

بررسی نقش پرینت سه بعدی در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و پایداری ساختمان‌ها

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

کد مقاله: ۷۱۵۴۴

فاطمه زرینی^{۱*}، یوسف گرجی مهلبانی^۲

چکیده

در دهه‌های اخیر، صنعت ساخت و ساز با چالش‌هایی ناشی از وابستگی به فرآیندهای سنتی روبرو بوده است، که این امر به تصور این صنعت به عنوان یک بخش با فناوری پایین منجر شده است. با این حال، با پیش‌بینی افزایش جمعیت جهانی و تقاضای رو به رشد برای مسکن، نیاز به بهبود بهره‌وری در این صنعت افزایش یافته است. چاپ سه بعدی به عنوان یک فناوری امیدبخش برای ایجاد تغییرات عمده در صنعت مطرح شده است، که قابلیت‌های این فناوری در پیچیدگی‌های هندسی دشوار، کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی فراوان است. این مقاله به بررسی فرآیندهای چاپ سه بعدی در صنعت ساخت و ساز می‌پردازد و تمرکز خود را بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های چاپی سه بعدی قرار می‌دهد. با استفاده از روش مروری، مقاله به ارائه پس‌زمینه‌ای از صنعت ساخت و ساز و چاپ سه بعدی می‌پردازد، به بررسی تعامل میان خواص مواد و نیاز به یک دیدگاه چندرشته‌ای می‌پردازد، و در نهایت، به کاربردهای عایق حرارتی در ساختمان‌ها می‌پردازد. این مقاله به اهمیت بررسی بیشتر و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌های چاپی سه بعدی تأکید می‌کند و راه‌هایی را برای بهبود این عملکرد پیشنهاد می‌دهد.

واژگان کلیدی: ساختمان پرینت سه بعدی، عملکرد حرارتی، فناوری‌های نوین، پایداری ساختمان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
Fatemehzarini110@gmail.com

۲- استاد دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

در طول دهه‌ها، صنعت ساخت و ساز به دلیل وابستگی شدید به فرآیندهای سنتی و دستی، با چالش‌هایی در زمینه نوآوری مواجه بوده است. این وابستگی منجر به تصور صنعت به عنوان یک بخش با فناوری پایین شده است، که در مقایسه با سایر صنایع، پیشرفت چشمگیری در بهبود بهره‌وری نداشته است (Wangler et al, 2019). علاوه بر این، ساختمان‌ها به عنوان بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در اروپا شناخته شده‌اند، با انتساب ۴۰٪ از مصرف انرژی و ۳۶٪ از انتشار CO₂ در اتحادیه اروپا به خود. همین حال، با پیش‌بینی افزایش جمعیت جهانی تا سال ۲۱۰۰ به ۱۰/۹ میلیارد نفر (DESA, 2019)، تقاضا برای مسکن افزایش خواهد یافت، که این نیز نیاز به تغییرات اساسی در رویکردهای ساختمانی را تشدید می‌کند. با توجه به این چالش‌ها، توجه به بهبود کارایی و پایداری در صنعت ساخت و ساز از طریق نوآوری و بهره‌وری افزایش یافته است. در این راستا چاپ سه بعدی (3DP) به عنوان یک فناوری امیدبخش برای ایجاد تغییرات عمده در صنعت مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند پیچیدگی‌های هندسی دشوار را با هزینه‌های کمتر و با قابلیت‌های بیشتری نسبت به روش‌های ساختمانی سنتی محقق سازد. علاوه بر این، چاپ سه بعدی مزایای فراوانی در زمینه‌های فنی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی ارائه می‌دهد و امکان استفاده از فناوری‌های جدید مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمانی (BIM) و هوش مصنوعی (AI) را در آینده فراهم می‌آورد. (Tan K, 2018) با این حال، صنعت ساخت و ساز در مسیر تبدیل دیجیتال هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد، و چالش‌های متعددی در زمینه مواد، رباتیک و پایداری ساختاری پیش روی آن است (Salet et al, 2016). عملکرد ساختمان از نظر حرارتی و صوتی، و سازگاری آن با استانداردهای انرژی فعلی، همچنان موضوعاتی هستند که نیاز به بررسی بیشتر دارند. این پژوهش در پی پرداختن به این موضوعات، به ویژه تمرکز بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های چاپی سه بعدی و بررسی اینکه آیا این جنبه تا کنون به طور کافی مورد توجه قرار گرفته است یا خیر، می‌باشد. با اتخاذ یک رویکرد تحقیق منظم، مقاله ابتدا به ارائه پس‌زمینه‌ای از صنعت ساخت و ساز و چاپ سه بعدی می‌پردازد، سپس به بررسی تعامل میان خواص مواد و نیاز به یک دیدگاه چندرشته‌ای می‌پردازد، و در نهایت، به کاربردهای عایق حرارتی در ساختمان‌ها و پیشرفت‌های آتی در این زمینه می‌پردازد.

۲- روش تحقیق

در این مقاله، ما از روش مروری برای بررسی اطلاعات موجود درباره چاپ سه بعدی در صنعت ساخت و ساز استفاده کرده‌ایم. هدف ما ارائه دیدگاهی اجمالی از فرآیندهای فعلی، فرصت‌ها، چالش‌ها در این زمینه است. سه سوال اصلی تحقیق ما عبارتند از:

۱. فناوری چاپ افزودنی چگونه در ساخت و ساز استفاده می‌شود؟
۲. اجرای چاپ سه بعدی در صنایع معماری و ساخت و ساز چه مزایا و مشکلاتی دارد؟
۳. چه راه‌هایی برای بهبود کارایی حرارتی سازه‌های چاپ شده وجود دارد؟

۳- شناخت فناوری چاپ افزودنی و پرینت سه بعدی

مطالعه دقیق مقالات انتخاب شده نشان داد که صنعت ساختمان نقش مهمی در رشد اقتصادی کشورها دارد. به طور خاص، در سال ۲۰۱۶، صنعت ساختمان تأثیر قابل توجهی بر اشتغال در اتحادیه اروپا داشته و تقریباً ۹٪ از تولید ناخالص داخلی این اتحادیه را تشکیل داده است. (Wolfs et al, 2019) این بخش به عنوان یک منبع اشتغال مستقیم عمل کرده و در ساخت زیرساخت‌های حیاتی برای تشویق پیشرفت و رشد اقتصادی سهیم است. با این حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد که در ادامه به آنها می‌پردازیم. در هر پروژه، تعاملات بین معماران، مهندسان، مشاوران، پیمانکاران و دیگر ذینفعان، گاهی اوقات موجب ایجاد تضاد منافع می‌شود، که می‌تواند به کاهش کارایی کلی صنعت منجر شود. همچنین، تشکیلات پیچیده و وجود تعداد زیادی از کسب‌وکارهای کوچک و متوسط، توسعه این صنعت را دچار مشکل می‌کند. این مسائل به ویژه در زمینه مدیریت پسماند، که تقریباً ۲۵ تا ۳۰٪ از کل پسماندهای تولیدی را تشکیل می‌دهند، برجسته هستند. (Kreiger et al, 2016)

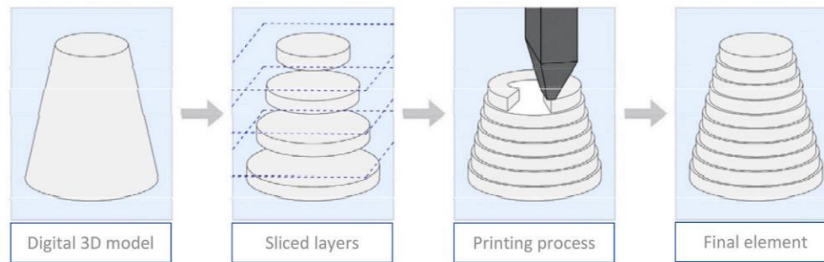
به منظور افزایش بهره‌وری و کلیت کارایی صنعت، صنعت ساختمان باید به عصر دیجیتال پیوسته شود. طبق شاخص دیجیتالی‌سازی صنعت موسسه جهانی مکینزی (McKinsey Global Institute, 2016)، ساختمان یکی از کم‌دیجیتال‌ترین بخش‌ها در سراسر جهان است و در آمریکا دومین کم‌دیجیتال‌ترین بخش است، فقط پیش از کشاورزی و در اروپا جایگاه آخر را دارد. افزایش تجربه در استفاده از فناوری ساختمانی مبتنی بر دیجیتال، همانند آنچه که صنایع تولیدی انجام داده‌اند، یک هدف مهم در صنعت ساختمان است. از آنجا که فرایند ساخت افزایشی (AM) به طور معمول در بسیاری از کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود، معماران، مهندسان و سازندگان به استفاده از آن در ساخت و ساز علاقه‌مند شده‌اند.

به موجب استاندارد ISO/ASTM 52900-15 برای ساخت افزایشی (ISO/ASTM 52900-15,2015)، فرآیند ساخت افزایشی (AM)، همچنین شناخته شده به عنوان چاپ سه بعدی "فرآیند اتصال مواد برای ساخت قطعات از داده‌های مدل D³ است، معمولاً لایه به لایه، به عنوان مقابل فرآیندهای ساخت کاستنی و فرم‌دهی."

۴- دسته بندی های چاپ سه بعدی و ساخت افزودنی

با وجود تنوع دسته‌بندی‌های پردازش ساخت افزایشی (AM) که بعداً توضیح داده خواهد شد، متداول‌ترین آنها با DP³ مرتبط است، که در آن، یک مدل D³ دیجیتال پیش‌تعریف شده تحلیل شده و از طریق یک دنباله از قسمت‌های عرضی به یک مسیر چاپ ترجمه می‌شود، جایی که لایه‌ها از پایین به بالا چاپ می‌شوند. استخراج مواد اساساً پیاده‌سازی به مقیاس بزرگی از روش مدل‌سازی نشانه‌گذاری یا مدل‌سازی رسوبی است، یک فرآیند تولید که به طور گسترده در نقاط مختلف دیده می‌شود، تا جایی که اغلب در پرینترهای D³ شخصی می‌توان دید (Mechtcherine et al, 2008).

به طور کلی، در AM یک مدل D³ در یک برنامه مدل‌سازی کشیده می‌شود، سپس به فرمت پرونده (STL زبان تسلسل معمولی) صادر می‌شود، که متناظر با یک نوع فایل استاندارد برای تبادل داده‌ها بین کاربران AM است و حاوی اطلاعات مربوط به هندسه سطحی شیء D³ است. سپس، با تطابق با جریان کاری نشان‌دهنده در شکل 1، یک نرم‌افزار کامپیوتر مدل را به لایه‌های برشی تجزیه می‌کند و خطوط مرزی متعددی را تولید می‌کند که همراه با داده‌های اضافی در مورد ویژگی‌های چاپ مانند جهت چاپ، تعداد مرزهای خارجی یا ارتفاع لایه، پردازش شده و به دستورات کنترل برای قرارگیری نازل چاپ منجر می‌شود. (Hager et al, 216 – Nadal et al, 2017 – Abdulhameed et al, 2019)

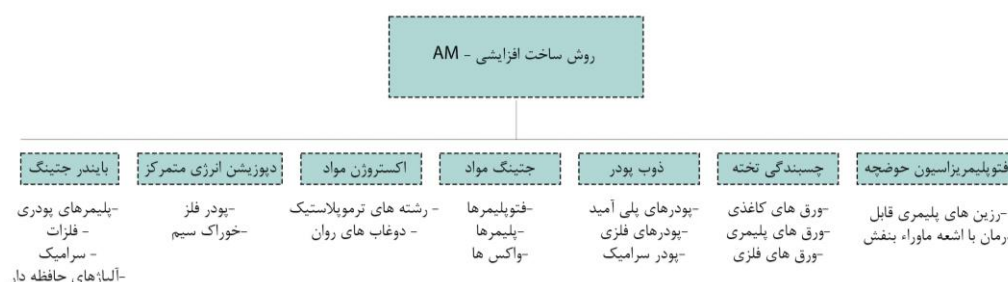


شکل ۱- جریان کار فرآیند اکستروژن مواد (مأخذ: Pessoa et al, 2021)

توسعه فناوری چاپ سه بعدی از اواخر دهه ۱۹۹۰ آغاز شده و تا به امروز به شکل چشمگیری رشد کرده است. در ابتدا به عنوان روشی برای پروتوتایپ سازی سریع معرفی شد که به مهندسين امکان می‌داد تا به سرعت نمونه‌هایی از طراحی‌های دیجیتال خود را تولید کنند. با پیشرفت زمان و افزایش دقت و قابلیت‌های این فناوری، چاپ سه بعدی اکنون فراتر از ساخت نمونه‌های اولیه است و به عنوان یک ابزار کلیدی در تولید افزوده مطرح شده است. (Pessoa, 2020) این تحولات، همراه با گسترش تحقیقات در این زمینه، به افزایش قابل توجهی در تنوع موادی که می‌توان با استفاده از فناوری‌های مختلف چاپ سه بعدی کار کرد، منجر شده است. بر اساس استاندارد ISO/ASTM 52900-15، فناوری ساخت افزودنی (AM) امروزه در هفت دسته فرآیند مختلف قرار می‌گیرد: بایندر جتینگ، دپوزیشن انرژی متمرکز، اکستروژن مواد، جتینگ مواد، ذوب پودر، چسبندگی تخته و فتوپلیمریزاسیون حوضچه. هر کدام از این دسته‌بندی‌ها نشان‌دهنده روش‌های متفاوتی برای اتصال مواد و ساخت شیء لایه به لایه هستند، با استفاده از مواد متنوعی از جمله پلیمرها، فلزات، سرامیک‌ها و رزین‌ها (Valente, 2019).

- بایندر جتینگ: از یک عامل چسبنده مایع بر روی لایه‌های نازک از مواد پودری استفاده می‌کند تا مواد پودری را به یکدیگر متصل و شیء را لایه به لایه بسازد.
- دپوزیشن انرژی متمرکز: مواد را با استفاده از انرژی حرارتی متمرکز شده ذوب می‌کند و در حین اعمال بر سطح، آن‌ها را اتصال می‌دهد.
- اکستروژن مواد: شامل تخلیه انتخابی ماده از طریق یک نازل یا سوراخ برای ساخت شیء است.
- جتینگ مواد: از قطرات ماده ساختمانی برای ساخت شیء به صورت لایه به لایه استفاده می‌کند.
- ذوب پودر: مناطقی از یک تخته پودر را با استفاده از انرژی حرارتی ذوب می‌کند، که پودر اطراف به عنوان ماده پشتیبان عمل می‌کند.

- چسبندگی تخته: روشی است که در آن لایه‌های مختلف مواد به هم متصل می‌شوند تا یک شیء سه بعدی تولید شود. این می‌تواند شامل چسباندن برگه‌ها یا تخته‌های پلیمری با چسب یا اتصال تخته‌های فلزی از طریق جوشکاری اولتراسونیک باشد.
- فتوپلیمریزاسیون حوضچه: فرآیندی است که در آن نور (معمولاً از یک لیزر یا پروژکتور) برای سخت کردن لایه‌های انتخابی از مایع فتوپلیمر در یک حوضچه استفاده می‌شود، به طوری که شیء سه بعدی لایه به لایه ساخته می‌شود. این دسته‌بندی‌ها، هر یک دارای ویژگی‌ها و کاربردهای منحصر به فردی هستند که آن‌ها را برای ساخت انواع مختلف محصولات در صنایع متنوع مناسب می‌سازد. به طور مثال، بایندر جتینگ و فتوپلیمریزاسیون حوضچه برای ساخت مدل‌های با جزئیات بالا و پیچیدگی‌های هندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که ذوب پودر و دپوزیشن انرژی متمرکز بیشتر برای تولید قطعات فلزی با استحکام بالا کاربرد دارند (Hambach et al, 2017).
- توسعه و گسترش مواد قابل استفاده در چاپ سه بعدی، از پلیمرها و فلزات گرفته تا سرامیک‌ها و رزین‌ها، این فناوری را به ابزاری قدرتمند برای نوآوری و سفارشی‌سازی در تولید تبدیل کرده است. قابلیت تولید قطعات پیچیده با هزینه‌های نسبتاً پایین و در زمان کوتاه، چاپ سه بعدی را به یکی از جذاب‌ترین فناوری‌ها در عصر حاضر تبدیل کرده است.

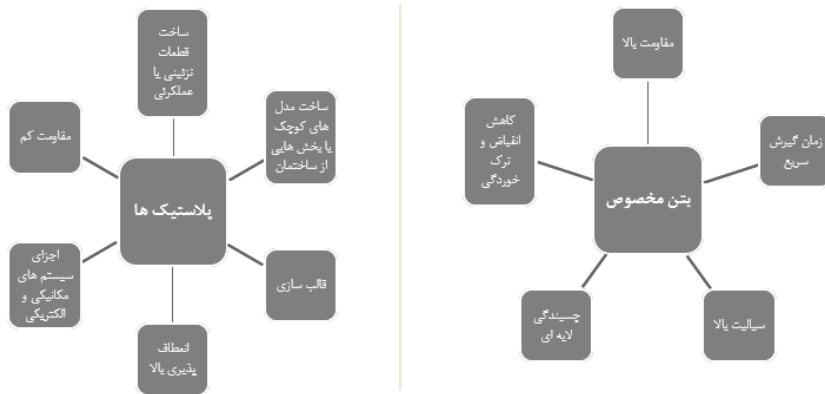


شکل ۲- دسته بندی های روش ساخت افزایشی با مواد مورد استفاده (مأخذ: نگارنده)

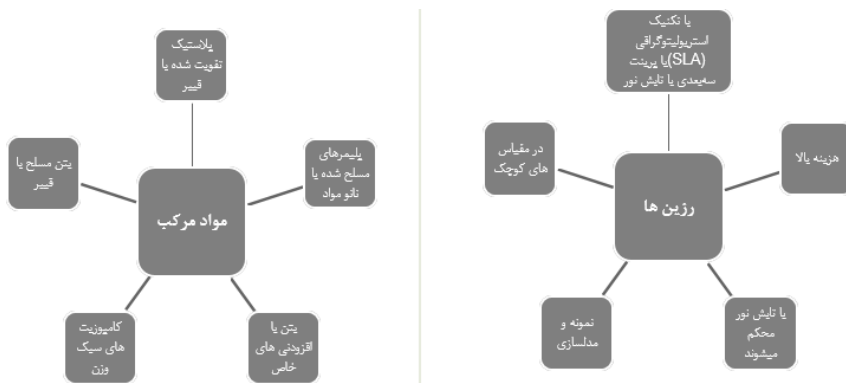
با توجه به این دسته‌بندی‌ها و کاربردهای متنوع، چاپ سه بعدی اکنون نقش مهمی در انقلاب صنعتی جدید ایفا می‌کند و به عنوان یک رکن اساسی در آینده تولید و طراحی محصولات مطرح است. هفت خانواده فرآیند ساخت افزودنی (AM)، که شامل بایندر جتینگ، دپوزیشن انرژی متمرکز، اکستروژن مواد، جتینگ مواد، ذوب پودر، چسبندگی تخته و فتوپلیمریزاسیون حوضچه می‌شوند، هر کدام دارای سطوح مختلف پیچیدگی بر اساس اصول عملکردی خود هستند. این پیچیدگی‌ها تأثیر مستقیمی بر کیفیت تکمیل سطحی، ویژگی‌های ساختاری، بهره‌وری و هزینه اشیاء تولیدی دارند. به این ترتیب، انتخاب فرآیند ساخت افزودنی مناسب بر اساس نوع موادی که مورد استفاده قرار می‌گیرد و برنامه‌های کاربردی مد نظر که نیازمند مجموعه‌ای خاص از الزامات هستند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در زمینه صنعت ساخت و ساز، تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده از فناوری چاپ سه بعدی (3DP) انجام شده است. پروژه‌های تحقیقاتی متعددی به بررسی راه‌های مختلف پیاده‌سازی این فناوری در این صنعت پرداخته‌اند، که نتیجه آن توسعه چاپگرهای سه بعدی قابل بررسی و مشاهده است.

بزرگ و متنوعی بوده است. این فناوری‌های توسعه یافته در زمینه روش‌های چاپ و مواد مورد استفاده متفاوت بوده‌اند، که نشان‌دهنده تنوع و پتانسیل بالای چاپ سه بعدی در بهبود فرآیندهای ساخت و ساز است. یکی از فرآیندهای برجسته که در حوزه کاربرد DP³ در صنعت ساخت و ساز مورد مطالعه قرار گرفته است، فرآیند اکستروژن مواد است. این فرآیند به دلیل داشتن ویژگی‌های رئولوژیکی مناسب برای مواد سیمانی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اکستروژن مواد می‌تواند به تولید سازه‌های با دقت بالا و کیفیت سطحی مطلوب بپردازد، که این امر برای پروژه‌های ساختمانی که نیازمند دقت و استحکام بالایی هستند، حیاتی است (Richardson, 2017). یکی دیگر از روش‌های دسته بندی پرینت های سه بعدی از طریق متریکال های مورد استفاده آنها هستند. این نوع دسته بندی عموماً شامل ۵ بخش می‌شود:

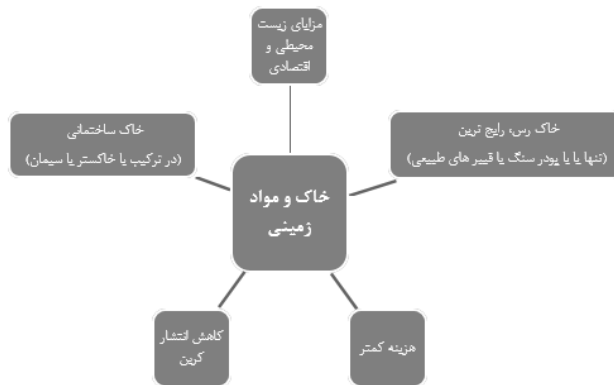
- بتن مخصوص، -پلاستیک ها، -رزین ها، -مواد مرکب، -خاک و مواد زمینیه (Kashani, 2018). در تصویر ۳ تا ۷ ویژگی های هر کدام از این دسته ها قابل مشاهده است.



شکل ۴، ۳- ویژگی های پرینت سه بعدی با استفاده از بتن مخصوص و پلاستیک ها (مأخذ: نگارنده)



شکل ۶، ۵- ویژگی های پرینت سه بعدی با استفاده از رزین ها و مواد مرکب (مأخذ: نگارنده)



شکل ۷- ویژگی های پرینت سه بعدی با استفاده از خاک و مواد زمینی (مأخذ: نگارنده)

۵- عایق حرارتی

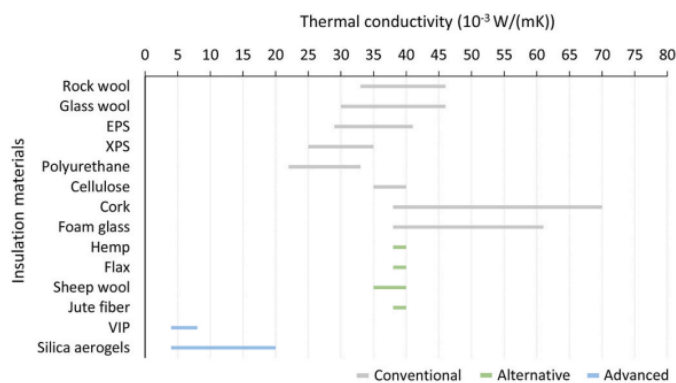
عملکرد حرارتی دیوارهای خارجی ساختمان‌ها یکی از عوامل کلیدی در تعیین میزان مصرف انرژی و کارایی ساختمان‌ها است. بهبود عایق‌بندی حرارتی دیوارها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش نیازهای انرژی برای گرمایش و سرمایش داشته باشد، و در نتیجه، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. این امر، پایداری ساختمان‌ها را افزایش داده و نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن ایفا می‌کند (Gardiner, 2016).

انتخاب مواد عایق حرارتی مناسب، به‌ویژه در مناطق با آب و هوای سرد، از اهمیت بالایی برخوردار است. Verbeke و همکاران (Verbeke et al, 2018) بر اهمیت کاربرد مواد عایق حرارتی به عنوان یک رویکرد اصلی برای کاهش تقاضای انرژی ساختمان تأکید کرده‌اند. آیین‌نامه‌های عملکرد انرژی معیارهای مشخصی را برای عایق‌بندی حرارتی تعیین می‌کنند، از جمله ضریب انتقال حرارت U و مقاومت حرارتی R ، که به ترتیب با واحدهای وات بر متر مربع بر کلونین ($W/(m^2 \cdot K)$) و متر مربع کلونین بر وات ($(m^2 \cdot K)/W$) بیان می‌شوند. این پارامترها میزان جریان حرارتی از طریق یک مولفه ساختمانی، مانند دیوار، سقف

یا کف، را در شرایط یک گرادیان دمایی مشخص می‌کنند (Lee D, 2017). بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها از طریق انتخاب مواد عایق حرارتی مناسب و طراحی دقیق، نه تنها به کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند بلکه به بهبود راحتی حرارتی در فضاهای داخلی نیز منجر می‌شود. این موضوع اهمیت انتخاب دقیق مواد عایق و رویکردهای ساختمانی را در فرآیند طراحی و اجرای پروژه‌های ساختمانی مورد تأکید قرار می‌دهد.

عایق‌بندی حرارتی به‌طور کارآمد می‌تواند از طریق پارامتر هدایت حرارتی λ ، بیان شده به واحد وات بر متر بر کلونین ($W/(m \cdot K)$)، در حالت ثابت ارزیابی شود. هدایت حرارتی، توانایی درونی یک ماده برای انتقال حرارت در حضور یک گرادیان دما را مشخص می‌کند. در شرایط پویا، پخش حرارتی D ، که به واحد متر مربع بر ثانیه (m^2/s) بیان می‌شود، مهم است و نشان‌دهنده توانایی یک ماده برای مدیریت نوسانات جریان حرارت از طریق جذب و ذخیره‌سازی حرارت در مولفه‌های سازنده و تدریجاً آزاد کردن آن است، که این امر می‌تواند به کاهش انتقال حرارت کمک کند. چگالی ماده ρ ، بیان شده به واحد کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) و ظرفیت حرارتی خاص آن c ، بیان شده به واحد جول بر کیلوگرم کلونین ($J/(kg \cdot K)$)، عوامل تعیین‌کننده مقدار حرارت متراکم در ماده هستند (Verbeke et al, 2018). مقاومت حرارتی یک عنصر ساختمانی، به‌طور مستقیم بر عملکرد رفتاری آن در طول زمستان برای استفاده از دماهای خورشیدی و همچنین در تابستان برای مدیریت اوج دمایی تأثیر می‌گذارد. در فصل تابستان، انتظار می‌رود که دستاوردهای حرارتی کمتر از افت حرارتی باشد، زیرا باید دمای داخلی را در یک حد مشخص حفظ کرد و از افزایش آن جلوگیری نمود. در فصل زمستان، این فرآیند معکوس می‌شود و هدف این است که دستاوردهای حرارتی بیشتری به دست آورد تا دمای داخلی حول یک دمای مطلوب و کمتر نگه داشته شود (Roussel, 2018).

به‌طور کلی، داشتن جرم حرارتی بیشتر در داخلی‌ترین لایه‌های عایق حرارتی می‌تواند به بهبود راحتی حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها کمک کند. با این حال، این جرم حرارتی باید به‌درستی مدیریت شود، به‌ویژه در ساختمان‌هایی که به صورت گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا ممکن است زمان بر باشد.



شکل ۲- مقایسه محدوده هدایت حرارتی مواد عایق حرارتی مختلف (مأخذ: Pessoa et al, 2021)

عایق‌های حرارتی در فرآیندهای چاپ سه‌بعدی کاربردهای قابل توجهی یافته‌اند، به‌خصوص در تولید اجسام با هندسه‌های پیچیده که یکی از مزایای برجسته این فناوری به‌شمار می‌رود. پژوهشگران بهره‌گیری از این فرصت را برای کاوش در الگوهای بیومیمتیک، که از طبیعت و موجودات زنده الهام گرفته شده‌اند، در دستور کار قرار داده‌اند (Lafhaj, 2019). استفاده از طرح‌های بیومیمتیک می‌تواند به بهبود عملکرد انرژی کمک کند و تأثیرات زیست محیطی منفی را به حداقل برساند. به عنوان مثال، استفاده از ساختارهای سلولی یا شبکه‌ای در چاپ سه‌بعدی، که خواص ساختاری بهینه‌ای مانند سختی و سبکی را ارائه می‌دهند، همچنین می‌توانند خواص حرارتی و صوتی مطلوبی داشته باشند. تحقیقاتی مانند کار Panda و همکاران (Panda et al, 2018)، خواص مکانیکی ساختارهای سلولی عسلی شکل تولید شده توسط فرآیند FDM را مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقات دیگری نظیر کار Kam و همکاران (Kam et al, 2019)، اجزاء با خواص مشابه چوب طبیعی با استفاده از فرآیندهای چاپ افزودنی تولید شده‌اند که مقادیر هدایت حرارتی بین ۰.۰۵ تا ۰.۰۸۵ $W/(mK)$ را نشان می‌دهند. همچنین، لایه‌های عایق حرارتی می‌توانند به ترکیبات سیمانی اضافه شوند تا هدایت حرارتی کاهش یابد. به عنوان مثال، تحقیقاتی مانند کار Baghban نشان داده‌اند که می‌توان با اضافه کردن ذرات آروژل به سیمان مبتنی بر فسفات و خاکستر پروازی، یک عایق با هدایت حرارتی ۰.۰۴ $W/(mK)$ توسعه داد (Baghban, 2019).

به‌طور خلاصه عوامل تأثیر گذار در انتقال حرارت در ساختمان‌های پرینت سه‌بعدی موارد زیر هستند:

خواص حرارتی مواد: هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی، و دانسیته مواد مورد استفاده در پرینت سه‌بعدی مستقیماً بر میزان انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند.

طراحی ساختمان: شکل و چیدمان کلی ساختمان، از جمله جهت‌گیری نسبت به خورشید، تأثیر زیادی بر روی انتقال حرارت دارد.

عایق‌بندی: استفاده از عایق‌های حرارتی مناسب، از جمله در دیوارها، سقف، و کف، می‌تواند به کاهش انتقال حرارت کمک کند.

پنجره‌ها و درب‌ها: کیفیت و نوع پنجره‌ها و درب‌ها، از جمله استفاده از شیشه‌های دوجداره یا عایق‌بندی مناسب، در کنترل انتقال حرارت حائز اهمیت است.

تهویه مطبوع و سیستم‌های HVAC: طراحی مناسب سیستم‌های گرمایش، تهویه و تبرید می‌تواند به تعادل دمای داخلی کمک کند.

جهت‌گیری و نورپردازی طبیعی: استفاده بهینه از نور خورشید برای گرمایش طبیعی در زمستان و سایه‌بان‌ها یا سایر عناصر معماری برای خنک‌سازی در تابستان.

تکنیک‌های ساخت: روش‌های پرینت و چیدمان لایه‌ها می‌توانند بر خواص حرارتی سازه تأثیر بگذارند.

استفاده از فناوری‌های سبز: مانند پانل‌های خورشیدی، سیستم‌های بازیافت حرارتی، و سایر تکنولوژی‌های کاهنده مصرف انرژی (Kontovourkis, 2020).

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله یک بررسی سیستماتیک از ادبیات مربوط به کاربرد چاپ سه‌بعدی در صنعت ساختمان ارائه کرده است. با توجه به مشکلات عملکردی چند دهه‌ای در این صنعت، نقش مرکزی آن در اقتصاد جهانی به همراه گذار جهانی فوری به سوی آینده‌ای کم‌کربن - که برای مهار مسائل اقلیمی ضروری است - رویکردهای هوشمند مانند چاپ سه‌بعدی ابزار کلیدی برای تغییرات لازم خواهد بود.

این بررسی نمونه‌های متعددی از همکاری نزدیک بین بخش خصوصی و گروه‌های تحقیقاتی در سراسر جهان را نشان داد، یک گام ضروری به سوی توسعه راهکارهای کامل مقیاس بزرگ برای چاپ سه‌بعدی.

در طول مقاله، فرآیندهای تولید ماده و توسعه مواد افزودنی مورد بررسی قرار گرفتند و چندین برنامه کاربردی آزمایشی اثبات مفهوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند، که روشن می‌شود تا کنون تمرکز تحقیقات تولید افزودنی بر تضمین ساختار صحیح و مقاومت دارد. عملکرد حرارتی ساختارهای چاپ شده سه‌بعدی، که اغلب نادیده گرفته شده است، نیاز به مطالعه و بهبود بیشتر دارد.

در ساختمان‌سازی سنتی، سطح نیازهای عملکرد حرارتی با نیازهای ساختاری قابل مقایسه است، بنابراین اهمیت آنها در چاپ سه‌بعدی نباید کم‌تر باشد. با در نظر گرفتن راحتی ساکنان به عنوان هدف، این مقاله اهمیت انجام مطالعات بیشتر در خصوص پاسخ به نیازهای حرارتی ساختارهای ساخته شده با استفاده از چاپ سه‌بعدی را برجسته می‌کند.

در کل، این تحقیق سه مسیر احتمالی برای بهبود عملکرد حرارتی دیوارهای ساختمان را شناسایی می‌کند: (۱) استفاده از مواد عایق حرارتی در جواهرات داخلی لایه‌های ساختاری دیوار سه‌بعدی چاپ شده، (۲) چاپ لایه‌های مختلف به صورت همزمان از نازل‌های اکستروژن متفاوت، یا (۳) تغییر ترکیب ملات. علاوه بر این، ضایعات ساختمانی می‌تواند به صورت بازیافتی به چرخه تولید بازگردد و به عنوان بخشی از مخلوط مورد استفاده قرار گیرد، عایق‌های زیستی و عایق‌های پیشرفته می‌توانند مورد استفاده قرار. اما تاکنون استانداردهای مشخصی برای طبقه‌بندی مواد در زمان استفاده از چاپ سه‌بعدی وجود ندارد، و تاکنون هر مطالعه با مواد و چاپگرهای خاصی کار کرده است تا هدف خود را برآورده کند. بنابراین، برای پذیرش این فناوری توسط صنعت ساختمان، هنوز مشکلات عمده‌ای وجود دارد. شروع با عدم وجود مقررات مشخص، اطلاعات مربوط به رفتاری کد می‌تواند مانعی برای کاربرد کامل این فناوری باشد. مسیر چاپ بستگی به ویژگی‌های مواد (مانند قابلیت جریان، قابلیت خروج و ساختارپذیری) دارد که به دلیل داشتن چندین متغیر، بهینه‌سازی عملکرد شکل هنوز یک چالش است. پایداری شکل چاپی، اتصال و تعامل لایه‌ها، چگونگی اعمال تقویت به طریق کارآمد، و بهینه‌سازی طراحی الگوی داخلی، برخی از سوالات بسیاری هستند که باید پاسخ داد تا موفق به بزرگ‌نمایی موفق فناوری شویم.

علاوه بر این مسائل، صنعت ساختمان تحمل راه‌حلی را نخواهد کرد که شکوهیت درمورد هواگرما، کنترل رطوبت، نفوذپذیری، عایق صوتی یا بهره‌وری انرژی ساختمان به دلیل رابطه‌های ضعیف ایجاد کند. به عنوان مثال، از آنجایی که بسیاری از مطالعات فرض می‌کنند که المان‌های ماژولار را که سپس در محل ترکیب می‌شوند چاپ می‌کنند، ضروری است که بررسی شود که چگونه این اتصالات بسته شوند که از نظر حرارتی مکان‌هایی از افت حرارت بزرگی خواهند بود. نویسندگان اعتقاد دارند که جایجایی آینده از رویکرد کلاسیک به یک رویکرد خودکار بر اساس یک راه‌حل عایق‌گذاری یکپارچه خواهد بود که به صورت مداوم و همزمان با لایه مرمتی سیمانی چاپ می‌شود.

1. S. Pessoa , A.S. Guimaraes, S.S. Lucas , N. Simoes , 3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021,
2. European Commission. Clean energy for all Europeans package. 2019.
3. Department of Economic and Social Affairs United Nations. World population prospects. 2019. 2019.
4. Salet TAM, Wolfs RJM. Potentials and challenges in 3D concrete printing. In: *International conference on progress in additive manufacturing*; 2016. p. 8–13.
5. Tan K. The framework of combining artificial intelligence and construction 3D printing in civil engineering. *Cedex A: E D P Sciences*; 2018.
6. Pessoa S, Guimar~aes AS. The 3D printing challenge in buildings. In: *E3S Web of conferences*; 2020. p. 172.
7. European Commission. The European construction sector: a global partner. 2016.
8. European Commission. Waste. 2019. https://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm. [Accessed 26 August 2019].
9. McKinsey Global Institute. Reinventing construction: a route to higher productivity. 2017.
10. Wolfs RJM, Bos FP, Salet TAM. Hardened properties of 3D printed concrete: the influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement Concr Res* 2019; 119:132–40.
11. ISO/ASTM 52900-15. Standard Terminology for additive manufacturing – general principles - Terminology. 2015.
12. Kreiger EL, Kreiger MA, Case MP. Development of the construction processes for reinforced additively constructed concrete. *Addit Manuf* 2019;28:39–49.
13. Hager I, Golonka A, Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? Amsterdam: Elsevier Science Bv; 2016.
14. Nadal A, Pavon J, Liebana O. 3D printing for construction: a procedural and material-based approach. *Inf Constr* 2017;69:10.
15. Abdulhameed O, Al-Ahmari A, Ameen W, Mian SH. Additive manufacturing: challenges, trends, and applications. *Adv Mech Eng* 2019;11:27.
16. Kim H, Lin Y, Tseng TLB. A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyp J* 2018;24:645–69.
17. Gardiner JB, Janssen S, Kirchner N. A realisation of a construction scale robotic system for 3D printing of complex formwork. 33rd international symposium on automation and robotics in construction (ISARC 2016). 2016.
18. Wolfs RJM, Bos FP, Salet TAM. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. *Cement Concr Compos* 2019;104.
19. Valente M, Sibai A, Sambucci M. Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry. *Journal of Composites Science* 2019;3.
20. Kashani A, Ngo TD. Optimisation of mixture properties for 3D printing of geopolymer concrete. In: *ISARC 2018 - 35th international symposium on automation and robotics in construction and international AEC/FM hackathon: the future of building things*; 2018.
21. Verbeke S, Audenaert A. Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate and building use. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:2300–18.
22. Panda B, Leite M, Biswal BB, Niu X, Garg A. Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures. *Measurement* 2018;116:495–506.
23. Baghban MH. Thermal insulating cementitious composite containing aerogel and phosphate-based binder. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2019:609.
24. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement Concr Res* 2018;112:76–85.
25. Hambach M, Volkmer D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement Concr Compos* 2017;79:62–70.
26. Mechtcherine V, Grafe J, Nerella VN, Spaniol E, Hertel M, Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – manufacture, mechanical properties and bond behaviour. *Construct Build Mater* 2018;179:125–37.
27. Lee D, Kim H, Sim J, Lee D, Cho H, Hong D. Trends in 3D printing technology for construction automation using text mining. *Int J Precis Eng Manuf* 2019;20: 871–82.
28. Richardson V. 3D printing becomes concrete: exploring the structural potential of concrete 3D printing. *Struct Eng* 2017;95:10–7.
29. S. Pessoa et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141 (2021) 11079413
30. Panda B, Paul SC, Mohamed NAN, Tay YWD, Tan MJ. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. *Measurement* 2018;113:108–16.
31. Lafhaj Z, Dakhli Z. Performance indicators of printed construction materials: a durability-based approach. *Buildings* 2019;9:17.
32. Kontourakis O, Tryfonos G. Robotic 3D clay printing of prefabricated nonconventional wall components based on a parametric-integrated design. *Autom ConStruct* 2020:110.