

مصالح ژئوسورس، زیست‌محور و کربن‌منفی در ساخت‌وساز پایدار:

مبانی، کاربردها و چشم‌اندازها

تینا سادات طیاری

کارشناسی مهندسی معماری

tinatayari@gmail.com

چکیده

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای، در کانون تلاش‌های جهانی برای دستیابی به توسعه پایدار قرار دارد. این مقاله به بررسی سه دسته نوظهور از مصالح ساختمانی می‌پردازد که پتانسیل دگرگون‌سازی این صنعت را دارند: مصالح ژئوسورس (زمین‌زاد)، مصالح زیست‌محور، و مصالح کربن‌منفی. مصالح ژئوسورس مانند خشت، کاهگل و سنگ، با حداقل فرآوری و بدون نیاز به دمای بالا تولید می‌شوند و ردپای کربنی بسیار پایینی دارند. مصالح زیست‌محور از منابع تجدیدپذیر گیاهی یا جانوری مشتق می‌شوند و قادر به ذخیره کربن در ساختار خود هستند. مصالح کربن‌منفی نوآورانه، از طریق فناوری‌هایی مانند بیوچار، کربنات‌سازی معدنی و آنزیم‌های بیومیمتیک، بیش از آنکه در چرخه عمر خود منتشر کنند، دی‌اکسید کربن جذب می‌کنند. این مقاله با مرور نظام‌مند ادبیات علمی پنج سال اخیر، مبانی نظری، نمونه‌های کاربردی، مزایای زیست‌محیطی و چالش‌های پیش‌روی هر یک از این سه دسته را تحلیل می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب این مصالح با یکدیگر—به‌ویژه جفت‌شدن مصالح زیست‌محور سبک با مصالح ژئوسورس دارای جرم حرارتی—می‌تواند عملکرد حرارتی، آکوستیکی و کیفیت هوای داخلی ساختمان را به‌طور هم‌زمان بهبود بخشد. با این حال، موانعی مانند خلأ استانداردهای فنی، مقاومت بازار و محدودیت‌های زنجیره تأمین، سرعت پذیرش گسترده را کند کرده است. مقاله با ارائه توصیه‌های سیاستی و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده به پایان می‌رسد.

کلمات کلیدی: مصالح ژئوسورس، مصالح زیست‌محور، کربن‌منفی، ساخت‌وساز پایدار، بیوچار، معماری کم‌کربن

۱. مقدمه

بخش ساختمان و ساخت‌وساز مسئول حدود ۳۴ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن جهانی و ۳۲ درصد از مصرف انرژی جهانی است (al et Nair, ۲۰۲۵). سیمان و فولاد به‌تنهایی نزدیک به ۱۸ درصد از انتشار جهانی را تشکیل می‌دهند، در حالی که مصالح و فرآورده‌های ساخت‌وساز حدود ۱۱ درصد از انتشار کربن مرتبط با انرژی را به خود اختصاص می‌دهند (Bahadori-Jahromi, ۲۰۲۴). این آمار نشان می‌دهد که هرگونه تلاش جدی برای دستیابی به اهداف توافق پاریس و بی‌طرفی کربنی تا سال ۲۰۵۰، بدون تحول بنیادین در انتخاب و تولید مصالح ساختمانی ناکام خواهد ماند.

پاسخ صنعت به این چالش، در سال‌های اخیر به سمت سه پارادایم مکمل متمایل شده است. نخست، **مصالح ژئوسورس** که از منابع معدنی و زمینی مانند خاک رس، لیم و سنگ مشتق می‌شوند و با حداقل فرآوری—بدون پخت در دمای بالا و بدون افزودنی‌های شیمیایی پیچیده—تولید می‌گردند (al et Latapie Rosa, ۲۰۲۳). دوم، **مصالح زیست‌محور** که از منابع گیاهی یا جانوری تجدیدپذیر مانند چوب، کنف، کاه و بامبو به دست می‌آیند و قادر به ذخیره کربن جذب‌شده از جو در طول رشد گیاه هستند (Gibson, ۲۰۲۴). سوم، **مصالح کربن‌منفی** که نسل جدیدی از محصولات مهندسی‌شده را نمایندگی می‌کنند و در طول چرخه عمر خود مقدار خالصی از دی‌اکسید کربن را از جو حذف و تثبیت می‌نمایند (al et Chen, ۲۰۲۲).

نکته حائز اهمیت آن است که این سه دسته، رقیب یکدیگر نیستند، بلکه مکمل‌اند. به‌ویژه، مصالح زیست‌محور و ژئوسورس دارای خواص فیزیکی متضاد اما هم‌افزا هستند: زیست‌محورها سبک، عایق و دارای ظرفیت ذخیره کربن‌اند، در حالی که ژئوسورس‌ها متراکم، دارای جرم حرارتی بالا و مقاوم در برابر آتش هستند (al et Kriven, ۲۰۲۴). ترکیب هوشمندانه این دو دسته می‌تواند به ساختارهایی منجر شود که هم‌زمان کارایی انرژی، آسایش حرارتی و ردپای کربنی پایین را ارائه دهند. مصالح کربن‌منفی نیز به‌عنوان لایه سوم، می‌توانند جبران‌کننده انتشار باقیمانده در چرخه عمر ساختمان باشند و حتی ساختمان را به یک مخزن خالص کربن تبدیل کنند (al et Wu, ۲۰۲۴).

هدف این مقاله، ارائه یک مرور نظام‌مند و تحلیلی از وضعیت دانش در زمینه این سه دسته مصالح، با تمرکز بر ادبیات علمی منتشرشده در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ است. پرسش‌های اصلی پژوهش عبارت‌اند از: (۱) مبانی علمی و فناوریانه هر یک از این سه دسته مصالح چیست؟ (۲) شواهد تجربی موجود درباره عملکرد مکانیکی، حرارتی و زیست‌محیطی آن‌ها چه می‌گوید؟ (۳) موانع اصلی بر سر راه پذیرش گسترده آن‌ها کدام‌اند و چه راهکارهایی برای رفع این موانع وجود دارد؟ (۴) ترکیب این مصالح با یکدیگر چگونه می‌تواند به ساخت‌وساز پایدارتر منجر شود؟

۲. مبانی نظری و تعاریف**۲.۱. مصالح ژئوسورس**

اصطلاح «ژئوسورس» یا «زمین‌زاد» به مصالحی اطلاق می‌شود که مستقیماً از منابع زمینی—خاک، سنگ، رس، ماسه و مواد معدنی—بدون فرآوری شیمیایی پیچیده یا پخت در دمای بالا به دست می‌آیند (al et Latapie Rosa, ۲۰۲۳). این مصالح

از دیرباز در معماری بومی سراسر جهان استفاده می‌شده‌اند، اما در دهه‌های اخیر به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی، توجه مجددی را به خود جلب کرده‌اند. برخلاف سیمان پرتلند که نیازمند دمای حدود ۱۴۵۰ درجه سلسیوس برای کلینک‌زاسیون است، مصالح ژئوسورس در دمای محیط یا دمای بسیار پایین‌تر فرآوری می‌شوند و از این رو ردپای کربنی به‌مراتب کمتری دارند (al et Kriven, ۲۰۲۴).

زیرشاخه‌های اصلی مصالح ژئوسورس شامل موارد زیر است:

خشت و کاهگل: خشت (آجر خشتی) از مخلوط خاک رس، آب و الیاف طبیعی (کاه، پشم) ساخته می‌شود و در آفتاب خشک می‌گردد. کاهگل نیز مخلوطی از خاک رس، آب و کاه است که به‌عنوان اندود یا ملات به کار می‌رود. این مصالح دارای ظرفیت حرارتی بالا، قابلیت تنظیم رطوبت و ردپای کربنی بسیار پایین هستند (al et Latapie Rosa, ۲۰۲۳).

خاک کوبیده (Earth Rammed): خاک مرطوب در قالب‌های چوبی ریخته و با فشار لایه‌به‌لایه کوبیده می‌شود. این روش به دیوارهایی با مقاومت فشاری قابل قبول (حدود ۱ تا ۳ مگاپاسکال) و جرم حرارتی بالا منجر می‌شود. خاک کوبیده در سال‌های اخیر با پایدارسازهای نوین مانند سیمان، آهک یا زیست‌پلیمرها ترکیب شده تا دوام آن در برابر آب بهبود یابد (al et Lahbabi, ۲۰۲۳).

آجرهای ژئوپلیمری: ژئوپلیمرها مواد آلومینوسیلیکاتی هستند که در محیط قلیایی فعال‌سازی می‌شوند و ساختاری مشابه ژئولیت‌ها ایجاد می‌کنند. این مواد می‌توانند از خاکستر بادی، سرباره کوره بلند، متاکائولن و ضایعات معدنی تولید شوند و جایگزینی برای سیمان پرتلند باشند (al et Kriven, ۲۰۲۴). ژئوپلیمرها در دمای زیر ۱۰۰ درجه سلسیوس سنتز می‌شوند و انتشار CO₂ آن‌ها می‌تواند تا ۸۰ درصد کمتر از سیمان معمولی باشد (al et Abdulkareem, ۲۰۲۳).

سنگ طبیعی: سنگ‌های ساختمانی مانند گرانیت، مرمر و تراورتن، اگرچه در استخراج و حمل‌ونقل انرژی‌بر هستند، اما در صورت استفاده محلی و بدون فرآوری شیمیایی، می‌توانند گزینه‌ای پایدار باشند (al et Kriven, ۲۰۲۴).

جدول ۱ خلاصه‌ای از انواع مصالح ژئوسورس و ویژگی‌های کلیدی آن‌ها را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. انواع مصالح ژئوسورس و ویژگی‌های کلیدی

نوع مصالح	منبع اصلی	دمای فرآوری	مقاومت فشاری (MPa)	هدایت حرارتی (W/m·K)	ردپای کربنی (kg CO ₂ /kg)
خشت	خاک رس، کاه	محیط (خشک در آفتاب)	۱-۲	۸.۵-۰.۰	۰.۵۰۲-۰.۰
خاک کوبیده	خاک، ماسه، رس	محیط (کوبش)	۱-۳	۲.۸-۱.۰	۰.۳۰۱-۰.۰
آجر ژئوپلیمری	خاکستر بادی، متاکائولن	< ۱۰۰°C	۱۰-۶۰	۶.۳-۰.۰	۱۵.۰۵-۰.۰

سنگ طبیعی	معادن سنگ	استخراج و برش	۵۰-۲۰۰	۵.۵-۳.۱	۳.۱-۰.۰
-----------	-----------	---------------	--------	---------	---------

منبع: اقتباس از al et Latapie Rosa (۲۰۲۳) و al et Kriven (۲۰۲۴)

۲.۲. مصالح زیست‌محور

مصالح زیست‌محور به مصالحی گفته می‌شود که ماده اولیه آن‌ها از منابع تجدیدپذیر بیولوژیکی—گیاهان، جانوران یا میکروارگانیسم‌ها—تأمین می‌شود (Gibson, ۲۰۲۴). این مصالح در طول رشد منبع اولیه خود، دی‌اکسید کربن را از جو جذب و در ساختار سلولی ذخیره می‌کنند. این فرآیند که «ذخیره‌سازی زیستی کربن» نامیده می‌شود، به مصالح زیست‌محور خاصیتی منحصر به فرد می‌بخشد: آن‌ها در طول چرخه عمر خود، بخشی از کربن جذب‌شده را حفظ می‌کنند و از این رو می‌توانند به‌عنوان «مخزن کربن» عمل کنند (al et Arehart, ۲۰۲۰).

مهم‌ترین مصالح زیست‌محور در ساخت‌وساز عبارت‌اند از:

کنف کریت (Hempcrete): مخلوطی از الیاف کنف (شو) و آهک به‌عنوان چسباننده است. کنف صنعتی در طول رشد خود ۸ تا ۱۵ تن CO_2 در هر هکتار جذب می‌کند (Gibson, ۲۰۲۴). کنف کریت دارای هدایت حرارتی پایین (حدود ۰.۰۷ تا ۰.۱۲ وات بر متر کلون)، قابلیت تنظیم رطوبت و جذب صدا است (al et Nair, ۲۰۲۵). چالش اصلی، چسباننده آهکی است که خود انتشار CO_2 قابل توجهی دارد؛ از این رو پژوهش‌های اخیر به سمت چسباننده‌های کم‌کربن مانند رس کلسینه و ژئوپلیمرها متمایل شده است (al et Nair, ۲۰۲۵).

مایسلیم (Mycelium): مایسلیم شبکه رشته‌ای قارچ‌ها است که می‌تواند بر روی بسترهای لیگنوسلولزی (ضایعات کشاورزی، خاک‌اره) رشد کند و کامپوزیت‌های سبک و عایق تولید نماید (al et Lingam, ۲۰۲۳). کامپوزیت‌های مایسلیمی چگالی پایین (۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، هدایت حرارتی کم (۰.۰۴ تا ۰.۰۸ وات بر متر کلون) و قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی دارند (al et Ouhaibi, ۲۰۲۳). با این حال، مقاومت مکانیکی آن‌ها محدود است و برای کاربردهای سازه‌ای نیاز به تقویت یا ترکیب با سایر مصالح دارند (al et Lingam, ۲۰۲۳).

کاه و ضایعات کشاورزی: کاه گندم، برنج و سایر ضایعات کشاورزی می‌توانند به‌عنوان عایق یا در تولید پانل‌های ساختمانی استفاده شوند. Zhou و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که کامپوزیت‌های کاه برنج با چسباننده‌های طبیعی (آلژینات سدیم و کیتوزان) دارای هدایت حرارتی ۰.۰۳۸ تا ۰.۰۴۷ وات بر متر کلون هستند و عملکرد عایقی مطلوبی دارند.

چوب و محصولات چوبی: چوب همچنان مهم‌ترین مصالح زیست‌محور سازه‌ای است. چوب‌های مهندسی‌شده مانند LVL، CLT و گلولام، مقاومت سازه‌ای بالایی دارند و در عین حال کربن را برای دهه‌ها یا قرن‌ها ذخیره می‌کنند (Gibson, ۲۰۲۴).

۲.۳. مصالح کربن‌منفی

مصالح کربن‌منفی دسته‌ای از مصالح هستند که در طول چرخه عمر خود، مقدار خالصی از دی‌اکسید کربن را از جو حذف و به‌صورت پایدار تثبیت می‌کنند (al et Chen, ۲۰۲۲). برخلاف مصالح «کم‌کربن» که صرفاً انتشار را کاهش می‌دهند، مصالح کربن‌منفی «جذب خالص» دارند: مجموع CO₂ جذب‌شده در طول تولید، بهره‌برداری و پایان عمر، از مجموع CO₂ منتشرشده بیشتر است (al et Wu, ۲۰۲۴).

فناوری‌های اصلی تولید مصالح کربن‌منفی عبارت‌اند از:

بیوچار (Biochar): بیوچار زغال تولیدشده از پیرولیز زیست‌توده (ضایعات کشاورزی، چوب، لجن فاضلاب) در محیط کم‌اکسیژن است. این ماده حدود ۶۰ درصد کربن دارد و کربن موجود در آن به‌صورت بسیار پایدار (با نیمه‌عمر هزاران سال) تثبیت می‌شود (Bahadori-Jahromi, & Room, ۲۰۲۴). بیوچار می‌تواند به سیمان، بتن، ملات و پانل‌های چوبی اضافه شود. Chen و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که پانل‌های ذره‌ای سیمانی حاوی ۵۰ تا ۷۰ درصد بیوچار می‌توانند ۱۳۷ کیلوگرم CO₂ در هر تن ذخیره کنند و در عین حال مقاومت خمشی بالای ۵.۵ مگاپاسکال داشته باشند.

کربناته‌سازی معدنی (Carbonation Mineral): در این فرآیند، CO₂ با مواد معدنی حاوی کلسیم یا منیزیم (مانند سرباره فولاد، باطله معدن، الیوین) واکنش می‌دهد و کربنات‌های پایدار تشکیل می‌دهد (al et Wu, ۲۰۲۴). این کربنات‌ها می‌توانند به‌عنوان سنگدانه یا چسباننده در بتن استفاده شوند. برآوردها نشان می‌دهد که کربناته‌سازی معدنی در مصالح ساختمانی پتانسیل جذب ۱.۸ میلیارد تن CO₂ در سال را دارد (al et Wu, ۲۰۲۴).

آنزیم‌های بیومیمتیک: برخی آنزیم‌ها می‌توانند فرآیند کربناته‌سازی را تسریع کنند و به تولید چسباننده‌های کربن‌منفی در دمای محیط منجر شوند. پژوهشگران دانشگاه آلتو و مرکز تحقیقات VTT فنلاند در سال ۲۰۲۴ نخستین چسباننده کربن‌منفی را توسعه دادند که از ضایعات صنعتی و CO₂ به‌عنوان مواد اولیه استفاده می‌کند (University, Aalto, ۲۰۲۴).

بتن جذب‌کننده CO₂: فناوری‌هایی مانند CO₂-SUICOM ژاپن و Carbonaide فنلاند، با تزریق CO₂ به مخلوط بتن در حین عمل‌آوری، آن را به‌صورت کربنات کلسیم تثبیت می‌کنند. Carbonaide در دسامبر ۲۰۲۴ اعلام کرد که توانسته است محصولات بتنی با ردپای کربنی خالص منفی تولید کند (Herald, Carbon, ۲۰۲۵).

جدول ۲ مقایسه‌ای از پتانسیل جذب کربن فناوری‌های مختلف کربن منفی ارائه می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه پتانسیل جذب کربن فناوری‌های کربن منفی

فناوری	ماده اولیه	ظرفیت جذب CO ₂	کاربرد اصلی	سطح بلوغ فناوری
بیوچار در سیمان	ضایعات کشاورزی، چوب	CO ₂ /ton kg ۱۰۰-۲۰۰	بتن، ملات، پانل	۶-۷ TRL
کربناته‌سازی معدنی	سرباره فولاد، باطله معدن	CO ₂ /ton kg ۵۰-۳۰۰	سنگدانه، چسباننده	۵-۶ TRL
آنزیم‌های بیومیمتیک	ضایعات صنعتی + CO ₂	CO ₂ /ton kg ۱۰۰-۲۵۰	چسباننده	۳-۴ TRL
عمل آوری با CO ₂	بتن تازه	CO ₂ /m ³ kg ۲۰-۵۰	بلوک بتنی	۷-۸ TRL

منبع: اقتباس از al et Chen (۲۰۲۲)، al et Wu (۲۰۲۴) و Bahadori-Jahromi & Room (۲۰۲۴)

۳. مرور شواهد تجربی

۳.۱. عملکرد مکانیکی مصالح ژئوسورس

شواهد تجربی نشان می‌دهد که مصالح ژئوسورس، در صورت طراحی و اجرای صحیح، می‌توانند عملکرد مکانیکی قابل‌قبولی برای کاربردهای غیرسازه‌ای و نیمه‌سازه‌ای ارائه دهند. Lahbabi و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های رسی منطقه الحوز مراکش، نشان دادند که افزودن بنتونیت به خاک کوبیده، مقاومت فشاری را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد و دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک را بهبود می‌بخشد. آن‌ها گزارش کردند که خاک کوبیده پایدارشده با ۵ درصد بنتونیت، پس از ۲۸ روز، مقاومت فشاری ۲.۸ مگاپاسکال داشت.

در حوزه ژئوپلیمرها، Abdulkareem و همکاران (۲۰۲۳) در یک ارزیابی چرخه عمر مقایسه‌ای، نشان دادند که بتن ژئوپلیمری تولیدشده از جریان‌های جانبی صنعتی (خاکستر بادی و سرباره) می‌تواند انتشار CO₂ را تا ۶۰ درصد نسبت به بتن پرتلند کاهش دهد، در حالی که مقاومت فشاری مشابه یا حتی بالاتری دارد. با این حال، آن‌ها تأکید کردند که عملکرد زیست‌محیطی ژئوپلیمرها به شدت به منبع پیش‌ماده و نوع فعال‌ساز قلیایی وابسته است؛ استفاده از سیلیکات سدیم به‌عنوان فعال‌ساز، ردپای کربنی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

Kriven و همکاران (۲۰۲۴) در یک مقاله چشم‌انداز، بر پتانسیل ژئوپلیمرها و مواد قلیایی فعال‌شده به‌عنوان اجزای کلیدی دنیای پایدار تأکید کردند و خواستار ادغام این مصالح در مقررات ساختمانی موجود، تسهیل صدور گواهینامه و ترویج دسترسی به بازار شدند. آن‌ها استدلال کردند که بدون چارچوب‌های نظارتی مناسب، پذیرش گسترده این مصالح کند خواهد بود.

۳.۲. عملکرد حرارتی و آکوستیکی مصالح زیست‌محور

مصالح زیست‌محور به‌طور کلی عملکرد حرارتی برجسته‌ای دارند. Zhou و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی کامپوزیت‌های کاه برنج با چسباننده‌های طبیعی، هدایت حرارتی ۰.۰۳۸ تا ۰.۰۴۷ وات بر متر کلون را گزارش کردند که در محدوده عایق‌های حرارتی متعارف قرار می‌گیرد. آن‌ها همچنین نشان دادند که کامپوزیت‌های مبتنی بر آلژینات، نفوذپذیری بخار آب و ظرفیت جذب رطوبت بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های کیتوزانی دارند، اما در شرایط رطوبت بالا (۹۳ و ۹۷ درصد)، رشد کپک در آن‌ها سریع‌تر است.

Nair و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای جامع بر روی کف‌کریک با چسباننده‌های کم‌کربن، نشان دادند که کف‌کریک حاوی ژئوپلیمر رس کلسینه/سرباره، بهترین عملکرد را از نظر مقاومت فشاری، ظرفیت پیوند سطحی و هدایت حرارتی دارد. هدایت حرارتی این نمونه ۰.۰۸ وات بر متر کلون بود، در حالی که کف‌کریک با آهک هیدراته خالص، هدایت حرارتی ۰.۱۲ وات بر متر کلون داشت. از نظر آکوستیکی، کف‌کریک حاوی آهک، رس کلسینه و سنگ آهک، بالاترین ضریب جذب صدا را نشان داد.

در حوزه مایسلیموم، Lingam و همکاران (۲۰۲۳) در یک مرور جامع، گزارش کردند که کامپوزیت‌های مایسلیمومی معمولاً مقاومت فشاری بین ۰.۱ تا ۱.۲ مگاپاسکال دارند که برای کاربردهای عایقی و غیرسازه‌ای مناسب است، اما برای کاربردهای سازه‌ای کافی نیست. آن‌ها تأکید کردند که خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها به شدت به نوع بستر، گونه قارچ، شرایط رشد و روش فرآوری وابسته است و آینده پژوهش باید بر هماهنگ‌سازی این متغیرها متمرکز شود.

جدول ۳ خلاصه‌ای از خواص حرارتی مصالح زیست‌محور کلیدی را ارائه می‌دهد.

جدول ۳. خواص حرارتی مصالح زیست‌محور

مصالح	چگالی (kg/m^3)	هدایت حرارتی ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	ضریب جذب صدا (α)
کف‌کریک (آهک)	۴۰۰-۶۰۰	۱۲.۰۷-۰.۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۰.۴-۰.۰
کف‌کریک (ژئوپلیمر)	۵۰۰-۷۰۰	۱۰.۰۶-۰.۰	۹۰۰-۱۲۰۰	۰.۳-۰.۰
مایسلیموم	۱۵۰-۳۰۰	۰.۸۰۴-۰.۰	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۰.۵-۰.۰
کاه برنج + آلژینات	۲۰۰-۳۵۰	۰.۴۷۰.۳۸-۰.۰	۱۲۰۰-۱۶۰۰	۰.۳-۰.۰
چوب (صنوبر)	۴۰۰-۵۰۰	۱۵.۱۲-۰.۰	۱۶۰۰-۱۸۰۰	۰.۱-۰.۰

منبع: اقتباس از Zhou et al. (۲۰۲۳)، Nair et al. (۲۰۲۵) و Lingam et al. (۲۰۲۳)

۳.۳. عملکرد زیست‌محیطی و پتانسیل ذخیره کربن

مصالح کربن‌منفی در سال‌های اخیر توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند. Chen و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای بر روی پانل‌های ذره‌ای سیمانی حاوی بیوپار، نشان دادند که استفاده از ۵۰ تا ۷۰ درصد بیوپار پیش‌خیسانده‌شده، محصولاتی با ردپای کربنی منفی تولید می‌کند. آن‌ها گزارش کردند که پانل حاوی ۵۰ درصد بیوپار، ۱۳۷ کیلوگرم CO_2 در هر تن ذخیره می‌کند و سود اقتصادی ۹۲ تا ۱۱۶ دلار در هر متر مکعب، بسته به قیمت کربن در کشورهای مختلف، به همراه دارد.

Room و Bahadori-Jahromi (۲۰۲۴) در یک مرور علم‌سنجی بر روی کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با بیوپار، نشان دادند که افزودن ۱ تا ۲ درصد بیوپار به کامپوزیت‌های سیمانی می‌تواند عملکرد مکانیکی را افزایش دهد، در حالی که افزودن بیش از ۵ تا ۶ درصد، به کاهش مقاومت منجر می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند که بیوپار جریان‌پذیری مخلوط را کاهش می‌دهد، اما عمل‌آوری داخلی را بهبود می‌بخشد و انقباض را کاهش می‌دهد. چین با ۵۶ مقاله، پیش‌تاز این حوزه پژوهشی است.

Wu و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی کربناته‌سازی معدنی الکتروشیمیایی، نشان دادند که جریان‌های زائد غنی از کلسیم و منیزیم—مانند باطله معدن نیکل، سرباره آهن و فولاد و شوره‌های اسمز معکوس—می‌توانند سالانه ۷.۶ میلیون تن CO_2 را به‌صورت مواد معدنی ذخیره کنند. آن‌ها تأکید کردند که روش‌های الکتروشیمیایی، سرعت فرآیند کربناته‌سازی را بهبود می‌بخشند و نیاز انرژی روش‌های سنتی را کاهش می‌دهند.

از منظر ارزیابی چرخه عمر، Abdulkareem و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که بتن ژئوپلیمری تولیدشده از جریان‌های جانبی صنعتی، در مقایسه با بتن پرتلند معمولی، انتشار CO_2 کمتری در مراحل تولید دارد. با این حال، آن‌ها تأکید کردند که مزیت زیست‌محیطی ژئوپلیمرها به شدت به منبع پیش‌ماده و نوع فعال‌ساز وابسته است و در برخی سناریوها، به‌ویژه زمانی که فعال‌ساز سیلیکات سدیم استفاده شود، مزیت زیست‌محیطی ممکن است کاهش یابد.

Nair و همکاران (۲۰۲۵) در ارزیابی چرخه عمر کنف‌کریت با چسباننده‌های کم‌کربن، نشان دادند که کنف‌کریت حاوی آهک، رس کلسینه و سنگ آهک، در مقایسه با کنف‌کریت آهکی سنتی، ردپای کربنی کمتری دارد، زیرا بخشی از آهک پراثری با رس کلسینه و سنگ آهک جایگزین شده است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که کنف‌کریت ژئوپلیمری، بهترین عملکرد زیست‌محیطی را در میان طرح‌های اختلاط مطالعه‌شده داشت.

جدول ۴ مقایسه ردپای کربنی مصالح مختلف را ارائه می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه ردپای کربنی مصالح ساختمانی (cradle-to-gate)

منبع داده	ردپای کربنی (CO_2e/kg)	مصالح
al et Abdulkareem (۲۰۲۳)	۰.۸-۱.۰	سیمان پرتلند
al et Abdulkareem (۲۰۲۳)	۲.۱-۰.۰	بتن معمولی

al et Abdulkareem (۲۰۲۳)	۰۸.۰۴-۰.۰	بتن ژئوپلیمری
al et Latapie Rosa (۲۰۲۳)	۰۳.۰۱-۰.۰	خاک کوبیده
al et Latapie Rosa (۲۰۲۳)	۰۵.۰۲-۰.۰	آجر خشتی
al et Nair (۲۰۲۵)	۱۰.۰۵-۰.۰	کنف‌کریت (آهک)
al et Nair (۲۰۲۵)	۰۵.۰۲-۰.۰	کنف‌کریت (ژئوپلیمر)
al et Chen (۲۰۲۲)	۰.۱۵- تا ۰.۵-۰	بیوچار در سیمان

منبع: اقتباس از منابع ذکرشده. اعداد منفی نشان‌دهنده جذب خالص کربن است.

۴. تحلیل مقایسه‌ای

۴.۱. مقایسه جامع سه دسته مصالح

برای درک بهتر جایگاه هر یک از سه دسته مصالح، جدول ۵ مقایسه‌ای جامع از منظر پارامترهای کلیدی ارائه می‌دهد.

جدول ۵. مقایسه جامع مصالح ژئوسورس، زیست‌محور و کربن‌منفی

معیار	مصالح ژئوسورس	مصالح زیست‌محور	مصالح کربن‌منفی
منبع اصلی	خاک، سنگ، رس	گیاهان، قارچ‌ها	ضایعات + CO ₂
تجدیدپذیری	محدود (منابع معدنی)	بالا (تجدیدپذیر)	بالا (ضایعات)
ذخیره کربن	خیر	بله (زیستی)	بله (خالص منفی)
هدایت حرارتی	متوسط تا بالا	پایین (عایق)	متغیر
جرم حرارتی	بالا	پایین	متوسط
مقاومت مکانیکی	متوسط تا بالا	پایین تا متوسط	متوسط

دوام در برابر آب	متوسط	پایین تا متوسط	بالا
بلوغ فناوری	بالا (سنتی)	متوسط	پایین تا متوسط
هزینه اولیه	پایین	متوسط	بالا
موانع اصلی	استانداردسازی، پذیرش بازار	دوام، استانداردسازی	هزینه، مقیاس‌پذیری

منبع: تدوین نویسنده بر اساس مرور ادبیات

تحلیل این جدول نشان می‌دهد که هر سه دسته دارای نقاط قوت و ضعف مشخصی هستند. مصالح ژئوسورس از نظر بلوغ فناوری و هزینه اولیه مزیت دارند، اما از نظر تجدیدپذیری محدودیت دارند و نمی‌توانند به‌عنوان مخزن کربن عمل کنند. مصالح زیست‌محور از نظر تجدیدپذیری و ذخیره کربن برجسته هستند، اما مقاومت مکانیکی و دوام آن‌ها چالش اصلی است. مصالح کربن‌منفی از نظر پتانسیل جذب خالص کربن منحصربه‌فرد هستند، اما هزینه و مقیاس‌پذیری موانع اصلی آن‌هاست.

۴.۲. هم‌افزایی و ترکیب مصالح

نکته کلیدی آن است که این سه دسته مصالح می‌توانند به‌صورت هم‌افزا با یکدیگر ترکیب شوند. Latapie Rosa و همکاران (۲۰۲۳) در تحلیل کتاب‌سنجی خود نشان دادند که همکاری بین‌رشته‌ای در حوزه مصالح زیست‌محور و زمین‌زاد در حال رشد است و موضوعاتی مانند فیزیک، مدل‌سازی، دوام و ریزساختار به‌عنوان اهرم‌های کلیدی برای پیشرفت آینده این مصالح ظاهر شده‌اند.

یک نمونه بارز از هم‌افزایی، ترکیب مصالح زیست‌محور سبک (مانند کنف‌کریت یا مایسلیم) با مصالح ژئوسورس دارای جرم حرارتی (مانند خاک کوبیده یا آجر ژئوپلیمری) است. این ترکیب می‌تواند به ساختارهایی منجر شود که هم‌زمان عایق‌بندی حرارتی مطلوب و اینرسی حرارتی کافی برای تنظیم دمای داخلی را فراهم می‌کنند. Nair و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که کنف‌کریت حاوی ژئوپلیمر، بهترین عملکرد ترکیبی را از نظر مقاومت، عایق‌بندی و جذب صدا دارد.

در سطح دیگر، مصالح کربن‌منفی می‌توانند به‌عنوان لایه جبران‌کننده در ساختمان‌هایی که عمدتاً از مصالح ژئوسورس یا زیست‌محور ساخته شده‌اند، استفاده شوند. برای مثال، استفاده از پانل‌های ذره‌ای بیوچار در دیوارهای داخلی یک ساختمان خاک کوبیده می‌تواند انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل و فرآوری خاک را جبران کند و ساختمان را به سمت بی‌طرفی کربنی یا حتی کربن‌منفی سوق دهد (al et Chen, ۲۰۲۲).

۵. چالش‌ها و موانع پذیرش

۵.۱. خلأ استانداردهای فنی و مقررات

یکی از مهم‌ترین موانع بر سر راه پذیرش گسترده مصالح ژئوسورس، زیست‌محور و کربن‌منفی، فقدان استانداردهای فنی مدون و مقررات ساختمانی مناسب است. Kriven و همکاران (۲۰۲۴) تأکید کردند که ژئوپلیمرها و مواد قلیایی فعال‌شده، با وجود پتانسیل بالای خود، هنوز در بسیاری از کشورها در چارچوب مقررات ساختمانی موجود جای نگرفته‌اند. آن‌ها استدلال کردند که بدون تدوین استانداردهای عملکردی، تسهیل صدور گواهینامه و ترویج دسترسی به بازار، پذیرش این مصالح در مقیاس صنعتی کند خواهد بود.

Latapie Rosa و همکاران (۲۰۲۳) نیز اشاره کردند که اگرچه علاقه به مصالح زیست‌محور و زمین‌زاد در حال رشد است، اما پذیرش گسترده آن‌ها هنوز محدود است، زیرا مطالعه سیستماتیک این مصالح نسبتاً جدید است و سابقه عملکردی بلندمدت کافی وجود ندارد. این خلأ دانش، بیمه‌گران، مجریان و مالکان را محتاط می‌کند.

۵.۲. موانع اقتصادی و بازار

هزینه اولیه بالای برخی مصالح کربن‌منفی، به‌ویژه در مراحل اولیه توسعه فناوری، مانع مهمی است. Wu و همکاران (۲۰۲۴) اشاره کردند که اگرچه کربنات‌سازی معدنی پتانسیل بالایی دارد، اما هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری اولیه برای راه‌اندازی تأسیسات در مقیاس صنعتی قابل توجه است. با این حال، آن‌ها استدلال کردند که با پیشرفت فناوری و افزایش مقیاس تولید، هزینه‌ها کاهش خواهد یافت.

از سوی دیگر، Chen و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که پانل‌های ذره‌ای بیوپار می‌توانند سود اقتصادی قابل توجهی (۹۲ تا ۱۱۶ دلار در هر متر مکعب) داشته باشند، به شرطی که قیمت کربن در بازارهای جهانی به سطح کافی برسد. این یافته نشان می‌دهد که سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن می‌توانند نقش کلیدی در بهبود economics مصالح کربن‌منفی ایفا کنند.

۵.۳. محدودیت‌های زنجیره تأمین و مقیاس‌پذیری

مصالح زیست‌محور و کربن‌منفی به شدت به دسترسی به منابع محلی وابسته‌اند. برای مثال، تولید کنف‌کریت نیازمند دسترسی به الیاف کنف در مقیاس صنعتی است، در حالی که تولید بیوپار نیازمند دسترسی پایدار به زیست‌توده ضایعاتی است. در مناطقی که این منابع به‌وفور یافت نمی‌شوند، هزینه حمل‌ونقل می‌تواند مزیت زیست‌محیطی را کاهش دهد (Bahadori-Jahromi, ۲۰۲۴).

Lingam و همکاران (۲۰۲۳) در مورد کامپوزیت‌های مایسلیمی اشاره کردند که فرآیند تولید این مصالح به شرایط کنترل‌شده رشد (دما، رطوبت، تهویه) نیاز دارد و مقیاس‌پذیری آن برای تولید انبوه چالش‌برانگیز است. آن‌ها پیشنهاد کردند که تحقیقات آینده باید بر توسعه روش‌های تولید پیوسته و اتوماسیون فرآیند متمرکز شود.

۵.۴. موانع اجتماعی و فرهنگی

پذیرش مصالح نوین در صنعت ساختمان، فراتر از موانع فنی و اقتصادی، به عوامل اجتماعی و فرهنگی نیز بستگی دارد. بسیاری از مصالح ژئوسورس، به‌ویژه خشت و کاهگل، در برخی جوامع با برجسب «مصالح فقیرانه» یا «سنتی» همراه هستند و مقاومت روانی در برابر استفاده از آن‌ها در ساختمان‌های مدرن وجود دارد (al et Latapie Rosa, ۲۰۲۳). غلبه بر این نگرش نیازمند آموزش، نمایش نمونه‌های موفق و ایجاد چارچوب‌های تضمین کیفیت است.

۶. جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده

۶.۱. ارزیابی چرخه عمر یکپارچه

یکی از نیازهای اساسی، توسعه چارچوب‌های ارزیابی چرخ عمر یکپارچه است که تمام مراحل—از استخراج مواد اولیه تا پایان عمر و بازیافت—را در بر گیرد. Abdulkareem و همکاران (۲۰۲۳) تأکید کردند که ارزیابی‌های موجود اغلب فقط cradle-to-gate را پوشش می‌دهند و مراحل بهره‌برداری و پایان عمر را نادیده می‌گیرند. ارزیابی‌های چرخه عمر کامل می‌تواند مزایای واقعی مصالح کربن‌منفی را در طول عمر ساختمان—از جمله دوام، نگهداری و قابلیت بازیافت—آشکار کند.

۶.۲. بهینه‌سازی طرح اختلاط و فرآوری

پژوهش‌های آینده باید بر بهینه‌سازی طرح‌های اختلاط و فرآوری متمرکز شوند تا تعادل بهینه بین عملکرد مکانیکی، خواص حرارتی، دوام و ردپای کربنی برقرار شود. Nair و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که ترکیب رس کلسینه با سنگ آهک در کنف‌کریتمی‌تواند عملکرد بهتری نسبت به استفاده از رس کلسینه به‌تنهایی داشته باشد و این یافته، مسیر جدیدی را برای بهینه‌سازی چسباننده‌های کم‌کربن پیشنهاد می‌کند.

۶.۳. توسعه استانداردها و مقررات

تدوین استانداردهای عملکردی برای مصالح ژئوسورس، زیست‌محور و کربن‌منفی، یک اولویت سیاستی است. Kriven و همکاران (۲۰۲۴) پیشنهاد کردند که نهادهای تنظیم‌کننده باید چارچوب‌هایی مبتنی بر عملکرد—نه تجویزی—توسعه دهند تا نوآوری را تسهیل کنند و در عین حال ایمنی و دوام را تضمین نمایند. همکاری بین‌المللی در این زمینه می‌تواند به هماهنگ‌سازی استانداردها و تسهیل تجارت مصالح کمک کند.

۶.۴. سیاست‌های تشویقی و قیمت‌گذاری کربن

سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن و مشوق‌های مالی می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در پذیرش مصالح کربن‌منفی ایفا کنند. Chen و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که سودآوری پانل‌های بیوپار به قیمت کربن وابسته است. سیاست‌هایی مانند مالیات کربن، سیستم‌های تجارت انتشار و خریدهای دولتی سبز می‌توانند تقاضا برای این مصالح را افزایش دهند. در سطح اتحادیه اروپا، چارچوب صدور گواهی حذف کربن (CRCF) که در دسامبر ۲۰۲۴ لازم‌الاجرا شد، گامی مهم در این راستا محسوب می‌شود (۲۰۲۴ Commission, European).

۶.۵. پژوهش‌های بین‌رشته‌ای

Latapie Rosa و همکاران (۲۰۲۳) در تحلیل کتاب‌سنجی خود نشان دادند که همکاری بین‌رشته‌ای—شامل فیزیک، شیمی، مهندسی عمران، معماری و علوم محیطی—برای پیشرفت این حوزه حیاتی است. آن‌ها موضوعاتی مانند مدل‌سازی انتقال حرارت و رطوبت، مطالعه ریزساختار و تحلیل دوام بلندمدت را به‌عنوان اهرم‌های کلیدی برای پژوهش‌های آینده معرفی کردند.

۷. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی سه دسته نوظهور از مصالح ساختمانی—ژئوسورس، زیست‌محور و کربن‌منفی—پرداخت که پتانسیل دگرگون‌سازی صنعت ساخت‌وساز به سمت پایداری را دارند. یافته‌های اصلی عبارت‌اند از:

اول، مصالح ژئوسورس مانند خاک کوبیده، خشت و آجرهای ژئوپلیمری، با حداقل فرآوری و بدون نیاز به دمای بالا، ردپای کربنی بسیار پایینی دارند و از نظر بلوغ فناوری و هزینه اولیه در وضعیت مطلوبی قرار دارند. با این حال، چالش‌هایی مانند خلأ استانداردسازی، محدودیت منابع معدنی و مقاومت فرهنگی در برابر پذیرش گسترده آن‌ها وجود دارد (۲۰۲۳; al et Kriven, ۲۰۲۴).

دوم، مصالح زیست‌محور مانند کنف‌کریت، مایسلیم و کامپوزیت‌های کاه، از منابع تجدیدپذیر مشتق می‌شوند و قادر به ذخیره کربن در ساختار خود هستند. این مصالح عملکرد حرارتی و آکوستیکی برجسته‌ای دارند و می‌توانند به بهبود کیفیت هوای داخلی کمک کنند. با این حال، دوام در برابر آب، مقاومت مکانیکی محدود و چالش‌های مقیاس‌پذیری، موانع اصلی آن‌هاست (۲۰۲۳; al et Nair, ۲۰۲۴; Gibson, ۲۰۲۵; al et Lingam, ۲۰۲۳).

سوم، مصالح کربن‌منفی مانند بیوپار در سیمان، کربناته‌سازی معدنی و بتن‌های جذب‌کننده CO₂، از طریق فناوری‌های نوآورانه قادر به جذب خالص دی‌اکسید کربن از جو هستند. این مصالح پتانسیل بالایی برای جبران انتشار باقیمانده در چرخه

عمر ساختمان دارند، اما هزینه اولیه بالا، سطح بلوغ فناوری پایین و نیاز به سیاست‌های تشویقی، پذیرش آن‌ها را محدود کرده است (Bahadori-Jahromi, & Room ۲۰۲۴; al et Wu ۲۰۲۲; al et Chen ۲۰۲۴).

چهارم، ترکیب هوشمندانه این سه دسته مصالح می‌تواند به ساختارهایی منجر شود که هم‌زمان کارایی انرژی، آسایش حرارتی، دوام و ردپای کربنی پایین را ارائه دهند. جفت‌شدن مصالح زیست‌محور سبک با مصالح ژئوسورس دارای جرم حرارتی و استفاده از مصالح کربن‌منفی به‌عنوان لایه جبران‌کننده، یک استراتژی امیدوارکننده برای دستیابی به ساختمان‌های کم‌کربن یا حتی کربن‌منفی است.

پنجم، برای غلبه بر موانع موجود، مجموع‌ای از اقدامات ضروری است: تدوین استانداردهای عملکردی، توسعه سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های بین‌رشته‌ای، و ترویج نمونه‌های موفق از طریق آموزش و نمایش عمومی.

در مجموع، مسیر گذار به ساخت‌وساز پایدار نیازمند رویکردی نظام‌مند است که در آن انتخاب مصالح، طراحی معماری، سیاست‌گذاری و رفتار کاربران به‌صورت هم‌افزا عمل کنند. مصالح ژئوسورس، زیست‌محور و کربن‌منفی، هر یک بخشی از این پازل پیچیده‌اند و تنها با درک عمیق از قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها می‌توان به ساخت‌وساز واقعاً پایدار دست یافت.

منابع

۱. Abdulkareem, M., Horttanainen, M., & Kärki, T) .۲۰۲۳. (A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolymers concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete. Science of The Total Environment, ۸۷۳, ۱۶۱۲۳۰. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161230>
۲. Arehart, J .H., Nelson, W .S., & Srubar, W .V) .۲۰۲۰. (On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. Journal of Cleaner Production, ۲۶۶, ۱۲۱۸۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846>
۳. Carbon Herald) .۲۰۲۵, January ۲۴. (Soletair Power and Carbonaide successfully produce concrete with captured CO₂. Carbon Herald. <https://carbonherald.com>
۴. Chen, L., Zhang, H .Y., Labianca, C., Wang, L., Ruan, S., Poon, C .S., Ok, Y .S., & Tsang, D .C .W) .۲۰۲۲. (Carbon-negative cement-bonded biochar particleboards. Biochar, ۴(۱), ۵۸. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00185-8>
۵. European Commission) .۲۰۲۴. (Regulation) EU (۲۰۲۴/۳۰۱۲ on the certification framework for carbon removals. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu>
۶. Gibson, P) .۲۰۲۴. (Mainstreaming precast and block hempcrete—a carbon sequestering solution for the built environment. Academia Materials Science, ۲۰۲۴)۴(, ۱-۱۵. <https://doi.org/10.20930/AcadMatSci>

۷. Kriven, W .M., Leonelli, C., Provis, J .L., Boccaccini, A .R., Attwell, C., Ducman, V., Ferone, C., Rossignol, S., Luukkonen, T., van Deventer, J .S .J., Emiliano, J .V., & Lombardi, J .E) .۲۰۲۴ .(Why geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world :A perspective contribution .Journal of the American Ceramic Society, ۱۰۷)۸(, ۵۱۵۵-۵۱۷۵ .<https://doi.org/10.1111/jace.19828>
۸. Lahbabi, S., Bouferra, R., & Saadi, L) .۲۰۲۳ .(Study of the physicochemical, mineralogical, and geotechnical properties of clayey soils to improve the durability of eco-construction materials in the rural region of Morocco .Construction and Building Materials, ۴۰۳, ۱۳۳۰۶۴ .<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133064>
۹. Lingam, D., Narayan, S., & Mamun, K) .۲۰۲۳ .(Engineered mycelium-based composite materials :Comprehensive study of various properties and applications . Construction and Building Materials, ۳۹۱, ۱۳۱۸۴۱ .<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131841>
۱۰. Nair, S .G., Nguyen, Q .D., Zhu, Q., Karimi, M., Gan, Y., Zhong, H., Castel, A., Irga, P .J., da Rocha, C .G., Torpy, F .R., Wilkinson, S., Moreau, D., & Delhomme, F) .۲۰۲۵ .(Low-carbon calcined clay-based binders for sustainable hempcrete .Materials and Structures, ۵۸, ۱۱۵۲۷ .<https://doi.org/10.1617/s11027>