

Studying the Effect of Shrinkage Reducing Admixture on 3D Printed Concrete Properties

Amirali Ziarati¹, Amir Mohammad Ramezaniyanpour^{2*}, Mohammad Reza Daneshpasand³, Morteza Eskandari-ghadi⁴, Moslem Shahverdi⁵, Abdollah Sadeghi Marzaleh⁶, Nima Zafarmomen⁷

1- Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

4- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

5- Assistant Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

6- Ph.D., Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

7- M.Sc. graduate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent years, the advantages of using 3D printed concrete (3DPC) have made it valuable for the construction industry. However, shrinkage is one of the basic challenges in the quality of printed concrete. Although the use of shrinkage reducing admixture is one of the methods to reduce the shrinkage of 3DPC, but there is still no relatively comprehensive research on the effect of additives, especially the shrinkage reducing admixture, on the characteristics of 3DPC and its shrinkage challenge. Therefore, in the present study, the effect of shrinkage reducing admixture on 3DPC properties was evaluated. In this regard, first, a suitable mixing plan without shrinkage reducing admixture was prepared for use in a 3DPC and as a control sample. Then, by using different percentages of shrinkage reducing admixture (0 to 2.5% of cement materials with 0.5% steps), suitable mixing plans are introduced in the 3DPC, and finally, mechanical and concrete properties are tested on all the samples. Recently, the test of free shrinkage and printing properties of 3DPC was done. According to the research results, the optimal amount of shrinkage reducing admixture is 2%. Also, the increase of the shrinkage reducing admixture caused a decrease in the compressive and bending resistance of the 3DPC, and the maximum decrease was about 13 percent in the compressive resistance and 6 percent in the bending resistance at the age of 28 days. All the designs showed good performance in constructability, printability and pumpability criteria. In addition, with the increase in the amount of shrinkage reducing admixture consumption, the mass loss decreased and the lowest mass loss was observed in the sample with 2.5% shrinkage reducing admixture.

ARTICLE INFO

Receive Date: 17 November 2023

Revise Date: 23 January 2024

Accept Date: 15 February 2024

Keywords:

Shrinkage

3D concrete printing

Shrinkage reducing Admixture

Printing properties

Mechanical properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424428.3265>

*Corresponding author: Amir Mohammad Ramezaniyanpour.

Email address: ramezaniyan@ut.ac.ir

بررسی اثر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر روی خواص بتن چاپ سه‌بعدی

امیرعلی زیارتی^۱، امیرمحمد رضانیانپور^{۲*}، محمدرضا دانش‌پسند^۳، مرتضی اسکندری قادی^۴، مسلم شاهرودی^۵، عبدالله صادقی مرزآله^۶، نیما ظفر مومن^۷

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۵- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۶- دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ای تی اچ زوریخ، زوریخ، سوئیس

۷- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، مزایای استفاده از چاپ سه‌بعدی بتن آن را برای صنعت ساخت‌وساز ارزشمند ساخته است. اما، جمع‌شدگی یکی از چالش‌های اساسی در کیفیت چاپ سه‌بعدی بتن به‌شمار می‌آید. اگر چه استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی یکی از روش‌های کاهش جمع‌شدگی بتن چاپ سه‌بعدی است، ولی هنوز تحقیق نسبتاً جامعی در مورد تأثیر افزودنی‌ها به خصوص افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر مشخصات بتن چاپ سه‌بعدی و چالش جمع‌شدگی آن وجود ندارد. از این رو، در پژوهش حاضر اثر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر روی خواص بتن چاپ سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، ابتدا، طرح مخلوط مناسب بدون افزودنی کاهنده جمع‌شدگی برای به‌کارگیری در چاپگر سه‌بعدی به عنوان نمونه مبنا تهیه شد. سپس با به‌کارگیری درصدهای مختلف افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (مقادیر ۰ تا ۲/۵ درصد مواد سیمانی با گام ۰/۵ درصد)، طرح‌های مخلوط مناسب به‌کارگیری در چاپگر سه‌بعدی معرفی و در نهایت بر روی همه نمونه‌ها آزمایش جمع‌شدگی آزاد، آزمایش‌های خواص مکانیکی، خواص بتن تازه و خواص چاپی بتن چاپ سه‌بعدی صورت گرفت. مطابق نتایج پژوهش، مقدار بهینه افزودنی کاهنده جمع‌شدگی ۲ درصد می‌باشد. همچنین افزایش افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن چاپ سه‌بعدی به‌ترتیب به‌میزان ۱۳ درصد و ۶ درصد در سن ۲۸ روز شد. همه طرح‌ها، عملکرد مناسبی در معیارهای ساخت‌پذیری، چاپ‌پذیری و پمپ‌پذیری از خود نشان می‌دهند. به‌علاوه، با افزایش میزان مصرف افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، افت جرم ناشی از دست‌دادن آب کمتر شده و کمترین افت جرم در نمونه با ۲/۵ درصد افزودنی کاهنده جمع‌شدگی مشاهده شد.

کلمات کلیدی: جمع‌شدگی، بتن چاپ سه‌بعدی، افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، خواص چاپی، خواص مکانیکی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424428.3265	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.424428.3265	۱۴۰۲/۰۷/۳۱	۱۴۰۲/۱۱/۲۶	۱۴۰۲/۱۱/۲۶	۱۴۰۲/۱۱/۰۳	۱۴۰۲/۰۸/۲۶
*نویسنده مسئول: امیرمحمد رضانیانپور ramezani@ut.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از وسیع ترین صنایع مهندسی در دنیا، سهم بالایی از هزینه، مصالح، زمان و همچنین آلودگی محیط زیستی و تلفات ناشی از خطاهای انسانی را به خود اختصاص می دهد. از این رو، در سال های اخیر، برای تعدیل این مسئله در صنعت ساخت و ساز، به کارگیری روش هایی که توانسته در سایر حوزه های صنعت به منظور افزایش بهره وری و بازده مؤثر واقع شود، مورد توجه مهندسان و محققان حوزه مهندسی سازه قرار گرفته است. یکی از این فرآیندهای صنعتی مدرن، ساخت به روش اتوماتیک و یا استفاده از ربات است. در واقع با استفاده از ربات های صنعتی می توان یک ساختمان بتنی را بدون استفاده از نصب قالب و یا استفاده از تکنیک های پیش ساخته، در محل ساخت [۱، ۲].

تکنولوژی چاپ سه بعدی بتن به عنوان یکی از به روزترین ابزارهای صنعت رباتیک توانسته است در سال های اخیر توجه برخی از مهمترین مراکز تحقیقاتی و پژوهشگران مهندسی سازه را به خود جلب سازد [۱]. چاپ سه بعدی، در حقیقت به معنای ساخت قطعات پیچیده، مستقیماً بر اساس یک طرح رایانه ای توسط چاپگر سه بعدی می باشد که دارای روش های مختلفی است و در این میان، روش مبتنی بر اکستروژن^۱ بیشترین کاربرد را دارد. در روش مبتنی بر اکستروژن، مواد سیمانی ساختمانی از طریق یک نازل که به یک بازوی رباتیک برای چاپ سازه بتنی متصل است، لایه به لایه روی هم قرار می گیرد. بتن چاپ سه بعدی نوع خاصی از بتن است که می تواند از طریق یک چاپگر سه بعدی به صورت لایه ای و بدون هیچ گونه قالب و فرآیند تراکم، ساخته شود [۱]. شاخص های مهم عملکرد بتن، از جمله قابلیت کار، زمان گیرش و سخت شدن و خصوصیات مکانیکی می توانند با انتخاب پارامترهای چاپ، بهینه شوند. روند ساخت لایه به لایه در بتن چاپ سه بعدی اجازه می دهد تا ساخت فرم و شکل های مختلف بدون استفاده از قالب های گران قیمت انجام شود که باعث افزایش آزادی هندسی می شود و ضایعات ساختمانی کمتری تولید می کند، به طوری که در هزینه و زمان ساخت و ساز صرفه جویی می کند و همچنین باعث توسعه کیفیت و سرعت ساخت و ساز می شود [۱، ۲].

مهم ترین جزء فرآیند چاپ در واقع مرحله پس از خروج مواد از نازل و روی هم قرار گرفتن لایه ها است زیرا که ویژگی هایی مثل نحوه برهم نهی لایه ها، تغییر شکل و کیفیت لایه های چاپ شده تأثیر زیادی بر شکل و مقاومت مکانیکی نهایی سازه خواهد داشت. پژوهشگران حوزه چاپ سه بعدی بتن برای توصیف هر یک از این ویژگی های ضروری بتن چاپی تعاریف مشخصی ارائه داده اند. در واقع یک بتن به منظور استفاده در این فرآیند باید هر یک از الزامات مشخص شده برای آن را برآورده سازد. به همین دلیل نسبت اختلاط معرفی شده باید بر طبق همین شرایط استوار باشد تا در فرآیند چاپ دچار مشکل نشود. پمپ پذیری، چاپ پذیری، ساخت پذیری و زمان باز از جمله اساسی ترین تعاریف این حیطه مهندسی محسوب می گردد [۳-۴]. جریان پذیری یا پمپ پذیری مناسب بتن در سیستم پمپاژ جهت انتقال به محل چاپ ضروری است. مهم ترین عامل مؤثر بر این ویژگی اندازه ذرات استفاده شده در مخلوط است. با این حال هر کدام از اجزا تشکیل دهنده بتن مانند ذرات دانه ای، سیمان، آب و سایر افزودنی های معدنی و شیمیایی اثرات مشخصی بر کارایی و جریان پذیری بتن خواهند داشت. ساخت پذیری به معنای امکان قرارگیری لایه های بتنی روی هم است با این شرط که لایه ها کمترین مقدار تغییر شکل را دارا باشند و سایر معیارهای کیفیت بتن در شرایط مناسب باشند. در واقع این تناقض چالش برانگیزترین مسأله موجود در فرآیند چاپ سه بعدی بتن است. با دانستن این موضوع محققان همواره سعی در برقراری یک تعادل در طراحی نسبت اختلاط بتن به منظور برآورده ساختن نیازهای هر دو موضع ساخت پذیری و جریان پذیری بتن هستند [۳-۵]. زمان باز^۲ در فرآیند چاپ سه بعدی به مدت زمانی گفته می شود که در آن بازه زمانی جریان پذیری بتن به اندازه ای باشد که از یک طرف بتن در هیچ زمانی از مدت پمپاژ و خروج از نازل دچار گرفتگی و یا سایر نواقص ساختاری نشده و از طرفی دیگر ساخت پذیری بتن تأمین گردد [۶].

علی رغم رشد علاقه به چاپ سه بعدی بتن، جمع شدگی زیاد بتن چاپ سه بعدی، محدودیت مشخصی نسبت به پیشرفت تکنولوژی نشان می دهد. یکی از روش های کاهش جمع شدگی و در نتیجه کاهش احتمال ترک خوردگی ناشی از خشک شدن، استفاده از افزودنی های شیمیایی مناسب است [۷]. در سال های اخیر انواع مختلفی از مواد افزودنی شیمیایی برای استفاده در بتن به صورت تجاری عرضه

¹ Extrusion

² Open time

شده است. افزودنی کاهنده جمع‌شدگی^۲ یکی از آنها است که به لحاظ شیمیایی مکانیزم جمع‌شدگی را بدون انبساط تغییر می‌دهد [۸]. نتایج تحقیقات نشانگر تأثیر مثبت کاربرد SRA در کاهش انواع جمع‌شدگی بتن می‌باشد.

در تحقیق مایا^۴ و همکاران [۹] بر روی بتن توانمند خودتراکم مشخص شد نوع ماده کاهنده جمه‌شدگی نیز بر روی کارایی و مقاومت فشاری بتن موثر است. این افزودنی موجب طولانی‌تر شدن گیرش بتن و افزایش زمان گیرش اولیه و نهایی در مقایسه با بتن شاهد شده است. بعلاوه در درصد‌های بالای کاربرد SRA احتمال کاهش مقاومت فشاری بتن وجود دارد. در تحقیقاتی دیگر، کاربرد SRA موجب کاهش مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز شده است [۱۰، ۱۱]. در تحقیقی دیگر تأثیر کاربرد ماده SRA بر روی جمع‌شدگی آزاد و جمع‌شدگی مفید بتن فوق‌توانمند بررسی شده است. کاربرد ۱ و ۲ درصد ماده SRA موجب تأخیر در زمان ایجاد ترک به ترتیب ۳۸ و ۸۲ درصدی نسبت به مخلوط کنترل شده است. نتایج این تحقیق حاکی از کاهش جمع‌شدگی آزاد در نمونه‌های ۷ روزه بتنی به میزان به ترتیب ۳۹ و ۴۸ درصد در مخلوط‌های حاوی ۱ و ۲ درصد SRA نسبت به مخلوط کنترل است [۱۲]. اسلاوچوا^۵ [۱۳] در تحقیقات خود بر روی جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن ملات چاپ سه‌بعدی از دو ماده میکروسلیس و فوق‌روان‌کننده استفاده کرد که باعث کاهش جمع‌شدگی تا ۵۰ درصد گردید. این محقق عنوان کرد که میزان جمع‌شدگی ملات‌های توانمند به ازای هر درصد از دست دادن آب، دو برابر ملات‌های معمولی خواهد بود. که این نکته به علت به کار بردن مقدار بالای سیمان در بتن چاپ سه‌بعدی به شدت حائز اهمیت خواهد بود.

همان‌گونه که بیان شد کنترل میزان جمع‌شدگی و ترک‌های ناشی از آن از چالش‌های موجود در ساخت به روش چاپ سه‌بعدی بتن است. نتایج تحقیقات پیشین نشانگر آن است که استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی یکی از روش‌های مؤثر بر کاهش جمع‌شدگی می‌باشد. ولی تا به حال تحقیقی به صورت خاص برای رفع چالش جمع‌شدگی بتن چاپ سه‌بعدی از این روش استفاده نکرده است و همچنین تأثیر این ماده افزودنی بر دیگر خواص بتن چاپ سه‌بعدی تحقیق نشده است. از این رو پژوهش حاضر به بررسی اثر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر روی خواص بتن چاپ سه‌بعدی و تأثیر به کار بردن دوزهای مختلف افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر روی خواص مکانیکی، خواص بتن تازه و خواص چاپی بتن چاپ سه‌بعدی پرداخته است. در این راستا، ابتدا یک طرح بدون افزودنی کاهنده جمع‌شدگی که بتواند توسط دستگاه چاپ سه‌بعدی، چاپ شود تهیه و از آن نمونه‌گیری شد. این نمونه‌ها به عنوان نمونه کنترل جهت بررسی تأثیر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر انواع خواص بتن چاپ سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفت. سپس چند طرح دیگر که حاوی مقادیر مختلف (به صورت صعودی) افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بودند، چاپ و نمونه‌گیری شدند. در نهایت بر روی همه نمونه‌ها آزمایش‌های خواص مکانیکی، بتن تازه و سخت شده، آزمایش جمع‌شدگی آزاد و آزمایش افت جرم طبق استانداردهای موجود صورت گرفت.

در این مقاله به ترتیب به بررسی فعالیت‌های آزمایشگاهی شامل راه‌اندازی دستگاه چاپگر سه‌بعدی بتن، مصالح مورد استفاده و آزمایش‌های مربوط به بتن چاپ سه‌بعدی تازه و سخت‌شده؛ و استانداردهای مربوط به هر آزمایش و سپس به ارائه و تحلیل نتایج حاصل از هر آزمایش پرداخته شده و در انتها نتیجه‌گیری‌های کلی مستخرج از این تحقیق بیان شده است.

۲- فعالیت‌های آزمایشگاهی

در این قسمت، به توضیح فعالیت‌های آزمایشگاهی انجام پذیرفته از جمله کارکرد و جزئیات چاپگر، مواد مورد استفاده، و پس از آن، نحوه اندازه‌گیری تأثیر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر میزان جمع‌شدگی، افت جرم، چاپ‌پذیری، جریان‌پذیری، پمپ‌پذیری، ساخت‌پذیری یا پایداری لایه‌ها، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن چاپ سه‌بعدی می‌پردازد.

³ Shrinkage reducing admixture (SRA)

⁴ Maia

⁵ Slavcheva

۲-۱- دستگاه چاپگر سه بعدی بتن

در این تحقیق از یک دستگاه جرثقیل^۶ چاپ سه بعدی بتن که بر پایه اکستروژن بتن کار می کند، استفاده می شود. شکل ۱-الف چاپگر ساخته شده، شکل ۱-ب منظور کنترل کننده حرکت دستگاه و شکل ۱-ج پمپ مورد استفاده را نشان می دهند. چاپگر سه بعدی ساخته شده، یک قاب فلزی قرار گرفته بر دو تکیه گاه است که دارای درجه آزادی در راستا رفت و برگشت در صفحه افق (X و Y) می باشد و تیر قرار گرفته روی قاب فلزی - که نازل روی آن سوار است- قابلیت حرکت در راستای Z را داراست. همچنین مکانیزم انتقال مواد چاپی به نازل و خروج از آن توسط یک ماردون پیچشی انجام می گیرد. برای به حرکت درآمدن نازل در هر دو راستا افقی و قائم و همچنین چرخش ماردون جهت خارج نمودن مواد از نازل از شش موتور استفاده می شود.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۱: مشخصات دستگاه آزمایش: (الف) چاپگر سه بعدی بتن، (ب) پمپ، (ج) کنترل کننده دستگاه چاپگر

⁶ Gantry

سرعت حرکت دستگاه به کمک کنترلر (کنترل کننده دستگاه چاپگر) قابل تنظیم است که مقدار آن بر روی ۱ سانتی‌متر بر ثانیه تنظیم شده است. انتخاب سرعت مناسب با توجه به طرح مخلوط و شکل نمونه باعث ایجاد یک لایه بتنی مناسب و عاری از مشکلاتی همچون کشیدگی بالای لایه و یا انقطاع آن می‌گردد. همچنین این سرعت می‌تواند تضمین‌کننده ایجاد بافت متراکم و بدون تخلخل زیاد لایه‌ها شود. نرم افزار با اعمال برش‌های افقی در مدل مورد چاپ، فایل g-code لازم توسط کنترلر را آماده می‌سازد. کنترلر نازل را به محل دقیق چاپ هدایت و دستور چاپ لایه اول را صادر می‌کند. پس از چاپ لایه اول، نازل به محل شروع چاپ می‌رسد و در راستای Z به اندازه قطر یک لایه حرکت می‌کند و سپس شروع به چاپ لایه دوم برای روی لایه اول می‌نماید. این روند می‌تواند در صورت در اختیار داشتن مقدار کافی از مصالح تا ارتفاع ۳۵ لایه بتن ادامه یابد. در هنگام عملکرد دستگاه، بتن چایی از طریق پمپ با سرعت قابل تنظیم نازل را تغذیه می‌کند. نکته مهم در این حین آن است که برای آنکه یک جریان ثابت خروجی از نازل وجود داشته باشد، لازم است تا نرخ ورودی مواد به چاپگر ثابت باشد که این شرایط به کمک پمپ دبی ثابت تأمین می‌شود.

تمامی طرح‌های اختلاط بیان شده در این پژوهش، دارای سه جزء اصلی سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان ساوه به عنوان ترکیب اصلی تشکیل‌دهنده خمیر سیمان، ماسه ریزدانه معمولی دو بار شسته شده با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر (رد شده از الک شماره ۱۰) و آب شرب تهران می‌باشند. از سایر افزودنی‌های استفاده شده می‌توان به افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، فوق‌روان‌کننده و میکروسیلیس اشاره نمود. فوق‌روان‌کننده استفاده شده از نوع پلی‌کربوکسیلاتی^۷ نسل سوم محصول شرکت استرامیکس^۸ است که عموماً با انواع ترکیبات مختلف سیمانی و پوزولانی سازگار می‌باشد. میکروسیلیس از شرکت فروسیلیس غرب پارس^۹ تأمین شده است. افزودنی کاهنده جمع‌شدگی از نمایندگی مپی^{۱۰} از کشور امارات تأمین شده است. برای اختلاط اجزای مختلف مخلوط از یک مخلوط‌کن ۱۰ لیتری ملات دو سرعت استفاده گردید. در مرحله اول، سیمان و میکروسیلیس در درون محفظه مخلوط‌کن قرار می‌گرفتند و سپس با دور کند دستگاه، به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط می‌شدند. در مرحله بعد، تمام مقدار آب و فوق‌روان‌کننده به درون مخلوط‌کن اضافه می‌شد و دستگاه به مدت دو دقیقه با دور کند مواد را مخلوط می‌کرد. بعد از آن، ماسه به مخلوط اضافه و به مدت ۴ دقیقه با دور تند مخلوط می‌شد. در نهایت افزودنی کاهنده جمع‌شدگی به مخلوط اضافه می‌شد و با دور تند اختلاط ادامه می‌یافت تا مخلوط همگن به‌دست آید. پس از آن، بتن برای استفاده در چاپگر سه‌بعدی از طریق پمپ مورد استفاده قرار می‌گرفت. بازه زمانی معمول بین اتمام اختلاط تا شروع کار چاپگر در حدود ۵ دقیقه بود.

۲-۲- مصالح مورد استفاده

به طور خلاصه، مصالح مورد استفاده در طرح مخلوط سیمان، ماسه، آب، فوق‌روان‌کننده، میکروسیلیس، و افزودنی کاهنده جمع‌شدگی می‌باشد که در ادامه مشخصات هر کدام با جزئیات بیان می‌گردد.

۲-۲-۱- سیمان

به منظور ساخت بتن چاپ سه‌بعدی، از سیمان پرتلند تیپ دو، ساخت شرکت ساوه با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است.

⁷ Polycarboxylates

⁸ STRUMIX company

⁹ Ferosilis Gharb Pars company

¹⁰ Mapei

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان تپ دو ساوه

مشخصات شیمیایی (%)		مشخصات فیزیکی	
۲۱/۱۳	SiO ₂	۳۱۷۰	سطح مخصوص (cm ² /g)
۵/۰۴	Al ₂ O ₃	۰/۰۸	انبساط اتوکلاو (%)
۳/۷۶	Fe ₂ O ₃	۲۰۹	مقاومت ۳ روزه (kg/cm ²)
۶۳/۳۰	CaO	۳۸۲	مقاومت ۷ روزه (kg/cm ²)
۱/۵۹	MgO	۴۳۱	مقاومت ۲۸ روزه (kg/cm ²)
۲/۳۰	SO ₃	۱۱۵	زمان گیرش اولیه (min)
۰/۶۹	K ₂ O	۲۵۰	زمان گیرش نهایی (min)
۰/۴۲	Na ₂ O		
۵۱/۲۹	C ₃ S		
۲۲/۱۸	C ₂ S		
۷/۰	C ₃ A		
۱۱/۴۳	C ₄ AF		

۲-۲-۲- ماسه

به منظور ساخت بتن چاپ سه بعدی، از ماسه ریزدانه‌ی طبیعی شرکت ماسه ریخته‌گری آزادگان استفاده شده است. جهت تعیین خواص مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش، شامل رطوبت موجود، جذب آب و چگالی از استانداردهای آزمایشگاهی به شرح زیر استفاده شده است:

مدول نرمی ماسه برابر ۳ به دست آمده و مقدار وزن مخصوص ظاهری در حالت سنگدانه اشباع با سطح خشک ۲/۵۴، وزن مخصوص ظاهری در حالت سنگدانه خشک شده در کوره ۲/۶۷ و وزن مخصوص انبوهی (مدول بالک) ۲/۴۶ تن بر متر مکعب بوده، جذب آب آن در حدود ۳/۰۵٪ محاسبه گردیده است. لازم به ذکر است که حداکثر قطر سنگدانه مصرفی در این پژوهش ۲ میلی‌متر بوده و همچنین مقدار عبوری سنگدانه از الک ۲۰۰ کم‌تر از ۳٪ محاسبه گردیده است.

۲-۲-۳- آب

آب مصرفی جهت استفاده در طرح اختلاط، آب تصفیه شده‌ی شهری تهران و در محدوده دمایی ۲۵ درجه می‌باشد. همچنین جهت عمل‌آوری نمونه‌ها از محلول فوق اشباع این آب همراه با آهک استفاده شده است.

۴-۲-۲- افزودنی فوق‌روان‌کننده

استراژین N550 یک ابر روان‌کننده بتن نسل چهارم و بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌اتر با عملکرد بالا از واحد تحقیق و توسعه تولید رزین پلی‌کربوکسیلات شرکت استرامیکس می‌باشد. این محصول جهت تولید بتنی با نسبت آب به سیمان پایین و روانی بالا توسعه یافته است و همچنین برای تولید بتن خود متراکم عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان می‌دهد. رسیدن به مقاومت و دوام بالا در بتن در میزان مصرف‌های متوسط این محصول از دیگر مزایای آن می‌باشد. در این تحقیق جهت افزایش کارایی و ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها از فوق‌روان‌کننده با نام تجاری "Strussin N550" با پایه شیمیایی پلی‌کربوکسیلات محصول شرکت استرامیکس استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات فوق‌روان‌کننده استفاده شده

پایه شیمیایی	شکل ظاهری	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	pH	میزان یون کلر
پلی‌کربوکسیلات اتر (نسل چهارم)	مایع عسلی یا قهوه‌ای	۱/۱۱	۵~۷	فاقد یون کلر

۵-۲-۲- میکروسلیس

میکروسلیس مورد استفاده در این پژوهش از شرکت فروسلیس ایران تهیه شده است. خصوصیات فیزیکی میکروسلیس مصرفی و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسلیس مصرفی

مشخصات شیمیایی		مشخصات فیزیکی	
اجزا	درصد	مشخصه	مقدار
SiO ₂	۸۵	اندازه ذرات (μm)	۴۰
Fe ₂ O ₃	۲		
CaO	۱/۵	چگالی بالک (kg/m ³)	۲۰۰-۳۰۰
Al ₂ O ₃	۱/۵		
MgO	۲/۵	سطح مخصوص (m ² /g)	۱۴-۲۰
C	۳		
L.O.I	۳/۵	وزن مخصوص ظاهری (kg/m ³)	۲/۳۵
رطوبت	۱		

۶-۲-۲- افزودنی کاهنده جمع‌شدگی

افزودنی کاهنده جمع‌شدگی یک ماده افزودنی مایع ویژه است که مخصوصاً برای کاهش ایجاد ترک‌های ناشی از انقباض رطوبت سنجی در بتن معمولی و خود تراکم طراحی شده است که از نمایندگی شرکت MAPEI در کشور امارات تهیه شده است. این ماده با کاهش کشش سطحی آب موجود در منافذ مویرگی کار می‌کند. این فرآیند شدت نیروهای وارد بر دیواره‌های منافذ را کاهش می‌دهد و ثبات ابعادی بهتر و در نتیجه کاهش شدید ترک‌های ناشی از پدیده جمع‌شدگی را تضمین می‌کند. استفاده از کاهنده جمع‌شدگی در

صورت ترکیب با عامل انبساط^{۱۱} یک عمل هم افزایی ایجاد می کند که امکان تولید بتن بدون انقباض و با ثبات حجمی استثنایی را فراهم می کند. در این مطالعه کاهنده جمع شدگی با مشخصات جدول ۴ مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۴: مشخصات کاهنده جمع شدگی استفاده شده

حالت فیزیکی	رنگ	دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)	pH
مایع	کهربای روشن	۱±۰/۰۳۰	۸±۱

۲-۳- طرح مخلوط

در این طرح مخلوط نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۲۵ و نسبت فوق روان کننده به مواد سیمانی برابر با ۰/۱۲ به دست آمد. طرح مخلوط های مورد آزمایش فقط در مقدار افزودنی کاهنده جمع شدگی تفاوت دارند که یک طرح شاهد یا کنترل بدون افزودنی کاهنده جمع شدگی (طرح K) و ۵ طرح دارای افزودنی کاهنده جمع شدگی که دارای ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد مواد سیمانی دارای افزودنی کاهنده جمع شدگی می باشند و به ترتیب طرح A تا E نامگذاری شدند. بقیه اجزا طرح مخلوط در همه طرح ها ثابت و یکسان می باشند.

۲-۴- جریان پذیری و آزمایش میز جریان

به منظور ارزیابی جریان پذیری نسبت اختلاط های بررسی شده، از آزمایش میز جریان مشابه با استانداردهای ASTM C 1437 [۱۴] و ASTM C 230 [۱۵] استفاده شده است.

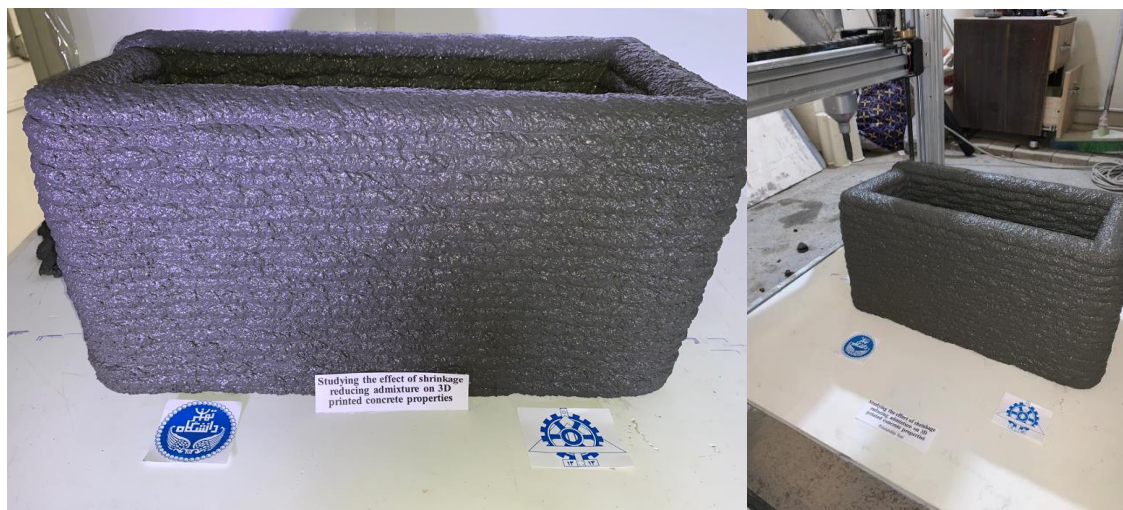
۲-۵- مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

در این تحقیق ۳ نمونه خمشی و ۶ نمونه فشاری حاصل از شکست نمونه های خمشی از هر طرح مخلوط مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C349-14 [۱۶] و آزمایش مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C348-14 [۱۷] انجام شد. برای انجام آزمایش های مقاومت مکانیکی از نمونه های منشوری ۴×۴×۱۶ سانتی متر استفاده شد که این نمونه ها در محلول آب آهک اشباع تا سنین ۷ و ۲۸ روز نگهداری شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۶- پایداری یا ساخت پذیری

به دست آوردن بتنی با خصوصیت روانی قابل توجه برای به کارگیری در چاپگر و از سوی دیگر برآوردن شرط پایداری و عدم تغییر شکل زیاد چالشی است که به آن نیز پرداخته شد. جهت بررسی معیار ساخت پذیری از هر طرح مخلوط یک دیوار با تعداد ۲۰ لایه چاپ شد. جهت تایید عملکرد مناسب دیوار در معیار ساخت پذیری باید اعوجاج عمودی، شکست لایه یا تغییر شکل بیش از حد در لایه های پایین تر مشاهده نشود. شکل ۲، ۲۰ لایه چاپ شده به طول ۳۵ سانتی متر و با مهارجانبی در ابتدا و انتها و روی هم قرار گرفته از بتن چاپ سه بعدی را نشان می دهد.

¹¹ Expansive agent



شکل ۲: ساخت نمونه بتنی ساخت پذیر

۲-۷- چاپ پذیری یا اکستروژن پذیری

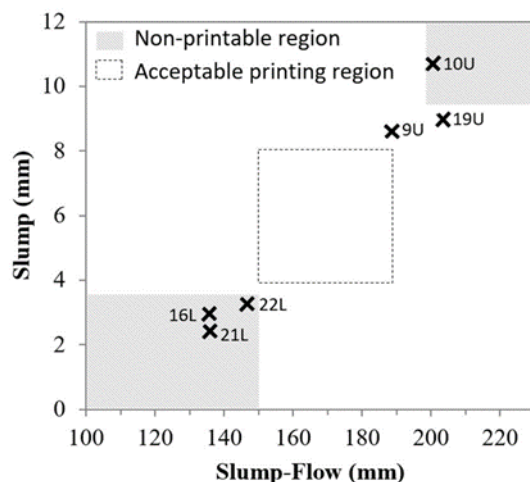
نحوه آزمایش بدین صورت است که از هر طرح مخلوط ۵ لایه منفرد هر یک به طول ۲۵۰ میلی متر چاپ شده که برای عملکرد مناسب در چاپ پذیری باید در طول فرآیند اکستروژن هیچ اشکالی نظیر انسداد، ریزش، جداسازی و آب انداختگی مشاهده نشود (شکل ۳).



شکل ۳: ساخت نمونه بتنی چاپ پذیر

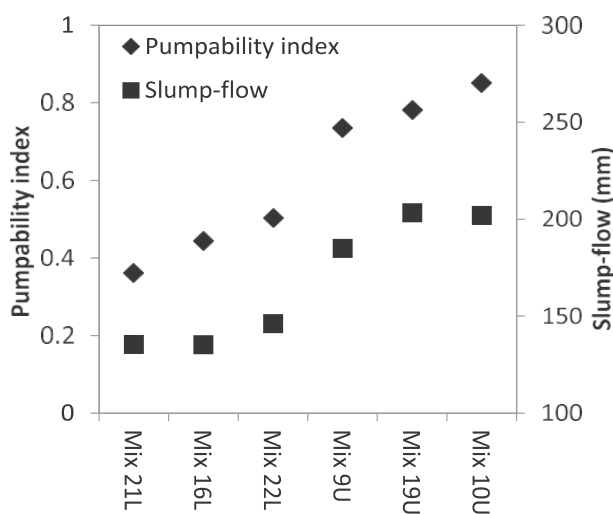
۲-۸- پمپ پذیری

طبق مطالعات گذشته رابطه‌ای مستقیم بین پمپ‌پذیری و آزمایش میز جریان و ساخت‌پذیری بتن چاپ سه‌بعدی وجود دارد [۱۸]. بر اساس این مطالعه مخلوط‌هایی با اسلامپ بین ۴ تا ۸ میلی متر و یا عدد بازشدگی میز جریان بین ۱۵۰ تا ۱۹۰ میلی متر، قابلیت پمپاژ بالا و قابلیت ساخت بالا با سطحی صاف را دارند. بنابراین طبق شکل ۴، منطقه قابل چاپ (پمپ‌پذیر و ساخت‌پذیر) بر اساس عدد بازشدگی آزمایش میز جریان و یا مقدار اسلامپ تعریف می‌شود [۱۸]. با این روش ساده و استاندارد، قابلیت پمپاژ و قابلیت ساخت و در کل قابلیت چاپ مخلوط‌ها را می‌توان قبل از چاپ سه‌بعدی تعیین کرد.



شکل ۴: محدوده قابل چاپ و غیر قابل چاپ [۱۵]

همچنین در تحقیق مورد اشاره، به منظور به دست آوردن یک پارامتر بدون بعد برای مشخص کردن قابلیت پمپ پذیری، شاخص پمپ پذیری تعریف می شود که برابر است حاصل تقسیم دبی بتن در سرعت پمپاژ ثابت بر دبی آب در همان سرعت پمپاژ. تای و همکاران [۱۸] مطابق شکل ۵ مشاهده کردند که شاخص پمپ پذیری نیز متناسب با مقدار آزمایش میز جریان نمونه ها است.



شکل ۵: ساخت نمونه بتنی چاپ پذیر [۱۵]

۲-۹- جمع شدگی

آزمایش جمع شدگی آزاد طبق استانداردهای ASTM C157 [۱۹] و ASTM C490 [۲۰] و ASTM C596 [۲۱] انجام شد. برای این منظور منشوری $25 \times 25 \times 285$ میلی متر قالب گیری، به اتاق کنترل با رطوبت نسبی ۹۵٪ و دمای ۲۳ درجه سانتیگراد منتقل و تا مدت ۲۴ ساعت از زمان شروع ساخت در آنجا نگهداری شده است. نمونه ها پس از خروج از قالب در آب آهک اشباع به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته و بعد از آن طول اولیه نمونه با دستگاه اندازه گیری جمع شدگی اندازه گیری شده است. بعد از عمل آوری مشخص شده، نمونه ها به

اتاق کنترل با رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای ۲۳ درجه سانتیگراد منتقل شدند. بعد از گذشت ۴ روز قرائت دوم برای هر نمونه انجام پذیرفت و سپس به صورت هفتگی تغییرات طول نمونه اندازه گیری شد.

۱۰-۲- آزمایش افت جرم

در همان روزهای قرائت جمع‌شدگی آزاد، جرم همه نمونه‌های ساخته شده برای بررسی جمع‌شدگی آزاد اندازه‌گیری شده و از تقسیم تفاضل جرم اولیه نمونه و جرم نمونه بر جرم اولیه نمونه، میزان افت جرم هر نمونه محاسبه شد. این آزمایش بر اساس پژوهش محققان دیگر انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفت [۲۲].

۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

۱-۳- نتایج آزمایش میز جریان

نتایج آزمایش میز جریان در جدول ۵ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش میزان افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر روانی مخلوط‌ها اضافه شده است به طوری که در طرح E، ۲۵ درصد افزایش قطر بازشدگی نسبت به طرح کنترل (طرح K) قابل مشاهده است. این یافته را می‌توان به مایع بودن افزودنی کاهنده جمع‌شدگی و ترکیبات شیمیایی آن نسبت داد که باعث روانی بیشتر و بیشتر شدن قابلیت جریان و کاهش لزجت شده است. حضور میکروسیلیس نقش به‌سزایی در روانی و کارایی بتن‌های ساخته شده ایفا می‌کند و با افزایش لزجت مانع از بازشدگی زیاد مخلوط می‌شود. طبق نتایج به‌دست آمده افزایش میزان میانگین قطر بازشدگی آزمایش میز جریان برای درصدهای استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی به مواد سیمانی برابر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در مقایسه با نمونه مبنا که افزودنی کاهنده جمع‌شدگی ندارد، به ترتیب حدود ۳، ۹، ۱۴ و ۲۰ درصد بوده است.

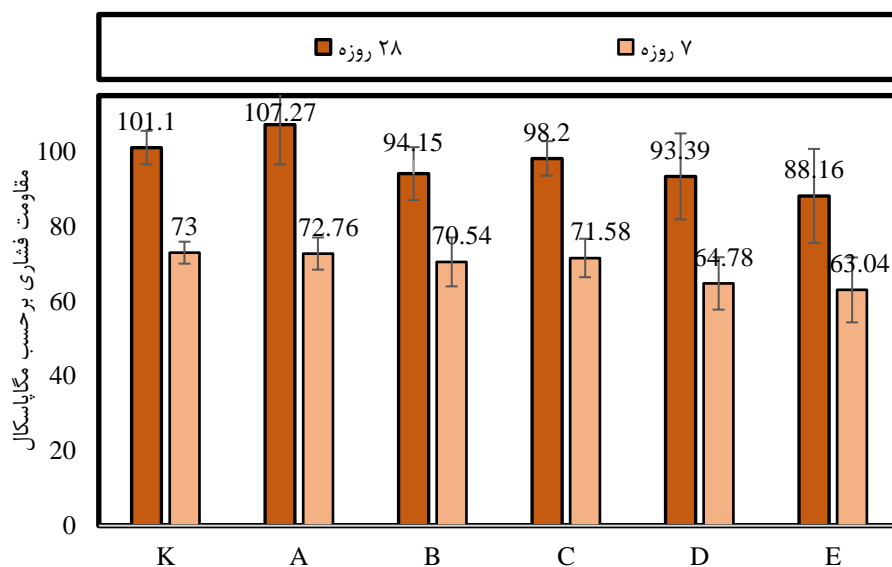
جدول ۵: نتایج آزمایش میز جریان

نام طرح	درصد SRA	میانگین قطر بازشدگی (cm)	جریان (%)
K	۰	۱۵/۴	۵۴
A	۰/۵	۱۵/۹	۵۹
B	۱	۱۶/۹	۶۹
C	۱/۵	۱۷/۶	۷۶
D	۲	۱۸/۵	۸۵
E	۲/۵	۱۹/۳	۹۳

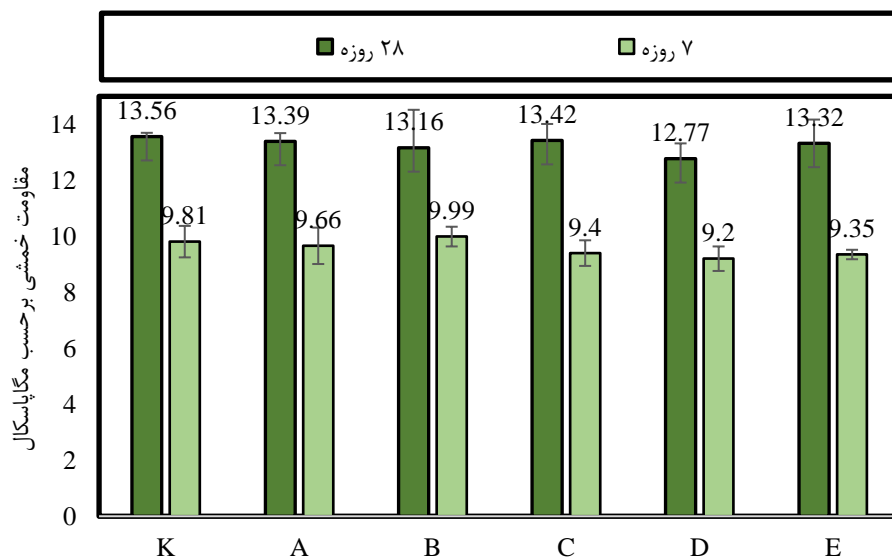
۲-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

شکل ۶، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و خمشی طرح‌های ساخته شده در سنین مختلف را نشان می‌دهد که با افزایش مقدار افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، از مقاومت فشاری نمونه‌ها کاسته می‌شود. حداکثر کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه مربوط به استفاده ۲/۵ درصدی از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (طرح E) می‌باشد که باعث کاهش حدود ۱۴ درصدی مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد شده است. نمونه‌های A، B، C و D به ترتیب کاهش ۰/۳ درصدی، ۳ درصدی، ۲ درصدی و ۱۱ درصدی در مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. همچنین مطابق این جدول، روند کلی میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای طرح‌های دارای ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد نزولی است؛ ولی افزایش و کاهش در مقاومت نمونه‌های میانی را می‌توان به عدم تراکم مناسب نمونه شاهد در قالب به دلیل روانی کم یا خطا در آزمایش نسبت داد. دلیل کاهش مقاومت را می‌توان به خاصیت افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در افزایش فضای

خالی نمونه‌ها نسبت به نمونه مبنا و مایع بودن آن که باعث افزایش روانی کاهش تحمل وزن لایه‌های بالایی نسبت داد. حداکثر کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به استفاده ۲/۵ درصدی از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (طرح E) می‌باشد که باعث کاهش حدود ۱۳ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد شده است. نمونه‌های A، B، C و D به ترتیب افزایش ۶ درصدی، کاهش ۷ درصدی، کاهش ۳ درصدی و کاهش ۸ درصدی در مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۶: مقاومت (الف) فشاری و (ب) خمشی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه

همچنین نمودارهای شکل ۶ نشان می‌دهند که با افزایش مقدار افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، از مقاومت خمشی نمونه‌ها به مقدار اندکی کاسته می‌شود و تفاوت‌ها معنادار و زیاد نمی‌باشد. حداکثر کاهش مقاومت خمشی ۷ روزه مربوط به استفاده ۲ درصدی از افزودنی

کاهنده جمع‌شدگی (طرح D) می‌باشد که باعث کاهش حدود ۶ درصدی مقاومت خمشی ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد شده است. نمونه‌های A, B, C و E به ترتیب کاهش ۲ درصدی، افزایش ۲ درصدی، کاهش ۴ درصدی و کاهش ۵ درصدی در مقاومت خمشی ۷ روزه نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. حداکثر کاهش مقاومت خمشی ۲۸ روزه مربوط به استفاده ۲ درصدی از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (طرح D) می‌باشد که باعث کاهش حدود ۶ درصدی مقاومت خمشی ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد شده است. نمونه‌های A, B, C و E به ترتیب کاهش ۱ درصدی، ۳ درصدی، ۱ درصدی و ۲ درصدی در مقاومت خمشی ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. از نتایج فوق در می‌یابیم که با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت (فشاری و خمشی) نیز افزایش یافته است زیرا با افزایش سن نمونه‌ها، واکنش‌های هیدراسیون انجام می‌شوند و مقاومت افزایش می‌یابد. این در حالی است که اثر کاهش افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در مقاومت (فشاری و خمشی) به سن نمونه وابسته نبوده و در هر سنی درصد این کاهش نسبت به نمونه مبنا تقریباً یکسان می‌باشد. این مشاهده را می‌توان به خاصیت افزودنی کاهنده جمع‌شدگی نسبت داد که از جمع‌شدگی نمونه جلوگیری می‌کند و کاهش حجم فضای خالی ایجاد شده در اثر خشک شدن نمونه کمتر می‌شود.

۳-۳- نتایج آزمایش ساخت پذیری و چاپ پذیری

نتایج آزمایش ساخت پذیری و چاپ پذیری در جدول ۶ به صورت کیفی تحلیل گردید که هر نمونه چابی در صورت داشتن تمام شروط و ویژگی‌های ساخت پذیری و چاپ پذیری، دارای عملکرد مناسب در معیار مربوطه و در صورت نداشتن حتی یک مورد از ویژگی‌های مورد نظر در هر معیار، دارای عملکرد نامناسب در معیار مربوطه خواهد شد.

جدول ۶: نتایج آزمایش ساخت پذیری و چاپ پذیری

نام طرح	معیار ساخت پذیری		معیار چاپ پذیری	
	مناسب	نامناسب	مناسب	نامناسب
K A B C D E	✓	-	✓	-
	✓	-	✓	-
	✓	-	✓	-
	✓	-	✓	-
	✓	-	✓	-

مطابق نتایج، همه طرح‌ها به جز طرح آخر (طرح E) ۲۰ لایه چاپ روی هم را تحمل کردند و اعوجاج عمودی، شکست لایه یا تغییر شکل بیش از حد در لایه‌های پایین‌تر مشاهده نشد. فقط در طرح آخر نشست لایه‌ها کمی افزایش یافت یعنی مقاومت لایه‌ها برای تحمل وزن لایه‌های رویی اندکی کم بود که می‌توان نتیجه گرفت برای درصدهای بالاتر از ۲/۵ کاهنده جمع‌شدگی با همین مقدار آب قطعاً عملکرد مناسبی در معیار ساخت پذیری وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر، طرح‌های K, A, B, C و D عملکرد مناسب در معیار ساخت پذیری داشتند و طرح E به مرز بحرانی ساخت پذیری نزدیک شد. دلیل این اتفاق را نیز می‌توان به مایع بودن افزودنی کاهنده جمع‌شدگی و روانی بیشتر طرح دارای ۲/۵ درصد افزودنی کاهنده جمع‌شدگی نسبت داد. البته لازم به ذکر است که فقط از طرح‌های K, B, D و E نمونه ساخت پذیری ساخته شد چون طرح‌های A و C بین طرح‌های دیگر از نظر مقدار SRA قرار دارند و این استنباط می‌شود که طرح‌ها ساخت پذیر می‌باشند. نتایج آزمایش چاپ پذیری نیز نشان می‌دهد که همه طرح‌ها در معیار چاپ پذیری عملکرد بسیار خوبی داشتند و موارد لازم را ارضا نمودند. در واقع ۵ لایه منفرد به طول ۲۵۰ میلی‌متر چاپ شده از هر طرح اختلاط، در طول فرآیند اکستروژن هیچ اشکالی نظیر انسداد، ریزش، جداشدگی و آب انداختگی نداشتند.

بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، همه طرح‌ها ساخت پذیر و چاپ پذیر می‌باشند و همچنین استفاده و افزایش مقدار افزودنی کاهنده جمع‌شدگی تا ۲/۵ درصد نسبت به مواد سیمانی در ساخت پذیری تأثیر چندانی ندارد و همه طرح‌های دارای افزودنی کاهنده جمع‌شدگی مشابه طرح کنترل، ساخت پذیر و چاپ پذیر می‌باشند.

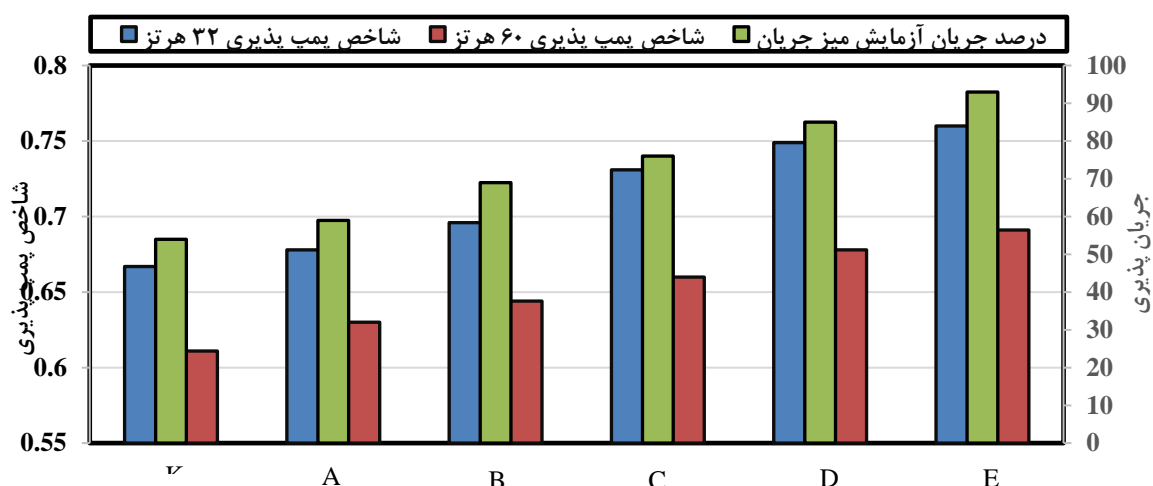
۳-۴- نتایج آزمایش ساخت پذیری و چاپ پذیری

در جدول ۷، شاخص پمپ‌پذیری هر کدام از طرح‌ها در دو سرعت ۳۲ و ۶۰ هرتز پمپ (فرکانس جریان متناوب موتور)، محاسبه و ارائه گردیده است. از نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی تأثیر کمی در افزایش پمپ‌پذیری خواهد داشت به طوری که در طرح حاوی ۲/۵ درصد افزودنی کاهنده جمع‌شدگی نسبت به مواد سیمانی (طرح E)، ۱۴ درصد در فرکانس ۳۲ هرتز و ۱۳ درصد در فرکانس ۶۰ هرتز باعث افزایش پمپ‌پذیری نسبت به طرح کنترل شده است. البته ذکر این نکته ضروری است که در صورت استفاده از درصدهای بالاتر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، قطعاً می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش پمپ‌پذیری بگذارد زیرا طبق جدول ۷، رابطه مستقیمی بین درصد استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی و شاخص پمپ‌پذیری وجود دارد و با افزایش درصد استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، شاخص پمپ‌پذیری نیز افزایش یافته است.

جدول ۷: نتایج آزمایش پمپ‌پذیری

شاخص پمپ‌پذیری (نسبت دبی بتن به دبی آب)		نام طرح
فرکانس ۶۰ هرتز	فرکانس ۳۲ هرتز	
۰/۶۱۱	۰/۶۶۷	K
۰/۶۳۰	۰/۶۷۸	A
۰/۶۴۴	۰/۶۹۶	B
۰/۶۶۰	۰/۷۳۱	C
۰/۶۷۸	۰/۷۴۹	D
۰/۶۹۱	۰/۷۶۰	E

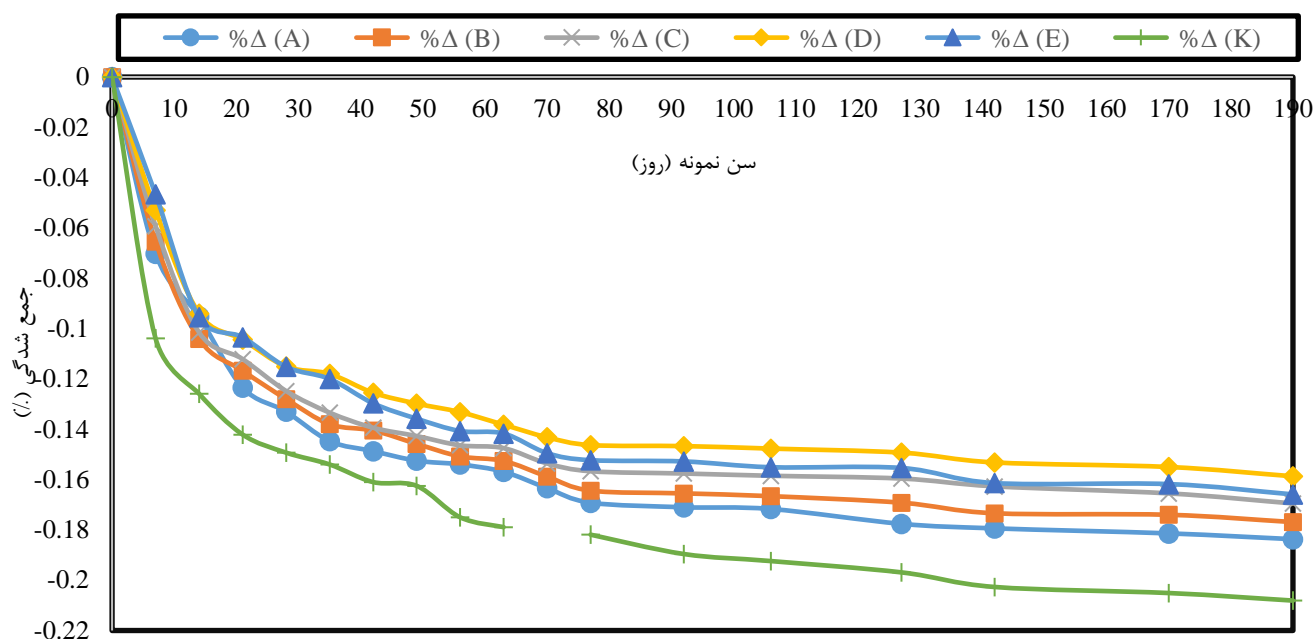
برای تحلیل و بررسی رابطه بین پمپ‌پذیری و آزمایش میزجریان، در شکل ۷ روند تغییرات درصد جریان آزمایش میز جریان، شاخص پمپ‌پذیری و میزان استفاده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در یک نمودار آورده شده است. از مقایسه این سه پارامتر در کنار هم می‌توان یافت که میزان بازشدگی و یا درصد جریان و شاخص پمپ‌پذیری با افزایش افزودنی کاهنده جمع‌شدگی افزایش یافته و دو به دو با هم رابطه مستقیم دارند. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که آزمایش ساده میز جریان شاخص مناسبی جهت تعیین پمپ‌پذیری مخلوط بتنی مورد چاپ است و با آزمایش میز جریان به تنهایی به رفتار پمپ‌پذیری بتن نیز دست یافت و با این آزمایش می‌توان تخمین مناسبی از پمپ‌پذیری بتن داشت.



شکل ۷: روند تغییرات درصد جریان آزمایش میز جریان، شاخص یمپ پذیرن و میزان استفاده افزودنی کاهنده جمع شدگی

۵-۳- نتایج آزمایش جمع شدگی

شکل ۸، نمودار جمع شدگی آزاد که شامل جمع شدگی ناشی از خشک شدن و جمع شدگی خود به خودی می باشد را ارائه می دهد. همچنین استفاده از ماده افزودنی کاهنده جمع شدگی موجب کاهش قابل توجه جمع شدگی آزاد بتن شده است به طوری که استفاده ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصدی از ماده افزودنی SRA به ترتیب موجب کاهش حدود ۱۲، ۱۵، ۱۸.۵، ۲۴ و ۲۰ درصدی جمع شدگی آزاد بتن در سن ۱۹۰ روز شده است. همه‌ی نمونه‌های حاوی SRA از نمونه شاهد جمع شدگی کمتری داشته و نمونه D کمترین جمع شدگی را دارد. بنابراین، طرح حاوی ۲ درصد افزودنی کاهنده جمع شدگی (طرح D) بهترین عملکرد را در کاهش جمع شدگی از خود نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش میزان مصرف SRA تا ۲ درصد میزان جمع شدگی نیز کاهش یافته است به این ترتیب که از نمونه A تا D جمع شدگی کاهش یافته است. این نتیجه نشانگر آن است که برای کاهش جمع شدگی ناشی از خشک شدن الزاماً نیاز به کاهش نسبت آب به سیمان نمی باشد و می توان با استفاده از ماده SRA به این هدف دست یافت. علاوه، با افزایش میزان استفاده از SRA بیشتر از ۲ درصد، مقدار جمع شدگی افزایش یافته است پس می توان نتیجه گرفت که با توجه طرح اختلاط و مقدار نسبت آب به سیمان، مقدار بهینه برای استفاده از افزودنی کاهنده جمع شدگی وجود دارد تا به حداقل میزان جمع شدگی رسید. در نتیجه در این پژوهش مقدار بهینه افزودنی کاهنده جمع شدگی ۲ درصد می باشد. با توجه به نمودار روند جمع شدگی را به ۳ قسمت میتوان تقسیم کرد که قسمت اول تا سن ۲۸ روز می باشد که شیب افزایش جمع شدگی زیاد است و قسمت دوم از سن ۲۸ روز تا ۷۰ روز می باشد که شیب افزایش جمع شدگی متوسط است و قسمت سوم از سن ۷۰ روز به بعد می باشد که شیب خیلی کم می باشد. این مشاهده به این دلیل نسبت داده می شود که از دست دادن آب در سنین اولیه بیشتر و راحت تر از سنین بالا است و در نتیجه نرخ افزایش جمع شدگی در سنین اولیه بیشتر از این مقدار در سنین بالا می باشد.

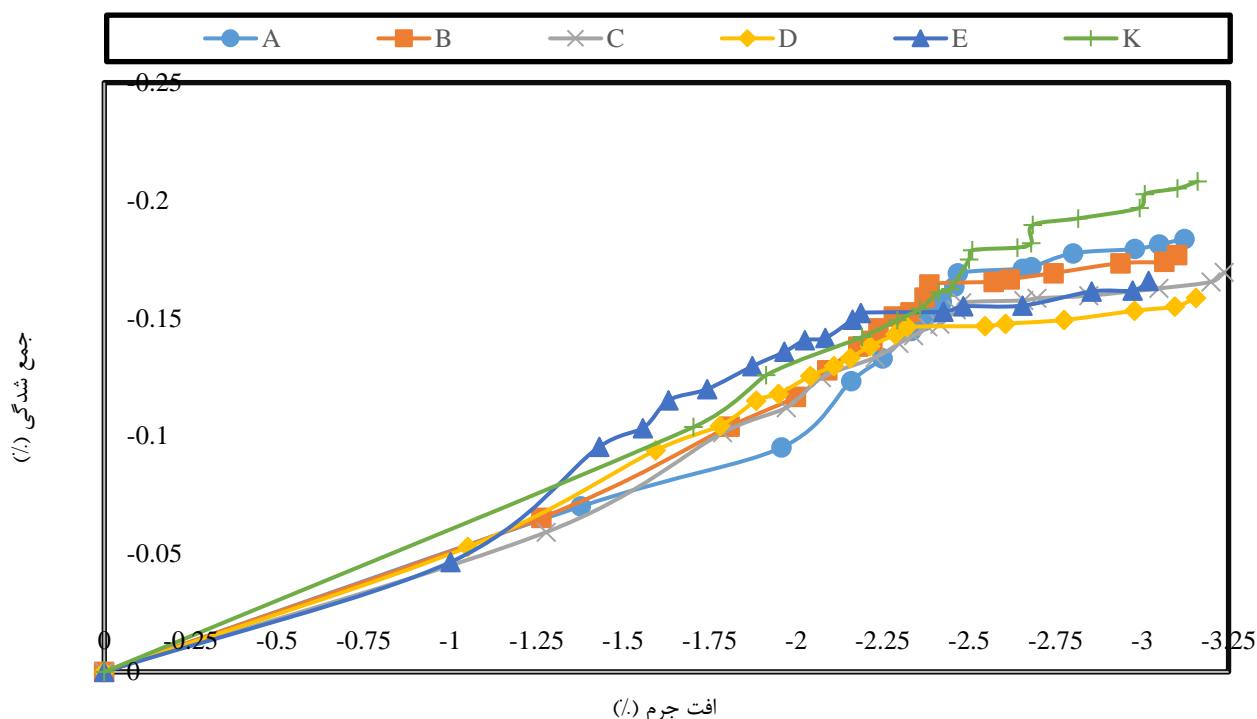


شکل ۸: نمودار جمع شدگی آزاد در سن‌های مختلف

چنانچه هدف رده‌بندی بتن از نظر جمع‌شدگی باشد، با توجه به تفاوت روش اندازه‌گیری جمع شدگی آزاد در این تحقیق، نمی‌توان مقایسه مستقیمی با محدودیت استاندارد کانادایی A23.1-14 [۲۳] صورت داد. اما با توجه به مقدار بسیار زیاد جمع شدگی آزاد مخلوط کنترل می‌توان اطمینان داشت که این مخلوط در رده بتن با جمع شدگی زیاد قرار می‌گیرد.

۳-۶- رابطه بین جمع‌شدگی و افت جرم

بررسی جمع‌شدگی و افت جرم مربوط به نمونه‌های شاهد و A تا E در شکل ۹ به صورت همزمان نشان داده شده است. در شکل ۹ تقریباً وجود تقارن و روندهای مشابه در جمع‌شدگی و افت جرم هر نمونه قابل مشاهده است. مطابق شکل ۹ نیز در اکثر مواقع در یک افت جرم ثابت، نمونه شاهد بیشترین جمع‌شدگی را داشته است و در قسمت انتهایی نمودار که افت جرم‌ها افزایش یافته است مشاهده می‌شود که در هر افت جرم ثابت و مشخص، نمونه‌های دارای افزودنی کاهنده جمع‌شدگی مقدار کمتری جمع‌شدگی نسبت به نمونه شاهد دارند. همچنین نمونه D که دارای ۲ درصد SRA می‌باشد، کمترین مقدار جمع‌شدگی را دارد و بعد از آن به ترتیب طرح‌های A و B و C، E جمع‌شدگی‌های کمتری نسبت به نمونه شاهد قرار دارند. در افت جرم برابر با ۳ درصد، نمونه D، ۲۳/۵ درصد جمع‌شدگی کمتری نسبت به نمونه K (شاهد) داشته است. به علاوه، مطابق شکل ۹، در افت جرم‌های بین ۱/۲۵ تا ۲/۳ درصد، نمونه‌های D و E جمع‌شدگی‌های بیشتری نسبت به سایر طرح‌ها داشته‌اند. در واقع نمونه‌های D و E در افت جرم‌های کمتر به حداکثر میزان جمع‌شدگی خود رسیده‌اند و بعد از آن علی‌رغم افزایش افت جرم تقریباً جمع‌شدگی آن‌ها ثابت مانده است ولی سایر نمونه‌ها بعد از بازه ۱/۲۵ تا ۲/۳ درصد، با یک روند صعودی به حداکثر میزان جمع‌شدگی خود می‌رسند. در بازه افت جرم ۰ تا ۱/۲۵ درصد نیز مشاهده می‌شود که نمودارهای نمونه‌های دارای SRA تقریباً بر هم منطبق هستند و نمودار نمونه شاهد دارای شیب بیشتر و مقدار جمع‌شدگی بیشتری می‌باشد. همچنین بر اساس شکل ۹ می‌توان دریافت که مقدار جمع‌شدگی و افت جرم نسبت مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش جمع‌شدگی، افت جرم نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۹: رابطه‌ی بین جمع‌شدگی و افت جرم

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (SRA) بر روی خواص مکانیکی و چابی بتن چاپ سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا چاپگر سه‌بعدی بتن در ابعاد آزمایشگاهی ساخته و توسعه داده شد. سپس با مطالعه منابع، تأثیر مواد و افزودنی‌ها از جمله افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر خواص بتن تعیین و طرح مخلوط‌های مختلفی برای به‌کارگیری بتن در چاپگر سه‌بعدی تعریف و در نظر گرفته شدند. جمع‌شدگی آزاد، افت جرم، جریان‌پذیری، ساخت‌پذیری، پمپ‌پذیری، چاپ‌پذیری و همچنین مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ساخته شده، مورد بررسی قرار گرفتند. مهم‌ترین نتایج اخذ شده از پژوهش عبارتند از:

- ۱- با توجه به نتایج بدست آمده این نکته حائز اهمیت است که با توجه طرح مخلوط و مقدار نسبت آب به سیمان، مقدار بهینه برای استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی وجود دارد تا به حداقل میزان جمع‌شدگی رسید و مقدار بهینه افزودنی کاهنده جمع‌شدگی برای این پژوهش و طرح مخلوط بکار برده شده ۲ درصد می‌باشد. پس میتوان نتیجه گرفت که این مقدار بهینه برای طرح مخلوط این مطالعه با نسبت آب به سیمان، نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی و مقدار سنگدانه استفاده شده بوده است. بنابراین با تغییر این نسبت‌ها مقدار بهینه افزودنی کاهنده جمع‌شدگی تغییر می‌کند.
- ۲- با افزایش درصد کاهنده جمع‌شدگی، میزان جمع‌شدگی آزاد (ناشی از خشک شدن به‌علاوه خودبه‌خودی) بتن چاپ سه‌بعدی تا حد بسیار خوبی کاهش می‌یابد. اما با توجه به خواص رئولوژی بتن چاپ سه‌بعدی مانند ساخت‌پذیری و چاپ‌پذیری استفاده بیشتر از ۲/۵ درصد از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، با افزایش بیش از حد روانی و کاهش مقاومت اولیه برای تحمل وزن لایه‌های فوقانی فرآیند چاپ را دشوار می‌کند. با افزایش میزان استفاده از SRA بیشتر از ۲ درصد مقدار جمع‌شدگی افزایش یافته است.

- پس می توان نتیجه گرفت که با توجه طرح اختلاط و مقدار نسبت آب به سیمان، مقدار بهینه برای استفاده از افزودنی کاهنده جمع شدگی وجود دارد تا به حداقل میزان جمع شدگی رسید.
- ۳- مقاومت های فشاری و خمشی برای همه طرح ها در رده بالایی قرار می گیرد ولی با توجه به آزمایش ها روند نزولی در مقاومت همراه با افزایش درصد افزودنی کاهنده جمع شدگی مشاهده شد که استفاده از افزودنی کاهنده جمع شدگی موجب کاهش حدود ۱۴ درصدی مقاومت فشاری در سن ۷ روز، کاهش حدود ۱۳ درصدی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز، کاهش حدود ۵ درصدی مقاومت خمشی در سن ۷ روز و کاهش حدود ۶ درصدی مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز شد. بنابراین مقدار کاهش در مقاومت خمشی اندک است و تفاوت ها در مقاومت خمشی معنادار و چشم گیر نیست.
- ۴- روانی بتن تازه با استفاده از آزمایش میز جریان تعیین شد که با افزایش میزان افزودنی کاهنده جمع شدگی بر روانی مخلوط ها اضافه شد که در طرح E با بیشترین روانی، ۲۵ درصد افزایش قطر باز شدگی مشاهده گردید.
- ۵- اعداد میز جریان برای همه طرح ها تقریباً بین ۱۶ تا ۱۹ سانتی متر قرار داشت که طبق پژوهش های گذشته ارتباطی بین عدد میز جریان و خواص بتن چاپ سه بعدی وجود دارد و در این بازه خواص بتن چاپ سه بعدی بهبود یافت.
- ۶- در بررسی ساخت پذیری همه طرح ها به جز طرح آخر (طرح E) ۲۰ لایه چاپ روی هم را تحمل کردند و هیچ گونه اعوجاج عمودی، ناهمواری سطوح، شکست لایه یا تغییر شکل بیش از حد در لایه های پایین تر مشاهده نشد و عملکرد مناسبی در معیار ساخت پذیری داشتند و طرح E به مرز بحرانی ساخت پذیری نزدیک شد. قطعاً برای درصدهای بالاتر از ۲/۵ کاهنده جمع شدگی با همین مقدار آب عملکرد مناسبی در معیار ساخت پذیری وجود نخواهد داشت.
- ۷- همه ی طرح ها در معیار چاپ پذیری عملکرد مناسبی داشتند. در واقع ۵ لایه منفرد به طول ۲۵۰ میلی متر چاپ شده از هر طرح اختلاط، در طول فرآیند اکستروود هیچ اشکالی نظیر انسداد، ریزش، جدا شدگی، آب انداختگی و ناهمواری سطوح نداشتند.
- ۸- همه طرح ها پمپ پذیری مناسبی داشتند و هیچ گونه گرفتگی یا انسداد یا جدا شدگی در طول فرآیند پمپ مشاهده نشد که مطابق انتظار بود زیرا تقریباً عدد باز شدگی میز جریان همه طرح ها بین ۱۵ تا ۱۹ سانتی متر می باشد. شاخص پمپ پذیری نیز با افزایش درصد افزودنی کاهنده جمع شدگی افزایش یافت.
- ۹- از مقایسه سه پارامتر درصد جریان، شاخص پمپ پذیری و درصد افزودنی کاهنده جمع شدگی در کنار هم می توان یافت که میزان باز شدگی و یا درصد جریان و شاخص پمپ پذیری با افزایش افزودنی کاهنده جمع شدگی افزایش یافته و دو به دو با هم رابطه مستقیم دارند.
- ۱۰- شاخص پمپ پذیری با باز شدگی و یا درصد جریان در آزمایش جریان رابطه مستقیم و یک به یکی دارند و می توان فقط با آزمایش میز جریان به تنهایی به رفتار پمپ پذیری بتن نیز دست یافت.
- ۱۱- در بررسی افت جرم، نمونه شاهد (K) بیشترین افت جرم را داشت و با افزایش میزان مصرف افزودنی کاهنده جمع شدگی، میزان افت جرم کاهش یافت. پس کمترین افت جرم نیز در نمونه E با ۲/۵ درصد افزودنی کاهنده جمع شدگی مشاهده شد.
- ۱۲- در بحث رابطه بین جمع شدگی و افت جرم تقریباً وجود تقارن و روندهای مشابه در جمع شدگی و افت جرم هر نمونه مشاهده شد. به عبارت دیگر، مقدار جمع شدگی و افت جرم نسبت مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش جمع شدگی، افت جرم نیز افزایش می یابد.

۵- مراجع

1. Wangler, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A., & Flatt, R. J. (2019). Digital concrete: a review. *Cement and Concrete Research*, 123, 105780.
2. Wang, C., Chen, B., Vo, T. L., & Rezaia, M. (2023). Mechanical anisotropy, rheology and carbon footprint of 3D printable concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 107309.
3. Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., & Rütther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in construction*, 72, 347-366.
4. Riaz, R. D., Usman, M., Ali, A., Majid, U., Faizan, M., & Malik, U. J. (2023). Inclusive characterization of 3D printed concrete (3DPC) in additive manufacturing: A detailed review. *Construction and Building Materials*, 394, 132229.
5. Şahin, H. G., & Mardani, A. (2023). Mechanical properties, durability performance and interlayer adhesion of 3DPC mixtures: A state-of-the-art review. *Structural Concrete*.
6. Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*, 21, 262-268.
7. Yurdakul, E. (2013). *Proportioning for performance-based concrete pavement mixtures* (Doctoral dissertation, Iowa State University).
8. Eberhardt, A. B. (2010). On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self con-solidating mortars and concretes.
9. Maia, L., Figueiras, H., Nunes, S., Azenha, M., & Figueiras, J. (2012). Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions. *Construction and Building Materials*, 35, 304-312.
10. Hamedanimojarrad, P. (2012). *Development of high performance shrinkage resistant concrete, using novel shrinkage compensating admixtures* (Doctoral dissertation).
11. Nunes, J., & Camões, A. (2013). Assessment of measures to mitigate concrete shrinkage.
12. Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2014). Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 46, 81-89.
13. Slavcheva, G. S. (2019, February). Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 481, No. 1, p. 012043). IOP Publishing.
14. ASTM C1437-15, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, 2015.
15. ASTM C230/C230M-14, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, 2014.
16. ASTM C349-14, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), 2014.
17. ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2014.
18. Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106968.
19. ASTM C157/C157M-08, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, 2014.
20. ASTM C490/C490M-11, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, 2014.
21. ASTM C596-09, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, 2009.
22. Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Lura, P., Shekarchi, M., & Ahmadi, B. (2013). An investigation on the use of zeolite aggregates for internal curing of concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 135-144.
23. A23.1-14/A23.2-14, Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete, 2014.