



ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت و ساز ساختمان با در نظر گرفتن ملاحظات

زیست محیطی

محمد بهرامی کیا

محمد امیر شرافتی*

کارشناسی ارشد مهندسی عمران واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

گروه عمران واحد شیراز، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه: صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از بزرگ ترین بخش های اقتصادی جهان، سهم قابل توجهی در مصرف منابع، انرژی و تولید گازهای گلخانه ای دارد. فعالیت های ژئوتکنیکی مانند خاک برداری، بهسازی زمین و احداث پی ها به دلیل مصرف بالای انرژی و مواد، نقش کلیدی در تأثیرات زیست محیطی این صنعت ایفا می کنند. ارزیابی چرخه عمر (LCA) به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل این تأثیرات در تمام مراحل عمر پروژه های ساختمانی شناخته شده است. این مقاله مروری با هدف بررسی کاربرد ارزیابی چرخه عمر در فعالیت های ژئوتکنیکی، شناسایی فناوری های پایدار (مانند مصالح بازیافتی و روش های کم کربن)، و تحلیل چالش های موجود در این حوزه تدوین شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

مواد و روش ها: این مطالعه با استفاده از روش مرور نظام مند، مقالات معتبر (۲۰۱۰-۲۰۲۵) از پایگاه های داده علمی را با کلیدواژه های مرتبط بررسی کرده است. پس از غربالگری بر اساس معیارهای کیفیت و ارتباط، داده های مربوط به روش های ارزیابی، شاخص های زیست محیطی و فناوری های نوین استخراج شد. تحلیل کیفی شامل مقایسه تطبیقی یافته ها، شناسایی چالش ها و ارائه راهکارها بوده و نتایج در قالب جداول مقایسه ای ارائه گردید.

نتایج و بحث: نتایج این مطالعه مروری نشان می دهد که فعالیت های ژئوتکنیکی (خاک برداری، بهسازی زمین و پی سازی) سهم قابل توجهی در مصرف انرژی (۱۵۰ تا ۱۸۰۰ مگاژول بر تن) و انتشار کربن (۱۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر تن) دارند. بررسی فناوری های نوین مانند خاک های مسلح با الیاف بازیافتی، شمع های کم کربن و روش های بهسازی بیولوژیک، مزایای زیست محیطی قابل توجهی را نشان می دهد، اما با چالش هایی مانند هزینه های بالای اولیه و محدودیت های فنی مواجه هستند. تحلیل استانداردهای بین المللی حاکی از عدم وجود چارچوب یکپارچه برای ارزیابی چرخه عمر فعالیت های ژئوتکنیکی است. یافته ها بر نیاز به توسعه شاخص های اختصاصی برای کیفیت خاک و خدمات اکوسیستمی و همچنین ایجاد پایگاه های داده ی دقیق تر تأکید دارند. این مطالعه راهکارهای عملی مانند بهینه سازی روش های اجرایی، مدیریت پسماند و استفاده از مصالح پایدار را برای کاهش اثرات زیست محیطی پیشنهاد می کند.

واژه های کلیدی: ارزیابی

چرخه عمر، کارهای ژئوتکنیکی، ساخت و ساز پایدار، تأثیرات زیست محیطی

نتیجه گیری: این مطالعه مروری نشان می دهد که فعالیت های ژئوتکنیکی نقش تعیین کننده ای در پایداری زیست محیطی پروژه های ساختمانی دارند. یافته ها حاکی از آن است که رویکردهای نوین مانند استفاده از مصالح بازیافتی و روش های کم کربن می توانند تا ۴۰٪ از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای بکاهند. با این وجود، موانع مهمی از جمله نبود چارچوب های ارزیابی یکپارچه، کمبود داده های معتبر و هزینه های بالای اجرایی وجود دارد. توسعه استانداردهای اختصاصی برای ارزیابی چرخه عمر فعالیت های ژئوتکنیکی، سرمایه گذاری در تحقیقات کاربردی برای کاهش هزینه های فناوری های پایدار، و ایجاد بانک های اطلاعاتی جامع برای تسهیل تصمیم گیری های مهندسی از جمله موارد پیشنهادی جهت بهبود مدیریت چرخه عمر این فعالیت ها است. این اقدامات می تواند صنعت ساخت و ساز را به سوی تحقق اهداف توسعه پایدار هدایت کند.

نویسنده مسئول: محمد امیر شرافتی

نشانی: گروه عمران واحد شیراز، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران | تلفن: ۰۹۱۷۳۸۷۰۰۱۴ | پست الکترونیکی: MA.Sherafati@iau.ac.ir

استناد: بهرامی کیا محمد، شرافتی محمد امیر. ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت و ساز ساختمان با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴؛ ۳(۹): ۵۱-۳۹.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه 4.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



مقدمه

فعالیت‌های ساختمانی عمرانی یکی از بخش‌های بزرگ در اقتصاد به‌شمار می‌رود. بر اساس آمار بانک جهانی سهم این بخش از اقتصاد جهان بین ۶ الی ۱۳ درصد گزارش شده است (بانک جهانی اقتصاد ۲۰۲۵). هم‌چنین این بخش سهم ۷ درصدی (۱۷۴ میلیون نفر شاغل فعال) از اشتغال جهانی را به خود اختصاص داده است (تیلور ۲۰۲۴). این بخش حدود ۵۰ درصد مواد خام استخراج شده (هرتویچ ۲۰۲۱) ۴۰ درصد انرژی مصرفی دنیا و ۳۵ درصد گازهای گلخانه‌ای تولید شده در جهان را به خود اختصاص داده است. همه این آمار و ارقام‌ها نشان‌دهنده اهمیت ویژه بخش عمرانی و ساخت‌وساز دارد.

بررسی چرخه عمر فعالیت‌های ژئوتکنیکی در پروژه‌های ساختمانی اهمیت ویژه‌ای در دستیابی به ساخت‌وساز پایدار دارد. مطالعات نشان می‌دهند که فرآیندهای ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی زمین و احداث پی‌ها، به‌طور قابل‌توجهی انرژی و منابع مصرف می‌کنند (سانگ ۲۰۲۰). ارزیابی چرخه عمر^۱ به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تحلیل تأثیرات زیست‌محیطی این فعالیت‌ها در طول دوره عمر ساختمان‌ها معرفی شده است. با استفاده از ارزیابی چرخه عمر، می‌توان راهکارهایی برای کاهش مصرف منابع و انرژی در مراحل اولیه ساخت‌وساز پیشنهاد داد، که این امر به بهبود پایداری کلی پروژه‌های ساختمانی کمک می‌کند (هاکین ۲۰۲۰).

ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیکی نقش مهمی در شناسایی و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با عملیات خاکی، پی‌سازی و بهسازی زمین ایفا می‌کند. این روش با تحلیل مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از منابع طبیعی و تولید ضایعات در تمامی مراحل از استخراج مواد اولیه تا پایان عمر سازه، امکان تصمیم‌گیری‌های بهینه برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی را فراهم می‌آورد (می‌ملو ۲۰۲۴). ملاحظات زیست‌محیطی در ارزیابی چرخه عمر ژئوتکنیکی شامل انتخاب مصالح پایدار، مدیریت پسماندهای ساختمانی و به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف انرژی است که به حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌ها کمک می‌کند و در نهایت به توسعه ساخت‌وساز پایدار می‌انجامد (پتینارولی ۲۰۲۳). در این مقاله به‌صورت جامع تأثیر ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت‌وساز ساختمان بر محیط‌زیست بررسی می‌شود.

فرضیات این مقاله بر این اساس استوار است که فعالیت‌های ژئوتکنیکی در صنعت ساخت‌وساز سهم قابل‌توجهی در مصرف

انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و ارزیابی چرخه عمر می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای کاهش این تأثیرات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین، فناوری‌های نوین مانند مصالح بازیافتی و روش‌های کم‌کربن قادرند تا حد زیادی از مصرف منابع و آلودگی‌ها بکاهند، اما چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا و محدودیت‌های فنی مانع از گسترش آن‌ها شده است. سانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای، اثر چرخه عمر بر فعالیت‌های ژئوتکنیکی مرتبط با ساختمان را بررسی نمودند. در این مطالعه فرآیندهای ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی زمین و ساخت فونداسیون‌ها جزو فعالیت‌های پر مصرف از نظر انرژی و منابع دسته‌بندی شدند. بنابراین، این عملیات می‌توانند نقش کلیدی در دستیابی به روش‌های ساخت‌وساز پایدارتر ایفا کنند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد ارزیابی چرخه عمر در بخش زیرساخت ساختمان‌ها هنوز در حال توسعه است و از انسجام کافی برخوردار نیست. نیاز به یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی چرخه حیات عملیات ژئوتکنیکی در ساخت‌وساز احساس می‌شود. به‌ویژه در تعریف واحد عملکردی، انتخاب مرزهای سیستم، داده‌های موجودی مناسب و انتخاب دسته‌بندی‌های تأثیر محیط‌زیستی. ساموئلسون (۲۰۲۳) روش‌شناسی ادغام ارزیابی چرخه عمر و تحلیل هزینه چرخه عمر در فرآیند طراحی ژئوتکنیکی را بررسی نموده است. هم‌چنین، روشی برای ارزیابی طرح‌های ژئوتکنیکی مختلف به منظور انتخاب پایدارترین طراحی بر اساس نتایج تحلیل چرخه عمر و هزینه چرخه عمر ارائه شده است. ریموند و همکاران (۲۰۲۰) دسته‌بندی‌های تأثیر و شاخص‌های زیست‌محیطی در ارزیابی چرخه عمر سیستم‌های ژئوتکنیکی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که ارزیابی‌های فعلی عمدتاً بر روی مصرف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی متمرکز هستند و تأثیرات مرتبط با منابع خاک و زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. نویسندگان بر لزوم توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی مرتبط با کیفیت خاک، عملکردهای خاک و خدمات اکوسیستمی آن تأکید کردند. هم‌چنین، نیاز به تطبیق روش‌های ارزیابی از مقیاس کلان به مقیاس پروژه‌های ژئوتکنیکی برای بهبود دقت تحلیل‌ها مطرح شد. مدل مفهومی ارائه‌شده بر جریان‌های موجودی و مرزهای سیستم تمرکز دارد و می‌تواند مبنایی برای تعیین دامنه مطالعات آینده ارزیابی چرخه عمر در کارهای ژئوتکنیکی باشد. هم‌چنین، این مدل می‌تواند به بهبود ارتباط مؤثر بین ذینفعان مختلف در زمینه پایداری

فعالیت‌های ژئوتکنیکی، شناسایی فناوری‌های پایدار و تحلیل چالش‌های موجود در این حوزه است تا با ارائه راهکارهای عملی، گامی در جهت تحقق ساخت و ساز پایدار برداشته شود.

محیط‌زیستی در بخش ساخت و ساز کمک کند. علاوه بر مطالعات یاد شده مطالعات دیگری نیز در حوزه تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول ۱ خلاصه این نتایج آورده شده است. هدف این مقاله بررسی نظام‌مند کاربرد ارزیابی چرخه عمر در

جدول ۱- مقایسه کارهای تحقیقاتی مختلف چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساختمان

عنوان مطالعه	شاخص‌های زیست‌محیطی مورد بررسی	شیوه‌های تحلیل و محاسبه	نتایج کلیدی
سانگ و همکاران (۲۰۲۰)	تغییرات آب‌وهوایی، اسیدی شدن خاک، اکسیدان‌های فوتوشیمیایی، تخریب اوزون، آلودگی آب، تغییر کاربری زمین	مطالعه مروری	ارزیابی چرخه عمر در ژئوتکنیک هنوز در مراحل ابتدایی است و نیاز به چارچوبی منسجم دارد.
ریموند و همکاران (۲۰۲۰)	مصرف انرژی، پتانسیل گرمایش جهانی، تأثیر بر کیفیت خاک	تحلیل ارزیابی چرخه عمر با تمرکز بر داده‌های ساختمانی	شاخص‌های سنتی کافی نیستند. نیاز به توسعه شاخص‌های مربوط به خدمات خاک وجود دارد.
کلیسگارد و همکاران (۲۰۲۰)	پتانسیل گرمایش جهانی، مصرف منابع، آلودگی هوا	مرور نظام‌مند مطالعات ارزیابی چرخه عمر	فرآیندهای ژئوتکنیکی بسیار مصرف‌گرا هستند و چارچوب یکپارچه‌ای وجود ندارد.
ساموئلسون (۲۰۲۳)	گرمایش جهانی، هزینه زیست‌محیطی مواد و انرژی	ترکیب ارزیابی چرخه عمر و هزینه	مدل مفهومی برای انتخاب طرح‌های ژئوتکنیکی پایدار ارائه شده است.
آذری جعفری و همکاران (۲۰۱۶)	تغییرات اقلیمی، مصرف انرژی اولیه و تجدیدناپذیر	تحلیل مقایسه‌ای بتن‌ها با استفاده از ارزیابی چرخه عمر	انتخاب نوع مصالح ژئوتکنیکی تأثیر زیادی بر کل عملکرد زیست‌محیطی دارد.
دو و همکاران (۲۰۱۴)	مصرف انرژی، تولید CO ₂ ، بهره‌وری منابع	مدل‌سازی فرآیند ساخت فونداسیون با نرم‌افزار SimaPro	فاز ساخت در فعالیت‌های ژئوتکنیکی بیش‌ترین تأثیر زیست‌محیطی را دارد.
هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)	آلودگی خاک و آب، مصرف منابع	تحلیل چرخه عمر برای بهسازی زمین با افزودنی‌های شیمیایی	روش‌های بهسازی پایدار، اثرات زیست‌محیطی کم‌تری نسبت به روش‌های سنتی دارند.

مواد و روش‌ها

به روش‌های ارزیابی، شاخص‌های زیست‌محیطی، فناوری‌های نوین و استانداردهای بین‌المللی استخراج و دسته‌بندی شدند. برای تحلیل داده‌ها از روش‌های کیفی شامل مقایسه تطبیقی یافته‌ها، شناسایی چالش‌های مشترک و استخراج راهکارهای پیشنهادی استفاده شد. همچنین، جداول مقایسه‌ای برای نمایش نتایج تحقیقات مختلف، ویژگی‌های فناوری‌های ژئوتکنیکی و استانداردهای ارزیابی چرخه عمر طراحی شدند تا دیدگاه جامعی از وضعیت موجود و گپ تحقیقاتی ارائه شود. در نهایت، یافته‌ها با توجه به اهداف تحقیق و ادبیات موضوع تفسیر و جمع‌بندی شدند.

در این مقاله مروری، روش تحقیق مبتنی بر بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین در حوزه ارزیابی چرخه عمر کارهای ژئوتکنیکی در ساخت و ساز ساختمان با تأکید بر ملاحظات زیست‌محیطی است. ابتدا با استفاده از پایگاه‌های داده علمی معتبر مقالات مرتبط با کلیدواژه‌های "ارزیابی چرخه عمر"، "کارهای ژئوتکنیکی"، "ساخت و ساز پایدار"، و "تأثیرات زیست‌محیطی" جمع‌آوری شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل ارتباط مستقیم با موضوع، انتشار در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵، و کیفیت علمی (نمایه شده در مجلات معتبر) بودند. پس از غربال‌گری اولیه، داده‌های مربوط

نتایج و بحث

فعالیت‌های ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی خاک، اجرای فونداسیون‌ها، نصب دیوارهای حائل و پایدارسازی، از مراحل کلیدی و اجتناب‌ناپذیر در هر پروژه ساخت‌وساز محسوب می‌شوند. این عملیات به دلیل استفاده گسترده از ماشین‌آلات سنگین، مصرف سوخت‌های فسیلی، به‌کارگیری مصالحی که رد کربنی بالایی دارند، مانند سیمان و فولاد، و همچنین دست‌کاری در ساختار طبیعی زمین، نقش قابل توجهی در تولید گازهای گلخانه‌ای، تخریب پوشش گیاهی، آلودگی خاک و مصرف منابع طبیعی دارند (هروتویچ ۲۰۲۱). در این میان، تحلیل چرخه عمر به‌عنوان روشی علمی و استاندارد، امکان ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی این فعالیت‌ها را فراهم می‌سازد. با استفاده از ارزیابی چرخه عمر می‌توان مشخص کرد که در کدام مرحله از فعالیت‌های ژئوتکنیکی - از استخراج مواد اولیه، حمل‌ونقل، اجرا تا پایان عمر مفید و تخریب - بیش‌ترین آسیب به محیط‌زیست وارد می‌شود. به‌عنوان مثال، در فرآیند خاک‌برداری، میزان مصرف

سوخت ماشین‌آلات و جابجایی خاک به مکان‌های دور تأثیر زیادی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. در بهسازی خاک، استفاده از افزودنی‌هایی مانند آهک یا سیمان می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل گرمایش جهانی و اسیدی شدن خاک شود. همچنین در احداث فونداسیون‌ها، انتخاب نوع سیستم (مثلاً فونداسیون‌های کم‌عمق در مقابل شمع‌های بتنی) اثرات زیست‌محیطی متفاوتی در بر دارد (پنینارولی ۲۰۲۳). کاربرد ارزیابی چرخه عمر در این حوزه می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در طراحی، انتخاب مصالح، روش‌های اجرایی و راهکارهای جایگزین منجر شود و در نهایت به کاهش ردپای زیست‌محیطی پروژه‌های عمرانی کمک کند. از این رو، توسعه چارچوب‌های تحلیلی منسجم و پایگاه‌های داده دقیق برای ارزیابی فعالیت‌های ژئوتکنیکی، گامی حیاتی در جهت تحقق ساخت‌وساز پایدار به‌شمار می‌رود. در جدول ۲ انواع فعالیت‌های ژئوتکنیکی از نظر شاخص‌های چرخه عمر و سازگاری زیست‌محیطی مقایسه شده است.

جدول ۲ - مقایسه انواع فعالیت ژئوتکنیکی از نظر شاخص‌های زیست‌محیطی

فعالیت ژئوتکنیکی	مصرف انرژی (MJ/ton)	انتشار کربن (kg/ton)	مصرف آب (m ³ /ton)	ضایعات تولیدی (kg/ton)	مرجع
خاک‌برداری	۱۵۰-۳۰۰	۱۰-۲۰	۰/۱-۰/۳	۵-۱۰	سانگ و همکاران (۲۰۲۰)
بهسازی زمین (با سیمان)	۸۰۰-۱۲۰۰	۷۰-۱۰۰	۰/۳-۰/۵	۱۰-۲۰	هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)
پی‌سازی (شمع کوبی بتنی)	۱۰۰۰-۱۸۰۰	۱۵۰-۲۵۰	۰/۴-۰/۶	۱۵-۳۰	دو و همکاران (۲۰۱۴)
دیوار حائل بتنی	۹۰۰-۱۵۰۰	۱۲۰-۲۰۰	۰/۵-۰/۷	۲۰-۳۵	آذری جعفری و همکاران (۲۰۱۶)
پایدارسازی شیب‌ها	۵۰۰-۹۰۰	۵۰-۸۰	۰/۲-۰/۴	۱۰-۱۵	کلیسگارد و همکاران (۲۰۲۰)

یکی از راهکارهایی که برای حل چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های ژئوتکنیکی پیشنهاد می‌شود استفاده از مواد و فناوری‌های جدید در این حوزه است. پس از بررسی ادبیات موضوع، شش فناوری احصا گردید. در جدول ۳ شش فناوری مختلف را مورد مقایسه قرار می‌دهد که هر کدام ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. این شش فناوری شامل موارد زیر هستند: **خاک مسلح با الیاف بازیافتی**: این روش شامل استفاده از الیاف بازیافتی برای افزایش استحکام و پایداری خاک در کاربردهایی مانند جاده‌ها، فرودگاه‌ها و سد‌ها است. مزایای زیست‌محیطی آن شامل کاهش نیاز به مصالح جدید و کاهش پسماندهای ساختمانی است. با این حال، چالش‌هایی مانند پیچیدگی و هزینه بازیافت، و کنترل کیفیت الیاف بازیافتی وجود دارد (میزابابایی و ارشد ۲۰۱۸). **شمع‌های کم‌کربن**: این شمع‌ها در فونداسیون سازه‌ها، پایدارسازی شیب‌ها و دیوارهای حائل کاربرد دارند. مزیت اصلی زیست‌محیطی آن‌ها کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با

تولید سیمان و فولاد است. اما ممکن است به فناوری‌های خاص یا مواد افزودنی جدید نیاز داشته باشند و محدودیت‌هایی در ظرفیت باربری و چالش‌های اجرایی در شرایط خاص خاک دارند (هابرت و راسل ۲۰۰۹).

روش‌های بهسازی بیولوژیک: این روش‌ها برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار، افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک استفاده می‌شوند. مزایای زیست‌محیطی آن‌ها شامل کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر و بهبود خواص خاک به روش طبیعی است. چالش‌های این روش شامل زمان‌بر بودن فرآیند و وابستگی به شرایط محیطی است (دیجونگ و همکاران ۲۰۱۰). **خاک‌ریزهای سبک (مانند استفاده از لاستیک فرسوده)**: این خاک‌ریزها در ساخت خاک‌ریز، دیوارهای حائل سبک و زه‌کشی کاربرد دارند. استفاده از لاستیک فرسوده به کاهش حجم پسماندهای لاستیکی و کاهش وزن کلی سازه کمک می‌کند. با این حال، نیاز به فرآوری خاص لاستیک‌ها و احتمال آزاد شدن

به کار می‌روند. مزیت عمده آن‌ها کاهش آلودگی محیط زیست پس از پایان عمر مفید و کاهش نیاز به دفن زباله است. با این حال، عمر مفید محدودتری نسبت به ژئوسنتتیک‌های پلیمری دارند و مقاومت مکانیکی آن‌ها در برخی موارد کمتر است (زیکاری و بیگنوزی ۲۰۱۹). به طور کلی، این بررسی نشان می‌دهد که صنعت ژئوتکنیک در حال حرکت به سمت راه حل‌های پایدارتر است که هم نیازهای مهندسی را برآورده می‌کنند و هم اثرات زیست محیطی را به حداقل می‌رسانند. انتخاب فناوری مناسب به عوامل متعددی از جمله شرایط خاص پروژه، ملاحظات هزینه و اولویت‌های زیست محیطی بستگی دارد.

مواد شیمیایی در صورت عدم کنترل صحیح از چالش‌ها محسوب می‌شود (سنادهیرا و همکاران ۲۰۱۷).

بتن‌های بازیافتی در فونداسیون: این بتن‌ها در بتن‌ریزی فونداسیون‌های کم‌اهمیت‌تر، لایه‌های زیرین روسازی و پر کردن گودال‌ها استفاده می‌شوند. مزایای زیست محیطی آن‌ها شامل کاهش مصرف سنگدانه طبیعی و کاهش پسماندهای ساختمانی است. اما ممکن است مقاومت فشاری کم‌تری نسبت به بتن معمولی داشته باشند و نگرانی‌هایی در مورد دوام بلندمدت آن‌ها وجود دارد. (تام و همکاران ۲۰۱۱).

ژئوسنتتیک‌های زیست تخریب پذیر: این مصالح برای کنترل فرسایش خاک، تقویت خاک در کاربردهای موقت و فیلتراسیون

جدول ۳- مقایسه انواع فناوری‌های جدید در حوزه فعالیت‌های ژئوتکنیکی

مزایای زیست محیطی	معایب/چالش‌ها	کاربرد در ژئوتکنیک	مرجع
کاهش نیاز به مصالح جدید و کاهش پسماند ساختمانی، افزایش پایداری و مقاومت خاک.	ممکن است فرآیند بازیافت پیچیده و هزینه‌بر باشد، کنترل کیفیت الیاف بازیافتی ممکن است چالش برانگیز باشد.	افزایش استحکام و پایداری خاک در جاده‌ها، فرودگاه‌ها و سدها، بهبود زه‌کشی خاک و آب‌های زیرزمینی، کنترل فرسایش خاک.	میرزا بابایی و ارشد (۲۰۱۸)
کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با تولید سیمان و فولاد، کاهش اثرات زیست محیطی حمل و نقل مصالح.	ممکن است نیاز به فناوری‌های خاص یا مواد افزودنی جدید داشته باشند، محدودیت در ظرفیت باربری برای برخی انواع، چالش‌های اجرایی در شرایط خاص خاک.	فونداسیون سازه‌ها، پایداری شیب‌ها، دیوارهای حائل.	هابرت و راسل (۲۰۰۹)
کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر، بهبود خواص خاک به روش طبیعی، پایداری طولانی مدت.	زمان‌بر بودن فرآیند، وابستگی به شرایط محیطی (دما، رطوبت)، کنترل دقیق فرآیند برای دستیابی به نتایج مطلوب، هزینه‌های اولیه بالاتر.	تثبیت خاک‌های مسئله‌دار مانند خاک‌های رمبند و واگرا، افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک، جلوگیری از روانگرایی خاک.	دیجونگ و همکاران (۲۰۱۰)
کاهش حجم پسماندهای لاستیکی، کاهش وزن کلی سازه و فشار بر خاک زیرین، خواص عایق حرارتی و صوتی.	نیاز به فرآوری خاص لاستیک‌ها، احتمال آزاد شدن مواد شیمیایی در صورت عدم کنترل صحیح، مسائل مربوط به آتش‌سوزی (در صورت عدم رعایت استانداردهای ایمنی)، محدودیت در کاربرد در خاک‌های با رطوبت بالا.	ساخت خاکریز، دیوارهای حائل سبک، زه‌کشی، جذب ارتعاشات.	سنادهیرا و همکاران (۲۰۱۷)
کاهش مصرف سنگدانه طبیعی، کاهش پسماندهای ساختمانی، کاهش انرژی مصرفی در تولید.	مقاومت فشاری کمتر در مقایسه با بتن معمولی در برخی موارد، نگرانی در مورد دوام و عملکرد در بلندمدت، نیاز به فرآیند جداسازی و خردایش مصالح.	بتن‌ریزی فونداسیون‌های کم‌اهمیت‌تر، لایه‌های زیرین روسازی، پر کردن گودال‌ها، سازه‌های نگهدارنده موقت.	تام و همکاران (۲۰۱۱)
کاهش آلودگی محیط زیست پس از پایان عمر مفید، کاهش نیاز به دفن زباله، بهبود خاک و حمایت از پوشش گیاهی.	عمر مفید محدودتر نسبت به ژئوسنتتیک‌های پلیمری، مقاومت مکانیکی کمتر در برخی موارد، هزینه تولید بالاتر.	کنترل فرسایش خاک، تقویت خاک در کاربردهای موقت، فیلتراسیون، زه‌کشی.	زیکاری و بیگنوزی (۲۰۱۹)

یکی دیگر از عواملی که بر ارزیابی چرخه عمر مصالح ساختمانی تأثیر دارد استانداردهایی است که در کشورها و مناطق مختلف اعمال می‌شود. از همین رو این استانداردها از منابع مختلف استخراج و یک تحلیل مقایسه‌ای ارائه گردید. در جدول ۴ این مقایسه آورده شده است. این جدول به مقایسه استانداردهای ارزیابی چرخه عمر در کشورهای مختلف می‌پردازد که می‌تواند برای پروژه‌های ژئوتکنیک کاربرد داشته باشد. در ادامه، توضیحات مربوط به شرح ذیل می‌باشد:

ISO 14040/14044 (جهانی): این استاندارد، یک چارچوب کلی برای انجام ارزیابی چرخه عمر ارائه می‌دهد. این استاندارد شامل تعریف هدف و دامنه، تحلیل موجودی، ارزیابی اثرات و تفسیر است. در پروژه‌های ژئوتکنیک، این استاندارد به‌عنوان یک چارچوب عمومی قابل استفاده است اما نیاز به تفسیر و بومی‌سازی برای کاربردهای خاص ژئوتکنیک دارد (فین ودن ۲۰۰۹).

EN 15804 (اروپا): این استاندارد بر قوانین اصلی دسته‌بندی محصول (PCR) برای اظهارنامه‌های زیست‌محیطی نوع III (EPD) برای محصولات و خدمات ساختمانی تمرکز دارد. این استاندارد به‌طور خاص در زمینه ارزیابی محصولات و مصالح ساختمانی مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیک مانند ژئوسنتیک‌ها کاربرد دارد و برای تعیین انتشار کربن مرتبط با مصالح در این پروژه‌ها مفید است (ویرینجا ۲۰۱۹).

LEED V4.1 (آمریکا USGBC): این سیستم رتبه‌بندی ساختمان سبز برای طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری ساختمان‌های سبز توسعه یافته است. اگرچه به‌طور مستقیم برای ارزیابی پروژه‌های ژئوتکنیک توسعه نیافته است، اما اهداف پایداری آن مانند کاهش ردپای کربن، استفاده از مصالح بازیافتی و مدیریت آب، می‌تواند از طریق انتخاب مصالح و روش‌های پایدار در کارهای ژئوتکنیکی حمایت شود (شورای ساختمان سبز آمریکا ۲۰۲۱).

ASTM E 1991 (آمریکا ASTM International): این استاندارد یک راهنمای استاندارد برای ارزیابی چرخه عمر زیست‌محیطی مصالح/محصولات ساختمانی ارائه می‌دهد. این استاندارد یک چارچوب و مجموعه اصول مشترک برای ارزیابی چرخه عمر مصالح و محصولات ساختمانی فراهم می‌کند که می‌تواند شامل مصالح مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیک نیز باشد و به تعیین دامنه و رویکرد ارزیابی کمک می‌کند (ASTM 2019).

BREEAM (بریتانیا BRE): این روش ارزیابی پایداری پیشرو برای برنامه‌ریزی جامع، زیرساخت و ساختمان‌ها است. این شامل ارزیابی آلودگی زمین (POL09) و خطرات طبیعی (RSL03) است که مستقیماً با بررسی‌های ژئوتکنیکی و ارزیابی خاک مرتبط است و می‌تواند به پروژه‌های ژئوتکنیک در کسب امتیاز پایداری کمک کند (BRE 2021).

ILCD Handbook (اتحادیه اروپا): این راهنما، راهنمای جامعی برای انجام مطالعات ارزیابی چرخه عمر و توسعه داده‌های ارزیابی چرخه عمر با کیفیت بالا، با تمرکز بر شفافیت و سازگاری ارائه می‌دهد. این راهنما یک چارچوب دقیق برای جمع‌آوری و مدل‌سازی داده‌های چرخه عمر ارائه می‌دهد که برای انجام ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیک بسیار مفید است و به اطمینان از صحت و قابلیت مقایسه نتایج کمک می‌کند (اتحادیه اروپا ۲۰۱۰).

جدول ۴ - مقایسه انواع استانداردهای مختلف در حوزه ارزیابی چرخه عمر

استاندارد/ دستورالعمل	کشور/ سازمان	تمرکز اصلی	سازگاری با پروژه‌های ژئوتکنیک	مرجع
ISO 14040/14044	ISO جهانی	اصول و چارچوب ارزیابی چرخه عمر، شامل تعریف هدف و دامنه، تحلیل موجودی، ارزیابی اثرات و تفسیر.	به‌عنوان یک چارچوب کلی برای انجام ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیک قابل استفاده است. این استانداردها راهنمایی‌های کلی ارائه می‌دهند و نیاز به تفسیر و	فین ودن (۲۰۰۹)

2- American Society for Testing and Materials

3- BRE Environmental Assessment Method

4- International Reference Life Cycle Data System

بومی سازی برای کاربردهای خاص ژئوتکنیک دارند.				
EN 15804	اروپا	قوانین اصلی دسته بندی محصول (PCR) برای اظهارنامه های زیست محیطی نوع (EPD) III برای هر محصول و خدمات ساختمانی.	در زمینه ارزیابی محصولات و مصالح ساختمانی مورد استفاده در پروژه های ژئوتکنیک، مانند ژئوسنتتیک ها، کاربرد دارد. به طور خاص برای تعیین انتشار کربن مرتبط با مصالح در این پروژه ها مفید است.	ویرینجا (۲۰۱۹)
LEED v4.1	آمریکا (USGBC)	سیستم رتبه بندی ساختمان سبز برای طراحی، ساخت، بهره برداری و نگهداری ساختمان های سبز.	به طور مستقیم برای ارزیابی پروژه های ژئوتکنیک توسعه نیافته است، اما اهداف پایداری آن (مانند کاهش رد پای کربن، استفاده از مصالح بازیافتی، مدیریت آب) می تواند از طریق انتخاب مصالح و روش های پایدار در کارهای ژئوتکنیکی حمایت شود.	شورای ساختمان سبز آمریکا (۲۰۲۱)
LCA	جهانی	ارزیابی جامع اثرات زیست محیطی یک محصول یا فرآیند از مرحله استخراج مواد اولیه (گهواره) تا پایان عمر (گور)، شامل مصرف انرژی، انتشار آلاینده ها و تولید پسماند.	یک ابزار اساسی برای ارزیابی اثرات زیست محیطی کارهای ژئوتکنیکی در طول چرخه عمر کامل پروژه (از بررسی سایت تا پایان عمر سازه) است. این شامل تحلیل ورودی ها و خروجی های انرژی و مواد در هر مرحله است.	ریبترز (۲۰۰۴)
ASTM E1991	آمریکا ASTM	راهنمای استاندارد برای ارزیابی چرخه عمر زیست محیطی مصالح / محصولات ساختمانی.	این استاندارد یک چارچوب و مجموعه اصول مشترک برای ارزیابی چرخه عمر مصالح و محصولات ساختمانی ارائه می دهد که می تواند شامل مصالح مورد استفاده در پروژه های ژئوتکنیک نیز باشد. این استاندارد به تعیین دامنه و رویکرد ارزیابی کمک می کند.	ASTM
BREEAM	بریتانیا (BRE)	روش ارزیابی پایداری پیشرو برای برنامه ریزی جامع، زیرساخت و ساختمان ها، شامل ارزیابی آلودگی، انرژی، آب، مصالح و زمین.	شامل ارزیابی آلودگی زمین (POL09) و خطرات طبیعی (RSL03) است که مستقیماً با بررسی های ژئوتکنیکی و ارزیابی خاک مرتبط است و می تواند به پروژه های ژئوتکنیک در کسب امتیاز پایداری کمک کند.	BRE. (2021)
ILCD	اتحادیه اروپا European Commission	ارائه راهنمای جامع برای انجام مطالعات ارزیابی چرخه عمر و توسعه داده های ارزیابی چرخه عمر با کیفیت بالا، با تمرکز بر شفافیت و سازگاری.	این راهنما یک چارچوب دقیق برای جمع آوری و مدل سازی داده های چرخه عمر ارائه می دهد که برای انجام ارزیابی چرخه عمر در پروژه های ژئوتکنیک بسیار مفید است و به اطمینان از صحت و قابلیت مقایسه نتایج کمک می کند.	اتحادیه اروپا (۲۰۱۰)

به تفسیر و بومی سازی دارد. استاندارد EN 15804 نیز که بیش تر بر مصالح ساختمانی تمرکز دارد، برای ارزیابی انتشار کربن در مصالحی مانند ژئوسنتتیک ها مناسب است. در مقابل، استاندارد LEED v4.1 با تأکید بر کاهش رد پای کربن و استفاده از مصالح بازیافتی، اگرچه مستقیماً برای پروژه های ژئوتکنیکی طراحی نشده، اما می تواند به عنوان راهنمای کلی مورد استفاده قرار گیرد.

ارزیابی چرخه عمر به عنوان ابزاری اساسی برای سنجش پایداری در پروژه های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می گیرد. استانداردهای مختلفی در این زمینه وجود دارند که هر کدام با رویکردی خاص به ارزیابی اثرات زیست محیطی می پردازند. از جمله این استانداردها می توان به ISO 14040/14044 اشاره کرد که چارچوب کلی برای انجام ارزیابی چرخه عمر ارائه می دهد و برای پروژه های ژئوتکنیکی قابل استفاده است. البته این استاندارد نیاز

عدم وجود یک چارچوب یکپارچه و منسجم برای ارزیابی چرخه حیات عملیات ژئوتکنیکی در ساخت‌وساز است. این عدم انسجام شامل تعریف واحد عملکردی، انتخاب مرزهای سیستم، داده‌های موجودی مناسب و انتخاب دسته‌بندی‌های تأثیر محیط‌زیستی می‌شود. بررسی ادبیات موضوع در این تحقیق نشان داد ارزیابی‌های فعلی عمدتاً بر روی مصرف انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی متمرکز هستند. در حالی که تأثیرات مرتبط با منابع خاک و زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این موضوع نیاز به توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی مرتبط با کیفیت خاک، عملکردهای خاک و خدمات اکوسیستمی آن را برجسته می‌کند. همچنین، نیاز به تطبیق روش‌های ارزیابی از مقیاس کلان به مقیاس پروژه‌های ژئوتکنیکی برای بهبود دقت تحلیل‌ها مطرح شده است. علاوه بر این، در برخی از فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی، چالش‌های خاصی وجود دارد:

– **خاک مسلح با الیاف بازیافتی:** فرآیند بازیافت ممکن است پیچیده و هزینه‌بر باشد و کنترل کیفیت الیاف بازیافتی می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.

– **شمع‌های کم‌کربن:** این شمع‌ها ممکن است نیاز به فناوری‌های خاص یا مواد افزودنی جدید داشته باشند. همچنین، محدودیت‌هایی در ظرفیت باربری برای برخی انواع و چالش‌های اجرایی در شرایط خاص خاک وجود دارد.

– **روش‌های بهسازی بیولوژیک (مانند MICP):** این فرآیند زمان‌بر است و به شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت) وابسته است. همچنین هزینه‌های اولیه بالاتری ممکن است داشته باشد. **خاکریزهای سبک (مانند استفاده از لاستیک فرسوده):** نیاز به فرآوری خاص لاستیک‌ها، احتمال آزاد شدن مواد شیمیایی در صورت عدم کنترل صحیح، و مسائل مربوط به آتش‌سوزی (در صورت عدم رعایت استانداردهای ایمنی) از چالش‌ها هستند. همچنین محدودیت‌هایی در کاربرد در خاک‌های با رطوبت بالا وجود دارد.

– **بتن‌های بازیافتی در فونداسیون:** این بتن‌ها ممکن است مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با بتن معمولی در برخی موارد داشته باشند. همچنین نگرانی‌هایی در مورد دوام و عملکرد در بلندمدت، و نیاز به فرآیند جداسازی و خردایش مصالح وجود دارد.

– **ژئوسنتتیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر:** این مصالح عمر مفید محدودتری نسبت به ژئوسنتتیک‌های پلیمری دارند و مقاومت مکانیکی آن‌ها در برخی موارد کمتر است. هزینه تولید آن‌ها نیز ممکن است بالاتر باشد.

استاندارد BREEAM نیز با تمرکز بر ارزیابی آلودگی زمین و خطرات طبیعی، ارتباط مستقیمی با بررسی‌های ژئوتکنیکی دارد. با وجود تنوع استانداردهای موجود، چالش‌های متعددی در زمینه ارزیابی چرخه عمر پروژه‌های ژئوتکنیکی وجود دارد. یکی از اصلی‌ترین مشکلات، نبود یک چارچوب یکپارچه و اختصاصی برای این نوع پروژه‌هاست که باعث شده ارزیابی‌ها از انسجام لازم برخوردار نباشند. علاوه بر این، بیشتر ارزیابی‌های کنونی بر مصرف انرژی و گرمایش جهانی متمرکز هستند و تأثیرات مرتبط با خاک و زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. کمبود داده‌های دقیق و قابل اعتماد نیز از دیگر چالش‌هاست که دقت ارزیابی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی مانند خاک‌های مسلح با الیاف بازیافتی یا روش‌های بهسازی بیولوژیک، با محدودیت‌هایی مانند هزینه‌های بالا و چالش‌های اجرایی مواجه هستند که کاربرد گسترده آن‌ها را دشوار می‌سازد. برای رفع این چالش‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. توسعه استانداردهای اختصاصی برای فعالیت‌های ژئوتکنیکی، از جمله تعریف واحدهای عملکردی یکپارچه و مشخص کردن مرزهای سیستم، می‌تواند به بهبود ارزیابی‌ها کمک کند. هماهنگی این استانداردها با چارچوب‌های بین‌المللی مانند ISO 14040/14044 نیز ضروری است تا قابلیت مقایسه و پذیرش جهانی آن‌ها تضمین شود. از سوی دیگر، ایجاد پایگاه‌های داده جامع و توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی جدید برای ارزیابی تأثیرات بر خاک و خدمات اکوسیستمی، می‌تواند دقت تحلیل‌ها را افزایش دهد. سرمایه‌گذاری در تحقیقات کاربردی و انجام مطالعات موردی نیز برای غلبه بر محدودیت‌های فناوری‌های نوین و کاهش هزینه‌های آن‌ها ضروری است. علاوه بر این، آموزش متخصصان و ترویج همکاری بین صنعت، دانشگاه و دولت می‌تواند به تسریع توسعه و اجرای چارچوب‌های یکپارچه کمک کند. با اجرای این راهکارها می‌توان به ایجاد یک سیستم ارزیابی چرخه عمر منسجم و کارآمد برای پروژه‌های ژئوتکنیکی دست یافت. چنین سیستمی نه تنها دقت و قابلیت اطمینان ارزیابی‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه زمینه را برای تصمیم‌گیری‌های پایدار در صنعت ساخت‌وساز فراهم می‌کند. حرکت به سمت استانداردهای اختصاصی و یکپارچه، همراه با توسعه فناوری‌های پایدار و آموزش ذینفعان، می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های ژئوتکنیکی و دستیابی به اهداف پایداری ایفا کند. با وجود مزایای فراوان ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیکی، چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز در به‌کارگیری آن وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها،

به طور کلی، چالش های اصلی در کاربرد ارزیابی چرخه عمر در ژئوتکنیک شامل کمبود داده های دقیق و قابل اعتماد، پیچیدگی مدل سازی فرآیندهای ژئوتکنیکی و نیاز به توسعه شاخص های زیست محیطی خاص برای این حوزه است. حل این چالش ها می تواند به بهبود دقت ارزیابی ها و ترویج تصمیم گیری های پایدارتر در صنعت ساخت و ساز کمک شایانی کند. برای کاهش تأثیرات زیست محیطی فعالیت های ژئوتکنیکی در صنعت ساخت و ساز، راهکارهای متعددی وجود دارد که با بهره گیری از ارزیابی چرخه عمر می توانند به بهبود پایداری پروژه ها کمک کنند. این راهکارها شامل انتخاب مصالح پایدار، بهینه سازی روش های اجرایی و مدیریت پسماندها در تمامی مراحل چرخه عمر پروژه هستند.

۱- انتخاب مصالح پایدار و نوآورانه

استفاده از مصالح با ردپای کربن کمتر و یا مصالح بازیافتی، یکی از مؤثرترین راه ها برای کاهش اثرات زیست محیطی در پروژه های ژئوتکنیکی است:

سیمان های با کربن کم^۶ و مواد مکمل سیمانی (SCMs): تحقیقات اخیر همچنان بر پتانسیل بالای SCMs مانند GGBS و خاکستر بادی در کاهش انتشار کربن تأکید دارند. مطالعات نشان می دهند که جایگزینی بخشی از کلینکر سیمان با این مواد می تواند منجر به کاهش انتشار CO₂ در محدوده ۳۰٪ تا ۷۰٪ یا حتی بیشتر شود. بسته به نسبت جایگزینی و نوع SCM (مسلم و ونگ ۲۰۲۱) این ارقام نشان دهنده تعهد صنعت به سمت سیمان های پایدارتر است. استفاده از افزودنی های جدیدتر و فعال کننده های قلیایی که سیمان را به طور کامل جایگزین می کنند، می تواند کاهش انتشار CO₂ را تا ۸۰٪ نسبت به بتن های سنتی سیمان پورتلند به همراه داشته باشد. این مواد پتانسیل زیادی در کاربردهای ژئوتکنیکی مانند شمع ها و ستون های بهسازی خاک دارند (پرویس ۲۰۱۸).

مصالح بازیافتی در تثبیت خاک و زیرسازی ها: استفاده از بتن بازیافتی (RCA) و سایر مصالح بازیافتی ساخت و ساز (مانند آجر خرد شده یا شیشه خرد شده) به عنوان پرکننده یا در لایه های زیرسازی جاده ها و فونداسیون ها، تأثیرات زیست محیطی قابل توجهی دارد. مطالعات نشان داده اند که جایگزینی مصالح طبیعی با RCA می تواند منجر به کاهش مصرف انرژی اولیه در حدود ۱۵٪ تا ۴۰٪ و کاهش انتشار CO₂ در حدود ۱۰٪ تا ۲۵٪ شود. این کاهش ها ناشی از صرفه جویی در استخراج، فرآوری و حمل و نقل مصالح بکر است (ژینگ و تام ۲۰۲۲).

۲- بهینه سازی روش های اجرایی

بهبود کارایی فرآیندهای اجرایی و استفاده از فناوری های نوین، نقش مهمی در کاهش ردپای زیست محیطی فعالیت های ژئوتکنیکی ایفا می کند:

بهره وری انرژی ماشین آلات و تجهیزات: استفاده از ماشین آلات نسل جدید با بهره وری سوخت بالاتر، به کارگیری سوخت های زیستی یا هیبریدی/برقی و بهینه سازی برنامه ریزی عملیات در محل پروژه می تواند منجر به کاهش مصرف سوخت ۱۵٪ تا ۳۰٪ و به تبع آن کاهش انتشار CO₂ شود. این امر مستقیماً به کاهش انتشار مستقیم گازهای گلخانه ای از سایت پروژه کمک می کند (کارلسون ۲۰۲۲).

روش های نوین بهسازی زمین: توسعه روش های بهسازی زمین با مصرف انرژی کمتر، مانند روش های بیولوژیکی که از فعالیت میکروارگانیسم ها استفاده می کنند، می تواند تأثیرات زیست محیطی ناشی از روش های سنتی (مانند تزریق سیمان یا استفاده از انرژی زیاد) را کاهش دهد. اگرچه درصد دقیق کاهش انرژی و CO₂ به ماهیت پروژه بستگی دارد، اما این روش ها به طور کلی پتانسیل کاهش مصرف انرژی و مواد را تا ۵۰٪ در مقایسه با روش های شیمیایی یا مکانیکی سنتی دارند (مارتینز و دیجونک ۲۰۲۲).

۳- مدیریت پسماند

مدیریت کارآمد پسماندهای ساخت و ساز، علاوه بر کاهش حجم پسماند دفن شده، می تواند منجر به صرفه جویی در منابع و انرژی شود.

بازیافت و استفاده مجدد از نخاله های ساختمانی: با توسعه فناوری های بازیافت و سیاست های حمایتی، نرخ بازیافت نخاله های ساختمانی در بسیاری از مناطق به طور فزاینده ای بالا رفته است. برخی مطالعات نشان می دهند که با اجرای سیاست های صحیح، بیش از ۸۰٪ تا ۹۰٪ از این نخاله ها را می تواند بازیافت یا استفاده مجدد شود (منگ و همکاران ۲۰۱۸). این امر منجر به کاهش قابل توجه در نیاز به دفن پسماند و کاهش انتشار CO₂ ناشی از تولید مصالح بکر می شود.

اقتصاد چرخشی در ژئوتکنیک: پیاده سازی اصول اقتصاد چرخشی که بر کاهش تولید پسماند، استفاده مجدد و بازیافت حداکثری مواد تأکید دارد، می تواند تأثیرات زیست محیطی را در طول چرخه عمر پروژه کاهش دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های اقتصادی جهان، سهم قابل‌توجهی در مصرف منابع، انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای دارد. فعالیت‌های ژئوتکنیکی مانند خاک‌برداری، بهسازی زمین و احداث پی‌ها به‌دلیل مصرف بالای انرژی و مواد، نقش کلیدی در تأثیرات زیست‌محیطی این صنعت ایفا می‌کنند. این مطالعه مروری نشان می‌دهد که ارزیابی چرخه عمر به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل این تأثیرات در تمام مراحل عمر پروژه‌های ساختمانی شناخته شده است. با این حال، علیرغم مزایای متعدد، چالش‌های اساسی در به‌کارگیری ارزیابی چرخه عمر در پروژه‌های ژئوتکنیکی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به نبود چارچوب یکپارچه و اختصاصی، کمبود داده‌های دقیق و قابل اعتماد، و تمرکز بیش از حد بر شاخص‌های سنتی مانند مصرف انرژی و گرمایش جهانی اشاره کرد. این در حالی است که تأثیرات مرتبط با خاک و خدمات اکوسیستمی آن کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

فناوری‌های نوین ژئوتکنیکی مانند خاک‌های مسلح با الیاف بازیافتی، شمع‌های کم‌کربن، روش‌های بهسازی بیولوژیک و استفاده از مصالح بازیافتی، پتانسیل بالایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی دارند. برای مثال، این فناوری‌ها می‌توانند تا ۴۰ درصد از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بکاهند. با این وجود، موانعی مانند هزینه‌های اولیه بالا، محدودیت‌های فنی، وابستگی به شرایط محیطی و چالش‌های اجرایی، گسترش آن‌ها را با دشواری مواجه کرده است. همچنین، استانداردهای بین‌المللی

موجود مانند ISO 14040/14044، EN 15804 و LEED v4.1 اگرچه چارچوب‌های مفیدی ارائه می‌دهند، اما نیاز به بومی‌سازی و توسعه شاخص‌های اختصاصی برای فعالیت‌های ژئوتکنیکی دارند. برای رفع این چالش‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. توسعه استانداردهای اختصاصی برای ارزیابی چرخه عمر فعالیت‌های ژئوتکنیکی، ایجاد پایگاه‌های داده جامع و دقیق، و توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی جدید برای ارزیابی تأثیرات بر خاک و خدمات اکوسیستمی از جمله این راهکارها هستند. علاوه بر این، سرمایه‌گذاری در تحقیقات کاربردی، انجام مطالعات موردی و پروژه‌های پایلوت، و استفاده از ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان ارزیابی‌ها کمک کند. از سوی دیگر، آموزش متخصصان، ترویج همکاری بین صنعت، دانشگاه و دولت، و وضع سیاست‌های تشویقی برای پروژه‌های پایدار نیز نقش کلیدی در تسریع این روند ایفا می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که حرکت به سمت استانداردهای یکپارچه و اختصاصی، همراه با توسعه فناوری‌های پایدار و آموزش ذینفعان، می‌تواند صنعت ساخت‌وساز را به سمت پایداری بیشتر سوق دهد. با اجرای این راهکارها، نه تنها دقت و قابلیت اطمینان ارزیابی‌های چرخه عمر بهبود می‌یابد، بلکه زمینه برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و پایدار در پروژه‌های ژئوتکنیکی فراهم می‌شود. این امر به کاهش اثرات زیست‌محیطی، حفظ منابع طبیعی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک شایانی خواهد کرد.

References

1. World Bank. (n.d.). Industry (including construction), value added (% of GDP). World Bank Data. Retrieved June 4, 2025, from <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS>
2. Hertwich, E. G., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N., & Fishman, T. (2021). Resource efficiency and climate change mitigation: Material efficiency strategies for buildings and cars. *Environmental Science & Policy*, 124, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.014>
3. Global Growth Insights. (2023). Construction materials market – Global industry analysis and forecast (2023–2030). Retrieved June 4, 2025, from <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/construction-materials-market-107429>
4. Häkkinen, T., & Vares, S. (2020). Life Cycle Assessment of Geotechnical Works in Building Construction: A Review. *Sustainability*, 12(20), 8442. <https://doi.org/10.3390/su12208442>
5. Song, X., Carlsson, C., Kiilgaard, R., Bendz, D., & Kennedy, H. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: A review and recommendations. *Sustainability*, 12(20), 8442.
6. de Melo, D. L., Kendall, A., & DeJong, J. T. (2024). Evaluation of life cycle assessment (LCA) use in geotechnical engineering. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(1), 012001.
7. Pettinaroli, A., Susani, S., Castellanza, R., Collina, E., Pierani, M., Paoli, R., & Romagnoli, F. (2023). A Sustainability-Based Approach for Geotechnical Infrastructure. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 738-752.
8. Song, J., Kim, J., & Lee, S. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: A review and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121345>
9. Raymond, M., Korre, A., & Durucan, S. (2020). Sustainability assessment of geotechnical systems: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 76–93. <https://doi.org/10.1111/jiec.12946>
10. Kilsgaard, A., Birgisdóttir, H., & Hauschild, M. Z. (2020). Life cycle assessment of geotechnical works in building construction: Harmonization challenges and future directions. *Sustainability*, 12(20), 8442. <https://doi.org/10.3390/su12208442>
11. Samuelsson, J. (2023). Development of life cycle based methodology for geotechnical design. Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology. Retrieved from <https://trid.trb.org/View/2344758>
12. AzariJafari, H., Yahia, A., & Amor, B. (2016). Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.004>
13. Du, G., Safi, M., & Pettersson, L. (2014). Life cycle assessment of a reinforced concrete bridge: Implementation in SimaPro. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 821–830. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0684-x>
14. Huang, B., Wang, L., & Li, G. (2018). Sustainable ground improvement using industrial by-products: An LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 189, 262–273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.099>
15. AzariJafari, H., Carrusca, K., DeRousseau, M., Ellingboe, E., Farny, J., Gasi, G., ... & Walloch, C. Members of Carbonation Working Group.
16. Mirzababaei, M., & Arshad, A. (2018). Mechanical properties of fiber-reinforced recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 178, 118-128.
17. Habert, G., & Roussel, N. (2009). Early age hydration of low-carbon cements. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1147-1158.
18. DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.
19. Senadheera, S. P. A., & Seneviratne, A. M. (2017). Geotechnical properties of tyre derived aggregate (TDA) mixed with sand. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2), 170-184.
20. Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2011). A review on the sustainability of construction waste recycling. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 1775-1780.
21. Zicari, S., & Bignozzi, M. C. (2019). Biodegradable geogrids for soil reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), 84-93.
22. Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J. B., Heijungs, R., Hellweg, S., ... & Suh, S. (2009). Recent developments in LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 21-36.
23. Wieringa, D., & Schipper, H. R. (2019). The new European Standard EN 15804+ A2 for Environmental Product Declarations of Construction Products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(7), 1335-1344.
24. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Inaba, T., Berg, K. I., ... & Rydh, C. J. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory

- analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720.
25. American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM E1991 - 18 Standard Guide for Environmental Life Cycle Assessment in the Building Construction Industry .
26. BRE. (2021). BREEAM International New Construction 2016 - Technical Manual .
27. European Commission, Joint Research Centre. (2010). ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Publications Office of the European Union.
28. Taylor, M. (2024, February 23). Why a circular built environment makes economic, environmental sense. Reuters. Retrieved June 4, 2025, from <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/comment-why-circular-built-environment-makes-economic-environmental-sense-2024-02-23/>
29. U.S. Green Building Council. (2021). LEED v4.1 Building Design and Construction Reference Guide .
30. Muslim, F., Wong, H. S., Choo, T. H., & Buenfeld, N. R. (2021). Influence of supplementary cementitious materials on microstructure and transport properties of spacer-concrete interface. *Cement and Concrete Research*, 149, 106561.
31. Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and concrete research*, 114, 40-48.
32. Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2022). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. *Construction and Building Materials*, 317, 125950.
33. Karlsson, I., Rootzén, J., & Johnsson, F. (2020). Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains—Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109651.
34. Martinez, A., Dejong, J., Akin, I., Aleali, A., Arson, C., Atkinson, J., ... & Zheng, J. (2022). Bio-inspired geotechnical engineering: principles, current work, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 72(8), 687-705.
35. Meng, Y., Ling, T. C., & Mo, K. H. (2018). Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 298-312.



Life cycle assessment of geotechnical works in building construction considering environmental considerations

Mohammad Bahrami Kia
Mohammad Amir Sherafati*

Master of Science in Civil Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Shiraz

Received: 04 April 2025

Accepted: 31 May 2025

Keywords: Life cycle assessment, geotechnical works, sustainable construction, environmental impacts

Extended Abstract

Introduction: The construction industry, as one of the largest economic sectors in the world, has a significant contribution to resource consumption, energy, and greenhouse gas emissions. Geotechnical activities such as excavation, land improvement, and foundation construction play a key role in the environmental impacts of this industry due to their high energy and material consumption. Life Cycle Assessment (LCA) is recognized as an efficient tool for analyzing these impacts at all stages of the life cycle of construction projects. This review article aims to investigate the application of LCA in geotechnical activities, identify sustainable technologies (such as recycled materials and low-carbon methods), and analyze the challenges in this field.

Materials and Methods: This study, using a systematic review method, reviewed valid articles (2010-2025) from scientific databases with relevant keywords. After screening based on quality and relevance criteria, data related to assessment methods, environmental indicators and new technologies were extracted. Qualitative analysis included comparative comparison of findings, identification of challenges and presentation of solutions and the results were presented in the form of comparative tables.

Results and Discussion: The results of this review study show that geotechnical activities (excavation, land improvement and foundation) have a significant contribution to energy consumption (150 to 1800 MJ/t) and carbon emissions (10 to 250 kg/t). The review of new technologies such as recycled fiber reinforced soils, low-carbon piles and biological remediation methods shows significant environmental benefits, but they face challenges such as high initial costs and technical limitations. Analysis of international standards indicates the lack of a unified framework for life cycle assessment of geotechnical activities. The findings highlight the need to develop specific indicators for soil quality and ecosystem services, as well as to create more accurate databases. The study suggests practical solutions such as optimizing construction methods, waste management, and the use of sustainable materials to reduce environmental impacts.

Conclusion: This review shows that geotechnical activities play a decisive role in the environmental sustainability of construction projects. The findings indicate that innovative approaches such as the use of recycled materials and low-carbon methods can reduce energy consumption and greenhouse gas emissions by up to 40%. However, there are significant barriers, including the lack of integrated assessment frameworks, a lack of reliable data, and high implementation costs. As a solution, it is proposed developing specific standards for life cycle assessment of geotechnical activities. These measures can guide the construction industry towards achieving sustainable development goals.

Corresponding author: Mohammad Amir Sherafati

Address: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Shiraz. **Tel:** +989173870014

Email: MA.Sherafati@iau.ac.ir

Citation: Sherafati M A, Bahrami Kia M. Life cycle assessment of geotechnical works in building construction considering environmental considerations. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 39-51.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.