

ترجمه انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Complex Geometry Forms and Curved Surfaces in 3D Concrete Printing
در همین شماره مجله به چاپ رسیده است.

مقاله پژوهشی

فرم‌هایی با هندسه پیچیده و رویه‌های منحنی در چاپ سه‌بعدی بتن*

خدایار بنداریان^۱، سعید حقیر^{۲*}، کارن ابری‌نیا^۳، محمدرضا متینی^۴

۱. پژوهشگر دکتری فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار دانشکده معماری، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴. دانشیار گروه مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر تهران، تهران، ایران.

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶

چکیده

بیان مسئله: از مهم‌ترین موضوعات در طراحی معماری، فرم است که در طراحی رایانشی، پیچیده‌تر از گذشته شده و برای ساخت، احتیاج به بهره‌گیری از روش‌های ساخت دیجیتال هم‌چون ساخت افزودنی (چاپ سه‌بعدی) است. دیرزمانی است که بتن از اصلی‌ترین مصالح در معماری و مهندسی ساختمان محسوب می‌شود. در دو دهه اخیر، چاپ سه‌بعدی بتن پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای داشته و نمونه‌های کاربردی مانند پل غابریاده، واحد مسکونی و میلمان شهری با این فناوری ساخته شده است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های چاپ سه‌بعدی، ساخت هندسه‌های پیچیده و دربردارنده سطوح منحنی است. در چاپ سه‌بعدی با مواد بتنی، به علت مقیاس بزرگ، برخی از نقایص سطح چاپ‌شده هم‌چون اثر پلکانی آن بیش‌تر نمایان می‌شود. یکی از روش‌هایی که می‌توان به کار برد تا پرداخت نهایی سطح چاپ‌شده، صاف‌تر و به طرح دیجیتال اصلی نزدیک‌تر باشد، کاربرد لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) در تولید اطلاعات ساخت مورد نیاز چاپگر است. این روش اصلاحی می‌تواند تنها با مداخله در سطح نرم‌افزاری و با بهره‌گیری از سخت‌افزار موجود، سطوحی با پرداخت نهایی بهتر تولید کند.

هدف پژوهش: بررسی روش‌های ارائه‌شده در ساخت افزودنی با مواد بتنی و یافتن مزیت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها در مقالات منتشر شده است.

روش پژوهش: در این پژوهش مروری، به روش توصیفی-تحلیلی، داده‌های اسنادی گردآوری شده از اسناد علمی منتشرشده مانند مقالات، کتاب‌ها و پایان‌نامه‌ها مورد واکاوی قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری: سه روش اصلی در ساخت افزودنی با مواد بتنی مورد بررسی قرار گرفته و مزیت‌ها و محدودیت‌های هر کدام برشمرده شده است. چالش‌های عمده ساخت افزودنی با بتن در سه دسته خصوصیات بتن قابل چاپ و مواد تشکیل‌دهنده آن، چاپ قطعات طره‌دار و سازه پشتیبان برای چاپ بتن و وجود درزهای سرد بررسی شده و در نهایت روش‌های ارائه‌شده برای ساخت رویه‌های (سطوح) منحنی با فناوری چاپ سه‌بعدی بتن ذکر شده است.

واژگان کلیدی: چاپ سه‌بعدی بتن، ساخت افزودنی، رویه‌های منحنی، فرم با هندسه پیچیده، لایه‌زنی منحنی (غیرتخت).

مقدمه

به آن چاپ سه‌بعدی^۲ (3DP) اطلاق می‌شود در دو دهه اخیر مقبولیت فراوان یافته است و در طیف وسیعی از

ساخت افزودنی^۱ (AM) یا ساخت برهم‌افزا که هم‌چنین

دکتر «محمدرضا متینی» در دانشکده معماری دانشگاه تهران در حال انجام است.
** نویسنده مسئول: saeed.haghir@ut.ac.ir, ۹۸+ ۹۱۲ ۴۴۳ ۴۹۲۷

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری «خدایار بنداریان» تحت عنوان «توسعه ابزارهای رایانشی طراحی هندسی در ساخت افزودنی دیجیتال» است که به راهنمایی دکتر «سعید حقیر» و دکتر «کارن ابری‌نیا» و مشاوره

نقطه‌ضعف بزرگ استفاده از بتن در تولید این قبیل فرم‌ها، پیچیدگی طراحی قالب، قالب‌بندی و البته هزینه بالای این کار است. به‌اضافه مدت زمان زیادی که برای قالب‌بندی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن لازم است. در برخی موارد نیز طرح ارائه‌شده قابلیت ساخت با روش‌های متداول سنتی را ندارد. در دهه گذشته، اقبال فراوانی برای استفاده از بتن به‌عنوان ماده در چاپگرهای سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس صورت گرفته است. اهداف متفاوتی برای این فناوری برشمرده شده است؛ ساخت سرپناه بر روی ماه، ساخت پناهگاه موقت در شرایط اضطراری، پایین‌آوردن قیمت تمام‌شده و زمان ساخت ساختمان، بهره‌گیری از شخصی‌سازی انبوه در تولید فرم‌های متنوع مانند مبلمان‌های شهری، کنترل کیفیت بالا در ساخت (Buswell, Leal de Silva, Jones & Dirrenberger, 2018).

خودکارسازی در صنعت ساختمان می‌تواند مزایای مضاعفی نیز به همراه داشته باشد. افزایش ایمنی برای کارگران ساختمانی و مواجهه با کمبود نیروی کار ماهر (Bos, Wolfs, Ahmed & Salet, 2016) کاهش زمان ساخت در محل، آزادی بیشتر در طراحی معماری (Lim, et al., 2012)، تولید کم‌تر آلاینده‌های محیط‌زیستی. در این نوشتار، روش‌های مختلف چاپ سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس به همراه مزایا و محدودیت‌ها و کاربردهایی هم‌چون ساخت پل عابر پیاده، واحد مسکونی، تولید مبلمان شهری، سرپناه موقت پس از سانحه (Mathur, 2016, Holt, Edwards, Keyte, Moghaddam & Townsend, 2019) ذکر شده است. در بخش بعدی، به چالش‌های ساخت افزودنی با مواد بتنی در سه زیربخش: «خصوصیات بتن قابل چاپ و مواد تشکیل‌دهنده آن»، «چاپ قطعات طره‌دار و سازه پشتیبان برای چاپ بتن» و «وجود درزهای سرد»^{۱۴} پرداخته شده است.

تکنیک‌های مدرن AM در چهار حوزه پژوهشی مطالعه می‌شوند (Gao, et al., 2015): (۱) طراحی هندسی (۲)



تصویر ۱. خدمات بزرگراهی Deitingen، زولوتورن، سوییس اثر هاینس ایسلر. مأخذ: Kleis, 2009.

کاربردها، از صنایع خودروسازی و هوا-فضا تا داروسازی و سیستم‌های زیستی و صنایع غذایی استفاده می‌شود. ریشه‌های این فناوری را می‌توان در مجسمه‌سازی با نگاره^۳ (در دهه ۱۸۶۰) و ساخت توپوگرافی (در دهه ۱۸۹۰) یافت (Gao, et al., 2015).

از مهم‌ترین مزیت‌هایی که ساخت افزودنی بر روش‌های متداول ساخت هم‌چون ساخت کاستنی^۴ دارد، که دلیل اقبال روزافزون به این حوزه است، می‌توان به این موارد اشاره کرد: انعطاف‌پذیری در طراحی (Karunakaran, Bernard, Suryakumar, Dembinski & Taillandier, 2012) و ساخت هندسه‌های پیچیده با هزینه کم‌تر، دقت ابعادی بالا، عدم نیاز به سرهم‌کردن قطعات (Gao, et al., 2015)، میزان انرژی مصرفی کم‌تر، پایداری بیشتر، سرعت بیشتر در تولید نمونه اولیه به‌خصوص در حجم‌های پایین، هزینه کم‌تر در تیراژ پایین (Hopkinson, Hague, & Dickens, 2006). برای نمونه‌سازی سریع^۵ (RP) یا همان ساخت افزودنی گونه‌های مختلفی از فایل‌های دیجیتال توسط بسته‌های مختلف نرم‌افزاری CAD تولید شده است ولی پراستفاده‌ترین و پذیرفته‌شده‌ترین آن‌ها گونه‌ای است به نام STL^۶ که در اصل یک مدل رویه‌ای مثلث‌بندی‌شده^۷ (برخلاف مدل صلب) است. این فایل توسط نرم‌افزار لایه‌زنی مورد استفاده قرار گرفته و پس از اعمال فرایند لایه‌زنی از آن مسیر ابزار برای چاپگر در قالب دستورات زبان G-code استخراج می‌شود (Brown, De Beer & Conradie, 2014).

مدل CAD ساخته‌شده در نرم‌افزار مدل‌سازی، تبدیل به فایل STL و سپس این فایل تبدیل به زبان قابل فهم برای چاپگر شده و چاپگر براساس تنظیماتی که پیش‌تر در میان‌افزار^۸ خود دارد و هم‌چنین برخی تنظیمات گنجانده‌شده در فایل شروع به ساخت قطعه کرده و پس از اتمام ساخت، قطعه با دقت از چاپگر خارج شده و در صورت نیاز، فرایندهای پس‌پردازش^۹ بر روی آن انجام می‌گیرد و آماده برای استفاده نهایی می‌شود (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010, 4-6). بتن از دیرباز در شاهنشاهی هخامنشی (بخشی، ۱۳۸۲) و امپراتوری روم باستان (Moore, 1995) به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شد. به‌علت ویژگی‌های خاصی هم‌چون شکل‌پذیری و مقاومت بالا در برابر نیروهای فشاری، مقاومت در برابر سایش و خوردگی، قیمت پایین‌تر نسبت به فولاد ساختمانی، همواره بتن مورد علاقه معماران و مهندسان برای ساخت ابنیه بوده است. از بتن در تولید فرم‌های پیچیده هندسی و دارای سطوح منحنی نیز بسیار استفاده شده از قبیل آثار معماری چون، اِرو سارینن^{۱۰}، آنتونیو گائودی^{۱۱}، فلیکس کاندلا^{۱۲}، هاینس ایسلر^{۱۳} (تصویر ۱).

سه‌بعدی برای تولید محصول نهایی در صنعت ساخت‌وساز، نیازمند چاپگرهای بزرگ‌مقیاس است. بیش از سی گروه از پژوهشگران در ده سال گذشته مشغول تحقیق در این حوزه بوده‌اند (Buswell, et al., 2018).

برای اهداف سازهای مختلف دو گروه اصلی از چاپگرهای بزرگ‌مقیاس وجود دارند که همه روش‌های چاپ زیرمجموعه این دو گروه قرار می‌گیرند: (۱) روش «ساخت هم‌تراز»^{۲۱} (۲) روش بستر پودر^{۲۲} (فرزین، مستوفی‌نژاد و قهرمانی، ۱۳۹۸).

بیش از نیمی از فرایندها از روش اکستروژن ماده (همانند ساخت هم‌تراز) استفاده می‌کنند که عموماً یک فیلامنت کوچک (با قطر بین شش تا پنجاه میلی‌متر) به‌طور پیوسته از افشانک^{۲۳} نصب‌شده بر ربات دروازه‌ای یا بازوی رباتیک پمپ می‌شود. معمولاً ماده استفاده‌شده، ملات با درصد بالای سیمان و سنگ‌دانه با ابعاد حداکثر دو تا سه میلی‌متر است. شکل اکستروژن‌شده متغیر است و می‌تواند دایروی، بیضوی یا مستطیلی باشد و سرعت خطی اکستروژن در بازه پنجاه تا پانصد میلی‌متر بر ثانیه است (Buswell, et al., 2018).

• چاپ سه‌بعدی به روش ساخت هم‌تراز

از اولین پیشگامان توسعه فناوری چاپ سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس با استفاده از خمیر سیمانی، دکتر بهرخ خوشنویس، استاد دانشگاه کالیفرنیا جنوبی است. چاپگر سه‌بعدی «ساخت هم‌تراز» یک ربات دروازه‌ای^{۲۴} است که بر روی آن، کنگی‌ای^{۲۵} تعبیه شده که با شلنگ متصل به یک پمپ بتن است و می‌تواند همانند چاپگرهای سه‌بعدی رومیزی، خمیر سیمان را در راستای خطوط هم‌ترازی که مختصات آن به کنترل‌گر ربات داده شده است، انباشته کند و محصول نهایی از روی هم قرارگرفتن این لایه‌ها پدید می‌آید. در ساخت هم‌تراز، چاپگر دو لایه از خمیر سیمان را برای تولید یک قالب اکستروژن می‌کند و رویه قطعه اکستروژن‌شده با ماله‌ای^{۲۶} که بر روی دستگاه تعبیه شده، صاف می‌شود. این فناوری به‌گونه‌ای طراحی شده که در ساخت‌وساز در محل^{۲۷} نیز کاربرد داشته باشد (تصویر ۲) (Khoshnevis, 2004).

این فناوری، چندین محدودیت دارد: (۱) محدود به اکستروژن عمودی و توپولوژی‌های دو و نیم‌بعدی (2.5D) است (۲) قالب اولیه و سامانه ماله می‌تواند پیچیده‌تر از آن باشد که در ساخت هر قطعه‌ای استفاده شود، این امر بسته به اندازه و شکل قطعه دارد (۳) انقطاع پی‌درپی بتن در قالب، بر اثر فشار هیدروستاتیکی و مشخصات مکانیکی ضعیف خمیر سیمان اکستروژن‌شده، سبب پیدایش مناطق ضعیف‌شده بین‌سطحی در بین لایه‌ها می‌شود، چنان‌که به‌صورت تجربی در پژوهش (Le, et al., 2012b) نشان داده شده است.

طراحی ماده (۳) ابزار رایانشی و توسعه رابط‌ها^{۱۵} (۴) ابزارهای تولید و توسعه فرایندها. چاپ سه‌بعدی بتن را نیز می‌توان از این چهار منظر مورد بررسی قرار داد و آخرین یافته‌ها و دستاوردهای آن را برشمرد. ساخت هندسه‌های پیچیده با چاپ سه‌بعدی با مواد بتنی در حوزه طراحی هندسی فناوری‌های AM قرار می‌گیرد که خود به پنج زیردسته تقسیم می‌شود: (۱) بازنمایی چندگانه مدل‌های سه‌بعدی^{۱۶} (۲) پردازش هندسی برای ساخت AM^{۱۷} (۳) صحت‌سنجی، تعمیر و بهبود مدل سه‌بعدی^{۱۸} (۴) رایانش با کارایی بالا برای AM^{۱۹} (۵) بهینه‌سازی برای جلوه‌های ویژه^{۲۰}. حوزه پژوهشی بررسی‌شده در بخش بعدی نوشتار، لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) که در زیردسته پردازش هندسی برای ساخت AM قرار دارد، تشریح شده است. این نوع از لایه‌زنی، گونه جدیدی است که در تولید فرم‌های با هندسه پیچیده و دارای انحنا به‌کار برده می‌شود تا قطعه چاپ‌شده کیفیت مطلوبی داشته باشد.

پرسش‌های پژوهش در روش لایه‌زنی منحنی از این قرار هستند:

آیا لایه‌زنی تخت یک روش بهینه برای چاپ هندسه‌های پیچیده حاوی تقعرهای فرم آزاد با وضوح پایین به‌عنوان مثال با یک فیلامنت بزرگ‌تر در روش FDM است؟

چه گزینه‌هایی برای کمینه‌کردن زبری سطوح منحنی تولیدشده در اثر پلکانی در روش لایه‌زنی تخت وجود دارد؟

چقدر می‌توان زبری سطوح منحنی را در مرحله پیش‌پردازش (مسیر چاپ طراحی‌شده دیجیتال) کمینه کرد نسبت به مرحله پس‌پردازش (پرداخت سطح با سایش یا انودکاری)؟

روش تحقیق

این نوشتار مروری از نوع توصیفی-تحلیلی است بر روش‌های متداول چاپ سه‌بعدی با مواد بتنی و همچنین روش‌های لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) در ساخت افزودنی که داده‌ها از طریق گردآوری اسنادی تهیه شده است. این اسناد شامل مقالات پژوهشی و مروری، مقالات کنفرانسی، پایان‌نامه‌ها و رساله‌های دکتری و کتاب‌ها هستند. کلیدواژگان جستجو شامل: چاپ سه‌بعدی بتن، ساخت افزودنی با مواد بتنی، ساخت افزودنی با خمیر سیمان، لایه‌زنی منحنی، لایه‌زنی غیرتخت هستند که در عنوان و چکیده مقالات جستجو شده‌اند که نتایج از سال ۱۹۹۷ به بعد مورد واکاوی قرار گرفته و براساس تعداد ارجاعات، پرارجاع‌ترین مقالات برای نگارش این نوشتار انتخاب شده‌اند.

• چاپ سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس

چاپ سه‌بعدی را می‌توان به دو گروه کوچک‌مقیاس (رومیزی) و بزرگ‌مقیاس تقسیم کرد. بهره‌گیری از چاپ

مزايای اين روش عبارتند از: (۱) امکان استفاده از مادهٔ دوم (۲) وضوح بالاتر نسبت به ساخت هم‌تراز (ibid.). محدوديت‌های اين روش: (۱) نياز به سازهٔ پشتيبان برای چاپ طره‌ها و فرم‌های آزاد (۲) نياز به پمپ بتن و نگهداری، پاکسازي و کنترل آن (۳) جداکردن سازهٔ پشتيبان و تميزکاري در يك فرايند پس‌پردازش (ibid.).

نمونه‌های ساخته‌شده با ساخت افزودنی بتن

از فناوری چاپ سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس با خمير سيمان، تاکنون چندین نمونه به‌عنوان محصول نهايي در سراسر جهان توليد شده است. دانشگاه فنی آيندهوون در هلند، يکی از پيشگامان استفاده از اين فناوری در ساخت پل عابر پياده و دوچرخه در جهان است (تصوير ۵) (Salet, Ahmed, Bos & Laagland, 2018 Everett, 2021). پروژه‌ای با چند واحد مسکونی هم به دست شرکت هلندی BAM در آيندهوون در حال ساخت است (تصوير ۵) (Boffey, 2021). شرکت Concreative در امارات متحده عربي، اقدام به توليد مبلمان شهری شامل ميز، نيمکت و گلدان کرده است (تصوير ۵) (Concreative, 2018). شرکت آمريكايی ApisCor توانسته در مصدر سیتی در کشور امارات متحده عربي چندین ساختمان را با چاپگر سه‌بعدی توليد کند (تصوير ۵) (Emre, 2022).

چالش‌های ساخت افزودنی با بتن

• خصوصيات بتن قابل چاپ و مواد تشكيل‌دهندهٔ آن

برای چاپ سه‌بعدی، خمير سيمان بايد دارای ویژگی‌های خاصی باشد و اين عمل را نمی‌توان با بتن‌های متداول مورد استفاده انجام داد. طرح اختلاط مورد نظر مانند بتن‌های پاششی بايد هم قابليت پمپ‌شدن داشته باشد و هم قابليت حفظ شکل بدون تغيير شکل يا با کم‌ترين تغيير شکل پس از اکستروژن (Buswell, et al., 2018).

ویژگی‌های کیفی چون «پمپ‌پذیری»^{۳۲}، «قابليت اکستروژن»^{۳۳} و «ساخت‌پذیری»^{۳۴} توسط (Le, et al, 2012a) معرفی شده‌اند. پمپ‌پذیری، سهولت انتقال خمير سيمان از پمپ به افشانک اکستروژن را توصيف می‌کند (ibid.). پمپ‌های جابه‌جایی مثبت^{۳۵} عموماً در فناوری‌های چاپ سه‌بعدی بتن به‌کار می‌روند (Buswell, et al., 2018). در بتن‌ریزی متداول، کارایی بتن به معنای ميزان سهولت در مخلوط‌کردن و انتقال آن تا نقطهٔ مورد نظر است که با مفهوم پمپ‌پذیری در چاپ سه‌بعدی بتن مشابهت دارد و نسبت‌های اختلاط مانند نسبت سيمان به سنگدانه، نسبت آب به سيمان و ميزان افزودنی‌ها بر آن اثرگذار است.

در بتن‌ریزی معمول، عبارت «زمان باز»^{۳۷} با از دست‌دادن

• چاپ سه‌بعدی D-Shape به روش بستر پودر
فناوری D-Shape توسط يك مهندس ایتالیایی به نام انریکو دینی^{۳۸} توسعه یافته است. برخلاف دو روش دیگر که از نوع چاپ سه‌بعدی بر مبنای اکستروژن ماده هستند، اين فناوری از نوع چاپ سه‌بعدی بر بستر پودری است (Cesaretti, Dini, De Kestelier, Colla & Pambaguian, 2014).

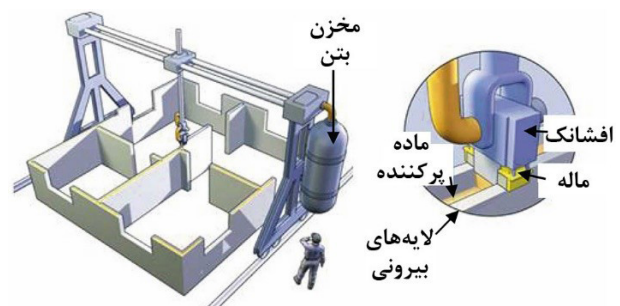
چاپگر D-Shape يك ربات دروازه‌ای است که درون محفظه‌ای قرار دارد و می‌تواند لایه‌به‌لایه مصالح پودری (طيفی از پودر سنگ، ماسه و ذرات سرامیکی) را بر روی سطح پخش کند و سپس با افشاندن چسب مخصوص، ذرات پودر را به هم چسبانده و یکپارچه کند. در انتها لازم است پودرهای اضافی از محفظهٔ چاپگر خارج شوند تا محصول نهايي قابل رؤیت باشد (فرزین و همکاران، ۱۳۹۸).

پودر ماسهٔ اضافی در اين روش می‌تواند در فرايند دوباره مورد استفاده واقع شود. با وجود اين که در ابتدا اين فناوری برای توليد خارج از محل^{۳۹} صفحه‌ها و عناصر سازه‌ای با هندسهٔ پیچیده طراحی شده بود، در حال حاضر سعی دارد تا امکان‌پذیری استفاده از آن را در محل نیز نشان دهد (تصوير ۳) (Gosselin, et al., 2016).

مزيت‌های اين روش عبارتند از (۱) امکان توليد هندسه‌های پیچیده بدون سازهٔ پشتيبان (۲) وضوح بالای قطعهٔ چاپ‌شده (فرزین و همکاران، ۱۳۹۸). محدوديت‌هایی که در اين روش وجود دارد، عبارتند از (۱) سرعت پایین برای توليد انبوه (۲) تفاوت در ميزان نفوذ چسباننده و درجهٔ آب انداختن^{۴۰} آن در نقطهٔ تزریق (Lim, et al., 2012).

• چاپ سه‌بعدی بتن (3DCP)

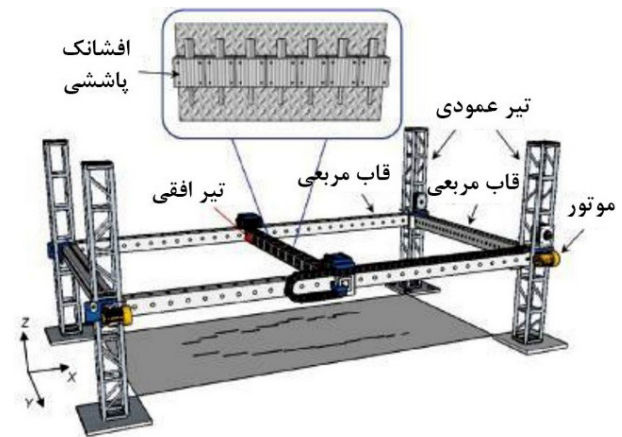
اساس روش چاپ بتن^{۴۱} (CP) بر مبنای روش ساخت هم‌تراز است و از نوع چاپ سه‌بعدی بر مبنای اکستروژن ماده است. تفاوت آن با روش ساخت هم‌تراز، آزادی سه‌بعدی و وضوح بیشتر قطعهٔ چاپ‌شده است که امکان کنترل بهتر هندسهٔ داخلی و خارجی را می‌دهد (تصوير ۴) (ibid.).



تصوير ۲. ساخت هم‌تراز. مأخذ: Allouzi, Al-Azhari & Allouzi, 2020.

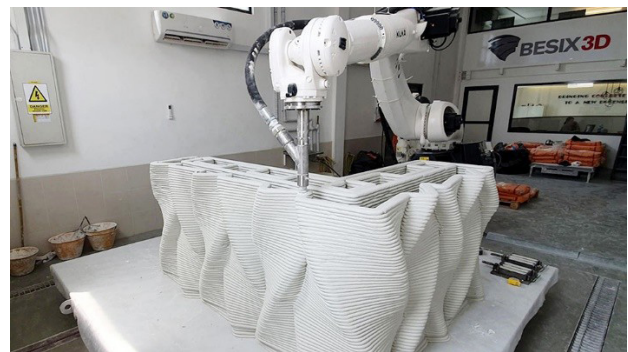
چاپ حیاتی است. این پارامتر با پنجره عملیات که در آن حجم مشخصی از ماده باید اکستروود شود، ارتباط دارد (ibid.). با داشتن سرعت انباشت ماده، پارامتر دیگری به نام «زمان چرخه»^{۳۸} تعریف می‌شود که زمان چاپ هر لایه و انتقال به لایه بعدی است. این پارامتر، تأخیر زمانی بین قرار گرفتن بتن تازه بر روی لایه زیرین را مشخص می‌کند (ibid.).

قابلیت اکستروود شدن به معنای توانایی اکستروود خمیر سیمان از افشانک بدون تغییر شکل قابل توجه در مقطع و حد قابل قبولی از جدایشگی/پارگی فیلامنت است. آزمایش مرجع زسمی برای برآورد قابلیت اکستروود شدن وجود ندارد و این پارامتر اکنون با بررسی چشمی برآورد می‌شود (ibid.).



تصویر ۳. چاپگر D-Shape. مأخذ: Al-Safy, 2019.

ساخت پذیری خمیر سیمان، با در نظر گرفتن قابلیت اکستروود شدن، پمپ پذیری (یا کارایی) و زمان باز مشخص (مثلاً صد دقیقه) برای تعیین میزان فوق‌روان کننده^{۳۹} که بر مقاومت برشی خمیر سیمان اثرگذار است، تعیین می‌شود. در پژوهش (Le, et al., 2012a) برای خمیر سیمان مورد استفاده محدوده ۳/۰ kPa تا ۹/۰ kPa تعیین شده که نه خیلی روان و نه خیلی سفت است.



تصویر ۴. چاپ سه‌بعدی بتن. مأخذ: www.kuka.com.

در خمیر سیمان چاپ سه‌بعدی از سنگ‌دانه‌های ریز معمولاً تا قطر دو تا سه میلی‌متر استفاده می‌شود (Buswell, et al., 2018) و الیاف پلیمری (Panda & Tan, 2018) و همچنین اجزای دیگری مانند فوق‌روان کننده‌ها، کندگیر کننده‌ها^{۴۰} و تندگیر کننده‌ها^{۴۱} نیز به آن افزوده می‌شود (Le, et al., 2012a).

مقاومت بتن چاپ شده به جهت چاپ شدن بستگی دارد (Paul, Tay, Panda & Tan, 2018). به علت مسلح نبودن این بتن، مقاومت کششی آن‌ها تنها با الیاف افزودنی به آن افزایش می‌یابد (Panda, Paul, Mohamed, Tay & Tan, 2018). البته یکی از روندهای پژوهشی در این حوزه، مسلح کردن بتن چاپ شده است. روش‌هایی چون، چاپ بر روی سازه پشتیبان، استفاده از مسلح کننده‌های متداول به شکل پس کشیده بعد از چاپ قطعه، وارد کردن مسلح کننده در حین چاپ بتن به صورت عمود بر لایه یا در امتداد لایه‌ها از جمله این روش‌ها است (Paul, van Zijl & Gibson, 2018). در پژوهش (Asprone, et al., 2018) در مورد مسلح کننده‌ها بررسی جامعی انجام شده است.



• چاپ قطعات طره‌دار و سازه پشتیبان برای چاپ بتن از دیگر چالش‌های پیش‌رو، چاپ قطعات طره‌دار و استفاده از سازه پشتیبان برای چاپ آن‌ها است. از آن‌جا که مقاومت بتن با گذشت زمان افزایش می‌یابد، در چاپ بتن، نیاز به حداقل زمانی است تا لایه زیرین مقاومت کافی برای تحمل لایه بالاتر را داشته باشد. ساخت طره‌ها به دو روش امکان‌پذیر است: (۱) با طره کردن (کُربل)

تصویر ۵. (۱) طولانی‌ترین پل (در سال ۲۰۱۸) چاپ شده با بتن، نیم‌مخ، هلند. مأخذ: www.dprintingindustry.com (۲) واحد مسکونی با بتن چاپ شده، آینده‌وون، هلند. مأخذ: www.guim.co.uk (۳) میلمان شهری شامل میز، نیمکت و گل‌دان توسط شرکت Concreative در امارات متحده عربی. مأخذ: www.concreative.me (۴) چاپ بتن، مصدر سیتی، امارات متحده عربی. مأخذ: www.dezeen.com.

اسلامپ در ارتباط است. در چاپ سه‌بعدی بتن، «زمان باز» با حفظ لزجت و تنش تسلیم بتن مرتبط است که برای فرایند



تصویر ۶. قالب سازگار شونده محصول شرکت Adapa. مأخذ: www.Adapamoulds.

برخلاف لایه‌زنی متداول تخت، مقادیر راستای عمودی (Z) برای هر لایه متغیر هستند (Allen & Trask, 2015). استفاده از این روش لایه‌زنی می‌تواند به بهبود خصوصیات مکانیکی قطعه نیز کمک کند، چون مسیر ابزار منطبق بر سطح رویه است.

لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) محدودیت‌هایی نیز دارد. در اکثر مواقع برای چاپ یک رویه منحنی، نیاز است سازه پشتیبانی برای محصول نهایی ساخته شود، چیزی مشابه یک قالب، تا بتوان بر روی آن چاپ نهایی را انجام داد. میزان شیبی که رویه می‌تواند داشته باشد با متغیرهای زیادی در ارتباط است از جمله: کارایی بتن، سرعت چاپ، ابعاد نازل. یکی از رایج‌ترین مشکلات، برخورد نازل با لایه‌های چاپ‌شده قبلی است (Nisja, Cao & Gao, 2021).

در ساخت‌وساز معمول که متکی بر قالب‌بندی است، هندسه‌ها با محدودیت‌هایی هم‌چون: (۱) زوایای ریخته‌گری^{۵۰} (۲) اشکال غیرتورفته^{۵۱} (۳) پیچیدگی، مواجه هستند (Hague, Campbell & Dickens, 2003).

ضعف‌های آشنای چاپ با روش لایه‌زنی تخت عبارتند از: (۱) تعداد لایه‌های بیش‌تر برای وضوح و دقت بیش‌تر در رویه‌های منحنی که منجر به افزایش زمان چاپ به حد غیر قابل قبول می‌شود (Sabourin, Houser & Bøhn, 1996) (۲) خصوصیات ناهمسانگرد قطعه نهایی مخصوصاً در روش FDM (Lee, Kim, Kim & Ahn, 2007) (۳) اثر پلکانی بر روی سطح (Hong, Lee & Gong, 2005).

علت بروز اثر پلکانی بر روی سطح، تخمین هندسی مقطع منحنی رویه با لایه‌هایی با ضخامت یکسان است. این اثر عمدتاً به ضخامت فیلامنت وابسته است و با مساحت یا ارتفاع دندان^{۵۲} که همان طول ارتفاع مثلث خطاست، اندازه‌گیری می‌شود.

برای حل این مشکل در D-Shape، چاپ به روش بستر پودر، سطح رویه را تا رسیدن به پرداخت دلخواه در یک

(Bos, et al., 2016) (Gosselin, et al., 2016); (۲) با اضافه‌کردن تکیه‌گاه موقت که بر روی آن چاپ انجام گیرد و پس از تکمیل قطعه برداشته شود (Lim, et al., 2016). برای سازه پشتیبان، پژوهشگران زیادی ایده‌هایی را مطرح کرده‌اند مانند، چاپ یک سازه پلیمری با فاصله زمانی نسبت به چاپ بتن، استفاده از مصالح پودری مانند شن و ماسه، چاپ سازه پشتیبان با بتن (ibid.) و یا قالب سازگار شونده مانند نمونه شرکت دانمارکی Adapa (تصویر ۶).

• وجود درزهای سرد (cold joints)

به دلیل فاصله زمانی بین چاپ لایه‌ها، بین هر دو لایه احتمال بروز نوعی درز سرد وجود دارد که خود می‌تواند مقاومت سازه را در محل شکل‌گیری کاهش دهد. اضافه‌کردن تارهای پلیمری (Panda, Chandra Paul & Jen Tan, 2017) و یا قرار دادن مسلح‌کننده بین لایه‌ها و هم‌چنین بهینه‌سازی مسیرهای ابزار چاپگر با توجه به پارامترهای چاپ از راه‌های کاهش و یا جلوگیری از بروز این پدیده است (Buswell, et al., 2018).

ساخت رویه‌های (سطوح) منحنی با فناوری چاپ سه‌بعدی

برای لایه‌زنی، فایل مدل سه‌بعدی که می‌تواند از نوع صلب^{۴۲} یا رویه‌ای^{۴۳} باشد، تبدیل به مدل مثلث‌بندی‌شده^{۴۴} (STL) می‌شود. هر چند لایه‌زنی به‌طور مستقیم بر روی فایل اصلی مدل امکان‌پذیر است، اما فایل‌های STL تبدیل به استاندارد در فناوری‌های AM شده‌اند (Mohan Pandey, Venkata, Reddy & Dhande, 2003).

اصلی‌ترین محدودیت فایل STL، به‌علت تقریب درجه اول از رویه، فقدان اطلاعات دقیق هندسی مدل اصلی است. به بیش‌ترین انحراف بین قطعه‌ای از رویه اصلی و مدل STL، خطای وتری^{۴۵} گفته می‌شود. با وجود این خطا، مدل STL مزایایی از قبیل، سهولت در لایه‌زنی، تغییر جهت‌گیری مدل و اضافه‌کردن سازه‌های پشتیبان را دارد.

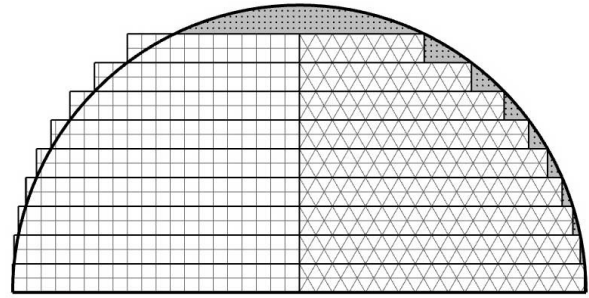
قرارگرفتن لایه‌های موازی بر روی هم منجر به اثر پلکانی همان‌طور که در تصویر ۷ نشان داده شده، می‌شود. با توجه به لبه‌های پله‌ای در قطعه، ممکن است سه حالت اتفاق بیفتد؛ اول، همه لایه‌ها درون حجم مدل اصلی باشند، دوم، همه بیرون از آن و سوم، بخشی درون حجم و بخش دیگر بیرون از آن باشند. به این پدیده «مشکل محصورشدگی»^{۴۶} گفته می‌شود (تصویر ۷).

لایه‌زنی منحنی^{۴۷} (غیرتخت)، روشی پویا برای مسیرهای ابزار در چاپ سه‌بعدی به روش مدل‌سازی رسوب‌شده^{۴۸} (FDM) یا ساخت فیلامنت‌شده^{۴۹} (FFF) است. در این روش،

آفت شده لایه‌های منحنی بودند، را تنظیم می‌کرد. پژوهش (Klosterman, et al., 1999) این ایده را توسعه داد تا به عملکرد بهینه مکانیکی در سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف رسید که با امکان پذیرش پیوستگی الیاف در صفحه منحنی به ویژه در سطح رویه اتفاق می‌افتاد. پژوهشگران بعدها درباره استفاده از روش برهم‌نهی^{۵۶} در مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده لایه منحنی (CLFDM)^{۵۷} و قابلیت تولید مقاومت بیش‌تر نسبت به لایه‌زنی تخت با اعمال طول‌های بلندتری از فیلامنت، سطح تماس بزرگ‌تر در لایه و ناهمسانگردی بین فیلامنت‌ها، مقالاتی را منتشر کردند (Bellini & Güçeri, 2003); (Lee, et al., 2007)

در پژوهش Chakraborty, Aneesh Reddy & Roy 2008 الگوریتمی برای حل مشکل پیوند بین فیلامنت‌ها ارائه شده، این مشکل خصوصاً در چاپ بزرگ‌مقیاس به علت بزرگ‌بودن اندازه فیلامنت برجسته است (Lim, et al., 2016). عمده پژوهش‌های صورت‌گرفته در این حوزه در جدول ۱ خلاصه شده است، این پژوهش‌ها تنها الگوریتم‌ها و یا شبیه‌سازی را مورد مطالعه قرار داده‌اند و کاربردهای کمی با این روش گزارش شده است.

صرف‌نظر از تنوع روش‌های موجود در جدول ۱، ردیف‌های ۱ تا ۶ و ردیف ۹ از روش حل ریاضی بهره برده‌اند. از همین رو، همیشه موارد استثنا وجود دارد که بسته به پیچیدگی هندسی قطعه الگوریتم‌ها نمی‌توانند مسیرهای ابزار مناسب را تضمین کنند. یکی از روش‌های مناسب بهره‌گیری از یک روش حل ضمنی^{۶۰}، استفاده از زبان برنامه‌نویسی (اسکرپت)^{۶۱} در نرم‌افزارهای مدل‌سازی همانند راینو (Robert McNeel & Associates, 2023) و افزونه آن گرس‌هاپر است. به این ترتیب کاربر می‌تواند از قابلیت‌های مدل‌سازی هندسی نرم‌افزار استفاده کرده و با زبان برنامه‌نویسی، الگوریتمی را برای تولید مسیرهای ابزار منطبق بر رویه منحنی تولید کند. پژوهش‌های ذکر شده در ردیف‌های ۸، ۷ و ۱۰ در جدول ۱ از این روش‌های ضمنی بهره برده‌اند. چند نمونه از قطعه‌های چاپ شده با این روش در تصویر ۸ آورده شده است. قطعه (۱) در تصویر ۸، در دانشگاه لافبورو^{۶۲} چاپ شده و مسیرهای ابزار چاپگر در نرم‌افزار راینو و زبان برنامه‌نویسی و ویژوال بیسیک تولید شده است. قطعه (۲) در تصویر ۸، در دانشگاه لافبورو چاپ شده و مسیرهای ابزار چاپگر در نرم‌افزار راینو و افزونه گرس‌هاپر به دست آمده است. تکه پایینی با رنگ روشن، با گچ آندود شده، تکه بالایی با الگوی شعاعی، تکه سمت راست، براساس مسیرهای ابزار لایه‌زنی منحنی چاپ شده و تکه سمت چپ به‌عنوان سازه پشتیبان با لایه‌زنی تخت تولید شده است. قطعه (۳) رویه گنبدی است که به کمک قالب سازگار شونده



تصویر ۷. اثر پلکانی در ساخت افزودنی بر پایه اکستروژن، قسمت‌های با هاشور عمودی (سمت چپ) خارج از مدل سه‌بعدی و قسمت‌های با هاشور مورب (سمت راست) در داخل مدل سه‌بعدی قرار گرفته‌اند. بخش‌های خاکستری اختلاف بین قطعه چاپ شده و مدل سه‌بعدی را نشان می‌دهد. مأخذ: نگارندگان.

عملیات پس‌پردازش می‌سایند. در ساخت هم‌تراز، از یک ماده مخصوص برای صاف کردن سطح در زمان چاپ استفاده می‌شود. در مجموع، ملزومات پرداخت سطح، کار اضافه‌ای طلب می‌کند و تفاوت اصلی در روش به کار رفته «شکل دقیق و سابیدن (سنگ‌زنی)» و یا «چاپ کم‌تر و آندودکاری» است (Lim, et al., 2016).

بهبود مسیرهای ابزار برای چاپگر، یک عملیات پیش‌پردازشی است که زبری سطح را کمینه می‌کند و موجب کاهش کارهای اضافه پس‌پردازش مانند سنگ‌زنی و آندودکاری می‌شود.

لایه‌زنی منحنی به دنبال بهبود خصوصیات زیبایی‌شناسانه و مکانیکی فناوری FDM با توسعه فرایند لایه‌زنی تخت از دو بُعدی به سه بُعدی است تا ماده بر روی یک لایه غیرتخت چاپ شود. این امر بدین معناست که قطع نظر از درجه تقعر، برای انباشت ماده با یک زاویه سازگار مانند نود درجه، افشانک چاپ باید بر سطح رویه عمود باشد. این شرایط باعث کاهش چشم‌گیر اثر پلکانی در قیاس با لایه‌زنی تخت خواهد شد چون ماده بر روی مقطع منحنی رویه انباشته می‌شود و نتیجتاً اثر پلکانی حداقل در یک راستا جلوگیری می‌شود. همچنین احتمال کنده شدن لایه‌ها به حداقل می‌رسد زیرا (۱) سطح رویه با یک لایه، پوشیده شده نسبت به لبه‌های متعدد لایه‌های تخت (۲) تعداد کل لایه‌های مورد نیاز برای چاپ بسیار کم‌تر از حالت لایه‌زنی تخت است.

ایده لایه‌زنی منحنی در دهه ۱۹۹۰، ابتدا برای فناوری «تولید جسم لایه‌ای» (LOM53) پیشنهاد شد. (Kalmanovich, 1996) با ارائه ایده «شبکه ارتفاع»^{۵۴} که صفحات xy را به شبکه با فواصل منظم تقسیم می‌کرد و مقدار ارتفاع (z) به‌عنوان عنصری از این شبکه برای نمایش نیم‌رخ‌های لایه منحنی استفاده می‌شد. همچنین با روش «حلقه باز»^{۵۵} تفاوت تقعر هر لایه که

محل و يا خارج از محل ارائه شده، شامل يك ربات دروازه‌اي و تجهيزات پمپاژ بتن است. در اين روش، به علت پيچيدگي كلگي چاپگر امكان توليد هندسه‌هاي پيچيده را عموماً ندارد. چاپ سه‌بُعدی بتن، معمولاً در خارج از محل استفاده می‌شود. چاپگر می‌تواند يك ربات دروازه‌اي يا يك بازوی رباتيك با شش درجه آزادی باشد كه تجهيزات پمپاژ بتن، خمير سيماني را تا كلگي و افشانك آن پمپ می‌كند. در اين روش امكان كنترل بيش‌تری بر هندسه چاپ شده وجود داشته و قابليت توليد هندسه‌هاي پيچيده با سطوح منحنی فراهم است.

نوع دوم از فناوری‌هاي ساخت افزودنی در مقیاس بزرگ، «ساخت بر بستر پودر» است كه D-Shape نام دارد. چاپگر سه‌بُعدی متشكل از يك ربات دروازه‌اي است كه مصالح پودری را روی سطح پخش کرده و سپس چسباننده از افشانك‌ها در نقاط مورد نظر ريخته می‌شود. مشابهت‌هاي اين دو نوع چاپ سه‌بُعدی بزرگ‌مقیاس و سه روش يادشده در **تصویر ۹** نمایش داده شده است.

خمير سيمان استفاده شده در دو روش ساخت بر مبنای

در دانشگاه آيندهوون^{۶۳} چاپ شده است. در اين قطعه، ابتدا مسيرهاي محيطی هر تکه با چاپگر چاپ شده و سپس فضای ميانی آن‌ها با بتن به صورت دستی پر شده است..

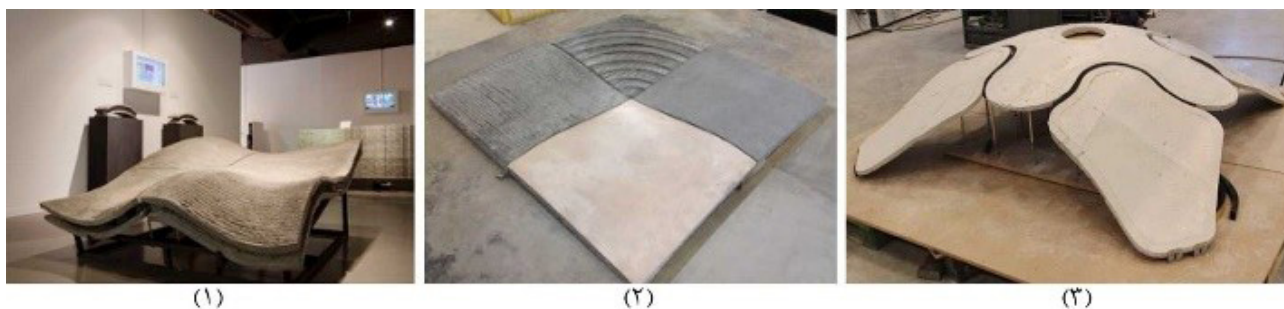
یافته‌ها

در دو دهه اخیر با اوج گرفتن کاربرد فناوری‌هاي ساخت افزودنی (چاپ سه‌بُعدی) در اكثر صنايع، صنعت ساختمان‌سازی نیز استثنا نبوده است. با توسعه دو نوع از فناوری‌هاي ساخت افزودنی، «ساخت بر مبنای اکستروژن» و «ساخت بر بستر پودر» در مقیاس بزرگ، امكان توليد تمام يا بخشی از سازه و اجزای متشكله ساختمان به وجود آمده است. هر دو نوع يادشده، در فرایندی لایه‌اي قطعه مورد نظر را توليد می‌کنند.

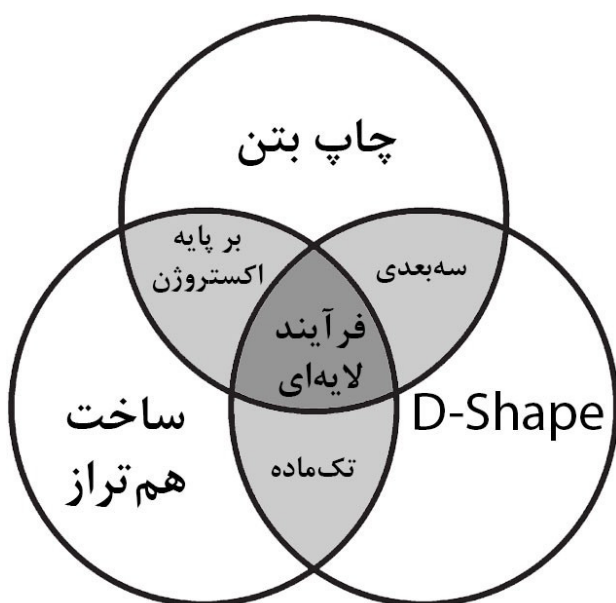
نوع اول، «ساخت بر مبنای اکستروژن» مقبولیت بيش‌تری داشته و بيش‌تر پژوهشگران بر روی اين فناوری متمرکز شده‌اند. «ساخت هم‌تراز» و «چاپ سه‌بُعدی بتن» فناوری‌هايی هستند كه در اين دسته جای دارند. ساخت هم‌تراز در اين حوزه سابقه بيش‌تری دارد و برای استفاده در

جدول ۱. پژوهش‌هاي موجود در حوزه ساخت افزودنی با لایه‌زنی منحنی. مأخذ: نگارندگان.

| ردیف | پژوهش | سال | روش | کاربرد/ماده |
|------|--|------|--|---|
| ۱ | (Kalmanovich, 1996) | ۱۹۹۷ | شبکه ارتفاع + حلقه باز | ساخت دقیق شکل (سرامیک یک‌تکه/کاپوزیت ماتریسی سرامیکی) |
| ۲ | (Klosterman, et al., 1999) | ۱۹۹۹ | توليد جسم لایه‌اي (LOM) | |
| ۳ | (Chakraborty, et al., 2008) | ۲۰۰۸ | مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده لایه منحنی (CLFDM) | مهندسی پزشکی (رزین‌هاي زیست‌سازگار (PMMA) |
| ۴ | (Diegel, Singamneni, Huang & Gibson, 2010) | ۲۰۰۹ | CLFDM با كلگي رسوب سه ماده (CLFDM) | بردهای مدارهای چاپی سه‌بُعدی (ABS/ اپوکسی/ پلیمر رسانا) |
| ۵ | (Huang & Singamneni, 2015) | ۲۰۱۵ | لایه‌زنی سازگار منحنی ^{۵۸} (CLAS) | توليد دقیق شکل با لیزر (مصالح FDM) |
| ۶ | (Allen & Trask, 2015) | ۲۰۱۵ | ساخت فیلامنت ذوب‌شده لایه منحنی ^{۵۹} (CLFFF) | اشیاء سه‌بُعدی (PLA) |
| ۷ | (Lim, et al., 2016) | ۲۰۱۶ | چاپ سه‌بُعدی بتن با لایه‌زنی منحنی (CL3DCP) | رویه‌هاي بتنی با فرم آزاد (بتن) |
| ۸ | (Borg Costanzi, et al., 2018) | ۲۰۱۸ | چاپ سه‌بُعدی بتن با لایه‌زنی منحنی (CL3DCP) بر روی قالب سازگار شونده | رویه‌هاي بتنی گنبدی شکل (بتن) |
| ۹ | (Lim, Weng & Pham, 2020) | ۲۰۲۰ | چاپ سه‌بُعدی بتن با لایه‌زنی منحنی (CL3DCP) بر روی قالب سازگار شونده | رویه‌هاي بتنی گنبدی و زین‌اسبی (بتن) |
| ۱۰ | (Li, Nguyen-Xuan & Tran, 2023) | ۲۰۲۳ | چاپ سه‌بُعدی بتن با لایه‌زنی منحنی (CL3DCP) | استوانه بتنی با لایه‌هاي غیر تخت (بتن) |



تصویر ۸. (۱) ساندویچ پنل چهارتکه چاپ شده با انحنای مضاعف (۱/۵ متر × ۱/۵ متر × ۰/۱ متر). مأخذ: Lim, et al, 2016. رویه بتنی چاپ شده با انحنای مضاعف با چهار سطح پرداخت شده متفاوت (۱ متر × ۱ متر × ۰/۰۳ متر). مأخذ: Lim, et al, 2016. رویه گنبدی چاپ شده با بتن (۲,۵ متر × ۲/۵ متر × ۰/۰۳ متر). مأخذ: Borg Costanzi, et al., 2018.



تصویر ۹. مشابهت‌های فناوری‌های ساخت افزودنی بزرگ مقیاس. مأخذ: نگارندگان.

ساخت افزودنی وجود دارد و سرعت بیش‌تر در تولید، احتیاج به نیروی کار انسانی کم‌تر و کنترل کیفیت بهتر، این دسته از فناوری‌ها را برای خودکارسازی در صنعت ساختمان ایده‌آل ساخته است. نمونه‌های واقعی تولیدشده با این فناوری‌ها در جهان، دامنه وسیعی از واحدهای مسکونی، سرپناه موقت پس از سانحه، پل عابر پیاده و مبلمان شهری را شامل می‌شود. برای بالابردن کیفیت پرداخت سطح نهایی تولیدات، دسته‌ای از پژوهشگران به دنبال به کارگیری روش لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) هستند تا با چاپگرهای موجود و تنها با مداخله در قسمت پیش‌پردازش فرایند چاپ سه‌بعدی بتوانند به این مهم دست یابند.

به کارگیری لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) می‌تواند نتایجی هم‌چون: (۱) کیفیت بهتر سطح رویه (۲) زمان کوتاه‌تر چاپ (۳) مقاومت بالاتر رویه را دربرداشته باشد. در روش‌های نوین لایه‌زنی منحنی، بهره‌گیری از زبان‌های

اکستروژن، حاوی درصد بالایی از سیمان بوده و قطر سنگدانه‌ها حداکثر دو تا سه میلی‌متر است. ویژگی‌های کیفی چون «پمپ‌پذیری»، «قابلیت اکستروژن شدن» و «ساخت‌پذیری» که خود تأثیرپذیر از پارامترهایی هم‌چون نسبت‌های اختلاط مانند نسبت سیمان به سنگدانه، نسبت آب به سیمان و میزان افزودنی‌ها است، برای بتن قابل چاپ تعریف می‌شود.

از محدودیت‌های چاپ سه‌بعدی با خمیر سیمان، ساخت طره‌هاست که معمولاً به دو روش «طره‌کردن (کُربل)» و یا استفاده از سازه پشتیبان و «قالب سازگار شونده» انجام می‌شود. نقطه ضعف اساسی در قطعات تولیدشده وجود درزهای سرد در بین لایه‌هاست که ایده‌هایی برای جای‌گذاری مسلح‌کننده‌ها در بین لایه‌ها و یا افزودنی الیاف فلزی و پلیمری به خمیر سیمان مطرح شده که این ضعف را برطرف کنند.

یکی از محدودیت‌های پیش‌رو در چاپ سه‌بعدی بر مبنای اکستروژن، کیفیت نهایی سطح قطعه چاپ‌شده است. در روش معمول که فایل سه‌بعدی توسط نرم‌افزار لایه‌زنی به صورت تخت، لایه‌زنی می‌شود، سطح نهایی قطعه، به‌ویژه در هندسه‌های پیچیده و دارای انحنای، به صورت پلکانی دیده می‌شود. یک روش رایانشی برای اصلاح این نقیصه، بهره‌گیری از لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) است. عمده پژوهشگران این حوزه، به دنبال حل ریاضی صریح برای این مسئله هستند، که در مواردی که هندسه قطعه، پیچیدگی زیادی داشته باشد، چندان کارایی ندارد. برای هندسه‌های پیچیده می‌توان از کدنویسی در نرم‌افزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی برای استخراج مسیرهای ابزار برای چاپگر بهره برد. به این شکل با حل ضمنی این مسئله، لایه‌زنی منحنی (غیرتخت) برای طیف وسیع‌تری از هندسه‌های پیچیده میسر می‌شود.

نتیجه‌گیری

توانایی تولید هندسه‌های پیچیده در فناوری‌های ساخت افزودنی بزرگ‌مقیاس، سبب شده تا طراحان بیش‌تر به این نوع هندسه‌ها روی آورند. از طرفی امکان شخصی‌سازی انبوه در فناوری‌های

Fused Deposition Modeling. ۴۸
 Fused Filament Fabrication. ۴۹
 Casting Angles. ۵۰
 Non-re-entrant Shapes. ۵۱
 Cusp. ۵۲
 Laminated Object Manufacturing. ۵۳
 Height Grid. ۵۴
 Open Loop. ۵۵
 Superposition Method. ۵۶
 Curved-Layered Fused Deposition Modelling. ۵۷
 Curved Layer Adaptive Slicing. ۵۸
 Curved Layer Fused Filament Fabrication. ۵۹
 Implicit. ۶۰
 Script. ۶۱
 Loughborough. ۶۲
 Eindhoven. ۶۳

فهرست منابع

- بخشی، لطفعلی. (۱۳۸۲). یادواره هفتادمین سالگرد صنعت سیمان. تهران: انجمن صنفی کارفرمایان صنعت سیمان.
- فرزین، محمود؛ مستوفی نژاد، داود و قهرمانی، سعید. (۱۳۹۸). ساخت پرینتر سه‌بعدی بتن و بررسی پارامترهای مؤثر پرینت. سومین کنگره توسعه زیرساخت‌های فناوری مهندسی عمران، معماری و شهرسازی ایران با رویکرد صنعت راه و ساختمان.
- Al-Safy, R. A. (2019). Myths and reality of implementing three-dimensional technology in construction. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 23 (5), 71–94.
- Allen, R. J. A. A. & Trask, R. S. (2015). An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot. *Additive Manufacturing*, 8, 78–87.
- Allouzi, R., Al-Azhari, W. & Allouzi, R. (2020). Conventional Construction and 3D Printing: A Comparison Study on Material Cost in Jordan. *Journal of Engineering*, 2020, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/1424682>
- Asprone, D., Menna, C., Bos, F. P., Salet, T. A. M., Mata-Falcón, J. & Kaufmann, W. (2018). Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 112, 111–121.
- Bellini, A. & Güçeri, S. (2003). Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9 (4), 252–264.
- Boffey, D. (2021). *Dutch couple become Europe's first inhabitants of a 3D-printed house*. *Guardian News & Media Limited*. <https://www.theguardian.com/technology/2021/apr/30/dutch-couple-move-into-europe-first-fully-3d-printed-house-eindhoven#:~:text=The new house consists of,fitted%2C and finishing touches applied.>
- Borg Costanzi, C., Ahmed, Z. Y., Schipper, H. R., Bos, F. P., Knaack, U. & Wolfs, R. J. M. (2018). 3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell

برنامه‌نویسی در نرم‌افزارهایی هم‌چون راینو، امکان تولید مسیره‌های ابزار (چاپ) را به‌گونه‌ای فراهم کرده که به‌طور تعاملی با هندسه‌های پیچیده سازگار شوند. در حال حاضر، این روش‌ها به‌طور کامل خودکار نبوده و نیاز است تا با مداخله کاربر، مسیره‌های ابزار مناسب برای چاپگر سه‌بعدی استخراج شود. در پژوهش‌های آتی، می‌توان انتظار داشت این فرایند خودکارسازی تا جایی پیش برود که مداخله کاربران نیاز نباشد.

پی‌نوشت‌ها

- Additive Manufacturing. ۱
- 3D printing. ۲
- Photo Sculpture. ۳
- Subtractive Manufacturing. ۴
- Rapid Prototyping. ۵
- Standard Tessellation Language. ۶
- Tessellated (triangulated) Surface Model. ۷
- Firmware. ۸
- Post-Process. ۹
- Eero Saarinen. ۱۰
- Antoni Gaudí. ۱۱
- Félix Candela. ۱۲
- Heinz Isler. ۱۳
- Cold Joints. ۱۴
- Interfaces. ۱۵
- Multi-Representation of 3D models. ۱۶
- Geometric Processing for AM Fabrication. ۱۷
- Verification, Repair and Enhancement. ۱۸
- High Performance Computation (HPC) for AM. ۱۹
- Optimization for Special Effects. ۲۰
- Contour Crafting. ۲۱
- Particle-bed. ۲۲
- Nozzle. ۲۳
- Gantry. ۲۴
- Head. ۲۵
- Trowel. ۲۶
- on-site. ۲۷
- Enrico Dini. ۲۸
- Off-site. ۲۹
- Bleeding. ۳۰
- Concrete Printing. ۳۱
- Pumpability. ۳۲
- Extrudability. ۳۳
- Buildability. ۳۴
- Positive Displacement Pumps. ۳۵
- Workability. ۳۶
- Open Time. ۳۷
- Cycle Time. ۳۸
- Superplasticizer. ۳۹
- Retarders. ۴۰
- Accelerators. ۴۱
- Solid. ۴۲
- Surface. ۴۳
- Tessellated. ۴۴
- Chordal Error. ۴۵
- Containment Problem. ۴۶
- Curved Layering. ۴۷

performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100, 102–109.

- Hague, R., Campbell, I. & Dickens, P. (2003). Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217 (1), 25–30.
- Holt, C., Edwards, L., Keyte, L., Moghaddam, F. & Townsend, B. (2019). *Construction 3D Printing. 3D Concrete Printing Technology*. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 349–370. <https://>
- Hong, W., Lee, Y. T. & Gong, H. (2005). A study of the staircase effect induced by material shrinkage in rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 11 (2), 82–89.
- Hopkinson, N., Hague, R. J. M. & Dickens, P. M. (2006). *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 1–285.
- Huang, B. & Singamneni, S. B. (2015). Curved layer adaptive slicing (CLAS) for fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal*, 21 (4), 354–367.
- Kalmanovich, G. (1996). Curved-Layer Laminated Object Manufacturing. *Conference proceedings of 1996 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. USA: Austin.
- Karunakaran, K. P., Bernard, A., Suryakumar, S., Dembinski, L. & Taillandier, G. (2012). Rapid manufacturing of metallic objects. *Rapid Prototyping Journal*, 18 (4), 264–280.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13 (1), 5–19.
- Kleis, C. (2009). *Deitingen Sued Raststaette*. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deitingen_Sued_Raststaette_Schalendach_04_09.jpg
- Klosterman, D. A., Chartoff, R. P., Osborne, N. R., Graves, G. A., Lightman, A., Han, G., Bezeredi, A. & Rodrigues, S. (1999). Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites. *Rapid Prototyping Journal*, 5 (2), 61–71.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F. & Thorpe, T. (2012a). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45 (8), 1221–1232.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F. & Thorpe, T. (2012b). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42 (3), 558–566.
- Lee, C. S., Kim, S. G., Kim, H. J. & Ahn, S. H. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 627–630.
- Li, S., Nguyen-Xuan, H. & Tran, P. (2023). Digital design and

structure. *Automation in Construction*, 94, 395–404.

- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z. & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11 (3), 209–225.
- Brown, A. C., De Beer, D. & Conradie, P. (2014). Development of a Stereolithography (STL) input and Computer Numerical Control (CNC) output algorithm for an entry-Level 3-D printer. *South African Journal of Industrial Engineering*, 25 (2), 39–47.
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z. & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. & Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430–450.
- Chakraborty, D., Aneesh Reddy, B. & Roy Choudhury, A. (2008). Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling. *CAD Computer Aided Design*, 40 (2), 235–243.
- Concreative. (2018). *Architectural products*. <https://www.concreative.me/architectural-product>
- Diegel, O., Singamneni, S., Huang, B. & Gibson, I. (2010). The future of electronic products: Conductive 3D printing? *Conference proceedings of 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Physical Prototyping*, VRAP 2009, Leiria, Portugal, 397–403. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-78649836781&partnerID=40&md5=c46c6e3c2b1ac738c35e6f6a99bf2cb4>
- Emre, M. (2022). *Apis Cor Completes The Dubai Municipality, Largest 3D-Printed Construction*. *ParametricArchitecture*. <https://parametric-architecture.com/apis-cor-completes-the-dubai-municipality-largest-3d-printed-construction/>
- Everett, H. (2021). *World'S Longest 3D Printed Concrete Pedestrian Bridge Unveiled In Nijmegen*. 3D Printing Industry. <https://3dprintingindustry.com/news/worlds-longest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-unveiled-in-nijmegen-195951/>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S. & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*, 69, 65–89.
- Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. (2010). *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. In *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J. & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high

parametric study of 3D concrete printing on non-planar surfaces. *Automation in Construction*, 145, 104624.

- Lim, J. H., Weng, Y. & Pham, Q. C. (2020). 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Construction and Building Materials*, 232, 117075.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F. & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21 (1), 262–268.
- Lim, S., Buswell, R. A., Valentine, P. J., Piker, D., Austin, S. A. & De Kestelier, X. (2016). Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. *Additive Manufacturing*, 12, 216–230.
- Mathur, R. (2016). 3D printing in architecture. *International Journal of Innovative Science. Engineering & Technology*, 3 (7), 583-591.
- Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N. & Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: A review. *Rapid Prototyping Journal*, 9 (5), 274–288.
- Moore, D. (1995). *The Riddle of Ancient Roman Concrete*. Romanconcrete.Com. Retrieved from <http://www.romanconcrete.com>.
- Nisja, G. A., Cao, A. & Gao, C. (2021). Short review of nonplanar fused deposition modeling printing. *Material Design and Processing Communications*, 3 (4), 1-11.
- Panda, B., Chandra Paul, S. & Jen Tan, M. (2017). Anisotropic

mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, 209, 146–149.

- Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D. & Tan, M. J. (2018). Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. *Measurement*, 113, 108–116.
- Panda, B. & Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, 44 (9), 10258–10265.
- Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B. & Tan, M. J. (2018). Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (1), 311–319.
- Paul, S. C., Van Zijl, G. P. A. G. & Gibson, I. (2018). A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*, 24 (4), 784–798.
- Robert McNeel & Associates. (2023). Rhino. <https://www.rhino3d.com/>
- Sabourin, E., Houser, S. A. & Bohn, J. H. (1996). Adaptive slicing using stepwise uniform refinement. *Rapid Prototyping Journal*, 2 (4), 20–26.
- Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P. & Laagland, H. L. M. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13 (3), 222–236.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله:
بنداریان، خدایار؛ حقیر، سعید؛ ابری‌نیا، کارن و متینی، محمدرضا. (۱۴۰۲) فرم‌هایی با هندسه پیچیده و روبه‌های منحنی در چاپ سه‌بعدی بتن. *باغ نظر*، ۲۰ (۱۲۷)، ۶۱–۷۲.

DOI:10.22034/BAGH.2023.394730.5371
URL:https://www.bagh-sj.com/article_180308.html

