مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۷- شماره ۵- سال ۱۴۰۱

www.ElitesJournal.ir

مروری بر کاربردتکنولوژی پرینت سه بعدی بتن و ابعاد مختلف آن

امیرحسن کریمی راد[1*]، شهروز وکیلی حاجی آقا[2]

۱- دکترای مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه UKM

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه ایوانکی

*Amirhassan.karimirad12@yahoo.com

ارسال: آبان ماه ۱۴۰۱ پذیرش: آذر ماه ۱۴۰۱

چکیده

به طور کلی، پیشرفت های بدست آمده در صنعت ساختمان، منجر به افزایش استفاده از مدل سازی سه بعدی در محیط اتوکد شده است. محبوبیت این رویکرد، همزمان با پیشرفت های حاصل در شاخه‌های صنعتی که از پرینترهای سه بعدی برای چاپ مواد چاپی مبتنی بر بتن در ساخت و ساز استفاده می‌کنند، افزایش یافته است. بطوریکه این امر، باعث افزایش آزادی عمل بیشتری در شکل و ابعاد المان های سازه ای می گردد. یکی از چالش های پیش رو در اجرای پرینتر سه بعدی بتن، احتمال وقوع جمع شدگی ناشی از خشک شدن مخلوط های بتنی می باشد. در عین حال، دوام سازه های بتنی، شدیدا تحت تاثیر مقاومت پوشش بتنی در برابر نفوذ یون کلرید و دی اکسید کربن (در سازه های دریایی)، قرار دارد. علیرغم اینکه فناوری پرینت سه بعدی بتن، یک تکنولوژی امیدوارکننده محسوب می شود و قادر است در زمان، هزینه ها و منابع ساخت صرفه جویی کند، در عین حال، توجه به مسائل خاصی در رابطه با عدم همجوشی بین لایه های چاپی بعدی و نیز دوام آن، امری اجتناب ناپذیر محسوب می شود.

کلمات کلیدی: پرینت سه بعدی، بتن، پرینتر، مزایا، چالش ها.

۱- مقدمه

اخیرا، پرینت سه بعدی بتن، به عنوان یک نوآوری نوین، و روش ساخت امیدوار کننده، مورد توجه محققین سراسر جهان قرار گرفته است و دارای مزایای قابل توجهی نظیر نیاز به نیروی انسانی کمتر، امکان اجرای طرح های پیچیده و متنوع معماری و نیز عدم نیاز به قالب بندی، می باشد[۱-۳]. پس از اینکه که Khoshnevis برای اولین بار مفهوم Contour Crafting (CC) را در پرینت سه بعدی بتن معرفی کرد[۴-۵]، به دلیل وجود چالش ها و موانع مربوط به مصالح، تجهیزات و سازه های مختلف، این فناوری به طور مداوم در سراسر جهان مورد بررسی قرار گرفت[۶-۱۰]. به طور کلی، پرینت سه بعدی بتن، به عنوان روش ساخت دیجیتال، پتانسیل ایجاد انقلاب و تحول در صنعت ساختمانی را دارد[۱۱].

به منظور معرفی تکنولوژی پرینت سه بعدی بتن به عنوان یک فناوری عملی و قابل اجرا، انطباق محصولات پرینتی با استانداردها و ضوابط ساختمانی متداول، ضروری خواهد بود. در تکنولوژی پرینت سه بعدی، روش های جدیدی به منظور مسلح کردن بتن ارائه شده است که در این میان می توان به پرینت آرماتور فولادی و یا لوله فولادی اشاره کرد[۱۲-۱۳]. با این حال، این فناوری همچنان در مقایسه با بتن پرینت سه بعدی تقویت شده با الیاف در مرحله تحقیق و بررسی می باشد. بنابراین، نحوه ترکیب آرماتور و مسلح کنندگی سازه های بتنی پرینت سه بعدی به یکی از چالش های اصلی تبدیل شده است[۱۴]. یکی از راهکارهای حل چالش

آرماتورگذاری ای نوع بتن، جایگزین کردن آرماتورهای فولادی با الیاف با طول کوتاه می باشد. به منظور گسترش کاربرد بتن پرینت سه بعدی در طراحی سازه های با عملکرد بالا، استفاده از مصالح با پایه سیمان که با الیاف مسلح شده باشند، یک نیاز مبرم تلقی می شود[۱۵-۱۷]. در حال حاضر، بسیاری از تحقیقات، بر مطالعه بر روی مصالح پایه سیمانی مسلح شده با الیاف که به صورت سه بعدی و قابل پرینت تهیه می شوند، معطوف شده است.

در عین حال، باید به این نکته توجه شود که صنعت ساختمان، به عنوان یکی از مهمترین مصرف کنندگان انرژی و تولید کنندگان گاز دی اکسید کربن به شمار می رود[۱۸]. لذا لازم است به منظور مقابله با تغییرات آب و هوایی و آثار منفی وارد بر محیط زیست، از مقدار انتشار گاز CO_2 کاسته شود. بخش عمده اثر منفی صنعت ساختمانی مربوط به مصرف بیش از اندازه سیمان و بتن و انتشار بیش از حد گاز CO_2 حین تولید کلینکر(به عنوان ترکیب اصلی سیمان) می باشد.

امروزه از تکنولوژی پرینت سه بعدی بتن در ساخت خانه ها، طرح های خاص معماری و پروژه های ساختمانی استفاده می شود. در عین حال، در چاپ بتن سه بعدی از پرینترهای سه بعدی بسیار بزرگ استفاده می شود که اغلب دارای چند متر طول و ارتفاع می باشند و بتن از نازل آن خارج می شود. این ماشین‌ها معمولا به صورت سیستم‌های بازویی دروازه‌ای یا روباتیک عرضه می‌شوند. پیکربندی چاپگر هر چه که باشد، در عمل، همه آنها به طور مداوم یک ماده بتنی خمیری شکل را بیرون می رانند و بواسطه قرارگیری لایه ای این مواد خمیری، عنصر ساختمانی مورد نظر ساخته می شود. علیرغم اینکه این روش، چاپ بتن سه بعدی نامیده می شود، اما در عمل ممکن است همیشه مصالح بتنی نباشد. زیرا بتن های معمولی (سنتی) قادر نیستند پایداری خود را هنگام پرینت گیری حفظ کنند. در عین حال، نازل چاپگر را مسدود می کند و به لایه های قبلی به درستی نمی چسبد. لذا بسیاری از مصالح موجود منحصر به فرد و دارای ثبت اختراع می باشند. لذا به منظور تهیه پرینت سه بعدی بتن، انتخاب مصالح، از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود.

شکل ۱- دیوارهای بتنی ضخیم، قابل استفاده به عنوان پایه در توربین های بادی

۲- مزایای و چالش های فناوری پرینت سه بعدی بتن

با پیشرفت هایی که در سال های اخیر در زمینه علم مواد و مصالح، رباتیک و نرم افزاری بدست آمده است، استفاده از پرینت های سه بعدی بتن، با رشد و تقاضای قابل توجهی مواجه شده است. به طور کلی، چاپ سه بعدی، پتانسیل بالایی در افزایش سرعت ساخت و ساز دارد. از دیگر مزایای این بتن می توان به کارآیی و هزینه آنها اشاره نمود.

شکل ۲- اولین آپارتمان چند طبقه ساخته شده با پرینتی سه بعدی بتن در کشور آلمان

به راحتی می توان فهمید که چرا شرکت های ساختمانی تمایل دارند به سمت چاپ سه بعدی حرکت کنند. این تکنولوژی، مزایای قابل توجهی را برای شرکت ها به دنبال خواهد داشت که از آن جمله می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- با توجه به اینکه المان های دیوار را می توان به صورت تو خالی اجرا کرد، مقدار مصرف مصالح، کاهش می یابد.
- با توجه به عدم نیاز به قالب بندی و قالب های با مقیاس بزرگ، ضایعات و دورریز مصالح کم است.
- در مقایسه با آجرها و بتن های قالب بندی شده، سرعت اجرای بالاتری دارد.
- آزادی عمل بیشتری در مرحله طراحی وجود دارد و طراح قادر به طراحی هندسه های مختلف همچون سطوح منحنی، تو خالی و... خواهد بود.
- بهره وری بالاتر
- نیاز کمتر به نیروی انسانی

در صورت پیشرفت های بیشتر در این تکنولوژی، از مقدار مصالح مصرفی کاسته شده و چاپگرها قادر خواهند بود هندسه های پیچیده تری را تولید نمایند. با این حال، صنعت چاپ بتن سه بعدی با چالش هایی روبرو می باشد که برخی از آنها عبارتند از:

- هزینه سرمایه گذاری اولیه بالا (چاپگرها و فناوری مرتبط)
- محدودیت در اندازه چاپ (بیشتر به صورت عمودی)
- محدودیت در انتخاب مصالح
- نیاز به تخصص بالا به منظور راه اندازی و نگهداری پرینترها
- شکل ظاهری و سطحی عناصر چاپ شده می تواند از نظر بصری جذاب نباشد.

۳- موانع موجود در آیین نامه های ساختمانی

اگرچه در تولید پرینت سه بعدی بتن، به نیروی انسانی کمتری نیاز است اما کارگران و نیروی انسانی فعال در این صنعت، باید از علم، آگاهی و تجربه کافی برخوردار باشند و به عبارت ساده تر، آموزش دیده باشند. علاوه بر این، فعالیت هایی همچون نصب لوله کشی و تاسیسات برقی، همچنان به نیروی انسانی نیاز دارد و آنها باید روش کار خود را با سازه های جدید تطبیق دهند.

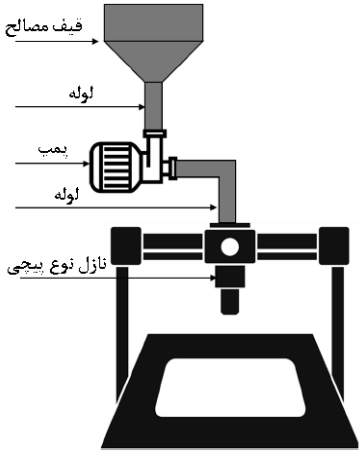
با وجود اینکه بسیاری از خانه ها و ساختمان های ساخته شده با این فناوری، در سراسر جهان، مورد توجه قرار گرفته اند، اما فناوری پرینت سه بعدی بتن، همچنان در مرحله توسعه می باشد و انتظار می رود طی ده سال آینده، به ویژه در کشورهایی که با کمبود نیروی کار و کمبود مسکن مواجه هستند، مورد استقبال گسترده ای قرار گیرد. به عنوان مثال، دوبی قصد دارد تا سال ۲۰۳۰، یک چهارم ساختمان های خود را به کمک این تکنولوژی احداث کند.

شکل ۳- ساخت ساختمان اداری در دوبی با استفاده از تکنولوژی پرینت سه بعدی بتن که منجر به کاهش ۵۰ درصدی نیازبه نیروی انسانی و کاهش ۶۰ درصدی دورریز و ضایعات، در مثایسه با ساختمان های سنتی، گردید[GolfNews]

۴-روند پرینت گیری بتن

به طور کلی، روند تهیه پرینت سه بعدی سازه های بتنی از سه مرحله اصلی تشکیل می شود که شامل آماده سازی پرینت، آماده سازی مصالح و در نهایت پرینت گیری می باشد. در مرحله آماده سازی پرینت، المان موردنظر در نرم افزار 3D CAD مدل سازی

می شود و سپس به یک مدل با فرمت STL تبدیل می شود. از این فایل، مسیر چاپ المان، برای ایجاد یک فایل G-code ایجاد می شود. پس از ایجاد فایل G-code، مرحله اول تکمیل می شود. مرحله بعد، شامل اختلاط بتن و مصالح سمنتی برای پرینت گیری می باشد. مصالح درون قیف قرار می گیرند تا مصالح را به طور مداوم در اختیار پمپ و نازل قرار دهد. پس از آماده سازی مصالح، عملیات تهیه پرینت با استفاده از سیستم قیف-پمپ- نازل، مطابق شکل شماره ۱، آغاز می شود.



شکل ۴- طرح شماتیک فرآیند پرینت گیری توسط پرینتر سه بعدی

در این سیستم، دو رگولاتور برای کنترل پمپ و یک پیچ در نازل تعبیه شده است. بنابراین، سیستم را طوری می توان کنترل کرد که قطعه را به طور مداوم و پایدار چاپ کند.

شکل ۵- نمونه هایی از پرینت تهیه شده از دیوار مجوف

۵- جمع شدگی پرینت سه بعدی بتن

ترکیب اختلاط و بروز خشک شدگی در پرینت های سه بعدی بتن، که ناشی از توسعه دینامیکی تغییرشکل های جمع شدگی می باشد، همواره به عنوان مهمترین موارد قابل توجه به شمار می رود. مقدار زیاد مصالح پرکننده، عدم استفاده از درشت دانه ها مناسب و اجرای المان ها بدون قالب بندی، باعث می شود تا پرینت های بتن، مستعد بروز جمع شدگی ناشی از خشک شدن شوند [۱۹]. خشک شدن مخلوط بتنی در ساعات اولیه پس از اختلاط با اب، این امکان را می دهد که رطوبت، سریعا در بتن تازه نفوذ کند[۲۰]. شروع تغییر شکل در مواد در این دوره به عنوان جمع شدگی پلاستیک نامیده می شود[۲۱]. این امر به دلیل از دست دادن رطوبت مخلوط بتن در نتیجه حرکت به سمت تعادل با رطوبت محیط می باشد[۲۲]. مقدار جمع شدگی پلاستیک تحت تاثیر عوامل متعددی قرار دارد که از آن جمله می توان به اندازه و سطح مستعد خشک شدگی، رطوبت و دمای محیط و جریان هوا اشاره کرد[۲۳]. علاوه بر این، در صورت کم بودن حجم آب مخلوط و سخت شدن سریع آن، پدیده جمع شدگی خود به خودی اتفاق خواهد افتاد. با توجه به مشخصه های مکانیکی مخلوط بتنی، تنها در فاز اولیه، بتن تازه، توانایی ناچیزی در به منظور مقاومت در برابر انبساط دارد و در نتیجه، به دلیل عدم امکان انتقال تنش، پدیده ترک خوردگی ایجاد می گردد. لذا بروز ترک خوردگی های مذکور، باعث کاهش ظرفیت باربری و دوام المان بتنی می شود و به منظور تعمیر آن، هزینه های هنگفتی تحمیل خواهد شد [۲۳]. در بسیاری اوقات، کنترل پارامترهای فوق، حین انجام پرینت بتن امکان پذیر نمی باشد. لذا در این شرایط، به حداقل رساندن مقدار جمع شدگی اولیه، از اهمیت بسزایی برخوردار خواهد بود. از هر دو روش فعال و غیر فعال، بر اساس نحوه عمل آوری و

مقاوم سازی سازه، به منظور به حداقل رساندن تغییرشکل بتن های معمولی استفاده می شود. مبنای روش های غیر فعال، طرح اختلاط مناسب، استفاده از الیاف ضد جمع شدگی همچون الیاف شیشه ای، پلی پروپیلن، پلی استایرن، پلی اتیلن، بازالت یا فولادی [۲۴-۲۶]، روش های عمل آوری داخلی نظیر استفاده از مواد افزودنی کاهنده جمع شدگی (SRA)، [۲۷-۲۹] و یا استفاده از سنگدانه های ریز خیس شده در آب [۳۰]، می باشد. روش های فعال، بر اساس عملکرد آنها در جلوگیری از تبخیر آب سطحی، طبقه بندی می شوند. روش های مذکور، شامل پاشش آب به سطح بتن، پوشش بتن با غشاء ضد تبخیر و ایجاد سایه بان به منظور محافظت از سطح بتن در برابر تابش مستقیم نور خورشید و باد می باشد[۳۱].

شکل ۶- تجهیزات انجام آزمایش جمع شدگی

۶- ویژگی های پرینت سه بعدی بتن تازه

بر خلاف بتن های معمولی درجا، انتظار می رود پرینت سه بعدی مصالح سمنتی که بدون قالب بندی تولید می شوند دارای اسلامپ کم و یا حتی بدون اسلامپ باشند [۳۲-۳۵] و به منظور حفظ پایداری هندسی خود، دارای سختی کافی باشند. بر اساس تفاوت موجود بین روش های ساخت سنتی و روش نوین پرینت گیری بتن، مهم است که ویژگی های پرینت بتن تازه ساخته شده با مصالح سمنتی، مطابق با تکنیک های نوین تهیه پرینت باشد.

در بسیاری از تحقیقات موجود، سیالیت و قابلیت ساخت، به عنوان مهمترین ویژگی های بتن تازه پرینتی در نظر گرفته می شود [۳۶-۳۸]. از عامل سیالیت بتن، به منظور ارزیابی رفتار جریان پذیری و روانی پرینت بتن حین پمپ کردن آن استفاده می شود. در پرینت گیری بتن، سیالیت، عبارتست از توانایی مصالح در حرکت هموار از مخلوط کن به نازل پرینتر. همانطور که اشاره شد، یکی از مهمترین ویژگی های بتن تازه پرینتی، قابلیت ساخت آن می باشد. در تعریف، این مشخصه، عبارتست از توانایی لایه های پرینت بتن در حفظ شکل و پایداری خود، تحت تاثیر بارهای وارده.

دو عامل اساسی، امکان اجرای پرینت بتن در مقیاس بزرگ ساخت را محدود می کند. اولا، خمیر مصالح سمنتی باید به اندازه کافی تازه باشد تا به خوبی از نازل خارج شود. در عین حال نیز باید به اندازه ای سفت باشد تا قادر به حفظ شکل خود باشد. ثانیا، افزایش زمان بتن ریزی پرینت بتن در مرحله ریختن بتن مفید است و باعث بهبود پیوستگی بین لایه ها می شود اما برای توانایی بتن در حفظ شکل و با توجه به عامل قابلیت ساخت، مضر است[۳۹].

۷- مسلح کردن پرینت سه بعدی بتن با الیاف

به طور کلی، استفاده از الیاف به منظور مسلح کردن پرینت سه بعدی بتن، به عنوان روشی کارآمد و قابل قبول در نظر گرفته می شود. با این حال، تحقیقات در مورد تاثیر الیاف بر خواص و مشخصه های پرینت سه بعدی بتن، محدود و ناچیز می باشد. بنابراین، رفتار پرینت بتن با پایه سیمانی که توسط الیاف مسلح شده اند، تحت خمش، مورد مطالعات گسترده ای قرار گرفته است. با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن (PE)، گسیختگی نمونه بتنی، مقاومت خمشی در هر سه جهت، به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. عملکرد پس از اوج (مقدار ماکزیمم)، به طور مستقیم تحت تاثیر مقدار الیاف و طول کافی آنها قرار دارد. تحلیل ریزساختار این مخلوط ها نشان می دهد که الیاف یکنواخت و هم جهت، به عنوان یک عامل کلیدی در افزایش مقاومت نهایی محسوب می شوند. لذا نمونه های پرینت بتن سه بعدی، همچنان ممکن است رفتار ناهمسانگرد آشکاری را از خود نشان دهند. مقدار مقاومت های خمشی در جهات موازی و عمود بر المان پرینت در صفحه پرینت گیری، زیاد می باشد. این در حالیست که مقدار مقاومت

خمشی در جهت متعامد بر صفحه پرینت گیری (در سراسر لایه ها)، ناچیز است. لذا یافته ها می توانند به درک بهتر نقش الیاف PE در پرینت سه بعدی بتن کمک شایانی نمایند.

۸- نتیجه گیری

با توجه به مزایای برجسته پرینت سه بعدی بتن در مقایسه با بتن های معمولی (سنتی)، که از آن جمله می توان به کاهش نیاز به نیروی انسانی، کاهش هدررفت و ضایعات مصالح، سرعت اجرای بالاتر، عدم نیازبه قالب بندی، امکان ساخت قطعات تو خالی و... اشاره کرد، استفاده از این نوع بتن، در سال های اخیر، با استقبال گسترده ای مواجه شده است و تحقیقات تکمیلی در این خصوص در سراسر جهان در حال انجام می باشد. به موازات مزایای این فناوری، چالش هایی نیز پیش روی آن قرار دارد که شامل مواردی همچون هزینه سرمایه گذاری اولیه بالا، محدودیت در انتخاب مصالح، نیاز به تخصص بالا و... می باشند. در عین حال، با توجه به اسلامپ کم این بتن، لازم است خمیر بتنی از سختی کافی برخوردار باشد. علاوه بر این، امکان مسلح کردن پرینت سه بعدی بتن با الیاف نیز میسر می باشد و می توان از الیاف به منظور تقویت و مسلح کنندگی آنها استفاده کرد. مقدار زیاد مصالح پرکننده، عدم استفاده از درشت دانه ها مناسب و اجرای المان ها بدون قالب بندی، باعث می شود تا پرینت های سه بعدی بتن، مستعد بروز جمع شدگی ناشی از خشک شدن شوند.

۹- مراجع

1. Bos F, Wolfs R, Ahmed Z, et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping 2016; 11(3): 209-225.

2. Buswell RA, de Silva WRL, Jones SZ, et al. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research 2018; 112: 37-49.

3. De Schutter G, Lesage K, Mechtcherine V, et al. Vision of 3D printing with concrete—technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research 2018; 112: 25-36.

4. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. Automation in Construction 2004; 13(1): 5-19.

5. Khoshnevis B, Dutton R. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. Materials Technology 1998; 13(2): 53-56.

6. Labonnote N, Rønnquist A, Manum B, et al. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Automation in Construction 2016; 72: 347-366.

7. Asprone D, Menna C, Bos FP, et al. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. Cement and Concrete Research 2018; 112: 111-121.

8. Hou Z, Tian X, Zhang J, et al. 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure. Composite Structures 2018, 184: 1005-1010.

9. Hambach M, Volkmer D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. Cement and Concrete Composites 2017; 79: 62-70.

10. Sarvestani HY, Akbarzadeh AH, Niknam H, et al. 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. Composite Structures 2018; 200: 886-909.

11. Tay YWD, Panda B, Paul SC, Noor Mohamed NA, Tan MJ, Leong KF. 3D printing trends in building and construction industry: a review. Virtual Phys Prototyp 2017; 12:261–76.

12. Mechtcherine V, Grafe J, Nerella VN, et al. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction–Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. Construction and Building Materials 2018; 179: 125-137.

13. Patel VI. Analysis of uniaxially loaded short round-ended concrete-filled steel tubular beam-columns. Engineering Structures 2020; 205: 110098.

14. Marchment T, Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing. Automation in Construction 2020; 109: 102992.

15. Al Abadi H, Thai HT, Paton-Cole V, et al. Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures. Composite Structures 2018; 193: 8-18.

16. Melenka GW, Cheung BKO, Schofield JS, et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. Composite Structures 2016; 153: 866-875.

17. Kabir SMF, Mathur K, Seyam AFM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: history, mechanism, materials and properties. Composite Structures 2020; 232: 111476.

18. UN Environment and International Energy Agency. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Global Status Report 2017; 2017.

19. Skibicki, S. Optimization of Cost of Building with Concrete Slabs Based on the Maturity Method. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2017, 245, 22061.

20. Tiberti, G.; Mudadu, A.; Barragan, B.; Plizzari, G. Shrinkage Cracking of Concrete Slabs-On-Grade: A Numerical Parametric Study. Fibers 2018, 6, 64.

21. Sayahi, F.; Emborg, M.; Hedlund, H.; Cwirzen, A. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. Proceedings 2019, 34, 2.

22. Lerch, W. Plastic Shrinkage. ACI J. Proc. 1957, 53, 197–802.

23. Cohen, M.D.; Olek, J.; Dolch, W.L. Mechanism of Plastic Shrinkage Cracking in Portland Cement and Portland Cement-Silica Fume Paste and Mortar. Cem. Concr. Res. 1990, 20, 103–119.

24. Qi, C.; Weiss, J.; Olek, J. Characterization of Plastic Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete Using Image Analysis and a ModifiedWeibull Function. Mater. Struct. 2003, 36, 386–395.

25. Banthia, N.; Gupta, R. Influence of Polypropylene Fiber Geometry on Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. Cem. Concr. Res. 2006, 36, 1263–1267.

26. Saradar, A.; Tahmouresi, B.; Mohseni, E.; Shadmani, A. Restrained Shrinkage Cracking of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete. Fibers 2018, 6, 12.

27. Bentz, D.P. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Early-Age Properties of Cement Pastes. J. Adv. Concr. Technol. 2006, 4, 423–429.

28. Leemann, A.; Nygaard, P.; Lura, P. Impact of Admixtures on the Plastic Shrinkage Cracking of Self-Compacting Concrete. Cem. Concr. Compos. 2014, 46, 1–7.

29. Lura, P.; Pease, B.; Mazzotta, G.B.; Rajabipour, F.; Weiss, J. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Development of Plastic Shrinkage Cracks. ACI Mater. J. 2007, 104, 187.

30. Henkensiefken, R.; Briatka, P.; Bentz, D.P.; Nantung, T.; Jason,W. Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures. Concr. Int. 2010, 32, 49–54.

31. Alhozaimy, A.I.A.-N.; Alhozaimy, A.M. Impact of Extremely Hot Weather and Mixing Method on Changes in Properties of Ready Mixed Concrete during Delivery. ACI Mater. J. 2008, 105, 438–444.

32. Van der Zee, A.; de Vries, B.; Salet, T. From Rapid Prototyping to Automated Manufacturing. In Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Newcastle upon Tyne, UK, 10–12 September 2014; pp. 455–461.

33. Van Zijl, G.P.A.G. Properties of 3D Printable Concrete. In Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing, Singapore, 16–19 May 2016; pp. 421–426.

34. Panda, B.; Paul, S.C.; Tan, M.J. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. Mater. Lett. 2017, 209, 146–149.

35. Panda, B.; Tan, M.J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. Ceram. Int. 2018, 44, 10258–10265.

36. Malaeb, Z.; Hachem, H.; Tourbah, A.; Maalouf, T.; Zarwi, N.E.; Hamzeh, F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. Int. J. Civ. Eng. Technol. 2015, 6, 14–22.

37. Tay, Y.W.D.; Panda, B.; Paul, S.C.; Tan, M.J.; Qian, S.Z.; Leong, K.F.; Chua, C.K. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. Mater. Sci. Forum 2016, 861, 177–181.

38. Ma, G.; Li, Z.;Wang, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. Constr. Build. Mater. 2018, 162, 613–627.

39. Le, T.T.; Austin, S.; Lim, S.; Buswell, R.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Mater. Struct. 2012, 45, 1221–1232.