سنگدانه‌های بازیافتی در فناوری بتن سه بعدی و آینده آن

پروین منتظری*
کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

ارجاع به مقاله:
پروین منتظری، سنگدانه های بازیافتی در فناوری بتن سه بعدی و آینده آن، *مهندسی و مدیریت ساخت*، ۱۴۰۳؛ ۹ (۱): ۵۵-۶۰.

چکیده

مطالعات اخیر نشان می دهد که سنگدانه های بتن بازیافتی (RCA) می توانند به خواص مکانیکی قابل مقایسه با سنگدانه های معمولی دست یابند و استفاده از آنها را در کاربردهای سازه ای بدون به خطر انداختن ایمنی یا دوام تسهیل می کنند. به عنوان مثال، تحقیقات نشان داده است که ترکیب سنگدانه های بزرگتر در روش های چاپ سه بعدی بتن درشت می تواند حجم بتن مورد نیاز را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه اثرات زیست محیطی را کاهش دهد و در عین حال یکپارچگی سازه را حفظ کند. علاوه بر این، استفاده از افزودنی های سیمان برای بهبود خواص پیوند و عملکرد کلی بتن بازیافتی نشان داده شده است. این بررسی همچنین نقش تکنیک‌های بازیافت نوآورانه و مواد هوشمند را در افزایش کارایی مواد بازیافتی در فرآیندهای چاپ سه‌بعدی روشن می‌کند. این پیشرفت ها نه تنها کیفیت مواد بازیافتی را افزایش می دهد، بلکه مقبولیت آنها را در صنعت افزایش می دهد. علاوه بر این، این بحث به مفاهیم چارچوب های نظارتی و ادراک عمومی که نقش مهمی در تأثیرگذاری بر پذیرش گسترده شیوه های ساخت و ساز پایدار دارند، میپردازد. در نتیجه، این بررسی ادبیات یک تحلیل جامع از وضعیت فعلی تحقیقات در مورد سنگدانه‌های بازیافتی در فناوری DCP۳ ارائه می‌کند و هم چالش‌ها و هم پتانسیل قابل توجه ادغام آن را برای ارتقای پایداری در بخش ساخت‌وساز برجسته می‌کند .این مقاله با مروری بر روندهای آتی و نیاز به تحقیقات مستمر برای بهینه سازی استفاده از سنگدانه های بازیافتی به پایان می رسد و آنها را به عنوان یک عنصر کلیدی در تکامل شیوه های ساخت و ساز زیست محیطی قرار می دهد .همانطور که صنعت رو به جلو حرکت می کند، اکتشاف مداوم تعامل بین مصالح بازیافتی و فن آوری های ساخت و ساز پیشرفته کلیدی برای شکل دادن به آینده ای پایدارتر برای تولید بتن و روش های ساخت و ساز خواهد بود.

کلمات کلیدی
سنگدانه های بازیافتی، بتن بازیافتی، بتن معمولی، پرینت سه بعدی، محیط زیست.

۱- مقدمه

ظهور فناوری چاپ بتن سه بعدی (DCP۳) نشان دهنده یک تغییر دگرگون کننده در صنعت ساخت و ساز است که نوید انقلابی در

Recycled aggregate in 3D printing concrete technology and the future of it

Parvin Montazeri*
MS.C graduated, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin branch, Iran.

***Corresponding author's email address:**
montazeri.parvin1992@gmail.com

How to cite this article:
Parvin Montazeri, Recycled aggregate in 3D printing concrete technology and the future of it, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2024; 9(1):55-60.

Abstract

Recent studies indicate that recycled concrete aggregates (RCA) can achieve mechanical properties comparable to those of conventional aggregates, thereby facilitating their use in structural applications without compromising safety or durability. For instance, research has demonstrated that the incorporation of larger aggregates in large particle 3D concrete printing methods can significantly reduce the volume of cement required, thus contributing to lower environmental impact while maintaining structural integrity. Additionally, the utilization of supplementary cementitious materials has been shown to improve the bonding characteristics and overall performance of recycled aggregate concrete. The review further elucidates the role of innovative recycling techniques and smart materials in augmenting the effectiveness of recycled aggregates within 3D printing processes. These advancements not only enhance the quality of the recycled materials but also promote their acceptance within the industry. Moreover, the discussion extends to the implications of regulatory frameworks and public perception, which play critical roles in influencing the widespread adoption of sustainable construction practices. In conclusion, this literature review presents a comprehensive analysis of the current state of research on recycled aggregates in 3DCP technology, highlighting both the challenges and the significant potential for their integration in promoting sustainability within the construction sector. It concludes with insights into future trends and the necessity for ongoing research to optimize the use of recycled aggregates, positioning them as a key component in the evolution of environmentally responsible building practices. As the industry moves forward, the continued exploration of the interplay between recycled materials and advanced construction technologies will be vital in shaping a more sustainable future for concrete production and construction methodologies.

Keywords
Recycled aggregates, recycled concrete, conventional concrete, 3D printing, environment.

شیوه های سنتی ساخت و ساز را می دهد. این روش ابتکاری که با تکنیک ساخت لایه به لایه مشخص می شود، امکان به دست آوردن فرم های ساختاری پیچیده را فراهم می کند که نه تنها از نظر زیبایی شناسی مورد توجه هستند، بلکه از نظر استفاده از مصالح نیز بسیار

کارآمد میباشند. با بهینه سازی فرآیند ساخت و ساز، فرایند بتن سه بعدی، به طور قابل توجهی هزینه های نیروی کار و زمان ساخت و ساز را کاهش می دهد در حالی که تولید زباله را نیز به حداقل می رساند و جایگزینی جذاب برای روش های ساخت و ساز معمولی ارائه می دهد. توانایی سفارشی‌سازی طرح‌ها و تولید سازه‌ها در سایت، بهینه‌سازی منابع را تسهیل می‌کند و نیاز به لجستیک حمل‌ونقل گسترده را که اغلب با رویکردهای ساخت‌وساز سنتی مرتبط است، کاهش می‌دهد.

تمرکز روزافزون بر پایداری در صنعت ساخت و ساز، اهمیت ترکیب مصالح و شیوه های سازگار با محیط زیست را برجسته می کند. از آنجایی که اقتصاد جهانی با تخریب محیط زیست و کاهش منابع دست و پنجه نرم می کند، صنعت ساخت و ساز برای تأثیرات زیست محیطی آن تحت نظارت فزاینده ای قرار دارد. مصالح پایدار، به ویژه سنگدانه های بازیافتی، به عنصری ضروری برای رویارویی با این چالش ها تبدیل شده اند. سنگدانه های بازیافت شده از زباله های ساختمانی و تخریبی راهی برای کاهش ردپای کربن مرتبط با فرایند تولید بتن ارائه می دهند. ادغام آن در مصالح ساختمانی نه تنها منابع طبیعی را حفظ می کند، بلکه زباله ها را از محل های دفن زباله منحرف می کند و به اصول اقتصاد دایره ای احترام می گذارد.

اهمیت سنگدانه های بازیافتی در تولید بتن قابل اغراق نیست. تحقیقات اخیر نشان داده است که این مصالح می توانند به خواص مکانیکی قابل مقایسه با سنگدانه های معمولی دست یابند، بنابراین تضاد بین پایداری و یکپارچگی سازه را کاهش می دهند. به عنوان مثال، مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی (RCA) می‌تواند مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام کلی مخلوط‌های بتن را افزایش دهد، این ویژگی‌ها برای اطمینان از عملکرد سازه‌های پرینت سه بعدی است. علاوه بر این، پیشرفت‌ها در علم مصالح و فناوری چاپ سه‌بعدی راه را برای استفاده کارآمد از سنگدانه‌های بازیافتی هموار کرده است و باعث ایجاد نوآوری‌هایی می‌شود که می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و حرارتی بتن را بهبود بخشد.

علاوه بر این، ادغام سنگدانه های بازیافتی در فرمولاسیون بتن با اهداف پایداری گسترده تر صنعتی همسو می شود. همانطور که توسط مطالعات مختلف نشان داده شده است، انتقال به استفاده از مواد بازیافتی نه تنها به مشکل فوری مدیریت زباله می پردازد، بلکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای مرتبط با استخراج و فرآوری مواد اولیه کمک می کند. به عنوان مثال، استفاده از روش های پرینت سه بعدی بتن دانه درشت، که از سنگدانه های بزرگتر استفاده می کنند، کاهش کسر حجمی مورد نیاز بتن را نشان داده است، بنابراین اثرات زیست محیطی تولید بتن را کاهش می دهد [۱]. این هم افزایی بین فناوری و پایداری، پتانسیل سنگدانه های بازیافتی را برای ایفای نقش محوری در شیوه های ساخت و ساز آینده برجسته می کند.

با توجه به این پیشرفت ها، چشم انداز آینده فناوری بتن پرینت سه بعدی به ویژه در مورد ادغام سنگدانه های بازیافتی امیدوارکننده به نظر می رسد. از آنجایی که تقاضا برای مصالح ساختمانی پایدار همچنان در حال رشد است، تحقیقات مداوم برای رسیدگی به چالش‌های مربوط به تنوع و کیفیت مواد بازیافتی مورد نیاز است. تحقیق در مورد خواص مکانیکی آن، تأثیر آن بر قابلیت چاپ و یکپارچگی ساختاری برای بهینه سازی استفاده از آن در کاربردهای چاپ سه بعدی ضروری است. پتانسیل راه حل های نوآورانه، که با همکاری بین رشته ای افزایش می یابد، می تواند منجر به توسعه مواد کارآمد و موثری شود که معیارهای زیست محیطی و ساختاری را برآورده می کنند.

۲- تحقیقات فعلی در مورد مصالح بازیافتی در پرینترهای سه بعدی

در سال‌های اخیر، استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در چاپ سه بعدی بتن (DCP۳) توجه زیادی را از سوی محققان و متخصصان به خود جلب کرده است. این علاقه ناشی از تقاضای مضاعف برای پایداری و نیاز به روش‌های ساخت و ساز نوآورانه است که قادر به انطباق با طرح‌های پیچیده و در عین حال به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی هستند. اکتشاف سنگدانه های بازیافتی در فرمولاسیون بتن، به ویژه در کاربردهای پرینت سه بعدی، منجر به افزایش تحقیقاتی شده است که خواص مکانیکی، تأثیر بر قابلیت چاپ و عملکرد را در مقایسه با سیمان سنتی برجسته می کند.

۳- یافته‌های اخیر در مورد خواص مکانیکی بتن بازیافتی سنگدانه (RAC)

نتایج تحقیقات در مورد خواص مکانیکی بتن سنگدانه های بازیافتی (RAC) نشان می دهد که این مواد می توانند به استحکام و دوام قابل مقایسه با بتن معمولی دست یابند و نگرانی های دیرینه در مورد یکپارچگی ساختاری آن را برطرف کنند. به عنوان مثال، کار ردی و همکاران. تمرکز آن بر افزایش مقاومت فشاری و خمشی مخلوط‌های سیمان با سنگدانه‌های بازیافتی است، به‌ویژه زمانی که از تکنیک‌های پردازش مناسب برای اطمینان از حذف آلاینده‌ها و بهینه‌سازی توزیع اندازه ذرات استفاده می‌شود [۲]. این نتایج نشان می دهد که با اقدامات کنترل کیفیت مناسب، سنگدانه های بازیافتی می توانند به طور موثر در کاربردهای ساختاری مورد استفاده قرار گیرند و جایگزینی پایدار برای مصالح سنتی باشند.

مطالعات دیگر نشان داده اند که ترکیب سنگدانه های بزرگتر در فرآیند چاپ سه بعدی ذرات بتن بزرگ (LP3DCP) می تواند به طور قابل توجهی کسر حجمی سیمان مورد نیاز را کاهش دهد و در نتیجه اثرات زیست محیطی کلی تولید بتن را کاهش دهد [۱]. این رویکرد نه تنها باعث صرفه جویی در منابع می شود، بلکه عملکرد مکانیکی بتن به دست آمده را نیز افزایش می دهد. افزایش استفاده از سنگدانه های درشت (درشت دانه) بازیافتی نشان داده شده است که مقاومت فشاری تا ۶۵ مگاپاسکال را ایجاد می کند، که پتانسیل RAC را برای برآوردن یا فراتر از معیارهای عملکرد تعیین شده برای مخلوط های بتن استاندارد برجسته می کند.

علاوه بر این، استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی، روشی امیدوارکننده برای بهینه‌سازی فرمول‌بندی مصالح نشان داده شده است. تحقیقات تان (Tan) نشان می دهد که تجزیه و تحلیل آماری مدل های مختلف شبکه عصبی

JECM
2024 , 9 (1)
دوره ۹، شماره ۱
تابستان ۱۴۰۳
دوفصلنامه پژوهشی

می تواند به طور موثر عملکرد بتن بازیافتی را پیش بینی کند، بنابراین تصمیم گیری بهتر در طراحی اختلاط و افزایش کیفیت سازه های قالب گیری شده را تسهیل می کند [۳]. چنین قابلیت هایی پیش بینی کلیدی برای پیشرفت استفاده از سنگدانه های بازیافتی در DCP۳ است، زیرا آنها راه حل های متناسب با نیازهای ساختاری خاص را امکان پذیر می کنند.

۴- مطالعاتی در مورد تأثیر مصالح بازیافتی بر قابلیت چاپ و یکپارچگی ساختاری

تأثیر سنگدانه های بازیافتی بر قابلیت چاپ بتن یکی دیگر از زمینه های مهم تحقیق است. ویژگی‌های منحصربه‌فرد سنگدانه‌های بازیافتی، مانند شکل، بافت و میزان رطوبت آن‌ها، می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر سیالیت و کارایی مخلوط‌های بتن تأثیر بگذارد. تحقیقات نشان داده است که بهینه سازی کیفیت و ترکیب مخلوط سنگدانه های بازیافتی می تواند چاپ پذیری آنها را افزایش دهد و مشکلات مربوط به چسبندگی لایه و اکستروژن مواد در طول فرآیند چاپ سه بعدی را کاهش دهد [4].

علاوه بر این، استفاده از مواد سیمانی جایگزین (SCM)، مانند خاکستر بادی یا سرباره، در ارتباط با سنگدانه های بازیافتی برای بهبود عملکرد کلی مخلوط بتن مثبت واقع شده است. این مواد می توانند خواص پیوند بین سنگدانه ها و ماتریس بتن را افزایش داده و منجر به یکپارچگی ساختاری بهتر اجزای قالب گیری شوند [۱]. همانطور که درک این فعل و انفعالات تکامل می یابد، تحقیقات آینده احتمالاً بر روی پالایش طرح های کامپوزیتی متمرکز خواهد شد که مزایای مواد بازیافتی و SCM را برای دستیابی به عملکرد بهینه در ساختارهای چاپ سه بعدی به حداکثر می رساند.

اهمیت یکپارچگی ساختاری اجزای پرینت سه بعدی را نمی توان نادیده گرفت. مطالعات در مورد دوام طولانی مدت RAC نشان داده است که تا زمانی که از تکنیک های عمل آوری و جابجایی مناسب استفاده شود، این مواد می توانند در برابر عوامل محیطی مشابه بتن معمولی مقاومت کنند. این کشف به ویژه برای کاربردهایی که در معرض شرایط سخت قرار دارند، که در آن عملکرد مکانیکی مواد حیاتی است، مهم است.

۵- تجزیه و تحلیل مقایسه ای بتن بازیافتی در مقابل بتن معمولی

تجزیه و تحلیل مقایسه ای بتن سنگدانه های بازیافتی و بتن معمولی مزایای متمایز مرتبط با استفاده از مواد بازیافتی را نشان می دهد. روی آوردن به استفاده از سنگدانه های بازیافتی نه تنها به کاهش ضایعات کمک می کند، بلکه با کاهش هزینه های مواد، مزایای اقتصادی نیز به همراه دارد. مطالعات اخیر نشان می دهد که منابع محلی مصالح بازیافتی می تواند انتشار گازهای گلخانه ای حمل و نقل را کاهش دهد و رشد اقتصادی منطقه ای را تحریک کند و با اهداف توسعه پایدار گسترده تر همسو شود [۵]. جدول ۱ تفاوت های کلیدی بین بتن سنگدانه بازیافتی (RAC) و بتن معمولی را خلاصه می کند.

مزایای نسبی RAC فراتر از عوامل محیطی و اقتصادی است. این موارد همچنین شامل ابعاد اجتماعی می شوند، زیرا استفاده از مصالح بازیافتی آگاهی عمومی را از پایداری افزایش می دهد و حرکت به سمت اصول اقتصاد دایره ای در بخش ساخت و ساز را رونق می کند.

جدول ۱: تفاوت های کلیدی بین بتن سنگدانه بازیافتی (RAC) و بتن معمولی

جنبه مورد نظر	بتن بازیافتی	بتن معمولی
منبع مصالح خام	حاصل از ضایعات ساختمانی و تخریب	سنگدانه های بکر از منابع طبیعی
تاثیرات زیست محیطی	کاهش زباله های دفن زباله و حفظ منابع طبیعی	تخریب محیط زیست به دلیل استخراج منابع
پیامدهای مرتبط با هزینه	هزینه کمتر مصالح به دلیل استفاده از منابع محلی	هزینه های بالاتر مرتبط با حمل و نقل و استخراج منابع
عملکرد مکانیکی	خواص مکانیکی قابل مقایسه یا برتر با عملیات مناسب	استانداردهای عملکرد با مصالح بکر تعیین شده است
قابلیت پرینت پذیری (چاپ)	با ویژگی های سنگدانه های مختلف متفاوت است بااین حال قابل بهینه سازی است	به خوبی قابل چاپ است

۶- چالش ها و محدودیت ها

ادغام سنگدانه های بازیافتی در فناوری چاپ بتن سه بعدی (DCP۳) فرصت های زیادی را برای ساخت و ساز پایدار ارائه می دهد. با این حال، این امر با تعدادی چالش و محدودیت همراه است که باید برای تسهیل پذیرش گسترده تر و بهینه سازی عملکرد برطرف شوند. این چالش ها را می توان به طور کلی به موضوعات فنی، مسائل نظارتی و کنترل کیفیت و درک عمومی در مورد پذیرش مواد بازیافتی در ساخت و ساز طبقه بندی کرد.

۶-۱- چالش های فنی در استفاده از سنگدانه های بازیافتی

چالش های فنی مرتبط با استفاده از سنگدانه های بازیافتی در فرمولاسیون بتن بسیار متنوع است. مهمترین آنها تنوع ذاتی مواد بازیافتی است که می تواند از منابع مختلف زباله های ساختمانی و تخریب ناشی شود. این تنوع می تواند منجر به ناهماهنگی در خواص مکانیکی بتن سنگدانه بازیافتی (RAC) شود و پیش بینی عملکرد قابل اعتماد را دشوار می کند. همانطور که توسط Reddy و همکاران ذکر شد، خواص سنگدانه های بازیافتی، از جمله چگالی، تخلخل و شکل ذرات آنها، می تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد کلی بتن، به ویژه از نظر مقاومت فشاری و خمشی، تأثیر بگذارد [۲]. این تناقضات نیازمند تست‌های دقیق و پروتکل‌های استانداردسازی هستند تا اطمینان حاصل شود که سنگدانه‌های بازیافتی معیارهای عملکرد مورد نیاز برای استفاده در کاربردهای ساختاری را برآورده می‌کنند.

علاوه بر این، قابلیت چاپ RAC چالش های مهمی را به همراه دارد .ویژگی‌های منحصربه‌فرد سنگدانه‌های بازیافتی، مانند شکل،

بافت و محتوای رطوبت آن‌ها، می‌تواند بر سیالیت و کارایی مخلوط‌های بتن تأثیر منفی بگذارد، که از جمله فاکتورهای حیاتی برای چاپ سه بعدی موفق هستند. تحقیقات نیاز به بهینه سازی درجه بندی و ترکیب مخلوط سنگدانه های بازیافتی را برای افزایش قابلیت چاپ و کاهش مشکلات مربوط به چسبندگی لایه و اکستروژن مواد در طول فرآیند چاپ نشان می دهد [۴].

علاوه بر این، اختلاط مواد سیمانی تکمیلی (SCM) برای بهبود عملکرد مخلوط های سیمانی حاوی سنگدانه های بازیافتی نشان داده شده است. با این حال، انتخاب و بهینه سازی این مواد می تواند پیچیده باشد، زیرا اثربخشی آنها اغلب به تعاملات خاص با سنگدانه های بازیافتی مورد استفاده بستگی دارد. بنابراین، فرمولاسیون مخلوط های بتن با کارایی بالا با استفاده از سنگدانه های بازیافتی و SCM نیازمند تحقیق و توسعه گسترده است.

۶-۲- مسائل نظارتی و کنترل کیفیت

چشم انداز نظارتی پیرامون استفاده از سنگدانه های بازیافتی در ساخت و ساز مانع بزرگ دیگری است .قوانین و استانداردهای ساختمانی موجود برای بتن اغلب خواص منحصر به فرد و ویژگی های عملکردی مواد بازیافتی را در نظر نمی گیرند. این شکاف در مقررات می تواند باعث می شود که پیمانکاران و سازندگان تمایلی به استفاده از سنگدانه های بازیافتی نداشته باشند زیرا ممکن است از عدم انطباق با استانداردهای موجود یا مسائل مربوط به مسئولیت بالقوه بیم داشته باشند [۵]. بنابراین، نیاز به توسعه دستورالعمل‌ها و استانداردهای به‌روز شده وجود دارد که به طور خاص به استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن می‌پردازد، پذیرش آن‌ها را ارتقا می‌دهد و ادغام آن‌ها را در شیوه‌های استاندارد ساخت و ساز تسهیل می‌کند. هنگام استفاده از سنگدانه های بازیافتی، کنترل کیفیت نیز یکی از نگرانی های اصلی است. ماهیت ناهمگون زباله های ساخت و ساز و تخریب مستلزم اقدامات دقیق تضمین کیفیت است تا اطمینان حاصل شود که مواد بازیافتی با مشخصات عملکرد مطابقت دارند. تغییرات در ترکیب و کیفیت سنگدانه های بازیافتی می تواند تفاوت های قابل توجهی در خواص RAC ایجاد کند که می تواند یکپارچگی ساختاری مقالات چاپ شده سه بعدی را به خطر بیندازد. بنابراین، اجرای پروتکل های کنترل کیفیت جامع برای تهیه، پردازش و کاربرد مواد بازیافتی برای اطمینان از نتایج قابل اعتماد در پروژه های ساختمانی ضروری است.

۶-۳-پیشرفت در علم مصالح

تکامل سریع فناوری چاپ سه بعدی بتن (DCP۳) عصر جدیدی را در علم مواد، به ویژه در زمینه ترکیب سنگدانه های بازیافتی (RAC) در فرمولاسیون بتن آغاز کرده است. همانطور که صنعت ساخت و ساز به طور فزاینده ای به دنبال شیوه های پایدار برای کاهش اثرات زیست محیطی است، پیشرفت های قابل توجهی در علم مواد با تمرکز بر نوآوری در تکنیک های بازیافت، توسعه مصالح جایگزین و ادغام مصالح هوشمند در چاپ سه بعدی پدیدار شده است. این بخش به بررسی این پیشرفت‌ها می‌پردازد و پیامدهای آنها را برای بهبود عملکرد و پایداری بتن در برنامه‌های پرینت سه بعدی برجسته می‌کند.

۶-۴-نوآوری در تکنیک های بازیافت زباله های ساختمانی

پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری‌های بازیافت، چشم‌انداز مدیریت زباله‌های ساختمانی را متحول کرده است، و امکان بازیافت کارآمد و استفاده مجدد از مصالح را به مواد بازیافتی با کیفیت بالا فراهم آورده است. رویکردهای نوآورانه شامل توسعه تکنیک های تخریب هوشمند، فرآیندهای مرتب سازی خودکار و فن آوری های خرد کردن و اسکن پیشرفته است که استخراج مواد قابل استفاده از زباله های ساختمانی و تخریب را تسهیل می کند. به عنوان مثال، تکنیک‌های تخریب هوشمند برای به حداقل رساندن آلودگی در حین برچیدن سازه‌ها، تضمین خلوص مواد بازیافتی تولید شده طراحی شده‌اند. این امر بسیار مهم است، چرا که کیفیت سنگدانه های بازیافتی مستقیماً بر خواص مکانیکی بتن به دست آمده تأثیر می گذارد [۶].

علاوه بر این، پیشرفت‌ها در کاهش زباله‌های ساختمانی منجر به ایجاد تسهیلات بازیافت پیچیده‌ای شده است که از سیستم‌های خودکار برای طبقه‌بندی و پردازش مواد استفاده می‌کنند. این سیستم ها از فناوری حسگر و الگوریتم های ماشین لرنینگ برای بهینه سازی و جداسازی مواد بر اساس اندازه، ترکیب و کیفیت آنها استفاده می کنند. چنین نوآوری هایی نه تنها کارایی فرآیند بازیافت را افزایش می دهد، بلکه قوام سنگدانه های بازیافتی تولید شده را بهبود می بخشد و امکان استفاده ایمن از آنها را در مخلوط های بتن فراهم می کند. در نتیجه، این تحولات با کاهش زباله های دفن زباله و حفظ منابع طبیعی به پایداری بخش ساخت و ساز کمک می کند.

۶-۵-توسعه مصالح جایگزین برای بهبود عملکرد RAC

عملکرد بتن سنگدانه بازیافتی (RAC) را می توان با ترکیب مصالح جایگزین به طور قابل توجهی افزایش داد. تحقیقات اخیر نشان می دهد که استفاده از مواد سیمانی مکمل (SCM) مانند خاکستر بادی، سرباره و دود سیلیس می تواند خواص مکانیکی و دوام RAC را بهبود بخشد. این مواد با افزایش پیوند بین سنگدانه ها و ماتریس بتن به عملکرد کلی بتن کمک می کنند و در نتیجه مقاومت فشاری را افزایش می دهند و نفوذپذیری را کاهش می دهند [۱].

به طور خاص، نشان داده شده است که افزودن SCM اثرات منفی بالقوه مرتبط با استفاده از سنگدانه های بازیافتی، مانند کاهش کارایی و تغییرات استحکام را کاهش می دهد. به عنوان مثال، مطالعات نشان می دهد که گنجاندن خاکستر بادی در ترکیب با سنگدانه های بازیافتی می تواند دوام بتن را در دراز مدت افزایش دهد و آن را برای کاربردهای مختلف سازه ای مناسب کند. این امر به ویژه در زمینه چاپ سه بعدی مهم است، جایی که قابلیت چاپ و یکپارچگی ساختاری مواد ضروری است. با بهینه‌سازی طراحی مخلوط از طریق استفاده استراتژیک از مصالح جایگزین، محققان می‌توانند RACهای با کارایی بالا را که استانداردهای بتن معمولی را برآورده می‌کنند یا فراتر می‌برند، توسعه دهند [۲].

علاوه بر این، کشف مصالح جایگزین مبتنی بر زیست و سازگار با محیط زیست، مرز هیجان انگیزی را در علم مواد باز می کند. این جایگزین های ابتکاری نه تنها به پایداری بتن کمک می کنند، بلکه ویژگی های منحصر به فردی را ارائه می دهند که می تواند عملکرد RAC را بهبود بخشد. به عنوان مثال، استفاده از پلیمرهای زیستی از منابع تجدیدپذیر به عنوان یک راه حل اتصال بالقوه در نظر گرفته شده است که می تواند خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشد و ردپای مخرب زیست محیطی آن را کاهش دهد. این با اهداف گسترده تر ساخت و ساز پایدار و اقتصاد دایره ای، که در آن ضایعات مجددا استفاده می شود و مصرف منابع به حداقل می رسد، همسو است.

۷- چشم اندازهای آینده

استفاده از سنگدانه های بازیافتی در فناوری چاپ سه بعدی بتن (DCP۳) آماده تعریف مجددی بر روش های ساخت و ساز را میباشد، به ویژه زمانی که صنعت با چالش های پایداری مواجه است. همانطور که مزایای استفاده از سنگدانه های بازیافتی (RAC) به طور فزاینده ای آشکار می شود، انتظار می رود که آینده DCP۳ شاهد پیشرفت های قابل توجهی به ویژه از نظر اجرایی در مقیاس بزرگ، تأثیر چارچوب های سیاست و پیشرفت های فنی و علمی باشد.

۷-۱-پتانسیل ها برای پیاده سازی در مقیاس بزرگ RAC چاپ شده سه بعدی

چشم انداز اجرای مقیاس بزرگ استفاده از سنگدانه های بازیافتی در چاپ سه بعدی امیدوارکننده است، زیرا با تقاضای رو به رشد برای شیوه های ساخت و ساز پایدار مطابقت دارد. مطالعات اخیر خواص مکانیکی RAC را برجسته می کند و نشان می دهد که در صورت استفاده مناسب، می تواند به مقاومت فشاری قابل مقایسه ای با بتن معمولی دست یابد. به عنوان مثال، کار ردی و همکاران. این عملکرد ساختاری بهبود یافته مخلوط‌های بتن با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و پایداری RAC را در کاربردهای مختلف ساختمانی برجسته می‌کند [۲].

از آنجایی که صنعت ساختمان به طور فزاینده ای از فناوری چاپ سه بعدی استفاده می کند، توانایی تولید سازه ها در محل از مواد بازیافتی محلی می تواند هزینه های حمل و نقل و انتشار کربن را کاهش دهد. این رویکرد محلی نه تنها پایداری را افزایش می دهد، بلکه با ایجاد شغل در بخش بازیافت و ساخت و ساز از رشد اقتصادی منطقه ای نیز حمایت می کند. علاوه بر این، ایجاد تسهیلات بازیافت متمرکز مجهز به فن‌آوری‌های پردازش پیشرفته می‌تواند تولید کارآمد مواد بازیافتی با کیفیت بالا را تسهیل کند، در نتیجه بر موانع موجود مرتبط با تنوع خواص مواد غلبه کند [۵].

علاوه بر این، انتقال به استفاده از چاپ سه بعدی RAC در مقیاس بزرگ مستلزم توسعه پروتکل‌های استاندارد و اقدامات تضمین کیفیت برای اطمینان از بازده ثابت مواد بازیافتی است. تحقیقات مستمر در مورد خواص RAC، از جمله مطالعات در مورد دوام طولانی مدت و مقاومت آن در برابر عوامل محیطی، برای ایجاد اعتماد ذینفعان به یکپارچگی ساختاری آن بسیار مهم است. از آنجایی که پروژه‌های بیشتری با موفقیت کارآیی RAC چاپ شده سه بعدی را نشان می‌دهند، احتمالاً پذیرش صنعت گسترده‌تری دنبال می‌شود و راه را برای پذیرش آن در شیوه‌های ساخت و ساز سنتی هموار می‌کند.

۸- نتیجه گیری

استفاده سنگدانه های بازیافتی در فناوری چاپ بتن سه بعدی (DCP۳) نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی در شیوه های ساخت و ساز پایدار است که چالش های زیست محیطی و تقاضا برای روش های ساخت و ساز نوآورانه را برطرف می کند. این بررسی ادبیات، یافته‌های کلیدی از تحقیقات اخیر را برجسته می‌کند که پتانسیل سنگدانه‌های بازیافتی را برای بهبود خواص مکانیکی بتن و در عین حال ارتقای پایداری در صنعت ساخت‌وساز برجسته می‌کند.

یکی از سؤالات اصلی که از ادبیات بررسی شده به دست می آید، عملکرد مکانیکی بتن سنگدانه بازیافتی (RAC) است. مطالعات نشان می دهد که با تکنیک های پردازش مناسب، RAC می تواند به مقاومت فشاری و خمشی قابل مقایسه با بتن معمولی دست یابد [۲]. این یافته بسیار مهم است زیرا تردیدهای دیرینه در مورد یکپارچگی ساختاری مواد بازیافتی را برطرف می کند. علاوه بر این، پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه بعدی بتن با ذرات بزرگ (LP3DCP) نشان می‌دهد که ادغام سنگدانه‌های بزرگ‌تر می‌تواند بخش‌های حجمی سیمان را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید سیمان را به حداقل برساند. چنین نوآوری هایی نه تنها عملکرد مکانیکی بتن را افزایش می دهد، بلکه به هدف کلی کاهش انتشار کربن در بخش ساخت و ساز کمک می کند [۱].

پیامدهای تحقیقات و اقدامات آتی عمیق است. همانطور که صنعت ساخت و ساز به طور فزاینده ای پایداری را پذیرفته است، نیاز فوری به پروتکل های استاندارد برای پردازش و کنترل کیفیت مواد بازیافتی وجود دارد. تنوع ذاتی در ضایعات ساخت و ساز و تخریب نیاز به آزمایش دقیق دارد تا اطمینان حاصل شود که مواد بازیافتی معیارهای عملکرد قابل مقایسه با سنگدانه های بکر را دارند. علاوه بر این، استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته، مانند شبکه‌های عصبی، نوید بهینه‌سازی فرمول‌بندی مخلوط‌های بتن بازیافتی را می‌دهد، بنابراین راه‌حل‌های مناسبی را که الزامات ساختاری خاص را برآورده می‌کنند، امکان‌پذیر می‌سازد [۳]. مطالعات آینده باید بر روی دوام طولانی مدت RAC به ویژه در شرایط محیطی مختلف تمرکز کند تا دوام آن در کاربردهای مختلف افزایش یابد.

علاوه بر این، مزایای اقتصادی مرتبط با استفاده از سنگدانه های بازیافتی را نمی توان نادیده گرفت .منابع محلی این مواد نه تنها انتشار گازهای گلخانه ای حمل و نقل را کاهش می دهد، بلکه رشد اقتصادی منطقه را با ایجاد شغل در بخش های بازیافت و ساخت و ساز تحریک می کند [۵]. همانطور که مصرف کنندگان و بازیگران صنعت از مسائل زیست محیطی آگاه تر می شوند، تقاضا برای راه حل های ساخت و ساز پایدار احتمالا افزایش می یابد و باعث سرمایه گذاری بیشتر در فناوری هایی می شود که کیفیت و عملکرد مواد بازیافتی را بهبود می بخشد. این همسویی پویایی بازار با اهداف توسعه پایدار فرصتی منحصر به فرد برای بخش ساخت و ساز برای گذار به اقتصاد دایره ای است.

JECM
2024 , 9 (1)
دوره ۹، شماره ۱
تابستان ۱۴۰۳
دوفصلنامه پژوهشی

آخرین بازتاب ها در مورد پایداری چاپ سه بعدی با مواد بازیافتی، مزایای چندوجهی این رویکرد را برجسته می کند. جابجایی زباله های ساختمانی از محل های دفن زباله، حفظ منابع طبیعی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای به طور کلی اهمیت استفاده از مواد بازیافتی در بخش ساخت و ساز را برجسته می کند. همگرایی پایداری، فناوری و پایداری اقتصادی، پرینت سه بعدی با مواد بازیافتی را به عنوان یک نیروی دگرگون کننده در محیط ساخته شده قرار می دهد.

در نتیجه، آینده فناوری بتن با پرینت سه بعدی، به ویژه با استفاده از سنگدانه های بازیافتی، پتانسیل زیادی برای پیشبرد شیوه های ساخت و ساز پایدار دارد. از آنجایی که صنعت چالش ها و فرصت های ارائه شده توسط این رویکرد نوآورانه را دنبال می کند، تحقیقات مستمر، تلاش های مشترک و تعهد به کیفیت برای تحقق بخشیدن به مزایای کامل مصالح بازیافتی ضروری خواهد بود. راه رو به جلو روشن است: پذیرش مواد بازیافتی نه تنها یک الزام زیست محیطی است، بلکه یک مزیت استراتژیک برای صنعت ساخت و ساز در جستجوی آینده ای پایدارتر است.

۹- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافعی ندارند.

۱۰- حمایت مالی

این تحقیق از هیچگونه حمایت مالی‌ای برخوردار نبوده است.

۱۱- مراجع

[1] Mai, Inka, Leon Brohmann, Niklas Freund, Stefan Gantner, Harald Kloft, Dirk Lowke, and Norman Hack. 2021. "Large Particle 3D Concrete Printing—A Green and Viable Solution" Materials 14, no. 20: 6125.

[2] M. Reddy, K. Kumar, B. Prathyusha, Y. A. Angel, B. Akhil, N. Bhanu, S. A. Reddy – "Experimental Study on Potential Use of Recycled Aggregates in Concrete", International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology (2023-01-31)

[3] Kang Hai Tan , Predicting Compressive Strength of Recycled Concrete for Construction 3D Printing Based on Statistical Analysis of Various Neural Networks- Scientific Research Publishing (2018-01-01)

[4] Pacheco, João, and Jorge de Brito. 2021. "Recycled Aggregates Produced from Construction and Demolition Waste for Structural Concrete: Constituents, Properties and Production" Materials 14, no. 19: 5748.

[5] Gamage, Kumari, Sabrina Fawzia, Tatheer Zahra, Muge Belek Fialho Teixeira, and Nor Hafizah Ramli Sulong. 2024. "Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing: A Review on Materials, Challenges, and Current Progress in Australia" Buildings 14, no. 2: 494.

[6] F. D. Maio, S. Lotfi, M. Bakker, Mingming Hu, A. Vahidi, E. V. Roekel, Iris Batterham, David Garca Estvez, I. Ramiro, Margareta Wahlstrom, J. Guine, F. Larrard, N. D. Temmerman, Anne Paduart, W. Debacker, K. Broos, F. Lowres, W. Lang, E. Durmisevic, L. Bragana, J. Couto, Abraham Teklay – "Advances in recycling and management of construction and demolition waste"

COPYRIGHTS
©2024 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)