فناوری پرینت سه بعدی ، مواد وفناوری های نوین بتن

شهاب الدین شفیعیان ، حسین حیدر

shafiyanshahab@gmail.com -۱

haydarhossein427@gmail.com -۲

خلاصه :
این مقاله به بررسی روش‌های پایدار در صنعت ساخت‌وساز بتنی می‌پردازد که با توجه به مصرف بالای بتن و اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان، اهمیت فزاینده‌ای یافته است .راهکارهای مختلفی از جمله استفاده از بتن سبز با سنگدانه‌های بازیافتی و محصولات جانبی صنعتی، بتن نفوذپذیر برای مدیریت رواناب، بتن خنک برای کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، و بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) برای کاهش مصرف مواد مطرح شده‌اند .همچنین، استفاده از مصالح محلی برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و اثرات زیست‌محیطی مورد تاکید قرار گرفته است .فناوری‌های نوآورانه‌ای مانند بتن خود ترمیم‌شونده برای افزایش دوام سازه‌ها و بتن پرینت سه‌بعدی (۳DPC) برای بهبود کارایی، کاهش پسماند و امکان ساخت اشکال پیچیده نیز در حال توسعه هستند .با وجود چالش‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی، همکاری بین دولت، صنعت و دانشگاه، و همچنین سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، اجرای سیاست‌های حمایتی و ترویج استانداردها برای دستیابی به ساخت‌وساز بتنی پایدار ضروری است .پرینت سه‌بعدی بتن در مقیاس بزرگ پتانسیل قابل توجهی برای تحول در این صنعت دارد، اما نیاز به پیشرفت در زمینه مواد، سیستم‌ها و استانداردسازی دار

کلمات کلیدی :ساخت‌وساز بتنی پایدار، بتن سبز، پرینت سه‌بعدی بتن (۳DPC)، مصالح پایدار، فناوری‌های نوآورانه، بتن نفوذپذیر، بتن خنک، بتن خود ترمیم‌شونده، سنگدانه‌های بازیافتی، بایندرهای جایگزین

۱. مقدمه

صنعت ساخت‌وساز بتنی، که بتن دومین ماده پرمصرف در زمین پس از آب است با تولید جهانی حدود ۴.۱ میلیارد تن سیمان در سال ۲۰۲۱ و مصرف سالانه بتن حدود ۷ برابر بیشتر نقش حیاتی در توسعه زیرساخت‌ها و مسکن ایفا می‌کند. با این حال، این صنعت سهم قابل توجهی در اثرات زیست‌محیطی جهانی دارد .تولید سیمان پرتلند، جزء اصلی بتن، مسئول تقریباً ۸-۷ درصد از انتشار جهانی CO_2است .این ردپای کربن قابل توجه، همراه با کاهش منابع طبیعی مانند سنگدانه‌ها و آب نگرانی‌های فزاینده‌ای را در مورد پایداری ساخت‌وساز بتنی ایجاد کرده و تحولی جهانی را به سوی بی‌طرفی اقلیمی آغاز کرده است .شهرنشینی سریع و رشد جمعیت تقاضا برای زیرساخت‌ها و مسکن جدید را افزایش داده و اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت‌وساز را تشدید می‌کند .با توجه به چالش‌های عمده تغییرات آب و هوایی و کمبود منابع، نیاز مبرمی به راهکارهای پایدارتر در ساخت‌وساز بتنی وجود دارد . در پاسخ به این چالش‌ها، صنعت ساخت‌وساز به طور فعال در حال بررسی و اجرای شیوه‌ها و مصالح پایدارتر در ساخت‌وساز بتنی است .هدف این تغییر کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید بتن، افزایش عمر مفید سازه‌ها و به حداقل رساندن مصرف منابع است .محققان، متخصصان صنعت و سیاست‌گذاران

در حال همکاری برای توسعه و ترویج فناوری‌ها، مصالح و راهبردهای نوآورانه هستند که می‌تواند به طور قابل توجهی ردپای کربن، مصرف انرژی و تولید پسماند مرتبط با ساخت‌وساز بتنی را کاهش دهد .اهمیت پایداری در ساخت‌وساز بتنی با توافقات بین‌المللی مانند توافق پاریس و اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد (SDGs) بیشتر مورد تأکید قرار گرفته است . همزمان با این تمرکز بر پایداری کلی، تکنیک‌های پرینت سه‌بعدی (۳D)ساخت‌وساز در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای توسعه یافته و در برخی موارد به کاربردهای عملی منتقل شده‌اند .فناوری پرینت سه‌بعدی بتن (۳DPC)یک تکنیک ساخت‌وساز نوآورانه است که عمدتاً از لایه‌گذاری برای رسوب مواد استفاده می‌کند .بتن از یک نازل اکسترود شده و به طور خودکار لایه به لایه بر اساس یک مسیر پرینت دیجیتالی طراحی‌شده و بدون استفاده از هیچ قالبی رسوب می‌کند . ثابت شده است که فناوری پرینت سه‌بعدی مزایایی مانند کارایی و انعطاف‌پذیری بالا، و همچنین مزایای زیست‌محیطی در طول ساخت‌وسازهای با شکل پیچیده و همچنین پرینت دیوارهای زاویه قائم معمولی دارد .این مقاله یک بررسی جامع از روندهای فعلی و فرصت‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار ارائه می‌دهد و بر اهمیت اتخاذ شیوه‌های دوستدار محیط‌زیست برای کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت تأکید می‌کند .همچنین وضعیت فعلی و فرصت‌های آینده فناوری پرینت سه‌بعدی بتن در مقیاس بزرگ را بررسی می‌کند .

۱ .مصالح پایدار در ساخت‌وساز بتنی

صنعت ساخت‌وساز به طور فزاینده‌ای بر پایداری و توسعه شیوه‌های دوستدار محیط‌زیست تمرکز کرده است .یک جنبه حیاتی این تغییر، پذیرش مصالح پایدار در ساخت‌وساز بتنی است .مصالح و فناوری‌های نوآورانه مختلفی با هدف کاهش ردپای محیط‌زیستی ساخت‌وساز بتنی، افزایش دوام و عملکرد آن و کمک به پایداری کلی محیط ساخته‌شده ظهور کرده‌اند .

۱.۱ .بتن سبز

بتن سبز یک اصطلاح رایج برای مصالح بهبودیافته از نظر محیط‌زیست در ساخت‌وساز بتنی است که در سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است .این اصطلاح به بتنی اطلاق می‌شود که با استفاده از مصالح و فرآیندهای دوستدار محیط‌زیست تولید می‌شود، با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید و ساخت‌وساز بتن .بتن سبز را می‌توان با استفاده از انواع روش‌ها، از جمله استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی، محصولات جانبی صنعتی و بایندرهای جایگزین تولید کرد که همگی به کاهش ردپای کربن و کاهش مصرف منابع طبیعی کمک می‌کنند .بتن سبز می‌تواند به عنوان بتن اکولوژیکی یا بتن بهبودیافته اقلیمی نیز شناخته شود .

- **سنگدانه‌های بازیافتی** :سنگدانه‌های بازیافتی جزء ضروری بتن سبز هستند، زیرا با استفاده از مواد پسماند و کاهش تقاضا برای منابع طبیعی به کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید بتن کمک می‌کنند .استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در ساخت‌وساز بتنی به اصول توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی کمک می‌کند و بهره‌وری منابع و به حداقل رساندن پسماند را ترویج می‌دهد .سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان از مواد پسماند مختلفی مانند پسماندهای ساخت و تخریب (C&D) تهیه کرد که شامل بتن، آجر و مصالح بنایی تخریب‌شده، و همچنین مواد پسماند مانند شیشه و پلاستیک است .چالش‌هایی نیز در ارتباط با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی وجود دارد، مانند تغییرپذیری در کیفیت و خواص آنها، آلودگی احتمالی و نیاز به کنترل کیفیت مناسب و تکنیک‌های پردازش .

- **محصولات جانبی صنعتی** :محصولات جانبی صنعتی اجزای ارزشمندی از بتن سبز هستند، زیرا استفاده از مواد پسماند از صنایع مختلف را امکان‌پذیر می‌سازند و اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید بتن را کاهش می‌دهند .استفاده از محصولات جانبی صنعتی در ساخت‌وساز بتنی با اصول توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی همسو است و بهره‌وری منابع و به حداقل رساندن پسماند را تشویق می‌کند .برخی از محصولات جانبی صنعتی رایج مورد استفاده در بتن سبز شامل خاکستر بادی، دوده سیلیسی، سرباره کوره بلند (GGBS) و خاکستر پوسته برنج هستند که همگی می‌توانند به عنوان مواد سیمانی جایگزین (SCMs) استفاده شوند و در نتیجه نیاز به سیمان سنتی را کاهش دهند .چالش‌هایی نیز در ارتباط با استفاده از محصولات جانبی صنعتی در بتن سبز وجود دارد، مانند در دسترس بودن محدود، تغییرپذیری در خواص آنها، آلودگی احتمالی و نیاز به کنترل کیفیت مناسب و تکنیک‌های پردازش .
- **بایندرهای جایگزین** :بایندرهای جایگزین یک جنبه ضروری از بتن سبز هستند، زیرا پتانسیل کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید بتن را با جایگزینی یا تکمیل سیمان پرتلند سنتی ارائه می‌دهند .تولید سیمان مسئول بخش قابل توجهی از انتشار CO_2در بخش ساخت‌وساز است .بتن ژئوپلیمری و بتن فعال شده با قلیایی دو جایگزین دوست‌دار محیط‌زیست برای بتن سنتی هستند .سیمان CSA یک جایگزین با CO_2پایین برای سیمان پرتلند است که حاوی کلسیم سولفوآلومینات (CSA) به عنوان جزء اصلی خود است .سیمان‌های پایه منیزیم، مانند سیمان منیزیم فسفات (MPC) و سیمان اکسید منیزیم(MgO) ، بایندرهای جایگزین هستند که امکان کاهش انتشار CO_2مرتبط با تولید سیمان را فراهم می‌کنند .سیمان کلسینه شده از خاک رس یک بایندر جایگزین امیدوارکننده است .بایندرهای جایگزین معمولاً ردپای کربن کمتری نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارند .با این حال، چالش‌هایی نیز در ارتباط با استفاده از بایندرهای جایگزین وجود دارد، مانند در دسترس بودن محدود، تغییرپذیری در خواص و نیاز به کنترل کیفیت مناسب و تکنیک‌های پردازش .

۱.۲ .بتن نفوذپذیر

بتن نفوذپذیر، که به عنوان بتن متخلخل نیز شناخته می‌شود، یک فناوری و روش نوآورانه در ساخت‌وساز بتنی است که به آب اجازه می‌دهد از ساختار آن عبور کند و زهکشی طبیعی را ترویج کرده و رواناب سطحی را کاهش دهد .این نوع بتن با تخلخل بالا مشخص می‌شود که با استفاده از حداقل مقدار سنگدانه‌های ریز یا ماسه در مخلوط و نسبت بیشتری از سنگدانه‌های درشت به دست می‌آید .فضاهای خالی متصل در بتن به آب اجازه می‌دهند از آن عبور کند و آن را به یک راهکار دوست‌دار محیط‌زیست برای کاربردهای مختلف ساخت‌وساز تبدیل می‌کند .بتن نفوذپذیر می‌تواند به مدیریت رواناب طوفان با اجازه دادن به نفوذ آب از طریق روسازی و ورود به زمین کمک کند و در نتیجه خطر سیل، فرسایش و آلودگی آب را کاهش دهد .این فرآیند زهکشی طبیعی همچنین می‌تواند به پر کردن منابع آب زیرزمینی و کاهش تقاضا برای زیرساخت‌های رواناب طوفان کمک کند .با تسهیل نفوذ آب از طریق بتن، روسازی‌های نفوذپذیر می‌توانند به فیلتر کردن آلاینده‌ها مانند روغن، فلزات سنگین و رسوبات کمک کنند و از ورود آنها به منابع آب و آلودگی آب جلوگیری کنند . ساختار متخلخل بتن نفوذپذیر می‌تواند با ترویج سرمایش تبخیری و کاهش میزان گرمای جذب شده توسط سطوح روسازی‌شده، به کاهش اثر جزیره گرمایی شهری کمک کند .ماهیت متخلخل بتن نفوذپذیر همچنین به کاهش تجمع آب در سطح کمک می‌کند و خطر هیدروپلنینگ را کاهش داده و مقاومت در برابر لغزش را بهبود می‌بخشد .بتن نفوذپذیر در مقایسه با روسازی‌های غیر نفوذپذیر سنتی نیاز به نگهداری کمتری دارد، با وجود مزایای آن، چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز در ارتباط با بتن نفوذپذیر وجود دارد .به دلیل تخلخل بالا و مقاومت کمتر در مقایسه با بتن معمولی، بتن نفوذپذیر ممکن است برای کاربردهای بار سنگین یا مناطق با حجم ترافیک بالا مناسب نباشد .با این حال، برای مناطق کم ترافیک

مانند پارکینگ‌ها، پیاده‌روها، خیابان‌های مسکونی و سایر کاربردهای کم فشار مناسب است .با گذشت زمان، فضاهای خالی در بتن نفوذپذیر ممکن است با رسوب، زباله یا مواد آلی مسدود شوند و ظرفیت نفوذ آن را کاهش دهند .



۱.۳ .بتن خنک

بتن خنک، که به عنوان بتن با آلبدوی بالا یا بتن بازتابنده نیز شناخته می‌شود، یک فناوری و روش نوآورانه در ساخت‌وساز بتنی است که با گنجاندن مواد با بازتابندگی خورشیدی بالا در مخلوط بتن یا پوشش‌های سطحی، با هدف کاهش اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) انجام می‌شود .این نوع بتن بخش بیشتری از تابش خورشیدی را به جو بازتاب می‌دهد و در نتیجه دمای سطح آن در مقایسه با بتن سنتی خنک‌تر است .بتن خنک می‌تواند به کاهش اثر UHI با کاهش دمای سطوح روسازی‌شده کمک کند .این می‌تواند منجر به فضاهای بیرونی راحت‌تر، بهبود کیفیت هوا و کاهش تنش حرارتی بر اکوسیستم‌های شهری شود .با کاهش گرمای جذب شده توسط سطوح روسازی‌شده، بتن خنک می‌تواند به کاهش نیازهای سرمایشی ساختمان‌های مجاور منجر شود و در نتیجه صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه داشته باشد .دمای سطح کاهش‌یافته بتن خنک می‌تواند با به حداقل رساندن تنش حرارتی و آسیب ناشی از دما، عمر مفید روسازی را افزایش دهد .سطوح روسازی خنک‌تر می‌توانند دمای رواناب طوفان را کاهش دهند، که می‌تواند به محافظت از اکوسیستم‌های آبی در برابر آلودگی حرارتی و بهبود کیفیت کلی منابع آب شهری کمک کند .چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز در ارتباط با بتن خنک وجود دارد .استفاده از مواد با آلبدوی بالا یا پوشش‌های تخصصی در بتن خنک می‌تواند منجر به هزینه‌های اولیه بالاتری در مقایسه با بتن سنتی شود .با این حال، مزایای بلندمدت کاهش مصرف انرژی، دوام بهبودیافته و عملکرد زیست‌محیطی افزایش‌یافته ممکن است این سرمایه‌گذاری اولیه را جبران کند .کثیفی، گرد و غبار و سایر آلاینده‌ها می‌توانند با گذشت زمان در سطح بتن خنک تجمع یافته و بازتابندگی خورشیدی آن و در نتیجه اثر سرمایشی آن را کاهش دهند .

۱.۴ .بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا(UHPC)

بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) به عنوان یک ماده پایدار امیدوارکننده در ساخت‌وساز بتنی ظهور کرده و مزایای قابل توجهی نسبت به بتن سنتی ارائه می‌دهد UHPC .یک کامپوزیت سیمانی تقویت‌شده با الیاف و بسیار مهندسی‌شده است که با خواص مکانیکی استثنایی، مقاومت بالا و دوام مشخص می‌شود .این خواص UHPC را به یک ماده جذاب برای کاربردهای مختلف ساخت‌وساز، از جمله پل‌ها، ساختمان‌ها و پروژه‌های زیرساختی، که در آنها عملکرد و پایداری افزایش‌یافته مورد نظر است، تبدیل می‌کند .یکی از مزایای کلیدی UHPC مقاومت و دوام برتر آن است که می‌تواند منجر به کاهش مقدار مواد مورد نیاز برای یک پروژه مشخص شود .با استفاده از مواد کمتر، UHPCمی‌تواند به کاهش ردپای محیط‌زیستی کلی ساخت‌وساز بتنی کمک کند، زیرا انرژی و منابع کمتری برای تولید، حمل و نقل و نصب آن مورد نیاز

است .علاوه بر این، دوام افزایش‌یافته UHPC می‌تواند عمر مفید سازه‌های بتنی را افزایش دهد و نیاز به نگهداری، تعمیر و جایگزینی را کاهش دهد .این می‌تواند به کاهش مصرف مواد خام، انرژی و انتشار مرتبط با ساخت‌وساز بتنی در بلندمدت کمک کند .مزیت دیگر UHPC پتانسیل آن برای بهبود بهره‌وری انرژی و عملکرد حرارتی ساختمان‌ها، از جمله ایمنی در برابر آتش است .با وجود مزایای فراوانUHPC ، چندین چالش و مانع باید برای تحقق کامل پتانسیل آن به عنوان یک ماده ساخت‌وساز پایدار برطرف شود .هزینه بالایUHPC ، به‌ویژه در مقایسه با بتن سنتی، می‌تواند مانع قابل توجهی برای پذیرش گسترده آن باشد .

۱.۵ .استفاده از مصالح محلی

استفاده از مصالح محلی در ساخت‌وساز بتنی یک جنبه ضروری از توسعه پایدار است، زیرا می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و حمایت از اقتصاد محلی کمک کند .گنجاندن مصالح محلی موجود در مخلوط بتن می‌تواند پایداری پروژه‌های ساخت‌وساز را بهبود بخشد در حالی که همچنان معیارهای عملکرد و دوام مورد نیاز را برآورده می‌کند .برخی از نمونه‌های مصالح محلی که می‌توان در ساخت‌وساز بتنی استفاده کرد شامل سنگدانه‌های طبیعی، سنگدانه‌های بازیافتی، پوزولان‌های طبیعی، الیاف محلی و بایندرهای محلی هستند .ماسه، شن و سنگ خرد شده سنگدانه‌های طبیعی رایج در تولید بتن هستند .تهیه این مواد از معادن و رسوبات محلی می‌تواند انتشار و مصرف انرژی مرتبط با حمل و نقل را کاهش دهد .استفاده از سنگدانه‌های محلی موجود می‌تواند اطمینان حاصل کند که مخلوط بتن برای شرایط محیطی محلی، مانند چرخه‌های ذوب و انجماد، قرار گرفتن در معرض نمک یا ویژگی‌های خاک مناسب‌تر است .استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی، مانند بتن خرد شده، آجر یا شیشه، می‌تواند حفاظت از منابع و کاهش پسماند را ترویج دهد .سیمان Limestone Calcined Clay Cement (LC۳) یک ماده سیمانی جدید و دوست‌دار محیط‌زیست است که به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند سنتی در ساخت‌وساز بتنی توجه را به خود جلب کرده است LC۳ . مخلوطی از کلینکر، خاک رس کلسینه شده، سنگ آهک و گچ است که منجر به کاهش انتشار کربن و مصرف انرژی در طول تولید آن در مقایسه با سیمان معمولی می‌شود .چندین مزیت با استفاده از مصالح محلی در ساخت‌وساز بتنی می‌توان به دست آورد .تهیه مصالح به صورت محلی می‌تواند انتشار مرتبط با حمل و نقل، مصرف انرژی و ردپای کربن کلی پروژه‌های ساخت‌وساز را کاهش دهد .با این حال، مهم است که در نظر گرفته شود که استفاده از مصالح محلی نباید کیفیت و عملکرد بتن را به خطر اندازد .آزمایش مناسب، مشخصه‌یابی و طراحی مخلوط برای اطمینان از برآورده شدن خواص و الزامات دوام مورد نظر در حین استفاده از مصالح محلی موجود در ساخت‌وساز بتنی ضروری است .

۲ .فناوری‌های نوآورانه و شیوه‌ها

علاوه بر مصالح پایدار، صنعت ساخت‌وساز بتنی در حال بررسی فناوری‌ها و شیوه‌های نوآورانه برای بهبود پایداری، عملکرد و کارایی سازه‌ها است .پذیرش این تکنیک‌های نوظهور برای تلاش‌های جاری صنعت برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش انعطاف‌پذیری محیط ساخته‌شده حیاتی است .

۲.۱ .بتن خود ترمیم‌شونده

بتن خود ترمیم‌شونده یک فناوری و روش نوآورانه در ساخت‌وساز بتنی است که پتانسیل افزایش دوام، عملکرد و پایداری سازه‌های بتنی را دارد .این فناوری بر اساس مفهوم امکان ترمیم خودکار ترک‌ها و آسیب‌ها در بتن است و عمر مفید سازه‌ها را افزایش می‌دهد و نیاز به نگهداری و تعمیرات را کاهش می‌دهد .روش‌های مختلفی برای دستیابی به قابلیت‌های خود ترمیم‌شوندگی در بتن وجود دارد .بتن خود ترمیم‌شونده می‌تواند با ترمیم خودکار ترک‌ها و آسیب‌ها، خطر خوردگی و سایر مکانیزم‌های تخریب را کاهش داده و عمر مفید سازه‌ها را طولانی‌تر کند .با به حداقل رساندن نیاز به بازرسی‌های دستی، نگهداری و مداخلات تعمیراتی، بتن خود ترمیم‌شونده می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌ها در طول عمر سازه شود .افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی و کاهش نیاز به نگهداری و تعمیرات می‌تواند به کاهش مصرف منابع، تولید پسماند و اثرات زیست‌محیطی کلی کمک کند .با وجود این مزایای امیدوارکننده، هنوز چالش‌ها و محدودیت‌هایی در ارتباط با فناوری‌های بتن خود ترمیم‌شونده وجود دارد، مانند مقیاس‌پذیری موفقیت‌های آزمایشگاهی به کاربردهای دنیای واقعی، عملکرد و قابلیت اطمینان بلندمدت مکانیزم‌های خود ترمیم‌شونده و افزایش هزینه‌های اولیه اجرای این فناوری‌ها .

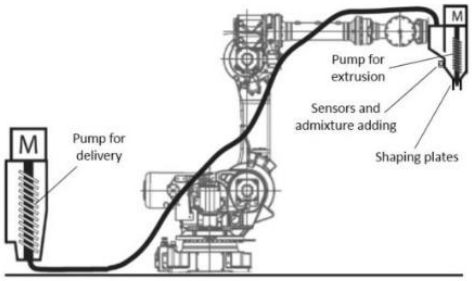
۲.۲ .بتن پرینت سه‌بعدی

بتن پرینت سه‌بعدی یک فناوری و روش نوآورانه در ساخت‌وساز بتنی است که شامل استفاده از سیستم‌های رباتیک کنترل‌شده با کامپیوتر برای رسوب لایه‌های مواد بتنی، بر اساس یک طراحی دیجیتالی از پیش تعیین‌شده، برای ایجاد اجزای سازه‌ای یا حتی کل ساختمان‌ها است .این فناوری، که به عنوان ساخت افزودنی یا ساخت دیجیتال نیز شناخته می‌شود، پتانسیل ایجاد انقلابی در صنعت ساخت‌وساز را با ارائه مزایای متعددی از نظر کارایی، سفارشی‌سازی و پایداری دارد .



پرینت سه‌بعدی پتانسیل قابل توجهی برای کاهش زمان ساخت‌وساز در مقایسه با روش‌های سنتی دارد، زیرا امکان ساخت همزمان چندین جزء یا سازه را فراهم می‌کند .این فناوری همچنین نیاز به نیروی کار دستی و قالب‌بندی را کاهش می‌دهد و به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های نیروی کار کمک می‌کند .پرینت سه‌بعدی امکان ایجاد هندسه‌های پیچیده و ظریفی را فراهم می‌کند که با استفاده از روش‌های ساخت‌وساز معمولی دشوار یا غیرممکن است .این امر آزادی طراحی، سفارشی‌سازی و پتانسیل برای طراحی‌های معماری نوآورانه را که عملکرد سازه‌ای و استفاده از مواد را بهینه می‌کنند، افزایش می‌دهد .

پرینت سه‌بعدی می‌تواند با رسوب بتن تنها در جایی که مورد نیاز است، پسماند مواد را به حداقل برساند، مصرف مواد خام و تولید پسماندهای ساخت‌وساز را کاهش دهد .این فناوری همچنین امکان استفاده از سازه‌های بهینه و سبک‌وزن را فراهم می‌کند که می‌تواند مقدار کلی مواد مورد نیاز برای دستیابی به عملکرد سازه‌ای مورد نظر را کاهش دهد .کاهش مصرف مواد، تولید پسماند و نیازهای نیروی کار مرتبط با بتن پرینت سه‌بعدی می‌تواند به صنعت ساخت‌وساز پایدارتر کمک کند . علاوه بر این، این فناوری می‌تواند به طور بالقوه ادغام مواد بازیافتی یا مواد جدید و دوست‌دار محیط‌زیست را در مخلوط‌های بتنی تسهیل کرده و عملکرد زیست‌محیطی سازه‌ها را بیشتر افزایش دهد . چالش‌ها و محدودیت‌های مرتبط با بتن پرینت سه‌بعدی معمولاً با جنبه‌های تکنولوژیکی و مادی مرتبط هستند .توسعه و اصلاح سیستم‌های پرینت سه‌بعدی، مواد و فرآیندها برای ساخت‌وساز بتنی در حال انجام است .پیشرفت‌های بیشتر در زمینه‌هایی مانند سیستم‌های رباتیک، سرعت پرینت، طراحی مخلوط بتن و فرآیندهای عمل‌آوری برای تحقق کامل پتانسیل این فناوری مورد نیاز است . پذیرش بتن پرینت سه‌بعدی در صنعت ساخت‌وساز مستلزم توسعه کدها، استانداردها و دستورالعمل‌های جدید برای اطمینان از کیفیت، ایمنی و دوام سازه‌ها است .



۲.۳بتن شفاف

حقیقات ممکن است در آینده نزدیک بر روی خواص و کاربردهای دیگر پودر شیشه، لاستیک برای افزایش مقاومت سازه انجام شود تا این ماده به یک مصالح ساختمانی ارزشمند برای بهبود کیفیت صنعت ساختمان سازی در فناوری، تولیدکنندگان و همچنین کاربران تبدیل شود .بتن نیمه شفاف آینده است .این روش هوشمندانه ای برای بهینه سازی و استفاده از نور است، روشی هوشمندانه برای زندگی .بتن انتقال دهنده نور یک روند در حال ظهور در فناوری بتن است . هزینه اولیه آن بالا است .اما، نگهداری روزمره لازم نیست و در دراز مدت ممکن است سودمند باشد .این یک مصالح ساختمانی سبز است که هزینه روشنایی در طول روز را کاهش می دهد .ثابت شده است که هم ظاهر زیبایی و هم پایداری سازه را فراهم می کند .در آینده انتظار می رود هزینه آن کاهش یابد .این یکی از بهترین کاربردهای فیبرهای نوری شیشه ای است که مربوط به منسوجات فنی است (۱ .نتیجه گیری می شود که با استفاده از ۴٪ تا ۵٪ فیبر نوری، مقاومت فشاری افزایش یافته است .مقاومت فشاری مکعب بتنی به قطر سوراخ های قالب و قطر فیبر نوری بستگی دارد و مستقیماً با مقاومت فشاری آن نسبت دارد (۲ .مقاومت فشاری بتن انتقال دهنده نور در محدوده ۱۰ تا ۱۴ نیوتن بر میلی متر مربع با فیبر نوری یافت شد که الزامات مقاومت فشاری برای بتن عیار M۱۵یا حتی تا M۲۰را برآورده می کند .این مطالعه نتیجه گیری می کند که شفافیت نور در بتن بدون تأثیر بر مقاومت فشاری آن امکان پذیر است، زیرا فیبرهای نوری به عنوان تقویت کننده فیبری عمل کرده و در نتیجه مقاومت را افزایش می دهند و همچنین ظاهر را بهبود می بخشند (۳ . مقدار POFها به طور جدی بر مقاومت فشاری بتن مربوطه تأثیر گذاشته است .هرچه تعداد POFها بیشتر باشد، مقاومت فشاری کمتر است .بنابراین انتقال نور نمی تواند با افزایش بی نهایت تعداد POFها در بتن بی نهایت افزایش یابد .علاوه بر

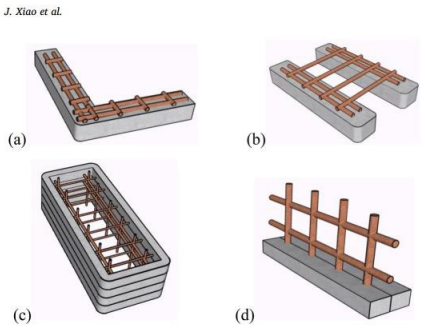
این، POFها نفوذ ناپذیری بتن را نیز کاهش داده اند .با استفاده از رزین اپوکسی برای مهر و موم کردن مرز POFها و بتن، نفوذ ناپذیری بتن شفاف هوشمند می تواند به شدت بهبود یابد

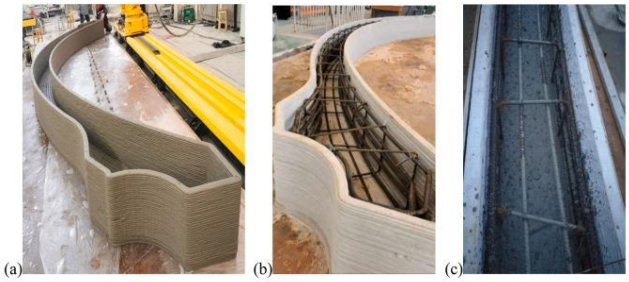
۳ .فناوری پرینت سه‌بعدی بتن (۳DPC) در مقیاس بزرگ: وضعیت فعلی و فرصت‌های آینده

تکنیک‌های پرینت سه‌بعدی (۳D)ساخت‌وساز در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای توسعه یافته و در برخی موارد به کاربردهای عملی منتقل شده‌اند .با این حال، دانش در مورد تفاوت‌های بین پرینت سه‌بعدی در مقیاس بزرگ و پرینت سه‌بعدی آزمایشگاهی هنوز محدود است .در این بررسی، فناوری‌های ۳DPC بر پایه اکستروژن در مقیاس بزرگ بر اساس اشیاء پرینت‌شده و فرآیندهای ساخت‌وساز به سه دسته تقسیم می‌شوند: المان‌های پرینت سه‌بعدی، قالب‌های پرینت سه‌بعدی و ۳DPC یکپارچه در محل .

۳.۱ .الزامات قابلیت پرینت ۳DPC در مقیاس بزرگ و آزمایشگاهی

در حال حاضر، قابلیت پرینت و خواص مکانیکی ۳DPC به طور گسترده در آزمایشگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است . علاوه بر این، بهینه‌سازی‌های فزاینده‌ای برای بهبود خواص مکانیکی ۳DPC وجود دارد، مانند بهبود مقاومت بین لایه‌ای با





تقویت مش، پرینت بتن سه‌بعدی با الیاف و پرینت بتن سه‌بعدی با مواد افزودنی .در همین حال، قابلیت پرینت ۳DPC نیز در بسیاری از آزمایشگاه‌ها مورد مطالعه و بهبود قرار گرفته است . قابلیت پرینت یک اصطلاح عمومی است که شامل قابلیت پمپاژ، قابلیت اکستروژن و قابلیت ساخت می‌شود .برای برآورده کردن این الزامات، خواص رئولوژیکی بتن تازه قابل پرینت باید با بتن معمولی متفاوت باشد .بتن قابل پرینت نیاز به نمایش روانی بالا و زمان گیرش طولانی در طول ذخیره‌سازی، پمپاژ و اکستروژن بتن، و همچنین روانی پایین، مقاومت سبز بالا و سرعت گیرش بالا پس از رسوب دارد .برخی از روش‌های آزمایش و داده‌های به‌دست‌آمده از ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی ممکن است برای برخی کاربردهای ۳DPC در مقیاس بزرگ مناسب باشند .با این حال، تفاوت‌هایی مانند اندازه پرینت، اندازه فیلامنت و فاصله پمپاژ بین ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس بزرگ باید در نظر گرفته شوند . علاوه بر این، الزامات قابلیت پرینت ۳DPC در مقیاس بزرگ می‌تواند متفاوت از ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی باشد، زیرا مقدار بیشتری بتن در ساخت‌وساز عملی تهیه، حمل، ذخیره، تامین و پرینت می‌شود .مطالعات علمی محدودی تفاوت‌های الزامات قابلیت پرینت ۳DPC در مقیاس بزرگ و آزمایشگاهی را مقایسه کرده‌اند .

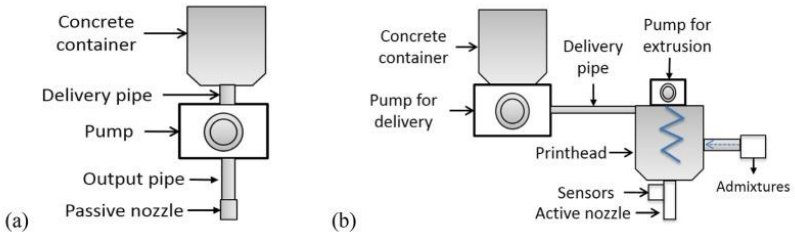
- **قابلیت پمپاژ** :برای فناوری پرینت سه‌بعدی در مقیاس بزرگ، روانی بتن و پارامترهای پمپاژ باید برای برآورده کردن الزامات تامین بتن کافی و بدون گرفتگی طراحی شوند .اندازه پرینت‌شده ۳DPC در مقیاس بزرگ همیشه بزرگتر از ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی است، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است ، و بتن بیشتری برای ۳DPC در مقیاس بزرگ تهیه و پمپاژ می‌شود .علاوه بر این، فاصله پمپاژ اغلب در ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی به دلیل اندازه کوچک المان‌های پرینت‌شده و آزمایش‌شده نادیده گرفته می‌شود .ویژگی‌های فرآیندهای پرینت مختلف باید در نظر گرفته شوند، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است .فاصله پمپاژ بتن ۳DPC یکپارچه و قالب در محل معمولاً طولانی‌تر از پرینت سه‌بعدی المان‌ها یا قالب‌های پیش‌ساخته در کارخانه یا آزمایشگاه است .بنابراین، برآورده کردن الزامات قابلیت پمپاژ و قابلیت ساخت ۳DPC یکپارچه و قالب با استفاده از همان مخلوط ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی چالش‌برانگیزتر است .علاوه بر این، تحقیق در مورد سیستم‌های پمپاژ در مقیاس آزمایشگاهی محدود است و فاصله پمپاژ همیشه مشخص نیست یا حتی نادیده گرفته می‌شود، همانطور که نشان داده شده است .علاوه بر این، رئولوژی بتن با افزایش فاصله پمپاژ، زمان و سرعت جریان تغییر می‌کند .مقدار زیادی بتن برای ساخت‌وساز عملی مورد نیاز است، بنابراین زمان گیرش ۳DPC در مقیاس بزرگ باید طولانی‌تر از ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی باشد تا الزامات حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی، پمپاژ و پرینت را برآورده کند .روش‌های آزمایش مختلفی برای تعیین کمیت قابلیت پمپاژ بررسی شده‌اند تا اطمینان حاصل شود که بتن می‌تواند به اندازه کافی و بدون گرفتگی به هد پرینت تامین شود .

	Pumping distance	Size of nozzle	Width × height of filament	Size of single printed layer
Lab-scale 3DPC	Not specified	8 × 24 mm²	30 × 8 mm²	2000 mm length
	Not specified	Ø20 mm circular	35 × 15 mm²	1350 mm length
	Not specified	Ø30 mm circular	30 × 10 mm²	Ø300 mm cylinder
Prefabricated element or formwork 3DPC	10 m	60 × 10 mm²	60 × 12 mm²	25,100 mm length
	5 m	Ø10 mm circular	10 × 11 mm² [a]	1860 × 460 mm² curved wall
	Not specified	Ø25 mm circular	25 × 20 mm²	3000 × 450 mm² beam
Monolithic 3DPC or formwork 3DPC on-site	15.2 m[b]	Ø38.1 mm circular	38.1 × 25.4 mm²	60,000 m length
	>30 m[c]	40 × 40 mm²	60 × 30 mm²	1000 × 20,000 mm² formwork
	18 m[d]	150 × 150 mm²	150 × 50 mm²	4600 × 12,100 mm² house
	70 m[e]	150 × 50 mm²	150 × 50 mm²	Monolithic building

Parameters	Lab-scale 3DPC	3D printing prefabricated formworks and elements in factory	Monolithic and formwork 3DPC on-site
Printing size	Specimen or small element	Formworks or elements	Monolithic or formwork
Pumping distance	Shortest	Moderate	Longest
Pumpability requirement of concrete	Lowest	Moderate	Highest
Amount of printing concrete	Amount for test	Amount for building	Amount for building
Requirement of setting rate	Relatively short	Long	Long

- **قابلیت اکستروژن** :برای فناوری ۳DPC در مقیاس بزرگ، مقدار زیادی بتن باید به طور پیوسته با سرعت معین اکسترود شود تا نیازهای کارایی و بهره‌وری در طول ساخت‌وساز برآورده شود .طراحی سیستم اکسترودینگ و رئولوژی بتن عوامل حیاتی هستند که بر فرآیند تأثیر می‌گذارند .موسسه فناوری دانمارک نازل‌های پرینت را به نازل‌های ربات غیرفعال و فعال طبقه‌بندی کرده است .نازل ربات غیرفعال به عنوان یک توزیع‌کننده عمل می‌کند که فقط بتن را در انتهای لوله با یک اکسترودر ساده گرد یا مربع توزیع می‌کند .در مقایسه، نازل ربات فعال دارای سیستم‌های کنترل پیچیده‌تری است که می‌تواند کیفیت و کارایی پرینت را بهبود بخشد، مانند سیستم افزودن ماده افزودنی، سیستم شکل‌دهی و سیستم نظارت بر سرعت جریانبا این حال، تحقیق دقیقی در این زمینه انجام نشده است .در این بررسی، دو فرآیند برای تحویل و اکستروژن مواد در نظر گرفته شده است: ۱) فرآیند تحویل-اکستروژن متحد و ۲) فرآیندهای تحویل و اکستروژن جداگانه .محققان فرآیند تحویل-اکستروژن متحدی را برای تحویل و اکستروژن بتن در آزمایشگاه پیشنهاد کردند برای برخی از سیستم‌های پرینت بتن سه‌بعدی، یک سیستم پمپاژ برای هر دو تحویل بتن و اکستروژن بتن استفاده می‌شود .در طول این فرآیند، بتن ابتدا با مواد افزودنی در یک ظرف بتن مخلوط می‌شود، سپس از طریق یک شلنگ و یک نازل غیرفعال با استفاده از یک

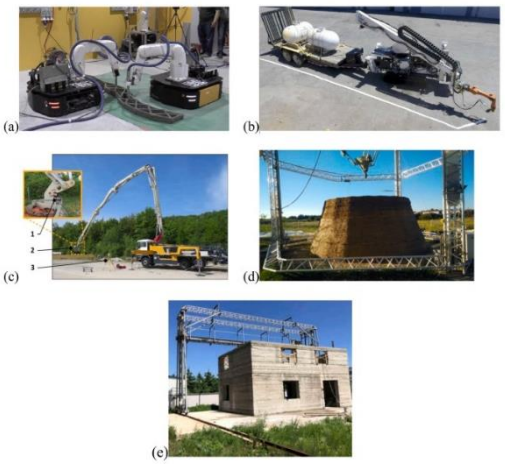
پمپ واحد تحویل و اکسترود می‌شود .این رویکرد در آزمایشگاه به خوبی کار می‌کند، زیرا فاصله تحویل کوتاه است و کنترل رئولوژی بتن برای بچ‌های کوچک و اشیاء پرینت کوچک نسبتاً آسان است .سرعت تحویل بتن به نازل باید با سرعت اکسترود بتن مطابقت داشته باشد و برای پرینت مداوم ثابت باشد .برای ۳DPC در مقیاس بزرگ، فاصله بین ظرف بتن و شیء پرینت‌شده طولانی‌تر از ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی است .با در نظر گرفتن تغییرات احتمالی رئولوژی بتن در طول پمپاژ و حتی جداسازی جدی احتمالی بتن، خطر اکستروژن بتن ناپیوسته و ناپایدار با افزایش فاصله پمپاژ افزایش می‌یابد .علاوه بر این، فرآیندهای تحویل و اکستروژن در برخی از سیستم‌های پرینت سه‌بعدی جدا بتن توسط یک پمپ تحویل به هد پرینت تامین می‌شود، سپس از طریق یک نازل فعال اکسترود می‌شود .برای چنین سیستم جداگانه‌ای، سرعت تحویل بتن برای حمل و نقل در مسافت طولانی نیازی به همگام‌سازی با سرعت اکسترود بتن ندارد .



- **قابلیت ساخت :(Buildability)** پس از تحویل و اکستروژن بتن، قابلیت ساخت باید برای جلوگیری از تغییر شکل بتن رسوب‌شده حاصل شود .در فناوری ۳DPC ، اندازه پرینت‌شده فیلامنت‌ها همیشه دقت و کارایی را تعیین می‌کند؛ فیلامنت پرینت‌شده کوچکتر می‌تواند دقت بالاتری داشته باشد اما کارایی پرینت پایین‌تری دارد .برخی از کاربردهای پرینت سه‌بعدی به دنبال دقت بالا برای دستیابی به طراحی شخصی‌تر هستند ، در حالی که کاربردهای فزاینده پرینت سه‌بعدی در مقیاس بزرگ به دنبال کارایی بالا با دقت مناسب برای برآورده کردن الزامات اقتصادی و استانداردهای ساختمانی هستند .محققان ثابت کردند که ارتفاع فیلامنت پرینت‌شده باید کوچکتر از عرض نازل باشد .اندازه‌های مختلف نازل‌ها، فیلامنت‌های پرینت‌شده و لایه تکی پرینت‌شده همانطور که از ادبیات شناخته شده است، در جدول فهرست شده‌اند .در بیشتر موارد، اندازه فیلامنت‌های پرینت‌شده در ۳DPC در مقیاس بزرگ بزرگتر از ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی است . علاوه بر این، فاصله طولانی‌تر لایه تکی پرینت‌شده معمولاً منجر به زمان طولانی‌تر بین لایه‌ها می‌شود . مقاومت مکانیکی بالا و سرعت ساختاردهی بالا در ۳DPC در مقیاس بزرگ و آزمایشگاهی به دلایل مختلفی مورد نیاز است، مانند تغییر شکل خودی و فواصل زمانی .برای ۳DPC در مقیاس بزرگ، لایه تکی پرینت‌شده معمولاً بزرگتر است که منجر به تغییر شکل خودی شدیدتر و فیلامنت‌های لایه بالایی سنگین‌تر می‌شود .در مقابل ۳DPC در مقیاس بزرگ، اندازه پرینت لایه تکی در مقیاس آزمایشگاهی کوچکتر است، که منجر به فواصل زمانی کوتاه بین لایه‌های متوالی می‌شود .بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نسبت بتن در ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی باید تنظیم شود تا الزامات ۳DPC در مقیاس بزرگ را منعکس کند، اگر آزمایشات آزمایشگاهی قرار است مبنایی برای توسعه مواد و بهینه‌سازی فرآیند باشند .قابلیت ساخت بتن پرینت سه‌بعدی یک مسئله حیاتی در پرینت سه‌بعدی در مقیاس بزرگ است، و روش‌های بهینه‌سازی برای قابلیت ساخت بتن در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند .علاوه بر افزودنی‌ها، چندین محقق مواد افزودنی را برای اصلاح قابلیت ساخت مواد پایه سیمانی در طول فرآیند پرینت اضافه کردند .به طور خلاصه، ادغام سنگدانه درشت در جوهر پرینت سه‌بعدی به دلیل

مزایای مرتبط مانند سازگاری بالاتر با کدهای موجود، قابلیت ساخت بالاتر، انقباض کمتر، هزینه‌های کمتر و سازگاری با محیط زیست بسیار مطلوب است .

	Pumping distance	Size of nozzle	Width × height of filament	Size of single printed layer
Lab-scale 3DPC	Not specified	8 × 24 mm^2	30 × 8 mm^2	2000 mm length
	Not specified	Ø20 mm circular	35 × 15 mm^2	1350 mm length
	Not specified	Ø30 mm circular	30 × 10 mm^2	Ø300 mm cylinder
Prefabricated element or formwork 3DPC	10 m	60 × 10 mm^2	60 × 12 mm^2	25,100 mm length
	5 m	Ø10 mm circular	10 × 11 mm^2 [a]	1860 × 460 mm^2 curved wall
	Not specified	Ø25 mm circular	25 × 20 mm^2	3000 × 450 mm^2 beam
Monolithic 3DPC or formwork 3DPC on-site	15.2 m[b]	Ø38.1 mm circular	38.1 × 25.4 mm^2	60,000 m length
	>30 m[c]	40 × 40 mm^2	60 × 30 mm^2	1000 × 20,000 mm^2 formwork
	18 m[d]	150 × 150 mm^2	150 × 50 mm^2	4600 × 12,100 mm^2 house
	70 m[e]	150 × 50 mm^2	150 × 50 mm^2	Monolithic building



۳.۲ .جوهر پرینت اقتصادی و دوستدار محیط زیست

علاوه بر قابلیت پرینت، مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی ۳DPC در مقیاس بزرگ نیز یک تمرکز تحقیقاتی هستند .اگرچه هزینه کل ساخت‌وساز با استفاده از فناوری ۳DPC در مقایسه با ساخت‌وساز سنتی به دلیل کاهش هزینه‌های نیروی کار و عدم وجود قالب‌بندی رقابتی است، هزینه مواد بتنی قابل پرینت بالاتر از بتن سنتی است .واضح است که کاهش هزینه جوهر پرینت یک رویکرد کارآمد برای کاهش هزینه کل پروژه‌های ۳DPC است .روش‌هایی برای بهبود ویژگی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی وجود دارد، مانند پرینت با ژئوپلیمر، مواد سیمانی جایگزین و پرینت سازه‌های توخالی .علاوه بر این، پرینت بتن سه‌بعدی با سنگدانه‌های درشت و سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند مصرف سیمان را کاهش دهد، بنابراین انتشار کربن و هزینه پرینت را کاهش دهد .

- **۳.۲.۱ ۳DPC .با سنگدانه‌های درشت طبیعی** :محققان نشان دادند که فناوری ۳DPC در مقایسه با ساخت‌وساز بتنی سنتی، بهبود محیط‌زیستی قابل توجهی ارائه نمی‌دهد .محتوای سیمان جوهر پرینت سه‌بعدی به طور قابل توجهی بالاتر از بتن سنتی است، که منجر به انتشار دی‌اکسید کربن بیشتر می‌شود .علاوه بر این، محتوای بالای سیمان یکی از دلایل هزینه بالای مواد بتنی قابل پرینت است، در حالی که می‌تواند باعث انقباض و ترک‌خوردگی شدید بتن پرینت سه‌بعدی نیز شود .بیشتر مطالعات در زمینه فناوری پرینت سه‌بعدی در ساخت‌وساز بر روی بتن قابل پرینت تولید شده با سنگدانه ریز متمرکز شده‌اند، یعنی حداکثر اندازه دانه کوچکتر از ۵ میلی‌متر .محدودیت اصلی برای عدم استفاده از سنگدانه درشت در بیشتر سیستم‌های ۳DPC این است که سیستم‌های پرینت اغلب از پمپ‌های روتور استاتور تجاری و مخلوط‌کن‌های پیوسته بدون قابلیت پردازش سنگدانه‌های درشت استفاده می‌کنند .برخی از ۳DPC در مقیاس بزرگ تحقیقاتی در مورد پرینت بتن سه‌بعدی حاوی سنگدانه‌های درشت انجام داده‌اند، همانطور که در جدول نشان داده شده است .

Reference	Cement	Other binders (fly ass and limestone)	Micro silica	Fine aggregates	Coarse aggregates
Le et al. [59]	1	0.286	0.1	2.143	0
Malaeb et al. [41]	1	0	0	1.920	0
Weng et al. [66]	1	1	0.1	0.5	0
Gosselin et al. [62]	1	0.286	0.286	1.286	0
Ji et al. [10]	1	0	0	3.200	3.620
Mechtcherine et al. [43]	1	0.4	0.3	>3.369	<0.886

- **۳.۲.۲ .با سنگدانه‌های بازیافتی ۳DPC** :استفاده از ماسه بازیافتی در ساخت‌وساز با پرینت سه‌بعدی می‌تواند مقرون به صرفه بودن و سازگاری با محیط زیست مواد پرینت سه‌بعدی را بهبود بخشد .تاثیر ماسه بازیافتی بر خواص مکانیکی در سنین اولیه و سخت‌شدگی توسط محققان بررسی شد .ماسه بازیافتی می‌تواند قابلیت ساخت مواد پرینت را به دلیل جذب آب بالای آن بهبود بخشد .با این حال، سنگدانه بازیافتی به طور قابل توجهی بر مقاومت کششی شکافنده تأثیر می‌گذارد، اگرچه مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار نگرفتند .یک سیستم پرینت سه‌بعدی در محل با ملات بازیافتی توسعه یافت و خواص مواد توسط محققان تجزیه و تحلیل شد .گزارش شد که ملات حاوی ٪۱۰۰ ماسه بازیافتی با دوز مناسب گلوکونات سدیم، زمان باز طولانی‌تر و مقاومت سبز بالاتری نسبت به ملات تولید شده با ٪۱۰۰ ماسه طبیعی از خود نشان می‌دهد .

۳.۳ .مسائل ساخت و ساز ۳DPC در مقیاس بزرگ

علاوه بر الزامات کارایی، اقتصاد و حفاظت از محیط زیست، مسائل عملی ساخت و ساز ۳DPC در مقیاس بزرگ نیز باید در نظر گرفته شوند .در این بررسی، روش‌های مختلف تقویت ۳DPC و کاربرد آنها در فرآیندهای مختلف ۳DPC در مقیاس بزرگ مورد بحث قرار می‌گیرد .علاوه بر این، آماده‌سازی و ترکیب مجدد بتن ۳D نیز ارائه شده است .

- **۳.۳.۱ .ساخت و ساز تقویت کننده** :ساخت و ساز تقویت کننده به طور فزاینده‌ای در ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی و بزرگ برای برآورده کردن الزامات مقاومت سازه‌ای و استانداردهای ساختمانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد .برخی از روش‌های ساخت و ساز تقویت کننده پیشنهاد شده است، از جمله تقویت کننده‌های افقی قرار داده شده بر روی دیوارهای پرینت شده ، تقویت کننده‌های افقی متصل کننده دیوارهای پرینت شده ، قرار دادن تقویت کننده در قالب‌های پرینت شده ، و ۳DPC با تقویت کننده از پیش قرار داده شده، .قرار دادن تقویت کننده افقی بر روی دیوارهای پرینت شده رایج‌ترین روش تقویت در ۳DPC در مقیاس آزمایشگاهی و بزرگ است .این روش را می‌توان اینگونه توصیف کرد: ابتدا یک لایه فیلامنت پرینت می‌شود، سپس تقویت کننده افقی قرار داده می‌شود، فیلامنت لایه بالایی پرینت می‌شود و مراحل بالا تکرار می‌شوند، علاوه بر این، محققان یک سیستم ۳DPC توسعه دادند که می‌تواند فیلامنت‌ها را پرینت کرده و کابل فلزی را به طور خودکار و همزمان قرار دهد .با وجود اینکه مقاومت اتصال ۳DPC با کابل فلزی کمتر از بتن ریخته شده با میلگرد آجدار معمولی است، این تحقیق یک رویکرد ساخت و ساز تقویت کننده خودکار را پیشنهاد کرد که ممکن است در ساخت

و سازهای ۳DPC در مقیاس بزرگ استفاده شود .همچنین، تقویت کننده‌های افقی را می‌توان برای اتصال دو دیوار پرینت شده موازی برای افزایش سازه قرار داد ، در برخی تحقیقات، تقویت کننده‌ها در قالب‌های پرینت شده قرار داده می‌شوند و سپس بتن ریخته می‌شود تا سازه‌های بتن مسلح (RC) برای ۳DPC در کارخانه و در محل تشکیل شود .

- **۳.۳.۲ .آماده‌سازی و ترکیب مجدد بتن** :در مقایسه با پرینت سه بعدی آزمایشگاهی، مقدار بیشتری بتن در واحد زمان باید تولید و حمل شود تا الزامات کارایی برای تامین و پرینت بتن برآورده شود .محققان راه حلی برای ذخیره‌سازی و حمل و نقل مواد اولیه مخلوط خشک و مایع ارائه دادند .مواد اولیه خشک بر اساس اندازه‌های مختلف ذرات برای دستیابی به توزیع اندازه ذرات خوب در طول مخلوط کردن و تولید خودکار مدیریت می‌شوند .علاوه بر این، نیاز به تولید بتن برای فناوری ۳DPC در مقیاس بزرگ مشخص شده است .تیمی در دانشگاه تونگجی روشی را بر اساس بتن آماده با حداکثر سنگدانه ۱۵ میلی‌متر برای برآورده کردن الزامات تولید و حمل و نقل برای پرینت سه بعدی در مقیاس بزرگ توسعه دادند .بتن آماده تولید شده در ایستگاه مخلوط‌کن، پس از ترکیب مجدد ثانویه در محل با افزودن مواد افزودنی، به ماده پرینت سه بعدی تبدیل شده است .

۳.۴ .سیستم‌های پرینت سه بعدی در مقیاس بزرگ

پرینتر سه بعدی و سیستم کنترل بخش‌های مهمی از سیستم پرینت سه بعدی هستند .ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و کاربردهای پرینترهای سه بعدی در مقیاس بزرگ و سیستم‌های کنترل آنها در این بخش بررسی و مورد بحث قرار می‌گیرد .

- **۳.۴.۱ .پرینترهای سه بعدی در مقیاس بزرگ** :پرینترهای ساخت و ساز سه بعدی در مقیاس بزرگ که برای کاربردهای ساخت و ساز عملی توسعه یافته‌اند، بر اساس سینماتیک آنها به پنج دسته تقسیم می‌شوند، این دسته‌ها شامل پرینترهای مبتنی بر بازوی رباتیک ، پرینترهای با بازوی ترکیبی ، پرینترهای متحرک مبتنی بر کامیون ، پرینترهای دلتا استایل و پرینترهای گانتری می‌باشند .
- **۳.۴.۲ .ویژگی‌های سیستم‌های کنترل پرینت سه بعدی** :سیستم کنترل بخش کلیدی دیگری از سیستم پرینت سه بعدی است که حرکات هد پرینتر را کنترل می‌کند .سیستم‌های کنترل پرینت سه بعدی معمولی در جدول فهرست شده‌اند .استفاده از سیستم کنترل چند واحدی و سیستم کنترل نازل‌های قابل چرخش متعدد می‌تواند کارایی پرینت را بهبود بخشد .یک سیستم کنترل تقویت کننده کابل فعال می‌تواند راه حلی برای قرار دادن خودکار تقویت کننده‌های افقی در دیوار پرینت شده ارائه دهد .دانشگاه Swinburne یک سیستم کنترل خودکار قرار دادن مش و یک نازل گرمایش مایکروویو برای بهبود مقاومت بین لایه‌ای و قابلیت ساخت بتن پرینت سه بعدی پیشنهاد کرد .علاوه بر این، یک سیستم کنترل بازخورد برای افزودن ماده افزودنی، ترکیب مجدد بتن و نظارت بر روانی قبل از اکستروژن بتن در هد پرینت توسعه یافت .یک سیستم اندازه‌گیری بازتابنده-تاکیمتر با صفحات شکل‌دهی قابل تغییر برای کنترل دقیق پرینتر مبتنی بر کامیون در محل توسط محققان پیشنهاد شد.

Typical 3D printing control systems.

Control system	3D printer	Shaping plate system
Multi-unit control system	Robotic arm-based 3D printer	No plates
Multiple rotatable nozzles control system	Contour Crafting	Shaping plates
Active cable reinforcement control system	Gantry 3D printer	No plates
Mesh auto-inserting and microwave heating control system	Gantry 3D Printer	Shaping plates
Feedback control system	Gantry 3D printer	Shaping plates
Reflector-tachymeter measuring system	Mobile truck-based printer	Width changeable shaping plates

۴ .نمونه‌هایی از ساخت و ساز ۳DPC در مقیاس بزرگ

۴.۱ .فناوری المان‌های پرینت سه‌بعدی

دانشگاه ساوث‌ایست و موسسه نانجینگ برای ساخت افزایشی هوشمند به طور مشترک راه حلی را برای پرینت قطعات دیوار با استفاده از فناوری پرینت سه‌بعدی توسعه دادند و با موفقیت یک ساختمان ۵.۱۵ متر ارتفاع و ۲۸۶ متر مربع را در نانجینگ چین ساختند .این ساختمان یک سازه قاب بتن مسلح با دیوارهای خارجی و دیوارهای داخلی پرینت‌شده با بتن سه‌بعدی بود که در کارخانه پیش‌ساخته و در محل مونتاژ شدند .المان‌های سازه‌ای مانند ستون‌ها، تیرها و دال‌ها با استفاده از فناوری بتن ریخته شده درجا سنتی ساخته شدند .برای المان‌های دیوار موجدار پرینت‌شده سه‌بعدی، ترتیب تقویت افقی با قرار دادن دستی خرپای میلگرد فولادی در طول فرآیند پرینت به دست آمد، فضای ستون رزرو شده بود و میلگردهای طولی ستون‌های سازه‌ای قرار داده شده و با میلگردهای افقی که در طول فرآیند پرینت در دیوارهای پرینت‌شده قرار داده شده بودند، متصل شدند .سپس، بتن تازه در قالب ستون در محل ریخته شد و با دیوارهای پرینت‌شده یکپارچه شد .باید توجه داشت که پس از مونتاژ المان‌های دیوار، از ملات پایه پلیمری برای گروتینگ اتصالات استفاده شد .سپس، عامل رابط، پوشش اولیه پایه سیمانی و ملات پایه پلیمری بر روی نمای خارجی ساختمان پوشش داده شد تا دوام آن بهبود یابد .آسپرون و همکاران یک رویکرد جدید را برای ساخت المان‌های بتن مسلح (RC) بر اساس فناوری ۳DPC ارائه دادند .قطعات یک تیر RC به طور جداگانه پرینت و سپس با استفاده از یک سیستم تقویت فولادی خارجی به یک المان واحد مونتاژ شدند.

۴.۲ .فناوری قالب‌های پرینت سه‌بعدی

در حال حاضر، یک گلوگاه قابل توجه که کاربرد مهندسی پرینت سه‌بعدی را محدود می‌کند، عدم وجود استانداردها/مشخصات طراحی تثبیت شده است .برخی از المان‌های پرینت سه‌بعدی به عنوان قالب دائمی، المان‌های تزئینی یا سایر المان‌های غیر باربر استفاده می‌شوند .دانشگاه فناوری هبی یک تکنیک ساخت و ساز برای سازه‌های قالب دائمی توسعه داد . این رویکرد امیدوارکننده می‌تواند انعطاف‌پذیری و مزایای اتوماسیون پرینت سه‌بعدی را بهبود بخشد و با مشخصات طراحی فعلی برای سازه‌های بتن مسلح ترکیب شود .ابتدا، خطوط پایین و کناری با ضخامت تقریبی ۵ سانتی‌متر پرینت شدند که هم به عنوان قالب سازه قوسی که قرار بود ساخته شود و هم به عنوان لایه محافظ سازه بتن مسلح عمل می‌کردند .پس از اتمام فرآیند پرینت، قفس تقویت کننده از پیش بسته شده در قالب پرینت شده قرار داده شد و سپس بتن با سنگدانه درشت در قالب ریخته شد .قالب پرینت سه‌بعدی یک سازه کامل را با قفس تقویت کننده و بتن تشکیل داد و سازه سپس تا سن طراحی خود عمل‌آوری شد .طراحی و ساخت قفس‌های تقویت کننده و ریختن مواد بتنی بر اساس مشخصات طراحی سازه‌ای فعلی انجام شد و ایمنی سازه را تضمین می‌کرد .شرکت TotalKustom یک راه حل ساخت و ساز متفاوت برای قالب‌بندی دائمی با استفاده از فناوری پرینت سه‌بعدی پیشنهاد داد .قالب‌بندی دائمی در محل پرینت شد و سپس بتن برای پر کردن دیوارها و ستون‌ها ریخته شد و همکاران یک فرآیند طراحی و ساخت جدید را ارائه دادند که در آن پرینت ساخت و ساز سه‌بعدی، بهینه‌سازی توپولوژی و پس‌تنیدگی سازه‌های بتنی ترکیب شدند.، تیر بهینه‌سازی شده توپولوژی به چندین قسمت تقسیم شد که به طور جداگانه تولید و در نهایت با استفاده از تاندون‌های پس‌تنیدگی به هم متصل شدند .

۴.۳ .فناوری 3DPC یکپارچه در محل

از لحاظ نظری، تمام پرینترهای سه‌بعدی شرح داده را می‌توان برای انجام ساخت و ساز در محل استفاده کرد .با این حال، برای انجام این کار، راه حلی برای ادغام تقویت کننده برای اکثر کاربردهای در مقیاس بزرگ برای برآورده کردن الزامات استانداردهای سازه‌ای ضروری است .یک راه حل پیشنهادی توسط دانشگاه تونگجی و شرکت چینیGreen Print ، قرار دادن تقویت کننده‌های افقی به طور مستقیم بر روی دیوار پرینت شده در ارتفاعات مشخص است ، در حالی که فضای ستون‌ها در طول پرینت دیوار رزرو می‌شود پس از اتمام پرینت دیوار، بستن تقویت کننده، قرار دادن قالب ستون و ریختن بتن در این قالب انجام شد . تقویت کننده افقی دیوار به تقویت کننده‌های ستون متصل شد و تقویت کننده ستون به تقویت کننده سقف متصل شد . بتن آماده با سنگدانه درشت با مقاومت فشاری طراحی شده ۲۰ و ۲۵ مگاپاسکال برای این پروژه عملی استفاده شد و مقاومت فشاری آزمایش شده نمونه‌های پرینت شده به ترتیب تقریباً ۱۹ و ۲۴ مگاپاسکال بود . شرکت چینی HuaShang Tenda فناوری جدید خود را با پرینت یک ویلای دو طبقه ۴۰۰ متر مربع در محوطه شرکت در تونگژو، پکن، در سال ۲۰۱۶ نشان داد ماده مورد استفاده بتن معمولی لرزانده شده است که از سیمان پرتلند، ماسه (۰-۵ میلی‌متر)، سنگدانه‌های درشت (۲۰-۵ میلی‌متر) و آب تشکیل شده است .هیچ ماده افزودنی استفاده نشد .ماده به صورت عمودی در هد پرینت بزرگ تحت گرانش و با کمک لرزش منتقل می‌شود .لرزش توسط یک جرم نامتعادل ایجاد می‌شود و در طول نازل منتشر می‌شود .نازل چنگالی است و توسط هد پرینت نصب شده بر روی یک ربات گانتری در مقیاس بزرگ با چهار درجه آزادی (شامل چرخش) نگه داشته می‌شود .با وجود اینکه لرزش در فاصله قابل توجهی از دهانه‌های نازل اعمال می‌شود، امواج به سمت دهانه‌ها منتشر می‌شوند و در نتیجه فشرده‌سازی شبه بتن، بهبود کیفیت بتن و اتصال بین بتن و تقویت کننده را فراهم می‌کنند .ابعاد بیرونی کاربرد گزارش شده در اینجا ۱۵ متر در ۱۵ متر در ۹ متر است .سیستم گانتری حامل هد پرینت ۲۰ متر عرض دارد و روی ریل‌ها حرکت می‌کند .تقویت کننده مش فولادی عمودی قبل از پرینت با دست ثابت می‌شود .سپس بتن لایه به لایه رسوب می‌کند و میلگردها را از همه طرف به تدریج محصور می‌کند، یک پیکربندی ماشین مشخص برای کار با سرعت جریان حجمی ثابت طراحی شده است و سرعت حرکت افقی هد پرینت در طول ساخت ویلا تقریباً ۰.۳ متر بر دقیقه بود در حالی که دیوارهای ۱۰۰ میلی‌متر ضخامت پرینت می‌شدند .ارتفاع متوسط هر لایه ۵۰ میلی‌متر بود .این رویکرد امیدوارکننده است، با این حال، در این مرحله، برخی محدودیت‌ها را نشان می‌دهد .اول، ارتفاع ورق‌های مش منفرد به اندازه نازل چنگالی محدود می‌شود، که بسیار بزرگ است: در اینجا ارتفاع ورق مش تقریباً ۱.۷ متر بود در حالی که ارتفاع کل هد پرینت تقریباً ۳.۵ متر بود .دومین محدودیت این است که تنها یک یا دو لایه تقویت کننده را می‌توان به راحتی در وسط مقطع عرضی دیوار ادغام کرد .با این حال، نه تنها تقویت کننده، بلکه برخی از نصب‌های ساده مانند لوله‌های کابل و حتی عایق حرارتی را نیز می‌توان جای داد .علاوه بر این، تنها دیوارهای عمودی (بدون شیب) و فقط انتقال‌های گرد (بدون گوشه‌های تیز) را می‌توان تولید کرد، در حالی که سطوح دیوارها بافتی ناهموار نشان می‌دهند .در نهایت، از آنجا که سیستم گانتری باید بسیار عظیم و سفت باشد تا امکان کنترل قوی هد پرینت سنگین و لرزاننده را فراهم کند، حمل و نصب چنین پرینتری تحرک و انعطاف‌پذیری آن را محدود می‌کند .

۵ .چالش‌ها و موانع

پیاده‌سازی شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار چالش‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی مختلفی را ارائه می‌دهد .این چالش‌ها، همراه با موانع احتمالی پذیرش، باید برای اطمینان از ادغام گسترده شیوه‌های پایدار در صنعت ساخت‌وساز مورد توجه قرار گیرند .

۵.۱ .چالش‌های فنی

چالش‌های فنی برای بهبود پایداری در ساخت‌وساز بتنی شامل موارد زیر است :عملکرد مواد: استفاده از مواد جدید، مانند مواد سیمانی جایگزین (SCMs) و بایندرهای جایگزین، ممکن است منجر به ویژگی‌های عملکردی متفاوتی در مقایسه با بتن سنتی شود .فناوری‌های جدید: فناوری‌های نوآورانه، مانند بتن خود ترمیم‌شونده، جذب کربن و پرینت سه‌بعدی، نیاز به توسعه و آزمایش بیشتر برای تعیین قابلیت اطمینان، کارایی و اثربخشی بلندمدت خود دارند .ادغام سیستم‌ها: شیوه‌های ساخت‌وساز پایدار اغلب شامل ادغام چندین سیستم، مانند بهره‌وری انرژی، تولید انرژی تجدیدپذیر و مدیریت آب است .

۵.۲ .چالش‌های اقتصادی

چالش‌های اقتصادی برای بهبود پایداری در ساخت‌وساز بتنی شامل موارد زیر است :هزینه‌های اولیه: شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار ممکن است به دلیل استفاده از مواد و فناوری‌های نوآورانه هزینه‌های اولیه بالاتری داشته باشند .این می‌تواند مانعی برای پذیرش باشد .پذیرش بازار: صنعت ساخت‌وساز می‌تواند محافظه‌کار باشد و در پذیرش شیوه‌های جدید کند عمل کند .متقاعد کردن ذینفعان، مانند توسعه‌دهندگان، پیمانکاران و مشتریان، در مورد مزایای بلندمدت ساخت‌وساز بتنی پایدار می‌تواند چالش‌برانگیز باشد .بازگشت سرمایه: شیوه‌های ساخت‌وساز پایدار اغلب نیاز به چشم‌انداز بلندمدت‌تری در مورد بازگشت سرمایه دارند .

۵.۳ .چالش‌های اجتماعی

چالش‌های اجتماعی برای بهبود پایداری در ساخت‌وساز بتنی شامل موارد زیر است :آگاهی و آموزش: ممکن است کمبود آگاهی یا درک از مزایای ساخت‌وساز بتنی پایدار در بین متخصصان صنعت و عموم مردم وجود داشته باشد .مهارت‌های نیروی کار: پذیرش شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار نیاز به کارگران ماهری دارد که با مواد، فناوری‌ها و روش‌های جدید آشنا باشند .موانع نظارتی: کدها، مقررات و استانداردهای ساختمانی موجود ممکن است به طور کامل از شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار پشتیبانی نکنند .

۵.۴ .راه‌های بالقوه برای غلبه بر چالش‌ها

راه حل‌های بالقوه برای پرداختن به این چالش‌ها و موانع شامل موارد زیر است :تحقیق و توسعه: سرمایه‌گذاری مستمر در تحقیق و توسعه می‌تواند به پیشرفت عملکرد، قابلیت اطمینان و مقرون به صرفه بودن مواد و فناوری‌های پایدار کمک کند .آموزش و تربیت: افزایش آگاهی از مزایای ساخت‌وساز بتنی پایدار در بین متخصصان صنعت و عموم مردم، و همچنین ارائه فرصت‌های آموزشی و تحصیلی برای نیروی کار، می‌تواند به رفع شکاف مهارت‌ها و ترویج پذیرش شیوه‌های جدید

کمک کند .حمایت و انگیزه‌های سیاستی: دولت‌ها و نهادهای نظارتی می‌توانند نقش مهمی در ترویج ساخت‌وساز بتنی پایدار ایفا کنند .همکاری و تبادل دانش: تشویق همکاری و تبادل دانش بین ذینفعان صنعت می‌تواند به رفع چالش‌های فنی و افزایش درک از مزایای ساخت‌وساز بتنی پایدار کمک کند .پروژه‌های نمایشی و مطالعات موردی: نمایش پروژه‌های موفق ساخت‌وساز بتنی پایدار می‌تواند به غلبه بر چالش‌های پذیرش بازار کمک کند .ارزیابی چرخه حیات و تجزیه و تحلیل هزینه: انجام ارزیابی‌های جامع چرخه حیات و تجزیه و تحلیل هزینه می‌تواند به نشان دادن مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی بلندمدت ساخت‌وساز بتنی پایدار کمک کند .

۶ .نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی روندهای مختلف، فناوری‌ها و مصالح با هدف بهبود پایداری ساخت‌وساز بتنی پرداخته است .یافته‌ها و بینش‌های کلیدی شامل پتانسیل بتن سبز، استفاده از انواع مختلف مواد سیمانی جایگزین(SCMs) ، بتن نفوذپذیر، بتن خنک و استفاده از مصالح محلی است .فناوری‌ها و شیوه‌های نوآورانه، مانند بتن خود ترمیم‌شونده، بتن پرینت سه‌بعدی، بتن فوتوکاتالیستی، قالب‌های بتنی عایق(ICF) ، سوخت‌های حاصل از پسماند و جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS)نیز مورد بحث قرار گرفتند .

اهمیت پذیرش شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار را نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا به طور مستقیم بر آینده صنعت و محیط زیست تأثیر می‌گذارد .با توجه به اینکه بخش ساخت‌وساز سهم قابل توجهی در انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع دارد، گذار به شیوه‌های پایدار برای مقابله با تغییرات آب و هوایی و حفظ منابع طبیعی ضروری است .توصیه‌ها برای تحقیقات آینده، سیاست‌گذاری و اقدامات صنعتی برای تسریع گذار به ساخت‌وساز بتنی پایدار شامل موارد زیر است :

- سرمایه‌گذاری مستمر در تحقیق و توسعه مواد، فناوری‌ها و شیوه‌های پایدار، با تمرکز بر همکاری بین‌رشته‌ای و تبادل دانش بین دانشگاه، صنعت و سیاست‌گذاران .
- اجرای سیاست‌های عمومی حمایتی، انگیزه‌ها و مقررات برای تشویق پذیرش شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار توسط توسعه‌دهندگان، پیمانکاران و صاحبان املاک .
- پذیرش و ترویج استانداردها، گواهینامه‌ها و ابتکارات داوطلبانه صنعتی مرتبط با ساخت‌وساز پایدار .
- تقویت همکاری بین دانشگاه و صنعت برای تسهیل آزمایش و اعتبارسنجی فناوری‌ها و شیوه‌های بتنی پایدار جدید .
- تشویق توسعه برنامه‌های آموزشی و تربیتی متمرکز بر ساخت‌وساز پایدار برای دانشجویان و متخصصان .
- ترویج اجرای اصول اقتصاد چرخشی و مفاهیم 'طراحی برای جداسازی' در ساخت‌وساز بتنی .
- حمایت از دیجیتالی‌سازی و رویکردهای مبتنی بر داده در صنعت ساخت‌وساز .

با عمل به این توصیه‌ها، ذینفعان در صنعت ساخت‌وساز می‌توانند به طور جمعی به سوی آینده‌ای پایدارتر و مسئولانه‌تر از نظر محیط زیست حرکت کنند .پذیرش شیوه‌های ساخت‌وساز بتنی پایدار نه تنها برای محیط زیست مفید است، بلکه فرصت‌های قابل توجهی را برای رشد اقتصادی، نوآوری و بهبود کیفیت زندگی ارائه می‌دهد .

فناوری‌های پرینت سه‌بعدی بتن در مقیاس بزرگ، همانطور که در این مقاله به تفصیل بررسی شد، با چالش‌های مرتبط با قابلیت پرینت، مسائل ساخت‌وساز و سیستم‌های مورد نیاز مواجه هستند. با این حال، همانطور که در نمونه‌های عملی نشان داده شد، این فناوری پتانسیل قابل توجهی برای تحول در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه از طریق کاهش پسماند،

افزایش کارایی و امکان ایجاد اشکال پیچیده دارد. توسعه بیشتر در زمینه مواد، سیستم‌های پرینت و استانداردسازی برای تحقق کامل پتانسیل ۳DPCدر مقیاس بزرگ ضروری است. آینده ساخت‌وساز بتنی پایدار به احتمال زیاد شامل ترکیبی از مصالح پایدار سنتی و نوآورانه، همراه با پذیرش فزاینده فناوری‌های پیشرفته مانند پرینت سه‌بعدی در مقیاس بزرگ خواهد بود. همکاری مداوم بین دانشگاه، صنعت و دولت برای غلبه بر چالش‌ها و بهره‌گیری از فرصت‌های پیش رو بسیار حیاتی است.

۷. مراجع

- Agwa, I.S., Zeyad, A.M., Tayeh, B.A., Adesina, A., de Azevedo, A.R., Amin, M., Hadzima-Nyarko, M., 2022b. A comprehensive review on the use of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material to produce eco-friendly concretes. Mater. Today: Proc.. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.264.
- Ahmad, J., Kontoleon, K.J., Majdi, A., Naqash, M.T., Deifalla, A.F., Ben Kahla, N., Isleem, H.F., Qaidi, S.M.A., 2022. A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production. Sustainability 14 (14), 8783. https://doi.org/10.3390/su14148783.
- Ahmed, M., AlQadhi, S., Mallick, J., Kahla, N.B., Le, H.A., Singh, C.K., Hang, H.T., 2022. Artificial neural networks for sustainable development of the construction industry. Sustainability 14 (22), 14738. https://doi.org/10.3390/su142214738.
- Akeed, M.H., Qaidi, S., Faraj, R.H., Mohammed, A.S., Emad, W., Tayeh, B.A., Azevedo, A. R., 2022. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part I: developments, principles, raw materials. Case Stud. Constr. Mater. 17, e01290 https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01290.
- Al-Hamrani, A., Kucukvar, M., Alnahhal, W., Mahdi, E., Onat, N.C., 2021. Green concrete for a circular economy: a review on sustainability, durability, and structural properties. Materials 14 (2), 351. https://doi.org/10.3390/ma14020351.
- Albuhairi, D., Di Sarno, L., 2022. Low-carbon self-healing concrete: state-of-the-art, challenges and opportunities. Buildings 12 (8), 1196. https://doi.org/10.3390/buildings12081196.
- Alcantara, R., Blanca, C., Rivera, K., Serrano, E., 2023. Review of sustainable concrete based on photocatalytic to reduce the environmental impact in large works in Peru. J. Proj. Man. 8 (2), 91–98. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2022.12.002.
- Ali, R.A., Kharofa, O.H., 2021. The impact of nanomaterials on sustainable architectural applications smart concrete as a model. Mater. Today: Proc. 42, 3010–3017. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.814.
- Aliev, F., Mirzaev, O., Kholmurodov, T., Slavkina, O., Vakhin, A., 2022. Utilization of carbon dioxide via catalytic hydrogenation processes during steam-based enhanced oil recovery. Processes 10 (11), 2306.
- Almeshal, I., Abu Bakar, B.H., Tayeh, B.A., 2022. Behaviour of reinforced concrete walls under fire: a review. Fire Technol. 58 (5), 2589–2639. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/s10694-022-01240-3.

- Aravind, N., Abdulrehman, T.I., 2022. A review and sequel experimental analysis on physical and mechanical properties of permeable concrete for pavement construction. Int. J. Pavement Eng. 23 (12), 4160–4173. https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1936519.
- Asadi, I., Baghban, M.H., Hashemi, M., Izadyar, N., Sajadi, B., 2022. Phase change materials incorporated into geopolymer concrete for enhancing energy efficiency and sustainability of buildings: a review. Case Stud. Constr. Mater., e01162 https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01162.
- Ashtiani Araghi, Z., Vosoughifar, H., 2023. Modified BIM processes considering safety–quality index for precast concrete construction. ASCE-ASME J. ASCE ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. A Civ. Eng. 9 (1), 04022062 https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001274.
- de Azevedo, A.R., Amin, M., Hadzima-Nyarko, M., Agwa, I.S., Zeyad, A.M., Tayeh, B.A., Adesina, A., 2022. Possibilities for the application of agro-industrial wastes in cementitious materials: a brief review of the Brazilian perspective. Cleaner Materials 3, 100040. https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100040.
- Bahman, N., Al-Khalifa, M., Al Baharna, S., Abdulmohsen, Z., Khan, E., 2023. Review of carbon capture and storage technologies in selected industries: potentials and challenges. Rev. Env. Sci. Bio/Tech. 1–20. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09649-0.
- Bahrami, A., Awn, R.F., Corona, J., Eriksson, B., 2022. How aware and active is the Swedish building and real estate sector in climate-smart concrete?. Int. J. Eng. Trends Technol. 70 (1), 126–138. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I1P214.
- Balan, L.A., Anupam, B.R., Sharma, S., 2021. Thermal and mechanical performance of cool concrete pavements containing waste glass. Construct. Build. Mater. 290, 123238 https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123238.
- Balzano, B., Sweeney, J., Thompson, G., Tuinea-Bobe, C.L., Jefferson, A., 2021. Enhanced concrete crack closure with hybrid shape memory polymer tendons. Eng. Struct. 226, 111330 https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111330.
- Bień, J., 2021. Production and use of waste-derived fuels in Poland: current status and perspectives. Prod. Eng. Arch. 27 (1), 36–41. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.5.
- Caldarelli, V., Filipponi, M., Saetta, S., Rossi, F., 2022. Lean and green production for the modular construction. Proc. Comput. Sci. 200, 1298–1307. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.331.
- Cheela, V.S., John, M., Biswas, W., Sarker, P., 2021. Combating urban heat island effect—a review of reflective pavements and tree shading strategies. Buildings 11 (3), 93. https://doi.org/10.3390/buildings11030093.
- Chen, Y., Zhang, Y., Xie, Y., Zhang, Z., Banthia, N., 2022. Unraveling pore structure alternations in 3D-printed geopolymer concrete and corresponding impacts on macro-properties. Addit. Manuf. 59, 103137 https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103137.

- Chouhan, J., Chandrappa, A.K., 2023. A systematic review on photocatalytic concrete for pavement applications: an innovative solution to reduce air pollution. Inn. Infra. Solutions 8 (3), 90. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/s41062-023-01060-6.
- Gao, N., Tang, T., Xiang, H., Zhang, W., Li, Y., Yang, C., et al., 2022. Preparation and structure-properties of crosslinking organic montmorillonite/polyurethane as solid-solid phase change materials for thermal energy storage. Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 244, 111831 https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111831.
- Gerassimidou, S., Velis, C.A., Williams, P.T., Castaldi, M.J., Black, L., Komilis, D., 2021. Chlorine in waste-derived solid recovered fuel (SRF), co-combusted in cement kilns: a systematic review of sources, reactions, fate and implications. Crit. Rev. Env. Tech. 51 (2), 140–186. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1717298.
- Hamada, H.M., Thomas, B.S., Tayeh, B., Yahaya, F.M., Muthusamy, K., Yang, J., 2020a. Use of oil palm shell as an aggregate in cement concrete: a review. Construct. Build. Mater. 265, 120357 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120357.
- Hamdany, A.H., Satyanaga, A., Zhang, D., Kim, Y., Kim, J.R., 2022. Photocatalytic cementitious material for eco-efficient construction—a systematic literature review. Appl. Sci. 12 (17), 8741. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/app12178741.
- Hemalatha, G., Sudheer, G., Shelton, J., Carmichael, J., 2022. Exploring the impact of EPS incorporation on insulated concrete form (ICF) wall panels under axial compression and flexure. J. King Saud Univ. Eng. Sci. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.04.002.
- Hong, W.Y., 2022. A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO2 emissions future. Carbon Capt. Sci. Tech., 100044 https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100044.
- Ismail, Z.A.B., 2022. Thermal comfort practices for precast concrete building construction projects: towards BIM and IOT integration. Eng. Construct. Architect. Manag. 29 (3), 1504–1521. https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2020-0767.
- Iyer, J., Lackey, G., Edvardsen, L., Bean, A., Carroll, S.A., Huerta, N., et al., 2022. A review of well integrity based on field experience at carbon utilization and storage sites. Int. J. Greenh. Gas Control 113, 103533. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103533.
- Jaskulski, R., Jo´´zwiak-Nied´zwiedzka, D., Yakymechko, Y., 2020. Calcined clay as supplementary cementitious. Material. Materials 13 (21), 4734. https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/ma13214734.
- Jung, M., Park, J., Hong, S.G., Moon, J., 2022. The critical incorporation concentration (CIC) of dispersed carbon nanotubes for tailoring multifunctional properties of ultra-high performance concrete (UHPC). J. Mater. Res. Technol. 17, 3361–3370. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.103.
- Kothari, A., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., Cwirzen, A., 2020. A review of the mechanical properties and durability of ecological concretes in a cold climate in comparison to standard ordinary Portland cement-based concrete. Materials 13 (16), 3467. https://doi.org/10.3390/ma13163467.