهمیت روزافزون بحث پایداری و همچنین تأثیر قابل توجه مصالح بر پایداری بنا، در این پژوهش به بررسی نقش مصالح بومی کاشان در پایداری زیست‌محیطی بناهای سنتی این شهر پرداخته شد. در این راستا ابتدا با مطالعهٔ منابع متعدد، شاخص‌های تأثیرگذار بر پایداری زیست‌محیطی مصالح در مراحل مختلف حیات آن‌ها شامل استخراج و تولید، حمل و انبار، ساخت‌وساز، بهره‌برداری و درنهایت تخریب و بازیافت، گردآوری شدند. سپس با بررسی‌های میدانی در بافت تاریخی کاشان و مطالعات کتابخانه‌ای، مصالح بومی به‌کاررفته در آن استخراج گردیدند تا از دیدگاه شاخص‌های جمع‌آوری‌شده مورد ارزیابی قرار گیرند. این ارزیابی در هر شاخص با روش متفاوتی نظیر گردآوری اطلاعات عددی، تحلیل کیفی و یا تدوین پرسش‌نامه انجام شد. درنهایت، بر مبنای تحلیل‌های صورت‌گرفته و با استفاده از طیف لیکرت، در هر شاخص امتیازاتی بین ۱ تا ۵ به مصالح مذکور اختصاص داده شد تا با جمع‌آوری امتیازات هر مورد، یک مقایسهٔ کیفی بین آن‌ها از دیدگاه تطابق با شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی حاصل شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از میان مصالح مورد بررسی شامل خاک، سنگ، گچ، آهک، مصالح نباتی و فلز، خاک با امتیاز ۸۳ از ۸۵ بیشترین تطابق و فلز با امتیاز ۳۷ از ۸۵ کمترین تطابق را با شاخص‌های مذکور دارند. با دقت روی تحلیل‌های موجود و امتیازات حاصل می‌توان دریافت که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر امتیازات پایین فلز، فرایند ساخت پیچیدهٔ آن و طی مراحل فراوری در کارخانه است، برخلاف خاک که نیازمند ساده‌ترین روش تولید، بدون انجام فرایندهای پیچیده برای آماده‌سازی است.

کلیدواژه‌ها:

معماری پایدار، بناهای سنتی کاشان، مصالح بومی، محیط‌زیست، مواد اولیه.

* دانشیار، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، نویسندهٔ مسئول، alemi@kashanu.ac.ir
** استادیار، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان
*** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۴ ـ پاییز و زمستان ۱۴۰۲
صفحات ۲۱۳-۱۹۳ ۱۹۳

پرسش‌های پژوهش

۱. مصالح پایدار چه مصالحی هستند و چه شاخصه‌هایی دارند؟

۲. در معماری سنتی شهر کاشان چه مصالحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و این مصالح تا چه میزان با شاخصه‌های پایداری زیست‌محیطی تطابق دارند؟

مقدمه

امروزه اصل پایداری یکی از مهم‌ترین مسائل مورد توجه بشر در دنیای معاصر است که از جهات مختلف (نظیر پایداری کالبدی، زیست‌محیطی، فرهنگی و اجتماعی) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. توسعهٔ پایدار، یعنی توسعه‌ای که نیازهای کنونی بشر را بدون به مخاطره انداختن نیاز نسل‌های آینده برآورده سازد و در آن به محیط‌زیست و نسل‌های فردا نیز توجه شود. تجلی توسعهٔ پایدار در حوزهٔ محیط ساخته‌شده، معماری پایدار نامیده می‌شود (اکرمی و علیپور ۱۳۹۴). ازطرفی، معماری سنتی ایران در ادوار مختلف همواره پاسخ‌گوی بسیاری از چالش‌های پیش روی انسان بوده و معماران قدیمی ایرانی به کمک انجام روش آزمون و خطا، موفق به کسب تجارب ارزشمندی شدند که بی‌توجهی به این مسائل، معماری این کشور را سال‌ها به عقب می‌راند. با وجود اینکه پایداری در معماری موضوعی است که در قرن معاصر مورد توجه قرار گرفته، با دقت و مطالعهٔ عمیق روی بناهای سنتی ایرانی می‌توان دریافت که بسیاری از اصول پایداری در این بناها رعایت شده است. استخراج و مطالعهٔ فنون مورد استفاده توسط گذشتگان می‌تواند در جهت رعایت اصول پایداری در ساخت بناهای امروزی بسیار کمک‌کننده باشد.

در دستیابی به این اهداف در بناهای سنتی ایرانی، عوامل بسیاری نظیر فنون اجرا، هندسه و تناسبات، شکل ظاهری بنا، دانش زمانه و... تأثیرگذار بوده‌اند. بی‌گمان یکی از این عوامل مهم و مؤثر در این زمینه، استفاده از مصالح ساختمانی مناسب و سازگار با محیط‌زیست بوده است. عدم تخریب طبیعت در برداشت، کمترین آلودگی در تولید، پایین بودن مصرف انرژی در تولید، صرفه‌جویی در انرژی حمل‌ونقل، کاهش مصرف انرژی در بهره‌برداری، کاهش هزینه‌های تمام‌شده و از همه مهم‌تر، بازگشت سریع به طبیعت و تخریب ننمودن محیط‌زیست، از مزایای مصالح بومی به شمار می‌رود (همان). استفاده از مصالحی با این مزایا، یکی از مهم‌ترین عوامل کمک‌کننده به استادکاران قدیمی در مسیر دست‌یابی به چنین اهدافی در بناهای سنتی بوده است. مصالح بومی یا به‌اصطلاح بوم‌آورد، شامل مصالح موجود یا قابل تهیه در روستا یا شهر یا مصالح واردشده به روستا یا شهر از فاصله‌ای کوتاه می‌شود (ویسه و دیگران ۱۳۸۸)؛ یعنی برخلاف روشی که امروزه در ساخت بناها مورد استفاده قرار گرفته و مصالح غیربومی از دورترین مسافت‌ها حمل شده و در بنا به کار گرفته می‌شوند و آسیب‌های بسیاری به محیط‌زیست می‌رسانند. معماری سنتی و بومی با موقعیت خود ازنظر جغرافیایی و اقلیمی منطبق است، مصالح آن طبیعی بوده و در محل قابل تأمین می‌باشد و پس از پایان عمر بنا، به‌راحتی به طبیعت بازمی‌گردد (اکرمی و علیپور ۱۳۹۴). هدف پژوهش پیش رو آن است که ابتدا به کمک مطالعات کتابخانه‌ای و مشاهدهٔ بناهای سنتی شهر کاشان، مصالح بومی مورد استفاده در بافت تاریخی این شهر استخراج شوند. سپس با استناد بر شاخص‌های مصالح پایدار که با مطالعهٔ پژوهش‌ها و منابع مربوط استخراج می‌شوند، به ارزیابی این مصالح از منظر پایداری زیست‌محیطی پرداخته می‌شود. درنهایت با تمرکز بر ترکیبات به‌کاررفته در آن‌ها و روند تولید و بهره‌برداری این مصالح، پیامدهای احتمالی مصالح مورد نظر برای محیط‌زیست، از مرحلهٔ استخراج و تولید تا بازیافت و بازگشت به طبیعت، مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۱. پیشینهٔ پژوهش

با توجه به ضرورت و اهمیت مسئلهٔ پایداری در معماری در دنیای معاصر و وجود ظرفیت‌های اثبات‌شده در همهٔ وجوه بناهای سنتی نواحی مختلف، محققان در سراسر جهان به‌دنبال استخراج شاخص‌های پایداری در معماری

تاریخی و مصالح پایدار به‌کاررفته در آن‌ها هستند. توجه به خطرات زیست‌محیطی ساخت‌وسازهای امروزی به‌همراه توصیف و تحلیل همهٔ عوامل تأثیرگذار بر انتخاب مصالح پایدار، نشان می‌دهد که استفاده از مصالح بومی هر منطقه در امر ساختمان‌سازی موجب کاهش خطرات زیست‌محیطی ساخت‌وساز می‌شود (همان). پژوهشی با تلاش برای شناسایی اصول و روش‌های پایداری در مسکن سنتی، به ارائهٔ راهکارهایی برای طراحی معماری پایدار می‌پردازد (ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴). استخراج ویژگی‌های قابل تکرار معماری سنتی در راستای دستیابی به اهداف معماری پایدار، به درک اهمیت نقش معماری بومی در ایجاد رویکرد پایداری در معماری منجر می‌شود (ارمغان و گرجی‌مهلبانی ۱۳۸۸). در پژوهش‌های متمرکز بر بحث پایداری در مناطق و اقلیم‌های مشخصی از کشور ایران، با بررسی تناسب و هماهنگی موجود بین تکنیک، مصالح، محیط‌زیست و عملکرد بناهای سنتی شهرهای کویری ایران، پس از اثبات وجود این هماهنگی، به یک سری نکات اصلی طراحی در این مناطق که به کاهش هرچه بیشتر مصرف انرژی منجر شده، دست یافته می‌شود (رستمی، جاویدنژاد، و منصوری ۱۳۹۸). بررسی و تحلیل چند نمونهٔ انتخابی از این اقلیم، با تبیین وجود ارتباطی تنگاتنگ بین معماری بومی و شرایط آب‌وهوایی، نشان می‌دهد که با طراحی و اتخاذ مناسب‌ترین رویکردها می‌توان به معماری پایدار در این مناطق دست یافت (زرین، طاهباز، و مفیدی شمیرانی ۱۴۰۰). همچنین بررسی میزان مصرف انرژی در خانه‌های بومی روستایی بخش جلگه‌ای گیلان ازطریق انتخاب، مقایسه و تحلیل میزان مصرف انرژی سه گونه از این خانه‌ها با مصالح بومی و جدید، نشانگر این است که ساختمان‌های نمونه با مصالح بومی مصرف انرژی کمتری نسبت به مصالح جدید دارند (زهری، طاهباز، و اعتصام ۱۳۹۵). پژوهشی با رویکرد بهره‌گیری از مصالح بومی، سعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی داشته و در این راستا به بررسی نمونه‌های یکسان در محیط بومی گرم و بیابانی گناباد با مصالح مصرفی متفاوت پرداخته است (مداحی، عابدی، و صداقت‌مند ۱۳۹۶).

در نقاط مختلف جهان نیز مطالعاتی روی مسئلهٔ پایداری در بناهای سنتی صورت گرفته است. تلاش برای اثبات مصالح بومی و ایجاد پایداری در معماری با به‌کارگیری آن‌ها، مشخص می‌کند که راه رسیدن به پایداری در محیط‌زیست، بازگشت به راهکارهای همگام با طبیعت است (Mahmoud and Rowaida 2019). بررسی رابطهٔ بین معماری پایدار پرتغال و مصالح بومی برای ارزیابی، سهم این مصالح در پایداری و مقایسهٔ آن‌ها از دیدگاه زیست‌محیطی با مصالح صنعتی، توانایی معماری بومی در ایجاد تعامل بین معماری و شرایط اقلیمی را مشخص می‌کند (Fernandes et al. 2014). با تمرکز بر چالش‌های مصرف انرژی ساختمان‌ها در اقلیم گرم و بیابانی عربستان سعودی، سعی در یافتن راهی برای کاهش مصرف انرژی ازطریق استفاده از تکنیک‌ها و مصالح بومی می‌شود (Alrashed, Asif, and Burek 2017). ارزیابی علت پایداری و سازگاری با محیط در خانه‌های بومی بالی که با مصالح بومی ساخته شده‌اند، ازطریق بررسی دو نمونه، کارآمد بودن این راهکارها برای نیازهای امروزی را تبیین کرده (Flaiban 2019) و پژوهشی روی معماری پادشاهی سوکور، بر استفاده از مصالح به‌عنوان وسیله‌ای پایدار در حل مشکلات پیش روی معماری، تمرکز می‌کند (Dodo et al. 2014). همچنین بررسی رابطهٔ بین معماری بومی چین و مصالح محلی، نشان‌دهندهٔ اهمیت استفاده از این مصالح برای بروز پایداری در معماری بومی است (Fang 2014).

از بررسی پژوهش‌های نگاشته‌شده در این زمینه می‌توان دریافت که روی مسئلهٔ تأثیر مصالح بومی بر پایداری بناهای سنتی و معماری بومی هر منطقه، مطالعات بسیاری در نقاط مختلف جهان صورت گرفته و اهمیت این موضوع کاملاً تبیین شده است. در این پژوهش سعی بر این است که با بهره‌گیری از نتایج مطالعات مرتبط دربارهٔ انواع و ویژگی‌های مصالح پایدار، به بررسی مصالح بومی به‌کاررفته در بناهای تاریخی شهر کاشان پرداخته و ضمن تمرکز بر این بناها و استخراج مصالح به‌کاررفته در آن‌ها، رعایت شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی در این مصالح در مراحل مختلف استخراج و تولید تا اجرا و بازیافت، مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. چارچوب نظری پژوهش

۲. ۱. معماری پایدار و شاخص‌های آن

مفهوم پایداری در معماری آن است که بناهایی خلق کنیم که به نیازهای زمان حال خود پاسخ‌گو باشند و نه اینکه صرفاً عمر زیادی را سپری کنند. چون ممکن است یک بنا با عمر چندین صدساله با نیازهای زمان حال هماهنگی نداشته باشد. نحوهٔ ارتباط با طبیعت که بستر هرگونه خلق فضایی است و چگونگی استفاده و حفظ و نگهداری آن، یکی از ریشه‌های اصلی پایداری است. همچنین منطقه‌گرایی و بوم‌گرایی، به‌معنای همراهی بنا با بوم و اقلیم خود نیز، یکی دیگر از مصادیق پایداری است. میزان اثرگذاری ارزش‌های بومی و منطقه‌ای بر طراحی و خلق فضا را نیز می‌توان یکی دیگر از این مصادیق دانست (ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴). مفهوم معماری پایدار را می‌توان از وجوه مختلفی اعم از وجه زیست‌محیطی، اجتماعی و فرهنگی، وجه اقتصادی، وجه کالبدی و... بررسی کرد. با توجه به اینکه مصالح، که موضوع مورد توجه در این مطالعه است، پدیده‌ای است که تأثیر زیادی روی وجوه زیست‌محیطی یک بنا می‌گذارد، در این پژوهش به مطالعهٔ پایداری زیست‌محیطی در معماری پرداخته می‌شود. با توجه به نیازهای امروز معماری و محدودیت درزمینهٔ منابع انرژی، شاخص‌هایی را می‌توان به‌عنوان اصول معماری پایدار از وجه زیست‌محیطی، با مطالعهٔ منابع و متون تخصصی در این حوزه استخراج کرد که شرح آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: شاخص‌های پایداری در معماری از وجه زیست‌محیطی

شاخص‌های پایداری در معماری از وجه زیست‌محیطی	منابع
هماهنگی و سازگاری با طبیعت و محیط‌زیست	ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ بیرانوند ۱۳۹۰؛ دربان و جوادنیا ۱۳۹۷؛ ارمغان و گرجی‌مهلبانی ۱۳۸۸؛ Akadiri, Chinyio, and Olomolaiye 2012
صرفه‌جویی در مصرف انرژی	رستمی، جاویدی‌نژاد، و منصوری ۱۳۹۸؛ ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ دربان و جوادنیا ۱۳۹۷؛ هیرمندی نیاسر ۱۳۹۵؛ ستاری و معتضدیان ۱۳۹۹
تأثیرپذیری از معماری بومی و اقلیم منطقه	ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ هیرمندی نیاسر ۱۳۹۵؛ دربان و جوادنیا ۱۳۹۷؛ ستاری و معتضدیان ۱۳۹۹؛ ارمغان و گرجی‌مهلبانی ۱۳۸۸؛ Akadiri, Chinyio, and Olomolaiye 2012
پاسخ درست به نیازهای عملکردی ساکنین	ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ ستاری و معتضدیان ۱۳۹۹
جلوگیری از ایجاد آلودگی	بیرانوند ۱۳۹۰؛ دربان و جوادنیا ۱۳۹۷
استفاده از منابع تجدیدپذیر	بیرانوند ۱۳۹۰؛ ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ تقی‌پورقصابی و میرزامحمدی ۱۳۹۸
استفاده کمتر از انرژی‌های تجدیدناپذیر و آلوده‌کننده	بیرانوند ۱۳۹۰؛ تقی‌پور قصابی و میرزامحمدی ۱۳۹۸؛ ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ هیرمندی نیاسر ۱۳۹۵
انعطاف‌پذیری و عمر طولانی	اکرمی و علیپور ۱۳۹۴؛ پارچه‌باف مطلق و عالمی ۱۴۰۰
از بین بردن یا به حداقل رساندن مصرف مواد آلوده و سمی	ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ تقی‌پور قصابی و میرزامحمدی ۱۳۹۸
استفاده از مصالح قابل بازیافت	دربان و جوادنیا ۱۳۹۷؛ ستاری و معتضدیان ۱۳۹۹؛ تقی‌پور قصابی و میرزامحمدی ۱۳۹۸؛ ضرغامی، خاکی، و سادات ۱۳۹۴؛ ارمغان و گرجی‌مهلبانی ۱۳۸۸؛ Akadiri, Chinyio, and Olomolaiye 2012
هماهنگی با سایت بنا	ستاری و معتضدیان ۱۳۹۹؛ هیرمندی نیاسر ۱۳۹۵؛ دربان و جوادنیا ۱۳۹۷

۲. ۲. مصالح پایدار

مصرف بیش از حد و ناصحیح مصالح جدید موجب آسیب‌های زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری شده است و از این پس با رواج مصالح صنعتی، این آسیب‌ها بیشتر و زیان‌آورتر خواهد شد (Zhou et al. 2009). انتخاب مصالح یکی از تصمیمات معمار در فرایند طراحی است که اگر به‌شکلی صحیح و با مطالعه صورت نگیرد، جبران خسارات آن دشوار خواهد بود. به‌منظور کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از مصالح ساختمانی، بایستی چرخهٔ حیات مصالح از زمان استخراج از طبیعت تا بازگشت دوباره به طبیعت و انرژی مصرفی در این چرخه بررسی شود (اکرمی و علیپور ۱۳۹۴). در بحث معماری پایدار، ویژگی‌هایی برای مصالح ساختمانی مطلوب برشمرده می‌شود که این عوامل را می‌توان

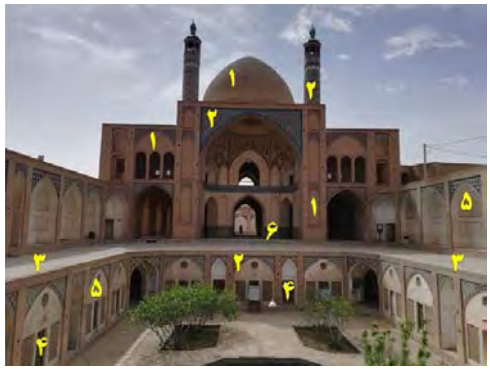
به‌صورت خلاصه، کاهش مصرف منابع و کاهش تولید ضایعات ذکر نمود و بایستی آن‌ها را در کل چرخهٔ حیات مصالح در نظر گرفت (Gabriella, Janssen, and Hendriks 2002; Yagi and Halada 2001). با مطالعهٔ روی منابع و اسناد تخصصی در این زمینه، شاخص‌هایی برای پایداری زیست‌محیطی مصالح در مراحل مختلف حیات آن‌ها، شامل استخراج و تولید، حمل و انبار، ساخت‌وساز، بهره‌برداری و درنهایت تخریب و بازیافت، استخراج شده که این شاخص‌ها در جدول ۲ منعکس شده‌اند.

جدول ۲: عوامل مؤثر در پایداری زیست‌محیطی مصالح (براساس مطالعهٔ منابع)

مراحل فراوری مصالح	عوامل مؤثر در پایداری زیست‌محیطی مصالح	منابع
استخراج و تولید	کمترین میزان مصرف انرژی برای تولید	Zimmermann, Althaus, and Haas 2005; Calkins 2008; Wever 1997; Zhou and Yin 2009; اکرمی ۱۳۸۳؛ کیم ۱۳۸۲
	استخراج حداقل مواد خام و مصرف کمترین منابع اولیه و آب	
	کمترین خطر استحصال برای محیط‌زیست	
	عدم ایجاد مسمومیت و سرطان‌زایی	
حمل و انبار	کوتاه‌ترین فاصلهٔ حمل‌ونقل و بی‌نیازی از انبار	ویسه و دیگران ۱۳۸۸؛ اکرمی و علیپور ۱۳۹۴؛ Calkins 2008
ساخت‌وساز	حداقل زمان ساخت	San- jose et al. 2007; Howarth and Hadfield 2006 اکرمی و علیپور ۱۳۹۴؛ ویسه و دیگران ۱۳۸۸
	کمترین هزینهٔ تولید	
	نیاز نداشتن به ماشین‌آلات پیشرفته و فناوری ساخت دور از دسترس	
	عدم ایجاد سروصدا	
	استفاده نکردن از مواد شیمیایی در تولید	
بهره‌برداری	دوام بالای مصالح در راستای افزایش طول عمر ساختمان	Godfaurd, Clements - Croome, and Jeronimidis 2004; Yagi and Halada 2001; Morel et al. 2001; Isik and Tulbentci 2008; Zimmermann, Althaus, and Haas 2005; Lyons 2014 قبادیان ۱۳۸۲؛ هادی، نصراللهی، و حسینی ۱۳۹۰؛ صادق‌پی ۱۳۹۱
	حداکثر تناسب مصالح انتخابی با بوم و آب‌وهوای محل	
	قابلیت تعمیرات در زمان بهره‌برداری	
	کمترین ضریب انتقال حرارت و بی‌نیاز از عایق‌کاری حرارتی	
تخریب و بازیافت	حداکثر قابلیت بازگشت به طبیعت و امکان استفادهٔ مجدد	Gabriella, Janssen, and Hendriks 2002; Calkins 2008; Yagi and Halada 2001; Wever 1997; Howarth and Hadfield 2006
	دارای بیشترین منابع اولیهٔ تجدیدپذیر	
	کمترین میزان ضایعات و پسماندها و حداقل ایجاد آلودگی در تولید و بازیافت	

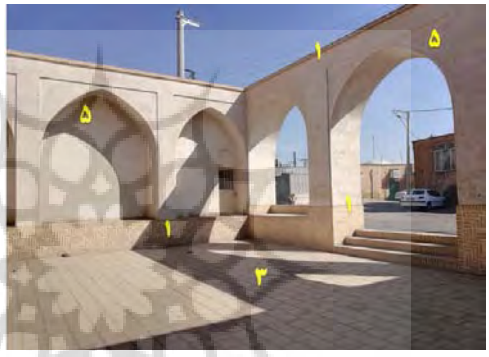
۲. ۳. مصالح بومی شهر کاشان

این پژوهش ضمن بررسی معماری سنتی کاشان به‌وسیلهٔ مطالعهٔ منابع مرتبط و همچنین مشاهدات میدانی روی تعدادی از بناهای تاریخی این شهر با تمرکز بر انواع مصالح به‌کاررفته در آن‌ها (تصویر ۱ و ۲ و ۳)، به استخراج مواد و مصالح بومی این منطقه که از گذشته در بناهای سنتی این شهر به کار برده می‌شده‌اند، پرداخته است. مصالح بومی یا به‌اصطلاح بوم‌آورد، شامل مصالح موجود یا قابل تهیه در روستا یا شهر یا مصالح واردشده به روستا یا شهر از فاصله‌ای کوتاه می‌شود (ویسه و دیگران ۱۳۸۸)؛ درنتیجه برای استخراج مصالح بومی کاشان، نیازی به تمرکز بر بناهای یک دورهٔ تاریخی مشخص و یا با کاربری واحد وجود ندارد و این مصالح حتی امروزه در روستاهای اطراف کاشان نیز به کار می‌روند. در ادامه ضمن معرفی و توضیحات مختصری دربارهٔ این مصالح، به ارزیابی تطابق شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی با مصالح مذکور پرداخته خواهد شد.



تصویر ۱: نمای داخلی مسجد تاریخی آقابزرگ

تصویر ۲: نمای داخلی خانهٔ تاریخی عزیززادگان



۱ آجرچینی
۲ کاشی‌کاری
۳ خشت برای کفسازی
۴ چوب و فلز برای درب‌ها
۵ نوعی ملات گچی
۶ ازاره سنگی
۷ ملات کاه‌گل

تصویر ۳: گشودگی محلهٔ سیقن

مصالح خاکی، یکی از قدیمی‌ترین و گسترده‌ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده توسط بشر به‌ویژه در نواحی گرم و خشک بوده‌اند (درمحمدی و رحیم‌نیا ۱۳۹۶)؛ چراکه دارای خواص انتقال حرارتی بهینه برای گرمایش زمستانی و سرمایش تابستانی، دسترسی آسان و سازگاری با آب‌وهوای محیط و همچنین رنگ روشن برای جلوگیری از گرم شدن ساختمان هستند. ناگفته نماند مصالحی که رنگ روشن دارند، جذب حرارتی کمتری داشته و انرژی خورشید را منعکس می‌کنند (Calkins 2008). رایج‌ترین مصالح خاکی مورد استفاده در این مناطق شامل خشت، آجر و انواع ملات‌های گلی (مانند کاهگل، ساروج، شفته‌آهک، گچ‌خاک و...) هستند که دارای مراحل ساخت ساده و سریعی بوده و در گذشته، در محل ساخت بنا با استفاده از خاک حاصل از گودبرداری، توسط کارگران تولید می‌شده‌اند.

گچ و آهک، از معدن استخراج می‌شوند و معادن آن‌ها چندان در دسترس نیستند؛ اما درصورتی‌که مانند فرایندی که در ساخت بناهای سنتی طی می‌شده است، این مصالح در کوره‌های سادهٔ محلی فراوری شوند، می‌توان آن‌ها را جزء مصالح بومی به شمار آورد. همچنین مصالح نباتی مانند چوب، کاه، الیاف گیاهی و... به‌علت صرف انرژی و تولید آلودگی اندک در تولید و فراوری سریع و ساده، از گذشته جزء مصالح بومی مورد استفاده حتی در اقلیم‌های خشک بوده‌اند و اصولاً در ساخت بناهای سنتی این مناطق، از چوب درختانی استفاده می‌شده که به‌میزان مطلوبی در آن اقلیم موجود بوده و از فواصل نزدیک قابل تهیه باشند. سنگ نیز از گذشته در ساخت بناهای این منطقه به‌صورت طبیعی، یا در صورت لزوم با اندکی تغییر شکل (به‌صورت سنگ قلوه یا سنگ لاشه) مورد استفاده قرار می‌گرفته و می‌تواند جزء مصالح بومی به شمار رود. اما برای تولید سنگ پلاک، انرژی فراوانی صرف شده و آلودگی و سروصدای زیادی ایجاد می‌شود و در این حالت جزء مصالح بومی به شمار نمی‌رود. هرچه از مصالح به‌صورت اولیه و کمتر فراوری‌شده استفاده شود، استخراج مواد خام کمتر و مصرف منابع کاهش می‌یابد (کیم ۱۳۸۲).

فلزات با وجود اینکه در گذشته سازهٔ اصلی ساختمان را تشکیل نمی‌داده‌اند، در برخی بخش‌های بناهای تاریخی مانند میخ‌ها و اتصالات مورد استفاده قرار می‌گرفتند که این موضوع نشان‌دهندهٔ در دسترس بودن آن‌ها و یا طی مسافت اندکی برای تأمین این مصالح در آن زمان است. درنتیجه لازم است در بررسی مصالح بومی کاشان، فلزات نیز مد نظر قرار گیرند. قدیمی‌ترین فلزی که ایرانیان باستان به آن دست یافتند، مس بوده است (زمرشیدی ۱۳۷۷؛ بزرگمهری و خدادادی ۱۳۸۹). به‌تدریج با کشف قلع و ترکیب آن با مس، آلیاژی با نام مفرغ پدید آمد و کمی بعد از این دوران، آهن شناخته شد و در حدود هزارهٔ اول پیش از میلاد با تبدیل آهن به فولاد، صنعت آن به‌سرعت پیشرفت کرد (بزرگمهری و خدادادی ۱۳۸۹). این فلزات از گذشته برای ساخت اجزائی نظیر میخ، قفل و کلید، لولا، گل‌میخ، کوبه، دستگیره و... در ساخت بناها مورد استفاده بوده‌اند. با توجه به مطالب ذکرشده و با مطالعهٔ منابع مرتبط، رایج‌ترین مصالح بوم‌آورد مورد استفاده در اقلیم گرم و خشک و در بناهای سنتی شهر کاشان استخراج شده و به‌همراه مواد تشکیل‌دهنده و شرح مختصری از شیوهٔ تهیه و ساخت آن‌ها، در جدول زیر منعکس شده‌اند.

جدول ۳: مصالح بومی رایج در بناهای سنتی شهر کاشان

نوع مصالح	نام مصالح		منبع تهیه/ مواد تشکیل‌دهنده	شیوهٔ تهیه/ شیوهٔ ساخت (به‌اختصار)
مواد اولیه	خاک	رس	زمین‌های اطراف محل احداث بنا	برداشت و انتقال به محل، الک کردن
		مخلوط		برداشت و انتقال به محل
		ماسه		برداشت از بستر مناسب و انتقال به محل
	سنگ	شن	زمین‌های اطراف و تکه‌سنگ‌های درشت	شکستن و خرد کردن تکه سنگ‌ها، دانه‌بندی به‌وسیلهٔ الک‌های مخصوص
		قلوه و لاشه	معادن سنگ	استخراج از معدن، برش به ابعاد مورد نیاز
	گچ		سنگ گچ موجود در طبیعت	پختن سنگ گچ در کوره، آسیاب کردن
	آهک		سنگ آهک موجود در طبیعت	پختن سنگ آهک در کوره، آب گرفتن به آهک پخته‌شده و زیرورو کردن آن، سرند کردن آهک شکفته‌شده
	مصالح نباتی		بافت گیاهی مناسب نزدیک محل احداث بنا	قطع درختان، حمل به محل مصرف، پوست کندن و خشک کردن چوب، برش زدن به ابعاد مورد نیاز
	فلز		معادن دارای فلز مورد نظر	استخراج از معدن، فراوری در کارخانه، تبدیل به اشکال و وسایل مورد نیاز، انتقال به محل ساخت بنا
مواد ترکیبی	خشت		خاک+ آب	ترکیب مواد، ورز دادن، آخوره بستن، قالب زدن، خشک کردن در آفتاب
	آجر		خاک رس+ آب	ترکیب مواد، ورز دادن، آخوره بستن، قالب زدن، پختن در کوره
	کاشی		خاک رس+ آب+ افزودنی‌ها	ترکیب مواد، ورز دادن، آخوره بستن، قالب زدن، خشک کردن، پختن در کوره، لعاب دادن
	کاهگل		خاک مناسب+ آب+ کاه	ترکیب مواد، آخوره بستن مواد، ورز دادن
	ساروج		آهک شکفته+ خاکستر+ خاک رس+ ماسه بادی+ الیاف گیاهی+ آب+ افزودنی‌ها	ترکیب مواد، ورز دادن، آخوره بستن، کوبیدن
	شفته‌آهک		مخلوط شن و ماسه و خاک+ آهک شکفته+ آب	ترکیب مواد، ورز دادن
	گچ‌خاک		خاک رس+ گچ+ آب	ترکیب مواد، هم زدن
	گل‌آهک		خمیر آهک شسته+ خاک رس+ آب	ترکیب مواد، آخوره بستن مواد، ورز دادن

با مطالعه روی منابع مختلف در حوزهٔ مصالح‌شناسی، مصالح مورد استفاده در بناهای سنتی شامل مواد اولیه و تعدادی از مواد ترکیبی، به‌همراه شرح مختصری از شیوهٔ ساخت آن‌ها در جدول بالا ذکر شدند. با دقت روی فرایند تولید و روش ساخت مواد ترکیبی، می‌توان دریافت که برای تولید این مواد، فرایند پیچیده‌ای روی مواد اولیه انجام نشده و ماهیت مواد اولیهٔ تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها به‌طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند. ازآنجاکه در ساخت بناهای تاریخی شهر کاشان، غالباً از مواد خالص بدون تغییرات اساسی و یا مواد ترکیبی‌ای که مطابق جدول، با تغییرات جزئی روی مواد اولیه تولید شده‌اند استفاده می‌شود، در این پژوهش ارزیابی شاخص‌های پایداری با تمرکز بر مواد اولیه صورت می‌گیرد؛ زیرا با توجه به عدم ایجاد تغییرات اساسی در ماهیت شیمیایی این مواد و صرف انرژی محدود و زمان نسبتاً کوتاه طی مراحل ساخت و تولید، بررسی مواد اولیهٔ تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها تا حدود زیادی بیانگر خواص و ویژگی‌های این مواد ترکیبی نیز می‌باشد و ضرورتی برای بررسی تک‌به‌تک این مصالح به‌صورت مجزا وجود ندارد.

۳. روش پژوهش

پژوهش حاضر به روش ترکیبی، با استفاده از تحلیل، استدلال منطقی و به‌کارگیری پرسش‌نامه برای استفاده ازنظر خبرگان تهیه شده است که در آن با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، اطلاعات مورد نیاز استخراج و توصیف شده و در ادامه به تحلیل این مطالب پرداخته شده است. در این راستا، به‌منظور تنظیم طیفی مناسب برای سنجش و مقایسهٔ هریک از این مصالح از دیدگاه شاخص‌های ذکرشده برای پایداری زیست‌محیطی، طیف لیکرت با ۵ درجهٔ خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و خیلی خوب به کار گرفته شد. مقیاس لیکرت که در اصل توسط رنسیس لیکرت در سال ۱۹۳۲ معرفی شد، به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف مانند اندازه‌گیری خواص قابل مشاهده در زمینه‌های علوم اجتماعی و انسانی، اثربخشی داروها در داروشناسی، ساختارهای پنهانی که مستقیماً قابل مشاهده نیستند و موارد دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرد (میراحمدی‌زاده و دیگران ۱۳۹۷). همچنین برخی کاربردهای این روش در حیطهٔ معماری، نظیر رتبه‌بندی هشت راهکار پدافند غیرعامل در طراحی ساختمان‌های مسکونی (صفوی همامی و دیگران ۱۳۹۶)، استخراج ارزش‌های معماری پل‌های تاریخی (کرجانی و دیگران ۱۴۰۲) و ارزیابی ۴۰ نمونه ساختمان بلندمرتبهٔ مسکونی از منظر شاخص‌های معماری ایرانی–اسلامی (مقدم‌راد و سپهری مقدم ۱۳۹۹) در پژوهش‌های مختلف مشاهده می‌شوند.

در بررسی برخی از شاخص‌های مذکور، امکان استخراج اطلاعات کمی وجود داشته که در این صورت، داده‌های عددی موجود، در این ۵ بازه تقسیم‌بندی شدند. برخی دیگر از شاخص‌ها به‌صورت کیفی قابل تحلیل و بررسی بوده که پس از ذکر اطلاعات به‌دست‌آمده در آن زمینه، امتیاز مناسب بین ۵ درجهٔ مذکور به مصالح مورد نظر اختصاص داده شد. دستهٔ سوم از این شاخص‌ها به‌گونه‌ای بودند که نه امکان استخراج داده‌های عددی را داشته و نه اطلاعات موثق کافی برای یک تحلیل کیفی قابل قبول برای آن‌ها در دسترس بود. در این حالت، پرسش‌نامه‌ای شامل اسامی مصالح مورد بررسی و شاخص‌های مورد نظر به‌همراه توضیحات لازم، تنظیم گردید و به‌صورت یک مصاحبهٔ نیمه‌عمیق، توسط ۲۰ نفر متخصص معماری پاسخ داده شد. این ۲۰ نفر متخصص، از میان اساتید دانشگاهی رشتهٔ معماری که دارای تجربهٔ فعالیت در این زمینه و مدارک کارشناسی‌ارشد و دکتری هستند، انتخاب شدند تا علاوه‌بر دانش آکادمیک کافی و جامع در ابعاد مختلف موضوع، تجربهٔ فعالیت در پروژه‌های متعدد و آشنایی با انواع مصالح را نیز داشته باشند. با توجه به دانش بالای مصاحبه‌شوندگان، به‌جای طرح سؤالات کوتاه و جزئی، از سؤالات جامع‌تر استفاده شد و از متخصصان درخواست شد تا به هرکدام از مصالح مورد بررسی، امتیازی بین ۱ تا ۵ اختصاص دهند و تعیین کنند کدام مورد از جهت آن شاخص، شرایط مطلوب‌تری دارد که درنهایت، پاسخ‌های ارائه‌شده توسط این کارشناسان اغلب با یکدیگر هم‌راستا بودند و پاسخ‌های متضاد و متناقضی دیده نمی‌شد. همچنین با در نظر گرفتن قسمتی برای ارائهٔ توضیحات اضافهٔ متخصصان، از آن‌ها خواسته شد تا هرگونه اطلاعات جانبی را که در رابطه با هر شاخص دارند، در قسمت مربوطه داخل پرسش‌نامه درج کنند تا در فرایند تحلیل برای نگارندگان کمک‌کننده باشد. در ادامه، هریک از این روش‌ها حین تحلیل و بررسی شاخص مورد نظر و ارائهٔ داده‌های موجود، به‌تفصیل بررسی خواهند شد.

۴. یافته‌ها و تحلیل، ارزیابی مصالح از منظر پایداری زیست‌محیطی

براساس توضیحات ارائه‌شده از تعریف مصالح بومی کاشان و ویژگی‌های آن‌ها و با استفاده از جدول تهیه‌شده از انواع و مواد تشکیل‌دهندهٔ این مصالح، با استناد بر شاخص‌های ذکرشده برای پایداری زیست‌محیطی در مصالح، به ارزیابی آن‌ها از دیدگاه پایداری زیست‌محیطی پرداخته و نتایج مطالعات پیشین مبنی‌بر پایدار بودن مصالح بومی، به‌طور اختصاصی برای شهر کاشان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به تعدد یافته‌های کلی و جزئی مستخرج از منابع در پژوهش حاضر، بیان یافته‌ها به‌تدریج و به‌صورت هم‌زمان با تحلیل آن‌ها صورت می‌گیرد و این روش، راه مناسب‌تری نسبت به جداسازی بخش یافته‌ها و تحلیل به نظر می‌رسد.

۴. ۱. کمترین میزان مصرف انرژی برای تولید

انرژی صرف‌شده برای مصالح، شامل بخش‌های گوناگونی نظیر انرژی حین استخراج، انرژی زمان اجرا و یا حتی انرژی مصرفی برای تعمیر و نگهداری مصالح است؛ در این قسمت، انرژی مورد نیاز برای تولید مد نظر است. از میان مصالح مورد بررسی در این پژوهش، خاک، فقط نیازمند برداشت از بستر، حمل به محل ساخت و انجام فرایندهای بسیار ساده (مانند الک کردن) برای آماده‌سازی است که تنها انرژی لازم برای تولید آن، انرژی حمل‌ونقل بوده که برای تهیهٔ تمامی مصالح مورد نیاز است. درنتیجه خاک با کمترین مصرف انرژی ممکن، در بازهٔ خیلی خوب قرار می‌گیرد. مصالح سنگ، گچ، آهک و آهن همگی علاوه‌بر موارد ذکرشده، نیاز به استخراج از معدن نیز دارند که سنگ به‌دلیل اینکه صرفاً نیازمند استخراج و انجام مراحلی نظیر شکستن و خرد کردن سنگ‌ها به ابعاد مورد نظر است، بعد از خاک، در بازهٔ خوب قرار می‌گیرد. در تهیهٔ چوب نیز تنها انرژی قابل توجه برای تولید، مربوط به مراحلی نظیر قطع درختان، خشک کردن چوب‌ها در هوای آزاد و بریدن آن‌ها به ابعاد مورد نظر است که نیاز به صرف انرژی چندانی ندارد و می‌توان به‌طور حدودی آن را معادل انرژی مورد نیاز برای استخراج سنگ دانست و چوب را نیز در بازهٔ خوب قرار داد. گچ، آهک و آهن نیاز به پخت در کوره و فراوری دارند. از میان انرژی‌های مصرفی برای تولید این مصالح، فقط بخش‌های محدودی مانند مرحلهٔ پخت در کوره امکان ارائهٔ حدودی اطلاعات عددی دارد. اگر به سنگ گچ در حدود ۱۷۰ درجه حرارت بدهیم، ۱/۵ مولکول از آب تبلور خود را از دست داده و به گچ ساختمانی به فرمول $CaSO_4 . 0.5H_2O$ تبدیل می‌شود (کباری ۱۳۷۵). همچنین اگر فشار یک اتمسفر باشد، سنگ آهک در حرارت ۸۹۴/۵ درجه می‌پزد (همان؛ حامی ۱۳۷۶). با توجه به شباهت حدودی مراحل فراوری گچ و آهک، براساس حرارت بالاتر مورد نیاز برای کورهٔ پخت آهک، می‌توان گفت در مقایسه با گچ، نیاز به انرژی بیشتری برای تولید دارد و درنتیجه گچ در بازهٔ متوسط و آهک در بازهٔ ضعیف قرار می‌گیرند. آهن در گرمای ۱۵۳۰ درجه ذوب می‌شود (حامی ۱۳۷۶). دمای بالای مورد نیاز برای ذوب کردن آهن و همچنین انرژی لازم برای تهیهٔ وسایل و اشکال فلزی مختلف در کارخانه، نشان می‌دهد که تولید آهن‌آلات در مقایسه با سایر مصالح مورد بررسی، نیاز به انرژی بیشتری دارد و در بازهٔ خیلی ضعیف قرار می‌گیرد.

۴. ۲. استخراج حداقل مواد خام و مصرف کمترین منابع اولیه و آب

در مصالحی نظیر خاک و سنگ، تمام مادهٔ استخراج‌شده استفاده می‌شود و دارای نخالهٔ بسیار کمی است که می‌توان از آن صرف نظر کرد؛ درنتیجه نیاز به کمترین میزان استخراج مواد خام نسبت به مقدار مصالح مورد نیاز دارند. در تهیهٔ خاک، حتی در صورت نیاز به الک کردن و تولید خاک رس، دانه‌های درشت‌تر باقی‌مانده بسته به دانه‌بندی و جنس آن‌ها، در بخش‌های دیگری از بنا مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین سنگ به‌دلیل نیاز به ابعاد مختلف آن در ساختمان، دارای نخالهٔ بسیار کمی است که قطعات درشت‌تر به‌عنوان سنگ لاشه، قطعات کوچک‌تر به‌عنوان سنگ قلوه و سنگ‌های ریزتر (که طی فرایند خرد کردن سنگ‌های بزرگ تولید می‌شوند) به‌عنوان شن در قسمت‌های مختلف به کار می‌روند. همچنین این دو ماده برای آماده‌سازی به آب و یا مواد دیگری نیاز ندارند که با توجه به مطالب ذکرشده، می‌توان بازدهی آن‌ها را تقریباً ۱۰۰ درصد در نظر گرفت. در تولید مصالح نباتی، برای طی مراحل پوست کندن، خشک

کردن چوب و برش به ابعاد دلخواه، نیاز قابل توجهی به استفاده از آب وجود ندارد. قطعات بزرگ‌تر به‌عنوان تیرها و الوارهای بزرگ و قطعات کوچک‌تر در بخش‌های دیگری از بنا مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ با وجود این، به‌دلیل عدم امکان به‌کارگیری پوسته و برخی بخش‌های دیگر چوب در ساخت بنا (مگر به‌عنوان هیزم و ذغال)، از ۱۰۰ درصد مصالح استخراج‌شده در احداث ساختمان استفاده نمی‌گردد و برای تهیهٔ میزان مشخصی چوب قابل استفاده در بنا، نیاز به قطع میزان بیشتری از چوب درختان است.

برای سنجش مصالحی مانند گچ، آهک و فلز، باید عیار سنگ خام آن‌ها و مقدار مصالح قابل مصرف پس از تولید بررسی شود. گچ ساختمانی باید با سنگ گچی پخته گردد که کمینه ۸۰ ٪ وزنش $CaSO_4 . 2H_2O$ باشد (حامی ۱۳۷۶)؛ البته طی فرایند پخت، آب شیمیایی موجود در این ترکیب نیز تا حدود زیادی کاهش می‌یابد. با وجود نیاز به مقادیر مختلفی از آب برای تولید ملات‌های متشکل از گچ، در فرایند پخت گچ ساختمانی به مصرف آب احتیاجی نیست. برای بررسی آهن، درصد عیار در انواع سنگ‌ها متفاوت است. برای مثال سنگ آهن مغناطیسی Fe_3O_4 تا ۶۸٪ ، سنگ آهن سرخ (هماتیت) O_3Fe_2 تا ۶۰٪ و سنگ آهن لیمویی تا قهوه‌ای $Limonit = 2Fe_2O_3 . 3H_2O$ تا ۵۰٪ وزنش آهن دارد (همان). همچنین طی فرایند تولید اشکال گوناگون آهن، در مراحل مختلف آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ارتباط با تولید آهک، اگر ۱۰۰ کیلوگرم سنگ آهک خالص را به کوره ببریم، ۵۶ کیلوگرم آهک به دست خواهد آمد (کباری ۱۳۷۵). درنتیجه درصد عیار سنگ آهک‌های غالب مورد استفاده را می‌توان ۵۶٪ در نظر گرفت. همچنین براساس شیوهٔ ذکرشده برای تهیهٔ آهک در جدول (۳)، آب یکی از منابع اصلی مورد نیاز در فرایند تولید آهک است. به‌طور کلی با توجه به مطالب گردآوری‌شده و تحلیل‌های عنوان‌شده، می‌توان خاک و سنگ را با بازدهی حدوداً ۱۰۰٪ در بازهٔ خیلی خوب، مصالح نباتی را با بازدهی کمی پایین‌تر از ۱۰۰٪ در بازهٔ خوب، گچ را با بازدهی ۸۰٪ در بازهٔ متوسط، فلز را با میانگین بازدهی ۵۹٪ (میانگین ارقام ذکرشده برای انواع سنگ آهن) و نیاز به مصرف آب در بازهٔ ضعیف و آهک را با بازدهی ۵۶٪ و نیاز مبرم به آب برای تولید، در بازهٔ خیلی ضعیف قرار داد. شایان ذکر است این دسته‌بندی‌ها به‌صورت نسبی بوده و ابزاری برای مقایسهٔ این مصالح با یکدیگر است.

۴. ۳. کمترین خطر استحصال برای محیط‌زیست

به‌علت وابستگی این شاخص به شیوهٔ استحصال هریک از مصالح، ارزیابی آن با کمک پرسش‌نامه صورت گرفت. با جمع‌بندی نتایج پرسش‌نامه‌ها، خاک در بازهٔ خیلی خوب، مصالح نباتی در بازهٔ خوب، سنگ، گچ و آهک در بازهٔ متوسط و فلز در بازهٔ خیلی ضعیف قرار گرفتند که این نتایج، با توجه به روش تهیهٔ هریک از این مصالح که پیش‌تر ذکر شد، متناسب به نظر می‌رسد؛ چراکه خاک، نیاز به طی فرایندی پیچیده برای تولید که موجب آسیب به محیط‌زیست شود نداشته و فقط از بستر مناسب به محل مصرف حمل می‌شود. مصالح نباتی نیز اگر با شیوهٔ مناسب و به حداقل میزان مورد نیاز استخراج شده و بافت گیاهی منطقه را از بین نبرد، فرایند آماده‌سازی آن (شامل خشک کردن، بریدن و...) برای محیط‌زیست خطری ایجاد نمی‌کند. سنگ، گچ و آهک، همگی نیاز به استخراج از معدن داشته و شرایط یکسانی از جهت ارتباط با طبیعت دارند؛ زیرا سایر مراحل آماده‌سازی آن‌ها مانند پخت در کوره یا برش سنگ‌ها، محیط‌زیست را به خطر نمی‌اندازد و فقط در صورت استفاده از روش نامناسب برای استخراج از معدن، چنین خطری وجود دارد. اما فلزات به‌علت نیاز به فراوری در کارخانه، شرایط متفاوتی داشته و علاوه‌بر موارد مطرح‌شده در مورد استخراج سنگ از معدن و خطرات احتمالی آن، انجام فرایند تولید در کارخانه و ایجاد پسماندهای کارخانه‌ای می‌توانند موجب بروز خطراتی برای طبیعت شوند.

۴. ۴. عدم ایجاد مسمومیت و سرطان‌زایی

ایجاد مسمومیت و سرطان‌زایی حین استخراج و تولید مصالح، می‌تواند شامل ابعاد مختلفی نظیر انتشار گازهای سمی، آلوده‌سازی خاک، ایجاد مسمومیت در آب‌های زیرزمینی و مواردی از این قبیل شود. برخی روش‌های موجود برای استخراج سنگ معدن، مانند روش استفاده از پودرهای منبسط‌شونده و یا روش آتش‌کاری، می‌توانند باعث تولید گازهای سمی شوند (ابراهیم‌آبادی، علوی، و کهربای منفرد ۱۳۹۱) که این موضوع در رابطه با تمام مصالح مورد بررسی که

نیاز به استخراج از معدن دارند، یعنی سنگ، گچ، آهک و فلز، صدق می‌کند؛ درنتیجه خاک و مصالح نباتی به‌دلیل نیاز نداشتن به استخراج از معدن و داشتن مراحل فراوری ساده‌تر، شرایط بهتری نسبت به سایر موارد دارند. به‌علاوه اگر مصرف سوخت به‌عنوان یکی از عوامل تولید آلاینده‌ها و گاهی گازهای سمی در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه گچ، آهک و فلز علاوه‌بر سوخت مورد نیاز برای حمل‌ونقل و استخراج، نیاز به پخت در کوره نیز دارند، نسبت به سنگ سوخت بیشتری برای تولید آن‌ها مصرف می‌شود. میزان انتشار آلاینده‌ها در هوا، به میزان سوخت مصرف‌شده بستگی دارد (لطفعلیان، بدراقی، و نقوی ۱۳۸۹)؛ درنتیجه سنگ در مقایسه با سه مورد مذکور، از شرایط بهتری در جهت عدم ایجاد مسمومیت برخوردار است. در بررسی فلزات نیز شایان ذکر است که فعالیت‌های معدن‌کاوی همچون استخراج و فراوری فلزات، موجب آلودگی خاک با فلزات سنگین و گسترش بیابان‌زایی می‌شود (رضائی‌پور باغدر و دیگران ۱۳۹۴؛ اکبری و دیگران ۱۳۹۵؛ سیستانی و دیگران ۱۳۹۶؛ Khashtabeh et al. 2020). فلزات سنگین از آلاینده‌های مهم معدنی محیطی هستند که در غلظت‌های خیلی کم نیز سمی‌اند و زمانی که غلظت مواد سمی از آستانهٔ مشخصی تجاوز کند، حاصلخیزی یا توان تولید زمین ممکن است به صفر کاهش یابد (خشتابه و دیگران ۱۴۰۱)؛ درنتیجه استخراج و تولید فلز بیشتر از سایر مصالح مورد بررسی، منجر به ایجاد مسمومیت و سرطان‌زایی می‌شود.

در عین توجه به مطالب ذکرشده، برای بررسی همه‌جانبهٔ این موضوع از ابعاد مختلف که به‌دلیل نیاز به انجام آزمایش‌های تخصصی در اینجا ممکن نیست، به کمک تهیهٔ پرسش‌نامه، نظر متخصصان دراین‌باره گردآوری شد که نتایج حاصل از پرسش‌نامه، کاملاً منطبق بر نتایج به‌دست‌آمده از اطلاعات ذکرشده است. درنهایت براساس نتیجهٔ تحلیل‌های صورت‌گرفته و همچنین جمع‌بندی امتیازات پرسش‌نامه‌ها، خاک و مصالح نباتی در بازهٔ خیلی خوب، سنگ در بازهٔ خوب، گچ و آهک در بازهٔ متوسط و فلز در بازهٔ خیلی ضعیف قرار گرفتند.

۴. ۵. کوتاه‌ترین فاصله حمل‌ونقل و بی‌نیازی از انبار

نکتهٔ اساسی در بررسی این شاخص، فاصلهٔ محل تهیهٔ این مصالح از محل ساخت پروژه و طول مسیر رفت‌وآمد است. با توجه به بومی بودن مصالح مورد بررسی، طبیعتاً این شاخص تا حدود قابل توجهی در تمامی آن‌ها برقرار بوده و در اینجا هدف، فقط مقایسهٔ همین مصالح است. خاک به‌دلیل فراوانی بسیار، به‌ویژه در کاشان، و نیاز نداشتن به فرایند آماده‌سازی خاص، می‌تواند از فواصل نزدیک مستقیماً به محل ساخت بنا حمل شود. سنگ به‌جز حمل از معدن به محل ساخت بنا، نیاز به شکسته شدن به ابعاد مورد نیاز دارد که در همان محل قابل انجام است. اما مصالح دیگر ازجمله گچ، آهک و فلز، پس از استخراج سنگ از معدن، نیازمند انجام فرایندهایی هستند که ضرورت حمل آن‌ها به مکان دیگری را ایجاد می‌کند و این موضوع باعث افزایش فواصل حمل‌ونقل آن‌ها می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، گچ و آهک می‌توانند در کوره‌های محلی فراوری شوند؛ اما آهن باید علاوه‌بر طی مراحل فراوری و استخراج آهن از سنگ آهن، مراحل دیگری را به‌منظور ساخت وسایل و اشکال فلزی مورد نیاز (مانند میخ، دستگیره، کوبه و...) در کارخانه بگذراند و حتی در صورت دور بودن کارخانه از محل ساخت بنا، چاره‌ای جز حمل این مصالح در این مسافت وجود ندارد. در بررسی مصالح نباتی، حتی در صورت استفاده از چوب درختان در دسترس و مختص همین اقلیم، بازهم انتقال چوب از محل قطع درختان که با توجه به پوشش گیاهی محدود کاشان ممکن است از محل پروژه دور باشد، اجتناب‌ناپذیر است. به‌علاوه چوب‌های مختص این منطقه نمی‌توانند به‌طور کامل پاسخ‌گوی نیاز تمام بخش‌های بنا باشند و برای برخی قسمت‌ها، احتیاج به حمل گونه‌های خاصی از چوب از مسافت‌های دورتر وجود دارد. همچنین با توجه به ضرورت خشک کردن چوب‌ها پیش از استفاده، نیاز به انبارسازی آن‌هاست که برای سایر مصالح مذکور چنین ضرورتی وجود ندارد.

درنتیجه براساس موارد ذکرشده، خاک با کوتاه‌ترین فاصلهٔ حمل و بی‌نیازی از انبار در بازهٔ خیلی خوب، سنگ به‌دلیل انتقال مستقیم از معدن به محل پروژه در بازهٔ خوب، گچ و آهک با توجه به استخراج از معدن و امکان فراوری در مکانی نزدیک به محل بنا در بازهٔ متوسط، چوب به‌علت فراوانی نه‌چندان زیاد آن در اقلیم مذکور و نیاز به انبارسازی در بازهٔ ضعیف و آهن با فاصلهٔ حمل زیاد و گذراندن مراحل ساخت و انبارسازی در کارخانه، در بازهٔ خیلی ضعیف قرار می‌گیرد.

شایان ذکر است که تمامی مصالح ترکیبی ذکرشده در جدول (۳) یا در محل ساخت پروژه قابل تهیه بوده و یا به کمک کوره‌های محلی قابل ساخت هستند و نیازی به حمل در مسافتی مضاعف بر مواد اولیهٔ خود ندارند.

۴. ۶. حداقل زمان ساخت

از بین مصالح مورد بررسی، سرعت دستیابی به خاک با توجه به فرایند سادهٔ تهیهٔ آن، صرفاً بستگی به زمان حمل آن از نزدیک‌ترین فاصلهٔ ممکن و سرعت کارگران در جابه‌جایی آن دارد. برای تهیهٔ سنگ نیز به‌جز مسئلهٔ حمل از معدن، نیاز به شکستن سنگ‌ها به ابعاد لازم وجود دارد که زمان مورد نیاز برای این کار، با توجه به وابستگی آن به ابعاد مد نظر برای سنگ‌ها و همچنین سرعت و تعداد کارگران، قابل تعیین نیست؛ اما در تهیهٔ گچ، به‌جز زمان لازم برای حمل‌ونقل و آسیاب کردن، زمان مشخصی برای پخت در کوره نیز مورد نیاز است. به‌طور کلی در کوره‌های اتوماتیک مدت‌زمان پخت، از هنگام ورود سنگ گچ به کوره تا خروج پودر گچ، حدود ۲ ساعت طول می‌کشد و در کوره‌های نیمه‌اتوماتیک، عمل پخت حداکثر در ۱۰ ساعت انجام می‌پذیرد (امام ۱۳۶۸). در مراحل تولید آهک نیز، سنگ آهک در کوره‌های چاهی (قدیمی‌ترین نوع کورهٔ متداول در ایران) پس از حدود ۴۸ ساعت پخته می‌شود. همچنین فرایند هیدراته کردن آهک چه از روش تنگ گذاشتن و چه از روش خشک، به ۴۸ ساعت زمان نیاز دارد (کباری ۱۳۷۵) که پس از طی این دو مرحله و انجام فرایند سرند کردن، آهک قابل استفاده در ساختمان‌سازی به دست می‌آید. برای تهیهٔ چوب پس از مراحل قطع درختان، حمل به محل مصرف و جداسازی پوست چوب، باید فرایند خشک کردن روی آن صورت پذیرد. خشک کردن چوب در هوای آزاد از ۴ تا ۱۲ ماه و گاهی ۲۴ ماه طول می‌کشد. اما خشک کردن چوب در کوره، بسته به جنس الوارها و درصد رطوبت مطلوب برای چوب نهایی، بین ۴ تا نهایتاً ۱۴ روز به طول می‌انجامد (همان). زمان لازم برای مراحل تولید فلزات به‌طور دقیق قابل عنوان نیست؛ اما با توجه به وجود مراحل استخراج سنگ از معدن، حمل به کارخانه، پخت در کوره برای جداسازی فلز خام از سنگ و همچنین ساخت وسایل فلزی با اشکال مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که درمجموع تولید این فلزات زمان بیشتری نسبت به سایر مصالح به خود اختصاص می‌دهد. درمجموع، با توجه به نیاز همهٔ مصالح به زمانی برای حمل‌ونقل و جابه‌جایی توسط کارگران، خاک که فقط به همین مراحل برای آماده‌سازی نیاز دارد، در بازهٔ خیلی خوب قرار می‌گیرد. سنگ به‌علت حمل از مسافتی دورتر نسبت به خاک (حمل از معادن سنگ) و همچنین نیاز به فرایند خرد کردن سنگ‌ها، در بازهٔ خوب واقع می‌شود. از میان گچ و آهک که علاوه‌بر حمل از معدن، نیاز به زمانی برای پخت در کوره و آماده‌سازی دارند، گچ به‌علت زمان پخت کوتاه‌تر در بازهٔ متوسط و آهک در بازهٔ ضعیف قرار می‌گیرد. فلز نیز با توجه به مراحل فراوری ذکرشده در کنار چوب با فرض انجام فرایند خشک کردن آن در هوای آزاد، هر دو در بازهٔ خیلی ضعیف قرار خواهند گرفت.

با توجه به اینکه برای ساخت مصالح ترکیبی، به‌دلیل انجام فرایندی مضاعف روی مواد اولیه، ممکن است نیاز به صرف زمان بیشتری باشد، می‌توان یک بررسی اجمالی دربارهٔ این مصالح نیز انجام داد. در برخی از مراحل تهیهٔ آن‌ها، زمان لازم به‌صورت حدودی قابل بیان است، اما بیشتر این مراحل دارای زمان مشخصی نیستند و بستگی به سرعت کارگران و سایر عوامل تأثیرگذار دارند. برای مثال در تهیهٔ خشت، زمان مورد نیاز برای ترکیب و ورز دادن مواد و قالب زدن آن‌ها وابسته به سرعت و تعداد کارگران است. اما برای آخوره بستن مواد ترکیب‌شده، بین ۲۴ تا ۴۸ ساعت زمان لازم است تا آب در مولکول‌های خاک نفوذ کند (زمرشیدی ۱۳۷۷). همچنین برای خشک کردن خشت در هوای آزاد، بسته به آب‌وهوا و رطوبت منطقه، بین ۳ تا ۱۵ روز زمان مورد نیاز است (کباری ۱۳۷۵؛ حامی ۱۳۷۶). برای تهیهٔ آجر نیز علاوه‌بر زمان لازم برای آخوره بستن مواد (مشابه خشت)، زمانی برای پخت آجر در کوره مورد نیاز است که بسته به نوع کورهٔ مورد استفاده متفاوت است. در کورهٔ هوفمان (متداول‌ترین نوع کورهٔ آجرپزی در ایران) خشت طی ۳ تا ۴ روز پخته می‌شود و در کورهٔ چاهی (قدیمی‌ترین کورهٔ آجرپزی در ایران)، این فرایند ۶ تا ۷ روز به طول می‌انجامد (کباری ۱۳۷۵). برای تهیهٔ کاشی نیز پس از ترکیب مواد، آخوره بستن و قالب‌بندی، پخت آن در دو مرحله انجام می‌شود: مرحلهٔ اول برای از بین بردن رطوبت قطعه و مرحلهٔ دوم مربوط به لعاب دادن روی کاشی است که هرکدام از این مراحل

حدود ۳ روز طول می‌کشند (همان). در تهیهٔ ملات‌های مذکور نیز به‌جز ترکیب مواد، هم زدن، ورز دادن و کوبیدن که دارای زمان مشخصی نیستند، برخی از آن‌ها نیاز به زمانی برای آخوره بستن دارند. برای مثال، فرایند آخوره بستن ملات کاهگل به‌مدت ۲ تا ۳ روز، ملات ساروج به‌مدت ۴۸ ساعت و ملات گل‌آهک به‌مدت لازم برای خیس شدن کامل خاک، به طول می‌انجامند (زمرشیدی ۱۳۷۷). ملات‌های شفته‌آهک و گچ‌خاک نیاز به آخوره بستن و صرف زمان مشخصی برای عمل‌آوری ندارند.

براساس مطالب بیان‌شده و با یک محاسبهٔ تقریبی می‌توان نتیجه گرفت که زمان ساخت این مصالح ترکیبی از زمان استخراج مواد اولیه تا انتها، در همان طیف ذکرشده برای مواد اولیه جای می‌گیرد؛ زیرا طولانی‌ترین فرایندها مربوط به چوب و فلز بودند که مادهٔ اولیهٔ هیچ‌یک از این مصالح نیستند و در ساخت این مصالح ترکیبی از مواد اولیه‌ای که زمان کمتری برای تولید احتیاج داشتند استفاده شده است؛ مانند خاک، گچ و آهک. برای مثال خشت، که از بین مصالح ترکیبی مورد بررسی بیشترین زمان ساخت را به خود اختصاص می‌دهد، از خاک تشکیل شده که زمان زیادی برای تهیه احتیاج ندارد و با توجه به ارقام بیان‌شده، به‌طور حدودی به دو هفته زمان برای تکمیل فرایند ساخت خشت نیاز است که این زمان در حدود زمان لازم برای تهیهٔ فلز قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که زمان لازم برای تولید مصالح ترکیبی ذکرشده، به‌رغم لزوم انجام فرایند آماده‌سازی و عمل‌آوری، در بازه‌ای فراتر از طیف حاصل برای مواد اولیه قرار نگرفته و حداقل و حداکثر ذکرشده در این طیف، برای مصالح ترکیبی نیز صادق است.

۴. ۷. کمترین هزینه تولید

برای یافتن میزان کمّی هزینهٔ تولید مصالح مورد نظر، نیاز به استخراج ارقام تک‌به‌تک مراحل تولید آن‌ها شامل هزینه‌های مربوط به مادهٔ اولیه، انرژی‌های مصرفی مانند برق و گاز، نگهداری از کارگاه یا کارخانهٔ ساخت مصالح، دستمزد کارگران، وسایل حمل‌ونقل و موارد جزئی و کلی دیگری است که علاوه‌بر گستردگی و تعدد موارد مذکور، به‌علت متغیر بودن این هزینه‌ها در کارگاه‌ها و کارخانجات مختلف، استخراج این ارقام امری بسیار دشوار است. به‌علاوه میزان استفاده از هریک از این مصالح در ساخت بنا با توجه به کاربردهای مختلف آن‌ها، با یکدیگر متفاوت بوده و یافتن نسبت بین هزینهٔ ساخت هر گرم از این مصالح با میزان مصرف آن در ساخت یک بنا، امری بسیار پیچیده است. درنتیجه نظر متخصصانی که تجربهٔ کار حرفه‌ای داشته و با این ارقام سروکار دارند، به‌منظور مقایسهٔ هزینهٔ تولید مصالح مختلف می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد. درنهایت، ارزیابی این شاخص با کمک تهیهٔ پرسش‌نامه امکان‌پذیر شد. با جمع‌بندی نتایج پرسش‌نامه‌ها، خاک در بازهٔ خیلی خوب، گچ، آهک و مصالح نباتی در بازهٔ متوسط و سنگ و فلز در بازهٔ ضعیف قرار گرفتند.

۴. ۸. نیاز نداشتن به ماشین‌آلات پیشرفته و فناوری ساخت دور از دسترس

خاک ماده‌ای مقرون‌به‌صرفه است که در محل ساخت بنا یافت می‌شود و نیاز به فرایند ساخت پیچیده‌ای ندارد (Mahmoud and Rowaida 2019). در صورت نبود خاک مطلوب در سایت بنا نیز فقط لازم است خاک دارای کیفیت مورد نیاز به محل ساخت حمل شود و پس از الک شدن توسط کارگران، به خاکی با دانه‌بندی مطلوب تبدیل گردد؛ درنتیجه برای تهیهٔ خاک، داشتن وسیلهٔ حمل‌ونقل که برای تهیهٔ تمامی مصالح لازم است، کافی است. سنگ نیز یکی از مصالحی است که از عهد باستان تاکنون برای امر ساختمان‌سازی استفاده می‌شود (زمرشیدی ۱۳۷۷). برای تهیهٔ سنگ در ابعاد مختلف صرفاً باید پس از استخراج از معدن و حمل به بنا، با وسایلی مانند سنگ‌خردکن آن را به ابعاد مطلوب تبدیل کرد. در تهیهٔ گچ و آهک، علاوه‌بر انتقال سنگ آن‌ها از نزدیک‌ترین معادن، نیازمند پخت در کوره هستند که این فرایند می‌تواند در کوره‌های محلی و در دسترس انجام شود و ضرورتی برای انتقال سنگ گچ و آهک به کارخانه وجود ندارد. پس از پخته شدن نیز برای انجام مراحلی مانند آسیاب کردن و سرند کردن، تجهیزات ویژه‌ای مورد نیاز نیست؛ درنتیجه در تهیهٔ گچ و آهک قابل استفاده در ساخت بناها، به‌جز وسیلهٔ حمل، کوره‌ای برای پخت سنگ‌ها و وسایل ساده‌ای برای فراوری نهایی، تجهیزات دیگری لازم نیست. برای استفاده از مصالح نباتی نیز پس از قطع درختان دارای چوب مورد نیاز، حمل به بنا، جدا کردن پوست و خشک کردن آن‌ها، باید به ابعاد مورد نیاز تقسیم

و برش زده شوند: از ابعاد تیرهای چوبی تا ذرات کاه. در تولید فلزات نیز علاوه‌بر مراحلی مانند استخراج، حمل‌ونقل و پخت در کوره، به‌دلیل ضرورت تولید وسایل فلزی در کارخانه، در مقایسه با سایر مصالح احتیاج بیشتری به ماشین‌آلات و فناوری ساخت پیشرفته وجود دارد.

درمجموع، خاک به دلایل مطرح‌شده در بازهٔ خیلی خوب، سنگ به‌دلیل نیاز به اندکی تجهیزات بیشتر نسبت به خاک در بازهٔ خوب، مصالح نباتی به‌علت احتیاج به تجهیزات قطع و برش درختان و خشک کردن آن‌ها در بازهٔ متوسط، گچ و آهک به‌دلیل نیاز به استخراج از معدن و پخت در کوره و فراوری بعد از آن در بازهٔ ضعیف و فلز با توجه به مسائل مطرح‌شده، در بازهٔ خیلی ضعیف قرار می‌گیرند. با نگاهی اجمالی به مصالح ترکیبی و روش تهیهٔ هرکدام از آن‌ها در جدول (۳)، می‌توان دریافت که هیچ‌کدام با انجام فرایند پیچیده‌ای روی مواد اولیه تولید نمی‌شوند و فقط نیاز به مراحلی مانند ترکیب مواد، هم زدن، آخوره بستن، ورز دادن، کوبیدن، خشک کردن و یا در پیچیده‌ترین حالت نیاز به پخت در کوره دارند که هیچ‌یک از این مراحل، تجهیزات پیشرفته‌ای نیاز ندارند و در محل ساخت توسط کارگران قابل انجام هستند.

۴. ۹. عدم ایجاد سروصدا

اغلب این مصالح در حین ساخت‌وساز، سروصدای چندانی ایجاد نمی‌کنند. مثلاً خاک از هنگام برداشت از محیط تا حمل به بنا و ترکیب با سایر مواد برای تولید مصالح ترکیبی، تولید صدا نمی‌کند که در بازهٔ خیلی خوب قرار می‌گیرد. سنگ، گچ، آهک و فلز همگی برای استخراج از معدن تا حدودی سروصدا تولید می‌کنند. گچ و آهک درادامهٔ فرایند تولید و پخت در کوره تا ترکیب با سایر مواد برای ساخت ملات‌ها، سروصدایی ندارند که آن‌ها را در بازهٔ خوب قرار می‌دهد. اما سنگ در حین شکستن و خرد شدن به ابعاد مورد نیاز، اندکی سروصدا دارد و در بازهٔ متوسط قرار می‌گیرد. چوب نیز زمان بریدن درختان و همچنین حین اجرا در بنا به‌علت نیاز به کوبیدن میخ برای اتصال، آلودگی صوتی ایجاد می‌کند و می‌توان آن را در بازهٔ ضعیف قرار داد. فلز علاوه‌بر صدای ناشی از استخراج، به‌علت نیاز به فراوری در کارخانه و تولید اشکال مختلف فلزی و همچنین اتصالات این اجزا در هنگام ساخت بنا، تولید آلودگی صوتی بیشتری دارد و در بازهٔ خیلی ضعیف قرار می‌گیرد.

۴. ۱۰. استفاده نکردن از مواد شیمیایی در تولید

با توجه به مواد تشکیل‌دهنده و روش تهیهٔ مصالح مورد نظر که در جدول (۳) ذکر شد، می‌توان دریافت که در تولید هیچ‌یک از این مصالح، از مواد شیمیایی استفاده نشده و همگی امتیاز کامل را در این زمینه به خود اختصاص می‌دهند.

۴. ۱۱. دوام بالای مصالح در راستای افزایش طول عمر ساختمان

دوام مصالح در راستای طول عمر ساختمان، دارای ابعاد متنوعی بوده و هریک از این مصالح در برابر عوامل مختلفی نظیر رطوبت، حرارت، فرسایش و موارد دیگر آسیب‌پذیرند. چوب علاوه‌بر خطر هجوم موریانه‌ها، پوسیدگی و فرسایش در زمان طولانی، در صورت وقوع آتش‌سوزی در بنا قابلیت اشتعال بالایی دارد و زود آسیب می‌بیند. فلز نیز با توجه به حساسیت بالا در برابر هوا و رطوبت، به مرور زمان دچار زنگ‌زدگی شده و کیفیت اولیهٔ خود را از دست می‌دهد. ضعف اصلی گچ نیز رطوبت است و موجب خراب شدن شکل ظاهری آن و یا حتی در صورت زیاد بودن میزان رطوبت، باعث ایجاد تخریبات جدی در آن می‌شود. مصالح خاکی از دوام نسبتاً خوبی برخوردار بوده و اگر در معرض ضربات شدید یا مقدار نامتعارفی از رطوبت (مانند سیل) قرار نگیرند، می‌توانند طول عمر زیادی داشته باشند. سنگ و آهک نسبت به سایر مصالح مورد بررسی دارای بالاترین دوام بوده و زود دچار فرسایش نمی‌شوند و در برابر رطوبت نیز حساسیت بالایی ندارند. در طول تاریخ، ملات‌های آهکی در سازه‌های آبی و بخش‌هایی از ساختمان‌ها که در معرض رطوبت بوده، کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند (حیدری، یونسی، و وطن‌خواه ۱۳۹۲)؛ درنتیجه با توجه به موارد ذکرشده، سنگ و آهک در بازهٔ خیلی خوب، خاک در بازهٔ خوب، گچ در بازهٔ متوسط، فلز در بازهٔ ضعیف و مصالح نباتی در بازهٔ خیلی ضعیف قرار خواهند گرفت.

۴. ۱۲. حداکثر تناسب مصالح انتخابی با بوم و آب‌وهوای محل

ازآنجاکه مصالح مورد بررسی در این پژوهش، مصالح بومی شهر کاشان هستند، همگی آن‌ها با بوم و آب‌وهوای این منطقه تناسب داشته و در این بخش امتیاز کامل را به خود اختصاص می‌دهند.

۴. ۱۳. قابلیت تعمیرات در زمان بهره‌برداری

امکان تعمیر مصالح در زمان بهره‌برداری از بنا، بستگی به نوع کاربرد مادۀ مورد نظر در ساختمان و محل مصرف آن داشته و روش‌های متنوعی برای این کار وجود دارد که نیازمند تجارب میدانی در این زمینه است؛ درنتیجه بهره‌مندی ازنظر متخصصان به کمک پرسش‌نامه، می‌تواند روش مناسبی برای ارزیابی این شاخص باشد. در این راستا، با جمع‌بندی نتایج پرسش‌نامه‌ها، خاک در بازۀ خیلی خوب، گچ، آهک و فلز در بازۀ خوب و سنگ و مصالح نباتی در بازۀ متوسط قرار گرفتند.

۴. ۱۴. کمترین ضریب انتقال حرارت و بی‌نیاز از عایق‌کاری حرارتی

ضریب انتقال حرارتی، برای یک مصالح خاص برابر است با معکوس مقاومت حرارتی آن و مقاومت حرارتی، حاصل تقسیم ضخامت مصالح بر هدایت حرارتی آن‌هاست؛ درنتیجه ضریب انتقال حرارت با هدایت حرارتی نسبت مستقیم داشته و با در نظر گرفتن ضخامت یکسان برای مصالح مورد نظر، هرچه هدایت حرارتی بیشتر باشد، ضریب انتقال حرارت نیز بیشتر است. هدایت حرارتی برای خاک ۱/۲۸، خشت ۰/۷۵، سنگ مرمر ۲/۹، سنگ گرانیت ۳/۴۹، چوب سخت ۰/۱۲، گچ‌کاری ۰/۵۱، سنگ آهکی ۱/۵ و آهن w/m.k ۷۲ است (پوردیهیمی ۱۳۹۰). به‌علاوه هرچقدر ضریب انتقال حرارت و هدایت حرارتی کمتر باشند، طبیعتاً نیاز به عایق‌کاری حرارتی نیز کمتر است؛ درنتیجه با توجه به ارقام ذکرشده، چوب در بازۀ خیلی خوب، گچ و خاک در بازۀ خوب، آهک در بازۀ متوسط، سنگ در بازۀ ضعیف و آهن در بازۀ خیلی ضعیف قرار می‌گیرند. در هر دو حالت در نظر گرفتن خاک به‌صورت اولیه یا به‌صورت خشت و همچنین در مورد دو جنس مرمر و گرانیت برای سنگ، بازه‌های ذکرشده به همین صورت هستند و تغییری نمی‌کنند.

۴. ۱۵. حداکثر قابلیت بازگشت به طبیعت و امکان استفادۀ مجدد

هریک از این مصالح، پس از استخراج از طبیعت، تحت فرایندهای مختلفی قرار می‌گیرند تا به شرایط مطلوب برای استفاده در ساختمان برسند. باید ویژگی‌ها و ترکیبات این مواد در حین استخراج و بعد از انجام این فرایندها با یکدیگر مقایسه شوند تا قابلیت بازگشت به طبیعت هریک از آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. خاک علاوه‌بر اینکه نیاز به طی مراحل خاصی برای آماده‌سازی ندارد، حتی برای تبدیل آن به خشت یا آجر، به‌جز کاه با مادۀ دیگری ترکیب نمی‌شود و همچنان قابل بازگشت به طبیعت است. سنگ نیز طی استخراج از معدن و شکسته شدن، تحت هیچ فرایندی که ماهیت شیمیایی آن را تغییر دهد قرار نمی‌گیرد؛ درنتیجه خاک و سنگ از جهت قابلیت بازگشت به طبیعت و استفادۀ مجدد، در بازۀ خیلی خوب قرار می‌گیرند. چوب به‌رغم اینکه بدون ترکیب با مواد دیگر به کار برده می‌شود، برای استفاده در ساخت بنا باید به ابعاد مختلف برش زده شود و پس از اتصال با سایر اجزا، یکپارچگی و فرم اولیۀ خود را از دست می‌دهد و همچنین پس از مدتی ممکن است دچار پوسیدگی شود. اما بازهم قابلیت بازگشت به طبیعت و استفاده در کاربری دیگری را دارد و می‌توان آن را در بازۀ خوب جای داد. گچ‌پزی یعنی حرارت دادن به سنگ گچ آب‌دار به‌طوری‌که بتوانیم ۱/۵ مولکول از آب تبلور آن را تبخیر نماییم (کباری ۱۳۷۵) یعنی تبدیل سنگ گچ سولفات کلسیم ($Ca\ SO_4\ ,\ 2H_2O$) به گچ ساختمانی ($Ca\ SO_4\ ,\ 0.5H_2O$). پودر گچ ساختمانی اگر در مجاورت آب قرار گیرد، ۱/۵ مولکول دیگر آب جذب کرده و با ۲ مولکول آب تبلور سخت شده و به سنگ گچ تبدیل می‌گردد (هرچند این سختی مطابق سختی سنگ گچ اولیه نیست، به‌خوبی می‌تواند در مقابل نیروهای وارده مقامت نماید) (همان). با وجود اینکه پس از تهیۀ انواع ملات‌های گچی به‌علت ضرورت ترکیب گچ با مواد مختلف، نمی‌توان به‌سادگی آن را از سایر ترکیبات جدا کرد، به این دلیل که گچ خالص را پس از فرایند پخت و آماده‌سازی می‌توان مجدداً به‌شکل اولیۀ آن بازگرداند، گچ می‌تواند در بازۀ متوسط جای گیرد. فلزات این قابلیت را دارند که بارها ذوب شده و برای ساخت وسایل فلزی جدید مورد استفاده قرار گیرند؛ درنتیجه

امکان استفادهٔ مجدد را دارند؛ اما ازآنجاکه پس از استخراج فلز از سنگ معدن، قابلیت بازگشت به حالت اولیه وجود نداشته و نمی‌توان فلزات را به بستر طبیعت برگرداند، این ماده در مقایسه با سایر مصالح مورد بررسی در طیف ضعیف قرار می‌گیرد. در تعریف فرایند پخت آهک، به گرفتن CO_2 سنگ آهک به یاری گرما تا CaO به جا ماند، آهک‌پزی گفته می‌شود ($CaCO_3$ + حرارت $\rightarrow$ $CaO + CO_2$) (حامی ۱۳۷۶؛ کباری ۱۳۷۵). هیدرات کلسیم در مجاورت آب‌وهوا، CO_2 هوا را گرفته و دوباره به سنگ آهک تبدیل می‌شود (کباری ۱۳۷۵). اما طی این فرایند نمی‌تواند دقیقاً به ماهیت اولیهٔ خود بازگردد، و ویژگی‌های آن با آهک تازه استخراج‌شده تفاوت دارد. براساس این موضوع و همچنین با توجه به اینکه آهک در ساخت بنا به‌طور خالص به کار نمی‌رود و باید با مواد دیگری ترکیب شود که جداسازی آن از مواد ترکیب‌شده امری بسیار دشوار است، از جهت قابلیت بازگشت به طبیعت در مقایسه با سایر مصالح مورد بررسی، در بازهٔ خیلی ضعیف قرار خواهد گرفت.

۴. ۱۶. دارای بیشترین منابع اولیهٔ تجدیدپذیر

ازآنجاکه مصالح مورد بررسی، مواد اولیهٔ تشکیل‌دهندهٔ مصالح ترکیبی هستند و با توجه به اینکه در بررسی شاخص پیشین مشخص شد که همگی این مصالح به‌گونه‌ای تجدیدپذیر بوده و فقط در مقایسه با یکدیگر دارای میزان قابلیت متفاوتی در بازگشت به طبیعت هستند، در مورد این شاخص می‌توان گفت تمامی این مصالح امتیاز کامل را گرفته و تمام منابع اولیهٔ آن‌ها تجدیدپذیر به شمار می‌روند.

۴. ۱۷. کمترین میزان ضایعات و پسماندها و حداقل ایجاد آلودگی در تولید و بازیافت

میزان ضایعات و پسماندها را از دو جهت می‌توان بررسی کرد: یکی ضایعات حین تولید مصالح و دیگری ضایعات و پسماندهای پس از بازیافت آن ماده. این دو زاویه در دو مورد از شاخص‌های پیشین بررسی شدند. در بررسی شاخصی که مرتبط با استخراج حداقل مواد خام بود، درصد مصالح مفیدی که از مادهٔ اولیهٔ آن قابل استخراج است، مورد مطالعه قرار گرفته و امتیازات لازم به آن‌ها اختصاص یافت. همچنین در بررسی قابلیت بازگشت به طبیعت و امکان استفادهٔ مجدد از آن‌ها، به این نتیجه رسیدیم که تمامی این مصالح تا حدودی بازگشت‌پذیر بوده و فقط در مقایسه با یکدیگر، امتیازات متفاوتی دریافت کردند. با نگاهی به بررسی‌های صورت‌گرفته روی این دو شاخص و امتیازات آن‌ها، مشاهده می‌شود که مصالح مختلف از زاویهٔ این دو شاخص، امتیازات یکسانی را به خود اختصاص داده‌اند؛ درنتیجه برای بررسی کلی ضایعات و پسماندها از زمان تولید تا بازیافت، با در نظر گرفتن دو شاخص ذکرشدهٔ پیشین، امتیازاتی مشابه آن‌ها به مصالح مورد نظر اختصاص داده خواهد شد.

۵. جمع‌بندی امتیازات حاصل از ارزیابی مصالح

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل ۱۷ شاخص مورد مطالعه، منجر به دسته‌بندی مصالح مورد نظر در ۵ بازهٔ خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف شد که در هر شاخص، قرارگیری مصالح در این ۵ بازه نسبت به سایر شاخص‌ها متفاوت بود. انجام این دسته‌بندی، در هر شاخص با روش‌های مختلفی شامل استفاده از اطلاعات دقیق گردآوری‌شده از منابع متعدد، به کار بردن اطلاعات اندک موجود در منابع در کنار تحلیل‌های نگارندگان، استفاده از اطلاعات اولیهٔ ارائه‌شده در جدول ۳ و ماهیت هریک از این مصالح، انجام تحلیل‌های کیفی توسط نگارندگان و یا با کمک پرسش‌نامه، صورت پذیرفت که با توجه به عدم امکان انجام آزمایش‌های عملی برای ۱۷ شاخص در یک پژوهش واحد، بهترین راه بررسی آن‌ها مطابق راهکارهای ذکرشده است. در انتها به‌منظور سهولت در ارزیابی این مصالح و امکان مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر، برای هریک از این طیف‌ها اعدادی در نظر گرفته شد که امکان جمع زدن نتایج وجود داشته باشد. بدین منظور، به طیف خیلی خوب تا خیلی ضعیف به‌ترتیب اعداد ۵ تا ۱ اختصاص داده شد. در جدول ۴، نتایج حاصل از تحلیل مصالح مذکور از زاویهٔ ۱۷ شاخص مورد بررسی، به‌همراه امتیازات عددی هریک از آن‌ها ذکر شده و اعداد به‌دست‌آمده جمع‌بندی خواهند شد.

جدول ۴: جمع‌بندی نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی مصالح

مراحل فراوری مصالح	عوامل مؤثر در پایداری زیست‌محیطی مصالح	خاک	سنگ	گچ	آهک	مصالح نباتی	فلز
استخراج و تولید	کمترین میزان مصرف انرژی برای تولید	۵	۴	۳	۲	۴	۱
	استخراج حداقل مواد خام و مصرف کمترین منابع اولیه و آب	۵	۵	۳	۱	۴	۲
	کمترین خطر استحصال برای محیط‌زیست	۵	۳	۳	۳	۴	۱
	عدم ایجاد مسمومیت و سرطان‌زایی	۵	۴	۳	۳	۵	۱
	مجموع امتیازات این مرحله	۲۰	۱۶	۱۲	۹	۱۷	۵
حمل و انبار	کوتاه‌ترین فاصلهٔ حمل‌ونقل و بی‌نیاز از انبار	۵	۴	۳	۳	۲	۱
ساخت‌وساز	حداقل زمان ساخت	۵	۴	۳	۲	۱	۱
	کمترین هزینهٔ تولید	۵	۲	۳	۳	۳	۲
	نیاز نداشتن به ماشین‌آلات پیشرفته و فناوری ساخت دور از دسترس	۵	۴	۲	۲	۳	۱
	عدم ایجاد سروصدا	۵	۳	۴	۴	۲	۱
	استفاده نکردن از مواد شیمیایی در تولید	۵	۵	۵	۵	۵	۵
	مجموع امتیازات این مرحله	۲۵	۱۸	۱۷	۱۶	۱۴	۱۰
بهره‌برداری	دوام بالای مصالح در راستای افزایش طول عمر ساختمان	۴	۵	۳	۵	۱	۲
	حداکثر تناسب مصالح انتخابی با بوم و آب‌وهوای محل	۵	۵	۵	۵	۵	۵
	قابلیت تعمیرات در زمان بهره‌برداری	۵	۳	۴	۴	۳	۴
	کمترین ضریب انتقال حرارت و بی‌نیاز از عایق‌کاری حرارتی	۴	۲	۴	۳	۵	۱
	مجموع امتیازات این مرحله	۱۸	۱۵	۱۶	۱۷	۱۴	۱۲
تخریب و بازیافت	حداکثر قابلیت بازگشت به طبیعت و امکان استفادهٔ مجدد	۵	۵	۳	۱	۴	۲
	دارای بیشترین منابع اولیهٔ تجدیدپذیر	۵	۵	۵	۵	۵	۵
	کمترین میزان ضایعات و پسماندها و حداقل ایجاد آلودگی در تولید و بازیافت	۵	۵	۳	۱	۴	۲
	مجموع امتیازات این مرحله	۱۵	۱۵	۱۱	۷	۱۳	۹
	مجموع امتیازات	۸۳	۶۸	۵۹	۵۲	۶۰	۳۷
	رتبه‌بندی حاصل از مجموع امتیازات	**(۱)** خیلی خوب	**(۲)** خوب	**(٤)** خوب	**(٥)** متوسط	**(۳)** خوب	**(٦)** ضعیف

در انتها با در نظر داشتن اینکه حداکثر مجموع امتیازات ممکن برای هرکدام از مصالح عدد ۸۵ (۱۷ مورد ۵ امتیازی) و حداقل آن عدد ۱۷ (۱۷ مورد ۱ امتیازی) بود، ۵ بازهٔ عددی مختلف برای تعیین جایگاه هریک از این مصالح تعیین شد؛ درنتیجه مصالح دارای مجموع امتیازات بین ۱۷ تا ۲۹ در بازهٔ خیلی ضعیف، ۳۰ تا ۴۳ در بازهٔ ضعیف، ۴۴ تا ۵۷ در بازهٔ متوسط، ۵۸ تا ۷۱ در بازهٔ خوب و ۷۲ تا ۸۵ در بازهٔ خیلی خوب قرار گرفتند. براساس این دسته‌بندی، خاک جایگاه خیلی خوب، سنگ و گچ و مصالح نباتی جایگاه خوب، آهک جایگاه متوسط و فلز جایگاه ضعیف را به خود اختصاص دادند.

شایان ذکر است که حتی اگر اهمیت هریک از مراحل فراوری مصالح در موقعیت‌ها و شرایط مختلف، متفاوت باشد و نتوان ضریب اهمیت یکسانی برای تمامی آن‌ها در نظر گرفت، با جمع‌بندی امتیازات هریک از مراحل به‌طور جداگانه نیز نتایج تقریباً مشابهی حاصل می‌شود. در این راستا، می‌توان مشاهده کرد که در جمع‌بندی امتیازات هریک از مراحل، همانند مجموع امتیازات کلی، خاک دارای بالاترین امتیاز و فلز دارای پایین‌ترین امتیاز در مقایسه با سایر مصالح مورد بررسی است، به‌جز مرحلهٔ تخریب و بازیافت که آهک با اختلاف اندکی، امتیاز پایین‌تری نسبت به فلز را به خود اختصاص داده است؛ درنتیجه حتی در صورت تفاوت اهمیت هریک از مراحل در موقعیت‌های مختلف، بازهم نتایج نهایی حاصل مبنی‌بر اینکه از بین مصالح مورد بررسی، خاک مناسب‌ترین و فلز نامناسب‌ترین مورد از جهت پایداری هستند، برقرار خواهد بود.

نتیجه

معماری سنتی شهر کاشان، یک معماری فاخر و سرشار از تجارب ارزشمند بوده که یکی از مهم‌ترین ابعاد آن، مصالح به‌کاررفته در این بناها بوده است. پژوهش حاضر، با تکیه بر نتایج پژوهش‌های پیشین مبنی‌بر مزایای استفاده از مصالح بومی در بناهای هر منطقه و همچنین تأثیر آن بر پایداری این بناها، کوشید تا با تمرکز بر معماری سنتی کاشان و مصالح بومی این شهر، به بررسی کمی و کیفی هریک از این مصالح از جنبهٔ شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی بپردازد. سپس سعی شد تا با امتیازدهی به هرکدام از این مصالح و مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر، مصالحی که از جهت پایداری زیست‌محیطی نسبت به سایر آن‌ها وضعیت بهتری دارند مشخص شوند؛ که این موارد، وجه تمایز این پژوهش با مطالعات پیشین هستند. در این راستا ابتدا شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی مصالح گردآوری شدند که درمجموع شامل ۱۷ مورد بوده و در ۵ دستهٔ استخراج و تولید، حمل و انبار، ساخت‌وساز، بهره‌برداری و همچنین تخریب و بازیافت دسته‌بندی شدند. سپس ازطریق مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای، به تهیهٔ جدولی از مصالح به‌کاررفته در بناهای تاریخی شهر کاشان پرداخته شد که شامل دو گروه مواد اولیه و مواد ترکیبی هستند. مواد اولیه شامل خاک، سنگ، گچ، آهک، مصالح نباتی و فلز بوده و مواد ترکیبی حاصل ترکیب برخی از این مواد اولیه با یکدیگر و انجام فرایندهای مختلف روی آن‌ها برای آماده‌سازی هستند. سپس این مصالح از منظر ۱۷ شاخص گردآوری‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفته و برای هریک از این شاخص‌ها امتیازات مناسب به مصالح مورد نظر اختصاص داده شد. این ارزیابی به سه روش مختلف صورت گرفت. برخی از شاخص‌ها ازطریق جمع‌آوری اطلاعات کمی و عددی، برخی از آن‌ها ازطریق تحلیل و اطلاعات کیفی و برخی از موارد نیز ازطریق تهیهٔ پرسش‌نامه از متخصصان معماری، ارزیابی شدند. درنهایت به هریک از این مصالح از منظر هرکدام از شاخص‌ها، امتیازی بین ۱ تا ۵ اختصاص یافت و در انتها با جمع‌آوری تمام امتیازات هریک از مصالح، امتیاز کلی آن مورد و جایگاه آن در مقایسه با سایر مصالح تبیین شد. جمع‌بندی امتیازات و تحلیل‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که از میان مصالح بومی مورد نظر، خاک با بالاترین امتیاز، دارای مطلوب‌ترین حالت از منظر پایداری و بیشترین تأثیر مثبت روی پایداری زیست‌محیطی بنا بوده و فلز با کمترین امتیاز در مقایسه با سایر مصالح مورد بررسی، کمترین تأثیر را بر پایداری زیست‌محیطی ابنیهٔ تاریخی این شهر داشته است. با دقت روی تحلیل‌های موجود و امتیازات جمع‌آوری‌شده، می‌توان دریافت که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر امتیازات پایین فلز، فرایند ساخت و تولید پیچیدهٔ آن بوده که نیاز به طی مراحل فراوری در کارخانه دارد؛ برخلاف خاک که با ساده‌ترین روش تولید و بی‌نیاز بودن از انجام فرایندهای پیچیده برای آمادسازی، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. در انتها، انجام پژوهش‌های آتی با نگاهی به مصالح رایج در بناهای معاصر کاشان و مقایسهٔ آن‌ها با انواع مصالح بومی از بُعد پایداری زیست‌محیطی، برای انتخاب مناسب‌ترین مصالح برای ساخت بناهای مدرن این شهر توصیه می‌شود. در این راستا می‌توان برای سهولت و پیشبرد بهتر پژوهش آتی، مصالح مدرن را به‌جای مقایسه با تمام مصالح بومی، صرفاً با خاک و فلز مقایسه کرد که براساس پژوهش حاضر به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان پایداری زیست‌محیطی در میان مصالح بومی این منطقه هستند.

منابع

ـ ابراهیم‌آبادی، آرش، ایرج علوی، و سارا کهربای منفرد. ۱۳۹۱. انتخاب روش بهینهٔ استخراج در معادن سنگ‌های ساختمانی ایران به روش TOPSIS فازی (مطالعهٔ موردی: معدن سنگ گرانیت گزیک بیرجند). فصلنامهٔ علمی‌پژوهشی *زمین‌شناسی محیط‌زیست* ۷ (۲۲): ۵۵ـ۷۰.

ـ ارمغان، مریم، و یوسف گرجی‌مهلبانی. ۱۳۸۸. ارزش‌های معماری بومی ایرانی در رابطه با رویکرد معماری پایدار. فصلنامهٔ *مسکن و محیط روستا* ۲۸ (۱۲۶): ۲۰ـ۳۵.

ـ اکبری، مرتضی، مجید اونق، حمیدرضا عسگری، امیر سعدالدین، و حسن خسروی. ۱۳۹۵. ارزیابی ریسک فرسایش خاک براساس مدل کورین (مطالعهٔ موردی: منطقهٔ نیمه‌بیابانی غرب استان گلستان). مجلهٔ علمی‌پژوهشی *مهندسی اکوسیستم بیابان* ۵ (۱۲): ۶۳ـ۷۸.

ـ اکرمی، غلامرضا. ۱۳۸۳. طراحی و بازسازی روستاهای بم با نگاه توسعهٔ پایدار. در *مجموعه مقالات کارگاه تخصصی تدوین منشور توسعهٔ پایدار بم*. تهران: مرکز مطالعات و تحقیقات معماری و شهرسازی وزارت مسکن و شهرسازی.
ـ اکرمی، غلامرضا، و لیلا علیپور. ۱۳۹۴. نقش مصالح بومی در معماری پایدار از دیدگاه زیست‌محیطی. مجلهٔ *مسکن و محیط روستا* ۳۵ (۱۵۶): ۲۹ـ۴۸.
ـ امام، تابع. ۱۳۶۸. گچ: دانستنی‌هایی دربارهٔ گچ. نشریهٔ *مسکن و محیط روستا*، ش. ۲۱: ۲۶ـ۲۹.
ـ بزرگمهری، زهره، و آناهیتا خدادادی. ۱۳۸۹. *آمودهای ایرانی (شناخت، آسیب‌شناسی و مرمت)*. تهران: سروش دانش.
ـ بیرانوند، مسلم. ۱۳۹۰. بازشناسی معماری پایدار و جایگاه آن در دستیابی به اهداف توسعهٔ پایدار. ماهنامهٔ *دانش نما*، ش.۱۹۶ـ۱۹۷: ۷۲ـ۷۹.
ـ پارچه‌باف مطلق، فاطمه، و بابک عالمی. ۱۴۰۰. بررسی و ارزیابی بازار تاریخی کاشان از منظر پایداری زیست‌محیطی. دوفصلنامهٔ علمی *کاشان‌شناسی* ۱۴ (۱): ۲۷ـ۵۶.
ـ پوردیهیمی، شهرام. ۱۳۹۰. *زبان اقلیمی در طراحی محیطی پایدار*. تهران: دانشگاه شهید بهشتی.
ـ تقی‌پور قصابی، بهزاد، و احمد میرزامحمدی. ۱۳۹۸. بررسی طراحی معماری پایدار با رویکرد طراحی معماری بیونیک و ارتباط آن‌ها با یکدیگر. نشریهٔ علمی‌تخصصی *شباک* ۵ (۴۶): ۱۹ـ۲۶.
ـ حامی، احمد. ۱۳۷۶. *مصالح ساختمان*. تهران: دانشگاه تهران.
ـ حیدری، داریوش، حامد یونسی، و غلامرضا وطن‌خواه. ۱۳۹۲. پژوهشی در ملات‌های آهکی تاریخی (ساروج)؛ نمونهٔ موردی: حمام شاهزاده‌ها در اصفهان. دوفصلنامهٔ علمی‌پژوهشی *مرمت و معماری ایران* ۳ (۵): ۸۳ـ۹۸.
ـ خشتابه، ریحانه، مرتضی اکبری، آوا حیدری، و علی‌اصغر نجف‌پور. ۱۴۰۱. تأثیر استخراج سنگ آهن بر غلظت برخی از فلزات سنگین و پهنه‌بندی آلودگی خاک (مطالعهٔ موردی: معدن سنگ آهن سنگان، خواف–ایران). نشریهٔ *آب و خاک* ۳۷ (۱): ۷۷ـ۹۴.
ـ دربان، علی، و مریم جوادنیا. ۱۳۹۷. معماری سبز گامی به‌سوی معماری پایدار. نشریهٔ *معماری‌شناسی* ۱ (۵): ۱ـ۶.
ـ درمحمدی، منصوره، و رضا رحیم‌نیا. ۱۳۹۶. تثبیت مکانیکی خاک و تبیین جایگاه آن در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک. نشریهٔ معماری *اقلیم گرم و خشک* ۵ (۶): ۲۹ـ۴۹.
ـ رستمی، ژنیت، مهرداد جاویدی‌نژاد، و بهروز منصوری. ۱۳۹۸. هماهنگی تکنیک، مصالح و محیط‌زیست و کاربرد آن در زیبایی و عملکرد بناهای سنتی شهرهای کویری ایران. مجلهٔ *مطالعات هنر اسلامی* ۱۵ (۳۴): ۲۱۵ـ۲۳۹.
ـ رضائی‌پور باغدر، عبدالحسین، حسن وقارفرد، حمیدرضا عظیم‌زاده، حمید غلامی، و یحیی اسماعیل‌پور. ۱۳۹۴. بررسی وضعیت آلودگی پساب ناشی از فراوری سنگ آهن در مناطق بیابانی (بررسی موردی: منطقهٔ بافق). نشریهٔ *مدیریت بیابان* ۳ (۵): ۱۴ـ۲۵.
ـ زرین، لیلا، منصوره طاهباز، و سید مجید مفیدی شمیرانی. ۱۴۰۰. اصول تطبیقی معماری پایدار بناهای مسکونی بومی در اقلیم‌های خشک ایران. نشریهٔ *مطالعات هنر اسلامی* ۱۸ (۴۱): ۲۲۳ـ۲۳۳.
ـ زمرشیدی، حسین. ۱۳۷۷. *معماری ایران: مصالح‌شناسی سنتی*. تهران: زمرد.
ـ زهری، سارا، منصوره طاهباز، و ایرج اعتصام. ۱۳۹۵. تأثیر مصالح و روش‌های ساخت بومی بر کاهش مصرف انرژی در خانه‌های روستایی مناطق جلگه‌ای گیلان. مجلهٔ *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست* ۲۲ (۱): ۸۹ـ۱۰۰.
ـ ستاری، حانیه، و فهیمه معتضدیان. ۱۳۹۹. تبیین اصول معماری پایدار، در جهت ارتقای نماهای طراحی‌شدهٔ ۵ سال اخیر در شهر تهران. نشریهٔ *معماری‌شناسی* ۳ (۱۴): ۱ـ۷.
ـ سیستانی، ندا، مظاهر معین‌الدینی، نعمت‌اله خراسانی، امیرحسین حمیدیان، محمدصالح علی طالشی، و رخساره عظیمی یانچشمه. ۱۳۹۶. آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان: ارزیابی غنای فلزی و درجهٔ آلودگی. مجلهٔ *سلامت و محیط‌زیست* ۱۰ (۱): ۷۵ـ۸۶.
ـ صادقی پی، ناهید. ۱۳۹۱. تأملی در مصالح بوم آورد روستا. نشریهٔ *مسکن و محیط روستا* ۳۱ (۱۳۹): ۱۷ـ۳۲.
ـ صفوی همامی، سید محمدمهدی، سید بهشید حسینی، و علیرضا عندلیب. ۱۳۹۶. معماری پایدار دفاعی در طراحی منازل مسکونی. مجلهٔ *سیاست دفاعی* ۲۵ (۱۰۰): ۱۳۱ـ۱۵۲.

ـ ضرغامی، اسماعیل، علی خاکی، و سیده اشرف سادات. ۱۳۹۴. بررسی تطبیقی معماری پایدار و مطابقت آن با معماری بومی خانه‌های سنتی در شهر ایرانی–اسلامی. مجلهٔ *معماری و شهرسازی پایدار* ۳ (۱): ۱۵ـ۳۰.
ـ قبادیان، وحید. ۱۳۸۲. *بررسی اقلیمی ابنیهٔ سنتی ایران*. تهران: دانشگاه تهران.
ـ کباری، سیاوش. ۱۳۷۵. *مصالح‌شناسی*. تهران: دانش و فن.
ـ کرجانی، شیدا، شبنم اکبری نامدار، مریم سینگری، و حسن ستاری ساربانقلی. ۱۴۰۲. اثرسنجی شاخص‌های ارزش‌های پنهان کالبدی معماری پل‌های تاریخی از دیدگاه طراحان و کاربران فضایی (نمونه‌های مطالعاتی: پل‌ها در مسیر زاینده‌رود از سرچشمه تا تالاب). فصلنامهٔ *معمار شهر* ۲ (۷): ۶۵ـ۸۹.
ـ کیم، جین. ۱۳۸۲. واحد معماری پایدار: مقدمه‌ای بر طراحی پایدار. ترجمهٔ نازلی دبیدیان و مروه فرهودی. نشریهٔ *معماری ایران* ۴ (۱۴): ۶ـ۲۸.
ـ لطفعلیان، مجید، نغیمه بدراقی، و حامد نقوی. ۱۳۸۹. بررسی میزان آلودگی منتشرشده در قطع هر مترمکعب چوب به‌وسیلهٔ اره‌موتوری (منطقهٔ مورد مطالعه: جنگل‌های پایین‌بند صنایع چوب و کاغذ مازندران). مجلهٔ *انسان و محیط‌زیست* ۸ (۱): ۲۱ـ۲۷.
ـ مداحی، سید مهدی، محمدحسین عابدی، و اعظم صداقت‌مند. ۱۳۹۶. بهره‌گیری از مصالح بومی–سنتی به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی حرارتی ساختمان؛ نمونهٔ موردی: بافت مسکونی–تاریخی بیلند گناباد. نشریهٔ *معماری سبز* ۳ (۷): ۱ـ۲۰.
ـ مقدم راد، فرهام، و منصور سپهری مقدم. ۱۳۹۹. ارزیابی بناهای بلندمرتبهٔ مسکونی ایرانی از منظر معماری الگوگرا در معماری و شهرسازی ایرانی–اسلامی. فصلنامهٔ *نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی* ۱۳ (۲): ۵۴۳ـ۵۵۷.
ـ میراحمدی‌زاده، علیرضا، حامد دلام، مژگان سیف، و ریحانه بهرامی. ۱۳۹۷. طراحی، ساخت و تجزیه و تحلیل داده‌های مقیاس لیکرت. مجلهٔ *آموزش و سلامت جامعه* ۵ (۳): ۶۳ـ۷۲.
ـ ویسه، سهراب، ناهید خدابنده، حمیدرضا حکاکی فرد، و فرهنگ طهماسبی. ۱۳۸۸. ارائهٔ روش‌های مناسب در استفاده از مصالح بوم‌آورد. نشریهٔ *مسکن و محیط روستا*، ش. ۱۲۶: ۲ـ۱۹.
ـ هادی، ابوذر، ابوذر نصرالهی، و سحر حسینی. ۱۳۹۰. بررسی نقش مصالح در مدیریت انرژی معماری بومی. *همایش ملی عمران، معماری، شهرسازی و مدیریت انرژی*.
ـ هیرمندی‌نیاسر، مرضیه. ۱۳۹۵. معماری و توسعهٔ پایدار و رابطهٔ آن با انسان و طبیعت. ماهنامهٔ *شباک* ۲ (۴): ۱۴۹ـ۱۵۵.
- Akadiri, Peter O., Ezekiel A. Chinyio, and Paul O. Olomolaiye. 2012. Design of a Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector. *Buildings* 2 (2): 126152-.
- Alrashed, Farajallah, Muhammad Asif, and Stas Burek. 2017. The Role of Vernacular Construction Techniques and Materials for Developing Zero - Energy Homes in Various Desert Climates. *Buildings* 7 (1): 119-.
- Calkins, Meg. 2008. *Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation Selection and Use of Sustainable Construction Materials*. New Jersey: John wiley & sons.
- Dodo, Yakubu Aminu, Mohd Hamdan Ahmad, Mansir Dodo, Faizah Mohammed Bashir, and Suleiman Aliyu Shika. 2014. Lessons from Sukur Vernacular Architecture: A Building Material Perspective. *Journal of Advanced Materials Research* (935): 207210-.
- Fang, Ying. 2014. Analysis of the Sustainable Construction Concept of the Vernacular Materials. *Journal of Advanced Materials Research* (893): 694697-.
- Fernandes, Jorge Emanuel Pereira, Ricardo Mateus, and L. Bragança. 2014. The Potential of Vernacular Materials to the Sustainable Building Design. *Journal of Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development*: 623629-.
- Flaiban, Vanessa. 2019. The Vernacular Roots Vernacular Architecture as a Leader to the New Sustainable

Dwelling. *Journal of a Sustainable Global South* 3 (2): 612-.
- Gabriella, Ir, M.T. Janssen, and Ch.F. Hendriks. 2002. Sustainable Use of Recycled Materials in Building Construction. *Advances in building Technology* 2: 13991406-.
- Godfaurd, John, Derek Clements - Croome, and George Jeronimidis. 2004. Sustainable Building Solution: A Review of Lessons from the Natural World. *Building and Environment* 40 (3): 319328-.
- Howarth, George, Mark Hadfield. 2006. A Sustainable Product Design Model. *Materials and design* 27 (10): 11281133-.
- Isik, Bilge, and Tugsad Tulbentci. 2008. Sustainable Housing in Island Conditions Using Alker - Gypsum - Stabilized Earth: A Case Study from Northern Cyprus. *Building and environment* 43 (9): 14261432-.
- Khashtabeh, Rokhsareh, Morteza Akbari, Mahdi Kolahi, and Ali Talebanfard. 2020. Assessing the Efects of Desertifcation Control Projects Using Socio - Economic Indicators in the Arid Regions of Eastern Iran. *Journal of Environment, Development and Sustainability* 23 (7): 1045510469-.
- Lyons, Arthur. 2014. *Materials for Architects and Builders*. London: Taylor and Francis group.
- Mahmoud, Randa A., and Rowaida Rashed. 2019. Gentrification of Vernacular Materials as a Key towards Sustainable Built Environment. *Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Morel, J.C., A. Mesbah, M. Oggero, p. Walker. 2001. Building Houses with Local Materials: Means to Drastically Reduce the Environmental Impact of Construction. *Building and Environment* 36 (10): 11191126-.
- San - Jose, J.T., R. Losada, J. Cuadrado, and I. Garrucho. 2007. Approach to the Quantification of the Sustainable Value in Industrial Buildings. Building and Environment 42 (11): 39163923-.
- Wever, H. 1997. Sustainable Building and the Use of Raw Materials in the Civil Engineering Sector. *Studies in Environmental Science* 71: 883886-.
- Yagi, Koichi, and Kohmei Halada. 2001. Materials Development for a Sustainable Society. *Materials and Design* 22 (2): 143146-.
- Zhou, Chang - Chun, Guo - Fu Yin, Xiao - Bing Hu. 2009. Multi Objective Optimization of Material Selection for Sustainable Products: Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm Approach. *Materials and Design* 30 (4): 12091215-.
- Zimmermann, M., H.J. Althaus, and A. Haas. 2005. Benchmarks for Sustainable Construction: A Contribution to Development a Standard. *Energy and Buildings* 37 (11): 11471157-.