

الزامات کاهش کربن در قراردادهای ساخت زیرساخت‌های خطی حمل‌ونقل

مرور تحلیلی و ارائه چارچوب آمادگی قراردادی

مقاله علمی-پژوهشی

علی فرخی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
*پویان ایار (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمیدرضا عباسیان جهرمی، استادیار، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ayar@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

صفحه ۱۸۲-۱۶۵

چکیده

کاهش انتشار کربن در زیرساخت‌های خطی حمل‌ونقل تنها با تعیین اهداف زیست‌محیطی یا درج معیارهای کربنی به اسناد مناقصه محقق نمی‌شود؛ بلکه مستلزم آن است که این اهداف به تعهدات قراردادی مشخص، قابل سنجش و قابل ارزیابی تبدیل شوند. پژوهش حاضر با رویکرد مرور تحلیلی، شواهد فنی، تدارکاتی، قراردادی و حرفه‌ای مرتبط با پروژه‌های راه، بزرگراه، روسازی، پل، تونل، راه‌آهن و مترو را تلفیق کرده و مسیر تبدیل سیاست کربنی به نتیجه اجرایی را بررسی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد قابلیت سنجش و مدیریت قراردادی الزامات کاهش کربن به تعریف روشن مرز سامانه، خط مبنا، واحد کارکردی، روش محاسبه، داده‌ها، مسئولیت‌ها، کنترل تغییر و راستی‌آزمایی وابسته است. بر پایه تحلیل منابع، الزامات کاهش کربن در هفت طبقه شامل ارائه اطلاعات، مدیریت و فرایند، الزامات فنی تجویزی، الزامات مبتنی بر عملکرد، اندازه‌گیری، گزارش‌دهی و راستی‌آزمایی، کنترل تغییر، تخصیص ریسک و انتقال تعهدات، و پیامدهای تجاری و ضمانت‌اجرا طبقه‌بندی شدند. همچنین، چارچوبی برای سنجش آمادگی قراردادی این الزامات ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد اظهارنامه‌های زیست‌محیطی محصول، برنامه‌های کربن و معیارهای مناقصه به‌تنهایی کاهش واقعی را تضمین نمی‌کنند و باید در زنجیره‌ای یکپارچه از تدارکات تا اجرا، تطبیق نهایی و تصمیم تجاری قرار گیرند. کمبود شواهد تجربی مبتنی بر پیگیری چرخه کامل قرارداد، به‌ویژه در پروژه‌های راه‌آهن و مترو، از محدودیت‌های برجسته دانش موجود است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چرخه عمر (LCA)، تدارکات پایدار، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، کاهش کربن، مدیریت قرارداد

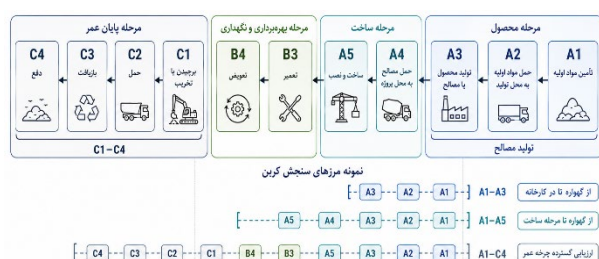
۱- مقدمه

عمر زمانی نشان‌دهنده بهبود واقعی است که گزینه‌های مقایسه‌شده از نظر عملکرد و دوام هم‌ارز باشند. تدارکات عمومی^۱ می‌تواند از طریق معیارهای ارزیابی^۲، مشخصات فنی، الزامات قراردادی و سازوکارهای تشویقی بر تصمیم‌های کربنی طراحی و ساخت اثر بگذارد (Kadefors et al., 2020). معیارهای کربنی مناقصه نیز می‌توانند جایگاه پیشنهاد دهندگان

ارزیابی چرخه عمر زیرساخت راه، آثار زیست‌محیطی مراحل مختلف عمر زیرساخت، از تولید مصالح و ساخت تا بهره‌برداری و پایان عمر را ارزیابی می‌کند. نتایج این ارزیابی به مرز سامانه^۱، مقدار مصالح، فاصله حمل، راهبرد نگهداری، عمر خدمت و دوره تحلیل وابسته است (Kopp et al., 2026). ازاین‌رو، پایین‌تر بودن پتانسیل گرمایش جهانی^۲ در مراحل ابتدایی چرخه

نمی‌شود. اعتبار هر کاهش پیشنهادی به مرز چرخه عمر، واحد کارکردی، حالت مرجع، عملکرد مهندسی، منبع داده و روش اندازه‌گیری آن بستگی دارد.

دامنه سنجش کربن می‌تواند مراحل متفاوتی از چرخه عمر را در بر گیرد. در مطالعات زیرساختی بررسی شده، این مراحل از تولید مواد اولیه و حمل تا ساخت، نگهداری و پایان عمر امتداد دارند و با مراحل چرخه عمر مشخص می‌شوند (Huang et al., 2020; Kleizienė et al., 2025). شکل ۲ این مراحل و ارتباط آن‌ها با تعریف دامنه الزام کربنی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مراحل چرخه عمر به‌عنوان مبنای تعیین دامنه

الزامات کاهش کربنی

۲-۱- کانون‌های انتشار، مرز سامانه و خط مبنا

انتشار کربن در پروژه‌های ساخت به سوخت مصرفی کارگاه محدود نیست. در ارزیابی توسعه راه السالوادور، تولید بالادستی مصالح، حمل‌ونقل و عملیات ساخت در مرز «از گهواره تا محل اجرا» منظور شد؛ درحالی‌که مطالعه تونل‌های نروژ، مراحل تولید A1-A3 و مرحله ساخت A5 را به‌ازای هر متر نگهداری سنگ اجرا شده بررسی کرد (Cruz Peraza and Liu, 2026; Huang et al., 2020).

در مطالعات بررسی شده، تولید مصالح سهم اصلی انتشار را داشته است. در یک ایستگاه مترو، مصالح ۷۷ درصد، حمل‌ونقل ۱۵ درصد و ماشین‌آلات ۸ درصد از انتشار مرحله ساخت را تشکیل دادند (Kong et al., 2026). همچنین، تولید سیمان ۷۳ تا ۹۲ درصد پتانسیل گرمایش جهانی مخلوط‌های بتن روسازی را به خود اختصاص داد (Rangelov et al., 2022). بنابراین، الزاماتی که فقط تجهیزات کارگاهی را هدف قرار دهند، بخش عمده کربن نهفته را نادیده می‌گیرند.

نقاط مداخله باید بر پایه طراحی پروژه، شدت مصرف مصالح، شرایط حمل و گزینه‌های در دسترس تعیین شوند.

ادبیات مرتبط با کاهش کربن در زیرساخت‌های حمل‌ونقل را می‌توان در سه جریان مکمل بررسی کرد.

جریان نخست، سنجش فنی و ارزیابی چرخه عمر است که آثار زیست‌محیطی گزینه‌های طراحی، مصالح، ساخت و نگهداری را در مرز و دوره زمانی مشخص کمی‌سازی می‌کند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد اعتبار مقایسه‌های کربنی به تعریف مرز سامانه، واحد کارکردی، داده‌های ورودی و فرضیات عمر خدمت و نگهداری وابسته است (Kopp et al., 2026). این جریان مبنای کمی تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند، اما چگونگی تبدیل نتایج سنجش به مسئولیت‌های قراردادی را مستقیماً تعیین نمی‌کند.

جریان دوم، تدارکات پایدار^۹ و سازوکارهای انتخاب را بررسی می‌کند. الزامات کاهش کربن می‌تواند از طریق معیارهای انتخاب و ارزیابی، مشخصات فنی و سازوکارهای تشویقی وارد فرایند تدارکات شوند، اما طراحی آن‌ها به شرایط رقابت، مدل تحویل، بلوغ بازار و توانمندی کارفرما وابسته است (Kadefors et al., 2020; Lingegård et al., 2021). مرور نظام‌مند اوگونماکینده و همکاران نیز نشان می‌دهد ریسک‌های مالی، عملکرد پروژه، زنجیره تأمین و ذی‌نفعان می‌توانند اجرای تدارکات پایدار را محدود کنند (Ogunmakinde et al., 2025).

جریان سوم، مدیریت و حاکمیت قراردادی است که بر تعیین مسئولیت‌ها، مستندسازی، کنترل تغییر، عدم انطباق و پیامدهای قراردادی تمرکز دارد. مطالعات انطباق زیست‌محیطی اهمیت تصریح مسئولیت‌ها و اداره مناسب تعهدات را نشان داده‌اند (El-adaway et al., 2019). همچنین، علاءالدین و عطایی ابهام در مفاد قرارداد، ضعف مستندسازی و نبود سازوکارهای مشخص مدیریت ریسک را از عوامل بروز اختلاف در ساخت پایدار معرفی می‌کنند (Aladdin and Ataei, 2025). بااین‌حال، ارتباط نظام‌مند میان این سه جریان، به‌ویژه پیگیری تعهد کاهش کربنی از ارزیابی مناقصه تا عملکرد نهایی راستی‌آزمایی شده، همچنان کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مبنای فنی و سازوکارهای کاهش کربن و ارزیابی

شواهد

کاهش کربن در زیرساخت‌های خطی حمل‌ونقل صرفاً با تعیین یک مصالح یا روش ترجیحی به الزام قراردادی معتبر تبدیل

درصد کاهش تنها زمانی معنا دارد که مرز سامانه و واحد مقایسه روشن باشد. مطالعات بررسی شده از مرزها و واحدهای متفاوتی استفاده کرده‌اند؛ از جمله آثار «از گهواره تا محل اجرا» به‌ازای هر مترمربع راه، نگهداری تونل به‌ازای هر متر و آثار بتن «از گهواره تا درِ کارخانه»^{۱۱} به‌ازای هر مترمکعب (Cruz Peraza and Liu, 2026; Rangelov et al., 2022). از این رو، نتایج سطح محصول نباید معادل عملکرد کل پروژه یا چرخه عمر تلقی شوند.

مقایسه کربنی معتبر مستلزم هم‌ارزی کارکردی گزینه‌هاست (Gbolade and Mishra, 2025). مزیت آسفالت بازیافتی نیز تنها زمانی قابل اتکاست که عملکرد و دوام آن نسبت به گزینه متعارف دچار افت عملکرد نشود (Buttitta et al., 2023). بنابراین، معیارهای کربنی نباید به‌بهای کاهش عملکرد فنی، دوام یا عمر بهره‌برداری اعمال شوند. در این پژوهش، خط مبنا به وضعیت مرجع کمی و مستندی گفته می‌شود که میزان کاهش یا عملکرد کربنی پروژه یا گزینه مورد بررسی نسبت به آن سنجیده می‌شود؛ این مرجع باید بر پایه مرز سامانه، واحد کارکردی، داده‌ها، تاریخ مرجع و فرضیات مشخص تعریف شود.

در پروژه راه ۴۴ سوئد، خط مبنا با استفاده از ابزار *Klimatkalkyl*^{۱۲} و داده‌های اختصاصی پروژه تعیین شد (Karlsson et al., 2020). بنابراین، خط مبنا باید حالت مرجع، روش محاسبه و ورودی‌های اصلی را به‌روشنی مشخص کند.

۲-۲- کیفیت داده‌ها و عملکرد چرخه عمر

اظهارنامه‌های زیست‌محیطی محصول^{۱۳}، شفافیت داده‌ها را افزایش می‌دهند، اما مقایسه مستقیم آن‌ها مستلزم هماهنگی قواعد رده محصول^{۱۴}، داده‌های پس‌زمینه و روش‌های ارزیابی است (Rangelov et al., 2021). در نتیجه، قرارداد باید منابع داده مجاز، نسخه ضرایب، قواعد به‌روزرسانی و شرایط استفاده از داده‌های جایگزین را مشخص کند. در مطالعه السالوادور، استفاده از داده‌های اروپایی بر قطعیت مقادیر مطلق اثر گذاشت، هرچند داده‌های اختصاصی پروژه همچنان کانون‌های اصلی انتشار را نشان دادند (Cruz Peraza and Liu, 2026). قابلیت ممیزی^{۱۵} نیز به محاسبات تکرارپذیر و حفظ سوابق ورودی

وابسته است. تحلیل حساسیت و مونت‌کارلو برای سنجش عدم قطعیت و تطبیق بالا به پایین و پایین به بالا برای کنترل مرز محاسبه و شمارش مضاعف به‌کار رفته‌اند (Huang et al., 2020; Kong et al., 2026). این کنترل‌ها اعتبار محاسبات را تقویت می‌کنند، اما جای راستی‌آزمایی مستقل را نمی‌گیرند. ارزیابی «از گهواره تا درِ کارخانه» برای مقایسه مصالح مفید است، اما عملکرد، دوام و پایان عمر را پوشش نمی‌دهد و در نتیجه، برتری کل چرخه عمر^{۱۶} را اثبات نمی‌کند (Rangelov et al., 2022). نتایج مشخصات مبتنی بر عملکرد^{۱۷} نیز به فرضیات عمر خدمت و برنامه نگهداری وابسته‌اند (Kopp et al., 2026). بنابراین، برای تبدیل سنجش کربن به الزام قراردادی باید مرز ارزیابی، واحد کارکردی، خط مبنا، روش داده و مسیر راستی‌آزمایی متناسب با تصمیم تدارکاتی تعیین شود، بدون آنکه عملکرد مهندسی یا دوام تضعیف گردد.

۲-۳- تبدیل اهداف کربنی به الزامات تدارکاتی و قراردادی

تدارکات عمومی ابزار مهمی برای پیشبرد اهداف کاهش کربن در پروژه‌های زیرساختی است و انتخاب مدل قرارداد می‌تواند بر تحقق این اهداف و نحوه مشارکت پیمانکار اثر بگذارد (Kadefors et al., 2020; Keijzer et al., 2015). این نقش از طریق شرایط احراز صلاحیت، مشخصات فنی یا عملکردی، معیارهای ارزیابی پیشنهادها و ترتیبات پایش پس از واگذاری اعمال می‌شود (Kadefors et al., 2020).

در چارچوب این مرور، قابلیت مدیریت قراردادی زمانی افزایش می‌یابد که روش محاسبه، مسئول انجام تعهد، مدارک قابل ممیزی، فرایند راستی‌آزمایی و پیامد عدم انطباق به‌روشنی تعیین شده باشد.

اهداف کربنی تنها زمانی اثرگذارند که به معیارها و تعهدات قابل سنجش در اسناد مناقصه و قرارداد تبدیل شوند. انتخاب مدل قرارداد، تعریف شاخص‌های اندازه‌گیری و گنجانیدن الزامات کاهش انتشار در ارزیابی پیمانکار، بر تحقق این اهداف اثر می‌گذارد (Sanchez et al., 2015). در پروژه تونل شهری مالمو، الزامات زیست‌محیطی از اسناد مناقصه به سامانه‌های

سازوکار مشخص تبادل اطلاعات و تصویب تغییرات وابسته است.

۲-۵- راستی آزمایی و ریسک اجرای الزامات کاهش کربن

سطح راستی آزمایی بهتر است متناسب با ریسک، عدم قطعیت و اثر مالی تعهد طراحی شود؛ کنترل مستقل برای تعهدات پرسیک و ممیزی سوابق پیمانکار برای موارد کم ریسک تر مناسب است. در مدل پیشنهادی آئیگاکوناگورن و همکاران، انحراف انتشار واقعی تجهیزات از حدود قراردادی، مشوق یا جریمه ای در پرداخت نهایی ایجاد می کند؛ با این حال، پایش چندمرحله ای و ارزیابی پرداخت های میانی همچنان به عنوان مسیر پژوهش آینده مطرح شده اند (Athigakunagorn et al., 2024). بنابراین، قرارداد باید روش و داده های مبنا، دسترسی به سوابق، اصلاح خطا و نحوه تطبیق بر آورد مناقصه با عملکرد واقعی را مشخص کند. اثربخشی این سازوکار نیز به پیوند روشن میان تعهد، ثبت داده، کنترل تغییر، راستی آزمایی و پیامد مالی وابسته است، بدون آنکه عملکرد فنی یا دوام تضعیف شود.

۲-۶- سطح، ماهیت و محدودیت شواهد موجود

منابع بررسی شده از نظر نوع شواهد، حوزه کاربرد و میزان اعتبار تجربی یکسان نیستند. بخشی از مطالعات، اجرای واقعی سازوکارهای کربنی را در پروژه های حمل و نقل بررسی کرده اند؛ گروهی دیگر بر مدل سازی رفتار مناقصه یا پیامدهای مالی تمرکز دارند. در کنار آن ها، مطالعات انطباق زیست محیطی و اسناد حرفه ای و قراردادی، اصولی برای مدیریت تعهدات ارائه می کنند که قابلیت انتقال به الزامات کربنی دارند، اما شواهد مستقیمی از تحقق کاهش انتشار محسوب نمی شوند. از این رو، ارزیابی یافته ها مستلزم تفکیک میان شواهد تجربی مستقیم، شواهد مدل سازی شده، شواهد قراردادی قابل انتقال و رویه های حرفه ای است.

شواهد مستقیم درباره پیوند معیارهای کربنی مناقصه با عملکرد پس از واگذاری هنوز محدود است. در طرح آزمایشی فلاندر، مقادیر انتشار اعلام شده در پیشنهاد پس از اجرا با داده های واقعی بازمینی و انحراف عملکرد به سازوکار پاداش یا جریمه مرتبط شد؛ با این حال، گردآوری و کنترل اطلاعات برای کاربرد گسترده، زمان بر و موجب استفاده بیش از حد از منابع بود

مدیریتی پیمانکار و فرایند پایش مرحله ساخت منتقل شد (Varnäs et al., 2009). نوع و شدت این الزامات نیز باید با بلوغ بازار، شرایط رقابت، مدل تحویل و توانمندی کارفرما متناسب باشد (Kadefors et al., 2020).

۲-۴- معیارهای ارزیابی، سازوکارهای مالی و الگوهای تحویل

کربن می تواند از طریق امتیازدهی وزنی، تعدیل قیمت ارزیابی شده یا تعیین آستانه پذیرش، مستقیماً بر انتخاب برنده اثر بگذارد (Moretti et al., 2017). در طرح آزمایشی فلاندر، ۵۰ درصد امتیاز به قیمت، ۳۰ درصد به انتشار ساخت و ۲۰ درصد به انتشار ناشی از اختلال ترافیک اختصاص یافت (Anthonissen et al., 2015). در سازوکار تدارکات تسویقی راه سبز^{۱۸} نیز کاهش های پیشنهادی به کاهشی محاسباتی در قیمت ارزیابی شده تبدیل می شود، بدون آنکه قیمت واقعی پیمان تغییر کند (Metham et al., 2019). مدل های آستانه ای نیز می توانند پیشنهادهای فراتر از حد مجاز انتشار را حذف یا براساس عملکرد کربنی تعدیل کنند (Jezzini and Assaad, 2024). از آنجا که وزن ها و آستانه ها ممکن است رتبه بندی پیشنهادها را تغییر دهند، باید شفاف و قابل توجیه باشند (Ahn et al., 2013; Somboonpisan and Limsawasd, 2021). همچنین، هر امتیاز کربنی باید در مرحله اجرا از طریق مستندات، محاسبه مجدد و پیامدهای مشخص عدم تحقق، قابل پیگیری باشد.

الگوهای مشارکتی زمانی فرصت بیشتری برای کاهش کربن فراهم می کنند که دانش اجرایی پیش از تثبیت تصمیم های اصلی طراحی وارد پروژه شود. در مطالعه سانچز و همکاران، مشارکت زودهنگام پیمانکار^{۱۹} به اصلاح مسیر و جلوگیری از حمل نزدیک به ۶۰۰ هزار مترمکعب مصالح و انتشار ناشی از آن انجامید؛ هرچند نهایی شدن خرید زمین و مجوزها، دامنه تغییرات را محدود کرده بود (Sanchez et al., 2015). در پروژه M5 کپنهاگ نیز مناقصه گفت و گو محور ارزیابی اثرات زیست محیطی، زمینه تعامل، هماهنگی، مذاکره و نوآوری روش شناختی را تقویت کرد (Ravn Boess et al., 2024). بنابراین، اثربخشی این الگوها به ورود به موقع بازیگران، حدود روشن اختیار و

محیط‌زیستی، اقتصاد چرخشی، ارزیابی اثرات یا فناوری‌های کم‌کربن متمرکزند، نه پیگیری یک تعهد قراردادی از مناقصه تا راستی‌آزمایی و پیامد نهایی. برای نمونه، پژوهش راه‌آهن بریتانیا بر موانع و عوامل توانمندساز اقتصاد چرخشی تمرکز دارد (O'Leary et al., 2024) و مطالعه متروی کپنهاگ نیز مربوط به مناقصه ارزیابی اثرات زیست‌محیطی است، نه قرارداد ساخت و تحقق کربن (Ravn Boess et al., 2024).

بنابراین، در مجموعه منابع بررسی‌شده هنوز شواهد تجربی کافی برای ارزیابی چرخه کامل تعهد کاهش کربنی، از پذیرش در مناقصه تا نتیجه نهایی راستی‌آزمایی‌شده و اعمال پیامد قراردادی، وجود ندارد.

۳- سازوکارهای اجرایی و طبقه‌بندی الزامات کاهش کربن

برای بررسی سازوکارهای اجرایی، سه دسته سند قراردادی و حرفه‌ای بررسی شد: راهنمای حرفه‌ای CIHT، راهنمای پیش‌نویس سرمایه کربنی شرکت زیرساخت ریلی بریتانیا و گزینه قراردادی «طبیعت و اقلیم» در NEC4. راهنمای CIHT نمونه‌هایی از برنامه‌های کاهش کربن، گزارش‌دهی دوره‌ای و شاخص‌های مرتبط با تعدیل حق‌الزحمه یا تمدید خدمت ارائه می‌دهد (CIHT, 2023). راهنمای پیش‌نویس سرمایه کربنی شرکت زیرساخت ریلی بریتانیا نیز خط مبنای، مرز سامانه، مسئولیت‌های مرحله‌ای و مقایسه عملکرد اجراشده با اهداف پروژه را سازمان‌دهی می‌کند (Network Rail, 2018). در گزینه X29 از NEC4، الزامات در شرح کار، نحوه اجرای آن‌ها در Nature and Climate Plan و اهداف و تعدیلات مالی در جدول عملکرد تعریف می‌شوند (NEC, 2026a). بااین‌حال، این اسناد بیشتر سازوکارهای قابل‌استفاده را نشان می‌دهند و به‌تنهایی اثربخشی کربنی آن‌ها را اثبات نمی‌کنند.

۳-۱- از اهداف تدارکاتی تا تعهدات اجرایی

اهداف کربنی زمانی اجرایی می‌شوند که به معیارهای قابل‌سنجش و سازوکارهای پیگیری پس از واگذاری متصل باشند (CIHT, 2023; Mosey et al., 2022). برنامه کاهش کربن، گزارش‌دهی دوره‌ای، شاخص‌های عملکرد و مشوق‌های مالی از ابزارهای این انتقال‌اند (CIHT, 2023).

(Anthonissen et al., 2015). این تجربه نشان می‌دهد امکان اتصال ارزیابی کربنی مناقصه به کنترل مرحله اجرا وجود دارد، اما قابلیت تعمیم آن به ظرفیت داده، هزینه پایش و شرایط پروژه وابسته است.

بخش دیگری از ادبیات، عملکرد سازوکارهای قراردادی را به‌صورت تحلیلی یا عددی بررسی می‌کند. آتیگاکوناگورن و همکاران پرداخت نهایی را به انحراف انتشار تجهیزات از محدوده عملکردی مرتبط کردند، اما پایش چندمرحله‌ای و ارزیابی پرداخت‌های میانی را همچنان زمینه پژوهش آینده دانستند (Athigakunagorn et al., 2024). مدل جزینی و اسعد نیز نشان می‌دهد تغییر آستانه‌های کربنی می‌تواند بر تصمیم‌های پیشنهاددهی و احتمال برنده‌شدن اثر بگذارد (Jezzini and Assaad, 2024). بنابراین، این مطالعات برای طراحی سازوکار مفیدند، اما جایگزین شواهد حاصل از اجرای مکرر پروژه نیستند.

مطالعات انطباق زیست‌محیطی، هرچند مستقیماً درباره کاهش کربن نیستند، برای تعیین مسئولیت، گزارش‌دهی، پایش، هزینه‌های انطباق و واکنش به عدم رعایت الزامات، شواهد قراردادی قابل‌انتقالی فراهم می‌کنند. مطالعه الاداوی و همکاران بر پایه یک پروژه زیرساختی، ضرورت تعریف روشن مسئولیت‌ها، الزامات پایش و پیامدهای عدم انطباق را نشان می‌دهد (El-adaway et al., 2019). چنین شواهدی می‌تواند طراحی تعهدات کربنی را پشتیبانی کند، اما نباید به‌عنوان اثبات کاهش واقعی انتشار تفسیر شود.

اسناد حرفه‌ای و قراردادهای استاندارد سطح دیگری از شواهد را تشکیل می‌دهند. راهنماهای صنعت و گزینه‌های قراردادی موجود، سازوکارهایی برای تعیین خط مبنای، تخصیص مسئولیت، گزارش‌دهی، کنترل تغییر و ارتباط عملکرد با پیامدهای تجاری فراهم می‌کنند. ارزش این منابع عمدتاً در نشان‌دادن امکان عملیاتی‌سازی تعهدات است، نه اثبات تجربی اثربخشی آن‌ها. ازاین‌رو، جزئیات سازوکارهای شرکت زیرساخت ریلی بریتانیا، CIHT و گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 در بخش ۳-۲ به‌طور جداگانه بررسی می‌شود (CIHT, 2023; NEC, 2026a). در مجموع، شواهد موجود از نظر بخش حمل‌ونقل و مرحله چرخه قرارداد نامتوازن‌اند. پژوهش‌های مستقیم بیشتر به راه، روسازی، مصالح و سازوکارهای مناقصه اختصاص دارند؛ در حوزه راه‌آهن و مترو نیز مطالعات موجود عمدتاً بر مدیریت

بنابراین، تعهدات پذیرفته شده در مناقصه باید در قرارداد به وظایف، نقاط بازبینی و پیامدهای تجاری مشخص تبدیل شوند.

۳-۲- سازوکارهای حرفه‌ای و قراردادی مدیریت کربن

راهنمای شرکت زیرساخت ریلی بریتانیا، مدیریت کربن را در مراحل مختلف پروژه با تعیین خط مبنای مرجع، مشخص کردن مرز ارزیابی، تقسیم مسئولیت‌ها و استفاده از ابزار سنجش کربن ریلی برای ثبت و مقایسه عملکرد کربنی دنبال می‌کند. این فرایند از تعریف الزامات و ارزیابی گزینه‌ها آغاز می‌شود و با ثبت انتشار براساس اطلاعات اجراشده و مقایسه نتیجه نهایی با خط مبنا و هدف ادامه می‌یابد (Network Rail, 2018).

روث‌ول و همکاران نیز بر ورود اطلاعات کربن از مراحل اولیه تصمیم‌گیری، هماهنگی قالب و زمان ارائه داده‌ها و جایگزینی تدریجی داده‌های عمومی با اطلاعات اختصاصی پروژه تأکید دارند (Rothwell et al., 2022). با این حال، این مطالعه اثر یک سازوکار قراردادی یا پرداختی مشخص را بر کاهش کربن ارزیابی نمی‌کند.

گزینه X29 با عنوان «طبیعت و اقلیم»، چارچوبی عمومی برای درج الزامات زیست‌محیطی در قرارداد فراهم می‌کند و کاربرد کربنی آن به الزامات تعریف شده در شرح کار پروژه وابسته است؛ «برنامه طبیعت و اقلیم» نیز نحوه اجرای این الزامات توسط پیمانکار را بیان می‌کند (NEC, 2026a). در صورت پیش‌بینی مشوق یا جریمه، جدول عملکرد باید اهداف، زمان ارزیابی و تعدیلات پرداخت را مشخص سازد. با این حال، X29 خط مبنا، مرز کربنی، روش محاسبه، ضرایب انتشار^{۲۰} و شیوه راستی‌آزمایی را تعیین نمی‌کند و این موارد باید در اسناد اختصاصی پروژه تکمیل شوند. نسخه‌های متناظر این گزینه در قراردادهای خدمات، تأمین و پیمان‌های فرعی نیز امکان هم‌راستا کردن تعهدات در سطوح مختلف زنجیره تأمین و خدمات را فراهم می‌کنند (NEC, 2026b-g, 2026k).

دریافت برنامه یا گزارش، به‌تنهایی صحت عملکرد کربنی را تأیید نمی‌کند؛ روش محاسبه، مدارک پشتیبان، مرجع بازبینی و رویه اصلاح باید از پیش مشخص باشند. راهنمای CIHT و گزارش موسی و همکاران به استفاده از شاخص‌های عملکرد، مشوق‌های مالی، تأمین مالی نوآوری و ارتباط عملکرد با خدمات آینده اشاره دارند (CIHT, 2023; Mosey et al., 2022). در گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 نیز جدول عملکرد می‌تواند اهداف، تاریخ‌های ارزیابی و تعدیلات پرداخت را تعیین و در پی

رویدادهای جبرانی به‌روزرسانی کند (NEC, 2026a). با این حال، عدم دستیابی به هدف تشویقی باید از نقض یک الزام اجباری در شرح کار تفکیک شود. در مجموع، تعهد کاهش کربنی زمانی عملیاتی است که گزارش‌دهی، راستی‌آزمایی، کنترل تغییر و پیامدهای تجاری در یک سازوکار منسجم به هم پیوند بخورند.

۳-۳- طبقه‌بندی الزامات کاهش کربن در قراردادهای ساخت زیرساخت‌ها

این طبقه‌بندی، الزامات کاهش کربن را بر پایه نقش آن‌ها در فرایند قرارداد سازمان‌دهی می‌کند. یک الزام ممکن است هم‌زمان چند کارکرد داشته باشد و صرفاً درج آن در اسناد، تحقق کاهش کربن را تضمین نمی‌کند. بر این اساس، میان ارائه اطلاعات، ارزیابی پیشنهادها، ایجاد تعهد قراردادی، راستی‌آزمایی عملکرد و اعمال پیامدهای قراردادی تمایز گذاشته می‌شود.

در این طبقه‌بندی، الزامات براساس نقشی که در تدارکات و اجرای قرارداد دارند بررسی می‌شوند؛ مانند ارائه اطلاعات، پایش، سنجش عملکرد یا اعمال پیامد مالی (El-adaway et al., 2019; Mosey et al., 2022). این الزامات ممکن است در اسناد مناقصه، شرح کار، برنامه‌های مدیریتی یا گزارش‌های پروژه درج شوند (NEC, 2026a; Network Rail, 2018). بنابراین، هر الزام باید از نظر محل درج، طرف مسئول، شواهد لازم و پیامد قراردادی ارزیابی شود. معیارهای مرحله مناقصه نیز تنها زمانی پس از واگذاری مؤثر می‌مانند که به تعهدی صریح و قابل‌پیگیری در قرارداد تبدیل شوند (Sanchez et al., 2015; Anthonissen et al., 2015).

۴-۳- طبقات اصلی الزامات

CRR-1: ارائه اطلاعات^{۲۱}. این گروه، ارائه اظهارنامه‌های زیست‌محیطی محصول، مقادیر پتانسیل گرمایش جهانی و داده‌های کربنی پروژه و زنجیره تأمین را دربر می‌گیرد. کارکرد آن ایجاد شفافیت و ردیابی‌پذیری^{۲۲} است، اما ارائه اطلاعات به‌تنهایی مقایسه‌پذیری یا کاهش واقعی کربن را اثبات نمی‌کند (Rangelov et al., 2021; Assaad, 2024).

CRR-2: مدیریت و فرایند. این الزامات، استفاده از ابزار محاسباتی مشخص، تهیه برنامه کربن، تعیین مسئولیت‌ها،

گزارش‌دهی مرحله‌ای و ارائه اقدامات بهبود را سازمان‌دهی می‌کنند (Network Rail, 2018; NEC, 2026a). رعایت این فرایندها شرط مدیریت تعهد است، نه دلیل تحقق نتیجه کربنی.

CRR-3: الزامات فنی تجویزی^{۲۳}. در این رویکرد، استفاده یا منع یک ماده، تجهیز، طراحی یا روش اجرایی مشخص می‌شود. چنین مشخصاتی کنترل انطباق را ساده می‌کنند، اما ممکن است فضای نوآوری را محدود سازند؛ از این رو، باید همراه با الزامات روشن عملکرد و دوام به کار روند (Kadefors et al., 2020; Kopp et al., 2026).

CRR-4: الزامات مبتنی بر عملکرد^{۲۴}. این گروه نتیجه‌ای کمی، مانند سقف GWP، میزان کاهش نسبت به خط مبنا (برای مثال، کاهش ۲۰ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی نسبت به خط مبنای تعریف‌شده) یا هدف مندرج در جدول عملکرد را تعیین می‌کند (Gbolade and Mishra, 2025; NEC, 2026a). اعتبار آن به تعریف خط مبنا، رده کارکردی، مرز ارزیابی، روش محاسبه و قواعد تعدیل وابسته است.

۳-۵- کنترل‌های پشتیبان و پیامدهای قراردادی

CRR-5: اندازه‌گیری، گزارش‌دهی و راستی‌آزمایی^{۲۵}. این کنترل‌ها روش سنجش، زمان ارائه داده‌ها، سوابق پشتیبان و مقایسه عملکرد اجراشده با خط مبنا و هدف را مشخص می‌کنند (Network Rail, 2018; Rothwell et al., 2022). پذیرش برنامه یا گزارش صرفاً دریافت یک مدرک است و نباید معادل تأیید صحت عملکرد تلقی شود.

CRR-6: کنترل تغییر، تخصیص ریسک و انتقال تعهدات^{۲۶}. این الزامات تعیین می‌کنند که تغییرات پروژه چگونه بر اهداف، تاریخ‌ها، مبالغ و مبنای ارزیابی اثر بگذارند (El-adaway et al., 2019; NEC, 2026a). نسخه‌های متناظر X29 در قراردادهای خدمات، تأمین و پیمان‌های فرعی نیز امکان هم‌راستا کردن تعهدات در زنجیره تأمین را فراهم می‌کنند (NEC, 2026b-g).

CRR-7: پیامدهای تجاری و ضمانت‌اجرا^{۲۷}. عملکرد کربنی می‌تواند بر امتیاز مناقصه، قیمت ارزیابی‌شده، پاداش، جریمه، تعدیل پرداخت یا اقدام اصلاحی اثر بگذارد (Anthonissen et al., 2015; CIHT, 2023; NEC, 2026a). برای حفظ پیوستگی قراردادی، مزیت اعطاشده در مناقصه باید به تعهدی قابل‌پیگیری پس از واگذاری متصل شود و هدف تشویقی نیز از الزام اجباری مندرج در شرح کار تفکیک گردد.

۳-۶- یکپارچگی طبقات و سطح بلوغ الزامات

این طبقات در عمل مستقل نیستند و قابلیت اجرای الزام به پیوند آن با داده‌های معتبر، روش محاسبه، سوابق قابل‌پیگیری، قواعد تغییر، راستی‌آزمایی و پیامدهای قراردادی وابسته است. نوع الزام نیز لزوماً بیانگر بلوغ آن نیست؛ زیرا حتی اهداف بلندپروازانه، در صورت ابهام در شواهد، مسئولیت‌ها یا پیامدها، می‌توانند از نظر قراردادی ناقص باشند. در این چارچوب، بلوغ از بیان کلی هدف تا تعهد قابل‌اندازه‌گیری و راستی‌آزمایی‌شده امتداد می‌یابد، اما افزایش بلوغ صرفاً نشان‌دهنده انسجام قراردادی بیشتر است و الزاماً کاهش کربن را اثبات نمی‌کند.

جدول ۱. طبقه‌بندی هفت‌گانه الزامات کاهش کربن

طبقه	کارکرد اصلی قراردادی	ابزارهای متداول	ضعف اصلی در صورت کاربرد مستقل
CRR-1	ارائه اطلاعات مشخص کربنی محصول یا پروژه	اظهارنامه زیست‌محیطی محصول؛ مقدار پتانسیل گرمایش جهانی؛ سیاهه؛ اظهارنامه تأمین‌کننده	شفافیت بدون قابلیت مقایسه، تعهد یا پیامد
CRR-2	ایجاد وظایف مستمر مدیریت کربن	برنامه کربن؛ ابزار مصوب؛ ماتریس نقش‌ها؛ نقاط کنترل مرحله‌ای؛ هشدار زودهنگام	انطباق فرایندی بدون نتیجه راستی‌آزمایی شده
CRR-3	الزام یا منع نهاده، طراحی، فناوری یا روش مشخص	حد آستانه مصالح؛ الزام تجهیزات؛ مشخصات طراحی	محدودشدن نوآوری یا نادیده‌ماندن آثار سایر مراحل چرخه عمر
CRR-4	تحقق نتیجه کمی نسبت به مرجعی مشخص	حداکثر پتانسیل گرمایش جهانی؛ درصد کاهش؛ بودجه کربن؛ هدف عملکردی	ابهام در نبود خط مبنا، اطمینان‌بخشی و قواعد تغییر
CRR-5	محاسبه، گزارش، تطبیق و راستی‌آزمایی عملکرد	دستورالعمل داده؛ مجموعه ضرایب؛ ممیزی؛ حساب کربن نهایی	نتیجه ظاهراً دقیق بر پایه شواهد ناقص یا غیرقابل مقایسه
CRR-6	تعدیل تعهدات و هم‌راستاسازی سطوح پایین‌تر قرارداد	تعدیل خط مبنا؛ قاعده تغییر؛ شرط پیمان جزء	ادعا، اهداف ناسازگار و خلأ داده‌های بالادستی
CRR-7	پیوند عملکرد کربنی با تصمیم تدارکاتی یا قراردادی	امتیازدهی؛ تعدیل پیشنهاد؛ پاداش؛ کسر؛ اصلاح؛ ضمانت اجرا	پایان اثر الزام در زمان واگذاری یا ایجاد رفتار انحرافی

۴- آمادگی قراردادی، ریسک‌های اجرا و تفسیر یافته‌ها

آمادگی قراردادی نشان‌دهنده میزان آماده‌بودن ساختار قرارداد برای مدیریت یک الزام کربنی است. این آمادگی زمانی وجود دارد که موضوع تعهد، روش اندازه‌گیری، مسئولیت طرفین، فرآیند راستی‌آزمایی و پیامد عدم تحقق مشخص باشد. این مفهوم به قابلیت مدیریت الزام در ساختار قرارداد اشاره دارد و نباید معادل قابلیت اجرای حقوقی یا اثربخشی اثبات‌شده آن در کاهش کربن تلقی شود.

الزام کربنی زمانی قابل‌مدیریت است که موضوع تعهد، مبنای سنجش، مسئول اجرا، شواهد، قواعد تغییر و پیامد عدم تحقق آن روشن باشد. مطالعات انطباق زیست‌محیطی بر شفافیت مسئولیت‌ها و پیامدهای قراردادی تأکید دارند (El-adaway et al., 2019). شرکت زیرساخت ریلی بریتانیا نیز خط مبنا، مرز ارزیابی و مسئولیت‌های مرحله‌ای را مشخص می‌کند، درحالی‌که گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 برنامه‌ریزی، گزارش‌دهی، کنترل تغییر و پرداخت مبتنی بر عملکرد را پشتیبانی می‌کند.

۴-۱- مؤلفه‌های آمادگی قراردادی و مبنای کمی الزام

الزام کربنی زمانی معنا پیدا می‌کند که جایگاه و اثر آن در قرارداد روشن باشد؛ زیرا داده‌های مناقصه، تعهدات الزام‌آور و اهداف مرتبط با پرداخت، نقش یکسانی ندارند. در صورت تعارض میان

اسناد، ترتیب اولویت آن‌ها باید از پیش تعیین شود (Chammout and El-adaway, 2024; Aladdin and Ataei, 2025). مبنای کمی نیز با تعریف مرز ارزیابی، واحد کارکردی، خط مبنا و دوره تحلیل شکل می‌گیرد. مقایسه گزینه‌ها زمانی معتبر است که تفاوت‌های عملکرد، عمر خدمت، دوام و نیازهای نگهداری در نظر گرفته شوند (Kopp et al., 2026). معیارهای مرجع نیز باید با رده محصول و شرایط کاربرد هم‌خوان باشند.

۴-۲- شاخص، داده‌ها و راستی‌آزمایی

الزام کربنی باید شاخص، واحد، مقدار هدف، زمان ارزیابی و قاعده محاسبه را روشن کند و میان برآورد اولیه و عملکرد نهایی تمایز بگذارد. در گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4، جدول عملکرد اهداف، تاریخ‌های ارزیابی و تعدیلات پرداخت را مشخص می‌کند. مسئولیت خط مبنا، محاسبه، تأمین داده و تأیید نیز باید میان طرف‌ها تفکیک شود؛ ماتریس RACI شرکت زیرساخت ریلی بریتانیا نمونه‌ای از این تقسیم نقش است. داده‌های زنجیره تأمین و اظهارنامه‌های زیست‌محیطی محصول نیز باید بر منابع معتبر و قواعد سازگار استوار باشند، زیرا ناهمگونی داده‌ها مقایسه‌پذیری را کاهش می‌دهد.

۴-۳- ساختار یکپارچه الزام کربنی در قرارداد

حداقل ساختار لازم برای یک الزام کربنی منسجم، جایگاه قراردادی، دامنه، خط مبنا، شاخص، هدف، مسئولیت‌ها، داده‌ها، تحویل‌دانی‌ها، راستی‌آزمایی، کنترل تغییر و پیامدها را به یکدیگر پیوند می‌دهد. در این ساختار، کاهش کربن نباید به تضعیف ایمنی، دوام، عمر بهره‌برداری، قابلیت اجرا یا نگهداری‌پذیری منجر شود (Hendy and Gowda, 2026). کامل‌بودن این مؤلفه‌ها نشان‌دهنده آمادگی بیشتر الزام برای مدیریت قراردادی است، اما به‌تنهایی اثربخشی کربنی یا قابلیت اجرای حقوقی آن را در همه شرایط اثبات نمی‌کند. شکل ۳ یک چارچوب فرآیندی ارائه می‌کند که در آن هدف کربنی از مرحله تعریف در اسناد تدارکاتی تا مرحله اندازه‌گیری، راستی‌آزمایی و اعمال پیامد قراردادی دنبال می‌شود.

(Assaad, 2024; Rangelov et al., 2021). هر تعهد نیز

به تحویل‌دانی، موعد و مرجع بازبینی مشخص نیاز دارد. راستی‌آزمایی باید هم‌زمان با هدف کربنی طراحی شود و شدت آن با اهمیت تعهد و هزینه کنترل تناسب داشته باشد. در طرح آزمایشی فلاندر، داده‌های اجرا به‌طور مستقل بررسی شدند، اما این فرایند برای کاربرد گسترده بسیار زمان‌بر بود (Anthonissen et al., 2015). کنترل تغییر نیز اهمیت دارد؛ گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 امکان تعدیل اهداف، مبالغ و تاریخ‌های جدول عملکرد را در اثر رویدادهای جبرانی فراهم می‌کند. همچنین، پذیرش گزارش، اقدام اصلاحی و پیامد قراردادی یکسان نیستند و نوع واکنش به عدم تحقق باید با ماهیت تعهد و سازوکار جبران قرارداد هماهنگ باشد (Chammout and El-adaway, 2024).



شکل ۳. چارچوب یکپارچه تبدیل الزامات کاهش کربن از تدارکات به عملکرد قراردادی راستی‌آزمایی‌شد

مدارک قابل تحویل، راستی‌آزمایی، کنترل تغییر و پیامد قراردادی بررسی شود. جدول ۲ این مؤلفه‌ها را در قالب حداقل محتوای لازم، نشانه آمادگی و نشانه عدم آمادگی جمع‌بندی می‌کند.

شکل ۳ منطق کلی تبدیل الزام کاهش کربن از مرحله تدارکات تا عملکرد نهایی راستی‌آزمایی‌شده را نشان می‌دهد. برای ارزیابی عملی این مسیر، هر الزام باید از نظر جایگاه قراردادی، مرز سامانه، خط مبنا، واحد کارکردی، شاخص، مسئولیت‌ها، داده‌ها،

جدول ۲. مؤلفه‌ها و نشانه‌های ارزیابی آمادگی قراردادی الزامات کاهش کربن

مؤلفه	حداقل محتوای لازم	نشانه آمادگی	نشانه عدم آمادگی
جایگاه قراردادی	محل درج، نحوه الحاق، کارکرد و ترتیب اولویت	تعهد مشخص در شرح کار، بند قرارداد یا پیشنهاد الحاق شده	تعهد کاهش کربنی فقط در پیشنهاد باقی مانده است
موضوع الزام و مرز سامانه	دارایی، فعالیت، محصول، مراحل چرخه عمر، موارد مشمول و مستثنا	دامنه اندازه‌گیری و مسئول به‌روزرسانی مشخص است	طرفین حساب‌های متفاوتی محاسبه می‌کنند
خط مبنا و واحد کارکردی	حالت مرجع، تاریخ تثبیت، مقادیر، واحد کارکردی، عمر بهره‌برداری و فرضیات	خط مبنا قابل بازتولید	خط مبنا پس از مشخص شدن عملکرد تغییر می‌کند
شاخص و هدف	واحد، فرمول، مقدار، دامنه مجاز، تاریخ‌ها و درجه الزام	معیار تصمیم‌گیری کمی	هدف کلی و مبهم کاهش کربن
نقش‌ها و اختیارات	تأمین‌کننده داده، محاسبه‌کننده، بازبین، تأییدکننده و تصمیم‌گیر	تناسب مسئولیت با کنترل و صلاحیت	تضمین نتیجه‌ای خارج از کنترل طرف
داده‌ها	ابزار، نسخه ضرایب انتشار، اولویت منابع داده و اظهاریه‌های زیست‌محیطی محصول، منبع مقادیر و قواعد جایگزین	محاسبه قابل‌ردیابی و شواهد نگهداری شده	داده‌های بی‌پشتوانه یا غیرقابل مقایسه
مدارک قابل تحویل و زمان‌بندی	خروجی‌ها، قالب، موعد، زمان پاسخ و اصلاح	ارتباط خروجی‌ها با تصمیم‌های پروژه	اکتفا به گزارش نهایی بدون کنترل‌های میانی
راستی‌آزمایی و ممیزی	سوابق، دامنه بررسی، حق دسترسی، صلاحیت بازبین و اصلاح	نتیجه بازبینی شده و تکرارپذیر	اتکای پرداخت به خوداظهاری راستی‌آزمایی نشده
تغییر و انتقال تعهدات	قواعد تعدیل و تعهدات سازگار سطوح پایین‌تر	بازنگری کنترل‌شده خط مبنا و هم‌راستایی شواهد زنجیره تأمین	تغییرات، قابلیت مقایسه را از بین می‌برند
اقدام اصلاحی و پیامد قراردادی	فرایند بهبود، مهلت رفع، محرک، فرمول و حدود	واکنش مشخص به انحراف پیش‌بینی شده یا واقعی	نبود مسیر اجرایی برای عملکرد نامطلوب
ملاحظات فنی و ادعاهای قراردادی	ایمنی، دوام، هم‌ارزی، گزارش‌دهی صحیح و مسیر جبران	اعتبار فنی راهکار کاهش کربن	دستیابی به کاهش انتشار از طریق افت عملکرد

۴-۴- چالش‌های اجرایی و موانع نهادی

حتی الزامی که به‌صورت کمی و صریح در قرارداد تعریف شده است، ممکن است در اجرا با مشکل روبه‌رو شود. محدودیت توان اجرایی طرفین، نبود داده‌های معتبر، تغییرات طراحی یا مقادیر و ابهام در پیامدهای عدم تحقق می‌تواند سنجش عملکرد و تعیین مسئولیت را دشوار کند و زمینه ادعا و اختلاف درباره

خط مبنا، محاسبات، تغییرات و آثار مالی را فراهم کنند. بنابراین، شناسایی این ریسک‌ها برای پیشگیری از اختلاف اهمیت دارد. ریسک اجرا بیش از آنکه از تنظیم قرارداد ناشی شود، اغلب به ساختار و ظرفیت سازمانی وابسته است. کاهش تعهد مدیران ارشد، ضعف حمایت مدیریتی و تصور افزایش هزینه از مهم‌ترین موانع تدارکات سبز هستند (Mojumder et al., 2022).

شواهد راه‌آهن بریتانیا نیز بر رهبری کارفرما و مشارکت زودهنگام زنجیره تأمین تأکید دارد و مقاومت در برابر تغییر را با ریسک‌گریزی و الزامات ایمنی مرتبط می‌داند (O'Leary et al., 2024). همچنین، در مطالعه ژانگ و ژو، رابطه مقررات کاهش کربن با آگاهی پیمانکاران قوی‌تر از رابطه آگاهی با رفتار اجرایی گزارش شد؛ نتیجه‌ای که محدودیت اتکا به آگاهی، بدون کنترل‌ها و محرک‌های اجرایی مکمل، را نشان می‌دهد (Zhang and Zhou, 2016). از این رو، اجرای تعهدات کربنی به توانمندی، آموزش، تعامل با بازار و منابع کافی نیاز دارد.

۴-۵- ریسک‌های اندازه‌گیری، تخصیص مسئولیت و مسیرهای اختلاف

ریسک اندازه‌گیری زمانی بروز می‌کند که نوع اظهارنامه، زمان ارائه، روش تجمیع یا مبنای مقادیر روشن نباشد. اسعد نشان می‌دهد که انتخاب میان مقادیر مناقصه و مقادیر واقعی اجراشده می‌تواند محل ابهام باشد (Assaad, 2024). این ابهام با تغییر طراحی، مقادیر یا تأمین‌کننده می‌تواند خط مبنا و نتیجه ارزیابی را تغییر دهد. جزینی و اسعد نیز نشان می‌دهند که آستانه‌های GWP می‌توانند بر رفتار پیشنهاددهی اثر بگذارند (Jezzini and Assaad, 2024). بنابراین، قرارداد باید مبنای داده، روش تطبیق و قواعد بازنگری خط مبنا را روشن کند. انطباق ظاهری همواره به تحقق هدف زیست‌محیطی منجر نمی‌شود؛ مطالعه شانگ و همکاران نشان می‌دهد که ضعف نظارت می‌تواند رفتارهای فرصت‌طلبانه و تداوم اقدامات ناپایدار را تقویت کند (Shang et al., 2022). از سوی دیگر، محاسبات کربن به اطلاعات طراحان، تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان و پیمانکاران جزء وابسته است؛ بنابراین، هماهنگی تعاریف، داده‌ها و مسئولیت‌ها در زنجیره تأمین اهمیت دارد. قراردادهای یکپارچه می‌توانند تصمیم‌های طراحی، ساخت و نگهداری را هم‌راستا کنند، اما الزامات سخت‌گیرانه ممکن است انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات فنی را کاهش دهند (Lenferink et al., 2013).

عدم تحقق هدف کربنی همواره به معنای نقض قرارداد نیست؛ زیرا هدف تشویقی، تعهد گزارش‌دهی و الزام اجباری می‌تواند

آثار متفاوتی داشته باشند. در گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 نیز اهداف جدول عملکرد از الزامات مندرج در شرح کار تفکیک شده‌اند. پس قرارداد باید مسئولیت، رابطه سببیت، فرصت اصلاح و پیامد هر نوع عدم تحقق را روشن کند. همچنین ابهام در مسئولیت، خسارات و روش حل اختلاف می‌تواند منازعه را تشدید کند (Chammout and El-adaway, 2024; Aladdin and Ataei, 2025). تجربه اختلافات مرتبط با گواهی سبز نیز نشان می‌دهد که ابهام در تخصیص مسئولیت می‌تواند زمینه طرح ادعاهای مالی و قراردادی را فراهم کند (Southern Builders, Inc. v. Shaw Development, LLC, 2007). واکنش قراردادی می‌تواند به‌صورت مرحله‌ای از اصلاح و تعدیل پرداخت آغاز و تنها در موارد موجه به خسارت یا حل رسمی اختلاف منتهی شود.

۴-۶- یکپارچگی سازوکارها و شکاف میان تعهد و عملکرد

کاهش کربن در زیرساخت‌های خطی حمل‌ونقل به پیوند منسجم میان سنجش، تدارکات، تعهدات قراردادی، راستی‌آزمایی و مدیریت تغییر نیاز دارد. شواهد نشان می‌دهد که اثربخشی الزامات به نحوه طراحی و اجرای سازوکارهای تدارکاتی و قراردادی وابسته است (Kadefors et al., 2020). گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 نیز ابزارهایی برای مدیریت این تعهدات فراهم می‌کند، اما به‌تنهایی تحقق کاهش کربن را تضمین نمی‌کند.

شواهد نشان می‌دهد اظهارنامه‌های زیست‌محیطی محصول تنها زمانی می‌توانند به بهبود زیست‌محیطی در تدارکات کمک کنند که قواعد رده محصول و چارچوب‌های ارزیابی هماهنگ باشند (Rangelov et al., 2021). مدل قرارداد و گنجانیدن الزامات کاهش انتشار در انتخاب پیمانکار نیز بر دستیابی به اهداف زیست‌محیطی اثر می‌گذارد (Sanchez et al., 2015). مسئولیت و جبران خسارت نیز تابع مفاد قرارداد است (Chammout and El-adaway, 2024). همچنین، معیارگذاری کربن باید با رده مخلوط سازگار باشد و ارزیابی چرخه عمر نیز دوام، عمر خدمت و سناریوهای نگهداری را در نظر گیرد (Gbolade and Mishra, 2025; Kopp et al., 2026).

عمل، کارفرمایان باید پیش از تعیین اهداف، ظرفیت سازمانی و آمادگی بازار را ارزیابی کرده و معیارهای مناقصه را با شرح کار، کنترل تغییر و تعهدات زنجیره تأمین هماهنگ سازند. چنین رویکردی، ضمن حفظ عملکرد فنی، می‌تواند پیوند میان تعهدات قراردادی و اجرای واقعی را تقویت کرده و تصمیم‌های قراردادی را بر پایه شواهد پشتیبانی کند.

۵- نتیجه‌گیری

این مرور نشان داد که چالش اصلی کاهش انتشار کربن در زیرساخت‌های خطی حمل‌ونقل، نبود ابزارهای سنجش یا الزامات قراردادی منفرد نیست، بلکه فقدان ارتباط یکپارچه میان تصمیم‌های فنی، تدارکاتی و قراردادی در طول چرخه پروژه است. الزامات کربنی زمانی قابلیت اجرا پیدا می‌کند که از مرحله ارزیابی پیشنهاد تا ثبت عملکرد واقعی، دارای سازوکار مشخص برای سنجش، تعیین مسئولیت، راستی‌آزمایی و واکنش قراردادی باشند. با این حال، طراحی این الزامات باید متناسب با بلوغ بازار، ظرفیت کارفرما، مدل تحویل پروژه و هزینه‌های پایش انجام شود. دستاورد اصلی این پژوهش، ارائه چارچوبی برای ارزیابی آمادگی قراردادی الزامات کاهش انتشار کربن است که کیفیت یک الزام را بر اساس مؤلفه‌هایی مانند تعریف موضوع تعهد، خط مبنا، مرز ارزیابی، روش محاسبه، مسئولیت‌ها، مدارک پشتیبان، کنترل تغییر، راستی‌آزمایی و پیامد قراردادی بررسی می‌کند. این چارچوب با تفکیک میان الزامات اطلاعاتی، تعهدات اجرایی، اهداف تشویقی و الزامات الزام‌آور، می‌تواند به شفاف‌تر شدن فرآیند تبدیل اهداف کربنی به تعهدات قراردادی کمک کند.

با وجود توسعه سازوکارهای مختلف در سطح بین‌المللی، شواهد تجربی درباره عملکرد بلندمدت این الزامات، به‌ویژه در پروژه‌های راه‌آهن و مترو، همچنان محدود است. همچنین، موضوعاتی مانند راستی‌آزمایی نهایی، تعدیل خط مبنا، آثار مالی و اختلافات قراردادی نیازمند بررسی بیشتر هستند. بنابراین، مطالعات آینده باید چارچوب‌های پیشنهادی را با داده‌های پروژه‌های واقعی اعتبارسنجی کرده و مؤلفه‌های کیفی آمادگی قراردادی را به شاخص‌های کمی قابل ارزیابی تبدیل کنند. در نهایت، موفقیت الزامات کاهش انتشار کربن به توانایی پروژه در ایجاد پیوند میان اهداف زیست‌محیطی، سازوکارهای قراردادی و عملکرد واقعی، بدون کاهش الزامات ایمنی، دوام و عملکرد فنی وابسته است.

یکی از شکاف‌های برجسته، تبدیل الزامات پایداری در مرحله تدارکات به تعهدات اجرایی قابل‌راستی‌آزمایی است. در طرح آزمایشی فلاندر، پیشنهادهای کربنی به کنترل مستقل و پاداش یا جریمه متصل شدند، اما فرایند پایش برای کاربرد متداول بسیار زمان‌بر بود (Anthonissen et al., 2015). مدل‌های مبتنی بر تعدیل پرداخت و آستانه‌های انتشار نیز هنوز عمدتاً در سطح مدل‌سازی قرار دارند. همچنین، اثربخشی گزینه «طبیعت و اقلیم» NEC4 به تعریف دقیق الزامات، اهداف و سازوکار ارزیابی متناسب با هر پروژه وابسته است.

کاربرد الزامات کربنی باید با نوع پروژه، بلوغ بازار، روش تحویل و ظرفیت طرفین سازگار باشد. رویکردهای مشارکتی می‌توانند تبادل اطلاعات و هماهنگی زنجیره تأمین را تقویت کنند، اما انتقال نامتناسب ریسک به تحقق اهداف خالص صفر کمکی نمی‌کند (Mosey et al., 2022). همچنین، ضعف حمایت مدیریتی و تصور افزایش هزینه از موانع مهم تدارکات سبز هستند (Mojumder et al., 2022). با این حال، شواهد مستقیم درباره پیگیری تعهدات کربنی از مناقصه تا نتیجه نهایی و اختلافات قراردادی هنوز محدود است.

۶-۷- پیشنهادهای اجرایی و مسیرهای پژوهش آینده

پژوهش‌های آینده می‌توانند با بررسی تجربی اجرای الزامات کاهش کربن در انواع پروژه‌های زیرساختی، شناخت دقیق‌تری از اثربخشی این الزامات، نحوه راستی‌آزمایی عملکرد، مدیریت تغییرات و ریسک‌ها و پیامدهای قراردادی آن‌ها فراهم کنند. همچنین، پیشنهاد می‌شود چارچوب ارزیابی آمادگی قراردادی ارائه‌شده در این پژوهش، به‌ویژه مؤلفه‌های کیفی جدول ۲، با تعریف شاخص‌های قابل اندازه‌گیری و توسعه یک مدل امتیازدهی کمی تکمیل شود تا امکان مقایسه سطح آمادگی قراردادی پروژه‌ها و کاربرد عملی‌تر آن در فرآیندهای تدارکات و مدیریت قرارداد فراهم شود. در ایران، توسعه پایگاه داده درباره انتشار کربن فرآیندهای ساخت می‌تواند دقت ارزیابی‌های چرخه عمر را افزایش دهد؛ زیرا استفاده از داده‌های خارجی ممکن است شرایط واقعی تولید و اجرای پروژه‌ها در کشور را به‌طور کامل منعکس نکند. همچنین، بررسی تطبیقی روش‌های مختلف تحویل پروژه می‌تواند مشخص کند کدام ساختار، با توجه به میزان یکپارچگی طراحی و اجرا، نحوه مشارکت پیمانکار و دسترسی به داده‌های زنجیره تأمین، زمینه مناسب‌تری برای تعریف و راستی‌آزمایی الزامات کاهش کربن فراهم می‌کند. در

۶- پی‌نوشت‌ها

1. System Boundary
2. Global Warming Potential
3. Public Procurement
4. Bid Evaluation Criteria
5. Market Maturity
6. Functional Equivalence
7. Baseline
8. Contractual Readiness
9. Sustainable Procurement
10. Cradle-to-Site
11. Cradle-to-Gate

۱۲. ابزار اداره حمل‌ونقل سوئد برای برآورد آثار اقلیمی چرخه عمر زیرساخت‌ها و تعیین خط مبنای انتشار

13. Environmental Product Declaration (EPD)
14. Product Category Rules (PCR)
15. Auditability
16. Whole-Life Performance
17. Performance-Based Specifications (PBS)
18. Green Road Incentive Procurement (GRIP)
19. Early Contractor Involvement (ECI)
20. Emission Factors
21. Disclosure and Information Requirements
22. Traceability
23. Prescriptive Technical Requirements
24. Performance-Based Carbon Requirements
25. Measurement, Reporting and Verification (MRV) Requirements
26. Change-Control, Risk-Allocation and Flow-Down Requirements
27. Commercial Consequence and Enforcement Requirements

۷- مراجع

Journal of Cleaner Production, Vol. 102, 96-102.

-Assaad, R.H. (2024). Examining low-carbon material initiatives: Existing policies, impacts on the procurement of projects, current challenges, and potential solutions to reduce embodied carbon in the construction industry.

Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, Vol. 16, No. 2, Article 04523060.

-Athigakunagorn, N., Limsawasd, C., Mano, D., Khathawatcharakun, P. and Labi, S. (2024).

Promoting sustainable policy in construction: Reducing greenhouse gas emissions through performance-variation-based contract clauses.

-Ahn, C., Peña-Mora, F., Lee, S. and Arboleda, C.A. (2013). Consideration of the environmental cost in construction contracting for public works: A + C and A + B + C bidding methods. *Journal of Management in Engineering*, Vol. 29, No. 1, 86-94.

-Aladdin, R. and Ataei, H. (2025). Contractual risk planning and mitigation in sustainable construction. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, Vol. 17, No. 4, Article 03125004.

-Anthonissen, J., Van Troyen, D., Braet, J. and Van den Bergh, W. (2015). Using carbon dioxide emissions as a criterion to award road construction projects: A pilot case in Flanders.

green public procurement. *Transportation Research Record*, Vol. 2676, No. 8, 322-335.

-Huang, L., Jakobsen, P.D., Bohne, R.A., Liu, Y., Bruland, A. and Manquehual, C.J. (2020). The environmental impact of rock support for road tunnels: The experience of Norway. *Science of the Total Environment*, Vol. 712, Article 136421.

-Jezzini, Y. and Assaad, R.H. (2024). Modeling the impact of low-carbon procurement on bidding dynamics. *Journal of Management in Engineering*, Vol. 40, No. 4, Article 04024022.

-Kadefors, A., Lingegård, S., Uppenberg, S., Alkan-Olsson, J. and Balian, D. (2020). Designing and implementing procurement requirements for carbon reduction in infrastructure construction: International overview and experiences. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 64, No. 4, 611-634.

-Karlsson, I., Rootzén, J. and Johnsson, F. (2020). Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains: Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 120, Article 109651.

-Keijzer, E.E., Leegwater, G.A., de Vos-Effting, S.E. and de Wit, M.S. (2015). Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in the Netherlands. *Environmental Science & Policy*, Vol. 54, 218-225.

-Kleizienė, R., van de Beek, M., Zofka, A. and Karbočius, M. (2025). Application of single score methods for environmental impact assessment to compare pavement technologies. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 26, No. S1, 503-524.

-Kong, C., An, B., Wang, S., Zhang, J., Wang, Y. and Feng, J. (2026). Low-carbon effects of constructing a metro station with new pipe curtain method: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 168, Article 107114.

-Kopp, T., Kurtis, K.E. and Grubert, E. (2026). Life-cycle analysis of proposed performance-based specifications for structural concrete and

Journal of Cleaner Production, Vol. 448, Article 141594.

-Buttitta, G., Giancontieri, G., Parry, T. and Lo Presti, D. (2023). Modelling the environmental and economic life cycle performance of maximizing asphalt recycling on road pavement surfaces in Europe. *Sustainability*, Vol. 15, No. 19, Article 14546.

-Chammout, B. and El-adaway, I.H. (2024). A contractual approach to resolving disputes arising from failure to achieve green certification. *Construction Research Congress 2024*, American Society of Civil Engineers, 20-30.

-Chartered Institution of Highways & Transportation (CIHT) (2023). Building carbon reduction into procurement processes. Chartered Institution of Highways & Transportation, London.

-Cruz Peraza, E.I. and Liu, T. (2026). Life cycle assessment of road expansion: Baseline environmental impacts in El Salvador. *Science of the Total Environment*, Vol. 1017, Article 181501.

-El-adaway, I.H., Abotaleb, I.S., Mohler, R.J., Sheffler, J., Fuller, H. and Orozco, C. (2019). Contractual implications of environmental compliance requirements in construction projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, Vol. 11, No. 3, Article 05019002.

-Gbolade, A. and Mishra, D. (2025). Global warming potential benchmarking of asphalt mixtures to support low-carbon procurement and cradle-to-gate life cycle assessment-based strategies to reduce mix global warming potential. *Transportation Research Record*, Vol. 2679, No. 9, 281-293.

-Hendy, C.R. and Gowda, C. (2026). Considerations for designing bridges for 100% utilisation to design standards”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering*.

-Hernando, D., Moins, B., Van den Bergh, W. and Audenaert, A. (2022). Identification of the main environmental impact categories over the life cycle of hot mix asphalt: An application to

- NEC (2026c). NEC4 Term Service Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026d). "NEC4 Supply Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026e). NEC4 Engineering and Construction Subcontract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026f). NEC4 Professional Service Subcontract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026g). NEC4 Term Service Subcontract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026h). NEC4 Alliance Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026i). NEC4 Design Build and Operate Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026j). NEC4 Facilities Management Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026k). NEC4 Facilities Management Subcontract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- Network Rail (2018). Capital Carbon Guidance Note. Draft v.10c, 23 May 2018, Network Rail, London.
- O'Leary, M.J., Osmani, M. and Goodier, C. (2024). Circular economy implementation strategies, barriers and enablers for UK rail infrastructure projects. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, Vol. 21, Article 200195.
- Ogunmakinde, O.E., Aghajani, M. and Memari, A. (2025). Identifying risks in sustainable procurement for construction: A systematic literature review and text-mining approach. *Smart and Sustainable Built Environment*, 1-27.
- Portland cement concrete pavement in Georgia. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, Vol. 152, No. 1, Article 05025004.
- Lenferink, S., Tillema, T. and Arts, J. (2013). Towards sustainable infrastructure development through integrated contracts: Experiences with inclusiveness in Dutch infrastructure projects. *International Journal of Project Management*, Vol. 31, No. 4, 615-627.
- Lingegård, S., Alkan Olsson, J., Kadefors, A. and Uppenberg, S. (2021). Sustainable public procurement in large infrastructure projects—Policy implementation for carbon emission reductions. *Sustainability*, Vol. 13, No. 20, Article 11182.
- Metham, M., Benjaoran, V. and Sedthamanop, A. (2019). An evaluation of Green Road Incentive Procurement in road construction projects by using the AHP. *International Journal of Construction Management*, Vol. 22, No. 3, 501-513.
- Mojumder, A., Singh, A., Kumar, A. and Liu, Y. (2022). Mitigating the barriers to green procurement adoption: An exploratory study of the Indian construction industry. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 372, Article 133505.
- Moretti, L., D'Andrea, A. and Di Mascio, P. (2017). Green public procurement criteria for road infrastructures: State of the art and proposal of a weighted sum multicriteria analysis to assess environmental impacts. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 12, No. 17, 4887-4894.
- Mosey, D., Bahram, D., Vornicu, R. and Giana, P.E. (2022). Procuring net zero construction. King's College London Centre of Construction Law & Dispute Resolution and Society of Construction Law, London.
- NEC (2026a). NEC4 Engineering and Construction Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.
- NEC (2026b). NEC4 Professional Service Contract: Option X29 Nature and Climate. *NEC*, London.

- Shang, T., Ye, K., Wu, L. and Shang, J. (2022). Opportunism or symbiosis? A case study on contractors' unsustainable highway construction in China. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, Vol. 14, Article 200082.
- Somboonpisan, J. and Limsawasd, C. (2021). Environmental weight for bid evaluation to promote sustainability in highway construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 147, No. 4, Article 04021013.
- Southern Builders, Inc. v. Shaw Development, LLC (2007). Southern Builders, Inc. v. Shaw Development, LLC. Case No. 19-C-07-011405, *Maryland Circuit Court*.
- Varnäs, A., Faith-Ell, C. and Balfors, B. (2009). Linking environmental impact assessment, environmental management systems and green procurement in construction projects: Lessons from the City Tunnel Project in Malmö, Sweden. *Impact Assessment and Project Appraisal*, Vol. 27, No. 1, 69-76.
- Zhang, L. and Zhou, J. (2016). The effect of carbon reduction regulations on contractors' awareness and behaviors in China's building sector. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 113, 10-93.
- Rangelov, M., Dylla, H., Mukherjee, A. and Sivanewaran, N. (2021). Use of environmental product declarations (EPDs) of pavement materials in the United States of America (U.S.A.) to ensure environmental impact reductions. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 283, Article 124619.
- Rangelov, M., Dylla, H., Dobling, B., Gudimettla, J., Sivanewaran, N. and Praul, M. (2022). Readily implementable strategies for reducing embodied environmental impacts of concrete pavements in the United States. *Transportation Research Record*, Vol. 2676, No. 9, 436-450.
- Ravn Boess, E., Kørnøv, L. and Jensen, J.U. (2024). Innovation through the EIA tender: A case of Copenhagen Metro and the SDGs. *Impact Assessment and Project Appraisal*, Vol. 42, No. 3, 211-228.
- Rothwell, N., Lyons, H. and Safari Baghsorkhi, M. (2022). Whole life carbon management in the rail industry. *The PWI Journal*, Vol. 140, No. 2, 30-35.
- Sanchez, A.X., Lehtiranta, L.M. and Hampson, K.D. (2015). Use of contract models to improve environmental outcomes in transport infrastructure construction. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 58, No. 11, 1923-1943.

Carbon-Reduction Requirements in Linear Transport Infrastructure Construction Contracts: An Analytical Review and a Contractual Readiness Framework

Ali Farrokhi, Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Pooyan Ayar, *Assistant Professor, School of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Hamidreza Abbasianjahromi, Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology,
Tehran, Iran.*

E-mail: ayar@iust.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Carbon emission reduction in linear transportation infrastructure cannot be achieved solely by defining environmental targets or incorporating carbon criteria into tender documents; rather, it requires translating these targets into clear, measurable, and assessable contractual obligations. This study adopts an analytical review approach to integrate technical, procurement, contractual, and professional evidence related to road, highway, pavement, bridge, tunnel, railway, and metro projects, and examines the pathway through which carbon policies are transformed into practical project outcomes. The findings indicate that the measurability and contractual manageability of carbon reduction requirements depend on the clear definition of system boundaries, baselines, functional units, calculation methods, data sources, responsibilities, change control mechanisms, and verification procedures. Based on the reviewed evidence, carbon reduction requirements are classified into seven categories: information provision; management and process requirements; prescriptive technical requirements; performance-based requirements; measurement, reporting, and verification; change control, risk allocation, and transfer of obligations; and commercial consequences and enforcement mechanisms. Furthermore, a framework for assessing the contractual readiness of these requirements is proposed. The results demonstrate that Environmental Product Declarations (EPDs), carbon plans, and tender evaluation criteria alone cannot ensure actual emission reductions and should be integrated into a coherent chain extending from procurement and implementation to final verification and commercial decision-making. The lack of empirical evidence based on tracking the full contract lifecycle, particularly in railway and metro projects, remains a major limitation in the existing body of knowledge.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Sustainable Procurement, Transport Infrastructure, Carbon Reduction, Contract Management