

## ویژگی مواد برای سازه‌های ساختمانی پرینت سه بعدی با چاپ افزودنی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۷

کد مقاله: ۲۰۱۲۹

علیرضا مشبکی اصفهانی<sup>۱\*</sup>، شایان شیرمحمدی<sup>۲</sup>،

نیلوفر عرب زاده<sup>۳</sup>، لیلی زمانی<sup>۴</sup>

### چکیده

چاپ سه بعدی یک فناوری نویدبخش برای نصب اشیاء ساختمانی است. در سرتاسر دنیا هر لحظه نمونه‌های اولیه جدیدی با استفاده از این روش ساخته می‌شود. چاپ سه بعدی به عنوان فناوری در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند برای چاپ سازه‌ها به صورت خودکار در ماه یا مریخ مورد استفاده قرار گیرد. مواد اولیه‌ای که می‌توان با چاپ سه بعدی استفاده کرد؛ باید الزامات اساسی را برای مواردی که در ساخت و ساز استفاده می‌شود برآورده کند. این بدان معناست که، اجزای ملات‌های چاپ از موادی ساخته شده‌اند که به راحتی در محل ساخت و ساز نزدیک به آن دسترسی دارند و می‌توانند مجدداً استفاده شوند. هزینه چاپ اشیاء ساختمانی با توجه به الزامات با هزینه‌های ساختمان سنتی که در حال حاضر موجود است قابل مقایسه است. با این حال، تکنیک چنین مخلوط‌هایی برای اینکه پرینت سه بعدی رقابتی بماند، نباید خیلی زیاد باشد. هر چند افزودنی تکنیک‌های چاپ برای تهیه چاپگر به ملات اختصاصی نیاز دارد. مشخصه این گونه ملات‌ها: زمان گیرش، مقاومت فشاری، قابلیت پیگیری در سیستم چاپ، ثبات شکل هر لایه چاپی، کنترل میزان هیدراتاسیون برای اطمینان از پیوند با لایه بعدی، قابلیت‌های قابل استفاده مجدد، در دسترس بودن مواد خام در روش‌های سنتی ساختمان، اجزای ملات باید قابل بازیافت و فرآیند چاپ نباید بر افراد و محیط تاثیر منفی بگذارد. تمام خواص ملات چاپ توسط دستگاه برای روش کاربرد افزودنی تعیین می‌شود. در این مقاله بررسی مواد موجود مورد استفاده برای فناوری چاپ سه بعدی در محل ساخت و ساز ارائه شده است. مواد ارائه شده از نظر الزامات فناوری مصالح ساختمانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با توجه به کمبود اطلاعات دقیق در خصوص خواص مواد اولیه، نتایج این تحلیل ممکن است در طراحی مخلوط بتن جدید در فناوری چاپ سه بعدی برای ساخت و ساز استفاده گردد.

واژگان کلیدی: سازه، پرینت سه بعدی، چاپ افزودنی

۱- دکترای معماری، عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران (مسئول مکاتبات) [a.moshabaki@pum.ac.ir](mailto:a.moshabaki@pum.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری دیجیتال، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری دیجیتال، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری دیجیتال، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

چاپ سه بعدی فرآیندی برای ساخت اجسام فیزیکی و سه بعدی بر اساس مدل کامپیوتری است. در ابتدا از این فناوری برای ساخت نمونه‌های اولیه دستگاه و عناصر ماشین استفاده می‌شد اما توسعه فناوری چاپ سه بعدی روند چشم‌انداز طراح را تسریع بخشید؛ فناوری چاپ سه بعدی استریولیتوگرافی تجاری و در سال ۱۹۸۶ توسط چارلز هال به ثبت رسید؛ روش او از رزین‌های فتوپلیمری سخت شونده موضعی توسط پرتو نور لیزر قوی بود. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) در سال ۱۹۸۹ کارل دکارد اختراع زینترینگلیزری انتخابی (SLS) را به ثبت رساند که بر اساس سخت شدن مواد توسط پرتو لیزر بود، این محلول بسیار شبیه به استریولیتوگرافی است، با این حال باید از مکمل‌های پودری استفاده شود. محبوب‌ترین فناوری چاپ سه بعدی (Modeling Deposition Fused(FDM)) است که در سال ۱۹۹۲ ثبت اختراع شد. در روش FDM مواد ترموپلاستیک توسط نازل چاپگر گرم می‌شود. نازل و دما جریان مواد مذاب را کنترل می‌کند و آبجکت لایه به لایه ایجاد می‌شود. ابتدا کانتور شی ترسیم می‌شود، سپس ناحیه ایجاد شده باید پر شود. برای حل مشکل عناصری که نیاز به پشتیبانی دارند از این چاپ اضافی استفاده می‌کنند. یک سر چاپ مواد ساختمانی را فراهم می‌کند، در حالی که دومی موادی را برای پشتیبانی فراهم می‌کند که می‌تواند محلول در آب باشد یا از عنصر چاپی جدا شود. FDM از مواد ترموپلاستیک، با مقاومت مکانیکی بالا، مقاومت حرارتی و دوام شیمیایی استفاده می‌کند. چاپ سه بعدی (3DP) لایه نازکی از کامپوزیت پودری را که به وسیله اهرمی از سر چاپگر که در صفحه افقی قرار گرفته است اسپری می‌شود. وقتی لایه به پایان رسید، غلتک لایه جدیدی از مواد پودری را روی میز دستگاه پایین می‌آورد. در این فناوری نیازی به پشتیبانی اضافی نیست. ضخامت جسم و استحکام آن اجازه می‌دهد تا با خیال راحت آن را از محفظه کار خارج کرد و همچنین امکان ساخت سازه‌های پیچیده را فراهم می‌کند. اجسام ساخته شده با روش (3DP) شکننده و حساس به آسیب هستند. برای افزایش استحکام مکانیکی آنها، تیمار مناسب انجام می‌شود و سپس از موادهای محافظ UV استفاده می‌شود. (Sobotka, Wrońska, budownictwie, 2015)

در حال حاضر بسیاری از ساخت و سازها در سراسر جهان با فناوری چاپ سه بعدی ساخته می‌شوند و چین پیش‌تاز این صنعت است. اما اطلاعات کافی در مورد فرمول‌ها و مخلوط‌های مورد استفاده برای فناوری چاپ وجود ندارد. بنابراین، نویسندگان، بر اساس تجزیه و تحلیل موجود و تجزیه و تحلیل مخلوط‌های بتن، سعی کردند ویژگی‌های مورد نیاز مصالح و ملات‌ها را ترکیب کنند که توانایی استفاده از آن را به عنوان مواد تامین کننده چاپگرها و برآورده کردن الزامات کلیدی مانند مقاومت فشاری و خمشیرا فراهم کند. این مقاله شامل توضیحاتی در مورد اجراها و مواد مورد استفاده مواد اولیه و مخلوط ملات می‌باشد و همچنین تأثیر اجزای ملات بر خواص ملات تازه و سخت شده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

## ۲- فرآیند چاپ سه بعدی در ساخت و ساز

فرآیند چاپ عنصر آماده شامل هفت مرحله است. مرحله اول طراحی کامپیوتر مدل سه بعدی گرافیکی (CAD) است. مرحله بعدی تبدیل مدل آماده شده به فرمتی است که با چاپگر سه بعدی قابل درک است. معمولاً این فرمت STL است. قبل از چاپ، چاپگر برای کار و فایل طراحی برای تنظیم مقیاس چاپ جهت اقلام چاپ شده سازگار می‌شود. مرحله بعدی پرینت سه بعدی شی است. مواد طبق مدل سه بعدی لایه به لایه با ضخامت مشخص گذاشته می‌شود. هنگامی که فرآیند چاپ به پایان رسید، چاپگر باید تمیز شود. آخرین مرحله تکمیل شی است. (Apis cor, 2018) اتوماسیون فرآیندهای ساختمان می‌تواند منجر به کاهش نیروی کار شود که باعث افزایش ایمنی در محل ساخت و ساز، کاهش زمان ساخت و هزینه‌های تولید می‌شود. علاوه بر این، توسعه مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و استفاده از اطلاعات دیجیتال، فرآیند اتوماسیون و تولید در ساخت و ساز را ساده می‌کند. در حال حاضر پروژه‌های متعددی در زمینه ایجاد سازه‌ها در فناوری افزودنی وجود دارد که عبارتند از: Apis-Cor، کانتور کرافت، D-Shape، چاپ بتن شرکت روسی Apis-cor دارای چاپگری است که می‌تواند در محل ساخت و ساز کار کند. Apis (cor, 2018) اندازه چاپگر ۴ متر / ۶،۱ متر / ۵،۱ متر و وزن آن ۲ تن است (شکل ۱). چاپگر روی یک پایه (یا) قرار می‌گیرد. به یک سیستم پشتیبانی خاص برای آماده سازی زمین نیاز ندارد. کار دستگاه مانند جرتقیل ساختمانی است، که به چاپگر اجازه می‌دهد تا اشیا را در داخل و خارج بچرخاند و چاپ کند. فضای کار چاپگر ۱۳۲ مترمربع است. مخلوط برای چاپ بر اساس سیمان است.

مواد سخت شده نهایی از چنین دستور العملی خواصی مانند بتن استاندارد سی ۱۶ و سی ۲۰ را نشان می‌دهد. در این پروژه از ژئوپلیمرها و بتن الیافی نیز استفاده شده است. فونداسیون ابتدا با کشیدن کانتور ایجاد می‌شود، سپس تقویت شده و با بتن پر می‌شود. پس از انجام فونداسیون و عایق کاری، خطوط دیوارها به صورت زیگزگاک در داخل دیوار چاپ و تقویت می‌شود. همکاری با شرکت Geobeton دستور العمل‌های جدیدی برای استفاده از بتن در صنعت ساختمان به ارمغان می‌آورد. ژئوسمنت TM از دو جزء تشکیل شده است: سیمان پودری ژئوپلیمر و معرف مایع - ژئوسیلیکات. علاوه بر این، این شرکت بتن ژئوپلیمر خشک را ارائه می‌دهد که در ساخت و ساز در مقادیر سفارشی برای تولید بتن تحویل داده می‌شود. ساختار ژئوپلیمری و سطح بالای مزوپوروزیت جریان هوا را از طریق مواد وارد می‌کند، بنابراین عایق، در برابر یخ زدگی و مقاوم در برابر آتش است. برخی از خواص

قابل تنظیم هستند، مانند تیکسوتروپی یا اسلامپ، زمان تنظیم در محدوده بسیار گسترده است، مقداری تا بالای ۱۸۰ دقیقه. بتن‌های ژئوپلیمر نشان دهنده مقاومت فشاری بالا، بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال و مقاومت شیمیایی در قلیایی‌ها و اسیدها هستند. بر اساس یک چسب ژئوپلیمر، ترکیبات مختلف ژئو بتن توسعه و آزمایش که این آزمایش‌ها در ایرکوتسک روسیه انجام شد. D-Shape, 2018)



عکس ۱- فرآیند چاپ ارائه شده در فوریه ۲۰۱۷ در شهر استوپینو با چاپگر سه بعدی ساخت و ساز (Apis cor, 2018)

پروژه Crafting Contour توسط تیم پروفیسور بهرخ کلشنویس از دانشگاه کالیفرنیا جنوبی توسعه یافته است. وسیله‌ای که بر روی قاب جرثقیل نصب شده است، بازوی اضافی ربات کانال‌های مناسبی را برای تامین مدیا و عناصر ساختاری افقی که چاپ آن‌ها دشوار است، نصب می‌کند. این فناوری چاپ سه بعدی شامل کاربرد افزودنی ملات سیمان با سر مالهای است. استفاده از مالها اجازه می‌دهد تا ناهمواری‌های سطوح جانبی را که در نتیجه افزودن لایه‌ها ایجاد می‌شود، صاف کند. در حال حاضر قادر به ساخت افزودنی یک دیوار ساختاری با اندازه کامل، با حداقل مصرف مواد است. (Sobotka, Wrońska, budownictwie, 2015 Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012)

چاپگر D-Shape می‌تواند ساختارهای یکپارچه را چاپ کند (شکل ۲). این چاپگر با استفاده از پودر، فرآیند رسوب را با استفاده از یک چسب خشک می‌کند. (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012) در این روش فرآیند چاپ شامل چیدمان با ضخامت مناسب مصالح ساختمانی، متراکم شدن لایه و استفاده از یک اهرم توسط نازل نصب شده بر روی سطح شیب دار می‌باشد. پس از اتمام فرآیند چاپ، شی چاپ شده از بستر پودر شل استخراج می‌شود. (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012) در فرآیند چاپ میکرو بتن سیمانی از موادی با دانه بندی‌های مختلف استفاده می‌شود. از ۰.۲ تا ۵ میلی‌متر و اتصال مواد را می‌توان با محلول‌های آب یا سیمان انجام داد. (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012) ماده خام بی اثر ممکن است: سنگ خرد شده، ماسه، شن، سنگدانه‌های رسی خرد شده و سرامیک باشد. همچنین می‌توان از مواد بازیافتی مانند: شیشه، خرده چوب خرد شده، پلاستیک، مواد تخریب، لاستیک، گچ یا مخلوطی از دسته‌های ذکر شده در بالا که تقویت شده استفاده کرد و توسط الیاف: طبیعی، شیشه، بازالت، پلیمر یا فولاد، به عنوان چسب مایع و از معرف‌های دسته‌های بی اثر: سوسپانسیون‌های مبتنی بر سیمان پرتلند، سیمان سورل یا ژئوپلیمرها، پرایمرهای پلیمری (اورتان، سیلوسان، وینیل با نمایش فنولیک PPC, PBB, اهرم) استفاده می‌شود. (D-Shape, 2018)



شکل ۲- چاپگر (D-Shape در سمت چپ) و شی چاپ شده - صخره مرجانی (در سمت راست) (D-Shape, 2018)

آزمون‌های پروژه (چاپ بتن) توسط دانشگاه لافورو (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012) انجام می‌شود. نمونه اولیه دستگاه چاپ از قاب فولادی با ابعاد ۴.۵ متر طول، ۴.۴ متر عرض، ۴.۵ متر ارتفاع ساخته شده و سر چاپ بر روی نوار افقی متحرک نصب شده است. (شکل ۳) فرآیند چاپ را می‌توان در سه مرحله توصیف کرد: آماده سازی داده‌ها، آماده سازی مخلوط بتن و چاپ؛ مخلوط آماده شده در پمپ روی سکوی خارجی قرار می‌گیرد تا از طریق نازل چاپ با قطر ۹ میلی‌متر تغذیه شود. راه حل پیشنهادی مخزن بافر کوچکی را فراهم می‌کند که در بالای چاپگر قرار می‌گیرد. (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012) در این پروژه از دو نوع متریال برای چاپ استفاده می‌شود. مواد مبتنی بر سیمان برای ساخت عناصر استفاده می‌شود، در حالی که مواد مبتنی بر گچ به عنوان ماده پشتیبانی برای عنصر چاپی عمل می‌کند. در این پروژه از مواد گچ به دلیل حذف آسان مواد، استحکام مکانیکی کم و بازیافت ۱۰۰٪ استفاده شده است. افزودنی‌های کندکننده به عنوان اجزای مخلوط اضافه می‌شوند تا زمان مورد نیاز را فراهم کنند و کارایی ثابتی از مواد در طول تولید به دست آورند. (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012)



شکل ۳- سیستم چاپ بتن (در سمت چپ) و نیمکت چاپی (در سمت راست) (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012)

تحقیق شرح داده شده در مقاله (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012) از ماسه‌ای با حداکثر اندازه دانه ۲ میلی‌متر استفاده می‌کند. به عنوان اجزای اتصال از سیمان CEM I ۵,۵۲، خاکستر بادی و غبار سیلیس غیر فشرده استفاده شده است. برای اجزای خشک مخلوط آب به همراه فوق روان کننده مبتنی بر پلی کربوکسیلات برای افزایش کارایی و استحکام مواد اضافه و برای به دست آوردن زمان باز مناسب، کندکننده بر پایه آمینوتریس (متیلن فسفونیک اسید)، اسید سیتریک و فرمالدئید اضافه شده است. مطالعات نیز همچنین با استفاده از یک شتاب دهنده مبتنی بر سولفون‌ها، نمک‌های آلومینیوم و دی اتانول آمین انجام شده است. بتن همچنین حاوی میکروالیاف پلی پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر و قطر ۱۸ میلی‌متر است که برای کاهش انقباض و تغییر شکل در حالت پلاستیک طراحی شده است. (Lim, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, 2012)

### ۳- ویژگی‌های اجزای مخلوط برای چاپ افزودنی

نمونه‌های ارائه شده از پروژه‌های پرینت سه بعدی در ساختمان‌ها و مواد استفاده شده در آن‌ها با جزئیات توضیح داده نشده است، اما امکان تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مورد نیاز مخلوط ملات را فراهم است که می‌تواند در چاپگرهای سه بعدی برای چاپ اشیاء ساختمانی استفاده شود. برای پرینت سه بعدی، تیم‌های تحقیقاتی ذکر شده در مقاله، بیشتر از مواد مبتنی بر سیمان استفاده کردند. البته مواد مورد استفاده برای پرینت سه بعدی باید با چاپگر سه بعدی سازگار باشد. در ترکیب بتن مدرن، افزودنی‌ها و افزودنی‌هایی که به همراه سنگدانه‌ها، سیمان و آب وجود دارد برای بهبود خواص انتخابی ملات‌ها به آن اضافه می‌شود. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) افزودنی‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی خواص ملات تازه یا سخت شده را تغییر دهند. هنگام طراحی مخلوط ملات برای چاپ سه بعدی، باید مراقب بود که ملات با فرضیات عملکرد ملات‌های تازه و سخت شده مطابقت داشته باشد. در طراحی ترکیب ملات، به ضرورت اکستروژن باید توجه داشت که چه چیزی بر کارایی و زمان باز بودن آن تأثیر می‌گذارد. خواص کلیدی بتن سخت شده مقاومت فشاری و خمشی است. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) مواد افزودنی برای تولید بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد: سرباره‌های گرانول شده در کوره بلند، خاکستر بادی، دود سیلیس و پودرهای سنگ: پودرهای سنگ آهک و کوارتز که به عنوان اجزای غیرفعال شیمیایی در نظر گرفته می‌شوند. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

خاکستر بادی - کاربرد گسترده آن به دلیل ظرفیت بالا، ترکیب شیمیایی و فازی و همچنین فعالیت پوزولانی آن تعیین می‌شود. خاکستر بادی کارایی مخلوط ملات را بهبود می‌بخشد و روند سخت شدن ملات را به طور قابل توجهی کند می‌کند. انقباض بتن به نسبت مقدار سیمان جایگزین شده با خاکستر بادی کاهش می‌یابد. خاکستر بادی با محتوای بالای زغال سنگ نسوخته، کارایی مواد افزودنی شیمیایی، به ویژه هوادهی، نرم کننده‌های فوق روان کننده‌ها را کاهش می‌دهد. خاکستر بادی سیلیکونی کارایی مخلوط و فرآیند پمپاژ آن را بهبود می‌بخشد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده زمینی از سرد شدن سریع سرباره مایع به دست می‌آید که به عنوان یک محصول جانبی در تولید آهن خام در کوره بلند تشکیل و سپس آسیاب می‌شود، با عواملی که آسیاب آن را تسهیل می‌کند که نباید از ۱٪، و اجزای آلی نباید از ۲ درصد جرم سرباره تجاوز کنند. سرباره فعال تر است و بتن را در رابطه با خاکستر بادی به طور موثرتری آب بندی می‌کند. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

دوده سیلیس محصول جانبی تولید سیلیکون فلزی یا آلیاژهای آن است. گرد و غبار سیلیس با پر کردن فضای بین دانه‌های سیمان، ساختار بتن را آب بندی می‌کند. استفاده از غبار سیلیس به مقدار ۲ تا ۳ درصد (به عنوان افزودنی) توده سیمان، در بهبود کارایی مخلوط همراه با ویسکوزیته تأثیر مفیدی دارد. گرد و غبار سیلیس با آب یک سل تشکیل می‌دهد که از خروج آب از مخلوط در حین فشرده شدن جلوگیری می‌کند. پودرهای سنگ کارایی ملات‌ها را بهبود می‌بخشد. بیشترین اثرات مفید با استفاده از پودرهای به دست آمده از سنگ‌های آهکی کم کریستالی حاصل می‌شود. بنتونیت به عنوان یک سنگ رسی، خواص تیکسوتروپیک مخلوط ملات را بهبود می‌بخشد. این ماده عمدتاً حاوی آلومینوسیلیکات است که تحت تأثیر آب متورم شده و

حجم آن‌ها را چندین برابر افزایش می‌دهد. (Ma, Wang, 2017)(Jamrozy, 2015) رزین‌های مصنوعی چسبندگی قابل توجهی با سنگدانه و ملات سخت شده نشان می‌دهند. یک ترکیب مناسب انتخاب شده از رزین، کارایی ملات و همچنین استحکام مکانیکی و خواص فیزیکی را بهبود می‌بخشد. (Ma, Wang, 2017)(Jamrozy, 2015) نقش مواد افزودنی بهبود یک یا چند ویژگی ملات یا بتن سخت شده است. در حین اختلاط تا ۵٪ جرم سیمان اضافه می‌شوند. هنگام طراحی ملات برای چاپ سه بعدی، مهم است که بر روی اثرات تغییرات ناشی از مواد افزودنی تمرکز کنید، که می‌تواند یکی را بهبود بخشد و دیگری را بدتر کند. فوق روان کننده‌ها بر پایه رزین‌های مصنوعی هستند که باری منفی به های سیمان می‌دهند که تشکیل یک لایه آب بین دانه‌های سیمان را تسهیل می‌کند. به دلیل برهم‌کنش نیروهای الکترواستاتیک بین مولکول‌ها، کارایی مخلوط بهبود می‌یابد. اصطکاک داخلی مخلوط و کشش سطحی آب کاهش می‌یابد. فرآیند خیس کردن سنگدانه و چسب آسان‌تر است و مخلوط ملات پلاستیکی‌تر می‌شود. (Ma, Wang, 2017)(Jamrozy, 2015)

انتخاب فوق روان کننده مناسب به خواص سیمان و همچنین به مواد افزودنی و سنگدانه‌ها (تا حدی) بستگی دارد و مشکل در انتخاب ناشی از تفاوت بین خواص چسبنده و فوق روان کننده است. (Ma, Wang, 2017)(Jamrozy, 2015) مواد افزودنی که سخت شدن را تسریع می‌کنند، در واکنش اتصال شدید ایجاد نمی‌کنند، فقط آن را کوتاه می‌کنند، که باعث تسریع دوره سخت شدن می‌شود. این افزودنی‌ها برای افزایش دینامیک افزایش مقاومت ملات در طول زمان طراحی شده‌اند. روند افزایش مقاومت اولیه تسریع می‌شود، بدون اینکه تاثیر منفی بر مقاومت نهایی ملات داشته باشد. در حین چاپ لایه‌های متوالی جسم، مقاومت اولیه ملات برای جلوگیری از لایه برداری و متلاشی شدن ساختار چاپی بسیار مهم است. (Ma, Wang, 2017)(Jamrozy, 2015) افزودنی‌های کندگیر به این دلیل استفاده می‌شوند که در طول فرآیند چاپ، حمل و نقل مخلوط زمان زیادی می‌برد و برای به دست آوردن پیوند مناسب بین لایه‌های ملات خاص نیاز است. عقب افتادن پیوند باعث می‌شود که مخلوط حمل شده نقدینگی خود را برای مدت طولانی‌تری حفظ کند که تاثیر مثبتی بر فرآیندهای پمپاژ و چاپ دارد. بتن با افزودنی بازدارنده نشان دهنده مقاومت اولیه کمتر و معمولاً سخت شدن کندتر است. (Ma, Wang, 2015)(Jamrozy, 2017) افزودنی‌های اصلاح کننده ویسکوزیته برای افزایش ویسکوزیته ملات‌ها بدون ایجاد تغییرات قابل توجهی در قوام طراحی شده‌اند. آن‌ها معمولاً برای از بین بردن جداسازی، بخصوص در مخلوط‌های خود متراکم استفاده می‌شوند. باید به فناوری تغذیه مخلوط به چاپگر سه بعدی توجه شود، زیرا در حین پمپاژ مخلوط، افزایش ویسکوزیته نیاز به فشار پمپاژ بالاتری دارد. (Ma, Wang, 2017)(Jamrozy, 2015)

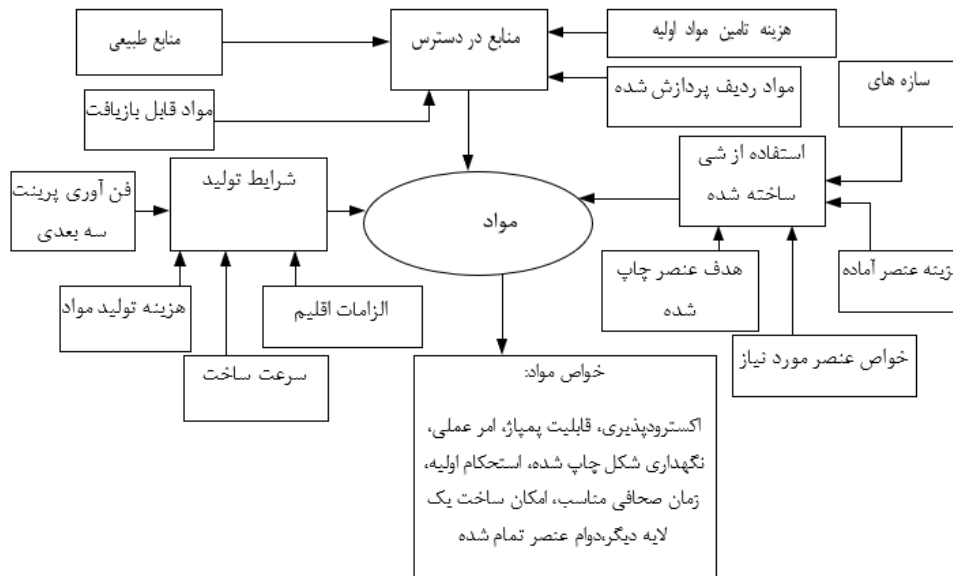
#### ۴- چاپ افزودنی شرایط و ویژگی‌های خاص را مخلوط می‌کند

براساس تحقیقات قبلی و تجربیات فناوری پرینت سه بعدی در ساخت و ساز به ویژه سازه‌های ساختمانی، می‌توان اصول ترکیب مخلوط ملات و خواص مورد نیاز آن را تعیین کرد (شکل ۴). باید بسیاری از اجراها، شرایط و انواع مختلف ساختمان‌ها، به ویژه شرایط خاص محل ساخت و ساز را در نظر گرفت. در حالی که طراحی مخلوط ملات در نظر گرفته شده برای استفاده از فناوری چاپ سه بعدی است، باید توجه داشت که این مخلوط معیارهای پذیرفته شده و فرضیات طراحی را برآورده می‌کند. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

مواد طراحی شده و مورد استفاده در فناوری چاپ سه بعدی برای ساخت و ساز، به سه عامل متقابل بستگی دارد: مواد اولیه، روش‌های کاربرد و روش‌های تولید. در طراحی چنین مترایی، باید به ویژگی‌هایی نیز توجه شود که شی ساخته شده باید داشته باشد و امکان چاپ توسط چاپگر داده شده وجود دارد. طراح باید به مواد اولیه موجود در محل در نزدیکی محل ساخت توجه کند تا هزینه حمل و نقل آن‌ها منطقی باشد. ترکیب مخلوط نیز تحت تاثیر شرایط آب و هوایی در محل تولید شی است، زیرا بر ترکیب و شرایط بلوغ آن تاثیر می‌گذارد. مدت زمانی که پس از آن ویژگی‌های داده شده به دست می‌آیند نیز بر فرآیند چاپ تاثیر می‌گذارد. همچنین بستگی به روش تحویل مصالح و زمان اعمال لایه‌های بعدی مصالح ساختمانی را دارد. ترکیب مواد نیز به هزینه تولید یک شی معین، بستگی دارد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) همانطور که در بالا گفته شد، هنگام طراحی و انجام پرینت سه بعدی از مخلوط ملات، باید به خواص آن توجه کرد که بر امکان و کیفیت شی چاپ شده تاثیر می‌گذارد. توجه ویژه باید به پارامترهایی مانند: جریان پذیری مخلوط، اکستروپذیری، پایداری شکل چاپ شده، زمان اتصال، مقاومت و جمع شدگی بتن شود. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

جریان پذیری مخلوط به پمپاژ مخلوط در طول تغذیه و سیستم‌های اختلاط تنظیم رئولوژی مخلوط و جریان آن در حالت تازه به دلیل توزیع گسترده اندازه ذرات تضمین می‌شود، بسته‌بندی متراکم‌تر دانه‌های مخلوط کمک می‌کند که منجر به سیالیت بهتر شود. لازم به ذکر است که کسر گرد و غبار زیاد (افزایش اصطکاک بین مولکولی) می‌تواند ویسکوزیته مخلوط را افزایش دهد که بر سیالیت آن تاثیر منفی می‌گذارد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) اکستروپذیری توانایی مخلوط برای انتقال روی لوله‌ها و نازل‌های کوچک در سر چاپ است. کارایی و قوام مخلوط تاثیر اساسی بر اکستروپذیری دارد. برای به دست آوردن اکستروپذیری خوب مخلوط، بتن باید مطابق با اصول طراحی بتن خود متراکم و بتن پاششی طراحی شود. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) توانایی حفظ شکل چاپ شده پارامتر مهم دیگری است که باید توسط مخلوط پمپ شده مورد استفاده برای چاپ سه بعدی در نظر گرفته شود. لایه‌های چاپ شده مواد باید شکل خود را به وسیله نازل‌هایی که تحت فشار

لایه‌های بعدی که توسط چاپگر اعمال شده حفظ کنند. پارامتر تعیین کننده استحکام اولیه مخلوط سخت شده است. ثبات شکل با افزایش مقدار دانه‌های ریز و شن تضمین می‌شود. افزودنی‌های اصلاح کننده ویسکوزیته می‌توانند سر ریز شدن مخلوط را کاهش داده و پایداری ساختار چاپی را بهبود بخشند. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)



شکل ۴- ترکیب مصالح ساختمانی برای چاپ سه بعدی و الزامات خواص (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

زمان تنظیم بر امکان اختلاط در حین چاپ تأثیر می‌گذارد. کارایی که بر امکان اکستروژن تأثیر می‌گذارد، به (زمان باز کردن) طولانی نیاز دارد. در غیر این صورت، مواد سفت‌تر شده و باعث کندتر شدن جریان مخلوط در سیستم‌های تغذیه چاپگر می‌شود و یا چاپگر را مسدود می‌کند. علاوه بر این، باز بودن طولانی مدت به اتصال مواد بین لایه‌ها کمک می‌کند، اما می‌تواند بر شکل‌گیری عناصر چاپ شده تأثیر منفی بگذارد. برای حفظ شکل و بار لایه‌های اعمال شده بالاتر، هنگام گذاشتن لایه‌های متوالی مواد به زمان اتصال کوتاهی نیاز است. استحکام و سفتی شکل چاپ شده به دلیل افزایش چگالی ماتریس حاصل از استفاده از پودرهای ریزتر نسبت به سیمان پرتلند به دست می‌آید. استحکام مخلوط نیز تحت تأثیر نسبت آب به سیمان، کلاس مقاومت سیمان، کیفیت سنگدانه‌ها و وجود مواد افزودنی است. انقباض بتن ممکن است در دوره اتصال و همچنین در دوره سخت شدن اولیه شروع شود. انقباض به طور قابل توجهی بر دقت ابعادی و پایداری اشیاء چاپی تأثیر می‌گذارد. انقباض ناشی از تبخیر آب از لایه‌های خارجی و تغییرات دما در اثر گرمای هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. عناصر چاپ شده دارای سطح بسیار بزرگتری هستند که در معرض تأثیر شرایط محیطی در رابطه با عناصر ساخته شده با قالب قرار دارند. در هنگام طراحی باید به این نکته توجه داشت که انقباض ناشی از تبخیر آب از لایه‌های خارجی و تغییرات دما در اثر گرمای هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. عناصر چاپ شده که در معرض تأثیر شرایط محیطی هستند دارای سطح بسیار بزرگتری در رابطه با عناصر ساخته شده با قالب قرار دارند. در هنگام طراحی باید به این نکته توجه داشت که انقباض از جمله با افزایش مقدار آب در ظرفیت سیمان و دانه بندی سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

## ۵- نتیجه‌گیری

توسعه فناوری چاپ سه بعدی در صنعت به جهش بزرگ فناوری کمک کرده است. به لطف روش‌های مختلف تولید اشیا چاپ سه بعدی، آزمایش روی نمونه‌های اولیه را امکان پذیر می‌کند که قبلاً انجام آن با روش‌های تولید معمولی دشوار بود. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) این مقاله بر روی فناوری چاپ سه بعدی که در حال حاضر در ساخت و ساز استفاده می‌شود تمرکز دارد. چاپ سه بعدی مخلوط ملات روشی امیدوارکننده است که می‌تواند فرآیندهای سنتی ساختمان را متحول کند. ایمنی ساختمان از طریق اتوماسیون بسیار افزایش می‌یابد و تقاضا برای نیروی کار کاهش می‌یابد. هزینه‌های ایجاد اشیاء ساختمانی جدید در مقایسه با روش‌های سنتی ساختمانی می‌تواند بسیار ارزان‌تر باشد. مسئله اساسی در پرینت سه بعدی ساختمان‌ها، به جز چاپگر، مواد مورد نیاز چاپ است. بسیاری از مواد جدید در حال حاضر توسعه یافته‌اند، از جمله: منشا بیولوژیکی، فولاد، چوب و پلاستیک، که امکان چاپ افزودنی محصولات را فراهم می‌کند. با این حال، به نظر می‌رسد که برای هر پروژه طراحی شده برای پیاده سازی در فناوری چاپ افزودنی، یک ترکیب جداگانه از مخلوط چاپ طراحی شود. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) مخلوط طراحی شده برای چاپ شی اول از همه باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد. با

توجه به اینکه کل ساختمان باید استانداردهای لازم مانند استحکام، حفاظت در برابر آتش و غیره را داشته باشد. از طرف دیگر، مواد اولیه تولید مخلوطها باید مطابق با مفهوم توسعه پایدار، یعنی صرفه جویی در منابع تجدیدناپذیر انتخاب شوند. استفاده از مواد زائد قابل بازیافت، باعث به حداقل رساندن احتمالی هزینهها می شود. همچنین شرایط اجرا، از جمله شرایط آب و هوایی، ممکن است بر ویژگیهای مورد نیاز مخلوط مورد استفاده تأثیر بگذارد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019) مخلوطهای چاپ باید دارای ویژگیهای قابل چاپ سودمندی باشند که می توان آن ها را در محدوده وسیعی کنترل کرد و ویژگیهای آن ها را برای بهبود عملکرد در طول فرآیند چاپ سه بعدی اصلاح کرد. تهیه یک ماده سازگار برای چاپگر سه بعدی در مقیاس بزرگ کار دشواری است. عوامل مختلفی بر خواص ملات های تازه و سخت شده تأثیر می گذارد. تجزیه و تحلیل دقیق خواص و در نظر گرفتن مکانیسمها به دلیل اثر افزودنی ها و مواد افزودنی منفرد بر کارایی مخلوطهای چاپی قطعاً توصیه می شود. همچنین با توجه به قابلیت های این چاپگر اگرچه این فناوری در مرحله آزمایشی است، پرینت سه بعدی از مخلوط ملات می تواند انقلابی را ایجاد کند و پتانسیل بخش ساخت و ساز را افزایش دهد. (Kaszynka, Olczyk, Techman, atc, 2019)

## منابع

1. Apis cor, w:<http://apis-cor.com>. (2018).
2. D-Shape, w:<https://d-shape.com>. (2018).
3. Jamrózy, Beton i jego technologie, (2015). PWN, Warszawa
4. Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, Thorpe, (2012)., Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, 45, 1221-1232
5. Le, Austin, Lim, Buswell, Law, Gibb, Thorpe, (2012)., Hardened properties of high-performance printing concrete, *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558 – 566
6. Lim, Buswell, Le, Austin, Gibb, Thorpe, (2012)., Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Automation in Construction*, 21(1), 262-268
7. Lim, Le, Webster, Buswell, Austin, Gibb, Thorpe, (2009), Fabricating construction components using layered manufacturing technology, (GICC'09), Loughborough University, pp. 512-520
8. Ma, Wang, (2017)., A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 1-19
9. Malaeb, Hachem, Tourbah, Maalouf, El Zarwi, Hamzeh, (2015)., 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design, *IJCIET*, 6(6), 14-22
10. Nematollahi, Xia, Sanjayan, (2017)., Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies, *ISARC 2017*, 260-267
11. Nerella, Krause, Näther, Mechtcherine, (2016)., Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D), 25th Conference on Rheology of Building Materials, Regensburg, 236 – 246
12. Sobotka, Wrońska, (2015)., 3D w budownictwie, Cz.1,2 —Capabilities of use the threedimensional printing technology in construction industry, *Builder*, 11,12, pp 26-29

