

3D Concrete Printing: Review of Mix Design, Reinforcement Strategy, Nozzle Geometry

Ramezanali Izadifard^{1*}, Zeinab Gharianpour², Amir Zahraei Salehi³

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Masters of Science, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

The use of 3D printing concrete in construction applications is one of the most innovative and challenging fields, combining traditional construction knowledge with digital technologies. The focus on this area has increased due to removing the molds, reducing the cost, needed human resources, and other important advantages. There are many challenges such as rheological requirements, bonding between layers, materials used, their reinforcement, and anisotropic behaviors in this industry which has a special potential in fast and mass construction, and complex architectures. Throughout history up to current times, the performance of the built structures has always been the result of the interaction between steel and concrete. According to the practical applications of this technology, manufacturing compatible materials, using reinforcing systems such as fibers and steel rebars, and maintaining proper interaction between them, are fascinating subjects that attract the attention of researchers in this field. The examples of the research processes along with their analysis are reviewed in this article. Since this article was written to introduce this technology and its challenges, it provides a source of inspiration, for getting to know the audience as much as possible, with conflict goals of producing suitable concrete to improve the ability of printing and its quality.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 December 2022

Revise Date: 09 April 2023

Accept Date: 17 April 2023

Keywords:

3D Printing
Concrete
Material Properties
Additive Manufacturing
Reinforcement Strategy
Fiber Reinforcement
Printable Concrete
Nozzle Geometry

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.364927.2951>

*Corresponding author: Ramazanali Izadifard
Email address: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

چاپ سه بعدی بتن: مروری بر طرح اختلاط، راهبردهای مسلح سازی و هندسه نازل

رضانعلی ایزدی فرد^{۱*}، زینب قاریان پور^۲، امیر زهرایی صالحی^۳

۱- دانشیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی آب و فاضلاب، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

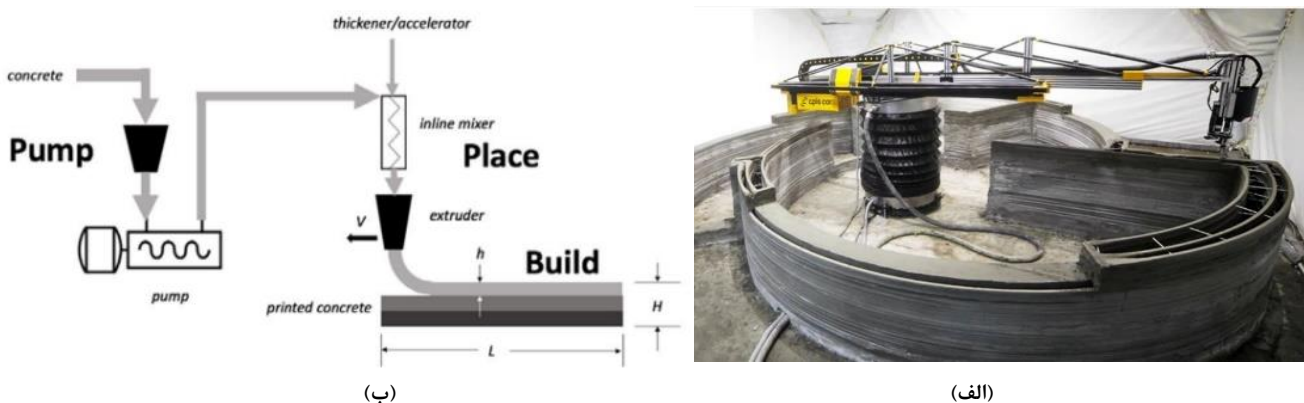
چاپ سه بعدی بتن در کاربردهای ساختمانی یکی از حوزه‌های خلاقانه و چالش برانگیز است که دانش ساخت و ساز سنتی را با فناوری‌های دیجیتال ترکیب می‌کند. حذف قالب، کاهش هزینه و نیروی انسانی مورد نیاز و چندین مزیت عمده‌ی دیگر، تمرکز بر این حوزه را بیشتر نموده است. در این صنعت که دارای پتانسیل ویژه‌ای در ساخت سریع و انبوه، و معماری‌های پیچیده است، چالش‌های بسیاری مانند رعایت الزامات رئولوژیکی، پیوند بین لایه‌ها، مواد مورد استفاده و تقویت آن‌ها و رفتار ناهمسانگرد مواد وجود دارد. از گذشته تا به امروز عملکرد سازه‌های ساخته شده، همواره حاصل تعاملی بین فولاد و بتن بوده است. با توجه به کاربردهای عملی این فناوری، ساخت موادی سازگار و استفاده از سیستم‌های تقویت کننده مانند الیاف و آرماتورها و حفظ تعامل مناسب بین آنها از جمله موضوعات مورد توجه محققین در این حوزه می‌باشند. این مقاله نمونه‌هایی از روند تحقیقاتی در این حوزه را به همراه تجزیه و تحلیل آن‌ها، مرور می‌کند و از آنجا که با هدف معرفی این تکنولوژی و چالش‌های آن به نگارش درآمده است، زمینه‌ای الهام بخش را برای آشنایی هرچه بیشتر مخاطبان با اهداف متضاد در تولید بتن مناسب، برای بهبود قابلیت و کیفیت چاپ فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: پرینت سه بعدی، بتن، خصوصیات مواد، تولید افزایشی، راهبرد مسلح سازی، الیاف تقویتی، بتن قابل چاپ، هندسه نازل.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.364927.2951	۱۴۰۱/۰۹/۲۳	۱۴۰۲/۰۱/۲۰	۱۴۰۲/۰۱/۲۸	۱۴۰۲/۰۱/۲۸	۱۴۰۲/۱۰/۳۰
		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		رضانعلی ایزدی فرد izadifard@eng.ikiu.ac.ir		

۱- مقدمه

به دلیل همه‌گیری پاندمی‌هایی مانند کرونا، کمبود نیروی کار و قطع زنجیره‌ی تأمین، پیمانکاران برای تکمیل پروژه‌ها به چالش کشیده شده‌اند. امروزه بیش از هر زمان دیگری با کاهش شدید موجودی مسکن، صنعت ساخت‌وساز به شدت به نوآوری‌های جدید برای کاهش هزینه‌ها و جبران زمان از دست‌رفته، نیاز دارد. فناوری ساخت سه‌بعدی به صورت لایه‌ای، به یک رویکرد جایگزین و نوآورانه برای ساخت سازه‌ها و طرح‌های پیچیده‌ی معماری تبدیل شده است، که اگر بتواند از چند مانع عبور کند، این پتانسیل را دارد تا این صنعت را به طور قابل‌توجهی دچار تحول کند. این فناوری جهت چاپ بتن، از چاپگرهای سه‌بعدی استفاده می‌کند، که در مقیاس‌های بزرگ دارای چندین متر ارتفاع و طول هستند (شکل ۱-الف). این ماشین‌ها معمولاً به عنوان چرتقیل و یا سیستم بازویی روباتیکی عرضه می‌شوند، که ترکیبی از دستورات G-Code به چاپگر سه‌بعدی امکان درک الگوی نهایی، جهت چاپ را می‌دهد و نهایتاً بتن به صورت یک ماده‌ی خمیری، که از نازل بیرون آمده، به صورت لایه‌ای روی هم قرار می‌گیرند تا عنصر سازه‌ای مورد نظر را بسازند (شکل ۱-ب). در این شکل سرعت حرکت نازل و طول مسیر به ترتیب با v و L نمایش داده شده‌اند. در این تکنولوژی مواد نقش بسیار کلیدی‌ای دارند زیرا باید طراحی را با سازگاری و کارایی ترکیب کنند. یکی از اصلی‌ترین مواد برای کاربردهای سازه‌ای در این فناوری بتن می‌باشد که ترکیبی از سیمان، ماسه و سایر مواد افزودنی است. اما باید توجه نمود که ترکیب این مواد از هدفی به هدف دیگر و از چاپگری به چاپگر دیگر متفاوت است. بتن سنتی برای پرینت سه‌بعدی مناسب نیست، زیرا باعث انسداد نازل چاپگر به دلیل زمان گیرش نامناسب می‌شود و همچنین در صورت استفاده از این بتن، چسبندگی بین لایه‌ها به خوبی ایجاد نخواهد شد، علاوه بر آن به عنوان یکی از نکات مهم می‌توان به اندازه سنگدانه‌های مورد استفاده اشاره نمود که باید به منظور استفاده در این تکنولوژی و به دلیل استفاده از نازل جهت چاپ، نسبت به روش‌های سنتی کوچک‌تر انتخاب شوند. از جمله فواید این فناوری می‌توان به مصرف مواد کمتر، ضایعات کمتر به خصوص در مقیاس‌های بزرگ، کاهش زمان ساخت، عدم نیاز به متراکم کردن بتن و نیاز کمتر به نیروی کار اشاره نمود. با این حال چالش‌های بسیاری وجود دارند که باید قبل از رواج گسترده‌ی این فناوری بر آنها غلبه نمود، مانند هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بالا به جهت تهیه چاپگرها، انتخاب مواد، تخصص بالا جهت راه‌اندازی و نگهداری چاپگرها.



شکل ۱: الف) نمونه‌ی چاپگر سه‌بعدی، ب) روند چاپ بتن

بازار فناوری چاپ سه‌بعدی همچنان در حال توسعه است و پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۳۰ در کشورهایمانند دبی که با کمبود نیروی کار و ساختمان مواجه هستند، یک چهارم خانه‌ها با استفاده از این تکنولوژی ساخته خواهند شد، که باعث کاهش هزینه‌ها و نیروی کار بین ۵۰٪ تا ۷۰٪ و کاهش ضایعات ساختمانی تا ۶۰ درصد می‌شوند. این مقاله که با هدف آشنایی هرچه بیشتر مخاطبان با چالش‌ها و مشکلات و موضوعات تحقیقاتی مطرح و جدید در زمینه فناوری چاپ سه‌بعدی در صنعت ساختمان، به نگارش درآمده است، ابتدا ترکیب-

های بتنی مورد استفاده‌ای که باید معیارهای مورد نیاز این فناوری از جمله، اکستروپذیری^۱، روانی و قابلیت ساخت را برآورده کنند، بررسی کرده و سپس مقاومت فشاری و خمشی و سایر ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در ادامه استراتژی‌های مختلفی برای تقویت بتن چاپی عنوان شده و به بررسی تأثیر پارامترهایی مانند، نازل‌های مورد استفاده در دستگاه چاپ سه‌بعدی بتن، پرداخته می‌شود.

۲- بتن مورد استفاده جهت چاپ سه‌بعدی

بتن معمولاً در قالب ریخته شده و سپس ویبره می‌شود. به منظور حذف پروسه‌ی تراکم از روند ساخت، دو استراتژی به نام‌های بتن خودتراکم و شاتکریت بتن ایجاد شد. فرآیند پرینت سه‌بعدی بتن برای ساخت سازه‌های بتنی، بر خلاف روش‌های مرسوم می‌تواند اجزای معماری و سازه‌ای را بدون استفاده از قالب، با حداقل اتلاف مصالح و مشارکت نیروی انسانی، به صورت دیجیتال بسازد [۱، ۲]. بتن مورد استفاده در این فرآیند باید دارای ویژگی‌های مهمی مانند اکستروپذیری و قابلیت ساخت باشد، که به طور قابل توجهی متأثر از طرح اختلاط بتن هستند. اکستروپذیری می‌تواند به عنوان ظرفیت بتن برای عبور از لوله‌ها و نازل‌های کوچک تعریف شود. در فرآیند پرینت سه‌بعدی، لایه‌های بتن باید تحت اثر وزن لایه‌های بالاتر تغییر شکل ناپذیری داده و بین لایه‌ها چسبندگی قابل قبولی ایجاد شود. لی‌و همکارانش [۳]، به بررسی تجربی ویژگی‌های مخلوط بتنی با عملکرد بالا و تقویت‌شده با الیاف پرداختند، که این ویژگی‌ها تحت تأثیر نسبت‌های مورد استفاده در مخلوط، حضور روان‌کننده، کندگیرکننده و الیاف می‌باشد و در انتها طرح اختلاط بهینه‌ای را جهت دستیابی به ویژگی‌های ذکر شده ارائه نمودند. در این بررسی میزان اکستروپذیری با چاپ رشته‌هایی به عرض ۹ میلی‌متر، در پنج حالت با تعداد یک تا پنج رشته در کنار هم، ارزیابی شد. یکی از ویژگی‌های کلیدی بتن سخت‌شده، مقاومت فشاری و خمشی برای نمونه‌های پرینت‌شده و قالب‌بندی شده است. ابتدا آن‌ها، مقاومت فشاری هدف در ۲۸ روز و مقاومت خمشی را برای نمونه‌های ساخته شده با استفاده از قالب، به ترتیب برابر با ۱۰۰ مگاپاسکال و ۱۲ مگاپاسکال در نظر گرفتند. به دلیل قطر کوچک نازل استفاده شده (۹ میلی‌متر)، به منظور داشتن چاپی با کیفیت بالاتر، اندازه‌ی حداکثر ذرات ماسه برابر با ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و همچنین در ساخت این ترکیب از سیمان تیپ یک (CEM type I 52/5)، خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیس متراکم‌نشده استفاده شده است که ماده‌ی چسبنده‌ی این ترکیب را تشکیل می‌دهند. اجزای خشک به همراه یک فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات به آب اضافه شدند تا نسبت آب به مواد چسبنده و در نتیجه‌ی آن کارایی و استحکام بتن را به ترتیب کاهش و افزایش دهند. همچنین یک کندگیرکننده، تشکیل‌شده از آمینوتریس، اسیدسیتریک و فرمالدئید، به منظور ایجاد جریان ثابت و بدون توقف و یک زودگیرکننده متشکل از سولفوریک، نمک آلومینیوم و دی‌اتانول‌آمین برای تنظیم سرعت گیرش و مقداری الیاف میکروپلی‌پروپیلن با نسبت طول به قطر برابر با ۱۲ به ۰/۱۸، به منظور کاهش جمع‌شدگی و تغییر شکل در حالت پلاستیک، به ترکیب اولیه اضافه شد. در این بررسی، طرح اختلاط بهینه به عنوان ترکیبی که دارای کمترین ماده‌ی چسبنده و مقدار پیشنهاد شده برای الیاف از سوی منبع تامین‌کننده به میزان ۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب باشد، تعریف شده است، که قابل پرینت و ساخت باشد و مقاومت هدف را تأمین کند. ابتدا مخلوط اولیه به منظور یافتن درجه‌بندی بهینه‌ی ذرات، شامل ماسه، سیمان، خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیس مورد آزمایش قرار گرفتند، سپس مخلوط دارای ترکیب ذرات بهینه، به ازای مقادیر مختلفی از الیاف به منظور دستیابی به اکستروپذیری و کارایی بهینه و همچنین قابلیت چاپ و ساخت بی‌وقفه مورد بررسی قرار گرفتند. ۵ ترکیب اولیه با نسبت‌های مختلف ماسه به ماده‌ی چسبنده با استناد به نتایج آنالیز ذرات طراحی شدند. در ترکیب ۱ تا ۵، مقدار ماسه هر بار ۵ درصد کاهش پیدا کرد و از ۷۵٪ به ۵۵٪ وزن مخلوط خشک رسید، در حالی که میزان ماده‌ی چسبنده با روند افزایشی ۵٪، از ۲۵٪ تا ۴۵٪ افزایش یافت. لازم به ذکر است که در تمام ترکیبات، ماده‌ی چسبنده از ۷۰٪ سیمان، ۲۰٪ خاکستر بادی و ۱۰٪ دوده‌ی سیلیس تشکیل شده بود. با توجه به نتایج پژوهش‌های قبلی، نسبت آب به مواد چسبنده برابر با ۰/۲۸ برای دستیابی به بتن با مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در این ترکیبات میزان الیاف، روان‌کننده، کندگیرکننده و زودگیرکننده به منظور یافتن طرح اختلاطی بهینه برای چاپ، تفاوت داشتند. در این مطالعه بهینه‌ترین طرح اختلاط دارای نسبت شن به ماده‌ی چسبنده ۳:۲ بود، که در آن ماده‌ی چسبنده

^۱ Extrudability: توانایی بتن برای خارج شدن از نازل به صورت مداوم

^۲ Le

حای همان درصدهای ذکر شده در قبل برای سیمان، خاکستر بادی و دوده سیلیس به اضافه‌ی ۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف پلی-پروپیلن می‌باشد. نسبت آب به سیمان در این مخلوط ۰/۲۶ و مقادیر فوق روان‌کننده و کندگیرکننده به ترتیب به میزان ۱ و ۰/۵ درصد وزنی ماده‌ی چسبنده بودند. با این طرح اختلاط می‌توان با نازلی به قطر ۹ میلی‌متر، در یک نوبت کاری تا ۶۱ لایه بدون تغییر شکل محسوس لایه‌های زیرین چاپ کرد. زمان چاپ بی‌وقفه در این حالت تا ۱۰۰ دقیقه افزایش پیدا کرد و مقاومت فشاری بتن از حد تعیین-شده فراتر رفته و به ۱۱۰ مگاپاسکال در ۲۸ روز رسید. ملائب^۳ و همکارانش [۴]، به طراحی دستگاه پرینت و مخلوط بتن مناسب و پیدا کردن بهترین مکانیزم چاپ پرداختند و نتایج تجربی خود را در این زمینه ارائه نمودند. از آنجا که ارتباط مکمل بین مواد مورد استفاده و چاپگر امری مهم می‌باشد، مخلوط بتن باید به گونه‌ای طراحی شود که بعضی از معیارهای اساسی‌ای که ارتباط مستقیمی با روش چاپ دارند را برآورده کند. معیارهای هدف برای طرح اختلاط عبارتند از، به حداکثر رساندن مقاومت فشاری، جریان‌پذیری سیستم، سرعت گیرش، کارایی، قابلیت ساخت و حفظ کردن نرخ گیرش مناسب برای اطمینان از اتصال لایه‌ها به یکدیگر. بعضی از اهداف در تضاد با یکدیگر بوده و چالش اصلی حفظ تعادل بین اهداف مختلف می‌باشد [۵]. به عنوان مثال، حداکثر کردن مقاومت فشاری به معنای حداقل کردن نسبت آب به سیمان در مخلوط می‌باشد، با این حال مقدار مشخصی آب برای رسیدن به کارایی مناسب در بتن نیاز است. علاوه بر این بتن به کار گرفته‌شده در این تکنولوژی باید جریان‌پذیری مناسبی داشته باشد و در عین حال باید خود ایستایی مناسبی داشته و وزن لایه‌های بعدی را بدون تغییر شکل تحمل کند. در این بررسی اجزای خشک تشکیل‌دهنده مخلوط عبارت بودند از سیمان تپ ۱ و ماسه و سنگدانه‌های ریز دانه‌بندی‌شده. با توجه به قطر نازل مورد استفاده (۲ سانتی‌متر) از سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر استفاده شد. مقداری فوق-روان‌کننده به منظور افزایش میزان کارایی بتن و کاهش نسبت آب به سیمان به ترکیب اضافه گردید، همچنین مقداری زودگیرکننده و کندگیرکننده به ترتیب با اهداف افزایش سرعت گیرش برای رسیدن هرچه سریع‌تر به مقاومت بیشتر و جلوگیری از ته‌نشین شدن زود هنگام بتن در مخزن، به مخلوط اضافه شدند. آنها به منظور رسیدن به مقادیر دقیق موارد ذکر شده برای ساخت مخلوطی بهینه و اکستروپذیر با کمترین نسبت آب به سیمان، چندین آزمایش انجام دادند، زیرا تعادل مناسب بین تمام اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک مخلوط، منجر به عملکرد مناسب آن می‌شود. به عنوان نمونه افزودن مقادیر فوق روان‌کننده بیش از مقدار بهینه‌ی به دست آمده می‌تواند باعث نتایج ناخواسته‌ای گردد [۶]. در این بررسی، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و نیز اکستروپذیری مخلوط‌های مختلف، به عبارتی فاصله‌ای که بتوان بدون جدایش و ترک خوردگی و مسدود شدن نازل، عملیات چاپ بتن را انجام داد، مورد ارزیابی قرار گرفتند. آنها همچنین قابلیت ساخت مخلوط‌های ارائه‌شده را با استفاده از تعداد لایه‌های قابل چاپ بر روی هم بدون رخ دادن فروپاشی، مورد آزمایش قرار دادند. یافتن رابطه‌ای متعادل بین نرخ اکستروژن مخلوط^۴ و سرعت دستگاه امری ضروری است و معمولاً پس از محاسبه‌ی نرخ بهینه‌ی اکستروژن، سرعت دستگاه با هدف حفظ معیارهای مناسب برای چاپ تنظیم می‌شود. در این بررسی سرعت اکستروژن خمیر بتن از نازل ۰/۰۹ لیتر بر ثانیه و سرعت مناسب دستگاه برای سازگاری با شرایط موجود، برابر با ۱۸/۷۶ سانتی‌متر بر ثانیه تعیین شد. برای داشتن یک پروسه‌ی آزمایشی درست، با تغییر در نسبت‌های مختلف سیمان، شن و ماسه و همین‌طور نسبت آب به سیمان، بهینه‌ترین حالت برای مخلوط شاهد مشخص گردید، که دارای نسبت ریزدانه به سیمان ۱/۲۸ و نسبت ریزدانه به ماسه ۲ و حداقل نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ بود. نتایج حاصله نشان می‌دادند که افزایش مقدار سیمان و کاهش مقدار ماسه، اکستروپذیری را بهبود می‌بخشد. در ادامه با اضافه نمودن افزودنی به ترکیب شاهد بدست آمده، ۴ مخلوط بدست آمد، که در آنها افزودن روان‌کننده، نسبت آب به سیمان را کاهش می‌داد و منجر به جریان‌پذیری بیشتر مخلوط می‌شد، اما بعد از اضافه نمودن نسبت مشخصی از روان‌کننده، ترکیبات قابلیت ساخت و ایستایی خود را از دست دادند و تعادل بین دو ویژگی مورد نظر، یعنی جریان‌پذیری و قابلیت ساخت برای ترکیبات از بین رفت. در ترکیبات ۱ تا ۵ ارائه‌شده برای ارزیابی روان‌کننده، به ترتیب مقدار کندگیرکننده و زودگیرکننده برابر با ۱ و ۰/۵ لیتر و مقدار روان‌کننده در آنها به ترتیب برابر با ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۱ و ۱/۳ بود و در نهایت مقاومت فشاری این ترکیبات به ترتیب برابر با ۴۰/۶، ۴۱/۵، ۴۲/۳، ۴۳/۵ و ۵۵/۴ مگاپاسکال بدست آمد، که تمامی آنها معیار مقاومت هدف (۴۰ مگاپاسکال) را بدست آوردند. جریان‌پذیری و قابلیت ساخت ترکیبات ارائه‌شده به ترتیب با استفاده از آزمایش اسلامپ و تعداد لایه‌های قابل چاپ بر روی یکدیگر، مورد ارزیابی قرار گرفت، که از ترکیب شماره‌ی ۲ تا ۵ به ترتیب افزایش و کاهش می-

³ Malaeb⁴ فرآیند فرم دادن و بیرون راندن مخلوطی انعطاف‌پذیر از طریق دهانه‌ی نازل Mixture Extrusion

یافت. نتایج نشان دادند، ترکیب بهینه‌ای که هر دو معیار جریان پذیری و قابلیت ساخت را برآورده کند، مخلوط شماره ۳ بود. با تغییر مقدار کندگیرکننده از ۰ تا ۱/۵٪، مقدار غلظت بهینه‌ی آن برابر با ۰/۵٪ و مدت زمان چاپ بی‌وقفه برابر با ۷۰ دقیقه بدست آمد، به طوری که با افزایش غلظت کندگیرکننده، این زمان به شدت کاهش یافته و به ۲۰ دقیقه در غلظت ۱٪ می‌رسد. در نهایت با هدف دستیابی به ویژگی‌هایی مانند اکستروپذیری، روانی، قابلیت ساخت و استحکام مناسب، مخلوط بهینه‌ای شامل ۱۲۵ گرم سیمان، ۸۰ گرم ماسه، ۱۶۰ گرم سنگدانه‌ی ریز، ۱ میلی‌لیتر زودگیرکننده، ۰/۶۲۵ میلی‌لیتر کندگیرکننده با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹، با مقاومت فشاری ۴۲ مگاپاسکال بدست آمد. دمیاننکو^۵ و همکارانش [۷]، به توسعه ترکیبات علمی اثبات‌شده برای ملات‌های اصلاح‌شده با استفاده از مواد افزودنی بر پایه ذغال سنگ نارس، در فرآیند چاپ سه‌بعدی پرداختند. این مقاله به تشریح نتایج تحقیقات تجربی بر روی خمیره‌ی سیمان سخت‌شده و مخلوط بتن با استفاده از افزودنی اصلاح‌کننده MT-600 (نوعی ذغال سنگ نارس اصلاح‌شده حرارتی) می‌پردازد. امروزه صنعت ساختمانی یکی از مصرف‌کنندگان اصلی منابع تجدیدناپذیر است. در مقایسه با فناوری‌های سنتی، فناوری‌های سه‌بعدی، امکان تنظیم خودکار کامل فرآیند، کاهش میزان ضایعات، بهبود پایداری و توجه به مسائل معماری و همچنین استحکام سازه به دلیل اجرای لایه‌به‌لایه به صورت مستمر را، فراهم می‌کنند. یکی از بزرگ‌ترین مزایای این فناوری سرعت بالای آن است، به طوری که در نمونه‌ای، ۱۰ ساختمان یک‌طبقه‌ی ۲۰۰ مترمربعی در یک روز ساخته شدند. فاصله‌ی زمانی مناسب برای بتن‌ریزی لایه‌ها باید به گونه‌ای تنظیم گردد که از یک سو زمان در حدی بالا باشد، تا لایه‌های پایین‌تر به استحکام مورد نظر برسند و از سوی دیگر برای ایجاد چسبندگی بین آن‌ها، این فاصله زمانی به اندازه‌ی کافی کوتاه باشد. در نتیجه با توجه به مطالب گفته‌شده، طرح اختلاط باید این ویژگی‌ها را داشته باشد: استحکام بالا در زمان کم، گیرش سریع، انسجام و چسبندگی و تنش تسلیم کافی. به منظور ارائه‌ی هم‌زمان ویژگی‌های ذکرشده، باید از طرح اختلاط بتنی که در آن از افزودنی‌های اصلاح‌کننده استفاده شده باشد، بهره برد. در این پژوهش اندازه‌ی متوسط ذرات افزودنی ذغال سنگ نارس برابر با $98.5 \pm$ میکرون و سطح ویژه‌ی آن‌ها ۰/۶ مترمربع بر گرم و همچنین نسبت ذغال سنگ نارس ریزشده تحت عملیات حرارتی به سیمان برابر با ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ در نظر گرفته شد. ابتدا مواد خشک طرح اختلاط، مخلوط شدند و سپس آب با نسبت ۰/۲۸ نسبت به سیمان مورد استفاده، به آن‌ها اضافه گردید. مواد مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از سیمان پرتلند CEM I 42/5H و ماسه‌ی ساختمانی. برای بررسی خواص ملات ماسه سیمان اصلاح‌شده با MT-600 (نوعی ذغال سنگ نارس اصلاح‌شده حرارتی)، نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۷۰/۷×۷۰/۷×۷۰/۷ میلی‌متر با نسبت ماسه به سیمان ۱:۲ ساخته‌شده و در شرایط هوای مرطوب سخت شدند و مقاومت فشاری آن‌ها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفتند. ذغال سنگ نارس مورد استفاده، از سه منطقه‌ی کاندینسکو، چلیباک و گوسوسکوئه بدست آمده بود. استفاده از این افزودنی باعث افزایش مقاومت خمیره‌ی سیمان سخت‌شده و ملات در سنین اولیه و در سن ۲۸ روزه می‌شود. نتایج حاکی از آن بود که میزان معقول مواد افزودنی اصلاح‌کننده باید ۰/۵٪ وزن سیمان مورد استفاده باشد. خواص محصول نهایی تا حد زیادی به خواص مواد اولیه بستگی دارد، به عنوان مثال مخلوط بتنی اصلاح‌شده با ذغال سنگ منطقه‌ی گوسوسکوئه^۶ بهترین مقاومت فشاری خمیره‌ی سیمان سخت‌شده را نشان می‌دهد، زیرا ذغال سنگ این منطقه نسبت به سایر معادن دارای خاکستر و میانگین عیار بالاتری است. لازم به ذکر است که میزان خاکستر بیشتر، باعث تشکیل ترکیبات آلی-معدنی می‌شود که خود عاملی برای افزایش استحکام خمیره‌ی سیمان است. با توجه به پیشرفت تکنولوژی و صنعتی شدن کشورها، تولید مواد بر پایه‌ی فناوری چاپ سه‌بعدی در صنعت ساختمان با رویکرد مسائل زیست‌محیطی امری مهم و ضروری است. در جهت تحقق هدف ذکرشده می‌توان از ضایعات صنعتی در مخلوط بتن استفاده نمود. تنظیم مقدار مواد افزودنی به بتن حاوی ضایعات صنعتی، امری کلیدی است. با ارزش‌گذاری روی این موضوع می‌توان به چرخه‌ی محیط‌زیست کمک کرده و سازه‌های پایدار و اقتصادی، بر پایه‌ی فناوری چاپ سه‌بعدی بتن ایجاد نمود. امروزه دفع زباله در زمین به یک نگرانی جدی تبدیل شده‌است، زیرا باعث مشکلات زیست‌محیطی قابل توجهی مانند آلودگی خاک، آب، هوا و منابع زیست‌محیطی می‌شود و بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارد [۸]. در سال‌های اخیر استرالیا یکی از کشورهای پیشرو در بازیافت زباله بوده و تا کنون گام‌های زیادی در زمینه‌ی فناوری‌های مدیریت این زباله‌ها برداشته است، به طوری که در سال ۲۰۱۹ نرخ کل بازیافت در این کشور به ۶۰٪ افزایش یافته است. تقریباً ۸۲٪ از زباله‌های ساختمانی با جنبه‌های مختلفی بازیافت می‌شوند، در حالی که هنوز ۱۸٪ از آنها در محل‌های دفن زباله قرار می‌گیرند [۹].

⁵ Demyanenko⁶ GOSUSKO Region

بتن حاوی ضایعات ساختمانی برای بسیاری از کاربردها مانند سنگدانه‌های بتن بازیافتی، روسازی جاده‌ها و پیاده‌روها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال بازیابی ضایعات آجر بسیار کم است و می‌توان با تبدیل آن‌ها به منابع ارزشمند، راه‌حل مناسبی برای حجم عظیمی از زباله‌های تولید شده توسط آن‌ها، یافت. در بتن ژئوپلیمری گسترده‌ترین منابع غنی از سیلیکات^۷ و آلومینا^۸ برای ژئوپلیمریزاسیون^۹، خاکستر بادی^{۱۰}، سرباره^{۱۱} و متاکائولین^{۱۲} هستند. در کشورهایی نظیر استرالیا ذخایر خاکستر بادی به سرعت در حال کاهش است. از آنجا که ضایعات آجر دارای نسبت بالایی از سیلیکات و آلومینا می‌باشد [۱۰، ۱۱، ۱۲]؛ پسوپاتی^{۱۳} و همکارانش [۱۳]، قابلیت چاپ و ویژگی‌های بتن ژئوپلیمر حاوی ضایعات آجر را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، پودر ضایعات آجر فعال شده قلیایی به عنوان چسباننده و همچنین جایگزینی جزئی برای خاکستر بادی، با نسبت‌های متفاوت ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ از کل مواد به کار گرفته شده‌ی دارای سیلیکات و آلومینات (سرباره، خاکستر بادی و ضایعات آجر)، باهدف توسعه مخلوط‌های ژئوپلیمر دارای قابلیت چاپ مورد استفاده قرار گرفت. تأثیر محتوای ضایعات آجر استفاده شده بر خواص مخلوط‌های تازه و قابل چاپ، مانند جریان پذیری، زمان گیرش و خواص رئولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت، و علاوه بر این، تأثیر درصدهای متفاوت ضایعات آجر به کار گرفته شده بر خواص بتن ژئوپلیمری سخت شده، مورد ارزیابی قرار گرفته شد. نتایج نشان دادند که، افزایش مقدار ضایعات آجر استفاده شده، میزان جریان پذیری مخلوط تازه و چسبندگی بین لایه‌های چاپ شده را کاهش و زمان گیرش را افزایش داده است. در مقایسه با بتن ژئوپلیمری بدون پودر ضایعات آجر، ترکیبات حاوی این ضایعات، در سنین پایین، قدرت تسلیم بالا و ویسکوزیته ظاهری از خود نشان دادند. خواصی همچون مقاومت فشاری و مقاومت بین لایه‌ای نمونه‌هایی که حاوی درصد بالایی از پودر ضایعات آجر هستند، کاهش یافته است، به طوری که مقاومت بین لایه‌های چاپ شده در ترکیباتی که حاوی ۵۰٪ از این ضایعات بودند، بعد از گذشت ۲۸ روز، در مقایسه با بتن ژئوپلیمر بدون پودر ضایعات آجر که به عنوان مخلوط کنترل در نظر گرفته شده بود، ۱۶٫۸٪ کاهش یافته است. با این حال خواص سخت شده ترکیباتی که حاوی ۱۰٪ از این ضایعات بودند، افزایش یافته بود. نمونه‌های مورد بررسی، رفتار ناهمسانگردی را در بحث مقاومت فشاری از خود نشان دادند، به طوری که بیشترین و کمترین مقاومت فشاری به ترتیب در جهت چاپ لایه‌ها و جهت جانبی گزارش شده بود. نتایج نشان دادند که بتن ژئوپلیمری مورد بررسی در این مطالعه، انرژی مصرف شده و انتشار کربن را، ۶۰٪ تا ۸۰٪ در مقایسه با بتن دارای سیمان پرتلند معمولی، کاهش می‌دهد.

۳- تقویت و مسلح سازی بتن

به کارگیری اقدامات تقویتی مرسوم مورد استفاده در بتن ریزی به روش سنتی، برای روش چاپ سه بعدی بتن امکان پذیر نیست، زیرا قفس فولادی تقویت کننده با نازل برخورد می‌کند و باعث اختلال در فرآیند چاپ می‌شود [۱۴]. رویکردهای مختلفی برای تقویت و بهبود عملکرد خمشی بتن چاپ شده توسط چاپگرهای سه بعدی پیشنهاد شده‌اند از جمله، ادغام کابل‌های فولادی با رشته‌های در حال چاپ [۱۵] و یا قراردادن این کابل‌ها در بین لایه‌های چاپ شده [۱۶]، استفاده از الیاف بین لایه‌های بتن چاپی تازه [۱۷]، فروکردن میلگرد درون لایه‌های چاپ شده [۱۸]، استفاده از پیش تنیدگی بر روی قطعات از پیش چاپ شده‌ای که در کنار هم نصب شده‌اند [۱۹]. این روش‌ها استحکام و سختی را تا حد خوبی بهبود می‌بخشند، اما به دلیل عدم ادغام تقویت کننده‌ها در جهت‌های مختلف، نمی‌توان نهایتاً از استحکام برشی به طور قابل ملاحظه‌ای بهره‌مند شد. به همین دلیل، لیو^{۱۴} و همکارانش [۲۰]، به عنوان رویکردی جدید، از یک شبکه سیمی فولادی یو-شکل^{۱۵}، برای تقویت و بهبود عملکرد خمشی بتن چاپ شده استفاده کردند و نتایج بررسی‌های خود را با نمونه‌های تقویت نشده و یا تنها دارای شبکه تقویتی افقی، مقایسه نمودند. در این مطالعه برای ساخت مخلوط قابل چاپ از سیمان پرتلند، خاکستر بادی، ماسه سیلیسی^{۱۶}،

⁷ SiO₂

⁸ Al₂O₃

⁹ Geo Polymerization

¹⁰ Fly Ash

¹¹ Slag

¹² Metakaolin

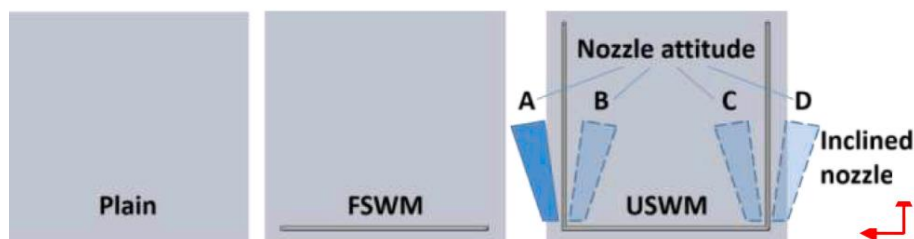
¹³ Pasupathy

¹⁴ Liu

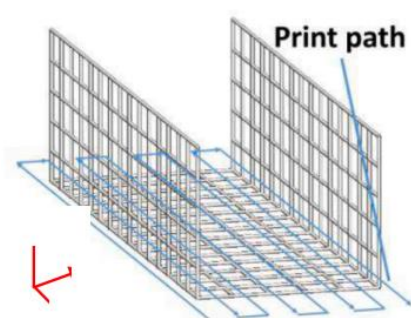
¹⁵ U-type

¹⁶ Silica Sand

میکروسیلیس^{۱۷}، فوق روان کننده^{۱۸} و آب استفاده شده است. مطابق شکل ۲، قطر سیم‌های استفاده شده ۱ میلی‌متر می‌باشد که با فاصله‌های ۶ میلی‌متری، یک شبکه سیمی فولادی را تشکیل داده‌اند.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۲: نمای جانبی نمونه‌های مختلف، (ب) فرآیند چاپ توسط نازل شیب‌دار، (ج) مسیر چاپ

سه گروه نمونه، شامل شبکه تقویت کننده‌ی فولادی یو-شکل، شبکه تقویت کننده فولادی افقی و بدون تقویت کننده، در ابعاد ۴۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، با استفاده از نازل شیب‌دار چاپ شد و خواص خمشی نمونه‌ها توسط دستگاه آزمایشی اونیورسال^{۱۹} مورد ارزیابی قرار گرفته‌شد. نتایج نشان دادند که عملکرد خمشی، ظرفیت باربری و توانایی حمل بار فزاینده پس از تشکیل اولین ترک تحت بارگذاری خمشی، در نمونه‌های تقویت شده با شبکه سیمی فولادی یو-شکل، نسبت به دو نمونه دیگر به طور قابل توجهی بهبود یافته‌است.

مارچمنت^{۲۰} و همکارانش [۲۱]، به بررسی روشی جهت تقویت بتن چاپ شده با استفاده از فناوری پرینت سه بعدی پرداختند. به منظور بهره‌مندی هرچه بیشتر از تکنولوژی چاپ سه بعدی، آنها روشی را برای تعبیه شبکه‌ی مش بندی شده‌ی فولادی به منظور مسلح کردن هم‌زمان با فرآیند چاپ بتن، ارائه کردند. یکی از چالش‌های مهم پیش روی این فناوری، مسلح کردن بتن، به ویژه در راستای بین لایه‌ای است. روش‌های دیگری که از قبل در رابطه با این بحث ارائه شده‌اند، عبارتند از: نصب آرماتورها در محل مناسب قبل از چاپ سه بعدی بتن و یا نصب آرماتور در سوراخ‌های تعبیه شده بعد از پرینت بتن، به طوری که این سوراخ‌ها با دوغاب پر شوند [۲۲-۳۰]. به منظور جایگزینی عملی و علمی این تکنولوژی با روش‌های سنتی بتن ریزی، باید روش‌های کارآمدی جهت تجهیز و مسلح کردن آن‌ها توسعه پیدا کنند. یکی از حوزه‌هایی که سطح وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است، استفاده از الیاف در بتن جهت مسلح کردن آن می‌باشد [۳۱-۳۳]. الیاف در مرحله‌ی اختلاط، به بتن اضافه می‌شوند، که تا حدودی باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شوند، با این حال این الیاف کوتاه هستند و پیوستگی مورد نیاز برای استحکام و شکل پذیری را ایجاد نمی‌کنند، علاوه بر این، به عنوان مهم‌ترین عامل، این الیاف تنها در جهت رسوب، لایه‌های بتنی را تقویت می‌کنند و جهت عمود بر آن غیرمسلح باقی خواهد ماند [۳۴]. شرکت ساختمانی چینی هواشنگ

¹⁷ Silica Fume

¹⁸ Super Plasticizer

¹⁹ universal testing machine

²⁰ Marchment

تنگد^{۲۱} روشی را برای تقویت در دو جهت عمودی و افقی در پروژه‌های در مقیاس بزرگ ارائه نمود، که در آن آرماتورها قبل از چاپ لایه‌های بتنی در محل مورد نظر نصب می‌شدند و بتن به صورت لایه‌به‌لایه در دو طرف آرماتورها اکستروود می‌شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود محدودیت‌های آشکاری در این روش وجود دارد، از جمله الزام به عمودی و مستقیم‌بودن عناصر (شکل ۳).

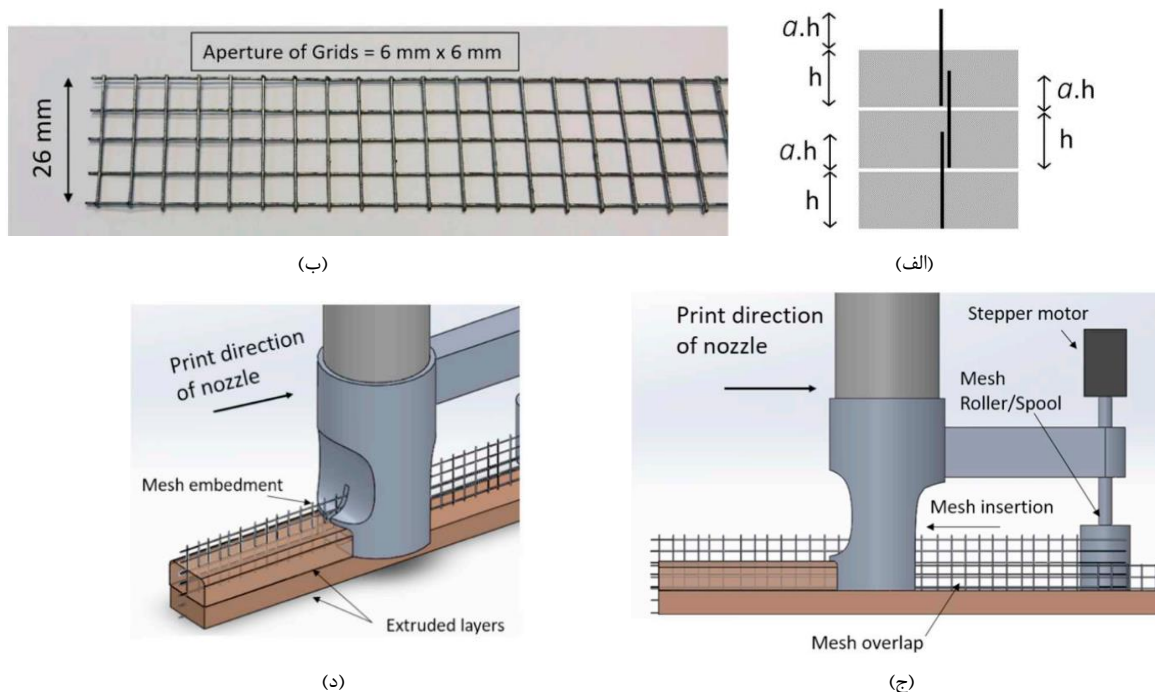


شکل ۳: روش تقویت و مسلح کردن با استفاده از پیش‌نصب آرماتور [۲۱]

ایده‌ی ارائه‌شده در این مقاله، مبتنی بر تقویت با استفاده از شبکه‌ی مش‌بندی‌شده‌ی فولادی به صورت هم‌زمان با اکستروود بتن، در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از نازل جدید طراحی‌شده مورد بررسی قرار گرفت، تا این روش را تایید و یا رد کند. در این مطالعه شبکه‌های مش‌بندی‌شده‌ی فولادی جهت تقویت سازه‌ی مورد نظر، در هر لایه با یکدیگر هم‌پوشانی داشتند. در طول چاپ هر لایه، مش به طور هم‌زمان در ارتفاعی بزرگتر از ارتفاع لایه، در آن قرار می‌گیرد. طول بیرون‌زدگی مش در هر لایه، برابر با طول روی هم افتادگی و پوشش با شبکه‌ی مش‌بندی‌شده‌ای است که در لایه بعد قرار خواهد گرفت. طول بیرون‌زده‌ی شبکه‌ی مش‌بندی‌شده از هر لایه نسبت به ارتفاع لایه‌ی چاپ‌شده مطابق شکل ۴-الف برابر با α در نظر گرفته شده، که مقدار آن باید بیشتر از صفر و کمتر از یک باشد، زیرا در غیر این صورت مش از لایه‌ی بعدی بیرون زده و باعث اختلال در نازل می‌شود. الزامات در نظر گرفته‌شده برای انتخاب این شبکه‌ی تقویت کننده، در درجه اول، عملی‌بودن قرارگیری، قطر و روزنه‌ی شبکه‌ها بوده است. روزنه‌ی این شبکه‌ها باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا مخلوط اکستروود شده بتواند از میان آنها عبور کرده و اتصال کافی را ایجاد نماید. اما باید توجه نمود که اگر مقدار این روزنه‌ها خیلی بزرگ باشد، مقدار این شبکه تقویت کننده به ازای واحد طول هر لایه کاهش می‌یابد. از طرفی اگر قطر فولادهای مصرفی بزرگ باشند، مانع از حرکت نازل در طول فرآیند چاپ می‌شوند. همچنین صلبیت مش مورد استفاده بسیار مهم است و باید تا حدی کم باشد که امکان اجرا و قرارگیری آن از میان سیستم نازل وجود داشته باشد، به همین دلیل از تقویت کننده‌های بسیار صلب نمی‌توان استفاده نمود. ماده‌ی مورد استفاده در این بررسی که ترکیبی از ماسه، سیمان، مواد افزودنی و آب است، به گونه‌ای ساخته شده بود تا علاوه بر داشتن قابلیت ساخت مناسب، امکان جریان در اطراف شبکه‌ی مش‌بندی‌شده برای ایجاد یک پیوند قوی را داشته باشد. همان‌طور که در شکل ۴-ب قابل مشاهده است، شبکه‌ی سیمی مورد استفاده دارای قطر ۰/۵ میلی‌متر و روزنه‌هایی به ابعاد ۶×۶ میلی‌متر بود که به یکدیگر جوش داده شده بودند. در شکل ۴-ج و ۴-د، نازل توسعه‌یافته در این مطالعه نشان داده شده است. قسمت پایینی این نازل به منظور خروج مواد از دو سمت، شکافته شده است، طراحی این نازل بسیار دقیق است و مواد بعد از جریان یافتن در شکاف، مجدداً به سمت وسط هدایت می‌شوند و پیوند محکمی را ایجاد می‌نمایند. در این روش شبکه‌ی مش‌بندی‌شده با همان سرعت اکستروود مواد، به صورت اتوماتیک در هر لایه قرار داده

²¹ Huasheng Tengda Construction Group

می‌شود. شکاف در قسمت پایین نازل به اندازه‌ی کافی په‌ن در نظر گرفته شده است تا امکان عبور هم‌زمان دو شبکه‌ی مش‌بندی (در قسمت‌های دارای هم‌پوشانی) را داشته باشد.

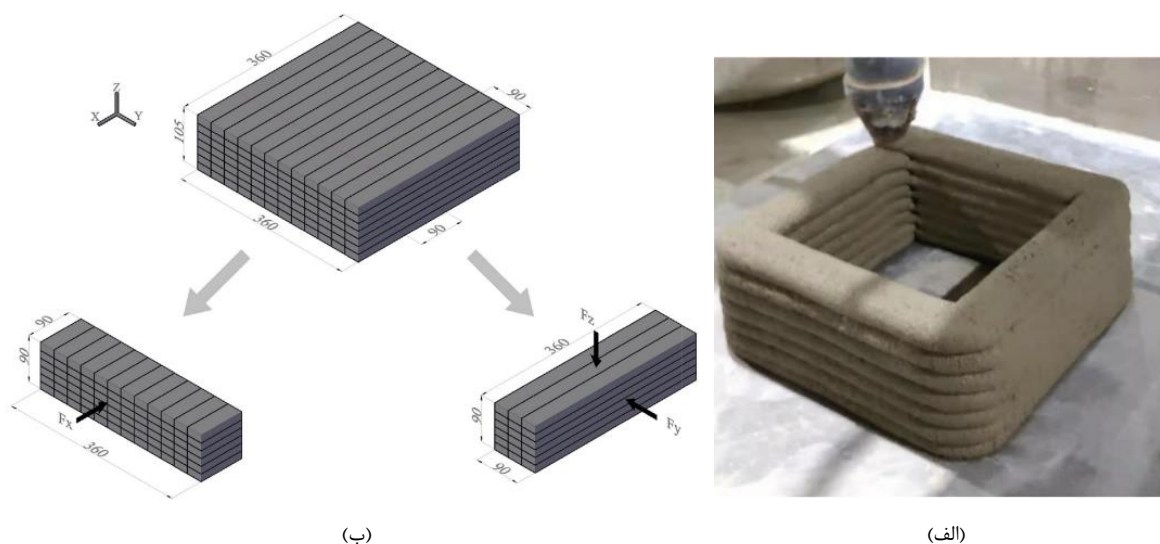


شکل ۴: الف) بیرون‌زدگی مش استفاده‌شده از هر لایه، ب) شبکه سیمی جهت تقویت عملکرد بتن چاپی، ج و د) نازل توسعه‌یافته برای چاپ هم‌زمان بتن و شبکه‌ی سیمی تقویت‌کننده [۲۱]

به منظور بررسی، یک دیوار عمودی تقویت‌شده با شبکه‌های فولادی به ارتفاع ۲۶ میلی‌متر، متشکل از ۹ لایه ساخته شد. فاصله‌ی نازل از کف هر لایه ۳ میلی‌متر و سرعت رسوب مواد و قراردادن شبکه‌های تقویت‌کننده، ۱۲ میلی‌متر بر ثانیه و مقدار ضریب α برابر با ۰/۷۶ در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه، نمونه‌ی تقویت‌نشده‌ی دیگری توسط همان نازل تهیه شد. قبل از انجام تست خمش سه‌نقطه‌ای، نمونه‌ی چاپ‌شده به قطعاتی به عرض ۴۵ تا ۵۰ میلی‌متر برش داده شد و سپس مقاومت خمشی آن‌ها در جهت عمود بر لایه‌های چاپ‌شده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که، گسیختگی نمونه‌های تقویت‌شده، به دلیل جداسازی پیوند بین مواد و شبکه‌ی تقویت‌کننده‌ی فولادی نمی‌باشد، بلکه این گسیختگی به دلیل تسلیم فولاد رخ داده است. این موضوع کارایی نازل طراحی‌شده را در ایجاد پیوندی قوی میان مواد پرینت‌شده و شبکه‌ی تقویت‌کننده‌ی فولادی تایید می‌کند. هم‌پوشانی شبکه‌ها در مرز بین لایه‌ها، باعث عملکرد پیوسته‌ی این شبکه‌های تقویت‌کننده شده، و استحکام و مقاومت خمشی را تا ۱۷٪-۲۹٪ افزایش می‌دهند. دینگ^{۲۲} و همکارانش [۳۵]، به بررسی رفتار ناهمسانگرد بتن مسلح‌شده با الیاف پلی‌اتیلن تحت اثر خمش پرداختند. به منظور دستیابی به مخلوطی که اکستروپذیری، قابلیت ساخت و کارایی مطلوبی داشته باشد، ترکیب پیش رو با استفاده از آزمون و خطا پیشنهاد شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی سیمان پرتلند معمولی مورد استفاده در این بررسی برابر با ۴۲/۵ مگاپاسکال و نسبت ماسه به سیمان و آب به سیمان، به ترتیب ۱ و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده بودند. همچنین اندازه‌ی سنگدانه‌های ریز مورد استفاده برای ساخت این ترکیب به ۰/۹ میلی‌متر محدود گشتند. برای اطمینان از کارایی و اکستروپذیری ترکیب حاصله، از فوق روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات با کارایی بالا و هیدروکسی‌پروپیل‌متیل سلولز استفاده شد. الیاف پلی‌اتیلن به دلیل استحکام و آب‌گریزی بالا، در مقایسه با الیاف پلی‌وینیل‌الکل، برای مسلح‌ساختن ترکیب ساخته‌شده مورد استفاده

²² Ding

قرار گرفتند. با استفاده از این الیاف، تنش کششی زیادی در سطح مشترک الیاف و بتن چاپ شده، به طور مؤثر قابل انتقال خواهد بود. آب-گریز بودن الیاف پلی اتیلن، پیوند شیمیایی آن‌ها و ماتریس بتن را از بین می‌برد و انرژی مکمل پل زدن الیاف را (پدیده‌ای که در کامپوزیت-ها مکانیزم محافظ ترک را افزایش می‌دهد) تا حد زیادی افزایش می‌دهد. الیاف پلی اتیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و قطر ۲۰ میکرومتر با نسبت‌های وزنی ۰٪، ۰/۲۵٪، ۱٪ و ۱/۴٪ در این مخلوط مورد استفاده قرار گرفتند. مخلوط تازه آماده شده توسط دستگاه پمپاژ در یک مخزن V شکل ریخته می‌شود و بتن تازه به طور مداوم و به آرامی از نازل خارج می‌گردد. نازل در این چاپگر می‌تواند در فضایی به ابعاد $3 \times 3 \times 3$ متر آزادانه حرکت کند. رشته‌های چاپ شده در این مطالعه به ترتیب عرض و ارتفاعی برابر با ۳۰ و ۱۵ میلی‌متر داشتند. سرعت اکستروژن و سرعت چاپ افقی به ترتیب $1/35$ لیتر بر دقیقه و ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده بودند. نمونه‌ی اولیه ساخته شده مطابق شکل ۵-الف قابلیت ساخت و اکستروپذیری مطلوبی را برای مخلوط تقویت شده با استفاده از الیاف پلی اتیلن نشان می‌دهد. در این مطالعه به منظور بررسی رفتار ناهمسانگرد، بر اساس فرآیند چاپ یک سیستم مختصاتی تعریف شده است، به گونه‌ای که صفحه چاپ به عنوان صفحه X-Y و جهت عمود بر آن در سرتاسر لایه‌ها به عنوان محور Z در نظر گرفته شد. محور X محوری است که در آن نازل حرکت کرده و موازی با رشته‌های چاپ شده است و محور Y عمود بر جهت X و در صفحه چاپ قرار دارد، که در آن نازل از یک رشته به رشته دیگر منتقل می‌شود. نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش‌های خمش سه نقطه، کشش و بررسی اثرات نسبت الیاف استفاده شده، طول الیاف و جهت بارگذاری، از یک قطعه به ابعاد $360 \times 360 \times 105$ میلی‌متر برش داده شدند، که مطابق شکل در سه جهت نشان داده شده تحت بارگذاری قرار گرفتند (شکل ۵-ب).



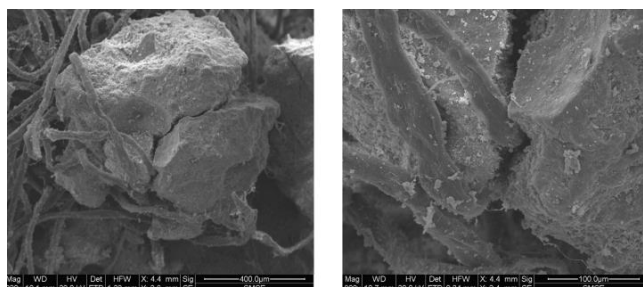
شکل ۵: الف) نمونه‌ی اولیه با استفاده از اختلاط ارائه شده، ب) جهت بارگذاری نمونه‌ها [۳۵]

مشاهده شد که با افزایش نسبت وزنی الیاف، بدون توجه به طول آن‌ها، فاصله ترک‌ها و تعداد آن‌ها افزایش می‌یابد. عملکرد اصلی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی^{۲۳}، برای مشاهده، تجزیه و تحلیل وضعیت شکست و یا آسیب نمونه، در یک مقطع پس از انجام تست کششی و نیز شناسایی حفره‌ها و تخلخل نمونه است. شکل ۶، ریز ساختار یک نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از الیاف پلی اتیلن، که توسط فناوری چاپ سه بعدی ساخته شده است را با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان می‌دهد. مشاهده شد که در اثر بارگذاری در هر کدام از سه جهت ذکر شده در بالا، مقدار مشخصی از الیاف گسیخته و مقداری از آن‌ها به بیرون از ماتریس سیمان کشیده می‌شوند.

به طور کلی برای مواد مبتنی بر سیمان که با استفاده از الیاف مرسوم تقویت می‌شوند، ترکیب مکانیکی بین ماتریس و الیاف، مقدار زیادی از انرژی را در طول فرآیند ترک خوردگی و شکست مصرف می‌کند، که نشان‌دهنده‌ی یک مکانیزم تقویت کننده‌ی قوی می‌-

²³ Scanning Electron Microscope: SEM

باشد. افزودن این الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای باعث بهبود مقاومت خمشی در هر سه جهت می‌شود. همچنین متوسط تنش کششی مواد چاپ‌شده با افزایش نسبت فیبر افزایش یافته، به عنوان مثال تنش کششی از $\frac{1}{3}$ مگاپاسکال به $\frac{4}{6}$ مگاپاسکال برای نمونه‌ای با نسبت وزنی الیاف پلی‌اتیلن برابر با $\frac{1}{4}$ ، افزایش یافته است. با افزایش الیاف عبوری از سطح شکست، مکانیسم شکست مطلوب‌تری رخ داده و رفتار مواد از حالت شکننده به حالت شکل‌پذیر تبدیل شده بود.

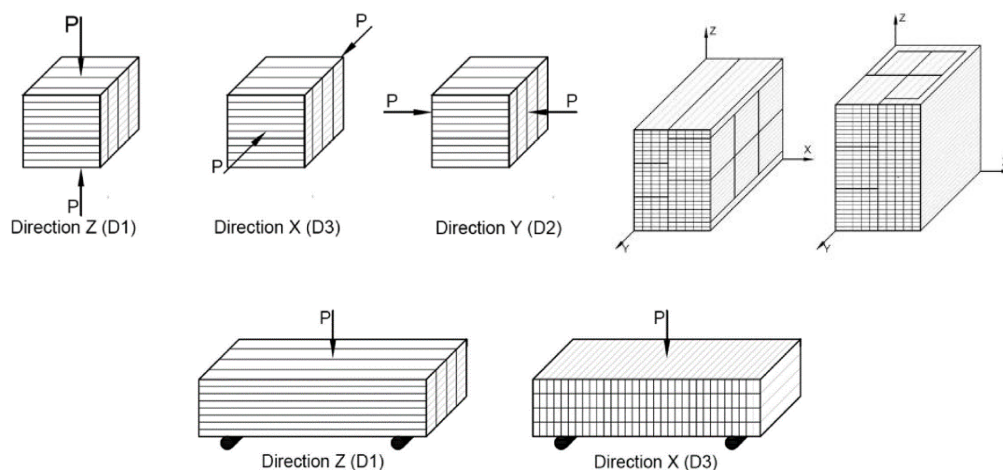


شکل ۶: تصاویر SEM گرفته‌شده از نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پلی‌اتیلن [۳۵]

فام^{۲۴} و همکارانش [۳۶]، تاثیر طول و کسر حجمی الیاف فولادی را بر خواص مکانیکی و مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های قالب‌بندی‌شده و پرینت‌شده مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین از پرتونگاری میکروکامپیوتری اشعه ایکس که یکی از ابزارهای تصویربرداری غیرمخرب است، برای تشخیص توزیع و جهت‌گیری الیاف و منافذ استفاده کردند. مخلوط مورد استفاده در این پژوهش، با اصلاح مخلوط بتن تقویت‌شده با الیاف فولادی با کارایی بالا، که از قبل توسط وو^{۲۵} و همکارانش [۳۷]، برای بتن‌ریزی با استفاده از قالب‌بندی به روش سنتی ارائه شده بود، جهت استفاده در فناوری پرینت سه‌بعدی بدست آمد. در این ترکیب از مقداری فوق‌روان‌کننده، کندگیرکننده و مقداری خاک رس سرامیکی، جهت دستیابی به ویژگی‌های مطلوب برای پرینت سه‌بعدی، استفاده شده است. نسبت آب به سیمان همانند آنچه در ترکیب اولیه آورده شده بود برابر با $\frac{0.377}{1}$ در نظر گرفته شد. ماده‌ی چسباننده در این ترکیب از سیمان، میکروسیلیس و خاکستر سرباره‌ای تشکیل شده است. در این مطالعه برای تقویت مخلوط مورد نظر، از الیاف فولادی نرم پوشیده‌شده از مس با چگالی 7850 گرم بر سانتی‌مترمکعب و مقاومت کششی 2000 مگاپاسکال، با طول‌های 3 و 6 میلی‌متر، با کسرهای حجم $\frac{0.175}{1}$ ، $\frac{0.15}{1}$ ، $\frac{0.25}{1}$ و $\frac{1}{1}$ استفاده شده است. ابتدا مواد خشک با یکدیگر ترکیب شده و سپس کندگیرکننده به آن‌ها اضافه شده است، سپس $\frac{2}{3}$ آب مورد نیاز بعد از ترکیب با فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه گشته و سپس مابقی آب و در نهایت خاک رس اضافه گردیده است. به عنوان گام آخر، فیبرها به ترکیب اضافه شده‌اند و برای اطمینان از اینکه که مخلوط از نظر توزیع فیبرها یکنواخت باشد، مواد به مدت 3 دقیقه مخلوط گشته‌اند. در نهایت برای ساخت نمونه به هر دو روش قالب‌بندی و پرینت سه‌بعدی، از یک مخلوط بدون الیاف و 8 مخلوط دارای الیاف استفاده شده است. قابلیت ساخت بتن تازه معمولاً با استفاده از تعداد لایه‌ها و یا ارتفاع جسم چاپ‌شده با تغییر شکل ناچیز ارزیابی می‌شود، که در این مطالعه نیز در ابتدا مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های ساخته‌شده در قالب، جهت انجام آزمایش فشار و خمش به ترتیب دارای ابعاد $50 \times 50 \times 50$ و $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر بودند. بنابر ظرفیت اکسترودر، ابعاد نمونه‌های چاپ‌شده طوری در نظر گرفته شدند که بتوان جهت انجام آزمایش‌های فشار و خمش، به ترتیب قطعاتی به ابعاد $50 \times 50 \times 50$ و $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر، از آن‌ها برش داده شود. مطابق شکل ۷، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها به ترتیب در سه و دو جهت ارزیابی شدند، لازم به توضیح است که جهت‌های X ، Y و Z به ترتیب نشان‌دهنده‌ی جهت رفتن از یک لایه به لایه دیگر جهت چاپ، جهت چاپ لایه‌ها و جهت انباشته‌شدن لایه‌ها روی هم می‌باشد.

²⁴ Pham

²⁵ Wu



شکل ۷: نمونه‌های پرینت‌شده و جهت‌های بارگذاری برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و فشار [۳۶]

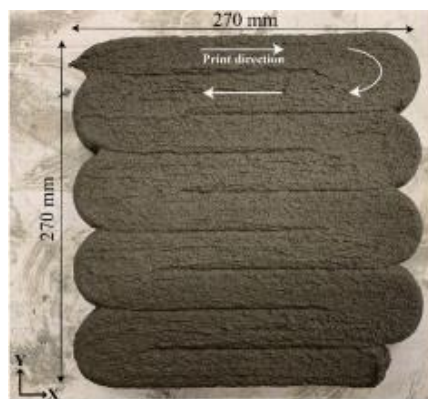
آن‌ها با استفاده از تصاویر X-ray micro-CT گرفته‌شده از نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش خمش، مقدار تخلخل و توزیع آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند در صورتی که فرآیند چاپ با کیفیت بالا انجام شود، منجر به کاهش منافذ و حفره‌های بزرگ ناشی از شکاف بین رشته‌ها می‌شود، علاوه بر آن افزایش کسر حجمی الیاف استفاده‌شده باعث کاهش منافذ شد. به دلیل خوب متراکم‌شدن بتن در فرایند اکستروژن، در یک کسر حجمی معین، منافذ مشاهده‌شده در نمونه‌های چاپ‌شده کمتر از نمونه‌های ساخته‌شده با استفاده از قالب بود. نتایج حاکی از آن بودند که استفاده از الیاف فولادی تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری گذاشته، به طوری که باعث افزایش آن در حدود ۲۴٪ و ۲۶٪، در نمونه‌ی پرینت‌شده نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با استفاده از قالب و پرینت‌شده‌ی بدون الیاف می‌شود. استفاده از این الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های چاپ‌شده و قالب‌بندی‌شده در حدود ۱۵/۴٪ و ۲۷٪ نسبت به نمونه‌های متناظر بدون الیاف آن‌ها می‌شود. الیاف فولادی به طول ۳ میلی‌متر در تمام کسرهای حجمی استفاده‌شده و الیاف فولادی به طول ۶ میلی‌متر در کسرهای حجمی ۰/۲۵٪ و ۰/۵٪ هیچ تأثیر مثبتی بر مقاومت خمشی نمونه‌های چاپ‌شده در جهت Z نداشتند، در حالی که استفاده از این الیاف با کسرهای حجمی ۰/۷۵٪ و ۱٪، منجر به افزایش مقاومت خمشی در جهت Z و کاهش رفتار شکننده و شکست ناگهانی می‌شود. ترکیب بتن با الیاف فولادی یکی از راه‌های تقویت آن می‌باشد، اما باید توجه نمود که تأثیر فرآیند چاپ بتن بر جهت‌گیری این الیاف بسیار مهم است. آرونوتایان^{۲۶} و همکارانش [۳۸]، توزیع جهت الیاف فولادی را، در چاپ سه‌بعدی بتن با عملکرد بالا (مقاومت فشاری < 150 مگاپاسکال)، به صورت کمی مورد بررسی قرار دادند و همچنین با استفاده از تصاویر دیجیتالی، اثر اندازه نازل اکستروژن، سرعت چاپ و کسر حجمی الیاف به کار رفته را بر جهت‌گیری الیاف، مورد ارزیابی قرار دادند. در این بررسی ابتدا مواد خشک مانند سیمان، دوده‌ی سیلیس و ماسه مخلوط شدند، سپس تقریباً ۷۵٪ از آب مورد نیاز ترکیب، به تدریج اضافه شد و مواد به مدت ۵ دقیقه مخلوط گردیدند. مابقی آب با روان‌کننده ترکیب شده و در یک فرآیند گام‌به‌گام به مخلوط اضافه شد، در گام بعد الیاف فولادی به طول ۶ میلی‌متر با کسرهای حجمی ۱٪ و ۲٪ به تدریج با سایر مواد ترکیب شدند و در نهایت مقداری نانو خاک رس به منظور مناسب‌کردن خواص رئولوژیکی مخلوط برای چاپ به آن اضافه گردید. مطابق شکل ۸-الف، قطعاتی با ابعاد ۲۷۰ × ۲۷۰ میلی‌متر متشکل از ۶ لایه با ضخامت هر لایه برابر با ۱۰ میلی‌متر، توسط دستگاه پرینت سه‌بعدی نشان داده‌شده در شکل ۸-ب و ج، مجهز به نازل‌های دایره‌ای با قطرهای متفاوت، با استفاده از سه پرتوکل چاپ شدند، که هر کدام از پرتوکل‌های یک، دو و سه، به ترتیب به بررسی تأثیر کسر حجمی الیاف به کار رفته، اندازه نازل و سرعت چاپ بر توزیع جهت‌گیری الیاف در نمونه‌ها پرداختند. پرتوکل اول شامل کسر حجمی الیاف فولادی ۱٪ و ۲٪ بود، که در آن قطعات با استفاده از نازل دایره‌ای با قطر ۳۰ میلی‌متر با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه چاپ شده بودند. در پرتوکل دوم از نازل‌های دایره‌ای با قطرهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر برای چاپ قطعات با درصد حجمی الیاف فولادی ۱٪، با سرعت چاپ ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شده بود. در پرتوکل سوم، قطعات با درصد حجمی الیاف فولادی ۱٪ با استفاده از نازلی به قطر ۳۰ میلی‌متر با سرعت‌های مختلف ۳۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه چاپ شده بودند. نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر و نمونه‌های منشوری با ابعاد ۵۰ × ۲۰ × ۲۰ میلی‌متر، به ترتیب

²⁶ Arunothayan

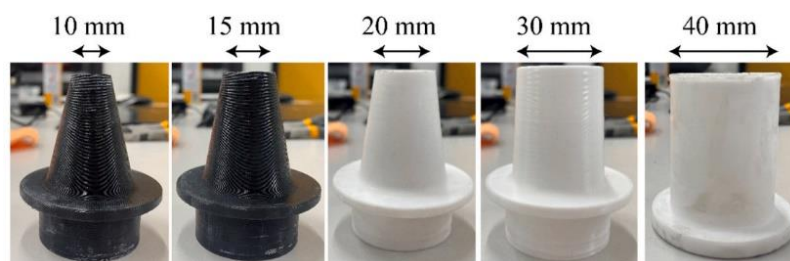
تحت آزمایش برای سنجش مقاومت فشاری به صورت بار کنترل (0.33 Mpa/sec) و خمشی به صورت تغییر مکان کنترل (1 mm/min) قرار گرفتند (شکل ۹). به منظور بررسی رفتار ناهمسانگرد، نمونه‌های ذکر شده، در سه جهت تحت فشار و در چهار جهت تحت خمش بارگذاری شدند. روش‌های مختلفی برای ارزیابی جهت‌گیری الیاف در بتن وجود دارد، روش‌های مستقیم مانند شمارش تعداد الیاف در یک مقطع برش زده شده، تجزیه و تحلیل اسکن میکروسکوپ الکترونی و تصاویر دیجیتالی و اسکن کامپیوتری توموگرافی، روش‌های غیرمستقیم مانند طیف‌سنجی آمپدانس، القای مغناطیسی و تصویربرداری مایکروویو. در این مطالعه برای ارزیابی جهت‌گیری الیاف به کار گرفته شده، از تصاویر دیجیتالی سه نمونه مکعبی به ابعاد 50 میلی‌متر استفاده شده است. الیاف در نمونه‌های پرینت شده با کسر حجمی 1% و 2% نسبت به نمونه‌های ساخته شده با استفاده از قالب، هم‌ترازی بیشتری در جهت چاپ از خود نشان دادند. کسر حجمی الیاف استفاده شده و قطر نازل بر توزیع جهت‌گیری الیاف تاثیرگذار هستند. کسر حجمی بیشتر منجر به تعامل بیشتر بین الیاف شده و در نتیجه تراز ترجیحی، بیشتر در جهت چاپ خواهد بود و هرچه قطر نازل مورد استفاده کوچک‌تر باشد، تراز ترجیحی در جهت چاپ افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از آن بودند که توزیع جهت‌گیری الیاف در نمونه‌های چاپ شده با سرعت‌های مختلف یکسان هستند. فشار مکانیکی و نیروی گرانشی فرآیند چاپ باعث هم‌ترازی هرچه بیشتر الیاف در نمونه‌های پرینت شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده توسط قالب می‌شود. همچنین مشاهده شد که هم‌ترازی بیشتر الیاف در جهت چاپ، مقاومت خمشی نمونه را افزایش می‌دهد.



(ب)

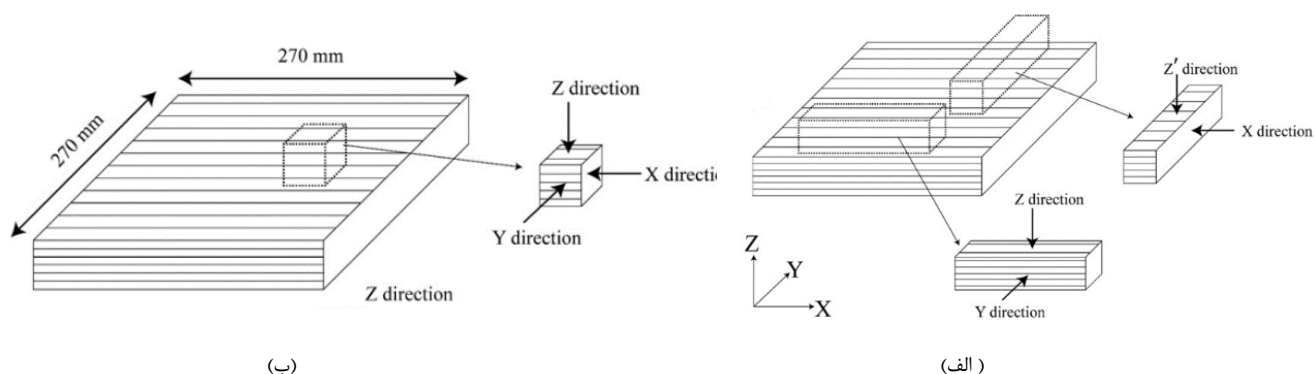


(ف)



(ج)

شکل ۸: الف) نمونه‌ی ساخته شده با استفاده از بتن با مقاومت بالا و تقویت شده با الیاف فولادی، ب) اکسترودر، ج) نازل‌ها با قطرهای متفاوت [۳۸]

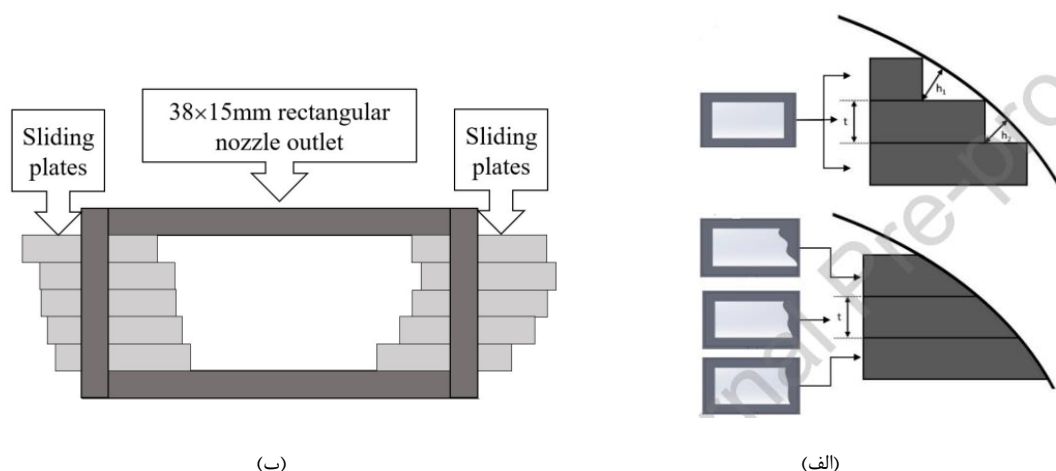


شکل ۹: برش قطعات و بارگذاری نمونه‌ها، (الف) برای سنجش مقاومت خمشی، (ب) برای سنجش مقاومت فشاری [۳۸]

۴- اثر هندسه نازل

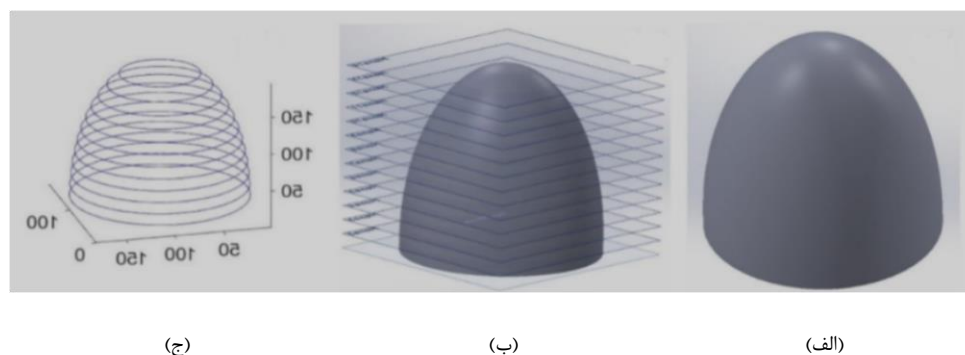
با وجود تأثیر به‌سزای فرآیند پرینت سه‌بعدی بر کاهش سرعت و هزینه‌ی صرف‌شده، سطح نهایی ایجادشده توسط این تکنولوژی به دلیل ناهمواری و کیفیت پایین، نیاز به پرداخت نهایی دارد، زیرا سطوح ناهموار علاوه بر سایش سریع‌تر نسبت به سطوح صاف، باعث تمرکز تنش و کاهش پیوند بین لایه‌ای می‌شوند. ونکسین^{۲۷} و همکارانش [۳۹]، کیفیت سطح نهایی ایجادشده را با استفاده از یک نازل با هندسه متغیر بهبود بخشیدند، که می‌تواند هندسه‌ی اکسترود را در طول فرآیند چاپ در هر لایه به صورت دینامیکی کنترل کند و متناسب با شکل طراحی‌شده برای سازه تنظیم شود. شکل اکسترود متناظر با ساختار مورد نظر، از طریق الگوریتم slicer تعیین می‌شود. الگوریتم یک ورودی از سازه‌ی طراحی‌شده در اتوکد دریافت می‌کند و هندسه‌ی اکسترود را در هر لایه برش می‌دهد، سپس یک کنترل-کننده شکل نازل را در طول فرآیند چاپ برای دستیابی به هندسه‌ی اکسترود مربوطه تغییر می‌دهد. آنها یک ساختار قوسی شکل را جهت نشان‌دادن اثر بخشی سیستم ارائه‌شده مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصله را با نمونه‌ی چاپ‌شده توسط نازل با هندسه‌ی ثابت مقایسه کردند. همانطور که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، نازل با هندسه‌ی ثابت باعث ایجاد اثر پلکانی در لایه‌های مختلف می‌شود، در صورتی که نازل با هندسه‌ی متغیر، هندسه‌ی اکسترود را مطابق هندسه‌ی ساختار تغییر می‌دهد و با به حداقل رساندن اثر پلکانی باعث کیفیت سطح نهایی می‌شود. نازل طراحی‌شده مطابق شکل ۱۰-ب از سه قسمت تشکیل شده است که عبارتند از صفحات متحرک در دو طرف نازل و قسمت رسوب‌گذاری که خود شامل ورودی نازل، کانال جریان برای مواد بتنی و خروجی نازل می‌باشد. این نازل توسط تغییر در ۱۰ صفحه‌ی متحرک در دو طرف عرض نازل، که می‌توانند آزادانه، مداوم و مستقل از صفحات دیگر حرکت کنند، شکل خروجی خود را تغییر می‌دهد. حرکت هر کدام از این صفحات حداکثر تا ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، به طوری که ابعاد خروجی نازل می‌تواند از ۱۵×۳۸ تا ۱۵×۲۲ میلی‌متر تغییر کند. لازم به ذکر است که تعداد این صفحات و محدوده‌ی حرکتی آنها می‌تواند متناسب با کاربرد مورد نظر تغییر داده شود.

²⁷ Wenxin



شکل ۱۰: الف) مقایسه‌ی نتیجه‌ی چاپ با استفاده از نازل با هندسه‌ی ثابت و نازل با هندسه‌ی متغیر، ب) نمایشی از خروجی نازل با هندسه‌ی متغیر [۳۹]

سازه‌ی نشان داده‌شده در شکل ۱۱ را در نظر بگیرید، در قسمت (ب) و (ج) از شکل ۱۱ به ترتیب صفحات برش داده‌شده از هندسه‌ی سه‌بعدی این سازه و مسیر چاپ قابل مشاهده است، لازم به ذکر است که ضخامت بین هر دو صفحه‌ی نشان داده‌شده، برابر با ضخامت لایه‌ی اکستروژن شده است. به منظور دستیابی به هندسه‌ی اکستروژن مناسب در هر لایه، مسیر چاپ نشان داده‌شده در ساختار سازه، تجزیه و تحلیل می‌شود.



شکل ۱۱: الگوریتم slicer به منظور تعیین هندسه‌ی اکستروژن در هر لایه [۳۹]

شکل ۱۲، سازه‌ی قوسی در نظر گرفته‌شده در این مطالعه‌ی موردی را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، الگوریتم slicer، ابتدا مدل طراحی‌شده در اتوکد را به منظور دستیابی به هندسه‌ی اکستروژن مورد نظر و برنامه‌ریزی مسیر چاپ تجزیه و تحلیل می‌کند و سپس شکل خروجی نازل را در بهترین حالت برای هر لایه تعیین می‌نماید و در نهایت اطلاعات مسیر چاپ را به ریات ارسال می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سازه‌ی ساخته‌شده توسط نازل با هندسه‌ی متغیر دارای سطح بهتر و باکیفیت‌تری نسبت به سازه‌ی ساخته‌شده توسط نازلی با هندسه‌ی ثابت می‌باشد.

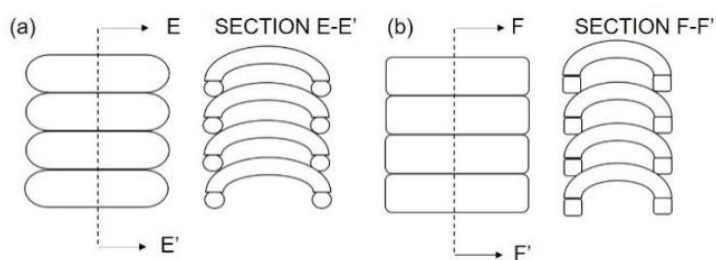


(ب)

(الف)

شکل ۱۲: الف) مقطع عرضی و مسیر چاپ سازه‌ی قوسی در نظر گرفته شده، ب) مقایسه‌ی سطح خارجی منحنی سازه‌ی چاپ شده با استفاده از نازل متغیر و ثابت [۳۹]

مانیکندان^{۲۸} و همکارانش [۴۰]، مطابق شکل ۱۳، تأثیر هندسه‌ی نازل بر مشخصات مکانیکی و انحراف خطوط تراز را در سازه‌های استوانه‌ای رسی چاپ شده با استفاده از چاپگر DIW، قبل از افزایش مقیاس انجام کار برای پروژه‌های بتنی، مورد بررسی قرار دادند. هر دو نمونه‌ی ساخته شده در شرایط یکسانی عمل‌آوری شده و قبل از بارگذاری، سطوح بالا و پایین این نمونه‌ها صاف شدند. نتایج نشان دادند که استحکام فشاری نمونه‌های ساخته شده با استفاده از نازل مربعی بیشتر است، همچنین استفاده از نازل دایره‌ای، زبری سطح و انحراف خط تراز کمتری را نسبت به نازل مربعی ایجاد می‌کند.



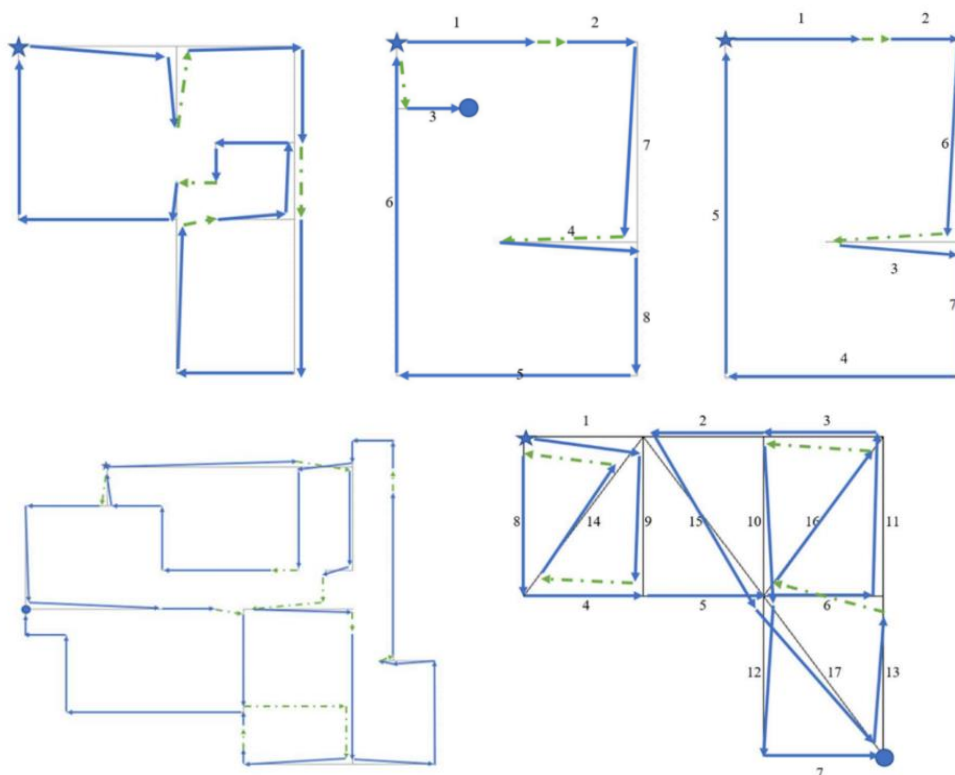
شکل ۱۳: نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با استفاده از دو نازل مربعی و دایره‌ای [۴۰]

توکلو^{۲۹} و همکارانش [۴۱]، حرکت بهینه‌ی نازل را برای ساخت سازه‌های بتنی، با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری و نسخه‌ی جدید زبان برنامه‌نویسی QB64، به صورت دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. یکی از روش‌های عملی در استفاده از تکنیک چاپ سه‌بعدی در صنعت ساختمان، بتن‌ریزی دیوارها و اجزای سازه‌ای است، که عملیات بتن‌ریزی از پایین شروع شده و طبق اصول تعریف شده، اکستروژن مواد به صورت لایه‌ای به سمت بالا ادامه پیدا می‌کند. در این مطالعه حرکت نازل به دو صورت در نظر گرفته شده است، حرکت فقط در جهت x-y یا حرکت آزادانه که شامل حرکت به صورت مورب نیز می‌شود. در این بررسی ۴ سطح تخت فرضی به ترتیب دارای ۷، ۸، ۱۴ و

²⁸ Manikandan

²⁹ Toklu

۳۱ دیوار و یک سازه با ۱۷ عضو، از نظر حرکت نازل بدون انجام بتن‌ریزی (T) به کل مسافت طی شده توسط نازل، با استفاده از سیستم کدگذاری، مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴). با افزایش تعداد اعضا و دیوارها، بهینه‌سازی حرکت نازل به دلیل افزایش تصاعدی ترکیب مسیرها، دشوار می‌شود. سطوح در نظر گرفته شده دارای تعدادی رأس و دیوار می‌باشند. هدف از این بررسی یافتن مسیری برای بتن‌ریزی دیوارها با حرکت از یک رأس به رأس دیگر در کم‌ترین زمان ممکن می‌باشد. تفاوت بین مسیرها، در زمانی است که نازل بدون بتن‌ریزی حرکت می‌کند تا به رأسی دیگر برای ادامه عملیات بتن‌ریزی خود برسد، لازم به ذکر است که این زمان به طور مستقیم تابعی از مسافت طی شده می‌باشد. نتایج نشان دادند، همان‌طور که انتظار می‌رفت حرکت نازل تنها در جهت $x-y$ هیچگاه بهتر از حالت دیگر نیست، زیرا در حالت دوم نازل می‌تواند برای رفتن به رأسی دیگر کوتاه‌ترین مسیر را برای خود انتخاب کند، اگرچه در بعضی موارد مسیر طی شده در هر دو حالت یکسان است. به عنوان مثال نمونه‌ی اول با ۸ رأس و ۷ دیوار را در نظر بگیرید. جداول ۱ و ۲ به ترتیب مختصات رئوس و دیوارها و ۶ مورد از مسافت‌های طی شده توسط نازل را به ازای مسیرهای متفاوت نشان می‌دهند. حرف R نشانگر حرکت نازل تنها در راستای $X-Y$ و حرف D به معنای مجازبودن نازل برای حرکت به صورت مورب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این نمونه در صورتی که تنها حرکت در راستای $X-Y$ مجاز باشد، در بهترین حالت نازل مسافتی برابر با ۲۵ واحد را بدون بتن‌ریزی طی خواهد کرد. نتایج نشان دادند که در طی مسیرهای متفاوت، حرکت نازل بدون انجام عملیات بتن‌ریزی می‌تواند تا ۱۸٪ کل مسافت طی شده باشد، که با توجه به بحرانی بودن این مقدار، یافتن یک مسیر بهینه برای عملیات بتن‌ریزی امری ضروری است و در صورتی که این بهینه‌سازی انجام نشود، بیش از ۲۰ درصد از حرکت نازل در یک مسیر، بدون استفاده خواهد بود که بیانگر سطح بالایی از اتلاف وقت و انرژی است. اگر عملیات به صورت سه‌بعدی باشد، مشکلات و محدودیت‌های دیگری می‌تواند یافتن یک مسیر بهینه را دشوارتر کند، مانند: زمان انتظار جهت گیرش سطح پایین قبل از ریختن لایه‌ی بالایی، که نباید کوتاه و یا طولانی باشد تا بتوان از اتصال شیمیایی دو سطح اطمینان حاصل نمود. محاسبات نشان دادند که در موارد خاصی که راه حل مناسبی برای محدودیت‌ها و مشکلات پیش رو وجود ندارد، بهترین کار استفاده‌ی هم‌زمان از چندین نازل است. بهینه‌سازی مسیر برای استفاده از این تکنولوژی یکی از مسائل پر اهمیت در استفاده از این فناوری در شرایط سخت مانند سطح کره‌ی ماه یا سیاره‌ی مریخ می‌باشد.



شکل ۱۴: به ترتیب از راست به چپ نمونه‌های مورد بررسی دارای ۸، ۷، ۱۴، ۳۱ دیوار و سازه‌ی دارای ۱۷ دیوار [۴۱]

جدول ۱: مختصات رئوس و نقاط ابتدایی و انتهایی دیوار [۴۱]

مختصات رئوس			نقاط ابتدایی و انتهایی دیوار		
رأس	جهت X	جهت Y	دیوار	نقطه ابتدایی	نقطه انتهایی
۱	۰	۰	۱	۱	۲
۲	۲۰	۰	۲	۳	۴
۳	۲۵	۰	۳	۵	۶
۴	۳۵	۰	۴	۷	۸
۵	۱۵	۳۰	۵	۱	۷
۶	۳۵	۳۰	۶	۴	۶
۷	۰	۵۰	۷	۶	۸
۸	۳۵	۵۰			

جدول ۲: ۶ مسیر پیشنهادی برای نمونه با ۷ دیوار [۴۱]

جهت حرکت نازل	ترتیب حرکت نازل							کل مسافت طی شده توسط نازل	
	مسیر	۱	۲	۳	۴	۵	۶		۷
مجاز به حرکت تنها در راستای X-Y (R)	۱	۱	۲	۶	۳	۷	-۴	-۵	۲۵
	۲	۱	۵	۴	-۷	۳	-۶	-۲	۴۰
	۳	۱	-۲	۶	-۳	۷	-۴	-۵	۴۵
مجاز به حرکت به صورت مورب (D)	۱	۱	۲	۶	۳	۷	-۴	-۵	۲۵
	۲	۱	۲	۶	-۳	۷	-۴	-۵	۲۵
	۳	۱	۲	۶	۷	-۴	-۵	۳	۳۸/۵۴۱۰

به پیشرفت

با توجه

نیاز صنعتی چهارم،

تکنولوژی و انقلاب

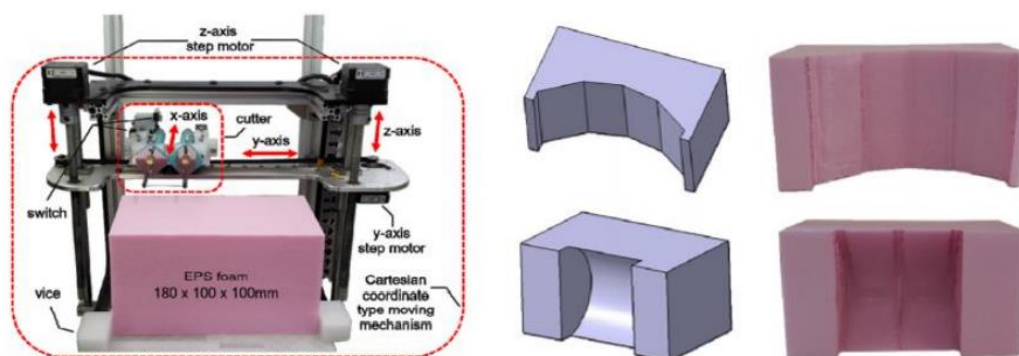
به ساخت سازه‌هایی که از شکل خاصی تبعیت نمی‌کنند و نوآورانه هستند، افزایش یافته است. به خصوص در بخش معماری، که تکنولوژی پرینت سه‌بعدی برای ساخت اتوماتیک و با دخالت حداقل نیروی انسانی در حال پیشروی است. جی یئونگ^{۳۰} و همکارانش [۴۲]، تجهیزات مورد نیاز برای ساخت قطعات FCP^{۳۱} (قطعاتی با شکل دلخواه) را با استفاده از تکنولوژی چاپ سه‌بعدی، با در نظرگیری مشکلاتی از قبیل هزینه و زمان و عدم استفاده مجدد از قالب‌ها در سایر پروژه‌ها، گسترش دادند. تجهیزات مورد نیاز برای تولید این قطعات عبارتند از قالب‌ها و پرینتر سه‌بعدی مناسب برای ساخت قطعاتی با این ویژگی، زیرا نازل‌های مورد استفاده در پرینترهای سه‌بعدی موجود مناسب برای ساخت این قطعات نبودند و باید متناسب با ساخت FCP ها ارتقا پیدا می‌کردند. به عنوان مثال پنل‌هایی که نمای بیرونی موزه ملی قطر را تشکیل می‌دادند، شکل و انحنای متفاوتی داشتند و همین امر هزینه و دستمزد تولید را به دلیل ساخت قالب‌های متنوع متناظر با پنل‌های مختلف افزایش می‌داد و در نهایت باعث ایجاد زباله‌های ساختمانی زیادی می‌شد (شکل ۱۵). در این مطالعه به منظور ایجاد نازلی که برای ساخت این قطعات مورد استفاده قرار گیرد، ابتدا ویژگی‌های الزامی این نازل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و برای هر کدام از آن‌ها طرح اولیه‌ای پیشنهاد گردید و پس از بررسی طرح‌های اولیه ارائه شده، طرح نهایی انتخاب و عملکرد آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. چوب به عنوان روشی سنتی جهت قالب‌بندی مورد استفاده قرار می‌گرفت که از جمله معایب آن می‌توان به عدم امکان استفاده مجدد، افزایش زمان ساخت و دستمزد و ایجاد خطا به دلیل دستی بودن کار اشاره نمود. بعد از آن قالب‌های فایبری برای رفع ضعف قالب‌های چوبی توسعه پیدا کردند، این قالب‌ها جهت ساخت پانل‌های پیچیده بسیار انعطاف‌پذیر بودند اما به دلیل متفاوت بودن ضخامت در سطح

³⁰ Ji-Yeong³¹ Free-form Concrete Panel

مقطع ، باعث بروز خطا در هنگام ساخت می شدند. به منظور کاهش خطا در تولید این پانل های پیچیده یک ماشین پردازش سه بعدی برای تولید قالب های EPS مطابق شکل ۱۶ توسعه داده شد که نیروی انسانی و هزینه ی ساخت را با ساخت اتوماتیک کاهش می داد. همچنین می توان با هدف توانایی استفاده مجدد از قالب ها به قالب های مومی اشاره نمود.

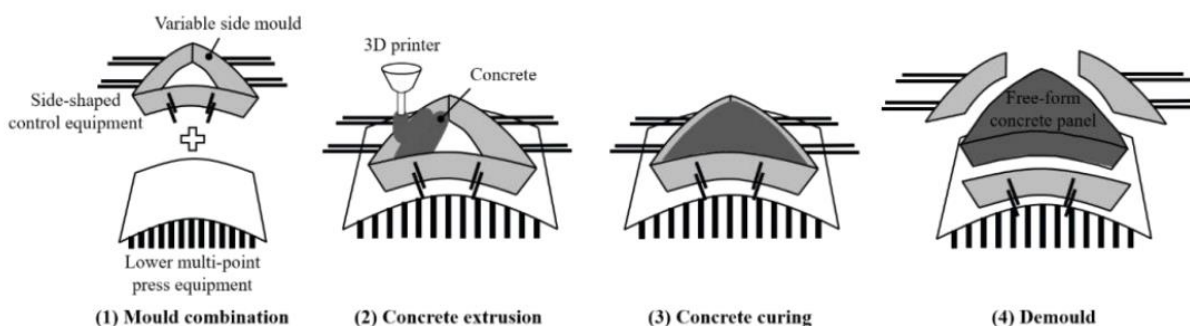


شکل ۱۵: موزه ملی قطر



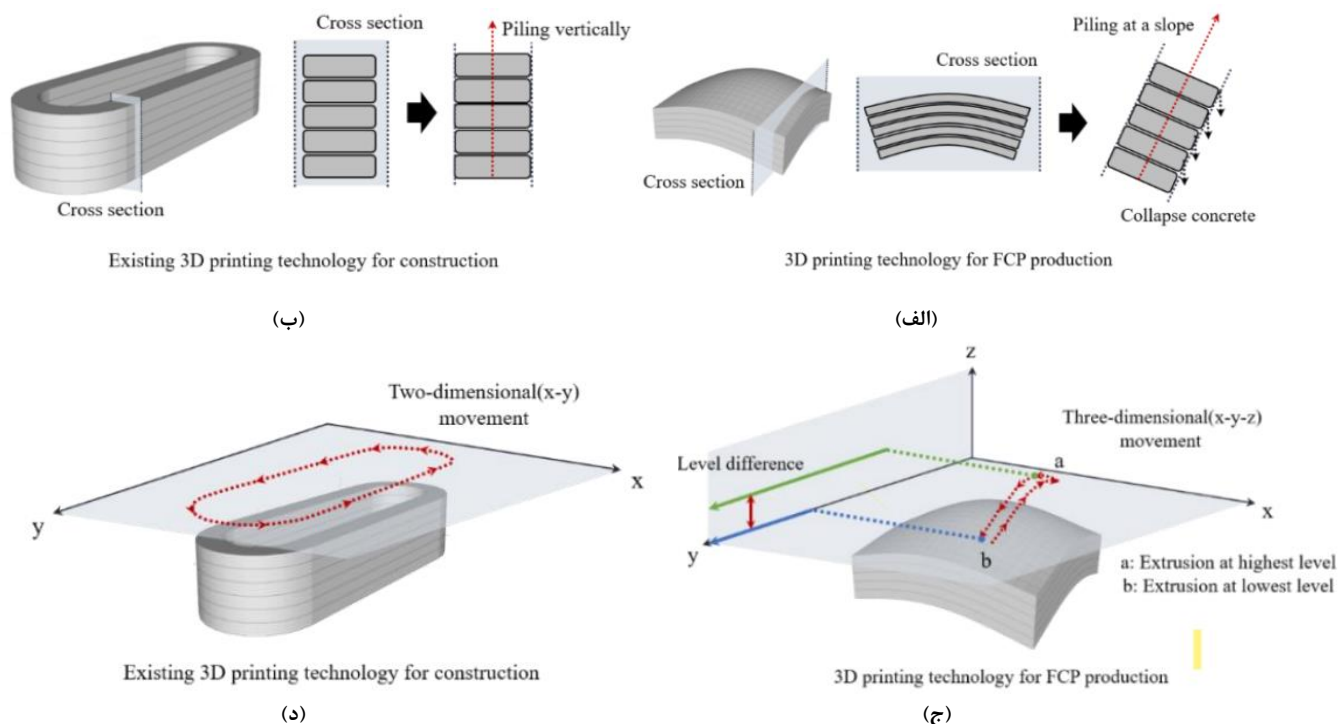
شکل ۱۶: دستگاه اتوماتیک جهت ساخت قالب های EPS

فناوری پرینت سه بعدی در صنعت ساختمان، بتن را جهت ساخت سازه اکستروود می کند، که به مقدار قابل توجهی باعث کاهش هزینه و زمان صرف شده می شود. تجهیزات مورد نیاز برای ساخت قطعات FCP که شامل قالب و تجهیزات چاپ گر سه بعدی می باشد در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در ابتدا ترکیبی از تجهیزات نگهدارنده ی جانبی و زیرین، قالب را تشکیل می دهند، سپس مقدار مشخصی از بتن در این قالب ها اکستروود و عمل آوری شده و در نهایت قالب ها از سطح کار جدا می شوند.



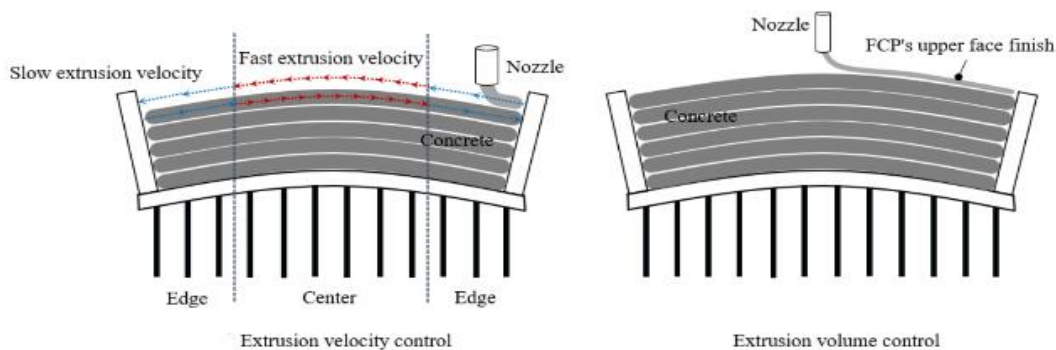
شکل ۱۷: روند تولید قطعات FCP [۴۲]

این قطعات را نمی‌توان تنها با حرکت چاپگر سه‌بعدی در دو بعد X-Y ساخت، زیرا برخلاف فناوری چاپ موجود که مواد را به صورت عمودی اکستروژن می‌کند، چاپگرهای مورد استفاده در ساخت قطعات FCP باید توانایی اکستروژن بتن در سطوح شیب‌دار و ساخت پانل‌های دارای انحنا را داشته باشند و بتوانند علاوه بر حرکت در صفحه‌ی X-Y، همزمان در جهت Z هم بالا و پایین روند (شکل ۱۸). به دلیل امکان فروریختن مواد قبل از سخت‌شدن در تولید قطعاتی با این ویژگی، ما نیاز به تجهیزات نگهدارنده‌ی جانبی جهت حفظ شکل کلی سازه داریم.

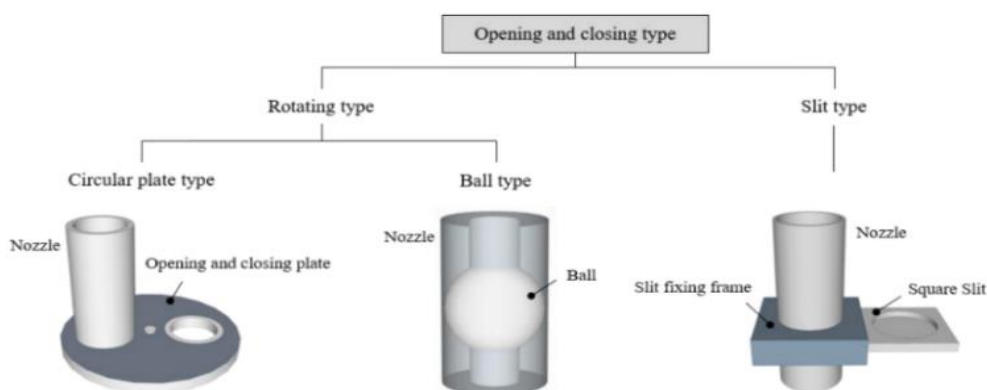


شکل ۱۸: (الف) و (ب): اکستروژن بتن در سطوح صاف و شیب‌دار، (ج) و (د): مسیر حرکت نازل [۴۲]

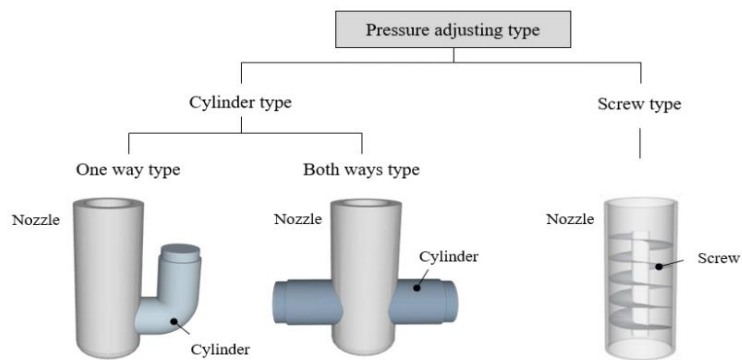
در فناوری پرینت سه‌بعدی موجود، بتن به صورت مداوم اکستروژن شده و نازل نمی‌تواند بتن اکستروژن شده را به صورت دقیق متوقف کند، بنابراین برای ساخت قطعات FCP نمی‌توان از نازل‌های موجود به دلیل فشار شدید بتن اکستروژن شده و عدم توقف دقیق آن، استفاده نمود. به همین دلیل ما نیازمند دستگاهی هستیم که دارای دریچه‌ای، جهت باز و بسته کردن، برای توقف دقیق اکستروژن بتن و پراکنده نمودن فشار ناشی از مسدود شدن خروجی، باشد. یکی دیگر از پارامترهای مود نیاز، قابل تنظیم بودن سرعت اکستروژن بتن است زیرا ما برای اکستروژن دقیق به خصوص در لبه‌ها، که تماس مستقیم با قالب دارند نیازمند سرعت پایین هستیم، علاوه بر این داشتن یک سطح صاف پایانی در این قطعات، نازل باید قادر به تنظیم حجم بتن اکستروژن شده باشد. بنابراین قابل تنظیم بودن قطر نازل بسیار مهم است. این مقاله به عنوان طرح اولیه‌ای برای رفع مشکلات بیان شده مطابق شکل ۱۹ نمونه‌هایی را ارائه کرد. در طرح اولیه‌ی ارائه شده، نازل به دو صورت دو‌آر و مستقیم باز و بسته می‌شود. حالت دو‌آر شامل دو حالت می‌باشد، صفحه‌ای که در انتهای نازل قرار گرفته و با چرخش ۹۰ درجه‌ای خود باعث باز و بسته شدن نازل می‌شود و تویی که با چرخش خود درون لوله‌ی نازل عملیات اکستروژن بتن را متوقف می‌نماید. در حالت دیگر نازل با استفاده از صفحه‌ی مستطیل شکلی که به چپ و راست حرکت می‌کند باز و بسته می‌شود. در طرح‌های ارائه شده فشار نازل به دو صورت استوانه‌ای و پیچشی قابل تنظیم بود. حالت استوانه‌ای با تبعیت از قانون پیستون به صورت یک‌طرفه و دوطرفه و حالت پیچشی با معکوس کردن موتور، باعث تغییر در فشار نازل می‌شد.



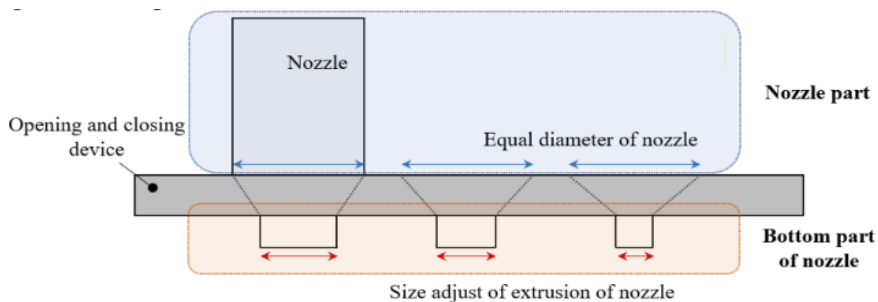
(الف)



(ب)

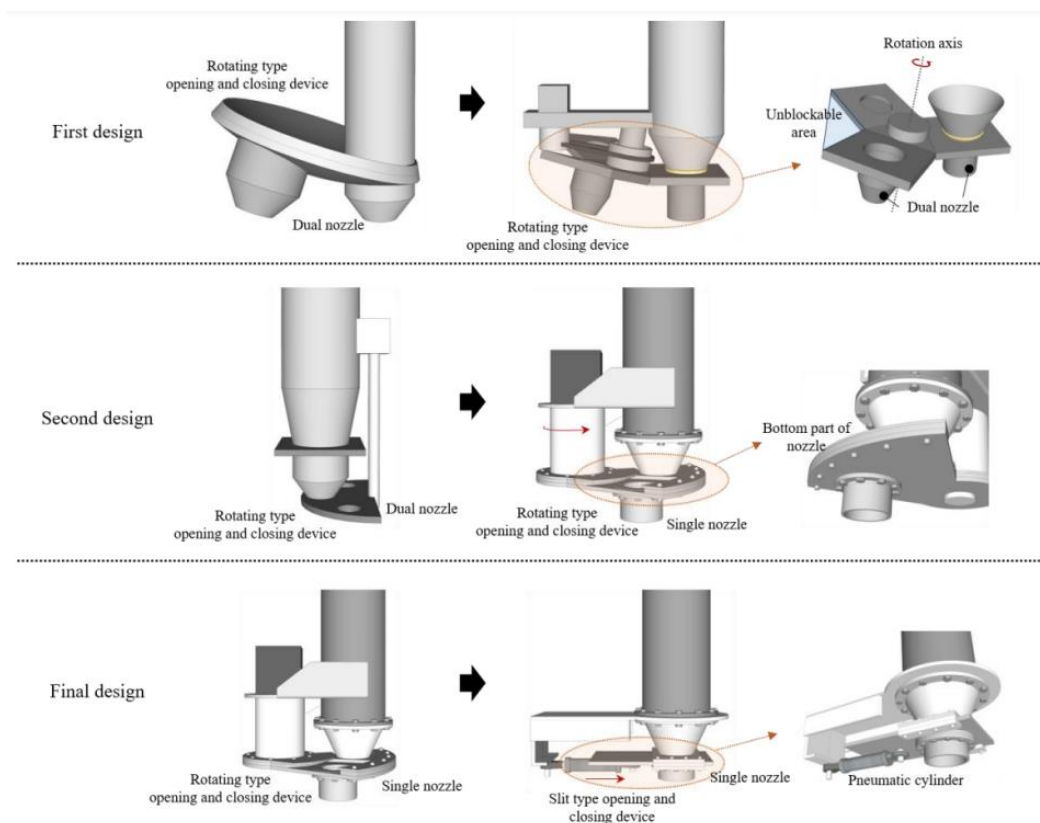


(ج)

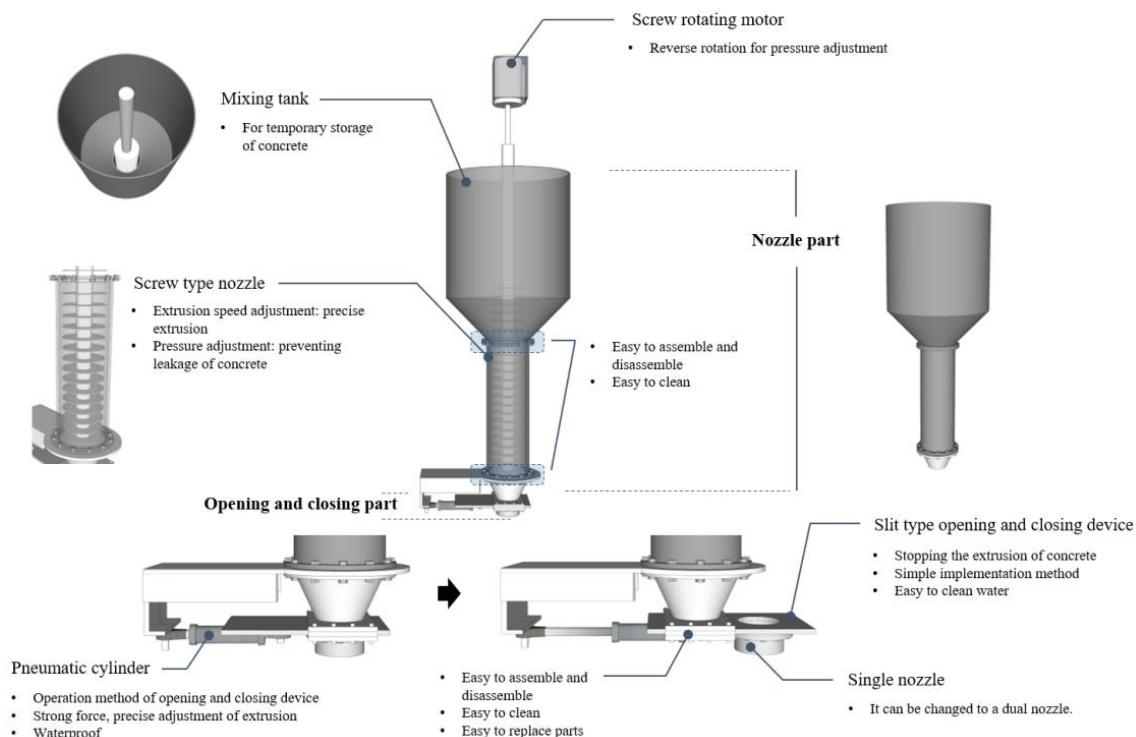


شکل ۱۹: الف) تنظیم سرعت و مقدار اکستروژن بتن، ب) طراحی حالت باز و بسته شدن نازل، ج) طراحی حالت دارای قابلیت تنظیم فشار، د) تنظیم قطر لوله نازل [۴۲]

به دلیل اکستروژن مداوم بتن توسط پمپ، اکستروژن دقیق بتن برای تولید قطعات FCP با استفاده از پمپ امکان پذیر نیست. بنابراین پیشنهاد شد در صورت استفاده از نازل پیشی به منظور تنظیم سرعت اکستروژن با توجه به تعداد چرخش‌ها، از یک مخزن جهت ذخیره موقت بتن استفاده شود. همچنین با توجه به اینکه هر بار برای تنظیم قطر خروجی نازل، قطر لوله‌ی نازل را نمی‌توان تغییر داد، دستگاه به گونه‌ای طراحی شده است که قطر لوله‌ی نازل به صورت ثابت در نظر گرفته شود و تنها قطر خروجی آن در پایین سیستم باز و بسته شدن نازل، قابل تنظیم باشد (شکل ۱۹-د). نتایج حاصل از بررسی استانداردهایی از قبیل امکان تمیز کردن، نگهداری و کارایی طرح‌های ارائه شده نشان دادند که سیستم‌هایی که در آن‌ها نازل توسط حرکت صفحه‌ی مستطیلی و یا با استفاده از چرخش تویی در درون لوله نازل باز و بسته می‌شود، به ترتیب باعث جریان بتن در بین فریم و صفحه، و بین نازل و گوی می‌شوند، که علاوه بر سخت تمیز شدن مشکلات مکانیکی زیادی را در پی خواهد داشت. در حالی که از صفحه‌ی دایره‌ای برای باز و بسته شدن نازل استفاده می‌شود، به دلیل سطح تماس زیاد در هنگام چرخش صفحه، لایه‌ی سخت نشده‌ی بتن تخریب می‌شود. برای ارائه‌ی طرح نهایی، مطابق شکل ۲۰ ابتدا سیستمی دارای صفحه‌ی دایره‌ای قابل چرخش، جهت باز و بسته کردن نازل، همراه با دو نازل انتخاب شد. به منظور جلوگیری از تخریب سطح بتن سخت نشده که در تماس با این صفحه است، صفحه مورد نظر به صورت شیب دار در نظر گرفته شد. از آنجایی که محور چرخش این صفحه روی یک سطح شیب دار قرار دارد، اجرای آن را مشکل می‌سازد. همچنین به منظور به حداقل رساندن سطح تماس بتن اکستروژده و صفحه‌ی مورد نظر و اجرای مکانیکی آسان در طرح ثانویه، به جای استفاده از یک صفحه‌ی دایره‌ای کامل، از سیستمی مشابه با پره‌های پنکه استفاده شد. با توجه به اینکه عملکرد نازل دوگانه یک نیاز ثانویه است، ابتدا مطالعات خود را به یک نازل محدود کردند. لازم به ذکر است، اکستروژن دقیق نه تنها به تنظیم کمیّت و سرعت اکستروژن، بلکه به توقف دقیق و سریع نیازمند است.



شکل ۲۰: روند طراحی نازل [۴۲]



شکل ۲۱: طراحی نهایی نازل [۴۲]

علازغم اینکه صفحه‌ی طراحی شده در گام ثانویه، اکستروژن دقیق را امکان پذیر می‌کند، اما قرارداد موتور که نیروی لازم برای چرخاندن این صفحه را تأمین کند دشوار است؛ به خصوص با قرارگیری این موتور در نزدیکی نازل ممکن است با ورود آب به آن در هنگام تمیز کردن نازل، دستگاه دچار اختلال شود. به همین دلیل در طرح نهایی ارائه شده مطابق شکل ۲۱، از صفحه‌ی مستطیل شکل برای باز و بسته کردن نازل استفاده شد. در طراحی نهایی ارائه شده، با استفاده از نازل پیچشی می‌توان سرعت و فشار اکستروژن بتن را تنظیم کرد و هنگام مسدود نمودن خروجی نازل از طریق چرخش معکوس موتور، از نشت بتن جلوگیری نمود. نتایج نشان دادند که طرح نهایی ارائه شده الزامات گفته شده را برآورده می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری و چشم انداز آینده

به دلیل پتانسیل فرآیند چاپ سه بعدی در ایجاد تحول، در شیوه‌های ساخت و ساز مرسوم و قطعاتی که دارای انحنا و اشکال پیچیده‌ای هستند، دوره‌ی جدیدی را در صنعت ساخت و ساز آغاز نموده است. استفاده از این فناوری در موقعیت‌های خطرناک به ویژه مقاصد نظامی، به دلیل حذف نیروی انسانی لازم، شرایط ایده‌آلی را برای صنعت ساخت و ساز فراهم خواهد کرد. همچنین ترکیب این فناوری با سیستم‌های کنترل و مدیریت ساخت و ساز، می‌تواند باعث کاهش برخی از چالش‌های کلیدی یک پروژه‌ی ساختمانی مانند، برنامه‌ریزی، ایمنی، نظارت و مدیریت شود. در دهه‌های اخیر فناوری چاپ سه بعدی بتن گامی رو به رشد برداشته است، که بهینه‌سازی طراحی را در زمینه‌ی ساخت و ساز فراهم می‌سازد و انتشار کربن را کاهش می‌دهد. اما هنوز این فناوری حاوی نکات بسیار زیاد و سوالات حل نشده می‌باشد که باید بررسی شوند، و امید است که به دلیل افزایش بلوغ این فناوری، در طیف وسیع تری مورد استفاده قرار گیرد.

- یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در این فناوری توسعه‌ی موادی است که قابلیت اکستروژن پذیری مداوم را داشته باشند، به طوری که در اثر انباشته شدن لایه‌ها بر روی یکدیگر، تغییر شکل قابل توجهی ایجاد نشود. با وجود اینکه

برخی از معیارهای هدف، نظیر به حداکثر رساندن مقاومت فشاری و جریان پذیری در تضاد با هم هستند، با این حال با تغییر در نسبت‌های طرح اختلاط و استفاده از مواد افزودنی، مانند کندگیرکننده و فوق روان کننده، می‌توان به ترکیباتی بهینه دست یافت، که نه تنها عملکرد مورد نیاز را داشته، بلکه دارای ویژگی‌های مطلوب جهت استفاده در فناوری پرینت سه‌بعدی نیز باشد. همچنین دوری از محصولات سیمانی سنتی با انتشار کربن بالا و استفاده از بتن‌های سازگار با محیط‌زیست مانند بتن ژئوپلیمر و حرکت به سمت جایگزین‌های جدید نظیر استفاده از مواد قابل بازیافت از پروژه‌های ساختمانی، از جمله موضوعاتی هستند که مورد توجه محققان می‌باشند. برای نمونه بتن ژئوپلیمری حاوی پودر ضایعات آجر، انرژی مصرف‌شده و انتشار کربن را، ۶۰٪ تا ۸۰٪ در مقایسه با بتن دارای سیمان پرتلند معمولی، کاهش می‌دهد.

- یکی از حوزه‌هایی که سطح وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است، استفاده از الیاف در بتن، جهت مسلح کردن آن می‌باشد. عواملی مانند کسر حجمی الیاف به کار گرفته شده، مشخصات مکانیکی و جهت‌گیری آن‌ها بر روی مقاومت و ویژگی‌های نمونه‌های ساخته شده تأثیرگذار می‌باشند، به طوری که می‌توانند در مواردی مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌ها را به ترتیب تا ۲۷٪ و ۲۶٪ افزایش دهند. پروژه‌های اخیر ساخته شده با استفاده از این فناوری نشان می‌دهند که، این صنعت در حال گسترش افق‌های خود و حرکت به سمت ساختمان‌هایی با مقیاس بزرگ است، که متناسب با نیازهای رو به رشد مسکن در سرتاسر جهان می‌باشد، در نتیجه روش‌های مبتنی بر به کارگیری آرماتورهای فولادی، جهت مقاومت در برابر بارگذاری واقعی یک سازه، توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال، استفاده از شبکه فولادی عمود بر جهت چاپ لایه‌ها، در صورت داشتن همپوشانی کافی در مرز بین دو لایه، می‌تواند مقاومت خمشی را ۱۷۰٪ تا ۲۹۰٪ افزایش دهد. ساخت دستگاه‌هایی که همزمان با عملیات چاپ بتن، عملیات مسلح سازی را نیز به صورت خودکار انجام دهند، از جمله اهداف این فناوری در آینده می‌باشد.
- با توجه به اینکه کیفیت سطوح چاپ شده و پیوند بین لایه‌ای متأثر از هندسه‌ی نازل مورد استفاده می‌باشند، راهکارهای متفاوتی جهت بهبود شرایط و عوامل ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از نازل با هندسه‌ی متغیر، با هدف دستیابی به هندسه‌ی اکستروژن مناسب در هر لایه و افزایش کیفیت سطح نهایی اشاره نمود.

مراجع

- [^۱] Menna, C., Mata-Falcón, J., Bos, F. P., Vantghem, G., Ferrara, L., Asprone, D., ... & Kaufmann, W. (2020). Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. *Cement and Concrete Research*, 133, 106079.
- [^۲] Mechtcherine, V., Bos, F. P., Perrot, A., da Silva, W. L., Nerella, V. N., Fataei, S., ... & Roussel, N. (2020). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials—production steps, processes, and their underlying physics: a review. *Cement and Concrete Research*, 132, 106037.
- [^۳] Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Gibb, A.G. and Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), pp.1221-1232.
- [^۴] Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N. And Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6. pp. 14-22.
- [^۵] Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533.
- [^۶] Verma, A., Shukla, M., & Sahu, A. K. (2013). Use of superplasticizers in concrete and their compatibility with cements. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 153.
- [^۷] Demyanenko, O., Sorokina, E., Kopanitsa, N. and Sarkisov, Y. (2018). Mortars for 3D printing. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, Vol. 143, 1-8.

- [۸] Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., ... & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction—A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105745.
- [۹] E. Australia, National waste report, Available from: <https://www.environment.gov.au/protection/waste/national-waste-reports/2020>, 2020.
- [۱۰] Diaz-Loya, I., Juenger, M., Seraj, S., & Minkara, R. (2019). Extending supplementary cementitious material resources: Reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans. *Cement and concrete composites*, 101, 44-51.
- [۱۱] Tapas, M. J., Thomas, P., Vessalas, K., Nsiah-Baafi, E., Martin, L., & Sirivivatnanon, V. (2023). Comparative study of the efficacy of fly ash and reactive aggregate powders in mitigating alkali-silica reaction. *Journal of Building Engineering*, 63, 105571.
- [۱۲] Wong, C. L., Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Yap, S. P. (2020). Mechanical strength and permeation properties of high calcium fly ash-based geopolymer containing recycled brick powder. *Journal of Building Engineering*, 32, 101655.
- [۱۳] Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2023). 3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing brick waste. *Cement and Concrete Composites*, 104943.
- [۱۴] Asprone, D., Menna, C., Bos, F. P., Salet, T. A., Mata-Falcón, J., & Kaufmann, W. (2018). Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 112, 111-121.
- [۱۵] Li, Z., Wang, L., Ma, G., Sanjayan, J., & Feng, D. (2020). Strength and ductility enhancement of 3D printing structure reinforced by embedding continuous micro-cables. *Construction and Building Materials*, 264, 120196.
- [۱۶] Xiao, J., Chen, Z., Ding, T., & Zou, S. (2022). Bending behaviour of steel cable reinforced 3D printed concrete in the direction perpendicular to the interfaces. *Cement and Concrete Composites*, 125, 104313.
- [۱۷] Jin, Y., Zhou, X., Chen, M., Zhao, Z., Huang, Y., Zhao, P., & Lu, L. (2022). High toughness 3D printed white Portland cement-based materials with glass fiber textile. *Materials Letters*, 309, 131381.
- [۱۸] Wang, L., Ma, G., Liu, T., Buswell, R., & Li, Z. (2021). Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails. *Cement and Concrete Research*, 148, 106535.
- [۱۹] Vantighem, G., De Corte, W., Shakour, E., & Amir, O. (2020). 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Automation in Construction*, 112, 103084.
- [۲۰] Liu, M., Wang, L., Ma, G., Li, W., & Zhou, Y. (2023). U-type steel wire mesh for the flexural performance enhancement of 3D printed concrete: A novel reinforcing approach. *Materials Letters*, 331, 133429.
- [۲۱] Marchment, T. and Sanjayan, J. (2020). Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing. *Automation in Construction*, 109, pp.102992.
- [۲۲] Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 13(1), 5-19.
- [۲۳] Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2018, September). Large scale testing of digitally fabricated concrete (DFC) elements. In: *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Cham: Springer, 129-147.
- [۲۴] Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C., & Mercuri, V. (2018). 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*, 165, 218-231.
- [۲۵] Lindemann, H., Gerbers, R., Ibrahim, S., Dietrich, F., Herrmann, E., Dröder, K., ... & Kloft, H. (2018, September). Development of a shotcrete 3D-printing (SC3DP) technology for additive manufacturing of reinforced freeform concrete structures. In: *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Cham: Springer, 287-298.
- [۲۶] Kloft, H., Hack, N., Mainka, J., Brohmann, L., Herrmann, E., Ledderose, L., & Lowke, D. (2019). Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP). *Bautechnik*, 96(12), 929-938.
- [۲۷] Hack, N., & Lauer, W. V. (2014). Mesh-mould: robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Architectural Design*, 84(3), 44-53.
- [۲۸] Wolfs, R. J., Bos, F. P., van Strien, E. C., & Salet, T. A. (2018). A real-time height measurement and feedback system for 3D concrete printing. In: *High Tech Concrete Where Technology and Engineering Meet*. Cham: Springer, 2474-2483.
- [۲۹] Severson, B. (2020). Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-story apartment building and an incredible home, [online]. Available at: <https://3dprint.com/38144/3Dprinted-apartmentbuilding/> (accessed on 02.05.2020).

- [۳۰] Apis Cor. Apis Cor—Construction technology. (2020). [online] Available at: <http://apiscor.com/en/faq/tecnologiya-stroitelstva> (accessed on 02.05.2020).
- [۳۱] Arunothayan, A. R., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S. H., & Sanjayan, J. (2020). Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Construction and Building Materials*, 257, 119546.
- [۳۲] Bos, F. P., Bosco, E., & Salet, T. A. M. (2019). Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(2), 160-174.
- [۳۳] Luhar, S., Suntharalingam, T., Navaratnam, S., Luhar, I., Thamboo, J., Poologanathan, K., & Gatheeshgar, P. (2020). Sustainable and renewable bio-based natural fibres and its application for 3D printed concrete: A review. *Sustainability*, 12(24), 10485.
- [۳۴] Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Burger, J., LloretFritsch, E., Reiter, L., ... & Kaufmann, W. (2020, July). Aligned interlayer fibre reinforcement and post-tensioning as a reinforcement strategy for digital fabrication. In: *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Cham: Springer, 622-631.
- [۳۵] Ding, T., Xiao, J., Zou, S. and Zhou, X. (2020). Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. *Composite Structures*, 254, pp.112808.
- [۳۶] Pham, L., Tran, P. and Sanjayan, J. (2020). Steel fibers reinforced 3D printed concrete: Influence of fiber sizes on mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 250, pp.118785.
- [۳۷] Wu, Z., Shi, C., He, W. and Wang, D. (2017). Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. *Cement and Concrete Composites*, 79, pp.148-157.
- [۳۸] Arunothayan, A.R., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S.H., Sanjayan, J.G. and Khayat, K.H. (2021). Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing. *Cement and Concrete Research*, 143, pp.106384.
- [۳۹] Lao, W., Li, M., & Tjahjowidodo, T. (2021). Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing. *Additive Manufacturing*, 37, 101638.
- [۴۰] Manikandan, K., Jiang, X., Singh, A.A., Li, B. and Qin, H. (2020). Effects of nozzle geometries on 3D printing of clay constructs: Quantifying contour deviation and mechanical properties. *Procedia Manufacturing*, 48, pp.678-683.
- [۴۱] Toklu, Y.C., Bekdaş, G. and Geem, Z.W. (2020). Harmony search optimization of nozzle movement for additive manufacturing of concrete structures and concrete elements. *Applied Sciences*, 10(12), pp.4413.
- [۴۲] Ji-Yeong, Y. (2021). Development of 3D concrete extrusion nozzle for producing free-form concrete panels. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(6), pp.427-436.