

مروری بر استراتژی‌های اقتصاد چرخه‌ای برای ساختمان‌های موجود: چالش‌ها، راه‌حل‌ها

فرخ پناهی راد

دانشجو دکتری، رشته معماری، دانشگاه هنر اصفهان

F.Panahirad@au.ac.ir

چکیده

بخش ساخت‌وساز یکی از عوامل اصلی تولید زباله، کاهش منابع طبیعی و تخریب محیط‌زیست است. این مقاله به بررسی نقش استراتژی‌های اقتصاد چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود می‌پردازد و چالش‌ها، راه‌حل‌ها و مسیرهای آینده را تحلیل می‌کند. با استفاده از مرور سیستماتیک منابع علمی و تحلیل کیفی، مزایای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی اقدامات چرخه‌ای مانند بازاستفاده و بازیافت مواد، بهره‌وری انرژی، کاهش زباله، صرفه‌جویی در مصرف آب و بهینه‌سازی عملیات ساختمان شناسایی شده است. همچنین، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه بالا، محدودیت‌های فنی، موانع قانونی و مسائل بازار مورد بررسی قرار گرفته و راه‌حلی از جمله مشوق‌های مالی، اصلاحات سیاستی، توسعه فناوری‌های نوآورانه و آموزش ذی‌نفعان پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که پذیرش شیوه‌های اقتصاد چرخه‌ای می‌تواند به کاهش ردپای کربنی ساختمان‌ها، حفظ منابع طبیعی، بهبود سلامت و رفاه ساکنان، صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی، افزایش ارزش ملک و ایجاد فرصت‌های شغلی کمک کند. این مقاله بر اهمیت تغییرات رفتاری و فرهنگی در پذیرش شیوه‌های چرخه‌ای و ترویج فرهنگ پایداری تأکید دارد. همچنین، مسیرهای تحقیقاتی آینده بر ارزیابی اثرات بلندمدت اقدامات چرخه‌ای، توسعه مواد و فناوری‌های پایدار، تحلیل تأثیرات اجتماعی و اقتصادی این شیوه‌ها، و نقش سیاست در ترویج اقتصاد چرخه‌ای تمرکز دارد. این مطالعه چارچوبی جامع برای تسریع گذار به محیط ساخته‌شده‌ای مقاوم، پایدار و عادلانه ارائه کرده و بر نقش همکاری میان دولت‌ها، صنایع و جوامع محلی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی: اقتصاد چرخه‌ای، بازسازی ساختمان، پایداری، بهره‌وری انرژی، بازاستفاده مواد

۱- مقدمه

اقتصاد خطی سنتی بر اساس الگوی "استخراج، تولید، دور ریختن" عمل می‌کند، به این معنا که مواد خام استخراج شده، برای تولید کالاها استفاده می‌شوند و سپس به عنوان زباله دور ریخته می‌شوند. این مدل ذاتاً از نظر پایداری محیطی و مدیریت منابع غیرقابل دوام است، زیرا منجر به استخراج بیش از حد منابع، کاهش منابع طبیعی، تخریب زیستگاه‌ها و از دست دادن تنوع زیستی می‌شود. علاوه بر این، دفع زباله‌ها از طریق دفن یا سوزاندن موجب آلودگی محیط زیست می‌شود، از جمله آلودگی خاک، آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای که همگی به طور قابل توجهی تغییرات اقلیمی را سرعت می‌بخشند (Cheshire, 2016; Ghisellini et al., 2019; Gillott et al., 2023; Stahel, 2019; شریفی و کریمی، ۱۳۹۷؛ عبادی و تقوی، ۱۳۹۹).

تاریخچه توسعه اقتصاد خطی، به‌ویژه پس از انقلاب صنعتی، نشان می‌دهد که مصرف مواد خام و انرژی به طور نمایی افزایش یافته و شهرهای با چگالی مصرف بالا شکل گرفتند که فشار بی‌سابقه‌ای بر اکوسیستم‌ها وارد می‌کنند (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Korhonen et al., 2018; Williams, 2019). در ایران نیز، مشکلات مرتبط با اقتصاد خطی به‌ویژه در بخش ساخت‌وساز به‌طور چشمگیری دیده می‌شود. به عنوان مثال، تحقیقات نشان می‌دهد که تولید زباله‌های ساختمانی در پروژه‌های عمرانی کشور به دلیل عدم مدیریت صحیح منابع و برنامه‌ریزی کارآمد، به معضلی بزرگ تبدیل شده است (اسدی و همکاران، ۱۳۰۰؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، تخلیه زباله‌های صنعتی و شهری در محیط‌های طبیعی، موجب آلودگی منابع آبی و خاکی کشور شده و تأثیرات منفی گسترده‌ای بر تنوع زیستی و کیفیت زندگی جوامع محلی داشته است (نوروزی، ۱۳۹۸). از سوی دیگر، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرآیندهای صنعتی و سوزاندن زباله‌ها یکی از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی در کشور است. طبق گزارش‌های داخلی، سهم بالای بخش انرژی و صنعت در انتشار دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای آلاینده، نیاز به بازنگری در الگوهای مصرف و تولید را برجسته‌تر کرده است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷؛ رضوی، ۱۴۰۱). این چالش‌ها بیانگر اهمیت حرکت به سمت مدل‌های اقتصادی پایدارتر نظیر اقتصاد چرخه‌ای هستند.

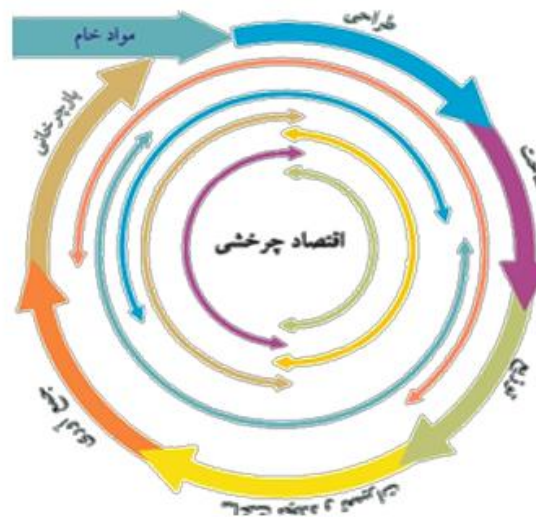
۱-۱- ناکارآمدی‌های اقتصاد خطی

با افزایش جمعیت جهانی و سطوح مصرف، ناکارآمدی‌های اقتصاد خطی بیش از پیش آشکار می‌شود. وابستگی این مدل به منابع محدود و انتقال هزینه‌های زیست‌محیطی به بیرون، فشار غیرپایداری بر سیستم‌های طبیعی وارد می‌کند و تعادل اکولوژیکی لازم برای رفاه انسانی و سلامت محیط زیست را تضعیف می‌کند (Ghisellini et al., 2016; Stahel, 2016; اسدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس گزارش شکاف چرخه‌ای (Circularity Gap Report 2024)، چرخه‌پذیری جهانی از ۹.۱٪ در سال ۲۰۱۸ به ۷.۲٪ در سال ۲۰۲۳ کاهش یافته است که چالش‌های رو به رشد در مدیریت منابع و پایداری محیط زیست را نمایان می‌کند (رضوی، ۱۴۰۱؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸). محیط ساخته شده به طور قابل توجهی به این بحران کمک می‌کند، به طوری که ۳۸٪ از انتشار CO₂ مرتبط با انرژی، ۵۰٪ از مواد استخراج شده و یک‌سوم از کل جریان‌های زباله جامد را شامل می‌شود و نیاز فوری به تغییرات سیستمی را نشان می‌دهد (Circularity Gap Report 2024; Ghisellini et al., 2016; IEA, 2019; Stahel, 2016; WorldGBC, 2019).

۲-۱- معرفی اقتصاد چرخه‌ای

در پاسخ به این چالش‌ها، مدل‌های نوآورانه متعددی پدید آمده‌اند، اقتصاد چرخه‌ای به عنوان یک جایگزین جامع و پایدار مطرح می‌شود. اقتصاد چرخه‌ای به دنبال تعریف مجدد رشد با تأکید بر مزایای سیستماتیک برای کسب‌وکارها، جامعه و محیط زیست است. این مدل بهره‌وری منابع را ترویج می‌دهد و با استفاده از یک سیستم بسته، مواد را به طور مداوم بازاستفاده، بازیافت و

بازپرداخت می‌کند و به این ترتیب تقاضا برای مواد خام جدید را کاهش می‌دهد (Ellen MacArthur, 2013; Hill, 2024; رضوی، ۱۴۰۱؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). نمونه‌هایی از این موفقیت در کشورهای پیشرو نظیر فنلاند و هلند دیده می‌شود که استراتژی‌های جامع اقتصاد چرخه‌ای را برای کاهش مصرف منابع و افزایش بازیافت پیاده‌سازی کرده‌اند (Amsterdam, 2024; Särkilähti et al., 2022).



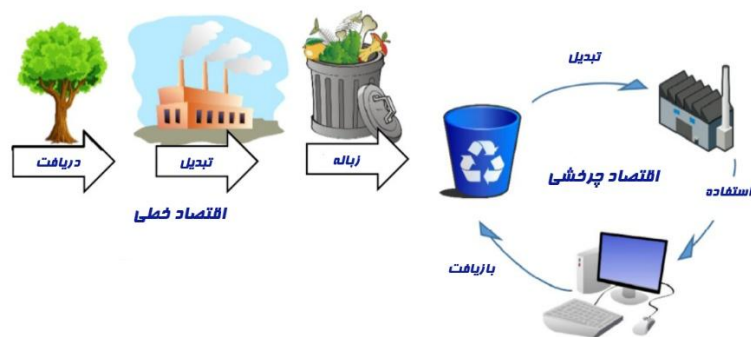
تصویر ۱: نمودار اقتصاد چرخشی (davoodabadi et al., 2018).

۳-۱- نوآوری‌ها و مدل‌های تجاری مرتبط

علاوه بر این، اقتصاد چرخه‌ای مدل‌های تجاری نوآورانه‌ای مانند "محصول به‌عنوان خدمت" و پلتفرم‌های اشتراک‌گذاری را تشویق می‌کند تا استفاده از محصولات بهینه شده و طول عمر آن‌ها افزایش یابد. این مدل از بازیافت سنتی فراتر رفته و بر طراحی بادوام، افزایش چرخه عمر محصولات و یافتن راه‌های خلاقانه برای بازاستفاده از موادی که در غیر این صورت دور ریخته می‌شدند، تمرکز دارد (Ellen MacArthur, 2013; Finamore & Oltean-Dumbrava, 2024; Hill, 2024).

۴-۱- اقتصاد چرخه‌ای در ایران

اقتصاد چرخه‌ای در ایران نیز به‌عنوان رویکردی نوآورانه برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری منابع مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهند که اتخاذ این مدل می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش تولید زباله و مصرف مواد اولیه داشته باشد و زمینه را برای توسعه پایدار فراهم کند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷؛ عبادی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، نوآوری‌هایی نظیر استفاده از پلتفرم‌های اشتراک‌گذاری و بازسازی مواد ساختمانی به عنوان نمونه‌هایی از راهبردهای موفق اقتصاد چرخه‌ای در کشور معرفی شده‌اند (رضوی، ۱۴۰۱؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
تصویر ۲ مقایسه ای از سازوکار اقتصاد خطی و اقتصاد چرخه‌ای را نشان می‌دهد.



تصویر ۲: مقایسه سازوکار اقتصاد خطی و چرخه‌ای (پارس‌مدیر، ۱۳۹۹).

تحقیقات نشان می‌دهد که اقتصاد چرخه‌ای توانایی ایجاد گسست میان رشد اقتصادی و تخریب محیط زیست را دارد، این امر از طریق اولویت دادن به استفاده کارآمد از منابع، افزایش چرخه عمر محصولات و ترویج فرهنگ پایداری امکان‌پذیر می‌شود (Geissdoerfer et al., 2017; رضوی، ۱۴۰۱؛ عبادی و همکاران، ۱۳۹۹). این شیوه‌ها در دستیابی به اهداف توسعه پایدار حیاتی هستند، زیرا استخراج منابع را کاهش می‌دهند، ضایعات را به حداقل می‌رسانند و پایداری بلندمدت را ترویج می‌کنند (Korhonen et al., 2018; Schröder et al., 2019; Winans et al., 2017).

۲- روش تحقیق

این مطالعه با هدف بررسی نقش و تأثیر اقدامات اقتصاد چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود از روش تحقیق کیفی مبتنی بر مرور سیستماتیک منابع علمی استفاده کرده است. مراحل اصلی این روش‌شناسی عبارت‌اند از:

۲-۱- جستجو و انتخاب منابع

پایگاه‌های داده: منابع از پایگاه‌هایی چون Google Scholar، Web of Science، Scopus، JSTOR و Elsevier انتخاب شدند. کلمات کلیدی: شامل اقتصاد چرخه‌ای، ساخت‌وساز پایدار، بازاستفاده مواد، بهره‌وری انرژی، صرفه‌جویی در مصرف آب و نوسازی چرخه‌ای.

محدوده زمانی: تمرکز بر مطالعات دهه اخیر.

معیارهای انتخاب: مطالعات مرتبط با محیط ساخته‌شده و تأثیرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی.

معیارهای شمول و طرد:

شمول: مطالعات تجربی یا نظری درباره اقتصاد چرخه‌ای در محیط ساخته‌شده.

طرد: منابع ناقص، قدیمی یا غیرمرتبط با محیط ساخته‌شده.

۲-۲- استخراج و تحلیل داده‌ها

استخراج اطلاعات: شامل نوع اقدامات اقتصاد چرخه‌ای (مانند بازاستفاده مواد و بهره‌وری انرژی)، مزایا، چالش‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی.

تحلیل داده‌ها: دسته‌بندی موضوعی یافته‌ها برای شناسایی روندها، نقاط توافق و شکاف‌ها؛ استفاده از تحلیل مقایسه‌ای برای ارزیابی همگرایی یا تضاد نتایج.

ترکیب اطلاعات: تدوین نمای کلی از شیوه‌ها، موانع و فرصت‌های اقدامات چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود.

۳-۲- اعتبارسنجی و مقایسه داده‌ها

نتایج منابع مختلف برای شناسایی همگرایی‌ها و تضادها مقایسه شدند و روندهای مشترک و موارد منحصربه‌فرد بررسی شدند. این روش‌شناسی تحلیلی جامعی از وضعیت دانش موجود درباره اقتصاد چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود ارائه داده و به شناسایی چالش‌ها و فرصت‌ها برای سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری در جهت توسعه محیط ساخته‌شده پایدار کمک می‌کند.

۳- مرور ادبیات:

۱-۳- اصول اقتصاد چرخه‌ای

۱-۱-۳- طراحی برای حذف زباله و آلودگی

یکی از اصول اساسی اقتصاد چرخه‌ای طراحی محصولات و فرآیندهایی است که از ابتدا زباله و آلودگی را به حداقل می‌رسانند. این امر شامل بازاندیشی در طراحی محصول برای بهینه‌سازی استفاده از منابع در کل چرخه عمر، ایجاد محصولاتی که به راحتی تعمیر، بازاستفاده یا بازیافت شوند، می‌باشد. این کار باعث افزایش طول عمر محصولات و کاهش نیاز به مواد جدید می‌شود (Ellen MacArthur, 2013; رضوی، ۱۴۰۱; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). با ادغام اصول طراحی زیست‌محیطی، شرکت‌ها می‌توانند مصرف مواد را کاهش داده، از مواد خطرناک اجتناب کرده و قابلیت بازیافت محصولات را افزایش دهند که این اقدامات منابع را حفظ کرده و تأثیرات زیست‌محیطی را در تمام مراحل تولید، استفاده و پایان عمر کاهش می‌دهد (Bocken et al., 2017; Stahel, 2019; عباسی و همکاران، ۱۳۹۸).

گذار به اقتصاد چرخه‌ای می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ به کاهش ۳۹٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش ۳۲٪ مصرف مواد اولیه منجر شود (WBCSD, 2024; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). ترنر (Turner, 2024) تأکید می‌کند که انعطاف‌پذیری در تعمیر اموال می‌تواند از طریق شیوه‌های چرخه‌ای تقویت شود و زباله‌ها را در مرحله طراحی کاهش داده و نوآوری را افزایش دهد (رضوی، ۱۴۰۱). این شیوه‌ها نه تنها چالش‌های زیست‌محیطی را رفع می‌کنند، بلکه موجب ایجاد شغل و رشد اقتصادی می‌شوند (WBCSD, 2024; جعفری و همکاران، ۱۳۹۷). اقدامات اقتصاد چرخه‌ای، مانند بازاستفاده از مصالح ساختمانی، می‌توانند وابستگی به منابع جدید را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند و در عین حال زباله‌های دفن‌شده را کاهش دهند (González et al., 2021; عبادی و تقوی، ۱۳۹۹).

شورای جهانی ساختمان‌های سبز (WorldGBC, 2019) بر ضرورت پرداختن به کربن تعبیه‌شده در مصالح ساختمانی تأکید دارد، که ممکن است تا ۵۰٪ از کل ردپای کربنی یک ساختمان را در طول چرخه عمر آن تشکیل دهد. با تمرکز بر بازاستفاده از مواد و مصالح کم‌کربن، می‌توان کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد کرد (عباسی، ۱۳۹۸; نوروزی، ۱۳۹۸). علاوه بر این،

در شهرهایی مانند آمستردام، بازاندیشی در طراحی شهری و استفاده از مصالح قابل بازیافت، کمک قابل توجهی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کرده است (Amsterdam, 2024).

مدیریت مؤثر زباله نیز در مدل‌های اقتصاد چرخه‌ای ضروری است، زیرا کیفیت زندگی را بهبود می‌بخشد این امر بر حمایت دولت برای پیشرفت فناوری‌های کاهش زباله و آموزش عمومی تکیه دارد (Hondroyiannis et al., 2024; Romano et al., 2022; رضوی، ۱۴۰۱؛ زمانی و همکاران، ۱۴۰۰). افزایش طول عمر محل‌های دفن زباله از طریق شیوه‌های کارآمد مدیریت زباله، مانند جداسازی، بازیافت و بازیابی بهبود یافته، می‌تواند به طور قابل توجهی حجم زباله ارسال شده به محل‌های دفن زباله را کاهش دهد و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تجزیه زباله‌ها را به حداقل برساند (D'Adamo et al., 2024; Shakirov et al., 2024; Simion et al., 2013; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). علاوه بر این، کشورهای پیشرو مانند فنلاند و دانمارک، به‌ویژه در کپنهاگ، توانسته‌اند با اجرای طرح‌های جامع مدیریت زباله، فرآیندهای تفکیک و بازیافت را بهینه‌سازی کرده و تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهند (Calisto Friant et al., 2020; Copenhagen, 2019).

۳-۱-۲- نگاه‌داشت محصولات و مواد در چرخه (رویکرد ۳R)

رویکرد ۳R—کاهش، بازاستفاده، بازیافت—یک استراتژی اساسی در اقتصاد چرخه‌ای است که هدف آن به حداقل رساندن استخراج منابع و تولید زباله است (Kirchherr et al., 2017; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۸).

• کاهش

به حداقل رساندن مصرف مواد و تولید زباله از ابتدا از طریق بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و طراحی محصولات با مواد کمتر. در ایران، کاهش مصرف مواد اولیه در صنعت ساختمان به دلیل هزینه‌های بالای تأمین مواد خام و فشارهای زیست‌محیطی اهمیت یافته است (رضوی، ۱۴۰۱). علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های نوین مانند طراحی به کمک هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف مواد در تولید محصولات، به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته کاهش زباله در صنایع مختلف معرفی شده است (Hill, 2024).

• بازاستفاده

افزایش چرخه عمر محصولات با یافتن راه‌های جدید برای استفاده از موادی که ممکن است دور ریخته شوند. این شامل بازسازی محصولات، استفاده مجدد از مواد و طراحی برای جداسازی و مونتاژ آسان است. بازاستفاده از اجزا، به‌ویژه در بخش ساخت‌وساز، منابع را حفظ کرده و نوآوری در بازسازی و بازتولید را حمایت می‌کند (Akinade et al., 2020; Charef & Emmitt, 2018; Chen et al., 2022; Ghisellini et al., 2016; Stahel, 2016; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰). در ایران، بازسازی و بازاستفاده از مواد ساختمانی نظیر آجر و بتن بازیافتی، گامی مهم در کاهش زباله‌های ساختمانی محسوب می‌شود (عباسی و همکاران، ۱۳۹۸).

• بازیافت

بازیافت مواد زائد به محصولات جدید نیاز به مواد اولیه جدید را کاهش داده و زباله‌های ارسال شده به محل‌های دفن زباله را به حداقل می‌رساند. سیستم‌های بازیافت مؤثر به حفظ مواد با ارزش در چرخه، کاهش ردپای زیست‌محیطی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند (Ferronato et al., 2023; Kirchherr et al., 2017; Korhonen et al., 2018; Ram et al., 2020; Rossi et al., 2016; Wang et al., 2021; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰). بانک سرمایه‌گذاری اروپا (European Investment, 2024) خاطرنشان می‌کند که اجرای راه‌حل‌های چرخه‌ای در بخش‌های کلیدی مانند سیمان، فولاد و پلاستیک می‌تواند تا سال ۲۰۵۰ حدود ۹.۳ میلیارد تن از انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان را حذف کند (نوروزی، ۱۳۹۸).

در ایران، برنامه‌های پایدار برای بازیافت، به ویژه در شهرهای بزرگ، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفع زباله‌ها را کاهش دهد و فرصت‌های جدیدی برای مدیریت پایدار مواد فراهم کند. از جمله این اقدامات می‌توان به توسعه سیستم‌های مدیریت پسماند و فناوری‌های بازیافت در مناطق شهری اشاره کرد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷؛ عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

علاوه بر این، نمونه‌هایی از شهرهای پیشرو مانند کپنهاگ و آمستردام نشان می‌دهند که ایجاد سیستم‌های بازیافت شهری که شامل مشارکت جامعه باشد، نه تنها نرخ بازیافت را افزایش می‌دهد بلکه آگاهی زیست‌محیطی مردم را نیز تقویت می‌کند (Calisto Friant et al., 2020; Copenhagen, 2019). چنین مدل‌هایی می‌توانند در شهرهای بزرگ ایران نیز مورد استفاده قرار گیرند و به عنوان نمونه‌های موفق در مدیریت پسماند معرفی شوند (رضوی، ۱۴۰۱).

۳-۱-۳- بازسازی سیستم‌های طبیعی

یکی از اصول کلیدی اقتصاد چرخه‌ای ارتقاء سیستم‌های طبیعی به جای تخلیه آنها است. این شامل استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، ترویج شیوه‌های کشاورزی بازسازی‌کننده و اتخاذ فرآیندهایی است که محیط طبیعی را ترمیم و بهبود می‌بخشند. هدف ایجاد یک سیستم اقتصادی بازسازی‌کننده است که از سلامت و تاب‌آوری اکوسیستم‌ها حمایت می‌کند (Geissdoerfer et al., 2017). برای مثال، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی در فرآیندهای تولید و توزیع می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و جلوگیری از تخریب بیشتر منابع طبیعی کمک کند (Hill, 2024; نوروزی، ۱۳۹۸).

اقتصاد چرخه‌ای همچنین بازسازی زیستگاه‌ها و اکوسیستم‌های تخریب‌شده توسط فعالیت‌های صنعتی را از طریق ابتکاراتی مانند جنگل‌کاری، احیای تالاب‌ها و ترمیم زمین‌های آلوده ترویج می‌کند. این اقدامات نه تنها تنوع زیستی را افزایش داده و تعادل اکولوژیکی را بازسازی می‌کنند، بلکه خدمات اکوسیستمی ضروری مانند تصفیه آب، تنظیم سیلاب و ذخیره‌سازی کربن را فراهم می‌کنند (Fletcher & Murray, 2016; Ghisellini et al., 2016). به عنوان نمونه، جنگل‌کاری مجدد در مناطق تخریب‌شده توسط فعالیت‌های صنعتی نه تنها به احیای تنوع زیستی کمک کرده بلکه به عنوان یک استراتژی برای کاهش کربن اتمسفر و مقابله با تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود (Amsterdam, 2024).

شیوه‌های نوسازی چرخه‌ای همچنین استفاده از مواد و فرآیندهای سازگار با محیط زیست را ترویج می‌دهند، تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رسانند و از پایداری بلندمدت سیستم‌های طبیعی حمایت می‌کنند (Korhonen et al., 2018; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

در ایران، طرح‌هایی مانند احیای تالاب انزلی و کاشت درخت در مناطق کویری به عنوان نمونه‌هایی از بازسازی اکوسیستم مطرح شده‌اند که به بهبود شرایط زیست‌محیطی و کاهش اثرات تخریبی فعالیت‌های صنعتی کمک می‌کنند (رضوی، ۱۴۰۱). علاوه بر این، تلاش‌های محلی برای ترویج کشاورزی بازسازی‌کننده، مانند استفاده از کودهای طبیعی و روش‌های حفظ خاک، به تقویت تنوع زیستی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کرده است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷؛ نوروزی، ۱۳۹۸).

مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که اتخاذ مدل‌های چرخه‌ای در مدیریت منابع طبیعی، از جمله آب، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی ناشی از تخلیه منابع را کاهش دهد. برای مثال، بازچرخانی آب در بخش کشاورزی و صنعت یکی از راهکارهایی است که به حفظ منابع آبی و کاهش تخریب زیستگاه‌های آبی کمک می‌کند (WBCSD, 2024; عباسی و همکاران، ۱۳۹۸). این اقدامات همچنین به ایجاد یک چارچوب پایدار برای مدیریت اکوسیستم‌ها در مناطق آسیب‌پذیر کمک می‌کنند و نقش کلیدی در مقابله با چالش‌های تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند (Fletcher & Murray, 2016; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

۲-۳- مزایای کلیدی اقدامات اقتصاد چرخه‌ای در ساخت‌وساز و مدیریت ساختمان

۳-۲-۱- مزایای زیست‌محیطی

اقدامات اقتصاد چرخه‌ای به کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز کمک می‌کنند. این اقدامات شامل بازاستفاده و بازیافت مواد، کاهش مصرف مواد خام، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. برای مثال:

استفاده از فولاد بازیافتی می‌تواند تا ۶۰٪ انرژی تولید فولاد را کاهش دهد (Circularity Gap Report 2024; Pomponi & Moncaster, 2017).

جایگزینی سیمان با مواد بازیافتی مانند خاکستر بادی، انتشار کربن تعبیه‌شده را تا ۴۰٪ کاهش می‌دهد (Pomponi & Moncaster, 2017b).

استراتژی‌های کاهش زباله می‌توانند ضایعات ساخت‌وساز را تا ۹۰٪ کاهش دهند (Adams et al., 2017).

۳-۲-۲- مزایای اقتصادی

اجرای اصول اقتصاد چرخه‌ای موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها، افزایش ارزش املاک و بهره‌وری اقتصادی می‌شود. به عنوان مثال: بازسازی با فناوری‌های بهره‌ور انرژی می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰٪ کاهش دهد و هزینه‌های جاری را کاهش دهد (Aste et al., 2017).

پروژه‌هایی مانند ساختمان Edge در آمستردام تا ۷۰٪ در هزینه‌های انرژی صرفه‌جویی کرده‌اند (Hossain et al., 2020).

اجرای اصول چرخه‌ای می‌تواند هزینه‌های مواد و عملیات ساختمانی را تا ۳۲٪ کاهش دهد (Ellen MacArthur, 2019).

۳-۲-۳- مزایای اجتماعی

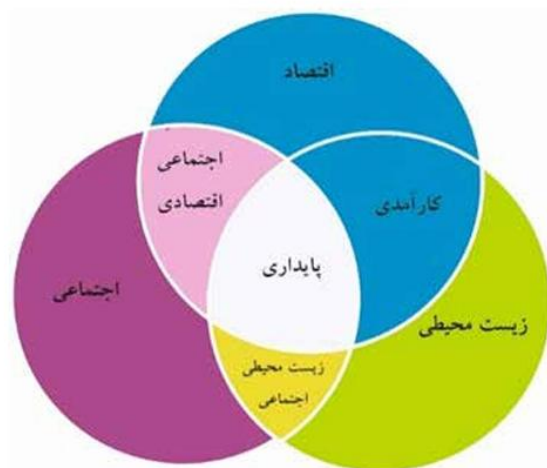
این اقدامات به بهبود رفاه اجتماعی، سلامت، و برابری کمک می‌کنند:

استفاده از مواد غیرسمی و بهبود کیفیت محیط داخلی، سلامت و بهره‌وری ساکنان را ارتقا می‌دهد (Al Horr et al., 2016).

برنامه‌های مشارکتی و آموزشی، حس مسئولیت‌پذیری و انسجام اجتماعی را تقویت می‌کنند (Williams, 2019).

فرصت‌های شغلی در صنایع سبز باعث ترویج برابری اجتماعی و توسعه اقتصادی محلی می‌شوند (De los Rios & Charnley, 2017).

اقدامات اقتصاد چرخه‌ای با کاهش اثرات زیست‌محیطی، صرفه‌جویی اقتصادی، و تقویت انسجام اجتماعی، به تسریع گذار به ساخت‌وسازی پایدار و عادلانه کمک می‌کنند. در ایران، این اقدامات پتانسیل کاهش آلودگی و ایجاد فرصت‌های شغلی پایدار را دارند.



تصویر ۳: ارتباط بین مولفه‌های اقتصاد چرخه‌ای در توسعه پایدار (davoodabadi et al., 2018)

۴- چالش‌ها و راه‌حل‌های اجرای اقدامات چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود

اجرای اقدامات چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود به دلیل موانع مختلف با چالش‌هایی روبرو است. در این بخش، موانع متداول شناسایی شده و راه‌حل‌های عملی برای غلبه بر آنها ارائه می‌شود.

۱-۴- موانع رایج و راه‌حل‌های عملی

۱-۴-۱- هزینه‌های بالای اولیه

سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای بازسازی یکی از موانع اصلی برای پذیرش اقدامات اقتصاد چرخه‌ای در ساختمان‌ها است. این هزینه‌های اولیه، با وجود پتانسیل کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش ارزش ساختمان در طول زمان، برای بسیاری از ذی‌نفعان مانع است (Aste et al., 2017).

راه‌حل‌ها:

- مشوق‌ها و حمایت‌های مالی: دولت‌ها و سازمان‌ها می‌توانند از طریق ارائه مشوق‌های مالی مانند یارانه‌ها، معافیت‌های مالیاتی و وام‌های با بهره پایین، بار مالی را کاهش داده و سرمایه‌گذاری در بازسازی را تشویق کنند (Rosenow et al., 2016; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
در ایران، برنامه‌هایی مانند "افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها"، با ارائه یارانه‌های انرژی و معافیت‌های مالیاتی، توانسته‌اند سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بازسازی سبز را تسهیل کنند (عبادی و تقوی، ۱۳۹۹). علاوه بر این، برنامه‌های بین‌المللی مانند وام‌های کم‌بهره می‌توانند الگویی برای کاهش هزینه‌های اولیه پروژه‌های بازسازی در ایران فراهم کنند (Sustainable Energy Authority of, 2020; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).
- تحلیل هزینه-فایده و صرفه‌جویی بلندمدت:

صاحبان ساختمان باید به مزایای مالی بلندمدت بازسازی چرخه‌ای توجه کنند. مطالعات نشان می‌دهند که صرفه‌جویی در انرژی و افزایش ارزش ملک می‌تواند هزینه‌های اولیه را جبران کند (Pomponi & Moncaster, 2017b); شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

گبهارت و همکاران (Gebhardt et al., 2024) تأکید کرده‌اند که شیوه‌های چرخه‌ای تاب‌آوری اقتصادی ساختمان‌ها را افزایش داده و آنها را برای سرمایه‌گذاری‌های آینده جذاب‌تر می‌کنند.

همچنین، مدل‌سازی اقتصادی بازگشت سرمایه برای پروژه‌های بازسازی سبز می‌تواند صاحبان املاک را به انجام این اقدامات ترغیب کند (Turner, 2024).

- استفاده از مواد بازیافتی و بومی:

به‌کارگیری مواد بازیافتی و تولید محلی در فرآیند بازسازی می‌تواند هزینه‌های اولیه را کاهش داده و در عین حال اصول چرخه‌ای را تقویت کند. در ایران، استفاده از مصالح بازیافتی نظیر بتن و آجر بازیافتی در برخی پروژه‌های پایلوت نشان داده که این روش می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌ها را کاهش دهد (شریفی و همکاران، ۱۳۹۷; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).

۴-۱-۲- کمبود آگاهی و دانش

یکی از چالش‌های اساسی در پذیرش اصول اقتصاد چرخه‌ای، کمبود آگاهی و درک این اصول در میان صاحبان، مدیران و ساکنان ساختمان‌ها است. این کمبود دانش می‌تواند منجر به مقاومت یا تردید در سرمایه‌گذاری در اقدامات پایدار شود (Suárez et al., 2021; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

راه‌حل‌ها:

- آموزش و افزایش آگاهی:

افزایش درک اصول چرخه‌ای و مزایای آنها از طریق برنامه‌های آموزشی، کارگاه‌ها، جلسات آموزشی و دوره‌های آنلاین می‌تواند به‌زی نفعان در پذیرش اقدامات پایدار کمک کند (Janda et al., 2021; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

- کمپین‌های اطلاعاتی:

استفاده از کانال‌های رسانه‌ای مختلف مانند رسانه‌های اجتماعی، پلتفرم‌های دیجیتال، و تبلیغات محلی می‌تواند مزایای شیوه‌های چرخه‌ای را برجسته کرده و راهنمایی‌های عملی در مورد اجرای آنها ارائه دهد (van Lidth de Jeude et al., 2020; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).

- داستان‌های موفقیت و مطالعات موردی:

به اشتراک‌گذاری تجربیات موفق از پروژه‌های بازسازی چرخه‌ای می‌تواند با نشان دادن امکان‌پذیری و مزایای این اقدامات الهام‌بخش‌دی نفعان باشد. به‌عنوان مثال، پروژه‌های موفق‌ی مانند ساختمان Edge در آمستردام نشان داده‌اند که اقتصاد چرخه‌ای می‌تواند صرفه‌جویی مالی و مزایای محیط‌زیستی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد (Turner, 2024; عباسی و همکاران، ۱۳۹۸).

- توسعه حرفه‌ای:

ارائه برنامه‌های گواهی برای متخصصان ساختمان در زمینه اصول اقتصاد چرخه‌ای می‌تواند دانش در صنعت را افزایش داده و اجرای صحیح را تضمین کند (Gebhardt et al., 2024; جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).

- آموزش فناوری‌های سبز:

- برنامه‌های آموزشی تخصصی در زمینه فناوری‌های سبز مانند سیستم‌های مدیریت هوشمند ساختمان و بازیافت مصالح ساختمانی می‌توانند مهارت‌های لازم برای پذیرش اقتصاد چرخه‌ای را تقویت کنند (Turner, 2024; رضوی، ۱۴۰۱).
- همکاری با دانشگاه‌ها و موسسات پژوهشی:
 - همکاری بین دانشگاه‌ها، موسسات تحقیقاتی و صنعت ساختمان می‌تواند به طراحی دوره‌ها و برنامه‌های آموزشی متمرکز بر اقتصاد چرخه‌ای منجر شود. این همکاری‌ها می‌توانند از توسعه ابزارهای آموزشی نوین و به‌روز حمایت کنند (Janda et al., 2021; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).
 - شبکه‌سازی و اشتراک دانش:
 - ایجاد پلتفرم‌های همکاری بین ذی‌نفعان، از جمله مالکان ساختمان، معماران، و پیمانکاران، می‌تواند به اشتراک‌گذاری بهترین شیوه‌ها و دانش کاربردی کمک کند. شبکه‌های تخصصی و کنفرانس‌های بین‌المللی می‌توانند متخصصان را گرد هم آورده و فرصت‌هایی برای تبادل دانش فراهم کنند (Suárez et al., 2021; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
 - ایجاد منابع و راهنماهای عملی:
 - طراحی و توزیع منابع آموزشی جامع، مانند راهنماهای گام‌به‌گام برای اجرای اصول اقتصاد چرخه‌ای، می‌تواند در کاهش پیچیدگی‌های فنی و افزایش درک افراد کمک کند. این منابع باید به زبان‌های محلی نیز در دسترس باشند تا دسترسی‌پذیری آنها افزایش یابد (van Lidth de Jeude et al., 2020; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).
 - با تمرکز بر آموزش، توسعه حرفه‌ای و به اشتراک‌گذاری دانش، کمبود آگاهی و دانش در میان ذی‌نفعان می‌تواند برطرف شود. این رویکردها نه تنها به پذیرش بهتر اصول اقتصاد چرخه‌ای کمک می‌کنند، بلکه مهارت‌ها و درک لازم برای اجرای موفقیت‌آمیز این اصول را در سطح جامعه و صنعت تقویت می‌کنند.

۳-۱-۴- محدودیت‌های فنی

- ساختمان‌های موجود اغلب دارای محدودیت‌های ساختاری و فنی هستند که بازسازی را دشوار می‌کند. ساختمان‌های قدیمی ممکن است با فناوری‌ها یا مواد مدرن سازگار نباشند، که این موضوع اجرای اقدامات چرخه‌ای را پیچیده می‌کند (Mohammadi et al., 2021; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
- راه‌حل‌ها:

- کمک‌های فنی و نوآوری:
- مقابله با محدودیت‌های فنی مستلزم توسعه فناوری‌های انعطاف‌پذیر و قابل تطبیق است که برای انواع و سنین مختلف ساختمان‌ها مناسب باشد.
- نوآوری در مواد ساختمانی:
- توسعه مواد ساختمانی پایدار که بازاستفاده یا بازیافت آنها آسان باشد، اهمیت ویژه‌ای دارد. به عنوان مثال، استفاده از بتن بازیافتی یا فولاد بازیافتی می‌تواند اجرای اصول چرخه‌ای را در ساختمان‌های قدیمی تسهیل کند (Allwood & et al., 2020; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).
- تکنیک‌های ساخت‌وساز پیشرفته:
- استفاده از تکنیک‌های ساخت مازولار و اجزای پیش‌ساخته می‌تواند سازگاری با اصول چرخه‌ای را افزایش دهد. این روش‌ها برای بازسازی ساختمان‌های قدیمی که نیاز به تغییرات ساختاری دارند، مناسب هستند (Cabeza et al., 2018; Stahel, 2019; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

- به کارگیری مواد بومی و نوآورانه:
استفاده از مواد بومی نظیر خاک رس تثبیت شده و فناوری های محلی می تواند محدودیت های فنی را کاهش داده و بازسازی چرخه ای را تسهیل کند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
 - ابزارهای دیجیتال:
استفاده از ابزار مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM)^۱ می تواند فرآیندهای بازسازی را بهینه کرده و کارایی ساختمان را بهبود بخشد. این ابزارها امکان شناسایی مناطقی از ساختمان را که بیشترین پتانسیل برای بازسازی و بهینه سازی چرخه ای دارند، فراهم می کنند (Garcia & Tenorio, 2020؛ زمانی و همکاران، ۱۴۰۰). BIM می تواند برای مدیریت سناریوهای پایان عمر ساختمان ها و تسهیل بازیابی و بازاستفاده مواد نیز مفید باشد (Charef & Emmitt, 2018؛ رضوی، ۱۴۰۱). استفاده از سیستم های مدیریت انرژی هوشمند در ترکیب با BIM می تواند راه حل هایی برای بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه ها ارائه دهد، در حالی که اصول چرخه ای را نیز ارتقا می بخشد (Eberhardt et al., 2022؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).
 - پشتیبانی فنی و تحقیقات کاربردی:
همکاری بین دانشگاه ها، شرکت های فناوری و بخش ساختمان می تواند به توسعه راه حل های فنی قابل اجرا برای بازسازی ساختمان های قدیمی کمک کند. این همکاری ها می توانند شامل آزمایش مواد جدید، توسعه فناوری های بازیافت، و پیاده سازی ابزارهای دیجیتال پیشرفته باشند (Mohammadi et al., 2021؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
 - آزمایشگاه های نوآوری:
ایجاد آزمایشگاه های نوآوری در بخش ساختمان می تواند به آزمایش فناوری ها و مواد جدید در پروژه های واقعی کمک کند. این رویکرد علاوه بر کاهش ریسک، به ذی نفعان امکان می دهد تا بهترین شیوه ها را شناسایی و در مقیاس بزرگ تر پیاده سازی کنند (Eberhardt et al., 2022؛ زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).
- با استفاده از ابزارهای دیجیتال مانند BIM، توسعه مواد پایدار، و همکاری بین بخشی، محدودیت های فنی می توانند کاهش یابند. این راه حل ها نه تنها اجرای اصول چرخه ای را تسهیل می کنند، بلکه به ارتقای تاب آوری ساختمان های قدیمی و بهبود عملکرد زیست محیطی آنها کمک می کنند.

۴-۱-۴- موانع قانونی

چارچوب های قانونی و مقررات ساختمانی می توانند چالش های مهمی را برای اجرای اقدامات چرخه ای ایجاد کنند. مقررات قدیمی ممکن است با فناوری های جدید یا شیوه های اقتصاد چرخه ای سازگار نباشند و موانع قانونی و بوروکراتیک برای ذی نفعان ایجاد کنند (Teubler et al., 2018). ریتزن و سنداستورم (Ritzen & Sandström, 2017) بیان می کنند که یکی از موانع مهم در اجرای اقتصاد چرخه ای، ناهماهنگی مقررات موجود با اصول چرخه ای است.

راه حل ها:

حمایت های سیاستی و اصلاح مقررات:

- به روزرسانی سیاست ها و مقررات ساختمانی:
دولت ها و نهادهای قانون گذار می توانند با به روزرسانی سیاست ها و مقررات، از اقدامات چرخه ای در ساخت و ساز حمایت کنند. این شامل بازبینی مقررات ساختمانی برای سازگاری با فناوری ها و مواد جدید است. به عنوان مثال، الزام

^۱ Building Information Modeling

استانداردهای پایداری مانند BREEAM^۲ یا LEED^۳ می‌تواند استفاده از شیوه‌های چرخه‌ای را تسهیل کند (Haapio & Viitaniemi, 2008; عباسی و همکاران، ۱۳۹۸). برنامه اقدام اقتصاد چرخه‌ای اتحادیه اروپا (European, 2019) بر نیاز به قوانین انعطاف‌پذیری تأکید دارد که بتواند مدل‌ها و فناوری‌های چرخه‌ای نوظهور را حمایت کند. تدوین مقررات ملی مرتبط با استفاده از مواد بازیافتی در ساخت‌وساز، الزام به تفکیک زباله در محل پروژه، و ارائه استانداردهای ملی برای بازسازی پایدار می‌تواند به کاهش چالش‌های قانونی کمک کند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).

- مشارک‌های عمومی-خصوصی: همکاری بین بخش‌های عمومی و خصوصی می‌تواند به غلبه بر موانع قانونی کمک کند. اشتراک‌گذاری دانش و تجربه بین این بخش‌ها، تصویب مقررات جدید را تسریع می‌کند و منابع لازم برای اجرای پروژه‌های اقتصاد چرخه‌ای را فراهم می‌کند (Ghisellini et al., 2016; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

شهرهای پیشرو مانند آمستردام و کپنهاگ از مدل‌های همکاری عمومی-خصوصی برای اجرای موفق پروژه‌های چرخه‌ای استفاده کرده‌اند، که این مدل‌ها می‌توانند در ایران نیز الهام‌بخش باشند (Amsterdam, 2024; Calisto Friant et al., 2020).

- مشوق‌های قانونی: دولت‌ها می‌توانند با ارائه معافیت‌های مالیاتی به شرکت‌هایی که از مواد بازیافتی استفاده می‌کنند یا پروژه‌های بازسازی پایدار انجام می‌دهند، پذیرش شیوه‌های چرخه‌ای را تشویق کنند (Rosenow et al., 2016; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). ساده‌سازی مراحل قانونی برای پروژه‌های اقتصاد چرخه‌ای، مانند کاهش الزامات مجوزهای ساخت برای استفاده از مواد بازیافتی، می‌تواند موانع را کاهش دهد و پروژه‌ها را تسریع کند (Teubler et al., 2018).

- آزمایشگاه‌های سیاست‌گذاری: ایجاد آزمایشگاه‌های سیاست‌گذاری که در آن قوانین جدید مرتبط با اقتصاد چرخه‌ای به‌صورت آزمایشی اجرا و ارزیابی شوند، می‌تواند به شناسایی و رفع موانع قانونی کمک کند. این روش در برخی کشورها مانند آلمان و دانمارک موفق بوده است و می‌تواند در ایران نیز پیاده‌سازی شود (European, 2019; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

با اصلاح چارچوب‌های قانونی، ترویج همکاری بین بخش‌های عمومی و خصوصی، و ارائه مشوق‌های مالی و قانونی، موانع قانونی می‌توانند برطرف شوند. این اقدامات می‌توانند به تسریع پذیرش اصول اقتصاد چرخه‌ای در صنعت ساخت‌وساز و بهبود پایداری محیط ساخته شده کمک کنند.

۴-۱-۵- مسائل بازار و زنجیره تأمین

دسترسی محدود و هزینه بالای مواد و فناوری‌های پایدار می‌تواند پذیرش اقدامات چرخه‌ای را دشوار کند. تقاضای محدود بازار برای مواد بازیافتی یا محصولات ساخته‌شده با اصول چرخه‌ای می‌تواند تولیدکنندگان را برای توجیه تولید با چالش مواجه کند، که منجر به هزینه‌های بالاتر و دسترسی محدود می‌شود (Sartor et al., 2021; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

راه‌حل‌ها:

- توسعه بازار و تقویت زنجیره تأمین:

² Building Research Establishment Environmental Assessment Method

³ Leadership in Energy and Environmental Design

دولت‌ها می‌توانند از طریق سیاست‌های خرید دولتی، تقاضا برای مواد پایدار را افزایش دهند. برای مثال، الزام استفاده از مواد بازیافتی در پروژه‌های دولتی می‌تواند تقاضای بازار را افزایش داده و تولید این مواد را مقرون‌به‌صرفه‌تر کند (Sartor et al., 2021).

ارائه مشوق‌های مالی مانند یارانه‌ها و معافیت‌های مالیاتی برای تولیدکنندگان و سازندگان که از مواد بازیافتی استفاده می‌کنند، می‌تواند تولید این مواد را جذاب‌تر کند (European Commission 2020; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹). حمایت از توسعه زیرساخت‌هایی مانند تأسیسات بازیافت منطقه‌ای و شبکه‌های توزیع برای مواد پایدار می‌تواند دسترسی به این مواد را تسهیل کند و هزینه‌ها را کاهش دهد (Pomponi & Moncaster, 2017b; جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).

- همکاری میان صنایع:
ایجاد شبکه‌هایی که بازیافت‌کنندگان، تولیدکنندگان، و سازندگان را گرد هم آورد، می‌تواند به اشتراک‌گذاری منابع و کاهش هزینه‌ها کمک کند. این همکاری‌ها همچنین می‌تواند در دسترس بودن مواد بازیافتی با کیفیت مناسب را تضمین کند (Rahla et al., 2021; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
در شهرهایی مانند روتردام، همکاری میان صنایع ساخت‌وساز و مدیریت زباله منجر به توسعه مصالح پایدار و ایجاد زنجیره تأمین کارآمد برای مواد بازیافتی شده است (Amsterdam, 2024; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).
- آموزش و ارتقای آگاهی:
با افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان درباره مزایای محصولات چرخه‌ای، تقاضا برای این محصولات افزایش می‌یابد. کمپین‌های آگاه‌سازی می‌توانند به تغییر نگرش عمومی نسبت به مواد بازیافتی و پایدار کمک کنند (Sartor et al., 2021; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).
برگزاری رویدادهایی برای نمایش محصولات چرخه‌ای و مواد بازیافتی می‌تواند به توسعه روابط بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان کمک کند و زنجیره تأمین را تقویت کند (Pomponi & Moncaster, 2017b; جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).
- ایجاد استانداردهای کیفیت:
تدوین استانداردهای کیفیت برای مواد بازیافتی می‌تواند اعتماد مصرف‌کنندگان و توسعه‌دهندگان را به این مواد افزایش داده و استفاده از آنها را گسترش دهد. این استانداردها می‌توانند به رفع نگرانی‌ها در مورد کیفیت و عملکرد مواد چرخه‌ای کمک کنند (European Commission 2020).

۵- راه‌کارهایی برای اجرای اقدامات چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود

۵-۱-۱- بازسازی برای بهره‌وری انرژی

- بهبود عایق‌ها:
ارتقای عایق دیوارها، سقف‌ها و کف‌ها می‌تواند به حفظ دماهای داخلی کمک کرده و نیاز به گرمایش و سرمایش را کاهش دهد. استفاده از مواد پیشرفته مانند آئروژل‌ها و پنل‌های عایق خلاء به‌عنوان راه‌حل‌های بازسازی عمیق توصیه می‌شود (Baetens et al., 2011).

- تعویض پنجره‌ها:
نصب پنجره‌های با عملکرد بالا شامل شیشه‌های دو یا سه‌جداره با پوشش‌های کم‌انتشار می‌تواند انتقال حرارت را کاهش داده و مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Cuce, 2016; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
- بهبود سیستم‌های تهویه مطبوع:
استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع با بهره‌وری انرژی بالا می‌تواند آسایش حرارتی را افزایش و مصرف انرژی را کاهش دهد (Delzendeh et al., 2017; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

۲-۵- مشوق‌های مالی و چارچوب‌های قانونی

- یارانه‌ها و کمک‌های مالی:
برنامه‌های ملی مانند "طرح ملی بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها" در ایران، بودجه‌های قابل‌توجهی برای بازسازی ساختمان‌ها با هدف بهره‌وری انرژی فراهم می‌کنند (عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).
- مشوق‌های مالیاتی:
معافیت‌های مالیاتی برای بهبودهای بهره‌ور انرژی، مشابه برنامه‌های بین‌المللی مانند Energy Efficient Home Credit، می‌توانند انگیزه مالی برای بازسازی ایجاد کنند (رضوی، ۱۴۰۱).
- حمایت‌های قانونی:
اصلاح قوانین ملی بهره‌وری انرژی و تدوین مقررات جدید برای استانداردسازی بازسازی‌های بهره‌ور انرژی، مشابه دستورالعمل‌های اتحادیه اروپا، می‌تواند بازسازی‌های پایدار را تسهیل کند (European Commission 2018; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

۳-۵- بازاستفاده و بازیافت مواد

- بازاستفاده مواد:
استفاده مجدد از اجزای ساختمانی مانند آجر، بتن و فولاد می‌تواند هزینه‌های بازسازی را کاهش دهد و تقاضا برای مواد خام را به حداقل برساند (Pomponi & Moncaster, 2017a; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).
- بازیافت مواد:
بازیافت مصالح ساختمانی تخریب‌شده و تولید محصولات جدید از آن‌ها، مانند بتن بازیافتی، می‌تواند ردپای زیست‌محیطی را کاهش داده و از دفن زباله جلوگیری کند (Ghisellini et al., 2016; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).

۴-۵- تخریب و بازاستفاده مواد

- تخریب انتخابی
جداسازی سیستماتیک ساختمان‌ها برای بازیابی مواد با ارزش. این روش به کاهش زباله‌های ساختمانی کمک می‌کند و در پروژه‌های پایدار در اروپا مانند دانمارک و هلند مورد استفاده قرار گرفته است (Crowther, 2017; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

- بازاستفاده تطبیقی
تبدیل ساختمان‌های موجود به کاربری‌های جدید بدون تخریب کامل، انرژی تعبیه‌شده را حفظ کرده و نیاز به مواد اولیه را کاهش می‌دهد. این رویکرد در پروژه‌های بازسازی در اروپا و ایران موفقیت‌آمیز بوده است (Langston & Shen, 2007; جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).

۵-۵- گنجاندن مواد بازیافتی در بازسازی ساختمان‌ها

- مصالح بازیافتی
استفاده از بتن بازیافتی در ساخت فونداسیون‌ها، جاده‌ها و بلوک‌های ساختمانی به جای بتن تازه می‌تواند نیاز به مصالح اولیه را کاهش دهد و حجم ضایعات ساختمانی را به حداقل برساند. (Tam et al., 2012; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
چوب استخراج‌شده از ساختمان‌های تخریب‌شده می‌تواند برای ساخت عناصر ساختاری، دکوراسیون داخلی یا حتی تولید مبلمان مجدداً استفاده شود که موجب کاهش ضایعات، حفظ جنگل‌ها و پشتیبانی از جنگلداری پایدار می‌شود (Falk & McKeever, 2017; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).
چارف و امیت (Charef & Emmitt, 2018) تأکید دارند که BIM می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد مواد استفاده‌شده در ساختمان‌ها ذخیره کند و فرآیند بازیابی و بازاستفاده از آنها را تسهیل کند. این قابلیت باعث ارتقای استراتژی‌های اقتصاد چرخه‌ای می‌شود (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷; عباسی و همکاران، ۱۳۹۸).

۵-۶- بهره‌وری عملیاتی و نگهداری

مدیریت نگهداری تجهیزات و سیستم‌های ساختمان باعث افزایش عمر مفید، کاهش هزینه‌های چرخه عمر، و بهینه‌سازی عملکرد می‌شود (Shohet & Lavy, 2017; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

- سیستم‌های مدیریت انرژی
استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی برای نظارت و بهینه‌سازی مصرف انرژی در زمان واقعی، بهره‌وری را افزایش می‌دهد. این رویکرد در ساختمان‌های مسکونی و اداری کاربرد دارد (Menezes et al., 2012; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

• فناوری‌های ساختمان هوشمند

فناوری‌های اینترنت اشیا و هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی و کیفیت هوای داخلی استفاده می‌شوند. سیستم‌های اتوماسیون نیز روشنایی و تهویه را بر اساس شرایط محیطی کنترل می‌کنند که منجر به کاهش مصرف انرژی و هزینه‌ها می‌شود (Awad et al., 2021; Hong et al., 2016; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

• سیستم‌های اتوماسیون ساختمان

سیستم‌های خودکار برای مدیریت منابع، می‌توانند روشنایی، سیستم‌های تهویه مطبوع، و امنیت ساختمان را بر اساس میزان اشغال و شرایط محیطی تنظیم کنند. استفاده از این سیستم‌ها در ساختمان‌های تجاری و مسکونی برای بهینه‌سازی عملیات روزانه و کاهش مصرف انرژی می‌تواند موجب بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش راحتی و ایمنی ساکنان شود (Dounis & Caraiscos, 2009; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

۵-۷- صرفه‌جویی در مصرف آب

- تجهیزات کم‌مصرف
استفاده از شیرآلات، سردوش‌ها و توالت‌های مدرن کم‌مصرف که بدون کاهش عملکرد موجب کاهش مصرف آب شهری و هزینه‌های عملیاتی ساختمان‌ها می‌شوند. این راهکار در پروژه‌های ساختمان‌های سبز در کشورهای اروپایی نتایج مثبتی ارائه داده (Gleick, 2013; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).
- سیستم‌های جمع‌آوری آب باران
جمع‌آوری و ذخیره آب باران برای مقاصد غیرآشامیدنی مانند آبیاری فضای سبز و شست‌وشوی توالت‌ها موجب کاهش وابستگی به منابع آب شهری و کاهش هزینه‌های مصرف آب می‌شوند (Vialle et al., 2011; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).
- بازیافت آب خاکستری
بازچرخانی آب‌های مصرفی حاصل از سینک‌ها و دوش‌ها برای مصارف دیگر می‌تواند مصرف آب آشامیدنی و تولید فاضلاب را کاهش دهد (Gross, 2017; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

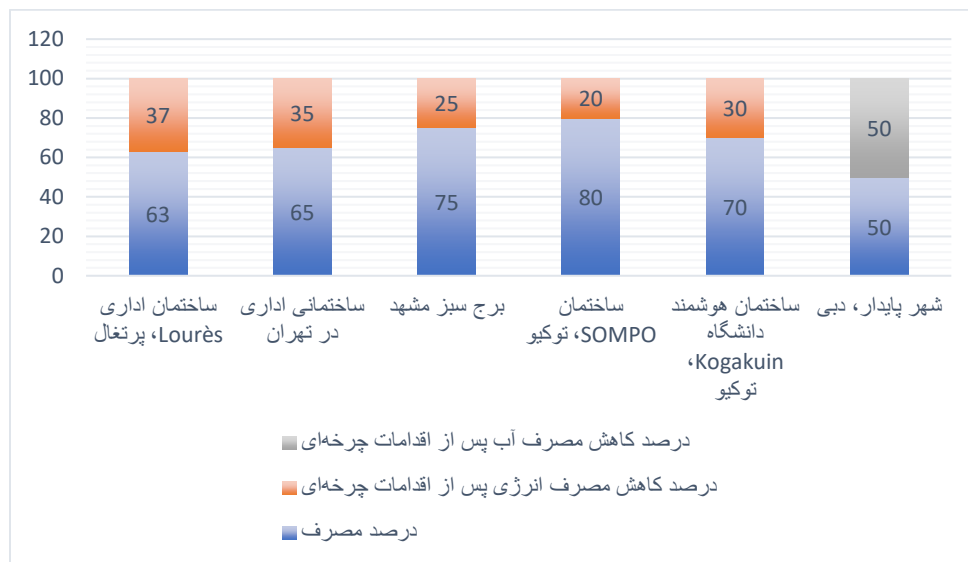
۵-۸- مشارکت و آموزش ذی‌نفعان

- ارائه اطلاعات و تحلیل‌های مالی در مورد صرفه‌جویی هزینه‌ها و افزایش ارزش ملک موجب افزایش آگاهی از مزایای اقدامات چرخه‌ای شود و سرمایه‌گذاری در شیوه‌های پایدار را تسریع کند (Keane et al., 2017; Mezher et al., 2019). همچنین آموزش‌های مرتبط با کاهش زباله و استفاده بهینه از منابع موجب رفتارهای مسئولانه ساکنان می‌شود که نقش کلیدی در بهره‌وری انرژی و کاهش زباله دارد (Ramos & de Jonge, 2020; Vahdat et al., 2021).
- این راهکارها نه تنها تأثیرات مثبت زیست‌محیطی دارند، بلکه از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه هستند و به ارتقای کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی کمک می‌کنند. با اعمال این استراتژی‌ها و بهره‌گیری از نمونه‌های موفق جهانی، صنعت ساخت‌وساز می‌تواند به سمت پایداری و مسئولیت‌پذیری بیشتر حرکت کند. همکاری بین دولت، بخش خصوصی و جامعه محلی برای تحقق این اهداف ضروری است. جدول ۲ نمونه‌هایی از بکارگیری اقدامات چرخه‌ای و نتایج آن‌ها و تصویر ۴ مطالعات موردی کمی در خصوص نتایج اعمال اقدامات چرخشی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نمونه‌هایی بکارگیری اقدامات چرخه‌ای و نتایج آن

پروژه	اقدامات	نتایج
ساختمان اداری Lourès، پرتغال	ارتقای عایق، نصب پنل‌های خورشیدی، روشنایی بهره‌ور	کاهش ۳۷٪ مصرف انرژی (Marques et al., 2019)
ساختمانی اداری در تهران	ارتقای عایق، تعویض پنجره‌ها، نصب LED	کاهش ۳۵٪ مصرف انرژی (عباسی و همکاران، ۱۳۹۸)
برج سبز مشهد	سیستم‌های تهویه مطبوع بهره‌ور، پنل‌های خورشیدی	کاهش ۲۵٪ هزینه انرژی، افزایش ارزش ملک (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸)

ساختمان SOMPO، توکیو	روشنایی LED، چیلرهای بهره‌ور	کاهش ۲۰٪ مصرف انرژی (Shinoda et al., 2021)
خانه چرخه‌ای، دانمارک	این پروژه آزمایشی از مواد بازیافتی و ارتقایافته مانند آجر، چوب و فولاد استفاده کرد	امکان‌پذیری شیوه‌های ساخت‌وساز چرخه‌ای را اثبات می‌کند (Klinge et al., 2020).
Alpnach، سوئیس	بازسازی یک ساختمان با بتن و چوب بازیافتی	کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و دستیابی به استانداردهای بالای پایداری منجر شد (Hossain et al., 2019).
ساختمان کریستال، لندن	استفاده از سیستم‌های اتوماسیون ساختمان پیشرفته و فناوری‌های هوشمند برای مدیریت بهینه مصرف انرژی.	تبدیل به یک ساختمان انرژی خنثی. کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری عملیاتی (Shinoda & Meirelles, 2024)
ساختمان هوشمند دانشگاه Kogakuin، توکیو	پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی پیشرفته و فناوری اینترنت اشیا برای نظارت و کنترل مصرف.	کاهش ۳۰٪ مصرف انرژی و افزایش راحتی و بهره‌وری ساکنان (Kogakuin University 2019).
شهر پایدار، دبی	استفاده از سیستم‌های بازیافت آب خاکستری و جمع‌آوری آب باران. طراحی محیط شهری با مصرف آب بهینه.	کاهش ۵۰٪ در مصرف آب و ترویج زندگی شهری پایدار (Ayyad, 2020).
CopenHill، کپنهاگ	ترکیب پشت‌بام‌های سبز با سیستم‌های جمع‌آوری آب باران. استفاده از فناوری‌های پیشرفته در مدیریت منابع آبی و تبدیل زباله به انرژی.	صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف آب و ارتقای پایداری شهری (Big, 2019).
One Central Park، سیدنی	مشارکت فعال ساکنان و کسب‌وکارها از طریق کارگاه‌ها و رویدادهای پایداری. تمرکز بر ایجاد جامعه‌ای قوی با محوریت حفاظت محیط زیست.	افزایش آگاهی اجتماعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی (Cox, 2018).
برنامه EDGE شورای ساختمان سبز	آموزش ذی‌نفعان درباره اصول ساختمان‌های پایدار. ارائه گواهی برای ساختمان‌هایی که به معیارهای ساختمان سبز دست یافته‌اند.	افزایش پذیرش شیوه‌های پایدار و ترویج پایداری بلندمدت (Green Building Council, 2020).



تصویر ۴: مطالعات کیفی کاهش مصرف پس از اقدامات چرخه‌ای

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش بر اهمیت اجرای اقدامات چرخه‌ای در ساختمان‌های موجود تأکید دارد و نشان می‌دهد که این شیوه‌ها می‌توانند به تحول بخش ساخت‌وساز به سمت آینده‌ای پایدارتر کمک کنند. اصول اقتصاد چرخه‌ای، از جمله بازاستفاده از مواد، بهره‌وری انرژی، کاهش زباله و صرفه‌جویی در مصرف آب، مزایای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی قابل‌توجهی ارائه می‌دهند.

۱-۶ مزایای زیست‌محیطی

- کاهش ردپای کربنی: اقداماتی مانند استفاده از مواد بازیافتی، بهینه‌سازی عملیات ساختمان و اجرای سیستم‌های بهره‌ور انرژی به کاهش انتشار کربن و تقاضای کلی انرژی کمک می‌کنند (Circularity Gap Report 2024; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).
- کاهش زباله: روش‌هایی همچون تخریب انتخابی و بازاستفاده مواد، حجم زباله‌های ساختمانی را کاهش داده و از دفن زباله جلوگیری می‌کنند (Crowther, 2017; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
- حفظ منابع طبیعی: ترویج بازاستفاده و بازیافت مواد ساختمانی، استخراج مواد خام را کاهش داده و از تخریب زیستگاه‌ها و کاهش تنوع زیستی جلوگیری می‌کند (Langston & Shen, 2007; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

۲-۶ مزایای اقتصادی

- صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی: فناوری‌های بهره‌ور انرژی مانند روشنایی LED و سیستم‌های تهویه مطبوع بهره‌ور می‌توانند هزینه‌های عملیاتی ساختمان‌ها را کاهش دهند (Pomponi & Moncaster, 2017a).
- کاهش هزینه‌های مرتبط با زباله و منابع: بازاستفاده و بازیافت مواد، هزینه‌های مرتبط با تأمین مواد اولیه و دفع زباله را کاهش می‌دهد (Gleick, 2013; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

- افزایش ارزش ملک: ساختمان‌هایی که شیوه‌های چرخه‌ای را ادغام می‌کنند، ارزش ملک بالاتری دارند و درآمد اجاره بیشتری جذب می‌کنند (De Boeck et al., 2015; شریفی و همکاران، ۱۳۹۷).

۳-۶- مزایای اجتماعی

- بهبود سلامت و رفاه: اقدامات چرخه‌ای با بهبود کیفیت محیط داخلی از طریق تهویه بهتر و استفاده از مواد غیرسمی، سلامت و راحتی ساکنان را افزایش می‌دهند (Al Horr et al., 2016; عباسی و همکاران، ۱۳۹۸).
- تقویت مشارکت اجتماعی: برنامه‌های آموزشی و شراکت‌های محلی در اقدامات چرخه‌ای، حس مالکیت و مسئولیت‌پذیری را در میان ساکنان تقویت کرده و پیوندهای اجتماعی را بهبود می‌بخشند (Ramos & de Jonge, 2020; نوروزی و همکاران، ۱۳۹۸).
- ترویج برابری اجتماعی: ایجاد فرصت‌های شغلی در زمینه‌های بازیافت و بازسازی، از توسعه اقتصادی محلی حمایت کرده و انسجام اجتماعی را تقویت می‌کند (Murray et al., 2017; زمانی و همکاران، ۱۴۰۰).

۴-۶- غلبه بر چالش‌ها

- با وجود چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه بالا، محدودیت‌های فنی، کمبود آگاهی، موانع قانونی و مشکلات بازار، راه‌حلی‌هایی مانند مشوق‌های مالی، اصلاحات سیاستی، توسعه فناوری‌های نوآورانه و آموزش ذی‌نفعان می‌توانند به رفع این موانع کمک کنند. این اقدامات به ایجاد دسترسی‌پذیری بیشتر برای شیوه‌های چرخه‌ای و ارتقای پذیرش عمومی کمک می‌کنند (Circularity Gap Report 2024; عبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

۵-۶- مسیر آینده

این مقاله بر لزوم همکاری میان سیاست‌گذاران، مالکان ساختمان، توسعه‌دهندگان، و جامعه مدنی برای تسریع گذار به اقتصاد چرخه‌ای تأکید دارد. با پیشرفت در این مسیر، محیط ساخته‌شده می‌تواند به اهداف توسعه پایدار نزدیک‌تر شود، نیازهای حال حاضر را برآورده کند و منابع و محیط زیست را برای نسل‌های آینده حفظ کند. دستیابی به بهره‌وری منابع، نیازمند یک رویکرد جامع است که شامل طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساختمان‌ها می‌شود.

۷- منابع

- اسدی، فاطمه، رضایی، محمدحسین، نوری، آرمان، ۱۴۰۰، اثرات زیست‌محیطی وابستگی به مدل‌های اقتصادی خطی، فصلنامه محیط زیست و منابع، ۱۷(۲)، 58-69.
- پارس‌مدیر، ۱۳۹۹. اقتصاد دورانی (چرخشی). <https://parsmodir.com/product/circular-economy.php>
- جعفری، سعید، حسینی، کامران، افشاری، علی‌رضا، ۱۳۹۷، تحلیل نقش اقتصاد خطی در انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش صنعت ایران. مجله مهندسی محیط زیست، ۲۸(۴)، 35-50.
- جعفری، سعید، خالدی، علی، قادری، سمانه، ۱۳۹۷، نقش محیط ساخته‌شده در بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از اقتصاد خطی. نشریه انرژی و محیط زیست، ۳۰(۲)، 22-35.
- رضوی، کامبیز، ۱۴۰۱، تغییرات سیستمی مورد نیاز برای کاهش تأثیر محیط ساخته‌شده. فصلنامه سیاست‌های توسعه پایدار، ۷(۲)، 50-62.
- رضوی، کامبیز، ۱۴۰۱، چالش‌ها و فرصت‌های حرکت به سمت اقتصاد چرخه‌ای در ایران. فصلنامه سیاست‌های توسعه پایدار، ۷(۱)، 71-84.
- زمانی، فرید، نوری، سامان، حسینی، زهرا، ۱۴۰۰، چالش‌ها و فرصت‌های مدیریت منابع در مدل‌های اقتصاد خطی و چرخه‌ای. مجله مدیریت منابع و انرژی، ۱۵(۴)، 91-105.
- شریفی، محمد، کریمی، الهه، ۱۳۹۷، مدیریت زباله‌های ساختمانی و تأثیر آن بر محیط زیست. فصلنامه علوم محیطی، ۴۲(۱)، 15-28.
- شریفی، محمد، نادری، یگانه، خالقی، ناهید، ۱۳۹۷، بررسی الگوهای اقتصادی و تأثیر آن بر محیط زیست ایران. مجله اقتصاد محیط زیست، ۲۴(۲)، 42-55.
- عبادی، حامد، تقوی، امیرحسین، ۱۳۹۹، تحلیل اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی الگوی اقتصاد خطی در ایران. مجله مدیریت منابع طبیعی، ۲۳(۳)، 121-134.
- عبادی، حامد، رضایی، علی، کریمی، زهره، ۱۳۹۹، نقش اقتصاد چرخه‌ای در مقابله با ناکارآمدی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی. نشریه محیط زیست و توسعه پایدار، ۳۱(۱)، 78-90.
- عباسی، رضا، ۱۳۹۸، بررسی چالش‌های مدیریت زباله‌های ساختمانی در ایران. نشریه پژوهش‌های مهندسی عمران، ۳۱(۲)، 58-72.
- عباسی، رضا، کریمی، نگین، صادقی، شایان، ۱۳۹۸، تحلیل ناکارآمدی‌های اقتصاد خطی در مدیریت منابع طبیعی. مجله توسعه پایدار، ۲۵(۳)، 127-140.
- نوروزی، مهدی، ۱۳۹۸، اثرات تخلیه زباله‌های صنعتی بر منابع آبی کشور. مجله آب و محیط زیست، ۱۹(۲)، 104-117.
- نوروزی، مهدی، امیری، رضا، صمدی، حامد، ۱۳۹۸، بررسی روند کاهش چرخه‌پذیری منابع و تأثیر آن بر پایداری. مجله علوم محیطی، ۱۹(۳)، 115-128.

Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., & Thornback, J. (2017). Circular economy in construction: Current awareness, challenges, and enablers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Jwrm*, 16.00011/10.1680/Resource Management, 170(1), 15-24. <https://doi.org>

Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., & Bello, S. A. (2020). Design for deconstruction (DfD) and circular economy in construction: The effectiveness of DfD as a strategy for achieving circularity in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121450>

Al Horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., & Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 1-11.

<https://doi.org/10.1016/j.ijse.2016.03.006>

Allwood, J. M., & et al. (2020). Innovations in material science and engineering for circular economy practices. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119486.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119486>

Alsheyab, M. (2022). Construction and demolition waste management: Challenges and potential solutions. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.033>. 160-152, *Waste Management*, 133

Amsterdam, M. o. (2024). *Policy: Circular economy*.

<https://www.amsterdam.nl/en/policy/sustainability/circular-economy>

incentive program for energy Aste, N., Angelotti, A., & Buzzetti, M. (2017). The influence of the financial retrofitting of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 736-744.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.149>

Awad, M., Khairalla, M., & Aly, M. (2021). Smart building technologies and the role of IoT in circular economy building management. *Energy Reports*, 7, 5109-5121.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.032>

Ayyad, M. (2020). Sustainable City, Dubai: An innovative model for sustainable urban development. *Development*, 14(2), 146-162. *International Journal of Innovation and Sustainable*
<https://doi.org/10.1504/IJISD.2020.106575>

Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761-769.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>

Big. (2019). CopenHill: A multi-use waste-to-energy plant. <https://big.dk/#projects-cph>

Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., & Lifset, R. (2017). Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 476-482. <https://doi.org/10.1111/jiec.12606>

Cabeza, L. F., Rincon, L., Vilarino, V., Perez, G., & Castell, A. (2018). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

Calisto Friant, M., Vermeulen, W., & Salomone, R. (2020). Analysing European Union circular economy policies: words versus actions. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 337-353.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.001>

Charef, R., & Emmitt, S. (2018). End-of-life information modelling for buildings to support circular economy strategies. *Journal of Building Engineering*, 19, 33-45.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.017>

Chen, X., Chen, Y., & Li, H. (2022). Circular economy pathways in construction: Exploring lifecycle strategies for resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131623.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131623>

Cheshire, D. (2016). *Building Revolutions: Applying the Circular Economy to the Built Environment*. RIBA Publishing

Safe Circularity Gap Report (2024). *Circularity Gap Report 2024: A Circular Economy to Live Within the Limits of the Planet*. <https://www.circularity-gap-report-2024.org>

Copenhagen, M. o. (2019). Circular Copenhagen Resource and Waste Management Plan 2024

Cox, J. (2018). Building community through sustainability: The One Central Park case study. *Journal of Urban Design*, 23, 523-540. <https://doi.org/10.1080/13574809.2018.1427731>

Crowther, P. (2017). Selective demolition: A sustainable approach to building deconstruction. *Journal of Environmental Management*, 203, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.039>

Cuce, E. (2016). The role of window glazing on energy efficiency in buildings. *Energy Efficiency*, 9(4), 791-810. <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9391-6>

D'Adamo, I., Falcone, P. M., Morone, P., & Rosa, P. (2024). A circular economy model based on biomethane: What are the opportunities for the municipality of Rome and beyond? *Renewable Energy*, 181, 401-413. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.048>

Wastewater Circular Economy .(18davoodabadi, m., Sajadifar, S. H., Ghane, A. A., & Shalpoush, S. (20 Approach in Sustainable Development. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(2), 1-12.
<https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.1.65197>

energy performance De Boeck, L., Verbeke, S., Audenaert, A., & De Mesmaeker, L. (2015). Improving the of residential buildings: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 960-975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>

De los Rios, I. C., & Charnley, F. J. (2017). Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of design. *Journal of Cleaner Production*, 160, 109-122.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.014>

Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., & Zhou, Y. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1061-1071. :analysis
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>

Dounis, A. I., & Caraiscos, C. (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1246-1261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015>

Eberhardt, L. C. M., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2022). Building design and construction strategies for a circular economy. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(2), 93-113. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1781588>

Ellen MacArthur, F. (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation

Ellen MacArthur, F. (2019). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/completing-the-picture-climate-change>

Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation

European, C. (2019). Circular Economy Action Plan. https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_en

European Commission (2018). *Revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

European Commission (2020). *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. [/https://ec.europa.eu/environment/circular-economy](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy)

European Investment, B. (2024). The Circular Economy: Our work in the sector. <https://www.eib.org/en/projects/sectors/environment/circular-economy/index.htm>

Falk, R. H., & McKeever, D. B. (2017). Generation and recovery of solid wood waste in the U.S. *BioResources*, 12(1), 561-571. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.561-571>

Torretta, V. (2023). Introduction & Ferronato, N., Rada, E. C., Portillo, M. A. G., Cioca, L. I., Ragazzi, M of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities. *Journal of Environmental Management*, 303, 113992. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113992>

Oltean-Dumbrava, C. (2024). Circular Economy and Sustainability in the Built & Finamore, L Environment. *Sustainability*, 16(1), 250. <https://doi.org/10.3390/su16010250>

A Fletcher, S., & Murray, J. (2016). The circular economy, the environment and levels of participation mathematical modelling approach. *Sustainability*, 8(8), 798. <https://doi.org/10.3390/su8080798>

Fuerst, F., & McAllister, P. (2011). Green noise or green value? Measuring the effects of environmental certification on office values. *Real Estate Economics*, 39(1), 45-69. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6229.2010.00286.x>

Garcia, K., & Tenorio, R. (2020). Role of BIM in energy and water management in buildings. *Energy Reports*, 6, 1092-1102. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.012>

Horenborg, T., & Gärtner, S. (2024). Implementing circularity in building Gebhardt, N., Kähler, S materials: Insights from the World Economic Forum. *Sustainability*, 16(2), 842. <https://doi.org/10.3390/su16020842>

J. (2017). The Circular Economy – A new Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Ghaffar, S. H., Burman, M., & Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118710>

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Built Gillott, M., James, P., Rodrigues, L., & Adeyeye, K. (2023). The Circular Economy in the Environment. *Building and Environment*, 204, 108105. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108105>

Gleick, P. H. (2013). Water use efficiency and productivity: Rethinking the basin approach. *Water* 02508060.2013.847655/1080. *International*, 38(7), 1047-1060. <https://doi.org/10>

González, A., Llatas, C., & Navarro, J. G. (2021). Carbon footprint and embodied energy assessment of a building from the life cycle perspective. *Journal of Environmental Management*, 281, 111847. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111847>

/Green Building Council. (2020). *EDGE Certification*. <https://www.edgebuildings.com>

Gross, A. (2017). Greywater reuse in buildings: A review of recent practices. *Water*, 9(3), 172. <https://doi.org/10.3390/w9030172>

P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. ,Haapio, A., & Viitaniemi *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), 469-482. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2008.01.002>

illegal waste Haitherali, M. A., & G, M. A. (2023). The environmental and economic challenges of dumping and burning in developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 6585-6602. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24078-9>

Hill, J. (2024). The Circular Economy: From Waste to Resource. *Environmental Science & Technology*, 58(4), 2024-2032. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06059>

Hondroyiannis, G., Papapetrou, E., & Samitas, A. (2024). The role of effective waste management in achieving circular economy goals. *Waste Management & Research*, 41(2), 311-322. <https://doi.org/10.1177/0734242X231152541>

Hong, J., Taylor-Lange, S. C., D'Oca, S., Turner, W. J. N., & Chen, Y. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116, 694-702. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.052>

Hossain, M. U., Ng, S. T., & Antwi-Afari, P. (2020). The Edge building: A case study of circular economy principles in practice. *Energy and Buildings*, 224, 110225. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110225>

Ng, S. T., Antwi-Afari, P., & Amor, B. (2019). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges, and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>

IEA. (2019). *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>

Janda, K. B., Bottrill, C., & Layberry, R. (2021). Fostering behavioral change in building occupants for circular economy adoption. *Energy Research & Social Science*, 75, 102015. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102015>

Keane, M. M., Lynch, D., & Flynn, D. (2017). Information and communication technologies to enable behavioral change: A review and analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 485-493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.020>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Klinge, C. M., Cramer, M., & Mahler, S. (2020). Circular house pilot project in Denmark. *Sustainability*, 12(7), 2874. <https://doi.org/10.3390/su12072874>

Kogakuin University (2019). *Smart building initiatives at Kogakuin University*. <https://www.kogakuin.ac.jp/english>

Kok, L., Worpel, G., & Ten Wolde, A. (2018). Circular economy strategies for the building sector. *Journal of Industrial Ecology*, 22(1), 198-208. <https://doi.org/10.1111/jiec.12657>

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Application of the adaptive reuse potential model in Hong Kong: A case study of Lui Seng Chun. *International Journal of Strategic Property Management*, 11(4), 193-207. <https://doi.org/10.1080/1648715X.2007.9637560>

M. (2019). Retrofitting municipal buildings in Portugal: A case study. *Energy and Buildings*, 188-189, 256-266. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.023>

Menezes, A. C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., & Buswell, R. (2012). Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. *Applied Energy*, 97, 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.075>

Mezher, T., Goldsmith, D., Chancerel, P., & Salameh, T. (2019). Enhancing sustainability in building design and construction by engaging stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1045-1055. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.252>

Mohammadi, S., Motawa, I., & Al Hattab, M. (2021). Challenges of integrating circular economy concepts in existing buildings. *Sustainability*, 13(4), 2021. <https://doi.org/10.3390/su13042021>

Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>

OECD. (2020). *Global Material Resources Outlook to 2060*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264307451-en>

Papadaki, O., Gray, N., Vanheusden, B., & Vercalsteren, A. (2022). Circular economy and the building sector: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132754>

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017a). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710-718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.055>

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017b). Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2431-2442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.049>

Bragança, L. (2021). Comparative sustainability assessment of binary blended & ,Rahla, K. M., Mateus, R concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement 2020.123894.(OPC). *Journal of Cleaner Production*, 279, 123894. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123894>

Ram, V., Kishore, K. C., & Kalidindi, S. N. (2020). Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120258

de Jonge, J. (2020). Engaging building occupants in sustainable practices through behavioral & ,Ramos, L change. *Sustainability*, 12(11), 4578. <https://doi.org/10.3390/su12114578>

Ritzen, S., & Sandström, G. Ö. (2017). Barriers to the Circular Economy – Integration of Perspectives and Domains. *Procedia CIRP*, 64, 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.005>

Romano, G., Gori, M., & Niccolucci, V. (2022). Waste management and circular economy: A cross-national analysis of policy drivers. *Waste Management*, 144, 85-77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.034>

Rosenow, J., Guertler, P., Sorrell, S., & Eyre, N. (2016). Funding energy efficiency in low-income households: Lessons from the UK Energy Company Obligation (ECO). *Energy Research & Social Science*, 21, 70-61. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.06.002>

Rossi, B., Cutaia, L., Luciano, A., & Farina, R. (2016). Life cycle assessment and life cycle costing methodologies applied to a circular economy context. *Energy Procedia*, 106, 248-260. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.121>

Särkilähti, M., Åkerman, M., Rintala, J., & Jokinen, A. (2022). Temporal challenges of building a circular city district through living-lab experiments [Article]. *European Planning Studies*, 30(7), 1333-1354. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1965963>

Sartor, A., Orzes, G., Tomašević, I., & Niero, M. (2021). Towards a more circular economy: Exploring the awareness, practices, and barriers from a focal firm perspective. *Business Strategy and the Environment*, 30(7), 3317-3333. <https://doi.org/10.1002/bse.2791>

Schröder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77-95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>

Shakirov, I., Golub, M., & Lebedev, A. (2024). The role of waste management strategies in reducing greenhouse gas emissions in the circular economy framework. *Environmental Science & Technology*, 58(1), 123-132. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04309>

K., Tanaka, H., & Kaway, T. (2021). Implementation of energy-saving measures in SOMPO Building, Tokyo: LED lighting and high-efficiency chillers. *Energy Reports*, 7, 1021-1031

Shinoda, T., & Meirelles, C. (2024). The Crystal Building: Sustainable performance and technologies. In *Journal of Cleaner Production*, 418, 138754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.138754>

Shohet, I. M., & Lavy, S. (2017). Facility maintenance and management: A health care case study. *International Journal of Strategic Property Management*, 21(2), 170-182. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2016.1249706>

Simion, I. M., Ghinea, C., & Gavrilescu, M. (2013). Sustainable landfill management through circular economy practices: Lessons from Europe. *Waste Management & Research*, 31(4), 291-302. 78751 <https://doi.org/10.1177/0734242X134>

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438. <https://doi.org/10.1038/531435a>

Stahel, W. R. (2019). *The Circular Economy: A User's Guide*. Routledge

promoting circular practices in Suárez, A., Osmani, M., & Walker, A. (2021). The role of incentives in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102593. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102593>

Sustainable Energy Authority of, I. (2020). Home Energy Grants. <https://www.seai.ie/grants/home-energy-/grants>

Tam, V. W., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2012). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195-1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>

Teubler, J., Kühler, M., Biege, K., & Lettenmeier, M. (2018). A comprehensive method for monitoring resource efficiency in Europe: A sectoral approach. *Journal of Cleaner Production*, 195, 418-434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.084>

Thatcher, A., & Milner, K. (2012). Changes in productivity, psychological wellbeing and physical wellbeing from working in a 'green' building. *Work*, 41(Supplement 1), 3816-3823. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0694-3816>

Circular Economy. Woodgate & Turner, N. (2024). Building Resilience in Property Repairs through the .Clark

Vahdat, M., Alipour, H., Mirzaei, A., & Aghaei, M. (2021). Promoting energy-saving behavior in residential buildings: A systematic review. *Energy Research & Social Science*, 81, 102289. 21.102289 <https://doi.org/10.1016/j.erss.20>

van Lidth de Jeude, T., Braungardt, S., & Blok, K. (2020). Cultural perceptions and circular economy adoption. *Sustainability*, 12(6), 2395. <https://doi.org/10.3390/su12062395>

Vialle, C., Sablayrolles, C., & Lovera, M. (2011). Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis. *Water Research*, 45(12), 3765-3775. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.029>

Wang, H., Chen, W., Wu, S., Wang, H., Wang, X., & Zeng, W. (2021). Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials*, 14(3), 684. <https://doi.org/10.3390/ma14030684>

WBCSD. (2024). *Circular Economy and the Built Environment: Insights for Transitioning to Circular Systems*

to implementing looping actions. *Sustainability*, 11(2), 423. Williams, J. (2019). Circular cities: Challenges <https://doi.org/10.3390/su11020423>

.Williams, J. (2021). *Circular cities: A revolution in urban sustainability*. Routledge

Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>

World Economic, F. (2016). Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-//:Technology. <https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-//:Technology>

WorldGBC. (2019). *Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*. <https://www.worldgbc.org/embodied-carbon>

Wu, Z., Yu, A. T. W., Shen, L., & Liu, G. (2019). Quantifying construction and demolition waste: An analytical review. *Waste Management*, 87, 741-753. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.015>

Energy savings through recycled steel in construction. *Energy Reports*, 4, 422-430. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.07.014>