ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شماره مجوز مجله:۸۰۴۰۰ زمان چاپ:۱۴۰۲/۰۸/۲۰

# فناوری‌های مخرب برای صنعت ساختمان دورانی

**مترجمین :**

**علی بابادی سورن[۱] ، محمد ابراهیم امین صبوری[۲] ، علیرضا طاهرزاده[۳] ، مجید رشمانی[۴] ، نسرین جوادی[۵]**

۱-کارشناس شهرسازی شهرداری اصفهان

۲-کارشناس شهرسازی شهرداری اصفهان

۳-کارشناس شهرسازی شهرداری اصفهان

۴-کارشناس شهرسازی شهرداری اصفهان

۵-کارشناس شهرسازی شهرداری اصفهان

**چکیده**

مقاله حاضر متمرکز بر اقتصاد دورانی (CE)، صنعت ساختمان و نوآوری‌های فناورانه مخرب است که در این حوزه‌ها متلاقی می‌گردند. این نمایانگر آن است که چگونه فناوری‌های مخرب و اغلب دیجیتالی، می‌توانند اقتصاد دورانی در صنعت ساختمان را اساساً در دو فاز دارای بیشترین ضایعات در چرخه ساختمان یعنی فازهای احداث و تخریب بررسی می‌کند. این از طریق تجزیه و تحلیل پتانسیل هر نوع فناوری برای قادر ساختن اقتصاد دورانی، استفاده از ادبیات تحقیق موجود و تحقیقات کتاب‌خانه‌ای در خصوص مثال‌های کاربردی راه‌حل‌های فناورانه مورد نظر به دست می‌آید. هدف این مقاله روشن ساختن اجرای سناریوهای فناوری‌های دیجیتالی برای صنعت ساختمان دورانی است که بر اساس نوع فناوری، اصل اقتصاد دورانی، فاز ساخت، خانواده مصالح، TRLبرآورد شده و نوع کاربری سازماندهی شده است.

**کلیدواژه‌ها:** فناوری‌های دیجیتال، اقتصاد دورانی، صنعت ساختمان

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

## ۱. مقدمه

صنعت ساختمان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان $CO_2$ و یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و منابع در جهان است [۱]. این نه تنها به دلیل ماهیت محصولات ساختمانی است که بزرگ و سنگین هستند بلکه به دلیل کارآیی نسبتاً پایین منابع است [۲]. در سال ۲۰۱۸، ضایعات حاصل از فعالیت‌های ساخت و تخریب در اروپا بالغ بر ۳۳۸/۹ میلیون تن بود که نمایانگر ۳۵/۹ درصد کل تولید ضایعات آن [۳] و ۳۸ درصد کل آلایندگی $CO_2$ در جهان [۴] است. یک سوم این میزان قابل توجه $CO_2$ نتیجه استخراج و تولید مصالح ساختمانی غیرزنده و نمایانگر ۱۲ درصد کل $CO_2$ تولید شده جهان در سال است [۵]. این ضایعات منجر به از دست رفتن قابل توجه مواد ارزشمند مانند مواد معدنی، فلزات و مواد ارگانیک می‌شود. بنابراین، مهم است مفاهیم، ابزار و فناوری‌های جدیدی در صنعت ساختمان تدوین شوند که باعث ایجاد حلقه‌های بسته مواد در اقتصاد دورانی می‌شوند. به این ترتیب، هر چه مصرف و بازیافت مواد خام کارآمدتر باشد، مزایای عظیم زیست محیطی به دست خواهند آمد و فرصت‌های جدیدی برای توسعه راه‌حل‌های نوآورانه، مدل‌های کسب و کار و خدمات در بخش ساختمان شکل خواهند گرفت. از اینرو، پیشرفت صورت گرفته در این مسیر نه تنها به نفع اقتصاد بلکه به نف محیط زیست است.

تحقق اقتصاد دورانی مستلزم نوآوری‌های پیشرفته فناورانه و تغییر ساختارهای چرخه حیات، فرهنگ، سازمان و تولید است. سه سیستم دانش در این موضوع ایفای نقش می‌کنند: توضیحات علمی، توضیحات اجتماعی علمی و ارزش‌های فردی. آنها توسط ورگراگت و گرینوژن یانسن، فان هیل [۶] به عنوان «فناوری»، «فرهنگ» (رفتار و نیازها) و «ساختار» (نهادها، اقتصاد و غیره) خلاصه شده‌اند. وقتی سیستم تحت فشار است، شرکت‌کنندگان اغلب ائتلاف‌هایی را شکل می‌دهند و به دنبال راه‌حل برای مسایلی هستند که بروز کرده‌اند و شبکه‌های خبری ایجاد می‌کنند که گاهاً می‌توانند از مرزهای سیستم عبور کنند و در همین راستا، حتی می‌توانند سیستم جدیدی ایجاد کنند [۷]. در سطح جهان، بسیاری از شرکت‌های فرآوری ضایعات هم‌اکنون گزینه‌های استراتژیک خود را در نظر گرفته‌اند: گسترش، یکپارچگی زنجیرخ و یا نوآوری فناورانه. رویکردهای آنها بر یکپارچگی زنجیره و انطباق با ساختار سازمانی درونی (فرهنگ، سیستم‌ها و غیره) تأکید می‌کنند. هم‌چنین تنوع‌سازی مورد تأکید قرار گرفته که در آن یکپارچگی زنجیره دو رویکرد را دنبال می‌کند:

یکپارچگی رو به جلوی زنجیره: که در آن فرآوری‌کنندگان نهایی بر فعالیت‌های اولیه در زنجیره مانند گردآوری و بازیافت تمرکز می‌کنند؛

یکپارچگی رو به عقل زنجیره: که در آن شرکت‌های گردآوری ضایعات بر بازیافت، بیرون ریختن و یا سوزاندن ضایعات تمرکز می‌کنند.

این مقاله متمرکز بر اقتصاد دورانی، صنعت ساختمان و نوآوری‌های فناوری‌های مخرب است که در این عرصه متلاقی می‌گردند. هدف «برنامه اقدام اقتصاد ـ نوآوری» اتحادیه اروپا ۲۰۱۱ [۸] تهییج نوآوری‌های اقتصادی و در عین حال کاهش آسیب‌های زیست محیطی است. بر اساس تعریف کمیسیون اروپا، «نوآوری اقتصادی شکلی از نوآوری است که منجر به پیشرفت قابل توجه و قابل

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

اثبات به سمت هدف توسعه پایدار از طریق کاهش اثرات زیست محیطی، ارتقای انعطاف به روی فشارهای زیست محیطی یا دستیابی به مصرف کارآمدتر و مسئولانه‌تر منابع طبیعی می‌شود» (برگرفته از حکم شماره ۱۶۳۹/۲۰۰۶/EC در خصوص برنامه رقابت‌جویی و چارچوب نوآوری).

## ۲. فناوری‌های مخرب، اقتصاد دورانی و صنعت ساختمان

در اتحادیه اروپا، کشورهای بسیاری نرخ‌های بالای استفاده مجدد از مواد بازیابی شده از فازهای ساخت و تخریب ساختمان‌ها را نشان می‌دهند. نرخ‌های جاری بالای بازیافت ضایعات ساخت و تخریب تا حد زیادی مبتنی بر حفاری، میزان پایین بازیافت یا کاربری‌های غیرقابل بازیافت مجدد هستند [۹]. بنابراین، ارزش ذاتی مواد رو به کاهش است زیرا به شکلی سیستماتیک به جنبه‌های کیفی بازیافت پرداخت نشده و بازیافت در حلقه‌های بسته انجام نشده است.

در ورای اقتصاد دورانی، اتحادیه اروپا تحول دیجیتال را اولویت‌بندی کرده که به تازگی در «دهه دیجیتال اروپا» اعلام شده است. این سند نشانگر یک نگرش روش برای تحول دیجیتال در اتحادیه اروپا تا سال ۲۰۳۰ است که شامل توانمندسازی دیجیتال کسب و کار و کمک به اقتصاد پایدار و با کارآمدی منابع است [۱۰]. این حاکی از یک پیوند روشن میان دیجیتالی شدن و اقتصاد دورانی است [۱۱]. فناوری‌های دیجیتالی نه تنها به عنوان محرک اصلی برای تحول دیجیتال صنایع مختلف در نظر گرفته می‌شوند [۱۲] بلکه برای انتقال آنها به اقتصاد دورانی الزامی هستند [۱۱].

فناوری‌های دیجیتال نمایانگر فرصت‌های متعددی برای دیجیتالی‌سازی صنعت ساختمان در کل چرخه حیات ساخت و مزایای مهمی هم‌چون کاهش هزینه‌ها، افزایش کارآیی تولید، بهبود کیفیت و سرعت هستند. به علاوه، افزایش بکارگیری فناوری‌ها در منازل نمایانگر داده‌های جدید در خصوص تعامل میان فناوری، محیط ساختمان و حلقه‌های بازخورد اطلاعات است که می‌تواند منجر به راه‌حل‌های انسانی برای زندگی پایدار شود. روشی که با آن محیط زندگی خود را توصیف و درک می‌کنیم، اساساً متحول شده زیرا اینها ابزارهایی هستند که از آنها برای طراحی، برنامه‌ریزی و مدیریت آنان استفاده می‌کنیم. یک حوزه جدید تحقیق و توسعه در فناوری کاربردی در محل تلاقی جنبه‌های فیزیکی و دیجیتالی حوزه ساختمان در حال ظهور است [۱۳].

دیلویت ۱۷ فناوری دیجیتال را شناسایی کرد که در طول چرخه کامل حیات ساختمان اجرا می‌شوند: خودروهای خودران، ساخت مدولار، رباتیک، طراحی مولد، پهپادها، فناوری بازاریابی، مدیریت انرژی، واقعیت دیجیتال (مجازی، افزوده، ترکیبی)، مدیریت موجودی کالا و عرضه، شارژ بی‌سیم، بلاکچین، اینترنت اشیا و حسگری، اسکن سه بعدی، تولید افزوده و چاپ سه بعدی، هوش مصنوعی و داده‌های کلان، BIM (مدل‌سازی اطلاعات ساختمان) و InsurTech برای ساختمان [۱۴].

در مقایسه با بسیاری از صنایع دیگر، صنعت ساختمان در زمینه بکارگیری فناوری‌های جدید، مواد و ابزارها محافظه‌کار است [۱۵]. با این وجود، اصل «اقتصادهای بیرونی فناورانه» نمایانگر نقاط خروج برای پیوند مستقیم محیط زیست و اقتصاد (و در نتیجه

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

اقتصاد دورانی) است. در نتیجه، نوآوری‌های ناشی از این توسعه‌ها می‌تواند بهبود مستمر را به پایداری برنامه‌ریزی محیطی ارتقا دهد. به طور مشخص، نوآوری کارکردی (جایگزینی محصولات با محصولات دیگر یا ترکیبی از محصولات و خدمات) و نوآوری سیستم، نیازمند تغییرات فرهنگی و اجتماعی همزمان با تغییرات فناورانه هستند. نوآوری محصول و کارکردی اغلب بخش‌هایی از نوآوری سیستم هستند [۱۶]. نوآوری کارکردی می‌تواند به ماده‌زدایی کردن کمک کند. نوآوری کارکردی (با ابزار جایگزینی محصولات با خدمات) الزاماً بدان معنا نیست که بار زیست محیطی در نتیجه این کار کاهش می‌یابد [۱۷].

البته، انتظار می‌رود اجرای فناوری‌های دیجیتال به نفع بخش ساختمان از منظر بهره‌وری، کیفیت و ایمنی باشد. علاوه بر کاربرد فناوری‌ها برای کارآمدتر و یا کیفیت‌تر نمودن کار ساخت، فرصت پرداختن به ضایعات و توسعه راه‌حل‌های نوآورانه اقتصاد دورانی با فناوری‌های جدید نیز وجود دارد. استراتژی‌های دورانی نیازمند یک چشم‌انداز سیستماتیک هستند. افزایش مقیاس در بخش ساختمان و تمرکز فزاینده بر سفارشی‌سازی، منجر به افزایش پیچیدگی و فعالیت‌های بین رشته‌ای در این صنعت شده که مسئله را حتی کلیدی‌تر ساخته است. پتانسیل بزرگی برای دورانی ساختن واقعی صنعت ساختمان وجود دارد به ویژه زمانی که با فناوری‌های جدید ترکیب می‌شود. علیرغم فرصت‌های در حال ظهور، مثال‌های اقتصاد دورانی و استفاده از فناوری‌های دیجیتال در صنعت ساختمان هم‌چنان محدود هستند.

مقاله حاضر مثال‌های کاربردی را شناسایی می‌کند که در آنها فناوری‌های مخرب (اغلب دیجیتال) برای توسعه اصول اقتصاد دورانی در صنعت ساختمان به کار گرفته می‌شوند (شکل ۱). این مثال‌ها وقتی افزایش یابند، اثرات زیست محیطی بزرگی دارند. این نشان می‌دهد چگونه فناوری‌های دیجیتال می‌توانند به شکلی بالقوه اقتصاد دورانی در صنعت ساختمان را ممکن سازند و در عین حال بر دو فاز مهم ایجاد ضایعات در چرخه ساختمان یعنی ساخت و تخریب تمرکز کنند. توان بالقوه هر فناوری بر مبنای ادبیات تحقیق و مطالعات کتاب‌خانه‌ای تحلیل شده است. مثال‌هایی جهت تأیید اجرای سناریوهای فناوری‌های دیجیتالی برای صنعت ساختمان دورانی استفاده شده‌اند و بر اساس نوع فناوری، اصل اقتصاد دورانی، فاز ساختمان، خانواده مصالح، TRL برآورد شده و نوع کاربری سازماندهی شده‌اند. به لحاظ روش‌شناسی، این تحقیق در چهار مرحله ساماندهی شده است:

(۱) شناسایی فناوری‌های مخرب که به نفع اقتصاد دورانی در بستر صنعت ساختمان است؛

(۲) فیلترینگ فناوری‌های مبتنی بر تعداد مطالعات معتبر موجود فعلی؛

(۳) تحلیل مزایای بالقوه اقتصاد دورانی هر فناوری از طریق مرور ادبیات تحقیق و مثال‌های کاربردی؛ و

(۴) انعکاس این که چگونه این فناوری‌ها می‌توانند بر اقتصاد دورانی اثر بگذارند.

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

### ۳. کلیات فناورانه و اقتصاد دورانی

(۵) صنعت ساختمان در حال تجربه کردن نوآوری‌های تکنولوژیکی است که تحول دیجیتال را در کل چرخه حیات ساختمان امکان‌پذیر می‌سازد و ظهور فناوری‌های دیجیتال، نقش مهمی در این تحول ایفا می‌کند. اگرچه مطالب زیادی درباره این فناوری‌های دیجیتالی و نقش آنها در دیجیتالی‌سازی صنعت ساختمان نوشته شده اما هیچ اجماع نظری در خصوص فهرستی معین از این فناوری‌ها در ادبیات تحقیق وجود ندارد (رُزا، ۲۰۲۰). جدول ۱ نمایانگر برخی نتایج بازیابی شده در گوگل و گوگل اسکالر در زمان جستجو باکلیدواژه‌های «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال» و هر یک فناوری‌های دیجیتال صنعت ساختمان است که توسط دیلویت پیشنهاد شده است. تعداد نسبتاً پایین نتایج هر جستجو بدان معنا است که حوزه‌های جستجو شده در حال ظهور هستند. بنابراین، به نظر می‌رسد این تحقیق هنوز واکاوی نشده است (در نقطه تلاقی اقتصاد دورانی، فناوری‌های دیجتال و صنعت ساختمان).

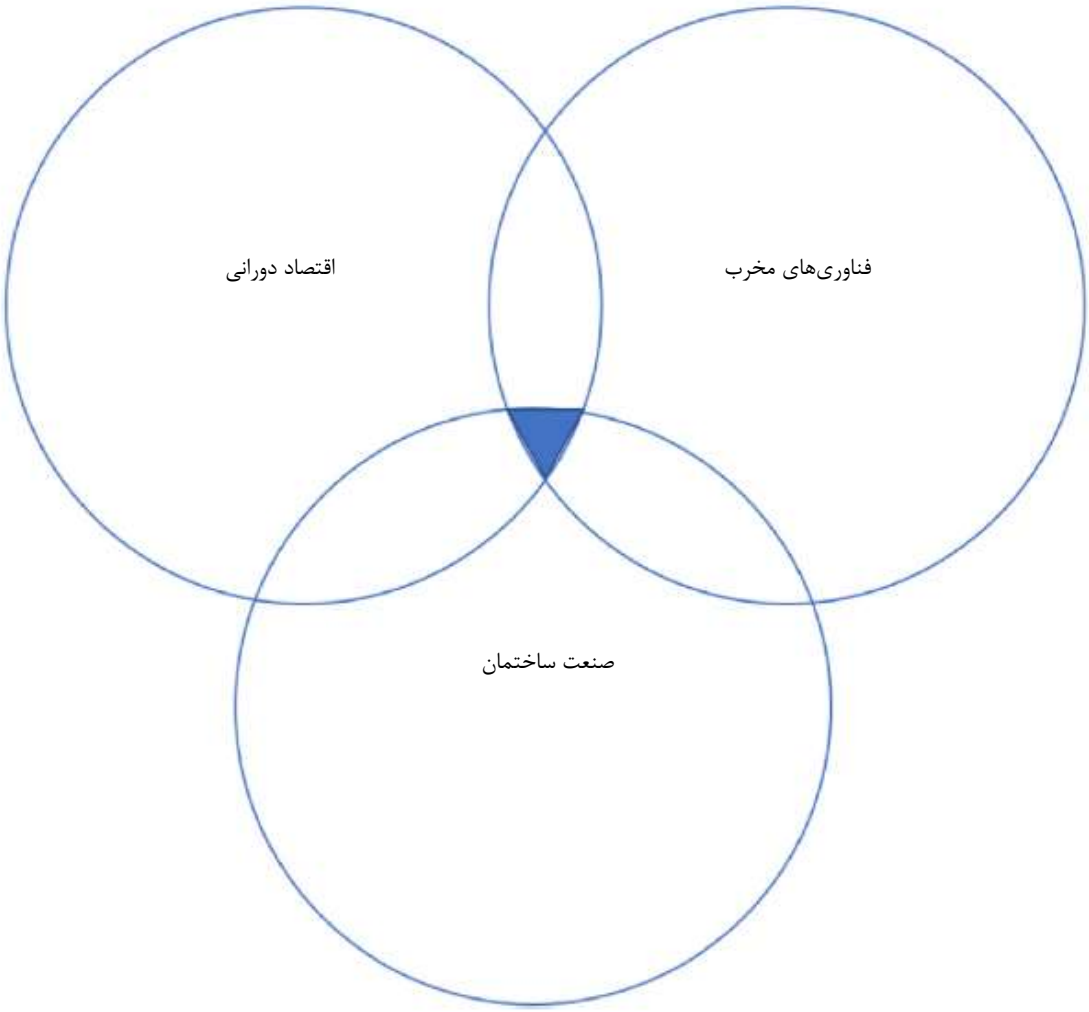
(۶) در این مقاله، فناوری‌های دیجیتال از منظر اقتصاد دورانی و صنعت ساختمان از طریق مرور ادبیات تحقیق و مثال‌های کاربردی بحث خواهند شد.

(۷) در حالی که اجرای این فناوری‌ها در صنعت ساختمان هنوز در ابتدای راه است اما این مقاله مثال‌ها را شناسایی می‌کند (مثال‌هایی با TRL ۴ و بالاتر) و پتانسیل آنها را روشن می‌نماید. فناوری در صنعت ساختمان می‌تواند مدیریت داده‌ها را از طراحی تا ساخت و تا تخریب، بهینه سازد. البته، این می‌تواند به توسعه مفاهیم دورانی جدید برای صنعت ساختمان در ارتباط با بازمصرف مواد، حفظ ارزش مواد از طریق کاربری‌ها و استراتژی‌هایی کمک کند که بازیافت با کیفیت بالا را ممکن می‌سازند. چنین استراتژی‌هایی می‌توانند تولید ضایعات را کاهش دهند. این مقاله فناوری‌های دیجیتال BIM، رباتیک، هوش هیجانی، تولید افزوده و چاپ سه بعدی، بلاکچین، پهبادها و واقعیت دیجیتال را تحلیل می‌کند. کمک فناوری‌های منتخب مخرب به اقتصاد دورانی در طول فازهای طراحی، مهندسی، ساخت و تخریب مطالعه شده است (شکل ۲). در میان چهار فاز چرخه حیات ساختمان (یعنی طراحی و مهندسی؛ ساخت؛ فعالیت‌ها و تعمیر و نگهداری؛ و تخریب)، این سه فاز بیش از ۳۰ درصد کل ضایعات جامد در اروپا را تولید می‌کنند [۸]. به همین دلیل، فاز تعمیر و نگهداری در این تحقیق مستثنی شده است. مثال‌های دقیق زیادی از فناوری‌های تخریب کاربردی در فاز تعمیر و نگهداری وجود دارند مانند استفاده از فناوری بلاکچین در سنجش عملکرد انرژی ساختمان، گزارش‌دهی و راستی‌آزمایی (MRV) [۱۸] و نظارت بر محیط کار با ربات‌های مستقل چندحسگری و قابل حمل [۱۹].

(۸) انتخاب مثال‌ها در این سه فاز مبتنی بر سطح بلوغ و کاربرد آنها در این حوزه است. سایر معیارهای انتخاب برای مثال‌های بررسی شده عبارتند از:

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶




**شکل ۱. مقاله حاضر تلاقی اقتصاد دورانی، فناوری‌های مخرب و صنعت ساختمان را بررسی می‌کند.**

- راه‌حل اثبات شده فناورانه به کار گرفته شده و یک راه‌حل دورانی جدید در طول فاز طراحی و مهندسی، ساخت یا تخریب پیشنهاد شده است.
- راه‌حل فناوری اثبات شده بالغ است هر چند که ممکن است اجرای آن در صنعت ساختمان هنوز تجربی باشد.
- راه‌حل فناوری اثبات شده حداقل در محیط‌های آزمایشگاه‌های تست شده که TRL برآورد شده آنها عموماً بالاتر از ۴ است. برآورد TRL توسط محققان پیشنهاد شده و مبتنی بر اطلاعات موجود در نشریات پروژه است.

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

- راه‌حل فناورانه اثبات شده حداقل یکی از ابعاد اقتصاد دورانی را اجرا می‌کند: اولویت‌بندی دروندادهای تجدیدپذیر، به حداکثر رساندن محصولات و مواد مورد استفاده و بازیابی محصولات جانبی و ضایعات که توسط بنیاد *الن مک‌آرتور* تعریف شده است. در ادبیات تحقیق صنعت ساختمان، اغلب سه اصل مطرح هستند: کاربرد بهینه مواد، طراحی برای باز کردن قطعات یا طراحی برای بازیافت.
- راه‌حل فناورانه اثبات شده دارای تأثیر بالقوه‌ای بر مزایای زیست محیطی است مانند پرداختن به جریان بزرگ ضایعات یا کمک به ذخیره‌سازی مواد فله‌ای.
- راه‌حل فناورانه اثبات شده برای کمک به انتقال دیجیتالی صنعت عمران و ساختمان.

**۳/۱. فناوری‌ها (به جدول ۲ رجوع نمایید)**

**۳/۱/۱. اینترنت اشیا (IoT )**

مزایای موجود در صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: صرفه‌جویی انرژی؛ افزایش استفاده از دارایی‌ها از طریق اشتراک‌گذاری؛ مواد بهینه شده، تعمیر و نگهداری و مدیریت ضایعات.

اینترنت اشیا عبارتی است که اشاره به پیوند شبکه‌ای اشیای فیزیکی دارد و نمایانگر نگرش‌هایی تازه از طریق به دست آوردن حجم بالایی داده در زمان واقعی است [۲۰]. در این فناوری، الکترونیک، نرم‌افزارها، حسگرها، بکاراندازها و اتصال شبکه همگی در اشیای فیزیکی هم‌چون قطعات، لوازم، تجهیزات، ساختمان‌ها، و خودروها جمع شده‌اند و آنها را قادر به گردآوری و تبادل داده‌ها از طریق اینترنت و در یک شبکه می‌نمایند [۲۰]. مزایای اینترنت اشیا در کل چرخه حیات ساختمان‌ها و زیرساختارها فراگیر بوده و باعث کارآیی فزاینده آنها می‌شود مانند بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش استفاده از دارایی‌ها از طریق اشتراک‌گذاری [۲۱] یا مدیریت بهینه ضایعات و منابع [۲۰].

۳/۱/۱/۱. مثال ۱: Oris [۲۲]. ORIS یک پلتفرم مطالب دیجیتال برای راه‌حل‌های جاده‌های پایدار است. این خدمت در راستای کاهش آلایندگی کربن پروژه‌ها و در عین حال افزایش ماندگاری و چرخه حیات جاده‌ها با استفاده از هوش مصنوعی، حسگرهای به هم متصل و تحلیل داده‌ها است. این راه‌حل قبلاً در پروژه‌های آزمایشی در آذربایجان، فرانسه، مکزیک و انگلستان به کار گرفته شده بود. یکی از مزایای کلیدی ORIS مصرف بهینه مواد است. این راه‌حل در طول فاز طراحی و ساخت مفید بوده و نمایانگر نگرش‌های در خصوص شرایط بومی، گزینه‌های تأمین منابع، مشخصات فنی و بهینه‌سازی پایداری است. فواید زیست محیطی این برنامه نویدبخش است و باید در نظر داشت که به طور میانگین، ۷۰۰ هزار کیلومتر راه جدید هر ساله در سطح جهان ساخته می‌شوند و ۶۰ هزار تن منابع برای ساخت یک کیلومتر بزرگراه مورد نیاز است [۲۲].

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

**BIM .۳/۱/۲**

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: کارآیی فرآیند ساخت؛ طراحی بهینه از منظر مدیریت مواد و ضایعات؛ حمایت از مفاهیم جدید اقتصاد دورانی.

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) نمایش دیجیتالی یک دارایی ساخته شده است که حاوی اطلاعات متعارف است مانند هندسه دارایی، خواص مواد و ویژگی‌های عناصر. امروزه، BIM به پراستفاده‌ترین فناوری در صنعت ساختمان از طراحی تا تکمیل و اجرای پروژه تبدیل شده است [۲۰]. می‌توان مدل‌های سه بعدی BIM را با ابعاد اضافی ارتقا داد مانند زمانبندی (۴D)، برآورد هزینه (۵D)، پایداری (۶D) و تعمیر و نگهداری (۷D) [۲۰]. یک مبحث در حال ظهور حاکی از یک جنبه جدید است که باید طبق اقتصاد دورانی، پایان حیات و مدل‌سازی اطلاعات باز کردن قطعات (۸D) استفاده شود [۲۵، ۲۴]. اگرچه ابعاد BIM زیر سوال است زیرا می‌تواند به بحث درباره پایداری محدود شود اما متخصصان فعالانه از آن استفاده می‌کنند [۲۴]. استفاده جاری از BIM منجر به کارآیی فرآیند ساخت می‌شود که به صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها، دقت در کار و کاهش خطاها تعبیر می‌شود. به علاوه، این منجر به رویکردهای جدیدی برای به حداقل رساندن ضایعات می‌گردد مانند حمایت مدل‌های دیجیتال برای ارایه طرح‌های پایدار، توسعه مواد، پایگاه‌داده‌های پروژه‌ها، بررسی داده‌ها، ارزیابی گردش داده‌ها، فرآیندهای بازیابی مواد و بانک‌های مواد [۲۳].

**جدول ۱. تعداد نتایج بازیابی شده در گوگل و گوگل اسکالر در زمان جستجوی کلیدواژه‌های «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»**

| فناوری | تعداد نتایج در گوگل | تعداد نتایج در گوگل اسکالر | عبارات جستجو شده |
|---|---|---|---|
| اینترنت اشیا و حسگری | ۵۰۵۰ | ۹۶ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «اینترنت اشیا» |
| BIM | ۴۸۲۰ | ۸۵ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «BIM» |
| رباتیک | ۵۴۲۰ | ۸۰ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «رباتیک» |
| هوش مصنوعی | ۷۱۵۰ | ۶۵ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «هوش مصنوعی» |
| چاپ سه بعدی | ۴۲۳۰ | ۶۳ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «چاپ سه بعدی» |
| بلاکچین | ۴۶۹۰ | ۵۱ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «بلاکچین» |
| پهبادها | ۳۱۸۰ | ۴۲ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «پهبادها» |
| واقعیت دیجیتال (مجازی، افزوده، | ۴۸۱۰ | ۳۷ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، |

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

| | | | |
|---|---|---|---|
| ترکیبی) | | | «فناوری‌های دیجیتال»، «واقعیت دیجیتالی» |
| ساخت ماژولار | ۱۳۱۰ | ۲۸ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «ساخت ماژولار» |
| **مدیریت انرژی** | ۳۱۳۰ | ۲۷ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «مدیریت انرژی» |
| مدیریت موجودی و عرضه | ۱۲۶۰ | ۲۶ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «مدیریت موجودی و عرضه» |
| خودروهای خودران | ۱۲۲۰ | ۴ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «خودروی خودران» |
| اسکن سه بعدی | ۴۳۵ | ۷ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «اسکن سه بعدی» |
| شارژ بی‌سیم | ۸۸ | ۰ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «شارژ بی‌سیم» |
| InsurTech برای ساخت | ۹۸۱ | ۰ | «اقتصاد دورانی»، «صنعت ساختمان»، «فناوری‌های دیجیتال»، «InsurTech» |

۳/۱/۲/۱. مثال ۱: پلتفرم ماداستر (Madaster) [۲۶]. ماداستر یک پلتفرم آنلاین است که گذرنامه مواد مناسب برای ساختمان‌ها، فعالیت‌های عمرانی و نمایه ساختمان‌ها را ایجاد کرده و سطح دَوران آنها را محسابه می‌کند. مواد، محصولات و عناصری که در ساخت استفاده می‌شوند در این پلتفرم ثبت و مستند می‌شوند. می‌توان این داده‌ها را از مدل‌های اطلاعات ساختمان (BIM) و با پیوندهای هوشمند با منابع مختلف داده‌ها در قبال محصولات و مواد (مانند ارزیابی چرخه حیات و داده‌های $CO_2$)، منابع مالی (ارزش مواد) و منابع داده‌ها در خصوص ابعاد مرتبط با سلامت مواد (مثلاً سمی بودن آنها) ثبت و مستند ساخت. این راه‌حل از قبل در آلمان، هلند، نروژ، سوئیس و بلژیک موجود بوده است.

یکی از مزایای کلیدی ماداستر پتانسیل طراحی ساختمان‌ها به شکل قابل بازیافت است: با ثبت مواد، آنها به صورت دیجیتالی قابل کشف برای مصرف آیده خواهند بود. این فناوری در طول فازهای طراحی، ساخت و تخریب مفید است و این پلتفرم مستندات محیط ساخت را بر اساس هویت و مکان مواد ارتقا می‌دهد. با کمک این گذرنامه، مواد هویت و ارزش واقعی خود را حفظ می‌نمایند که این امر کمک می‌کند آنها در طول فاز تخریب به ضایعات تبدیل نشوند.

**۳/۱/۳. ربات‌ها**

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و از منظر اقتصاد دورانی: دقت بالا؛ مونتاژ؛ اتوماسیون.

استفاده از ربات‌ها در صنعت ساختمان برای تولید قطعات ساختمان می‌تواند منجر به جریانات کاری خودکار در سایت ساختمان شود که دربرگیرنده اقتصاد دورانی با دقت بالا و کاهش زمان تولید است.

به علاوه، ربات‌ها می‌توانند کارهای فراوان، سخت یا تکراری هم‌چون بلند کردن اجسام سنگین و قرار دادن آنها در مختصات دقیق یا کار با مواد غیراستاندارد از منابع ضایعات را با دقت بالا انجام دهند که منجر به قطعاتی با ارزش بالا می‌شود. بازوهای رباتیک می‌توانند طیفی بزرگ از وظایف را انجام و از راه‌حل‌های سفارشی در قبال هر پروژه از چیدن آجرها آجرها گرفته تا انجام مونتاژهای پیچیده را با دقت بالا استفاده کنند. می‌توان توانایی‌های آنها را با اصول پایداری هم‌چون مرتب‌سازی ضایعات یا مونتاژ سازه‌ها از منابع ضایعات ترکیب کرد.

۳/۱/۳/۱. مثال ۱: تجربه دورانی [۲۷]. استودیو RAP یک دیوار داخلی و یک نرده پلکانی را با استفاده از ضایعات چوب و یک مسیر رباتیک طراحی کرده و ساخته است. این دیواره به طور دائمی در پاویون مدور داخل ساختمان ABN در آمستردام (هلند) نصب شده است. ماده ضایعاتی از فرآیند تولید قالب‌های لمینیت شده تأمین و به شکلی کاملاً کنترل شده در یک فرآیند ساخت رباتیک بازاستفاده گردید. فضای داخلی متشکل از ده‌ها هزار عناصر چوبی منحصر به فرد در کاج و صنوبر است که در یک روش مونتاژ رباتیک کنار هم قرار گرفته‌اند. یکی از مزایای کلیدی اقتصاد دورانی این روش ساخت، استفاده از ماده بهینه شده در طول ساخت است.

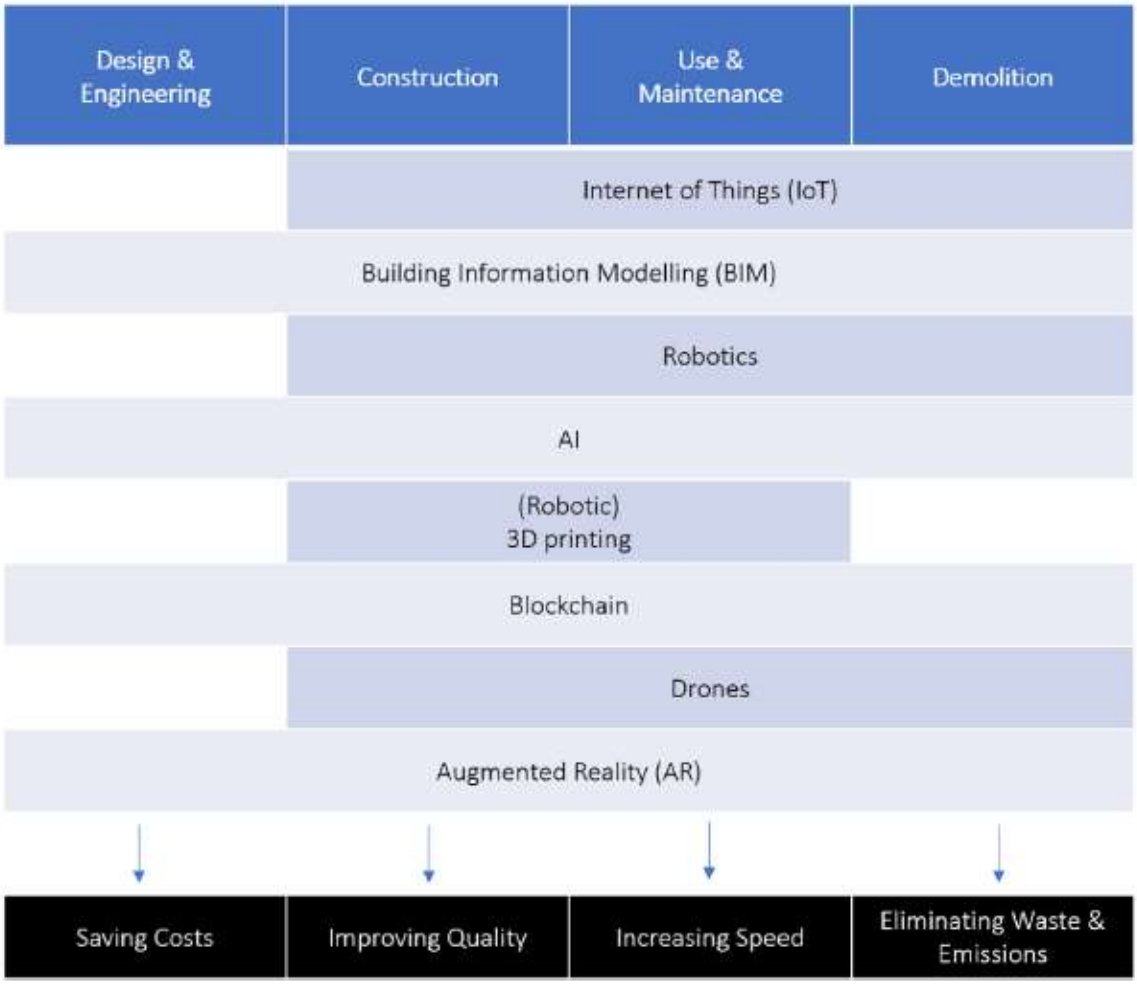
۳/۱/۳/۲. مثال ۲: پاویون چاپ سنگی [۲۸]. این پروژه با تراکم پایین و چندلایه توسط یک ربات همراه ساخته شده است. این پروژه روش طراحی و تراکم رباتیک مواد گرید پایین ساختمانی را در تحمل بار سازه‌های معماری بررسی کرد که با انعطاف‌پذیری هندسی بالا و حداقل اتلاف مواد، قابل استفاده مجدد و قابل پیکربندی مجدد هستند. بدین ترتیب، این متمرکز بر اصلی به نام «انباشت» است که به تراکم مواد دانه دانه (مانند شن) اطلاق میشود که شکل و فُرم خود را حفظ می‌کند. این در پاویون یک نمایشگاه اجرا شد. یکی از مزایای کلیدی اقتصاد دورانی برای باز کردن قطعات اثبات شده است. از آن جا که هیچ چسب یا روکشی استفاده نشده، می‌توان سازه را به راحتی از هم باز کرد و به مواد خام اولیه تبدیل نمود. به علاوه، این روش ساخت اجازه استفاده مجدد و چند مرتبه‌ای از مواد را بدون فرآوری اضافی می‌دهد. این راه‌حل فناورانه در طول فازهای ساخت و تخریب مفید است.

۳/۱/۳/۳. مثال ۳: انبار خرده چوب [۲۹]. «انبار خرده چوب» یک ساختار معماری رباتیک است که متشکل از ۲۰ شاخه مجزا درخت راش که از جنگل تأمین می‌شوند. از طریق اسکن سه بعدی، طراحی دیجیتال و روش‌های ساخت، شکل ذاتی و ظرفیت سازه‌ای درخت طبیعی حفظ و منتقل می‌شود و مستقیماً از آن در سازه استفاده می‌گردد. هر مؤلفه اسکن سه بعدی می‌شود تا شرایط سازه‌ای تعیین شود و پیوندها با بازی رباتیک شکل بگیرند. جریان کار و جعبه ابزار توسعه یافته از شاخه‌های پیچیده درختان برای ایجاد یک پاویون استفاده می‌کند (بدون توجه به جنگلداری مرسوم و روش‌های تولید چوب). یکی از مزایای کلیدی

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

اقتصاد دورانی که اثبات شده، مصرف بهینه مواد در طول فاز ساخت است. به علاوه، این رویکرد اثبات می‌کند می‌توان مستقیماً از خصوصیات متنوع مواد بدون فرآوری صنعتی افراطی استفاده کرد.




**شکل ۲. فناوری‌های دیجیتال بررسی شده در کل چرخه حیات ساخت و مزایای متناظر.**

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

**۳/۱/۴. هوش مصنوعی**

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: افزایش کارآیی در کل زنجیره ارزش؛ نظارت و بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری.

هوش مصنوعی (AI) عنوان اعطا شده به سیستم‌های محاسباتی است که نمایانگر توانایی برداشت اطلاعات، حفظ آن به عنوان دانش و استفاده از آن برای تصمیم‌گیری است [۲۰] و تحت حمایت داده‌ها و الگوریتم‌های یادگیری قرار دارد که استخراج سطوح عمیق‌تر دانش را امکان‌پذیر می‌سازند [۱۱]. تلاش‌های فعلی هوش مصنوعی عبارتند از بهینه‌سازی زمانبندی پروژه با استفاده از داده‌های گذشته، بهبود ایمنی کارکنان از طریق شناخت تصویر و دسته‌بندی سیگنال‌ها و الگوها برای ارایه بازخوردها و راه‌حل‌ها در زمان واقعی. راه‌حل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، کارآیی فرایند ساخت را در کل زنجیره ارزشی بهبود می‌بخشند و می‌توانند با بهبود طراحی، نظارت و بهینه‌سازی نگهداری به اقتصاد دورانی کمک کنند.

**جدول ۲. مزایای BE و CE هر فناوری مخرب، بر مبنای مرور ادابیت تحقیق**

| فناوری‌های مخرب | مزایای BE و CE |
|---|---|
| اینترنت اشیا | • صرفه‌جویی در انرژی<br>• کاربرد فزاینده دارایی‌ها از طریق اشتراک‌گذاری<br>• مواد بهینه، نگهداری و مدیریت ضایعات |
| BIM | • کارآیی فرآیند ساخت<br>• طراحی بهینه از منظر ماده و مدیریت ضایعات<br>• حمایت از مفاهیم جدید اقتصاد دورانی |
| ربات‌ها | • دقت بالا<br>• مونتاژ<br>• اتوماسیون |
| هوش مصنوعی | • افزایش کارآیی در کل زنجیره ارزشی<br>• نظارت و بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری |
| (رباتیک) چاپ سه بعدی | • مصرف بهینه مواد<br>• امکان استفاده از مواد بازیافت شده یا قابل بازیافت<br>• پتانسیل ساخت با ضایعات صفر |
| بلاکچین | • افزایش کارکرد، کارآیی و ملموس بودن<br>• ردیابی غیرمتمرکز اطلاعاتی هم‌چون جریانات مواد و ضایعات |
| پهبادها | • ردیابی دارایی دیجیتال در سایت، نظارت محیطی مستمر و نظارت بر پیشرفت کار<br>• ارتقای کاهش ضایعات |
| AR | • ساخت بهینه در محل<br>• تعمیر و ساخت از راه دور |

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۳/۱/۴/۱. مثال ۱: AMP Cortex [۳۰]. AMP Cortex با هوش مصنوعی کار می‌کند تا بتوان مواد را برای بازیافت شدن پس از تخریب انتخاب کرد. شناسایی، مرتب‌سازی، انتخاب و فرآوری ضایعات ساخت و تخریب (C&D) شامل فلزات، چوب، گچ و بتون مهندسی می‌شود. این فناوری برای به حداکثر رساندن توانایی مراکز بازیافت برای بازیابی ده‌ها تن مواد در عرض یک ساعت به کار گرفته می‌شود و می‌تواند این کار را با یک ایستگاه رباتیک دارای دقت بالا و سطح بالای خلوص مواد انجام داد. این فناوری در ۱۶۰ نقطه در جهان راه‌اندازی شده است. یکی از مزایای کلیدی اقتصاد دورانی، بازیابی محصولات جانبی و ضایعات در طول فاز تخریب است. به علاوه، تحلیل داده‌های گردآوری شده نه تنها در بهبود کارآیی عملیاتی مراکز بازیافت بلکه در ایجاد جریانات جدیدی ارزشی برای مواد قابل بازیافت نقش دارد.

۳/۱/۴/۲. مثال ۲: استخراج قارضه‌ها [۳۱]. استخراج قراضه‌ها یک خدمت داده‌محور است که سازه‌های جدیدی را از قراضه‌های موجود طراحی می‌کند. ضایعات به مواد قابل استفاده با کمک رایانه و اتوماسیون ساخت تبدیل می‌شوند. موجودی‌های نامنظم و غیریکسان قراضه‌های عمرانی به بلوک‌های ساختمانی با استفاده از شکل‌های جدید، استفاده از امکانات شناخت الگو، اسکن و دسته‌بندی برای یافتن بهترین کاربرد هر قطعه در سازه جدید، تبدیل می‌شوند. مزایای کلیدی اقتصاد دورانی عبارتند از بازاستفادهٔ محصولات جانبی، کاهش ضایعات و استفاده بهینه از مواد. این خدمت در طول فازهای تخریب و طراحی قابل استفاده است.

**۳/۱/۵. (رباتیک) چاپ سه بعدی**

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: مصرف بهینه مواد؛ احتمال استفاده از مواد بازیافت شده یا قابل بازیافت؛ مواد تأمین شده بومی؛ پتانسیل ضایعات ساختمانی صفر.

چاپ سه بعدی یا ساخت افزایشی خانواده‌ای از فناوری‌ها است که اشیای سه بعدی و لایه به لایه را مستقیماً از فایل دیجیتال تولید می‌کند [۳۲]. این فناوری تولید آزاد از شکل‌هایی را ممکن می‌سازد نمی‌توان با سایر روش‌ها تولید کرد. فرصت‌های بسیاری برای معرفی چاپ سه بعدی در صنعت ساختمان جهت ایجاد قطعات دورانی وجود دارند که نسبتاً بکر باقی مانده‌اند. این فناوری می‌تواند از تولید ساختمان‌ها با استفاده از مواد بومی حمایت کند یعنی موادی هم‌چون مواد طبیعی (مواد ارگانیک، خاک و غیره) یا جریانات ضایعات بومی (غیرآلی). از آن جا که این یک روش ساخت افزایشی است، می‌تواند فرآیند ساخت را با ضایعات کم یا صفر تولید کرد. با ترکیب این فناوری با جریانات کاری طراحی محاسباتی هم‌چون طراحی الگوریتم و روش‌های بهینه‌سازی، می‌توان قطعات را با عملکرد بهینه و مصرف حداقلی مواد تولید کرد. در نهایت، می‌توان قطعات را از یک ماده تولید کرد که می‌تواند باز کردن قطعات را ساده سازد و می‌توان آنها را به راحتی تعمیر یا بازیافت کرد.

۳/۱/۵/۱. مثال ۱: Casa Covida [۳۳]. «Casa Covida» در کلرادو (آمریکا) توسط شرکت معماری امرجینگ آبجکتس (Emerging Objects) برای واکاوی مفهوم ساخت کم هزینه از تست خاک محلی طراحی شده است. این با کمک یک چاپگر سه بعدی به دست می‌آید که به محل تست خاک حمل می‌شود و می‌توان بلافاصله از آن برای چاپ سه بعدی سازه‌ها در مقیاس

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

کلان استفاده کرد. این راه‌حل  قبلاً در یک ساختمان آزمایشی در کلرادو آمریکا تست شده است. مزایای کلیدی اقتصاد دورانی عبارتند از مصرف بهینه مواد و استفاده از منابع بومی برای کاهش کارهای لجستیک. این راه‌حل فناورانه در طول فاز ساخت مفید است. توسعه چاپگر سه بعدی ارزان و قابل حمل، ساخت در محل تست خاک و استفاده سریع از چاپ سه بعدی برای سازه‌های در مقیاس کلان را ممکن می‌سازد.

۳/۱/۵/۲. مثال ۲: چاپ پل بتونی [۳۴]. این پروژه از از چاپ بتون سه بعدی برای تولید سازه‌های بهینه استفاده می‌کند بارهای یکسانی را حمل می‌کنند و در عین حال مصرف موادرا تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. پتانسیل ترکیب این فناوری و ساخت با ساخت پلی در آمرزروفت (هلند) با همکاری دانشگاه گنت و انستیتو فناوری تکنیون اسراییل اثبات شده است. یکی از مزایای کلیدی اقتصاد دورانی مصرف بهینه مواد در طول فاز ساخت از طریق بهینه ساختاری و چاپ سه بعدی است.

۳/۱/۵/۳. مثال ۳: گره چاپ شده سه بعدی فلز ARUP [۳۵]. این پروژه نشان می‌دهد می‌توان عناصر طراحی شده سازه فولادی را به شکلی کارآمد با چاپ سه بعدی فلزی تولید کرد. اگرچه آنها به شکل معناداری کوچک‌تر و سبک‌تر هستند اما می‌توانند همان نیروها و بارهای سازه‌ای را به عنوان عناصر استاندارد به دلیل شکل غیرمنظم خود حمل کنند و در عین حال مواد مورد نیاز را کاهش و آلایندگی کربن سازه را به حداقل برسانند. یکی از مزایای کلیدی اقتصاد دورانی، مصرف بهینه مواد در طول فاز ساخت از طریق بهینه‌سازی اسره‌ای و چاپ سه بعدی است.

۳/۱/۵/۴. مثال ۴: شهر خود را چاپ کنید [۳۶]. شهر خود را چاپ کنید ضایعات پلاستیکی خانواده‌ها را به مبلمان شهری و قطعات ساختمانی با چاپ سه بعدی رباتیک و مشارکت شهروندان تبدیل می‌کند. شهروندان از طریق اهدای مواد از طریق فرآیند همکاری در ساخت، مشارکت می‌کنند. این فرآیند از طریق یک پلتفرم طراحی آنلاین حمایت می‌شود که سفارشی‌سازی مبلمان شهری را ممکن می‌سازد. علاوه بر تولید بومی از منابع بازیافت شده، قطعات نهایی مجدداً قابل بازیافت هستند. این راه‌حل قبلاً در دو پروژه آزمایشی در هلند و یونان تست شده است. مزایای کلیدی اثبات شدهٔ اقتصاد دورانی عبارتند از بازیابی ضایعات و استفاده بهینه از مواد. این راه‌حل در طول فاز ساخت قابل کاربرد بوده و استفاده از ضایعات پلاستیکی محلی را به عنوان ماده‌ای برای ساخت و تولید فضای عمومی پر جنب و جوش تسهیل می‌نماید.

**۳/۱/۶. بلاکچین**

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: افزایش کارکرد، کارآیی و ملموس بودن؛ ردیابی غیرمتمرکز اطلاعاتی هم‌چون جریانات مواد و ضایعات.

بلاکچین یک ابزار توزیع شده و غیرمتمرکز است که به شکلی کارآمد، شفاف و غیرقابل تقلید، معاملات را از طریق روش‌های ایمن و رمزنگاری شده ثبت می‌کند (هیسکانن، ۲۰۱۷؛ تورک و کلینک، ۲۰۱۷؛ کراسبی و همکاران، ۲۰۱۶). هم‌اکنون، از بلاکچین در

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

صنعت ساختمان برای ثبت دقیق تغییرات در یک مدل BIM استفاده می‌شود که گروهی از کاربران به آن دسترسی دارند (تورک و کلینک، ۲۰۱۷). می‌توان از بلاکچین برای مدیریت و ایجاد سوابق قابل اطمینان معاملات در عرضه و تقاضای مواد استفاده کرد. می‌توان اطلاعات را در بلاکچین برای ردیابی مکان مواد در کل چرخه حیات آن ذخیره نمود. کاربردهای بالقوه دیگر بلاکچین عبارتند از (البته نه محدود به این موارد): ردیابی لجستیک زنجیره عرضه، تغییرات زمانی در مدل‌های BIM، حفظ گذرنامه مواد، و خودکارسازی تعمیر و نگهداری ساختمان بر مبنای تعاملات اینترنت اشیا.

۳/۱/۶/۱. مثال ۱: پلتفرم Circularise [۳۷]. Circularise یک شرکت استارت‌آپ هلندی است که مواد را در طول زنجیره‌های پیچیده عرضه در یک بلاکچین عمومی بدون به خطر افتادن محرمانگی دیجیتالی ساخته و ردیابی می‌کند. از طریق یک رویکرد متمرکز، آنها شفافیت و حریم خصوصی ایمن را ترکیب می‌کنند تا صنعت بتواند دعاوی معتبر درباره پایداری داشته باشد. این شرکت به تولیدکنندگان پلاستیک، برندها و تولیدکنندگان محصولات اصلی (OEMs) کمک می‌کند مواد خام را از منبع تا قطعات و تا محصول نهایی ردیابی کنند. این راه‌حل قبلاً در بخش پلاستیک آزموده شده است. این راه‌حل در طول فاز طراحی مفید بوده و از مزایای استفاده بهینه مواد در اقتصاد دورانی حمایت می‌کند.

**۳/۱/۷. پهبادها**

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: ردیابی دارایی‌های دیجیتال در سایت، بازرسی محیطی مستمر و نظارت بر پیشرفت؛ ارتقای کاهش ضایعات.

پهبادها که تحت عنوان هواپیماهای بدون سرنشین یا هواپیماهای کنترل از راه دور نیز شناخته می‌شوند، به سرعت در حال به بلوغ رسیدن هستند. یکی از مزایای کلیدی این فناوری آن است که بسته به ظرفیت پهبادها، اندازه، توانایی‌ها و کارکردهای آنها بسیار متنوع هستند [۳۸]. از اینرو، مصرف و کاربرد آنها در صنعت ساخت در حال گسترش برای وظایفی هم‌چون نظارت بر یک پروژه ساختمانی و گردآوری داده‌ها در زمان واقعی هم‌چون شرایط جوّی، ابعاد و موقعیت‌ها است. از منظر دورانی، این فناوری می‌تواند به عملکرد بهینه در سایت‌های عمرانی، افزایش سرعت فرآیند نظارت یا افزایش دقت در ساختمان کمک کند که می‌تواند منجر به تولید کمتر ضایعات شود. کاربردهای تجربی عبارتند از کاربرد پهبادها در سایت‌های ساختمانی برای از بین بردن کارهای سخت نیروی کار، انجام کار با دقت بالاتر و دستیابی به بازخورد از داده‌های واقعی.

۳/۱/۷/۱. مثال ۱: Mud Shell [۳۹]. Mud Shell از پهبادها برای کشیدن روکش خاک رس بر روی یک پناهگاه استفاده می‌کند. این روش ساخت سریع کاربرد بالقوه خود را در اردوگاه‌های پناهجویان و مناطق فاجعه‌زده اثبات کرده است. Mud Shell یک سیستم تأمین مسکن ارزان و اضطراری پایدار است که می‌تواند در هر نقطه‌ای جهان به کار گرفته شود. هدف این روش آن

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

است که مدلی جدید برای احداث پناهگاه‌های اضطراری با استفاده از مواد محلی و پهبادها باشد. این راه‌حل قبلاً در لندن برای راه‌اندازی یک نمایشگاه به کار گرفته شده است. این فناوری از خاک محلی و روش ساخت در محل استفاده می‌کند. یکی از مزایای کلیدی اثبات شده اقتصاد دورانی، کاربرد بهینه مواد در طول فاز ساخت است.

۳/۱/۷/۲. مثال ۲: معماری منطبق با پرواز [۴۰]. در این پروژه، از پهبادها برای ساخت سازه‌ها استفاده شد. این روش متشکل از ۱/۵۰۰ ماژول بود که در پهبادها برنامه‌ریزی شده بودند تا بتوان از داده‌های طراحی دیجیتال برای اجرای ساخت استفاده کرده. سازه تک ماده‌ای حاصله ترکیب ماده خشک (بدون سیمان یا مواد اتصال‌دهنده) و با دقت بالا است. بنابراین، سازه به گونه‌ای طراحی شد که بتوان آن را بدون هیچ ضایعاتی به راحتی از هم باز کرد. این راه‌حل قبل به عنوان روش راه‌اندازی یک نمایشگاه در فرانسه تست شده بود. این فناوری قادر به ساخت شکل‌های پیچیده با دقت بالا با استفاده از بلوک‌های ساختمانی از آجر معمول است. یکی از مزایای کلیدی اقتصاد دورانی اثبات شده توسط این پروژه، کاربرد بهینه ماده در طول فاز ساخت است.

**۳/۱/۸. واقعیت افزوده (AR)**

مزایای موجود در بستر صنعت ساختمان و چشم‌انداز اقتصاد دورانی: ساخت بهینه در محل؛ تعمیر و ساخت از راه دور.

واقعیت افزوده در صنعت ساختمان معمولاً دربرگیرنده اطلاعات دیجیتال از نگاه واقعی کاربران است. این اغلب با استفاده از یک ابزار مجهز به دوربین مانند تبلت، گوشی هوشمند یا هدست به دست می‌آید. صنعت ساختمان می‌تواند با استفاده از این فناوری برای تولید شکل‌های پیچیده در مکان با نتایج با کیفیت بالا و ابزارهای فناورانه ارزان قیمت منتفع شود. به علاوه، این می‌تواند به فرآیندهای تعمیراتی کمک کند که در اصل امکان استفاده بلندمدت‌تر از محصولات را ممکن می‌سازد [۳۸].

می‌توان از طریق تعمیرات یا ساخت قطعاتی که دسترسی به آنها سخت است، کارکنان غیرفنی را هدایت کرد.

۳/۱/۸/۱. مثال ۱: نمای کارخانه مشروب‌سازی Kitrvs [۴۱]. این پروژه از واقعیت افزوده برای تولید یک نمای غیراستاندارد ساخته شده در مقیاس معماری کامل استفاده کرد. نمای پیچیده ساختمان آجری برای یک کارخانه مشروب‌سازی در یونان از طریق آجرچینی دستی افزوده ساخته شد. نمای متشکل از ۱۳،۵۹۶ آجر با استفاده از یک فناوری به نام «آجرچینی افزوده» بود. هدف این فناوری ساخت نمای آجری پیچیده با دقت بالا و حمایت از کاربرد بهینه مواد در طول فاز ساخت بود.

۳/۱/۸/۲. مثال ۲: فولوگرام [۴۲]. فولوگرام (Fologram) پلتفرمی برای طراحی و ساخت واقعیت پیچیده است. این روش محتوای دیجیتال را با دقت در یک فضای سه بعدی قرار می‌دهد و به طور خودکار هولوگرامی برای مسافت‌های بزرگ ایجاد می‌کند. این استفاده از مدل‌های طراحی را به عنوان دستورالعمل‌های ساخت امکان‌پذیر می‌سازد و نیاز به ایجاد نقشه‌های پیچیده دو بعدی را مرتفع می‌سازد. این راه‌حل قبلاً در مطالعات موردی مختلف تست شده است از جمله Tallin Architecture Biennale. دو

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

مزیت کلیدی اقتصاد دورانی اثبات شده با این فناوری عبارتند از کاربرد بهینه مواد به دلیل کارآیی و سرعت در طول فاز ساخت (جدول ۳).

**جدول ۳. کلیات فناوری‌ها و مثال‌های مورد بحث**

| | نام پروژه | فناوری | فعالیت | فاز ساخت | خانواده مواد | TRL | کاربرد | ارزش CE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳/۱/۱a | Oris | اینترنت اشیا | بهینه‌سازی نگهداری | تمامی فازها به ویژه در ساخت و نگهداری | همه مواد | ۴-۵ | پلتفرم مواد دیجیتال | به حداکثر رساندن مصرف مواد |
| ۳/۱/۲a | Madaster | BIM | بهینه‌سازی جریان مواد | همه فازها به ویژه در تخریب | همه مواد | ۷-۸ | گذرنامه مواد | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۳a | تجربه دورانی | ربات‌ها | بازاستفاده ضایعات چوب | ساخت/تخریب | چوب | ۷-۸ | معمار داخلی | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۳b | Rock Print Pavillion | ربات‌ها | مونتاژ خشک | ساخت/تخریب | سنگ/نخ | ۳-۴ | پاویون موقت | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۳c | Wood Chip Barn | ربات‌ها | کاهش ضایعات | ساخت | چوب به شکل طبیعی | ۵-۶ | پاویون موقت | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۴a | AMP Cortex | هوش مصنوعی | مرتب‌سازی ضایعات تخریب | تخریب | ضایعات تخریب | ۷-۸ | مرتب‌سازی مراکز | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۴b | Mine the Scrap | هوش مصنوعی | بازاستفاده از قراضه‌ها | طراحی و ساخت | مواد قراضه | ۳-۴ | دسته‌بندی و بازاستفاده از مواد قراضه | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۵a | Casa Covida | چاپ سه بعدی | خاک محلی | ساخت و تخریب | خاک | ۵-۶ | معماری در مقیاس کوچک | مواد تجدیدپذیر (کارآیی منابع) |
| ۳/۱/۵b | چاپ سه بعدی پل بتونی Vertico | چاپ سه بعدی رباتیک | بهینه‌سازی کاربرد مواد | ساخت | بتون | ۷-۸ | زیرساختار/پل | مواد تجدیدپذیر (کارآیی منابع) |
| ۳/۱/۵c | چاپ سه بعدی فلز ARUP | چاپ سه بعدی | بهینه‌سازی مصرف مواد | ساخت | فلز | ۵-۶ | ساخت قطعات | مواد تجدیدپذیر (کارآیی منابع) |
| ۳/۱/۵d | Print Your City | چاپ سه | مواد ضایعات، | ساخت و | ضایعات | ۷-۸ | مبلمان شهری | بازیابی |

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | بعدی رباتیک | منبع بومی | تخریب | پلاستیکی خانواده | | | محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۶a | Circularise | بلاکچین | دیجیتالی سازی و پیگیری موادساخت | ساخت و تخریب | همه فلزات | ۷-۸ | پلتفرم آنلاین | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
| ۳/۱/۷a | Mud Shell | پهپادها | خاک | ساخت | کلوخ | ۳-۴ | پوسته | دروندادهای تجدیدپذیر (تأمین دورانی) |
| ۳/۱/۷b | Flight Assembled Architecture | پهپادها | یک ماده، مونتاژ خشک | ساخت | آجر | ۳-۴ | نمایشگاه | دروندادهای تجدیدپذیر (تأمین دورانی) |
| ۳/۱/۸a | Kirtvs | AR/VR | تولید پیچیده در محل | ساخت | آجر | ۷-۸ | نما | دروندادهای تجدیدپذیر (تأمین دورانی) |
| ۳/۱/۸b | Fologra m | AR/VR | تولید پیچیده در محل | ساخت | مواد مختلف | ۷-۸ | پلتفرم | دروندادهای تجدیدپذیر (تأمین دورانی) |

## ۴. مباحثه

در میان چهار فاز اصلی چرخه حیات ساختمان (طراحی، ساخت، نگهداری و تخریب) فازهای ساخت و تخریب دارای بیشترین ضایعات است. این بدان معنا است که توسعه راه‌حل‌های دورانی و مؤلفه‌های ساخت که ضایعات را در طول ساخت و تخریب به حداقل می‌رساند، دارای پتانسیل ایجاد اثرات زیست محیطی مثبت هستند. البته این استراتژی‌های اقتصاد دورانی اثربخش‌تر هستند اگر در فاز طراحی اجرا شوند. کاربری‌های منتخب نشانگر راه‌حل‌های فناورانه هستند که مرتبط با اصول اقتصاد دورانی به شرح ذیل هستند: (۱) باز کردن قطعات، بازاستفاده و بازیافت در طول فاز طراحی و مهندسی، (۲) مصرف بهینه مواد در طول فاز ساخت، و (۳) اولویت‌بندی مواد تجدیدپذیر و بازیابی محصولات جانبی و ضایعات در طول فاز تخریب (جدول ۲).

این تحقیق هشت فناوری مخرب را شناسایی کرده که می‌تواند به نفع صنعت ساختمان دورانی باشد و نقش بالقوه آنها را در مراحل چرخه حیات ساختمان‌ها واکاوی می‌کند (جدول ۳). مزایای اقتصاد دورانی در هر مرحله از چرخه حیات ساختمان‌ها (به استثنای مصرف و نگهداری) (شکل ۳) و در بستر سه اصل اساسی اقتصاد دورانی (جدول ۴) خوشه‌بندی شده‌اند.

تجزیه و تحلیل مثال‌های منتخب نشان می‌دهد در طول فاز طراحی و مهندسی، راه‌حل‌های فناورانه را ارزیابی می‌کند که عمدتاً به باز کردن قطعات و مصرف بهینه مواد کمک می‌کنند. این راه‌حل‌ها از مزایای فناوری‌هایی هم‌چون اینترنت اشیا، BIM، هوش

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

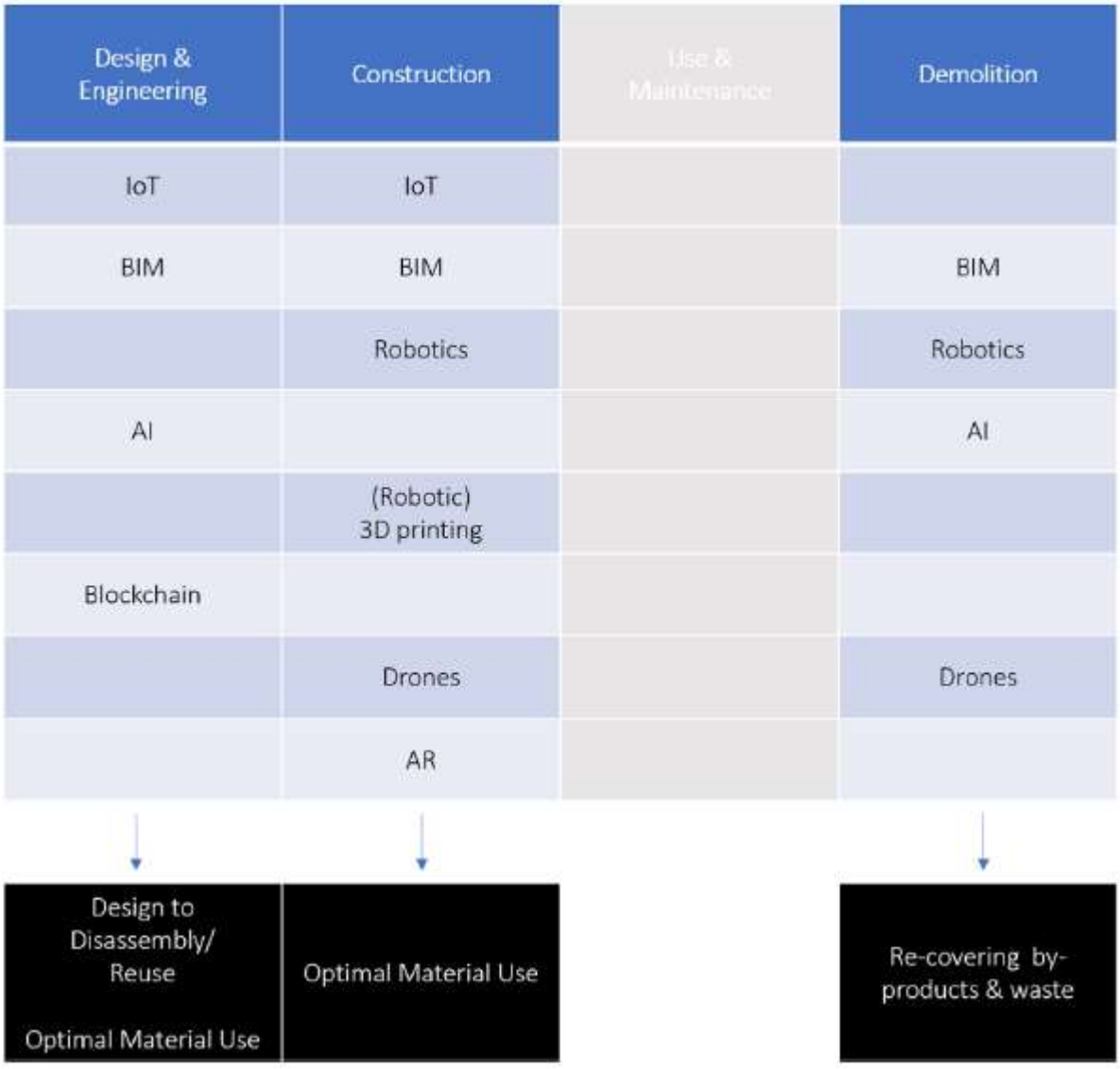
ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

هیجانی و بلاکچین بهره می‌برند. معمولاً، فناوری‌ها نمایانگر یک پلتفرم آنلاین یا ابزار دیجیتال است که امکان پرداختن به موضوعات جهانی را در سطح محلی امکان‌پذیر می‌سازد (مانند جاده‌های پایدار). فواید محیطی حاصل از این مرحله عمدتاً در طول فازهای ساخت و تخریب منعکس می‌شوند. در طول فاز ساخت، جنبه‌ای از اقتصاد دورانی که اغلب به بیشترین شکل بدان پرداخته می‌شود، مصرف بهینه مواد از طریق اینترنت اشیا، BIM، (رباتیک) چاپ سه بعدی، پهبادها و AR است. سناریوهای اقتصاد دورانی که تأیید می‌شوند عبارتند از تأمین منابع بومی، تولید با ضایعات صفر، بازاستفادهٔ مواد غیر استاندارد و کاهش لجستیک. در طول فاز تخریب، جنبه‌ای از اقتصاد دورانی که اغلب به بیشترین شکل ممکن بدان پرداخته می‌شود، بازیابی محصولات جانبی یا ضایعات از طریق BIM، رباتیک، هوش مصنوعی و پهبادها است. سناریوهای اقتصاد دورانی که تأیید می‌شوند عبارتند از حفظ ارزش مواد از طریق ثبت و دیجیتالی‌سازی، بهبود کارآیی مرتب‌سازی در فرآیندهای بازیافت و قادر ساختن استفاده مجدد از مواد به دلیل مونتاژ خشک.

این تحقیق از نظر تعداد کلیدواژه‌های مورد استفاده در زمان کسب منابع ادبیات تحقیق و تعداد مثال‌های به کار برده شده و ارزیابی شده محدود است. به علاوه، فاز تعمیر و نگهداری در این بررسی مستثنی شده است. بنابراین، برای گنجاندن کلیدواژه‌های متعارف‌تر و مثال‌های کاربردی در کل فازهای چرخه حیات ساختمان‌ها، به تحقیق بیشتری نیاز است. اگرچه این تحقیق متمرکز بر مطالعات موردی اجرا شده است اما اکثر موارد هنوز در فازهای ابتدایی توسه خود قرار دارند.

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶




**شکل ۳. مزایای اقتصاد دورانی در قبال فناوری‌های مخرب و ساخت بر مبنای مثال‌های مطالعه شده**

## ۵. نتیجه‌گیری

صنعت ساختمان صنعتی با بیشترین ضایعات در جهان است. در عین حال، صنعت ساختمان در بکارگیری فناوری‌های جدید به ویژه در فاز ساخت بسیار محافظه‌کار است. مقاله حاضر به فرصت‌ها و پتانسیل توسعه فرآیندها و محصولات ساخت دورانی با

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

استفاده از فناوری‌های مخرب می‌پردازد و به بازیابی مواد قبلاً دور ریخته شده از طریق کاربردهای با ارزش بالا و ماندگار کمک می‌کند.

می‌توان استدلال کرد که در این رویکردهای یکپارچه، منابع تفکیک محیطی (بازیابی شده) و مصرف آنها از طریق فناوری‌های نوآورانه می‌تواند مسئله‌ساز باشد. به علاوه، افزایش پیچیدگی و عدم شفافیت وجود دارد که باعث مانع در برابر پرداختن به موضوع تفکیک محیطی می‌شود و نشانگر یک چرخه باطل است. این را می‌توان با در نظر گرفتن رابطه میان ابهامات و پیچیدگی‌ها تشریح کرد: رسیدن به هدف عدم وجود هر گونه ابهام کاری بسیار پیچیده است و منجر به نوآوری نخواهد شد در حالی که نادیده گرفتن ابهامات نیز بسیار ساده است. در مورد دوم، تمامی انواع معیارها بدون در نظر گرفتن ابهامات، آزموده و اجرا می‌شوند. سپس، مسایل به صورت معمول وارد فاز مدیریت می‌شوند یا در اختیار مدیران سیستم‌ها قرار می‌گیرند. میزان واقعی پیچیدگی در جایی بین این قرار دارد و می‌تواند منجر به نوآوری‌هایی مفید شود که در صورت لزوم به کار گرفته خواهند شد.

**جدول ۴. سناریوهای اقتصاد دورانی خوشه‌بندی شده در بستر سه اصل اساسی اقتصاد دورانی بر مبنای مثال‌های مورد مطالعه.**

| | طراحی برای باز کردن قطعات، استفاده مجدد یا بازیافت | مصرف بهینه مواد | بازیابی محصولات جانبی و ضایعات |
|---|---|---|---|
| اینترنت اشیا | نگرشی در خصوص شرایط محلی و گزینه‌های تأمین منابع | | |
| BIM | محاسبه درصد دروانی بودن یک ساختمان در طول فاز طراحی | | |
| رباتیک | | استفاده مجدد از مواد استاندارد (قبلاً نادیده گرفته شده، مواد فرآوری شده غیرصنعتی و غیره) | امکان استفاده مجدد از مواد به دلیل مونتاژ خشک |
| هوش مصنوعی | روش‌های طراحی مولد که استفاده از مواد غیراستاندارد را خودکار می‌سازند (قبلاً نادیده گرفته شده، مواد فرآوری شده غیرصنعتی و غیره) | | مرتب‌سازی کارآمد (افزایش سطح خلوص با کاهش زمان) |
| رباتیک (چاپ سه بعدی) | | تولید ضایعات صفر<br>تأمین منابع بومی<br>ساخت در محل و کاهش لجستیک | قطعات ساختمانی مکرراً قابل بازیافت |
| بلاکچین | شفافیت و حریم خصوصی تضمین شده برای انجام ادعاهای معتبر درباره پایداری | | |
| پهبادها | | استفاده از مواد بومی | استفاده مجدد از مواد به دلیل مونتاژ خشک |
| AR | | ساخت از راه دوره در جریان کاری بهینه و دقت بالا<br>کارآیی و سرعت در طول فاز ساخت | |

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

در تلاقی فناوری‌های جدید، اقتصاد دورانی و صنعت ساختمان در این تحقیق واکاوی شده‌اند. تحقیق حاضر مشخص کرده کدام فناوری‌ها می‌توانند در تحقیق اقتصاد دورانی صنعت ساختمان نقش ایفا کنند یا از قبل چنین نقشی ایفا کرده‌اند و نقش‌های بالقوه آنها در فازهای دارای بیشترین ضایعات در طول چرخه حیات ساختمان‌ها واکاوی شده‌اند. هشت فناوری دیجیتال (اینترنت اشیا، BIM؛ ربات‌ها؛ هوش مصنوعی؛ چاپ سه بعدی؛ بلاکچین؛ پهبادها؛ و AR) انتخاب و بحث شدند که این مبحث شامل سطوح TR آنها و نقش بالقوه آنها در صنعت ساختمان دورانی نیز بود. این فناوری‌ها از منظر مزایای و فرصت‌های اقتصاد دورانی با استفاده از مرور ادبیات تحقیق بحث شدند و تحلیل مثال‌های دقیق درباره این فناوری‌ها نیز انجام شد. فناوری‌های مورد بحث دارای پتانسیل تولید مسیرهای جدید در یک صنعت ساختمان دورانی هستند که حامی مفاهیمی هم‌چون تولید محلی و با ضایعات صفر، جریان کاری بهینه و توزیع مواد است و استفاده از منابع محلی هم‌چون خاک، ضایعات، مواد مازاد و غیره را ممکن می‌سازد. به علاوه، ممکن است آنها حامی دیگر استراتژی‌های دورانی نیز باشند مانند مدیریت فعالیت‌ها، کارآیی منابع، بهینه‌سازی جریان منابع و ردیابی و دنبال کردن محصول پس از مصرف. این عمدتاً از طریق دیجیتالی‌سازی فرآیندها، پیوند اطلاعات و ایجاد جریانات کاری جدید به دست می‌آید.

اجرای این فناوری‌ها در صنعت ساختمان هنوز در فاز اولیه است. بنابراین، اکثر مثال‌ها در یک مقیاس کامل تست نشده‌اند. لذا، ارزیابی آنها از منظر ارزش کسب و کار اغلب دشوار است. باید انتظار داشت که آغاز تکنیک‌های ساخت دورانی (مانند بازیافت مواد خرد شده، مخلوط شده و غیره) هم‌چنان یک حوزه مهم در سیاست‌ها و بازار ساخت دورانی حداقل طی دهه جاری باشد.

**منابع**

[۱] UNEP, ۲۰۲۰ Global Status Report for Buildings and Construction, towards a Zero-Emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Retrieved from, Nairobi, ۲۰۲۰.

[۲] M. Migliore, C. Talamo, G. Paganin, Strategies for CE and Cross-Sectoral Exchanges for Sustainable Building Products, Springer, ۲۰۲۰.

[۳] Eurostat, Waste statistics, Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics#Total_waste_generation, ۲۰۲۱. (Accessed ۲۵ July ۲۰۲۱).

[٤] Global Alliance for Buildings and Construction, GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION towards a zero-emissions, efficient and resilient

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

buildings and construction sector, Available online: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/۲۰۲۰٪۲۰Buildings٪۲۰GSR_FULL٪۲۰REPORT.pdf, ۲۰۲۰.

[۵] Circle Economy, The CE gap, Available online: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/circularity_gap_report_۲۰۱۹.pdf, ۲۰۱۹.

[۶] PhJ. Vergragt, P. Groenewegen, J.L.A. Jansen, H.P. van Heel, New Technological Developments and Technology Assessment: a Plea for an Integrated Approach, in: Project Appraisal, vol. ٤, Technische Universiteit Delft (TUD), Delft, ۱۹۸۹.

[۷] PhJ. Vergragt, Leap-frogging to sustainable households, in: Proceedings, ۸th Greening of Industry Conference 'Ways of Knowing/Ways of Acting', ۷ July ۱۹۹۹, Chapel Hill, North Carolina, ۱۹۹۹.

[۸] European Commission, Construction, and demolition waste, Available online: https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/construction-anddemolition-waste_en.

[۹] European Environment Agency, Construction and Demolition Waste: Challenges and Opportunities in a Circular Economy, ۲۰۲۰ available online: https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges.

[۱۰] European Commission, Europe's Digital Decade: Commission Sets the Course towards a Digitally Empowered Europe by ۲۰۳۰, ۲۰۲۱. Available online: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_۲۱_۹۸۳. (Accessed ۲۵ July ۲۰۲۱).

[۱۱] S. Çetin, C. De Wolf, N. Bocken, Circular digital built environment: an emerging .framework, Sustainability ۱۳ (۲۰۲۱) ٦۳٤۸

[۱۲] P. Rosa, C. Sassanelli, A. Urbinati, D. Chiaroni, S. Terzi, Assessing relations between CE and Industry ٤٫۰: a systematic literature review, Int. J. Prod. Res. ۵۸ (۲۰۱۹) ۱٦٦۲–۱٦۸۷.

[۱۳] A. Van Timmmeren, D.V. Keyson, Living Labs. Designing for and assessing sustainable living, in: D.V. Keyson, O. Guerra-Santin, D. Lockton (Eds.), (۲۰۱٦) Living Labs, Springer International publishing Switzerland, ۲۰۱٦.

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

[۱٤] Deloitte, Point of View on Digital Construction, the Business Case of Incorporating Digital Technologies into the Construction Industry, ۲۰۱۹ available on-line: htt ps://www۲.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resou rces/deloitte-nl-eri-point-of-view-digital-construction.pdf.

[۱٥] D. Jacobs, J. Kuijpers, B. Roes, De economische kracht van de bouw: Noodzaak van een culturele trendbreuk. (Dutch only). TNO-Beleidstudies, Stichting Maatschappij en Onderneming, Den Haag, ۱۹۹۲.

[۱٦] C.G. van Hemel, J.C. Brezet (Eds.), EcoDesign; a Promising Approach to Sustainable Production and Consumption, UNEP, Paris, ۱۹۹۷.

[۱۷] M.J. Goedkoop, D.J.G.van Halen, H.R.M.te Riele, P.J.M. Rommens, Product Service Systems: Ecological and Economic Basis, PWC PricewaterhouseCoopers, Storrm C.S. & Pre Consultants, ۱۹۹۹.

[۱۸] Junghoon Woo, Ridah Fatima, Charles J. Kibert, Richard E. Newman, Yifeng Tian, Ravi S. Srinivasan, Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: a review of the literature, Build. Environ. ۲۰٥ (۲۰۲۱) ۱۰۸۱۹۹, https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.buildenv.۲۰۲۱,۱۰۸۱۹۹. ISSN ۰۳٦۰-۱۳۲۳.

[۱۹] B. Quintana, K. Vikhorev, A. Ad´an, Workplace occupant comfort monitoring with a multi-sensory and portable autonomous robot, Build. Environ. ۲۰٥ (۲۰۲۱) ۱۰۸۱۹٤, https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.buildenv.۲۰۲۱,۱۰۸۱۹٤. ISSN ۰۳٦۰-۱۳۲۳.

[۲۰] EY, How Technology Advances Are Disrupting the Construction Industry, ۲۰۲۰. Available online: https://www.ey.com/en_us/real-estate-hospitality-construction/ corporate-advisory-services/how-technology-advances-are-disrupting-the-constr uction-industry.

[۲۱] Ellen Mc Arthur Foundation, Intelligent assets. https://www.ellenmacarthurfou ndation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intellig ent_Assets_۰۸۰۲۱٦-AUDIO-E.pdf.

[۲۲] ORIS, LafargeHolcim, IBM, ۲۰۲۰, available online https://www.holcim.com/orisibm-

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

partnership.

[۲۳] Rabia Charef, Stephen Emmitt, Uses of building information modelling for overcoming barriers to a CE, J. Clean. Prod. ۲۸۵ (۲۰۲۱).

[۲٤] R. Charef, The use of Building Information Modelling in the circular economy context: several models and a new dimension of BIM (۸D), Clean. Eng. Technol. ۷ (۲۰۲۲) ۱۰۰٤۱٤, https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.clet.۲۰۲۲,۱۰۰٤۱٤. ISSN ۲٦٦٦-۷۹۰۸.

[۲٥] Benjamin Sanchez, Christopher Rausch, Carl Haas, Timo Hartmann, A framework for BIM-based disassembly models to support reuse of building components, Res. Conserv. Recycling J. ۱۷٥ (۲۰۲۱) https://urldefense.proofpoint.com/v۲/url?u=https-۳A__doi.org_۱۰,۱۰۱٦_j.resconrec.۲۰۲۱,۱۰٥۸۲٥&d=DwIGaQ&c=XYzUhXBD۲cD-CornpT٤QE۱۹xOJBbRy-TBPLK۰X۹U۲o۸&r=G۰UjiZ۷۳TeUNbQOAO٤nJM٦mfIqYC۲Chb_qRDrvLaKWE&m=K۰DJ۲QVFk۲t۹۷h٥Zh٦KCBUZxEXUsbJHlIGmperj۲Rlc&s=٥GchCcCVbEK٥OVtqkEp۹G٦ate٥dESdh٦T۷fb_n۸i۰zk&e=[Journal Impact Factor (۲۰۲۰): ۱۰,۲۰٤, JCR Quartile (۲۰۲۰): Q۱].

[۲٦] Madaster Platform, available online: https://madaster.com/.

[۲۷] R.A.P. Studio, Circular Experience, ۲۰۱۸ available online: https://studiorap.nl/#/abnamro.

[۲۸] Rock Print Pavilion, Gramazio Kohler Research at ETH Zurich, ۲۰۱۸ available online: https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/۳٦٤.html.

[۲۹] Wood Chip Barn, AA Design&Make, available online: http://designandmake.aaschool.ac.uk/project/wood-chip-barn/, ۲۰۱٦.

[۳۰] Amp Robotics Corp and Ryohshin Co Ltd, information retrieved from: https://www.businesswire.com/news/home/۲۰۱۹۰۳۱۲۰۰٥۱٤۰/en/AMP-Robotics-and-Ryohshin-Partner-on-New-Industrial-Automation-for-Construction-and-Demolition-Recycling, ۲۰۱۹.

[۳۱] Certain Measures, available online: https://certainmeasures.com/mts_installation.html, ۲۰۱٦.

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

[۳۲] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Introduction and basic principles, in: I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker (Eds.), Additive Manufacturing Technologies. ۳D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, New York, NY, USA, ۲۰۱۵, pp. ۱–۱۸.

[۳۳] Emerging Object, Mud frontiers, available online: http://emergingobjects.com/project/mud-frontiers-part-ii/, ۲۰۱۹.

[۳٤] Vertico ۳D, Topology optimised bridge, available online: https://www.vertico.xyz/topology-optimised-bridge, ۲۰۱۹.

[۳٥] Arup, Design method for critical structural steel elements, available online: https://www.arup.com/projects/additive-manufacturing.

[۳٦] Print Your City, The New Raw, available online: https://www.printyour.city/, ۲۰۱۸.

[۳۷] Circularise platform, Circularise. https://www.circularise.com/, ۲۰۱٦.

[۳۸] PWC, The road to circularity. https://www.pwc.nl/en/assets/documents/pwc-the-road-to-circularity-en.pdf.

[۳۹] Mudd architects, Mudd Shell, available on-line: https://www.muddarchitects.com/projects.

[٤۰] Gramazio, Kohler, Flight assembled architecture, available on-line: http://www.gramaziokohler.com/web/d/installationen/۲۰۹.html, ۲۰۱۲.

[٤۱] Gramazio, Kohler, Human-machine collaboration in computational design and robotic fabrication, available online: https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/۳۷۲.html.

[٤۲] Fologram, available online: https://fologram.com/.

Further reading

[٤۳] CBS, available online: https://www.cbs.nl/en-gb/news/۲۰۱۹/٤٥/construction-sector-leading-in-waste-and-recycling, ۲۰۱۹.

[٤٤] Samuel Copeland, Melissa Bilec, Buildings as material banks using RFID and building information modeling in a CE, Procedia CIRP ۹۰ (۲۰۲۰) ۱٤۳–۱٤۷.

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

[٤٥] World Economic Forum: Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology.

[٤٦] C. Newman, D. Edwards, I. Martek, J. Lai, W.D. Thwala, I. Rillie, Industry ٤,٠ deployment in the construction industry: a bibliometric literature review and UKbased case study, Smart Sust. Built Environment ١٠ (٤) (٢٠٢١) ٥٥٧–٥٨٠, https://doi.org/١٠,١١٠٨/SASBE-٠٢-٢٠٢٠-٠٠١٦.

[٤٧] Shu Tang, Dennis R. Shelden, Charles M. Eastman, Pardis Pishdad-Bozorgi, Xinghua Gao, A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: present status and future trends, Autom. ConStruct. ١٠١ (٢٠١٩) ١٢٧–١٣٩