

Studying the Influence of Expansive Agents on 3D-Printed Concrete Properties

Mohammad Reza Daneshpasand¹, Amir Mohammad Ramezaniapour^{2*}, Amirali Ziarati³, Moslem Shahverdi⁴,
Abdollah Sadeghi Marzaleh⁵, Morteza Eskandari-ghadi⁶, Nima Zafarmomen⁷

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

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

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

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

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

6- Full Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

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

ABSTRACT

3D printed concrete (3DPC) is a subset of additive manufacturing technology that has gained significant attention in recent years. However, one of the fundamental challenges of this technology is the shrinkage of 3DPC. The absence of formwork, low water-cement ratio, and fine aggregate characteristics pose critical challenges in the shrinkage of these types of concrete. Therefore, this article aims to reduce and control the shrinkage of 3DPC using an expansive admixture. Additionally, it evaluates the impact of the admixture on various concrete properties, including mechanical properties, fresh concrete properties, and 3DPC properties. In this study, five mix designs with expansive admixture proportions of 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, and 1.5%, as well as one design without the admixture (the reference design), were selected for laboratory testing. The evaluation of free shrinkage for all six designs over a 177-day period indicates a 30% reduction in shrinkage when utilizing 1% of the expansive admixture. The direct relationship between mass loss and shrinkage in the tested specimens suggests that the majority of the measured shrinkage is attributable to water loss. The addition of 1% of the expansive admixture results in an 18% decrease in the compressive strength for the 7- and 28-day specimens, while each percentage increase in this admixture results in a 17% decrease in tensile (flexural) strength for the specimens at 28 days. Furthermore, each percentage increase in the use of this admixture in the six selected mix designs results in an 11% increase in the flow table test slump.

ARTICLE INFO

Receive Date: 17 November 2023

Revise Date: 15 September 2024

Accept Date: 04 January 2024

Keywords:

Shrinkage,
3D printed concrete,
Additive manufacturing,
Expansive admixture,
Buildability,
Pumpability,
Printability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424406.3264>

*Corresponding author: Amir Mohammad Ramezaniapour.

Email address: ramezani@ut.ac.ir

بررسی اثر افزودنی منبسطشونده بر روی خواص بتن چاپ سه بعدی

محمد رضا دانش پسند^۱، امیر محمد رمضان پور^{۲*}، امیرعلی زیارتی^۳، مسلم شاهوردی^۴، عبدالله صادقی مرزآله^۵، مرتضی اسکندری قادی^۶، نیما ظفر مومن^۷

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

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

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

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

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

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

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

چکیده

فناوری چاپ سه بعدی بتن که زیر شاخه‌ای از روش ساخت افزایشی^۱ است، با سرعت (از نظر زیرساختی) در سال‌های اخیر پیشرفت کرده است. با این وجود یکی از چالش‌های اساسی این فناوری ساخت، جمع‌شدگی بتن چاپ سه بعدی است. عدم وجود قالب، آب انداختگی کم، نسبت پایین سنگ‌دانه به خمیر و ریزی سنگ‌دانه‌ها باعث بحرانی شدن جمع‌شدگی این نوع بتن‌ها گشته است. به همین جهت در این مقاله قصد بر این است که با استفاده از ماده منبسط‌شونده، جمع‌شدگی بتن چاپ سه بعدی را کاهش داد و تا حد امکان آن را کنترل کرد و همچنین تأثیر میزان استفاده از ماده افزودنی را بر دیگر خواص بتن، اعم از خواص مکانیکی، خواص بتن تازه و خواص بتن سه بعدی مورد سنجش قرار داد. در این مقاله، ۵ طرح با نسبت‌های ماده منبسط‌شونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد و یک طرح فاقد منبسط‌شونده (طرح مینا) جهت بررسی آزمایشگاهی انتخاب شدند. ارزیابی جمع‌شدگی آزاد ۶ طرح ذکر شده نشان‌دهنده کاهش ۳۰٪ جمع‌شدگی تا سن ۱۷۷ روز به‌زای استفاده ۱٪ ماده منبسط‌شونده است. رابطه مستقیم بین افت جرم و جمع‌شدگی نمونه‌ها حاکی از این امر است که در آزمایش انجام‌گرفته، قسمت اصلی جمع‌شدگی اندازه‌گیری شده در اثر از دست دادن آب بوده است. افزودن ۱٪ ماده منبسط‌شونده منجر به کاهش ۱۸٪ در مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز گردیده است، در حالی که هر درصد افزایش این ماده بیشتر از یک درصد باعث کاهش ۱۷٪ در مقاومت کششی (خمشی) نمونه‌ها در سن ۲۸ روز می‌شود. به‌علاوه هر درصد افزایش در استفاده از این ماده در ۶ طرح موردنظر، منجر به افزایش ۱۱٪ در میزان بازشدگی آزمایش میز جریان گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن چاپ سه بعدی، ساخت افزایشی، جمع‌شدگی، ماده منبسط‌شونده، ساخت پذیری، پمپ پذیری، چاپ پذیری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424406.3264	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.424406.3264	۱۴۰۳/۰۶/۳۱	۱۴۰۲/۱۰/۱۴	۱۴۰۲/۱۰/۱۴	۱۴۰۳/۰۹/۲۵	۱۴۰۲/۰۸/۲۶
				*نویسنده مسئول:		
				امیرمحمد رمضانپور		
				post@ramezian@ut.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بتن چاپ سه بعدی نوعی خاص از بتن است که می‌تواند از طریق یک چاپگر سه بعدی به صورت لایه‌ای و بدون هیچ گونه قالب و فرآیند تراکم ساخته شود. چاپ سه بعدی بتن^۲ دارای مزایایی همچون ساخت با بازدهی بالا، کاهش هزینه اجرا، آزادی هندسه، ایمنی بیشتر و تولید کم‌تر ضایعات در ساخت و ساز در مقایسه با فناوری ساخت سنتی است. تا به امروز، بسیاری از سازه‌های ساختمانی با موفقیت با استفاده از فناوری بتن چاپ سه بعدی چاپ (ساخته) شده‌اند که برخی از آن‌ها حتی به کاربرد واقعی نیز دست یافته‌اند. بتن چاپ سه بعدی همانند هر روش نوین دیگر در ابتدای راه خود با چالش‌هایی روبه‌رو است. از این چالش‌ها می‌توان به جمع‌شدگی، مقاومت بین لایه‌ای، مسلح سازی، رفتار تیکسوتروپیک^۳ و مقاومت سبز (مقاومت بتن در حالت بتن تازه) آن اشاره کرد.

جمع‌شدگی (انقباض) بتن یکی از نکات کلیدی است که برای هر نوع بتن و هر طرح اختلاط باید مورد توجه و کنترل قرار گیرد تا از بروز ترک‌های جمع‌شدگی جلوگیری شود. تغییرات حجمی رخ داده در بتن در اثر گذشت زمان بدون اعمال بار را جمع‌شدگی می‌گویند. این نوع تغییرات در صورتیکه سبب بروز ترک شود می‌تواند بر دوام بتن اثر مستقیم بگذارد، به گونه‌ای که بدون پیش بینی تمهیدات خاص برای خنثی کردن آثار این پدیده، ساخت بتن با دوام در شرایط مختلف محیطی عملاً ممکن نخواهد بود. در بتن چاپ سه بعدی محدودسازی جمع‌شدگی ضروری است چرا که در این روش بتن بدون قالب‌بندی ساخته می‌شود و به تبع آن امکان از دست دادن آب از سطح افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به ترک خوردن بتن شود [۱].

صدیکا^۴ و همکاران جمع‌شدگی را یک چالش اساسی برای بتن‌های چاپ سه بعدی بیان کردند. آنها همچنین در مقاله خود به ارائه توضیحات کامل درباره خواص چاپی بتن چاپ سه بعدی نظیر: قابلیت جریان، قابلیت اکستروژن، ساخت پذیری، زمان باز، زمان گیرش و پایداری شکل بتن‌های چاپ سه بعدی پرداختند [۲]. سایر محققان در مطالعات خود بر روی مقاومت بین لایه‌ای ملات‌های ژئوپلیمری چاپ سه بعدی، علت کاهش مقاومت بین لایه‌های چاپی با افزایش زمان چاپ دو لایه روی هم را جمع‌شدگی غیر یکنواخت دولایه متوالی دانستند [۳]. به علت استفاده بیش‌تر از ریزدانه در بتن‌های چاپ سه بعدی سطح ویژه سنگ‌دانه‌ها افزایش می‌یابد که به دنبال آن مقدار آب مورد نیاز در طرح و همچنین جمع‌شدگی افزایش خواهد یافت. به علاوه حجم کمتر سنگ‌دانه استفاده شده و نسبت کمتر سنگ‌دانه به خمیر، منجر به افزایش جمع‌شدگی بتن می‌شود که دو دلیل اساسی برای جمع‌شدگی قابل ملاحظه بتن‌های چاپ سه بعدی می‌باشند [۴]. برای کنترل جمع‌شدگی بتن‌های چاپ سه بعدی مشابه بتن‌های معمولی راهکارهای زیر توصیه شده است: (۱) استفاده از مواد منبسط‌شونده در مخلوط (۲) استفاده از مواد افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (۳) استفاده از الیاف [۵]. راهکارهای اول و دوم نیاز به بررسی جامع آزمایشگاهی دارند.

به طور معمول، پس از گیرش، مقداری جمع‌شدگی در بتن رخ می‌دهد. برای جلوگیری از این پدیده در مواردی که جمع‌شدگی بتن باعث بروز مشکل در کار می‌شود، می‌توان از افزودنی منبسط‌شونده استفاده نمود. افزودنی‌های منبسط‌شونده موادی هستند که خاصیت انبساطی به بتن می‌دهند. چنانچه این افزودنی در هنگام تهیه بتن به آن اضافه شود، علاوه بر کاهش جمع‌شدگی بتن، نسبت آب به سیمان و آب انداختن بتن را کاهش می‌دهد و در نهایت مقاومت و عمر سازه بتنی را افزایش می‌دهد. برای مثال طبق نتایج تحقیق ابرهاردت^۵ و همکاران بر روی جمع‌شدگی بتن، استفاده از ماده منبسط‌شونده بر روی بتن با عیار ۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴ باعث کاهش ۳۳ درصدی در جمع‌شدگی می‌شود [۶]. همچنین، گانیه^۶ و همکاران بیان کردند که با توجه به شکل ۱، استفاده از ماده منبسط‌شونده باعث کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود [۷]. با توجه به ساخت متفاوت بتن در روش چاپ سه بعدی نسبت به روش اجرای سنتی (اعم از حذف قالب، داشتن طرح اختلاط کاملاً متفاوت و ...) انتظار می‌رود تفاوت عمده این دو نوع بتن در میزان

² 3D-concrete printing (3DCP)

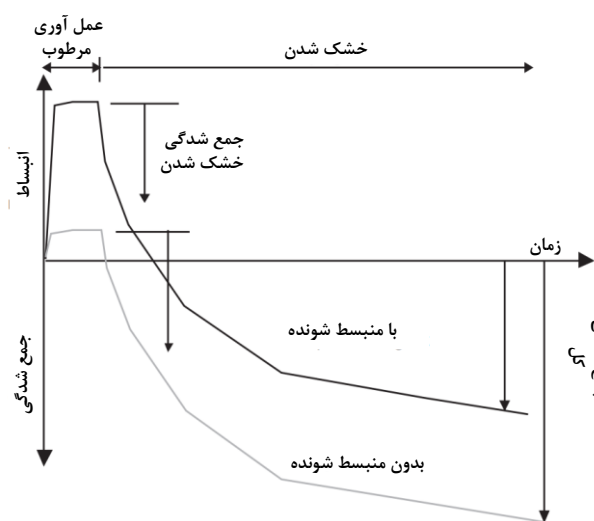
³ Thixotropic

⁴ Siddika

⁵ Eberhardt

⁶ Gagné

جمع شدگی اولیه آنها در مرحله ساخت باشد. از این رو در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از ماده منبسط شونده بر روی خواص بتن چاپ سه بعدی پرداخته شده است.



شکل ۱: تأثیر منبسط شونده بر جمع شدگی بتن انقباض شده از [۷].

۲- دستگاه، مواد و روش ساخت بتن

۲-۱- دستگاه چاپگر سه بعدی بتن

برای انجام این پژوهش از دستگاه چاپگر سه بعدی ساخته شده در آزمایشگاه مواد و سیستم‌های مرکب و هوشمند و آزمایشگاه مصالح دانشگاه تهران استفاده گردیده است. شکل ۲-الف چاپگر ساخته شده و شکل ۲-ب جعبه مدار الکترونیکی به منظور کنترل حرکت دستگاه را نشان می‌دهند. چاپگر سه بعدی ساخته شده از نوع جرثقیل دروازه‌ای^۷ بوده که دارای سه درجه آزادی است که از آن دو درجه آزادی در راستای افقی و یک درجه آزادی در راستای قائم است. در این دستگاه انتقال مواد تا نازل توسط پمپ انجام می‌گیرد و خروج مواد از نازل توسط یک ماردون پیچشی و فشار ناشی پمپ بر روی مواد پشت نازل محقق می‌شود. مراحل کار این دستگاه به این صورت است که با فشردن دکمه چاپ، نازل در مسیر چاپ در صفحه افقی حرکت می‌کند و همزمان ماردون مرکزی قرار گرفته در بالای نازل مواد را به سمت خروجی نازل هدایت می‌کند. اختلاف تراز جهت چاپ لایه‌های فوقانی به صورت تدریجی در یکی از وجوه سازه مورد چاپ صورت می‌پذیرد. در هنگام کار دستگاه، بتن چاپی از دهانه مجاور محفظه چاپگر به درون آن پمپ می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۲: دستگاه آزمایش: (الف) چاپگر سه بعدی بتن، (ب) جعبه مدار الکترونیکی به منظور کنترل حرکت دستگاه.

۲-۲- سیمان

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

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو ساوه [۸].

درصد ترکیبات اصلی				درصد ترکیبات شیمیایی							
C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۱۱/۴۳	۷/۰۰	۲۲/۱۸	۵۱/۲۹	۰/۴۲	۰/۶۹	۲/۳۰	۱/۵۹	۶۳/۳۰	۳/۷۶	۵/۰۴	۲۱/۱۳
مشخصات فیزیکی											
زمان گیرش نهایی	زمان گیرش اولیه	مقاومت ۲۸ روزه	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۳ روزه	انقباض اتوکلاو	سطح مخصوص					
(دقیقه)	(دقیقه)	(kg/cm ^۲)	(kg/cm ^۲)	(kg/cm ^۲)	(درصد)	(g/cm ^۲)					
۲۵۰	۱۱۵	۴۳۱	۳۸۲	۲۰۹	۰/۰۸	۳۱۷۰					

۲-۳- ماسه

به منظور ساخت بتن چاپ سه بعدی، از ماسه ریزدانه‌ی طبیعی شرکت ماسه ریخته‌گری آزادگان استفاده شده است. در این پژوهش جهت تعیین خواص مصالح سنگی مورد استفاده از استاندارد آزمایشگاهی ASTM C128 در تعیین چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی ریزدانه [۹] و از استاندارد آزمایشگاهی ASTM C566 در تعیین درصد رطوبت کلی سنگدانه‌ها [۱۰] استفاده شده است.

مدول نرمی ماسه برابر ۳ بدست آمده و مقدار وزن مخصوص ظاهری در حالت سنگدانه اشباع با سطح خشک ۲/۵۴، وزن مخصوص ظاهری در حالت سنگدانه خشک شده در آن ۲/۶۷ و وزن مخصوص انبوهی (مدول بالک) ۲/۴۶ تن بر متر مکعب بوده و 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.

۲-۴- افزودنی فوق‌روان‌کننده

در این تحقیق جهت افزایش کارایی و ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها از فوق‌روان‌کننده با نام تجاری Strusin N550 استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است. 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 خودمترکم عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. رسیدن به مقاومت و دوام بالا در بتن در میزان مصرف‌های متوسط این محصول از دیگر ویژگی‌های آن می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات فوق‌روان‌کننده استفاده شده [۱۱].

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

۲-۵- میکروسیلیس

میکروسیلیس مورد استفاده در این پژوهش از شرکت فروسیلیس ایران تهیه شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس مصرفی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس مصرفی [۱۲].

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

۲-۶- ماده منبسط شونده

ماده منبسط‌شونده مورد استفاده در این پژوهش استراگروت EN500 بوده که از مواد منبسط‌شونده پایه آلومینیومی می‌باشد. این محصول قادر به ایجاد انبساط کنترل شده ۱ الی ۴ درصد می‌باشد. میزان مصرف این ماده برای بتن‌های متعارف در حدود ۰/۴ تا ۰/۶ درصد وزنی مواد سیمانی توصیه شده است. مشخصات فیزیکی این ماده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات ماده منبسط‌شونده استفاده شده [۱۳].

شکل ظاهری	جرم حجمی (g/cm^3)	میزان یون کلر
پودر طوسی رنگ	۱/۲	فاقد یون کلر

۳- طرح مخلوط و عمل آوری

۳-۱- طرح مخلوط بتن چاپ سه بعدی

در مرحله آغازین طرح مخلوط آزمایشی بدون ماده پوزولانی و دیگر مواد افزودنی همانطور که در جدول ۵ آمده است انتخاب گردید.

جدول ۵: مشخصات ماده منبسط شونده استفاده شده.

شماره طرح پیشنهادی	نسبت آب به سیمان	نسبت ماسه به سیمان	نسبت فوق روان کننده به سیمان	حداکثر اندازه سنگ دانه (mm)
۱	۰/۳۲	۰/۵۷۶	۰/۰۱۳	۲

با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی طرح اولیه مانند آزمایش میزجریان و بررسی مشاهدات صورت گرفته در زمینه پمپ پذیری و چاپ پذیری بتن، طرح پایه نهایی با نسبت آب به خمیر ۰/۲۵، نسبت فوق روان کننده به خمیر ۰/۰۱۲ و نسبت میکروسلیس به خمیر ۰/۲۰ ارائه گردید. این طرح قابلیت ساخت پذیری تا ۳۰ لایه را دارد و دیگر خواص بتن چایی را نیز ارضا می نماید.

۳-۲- نحوه ساخت و عمل آوری

در مرحله اول، مخزن مخلوط کن با آب پر شد و به مدت چند دقیقه فرصت داده شد تا مخلوط کن و آب با یکدیگر در تماس باشند. این اقدام به دلیل اهمیت حیاتی تغییرات کوچک در مقدار آب مخلوط برای کیفیت چاپ آن، انجام شد. پس از خیس شدن پره و مخزن، ابتدا آب اضافی خالی شد و پس از آن سیمان و میکروسلیس درون مخزن ریخته و به مدت ۶۰ ثانیه با دور کند کاملاً مخلوط شدند. سپس آب و فوق روان کننده ها به مخزن مخلوط کن اضافه گردیده و به مدت ۲۰ ثانیه اجازه اختلاط مواد با دور کند داده شده است و در نهایت، ۴۰ ثانیه اجازه اختلاط به مواد با دور کند داده شد. در ادامه ماسه به صورت تدریجی و در حالی که مخلوط کن در حال کار بود به مخزن اضافه گردید. از زمان افزودن ماسه به مواد، مخلوط کن ۱ دقیقه با دور کند و پس از آن ۴ دقیقه با دور تند کل مواد را مخلوط می کرد.

برای عمل آوری نمونه های منشوری ۱۶×۴×۴ بعد از ریختن بتن در قالب و انجام عملیات تراکم طی دو مرحله توسط میله تراکم، روی سطح آزاد قالب برکه پلاستیکی کشیده و دور تا دور قالب با گونی خیس پوشانده شد. سپس نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. پس از آن نمونه ها از قالب ها بیرون آورده شده و داخل حوضچه آب آهک نگهداری شدند تا در سن های معین مورد آزمایش قرار گیرند.

برای عمل آوری نمونه های جمع شدگی آزاد مشابه سایر نمونه ها، مراحل تکرار شده و نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت و با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و در رطوبت ۱۰۰٪ نگه داری شدند و پس از ۲۴ ساعت از قالب ها بیرون آورده شدند و با دستگاه کمپراتور قرائت اولیه آن انجام گرفت. سپس به مدت ۴۸ ساعت داخل حوضچه آب آهک نگهداری شدند و بعد از آن یک قرائت دیگر صورت گرفت و سپس نمونه ها به اتافک کنترل با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪ نگهداری شدند تا در سن های معین طول آن ها قرائت شود.

۳-۳- طرح مخلوط های مورد استفاده

برای ارزیابی اثر ماده منبسط شونده بر خواص بتن چاپ سه بعدی در این پژوهش، از پنج طرح حاوی ماده منبسط شونده و به ترتیب حاوی ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد ماده منبسط شونده نسبت به خمیر و یک طرح مبنا بدون این ماده و با نام "CON" استفاده شد. نسبت های اختلاط این شش طرح در جدول ۶ خلاصه شده است.

جدول ۶: طرح مخلوط های مورد استفاده در پژوهش.

E	D	C	B	A	CON	طرح
۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰	نسبت منبسط‌شونده به خمیر

۴- آزمایش‌های انجام شده

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C349 در سنین ۷ و ۲۸ روز بر روی ۶ نمونه مکعبی $4 \times 4 \times 4$ سانتی‌متر انجام شده است [۱۴]. برای انجام آزمایش از دستگاه مقاومت فشاری با ظرفیت ۲۰ تن استفاده شده است. نمونه‌ها تا زمان آزمایش درون مخزن آب آهک با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری و نگهداری شده‌اند. سه نمونه از هر طرح در سن مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج بر اساس میانگین مقاومت فشاری سه نمونه ارائه شده است.

۴-۲- آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی بر روی ۳ نمونه منشوری $4 \times 4 \times 16$ سانتی‌متری در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. در انجام آزمایش مقاومت خمشی سعی شد الزامات استاندارد ASTM C348 رعایت گردد [۱۵]. روش ساخت ملات در بخش ساخت نمونه‌ها بیان شده است. سطوح داخلی قالب که در تماس با ملات است، توسط قشر نازکی از روغن قالب بتن بر پایه حلال با ویسکوزیته پایین و عملکرد رهاسازی بالا پوشش داده شد. نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری مرطوب نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش مقاومت خمشی، نمونه‌های منشوری خشک شدند و دانه‌ها و ذرات سست چسبیده به سطوحی از نمونه که با تکیه‌گاه‌ها و نقاط اعمال بار تماس پیدا می‌کنند، پاک گردید.

۴-۳- آزمایش جمع‌شدگی آزاد و افت جرم

برای انجام آزمایش جمع‌شدگی آزاد از ۳ نمونه‌های مکعبی $25 \times 25 \times 285$ میلی‌متر برای هر طرح مخلوط و کمپراتور با ساعت اندیکاتور دیجیتال و طبق استانداردهای ASTM C596 [۱۶]، ASTM C157 [۱۷] و ASTM C490 [۱۸] استفاده گردید و انجام آزمایش به مدت ۱۷۷ روز ادامه داشت. زمان شروع آزمایش، روز خارج کردن نمونه‌ها از قالب بوده (سن یک روزگی) و قرائت بعدی روز خارج کردن نمونه‌ها از حوضچه (سن سه روزگی) و پس از آن در سن هفت روزگی و در ادامه هر هفته قرائت‌ها انجام گرفت. در هفته‌ی ۱۰ به بعد به علت تفاوت ناچیز در دو قرائت متوالی، فاصله زمانی دو قرائت افزایش داده شد. با توجه به اینکه طی اندازه‌گیری جمع‌شدگی نمونه‌ها، باید دما و رطوبت محیط ثابت نگه داشته شود، کلیه قرائت‌های جمع‌شدگی آزاد در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰٪ انجام گرفت. سپس نمونه‌هایی که برای آزمایش جمع‌شدگی آزاد آماده شدند، در هر بار قرائت برای آزمایش جمع‌شدگی، وزن گرفته و میزان افت جرم نمونه‌ها در اثر از دست دادن آب اندازه‌گیری و ثبت شده است.

۴-۴- آزمایش جریان پذیری

برای تعیین روانی بتن، در تحقیقات مختلف، آزمایش‌هایی مانند آزمایش اسلامپ، آزمایش ویبی، میز روانی به کار گرفته شده‌اند. در این پروژه، برای تعیین میزان روانی و تأثیر نوع و میزان ماده منبسط‌شونده بر آن از آزمایش میز روانی استفاده شده است. آزمایش میز روانی مطابق با رویکرد ارائه شده در استاندارد ASTM C1437 [۱۹] و ASTM C230 [۲۰] صورت گرفته است.

۴-۵- آزمایش ساخت پذیری

ساخت‌پذیری یکی دیگر از پارامترهای اساسی مختص تکنولوژی چاپ سه‌بعدی محسوب می‌شود که برای مشخصه‌سازی آن هنوز استاندارد خاصی تهیه نشده است. بر اساس تحقیقات گذشته می‌توان ساخت‌پذیری را با تعداد لایه‌های بتنی که می‌توانند بر روی هم چاپ شوند مرتبط دانست با این شرط که لایه‌ها کم‌ترین مقدار تغییر شکل را داشته باشند و بتن چاپ شده بتواند معیارهای کیفیتی لازم را ارضا

کند [۲۱]. هر چه تعداد لایه‌های بتنی که بتوانند بدون سقوط کردن و یا تغییر شکل دادن زیاد بر روی هم قرار بگیرند بیش تر باشد، آن ملات بتنی ساخت پذیرتر خواهد بود. جهت بررسی ساخت پذیری هر طرح در این پژوهش جداره‌های کناری یک مکعب با چاپگر سه بعدی بتن با مشخصات جدول ۷ چاپ گردید.

جدول ۷: مشخصات نمونه چاپی برای آزمایش ساخت پذیری.

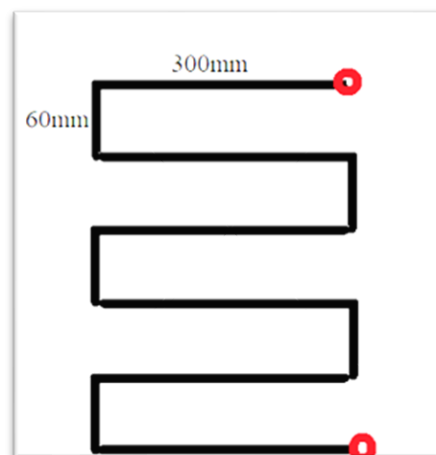
ابعاد نمونه (mm)	ضخامت لایه (mm)	پهنای لایه (mm)	تعداد لایه	سرعت حرکت نازل (mm/s)	سرعت حرکت ماردون نازل (mm/s)	مدت زمان چاپ (s)	زمان سپری شده از اختلاط بتن (s)	فرکانس پمپ (Hz)
۳۶۰×۱۴۰×۲۰۰	۱۰	۳۵-۴۰	۲۰	۴۰	۶	۵۰۰	۳۰۰	۳۲

۴-۶- آزمایش چاپ پذیری

در تحقیقاتی که در حوزه‌ی چاپ سه بعدی بتن انجام شده است [۲۲]، سه معیار کیفی جهت ارزیابی پارامتر چاپ پذیری معرفی شده است که در صورتی که هر نمونه‌ی چاپی یکی از این شروط را ارضا نکند، به عنوان یک نمونه‌ی نامناسب تلقی می‌گردد. معیار اول مبنی بر این است که لایه‌ی چاپ شده باید فاقد نقص‌هایی مانند انقطاع ناشی از سفتی بیش از حد مخلوط و یا پیوستگی نامناسب باشد. در معیار دوم لبه لایه‌ها باید تا حد امکان مربعی باشد. در معیار نهایی، ابعاد چاپ شده‌ی هر لایه باید ثابت باشند که در آن مقدار خطای مجاز در پذیرش ثابت بودن عرض لایه‌های چاپ شده برابر با ۱۰ درصد عرض باریکترین لایه پیشنهاد داده شده است. با توجه به معیارهای ذکر شده، در این پژوهش برای ارزیابی چاپ پذیری، هر یک از طرح‌ها توسط چاپگر بتن در یک مسیر مشخص چاپ گردیدند که مسیر چاپ و مشخصات چاپ در جدول ۸ و شکل ۴ آمده است. چنانچه مخلوط بتنی چاپ شده هر سه معیار عنوان شده را ارضا کرده باشد، چاپ پذیری آن مورد تایید قرار گرفته است.

جدول ۸: مشخصات نمونه چاپی برای آزمایش چاپ پذیری.

طول نمونه (mm)	ضخامت لایه (mm)	پهنای لایه (mm)	تعداد ردیف	سرعت حرکت نازل (mm/s)	سرعت حرکت ماردون نازل (mm/s)	مدت زمان چاپ (s)	زمان سپری شده از اختلاط بتن (s)	فرکانس پمپ (Hz)
۲۱۰۰	۱۰	۳۵-۴۰	۶	۴۰	۶	۵۳	۲۴۰	۳۲



(الف)

(ب)

شکل ۴: نمونه چاپی برای آزمایش چاپ پذیری (الف) مسیر چاپ (ب) نمونه چاپ شده.

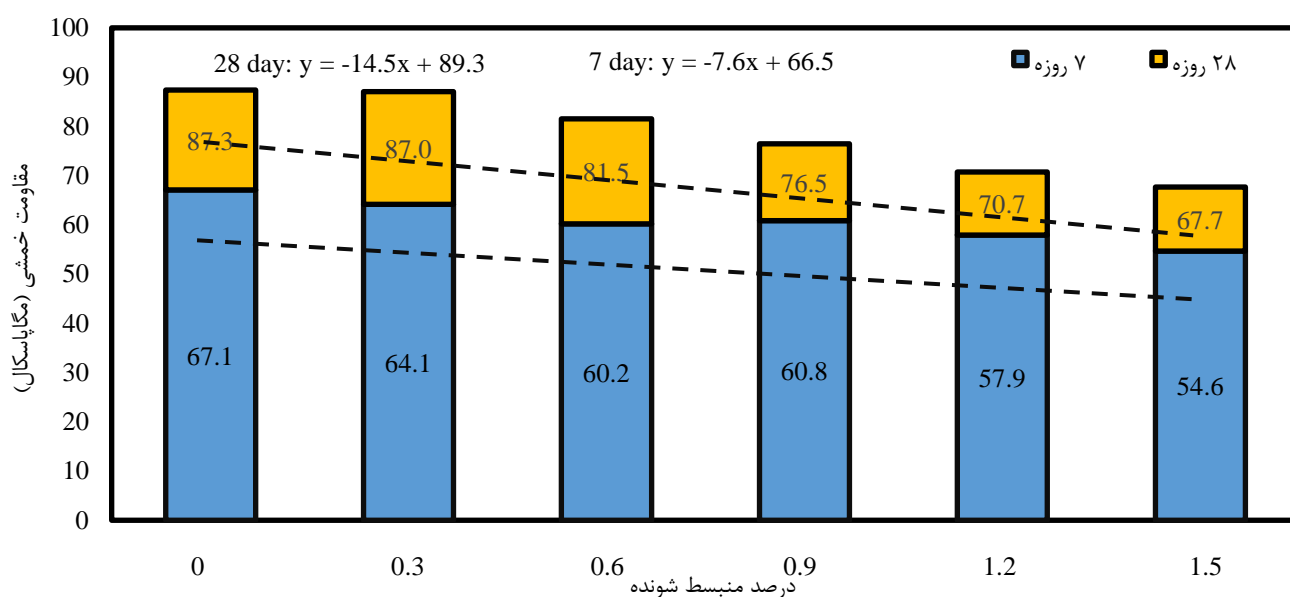
۴-۶- آزمایش پمپ پذیری

در این پژوهش برای مقایسه پمپ پذیری طرح اختلاطها از روش عنوان شده در تحقیقات گذشته [۲۳] استفاده شده است. در این روش برای بدست آوردن یک پارامتر بی بعد برای ارزیابی پمپ پذیری طرح اختلاطها ابتدا دبی خروجی پمپ جهت پمپ کردن آب اندازه گیری و با دبی خروجی پمپ جهت پمپ کردن مخلوط بتنی مورد نظر مقایسه می شود. نسبت دبی مخلوط به دبی آب پارامتری بی بعد برای پمپ پذیری است که به آن شاخص پمپ پذیری گویند. واضح است که این شاخص یک عدد کوچک تر از یک خواهد بود و هرچه این عدد به یک نزدیک تر گردد به معنای پمپ پذیری بیش تر ماده است. در این پژوهش برای اندازه گیری دبی آب و طرح اختلاطها یک ظرف در محل خروجی پمپ قرار داده شد و هم زمان نیز با استفاده از زمان سنج، زمان ثبت گردید. بعد از پر شدن، ظرف از جلوی دهانه پمپ برداشته شد و زمان سنج متوقف گردید. سپس وزن ماده داخل ظرف اندازه گیری و با داشتن وزن مخصوص آن حجم ماده و دبی خروجی پمپ مورد نظر محاسبه گردید. پس از آن از نسبت دبی آب به دبی مخلوط مورد نظر شاخص پمپ پذیری ماده بدست آمد. برای افزایش دقت این شاخص و کاهش خطای احتمالی در سرعت بالای پمپ این آزمایش برای هر طرح در دو فرکانس ۳۲ هرتز (محدوده فرکانسی پمپ که در زمان چاپ استفاده می شود) و ۶۰ هرتز (فرکانس مربوط به حداکثر سرعت پمپ) انجام گرفت. لازم به ذکر است که فرکانس های مذکور در حقیقت فرکانس برق متناوب ورودی به موتور پمپ هستند که قابل تنظیم هستند و بر روی سرعت موتور تاثیر مستقیم می گذارند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری طرح های ساخته شده حاصل از میانگین شش نمونه شکسته شده با سطح بارگذاری 4×4 سانتی متر مربع در سنین ۷ و ۲۸ روز در شکل ۵ نشان داده شده است. متوسط مقاومت فشاری طرح مبنا (طرح CON) در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب برابر با $67/1$ و $87/3$ مگاپاسکال و متوسط مقاومت فشاری مخلوط حاوی $1/5$ ٪ منبسط شونده (طرح E) در سن ۷ و ۲۸ روز برابر با $54/6$ و $67/7$ مگاپاسکال بدست آمده است. این نتایج نشانگر آن است که استفاده $1/5$ ٪ از افزودنی منبسط شونده موجب کاهش حدود ۱۷ درصدی مقاومت فشاری در سن ۷ روز و کاهش حدود ۲۵ درصدی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز شده است. با برآزش خطی می توان دریافت که به صورت میانگین، هر $3/0$ ٪ استفاده از منبسط شونده باعث کاهش $4/3$ ٪ در مقاومت فشاری ۷ روزه و کاهش 5 ٪ در مقاومت فشاری ۲۸ روزه گشته است. همانطور که در شکل ۵ مشخص است تاثیر ماده منبسط شونده در درصد های پایین استفاده (طرح A و طرح B) بر مقاومت ۷ روزه بیش از تاثیرش بر مقاومت ۲۸ روزه بوده است به طوری تأثیر استفاده $3/0$ ٪ (طرح A) در مقاومت ۲۸ روزه تقریباً ناچیز است. در حالی که در درصد های بالاتر استفاده (طرح C، طرح D و طرح E) تأثیر ماده منبسط شونده بر مقاومت ۲۸ روزه نسبت به تاثیرش بر مقاومت ۷ روزه افزایش داشته است.

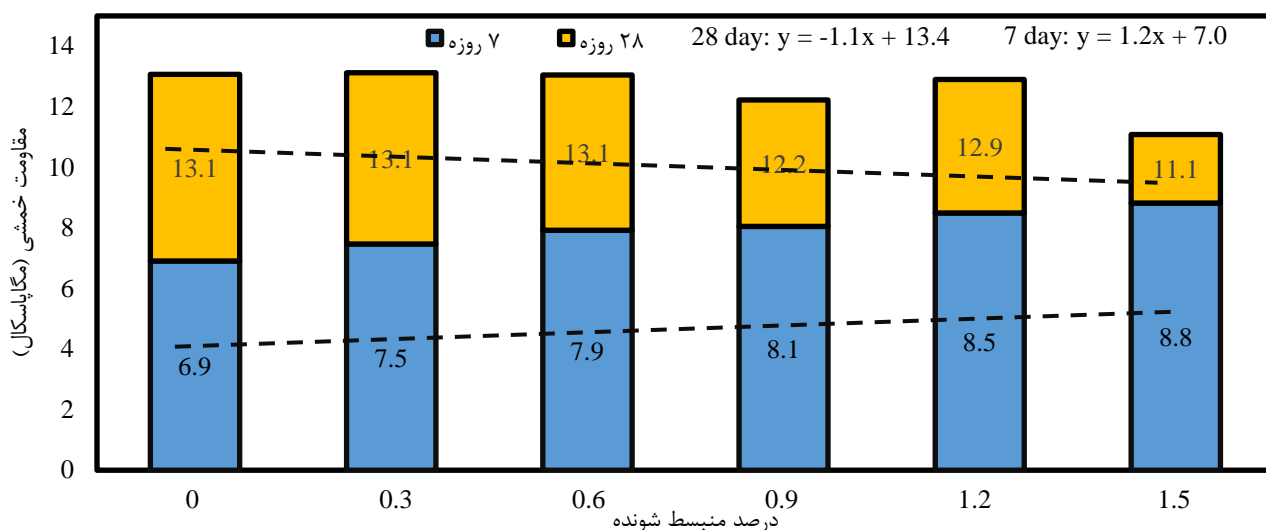


شکل ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه.

مطالعات صورت گرفته در مورد استفاده ماده منبسط‌شونده در دیگر انواع بتن‌ها حاکی از آن است که تفاوت مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه در درصد‌های پایین استفاده مشابه روند به دست آمده در این پژوهش می‌باشد به طوری که میزان کاهش مقاومت ۲۸ روزه تا ۳ برابر میزان کاهش مقاومت ۷ روزه نیز گزارش شده است [۲۴]. کاهش مقاومت‌های مشاهده شده در مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه این بخش را می‌توان به انبساط حجمی ایجاد شده توسط ماده منبسط‌شونده استفاده شده نسبت داد که باعث افزایش میزان حفرات داخل بتن شده است. بر مبنای تحقیقات گذشته افزایش میزان حفرات موجود در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری آن می‌گردد [۲۵]. در این پژوهش نیز با افزایش استفاده ماده منبسط‌شونده میزان حفرات ایجاد شده افزایش یافته که باعث کاهش بیش‌تر مقاومت فشاری شده است.

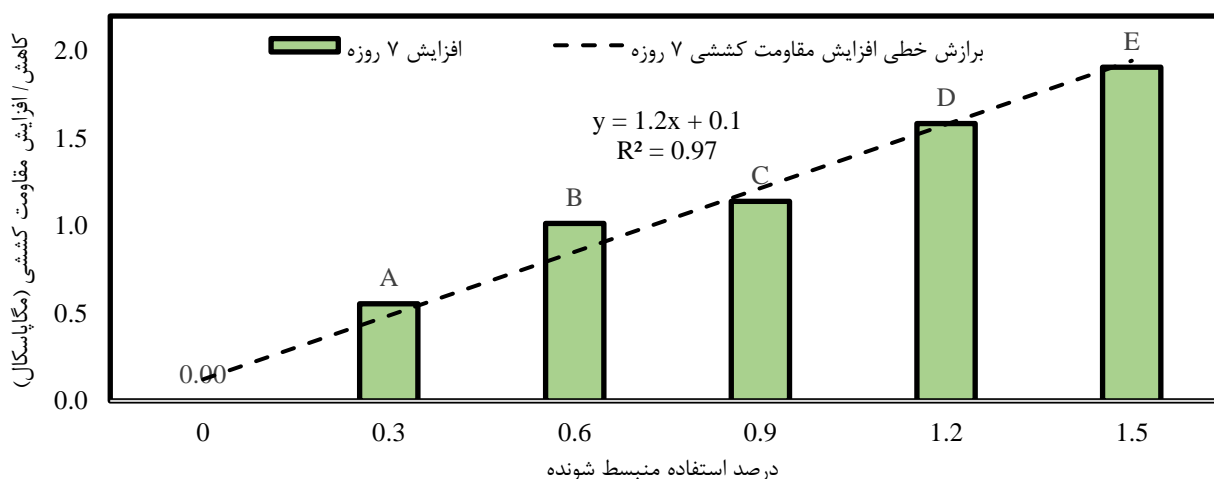
۲-۵- مقاومت خمشی

میانگین مقاومت کششی نمونه‌های پنج طرح دارای ماده منبسط‌شونده و طرح مینا به ترتیب برای مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. روند تغییرات مقاومت خمشی برای نمونه‌های ۷ روزه به صورت افزایشی و برعکس رفتار مشاهده شده در نمونه‌های مقاومت فشاری بدست آمده است و در نمونه‌های ۲۸ روزه روندی کاهشی بارزی مشاهده نمی‌شود. متوسط مقاومت کششی طرح مینا (CON) در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب برابر با ۶/۹ و ۱۳/۱ مگاپاسکال و متوسط مقاومت کششی طرح E در سن ۷ و ۲۸ روز برابر با ۸/۸ و ۱۱/۱ مگاپاسکال بدست آمده است. این نتایج نشان دهنده افزایش ۲۸٪ مقاومت ۷ روزه کششی و کاهش مقاومت ۱۵٪ مقاومت ۲۸ روزه کششی برای نمونه حاوی ۱/۵٪ ماده منبسط‌شونده نسبت به طرح مینا بوده است. به صورت میانگین با برآزش یک خط بر داده‌های بدست آمده می‌توان یافت که در هر ۰/۳٪ استفاده از منبسط‌شونده باعث افزایش ۵/۳٪ در مقاومت ۷ روزه و کاهش ۲/۵٪ در مقاومت ۲۸ روزه گشته است.



شکل ۶: نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است ماده منبسط‌شونده در سن ۷ روزگی نمونه‌ها تأثیر افزایشی در مقاومت کششی داشته و در سن ۲۸ روزه نیز به جز طرح حاوی ۱/۵٪ منبسط‌شونده (طرح E) در دیگر طرح‌ها تأثیر چندانی نداشته است. این تفاوت رفتار مقاومتی بین نمونه‌های فشاری و کششی را می‌توان به پیش‌تنیدگی داخلی حاصل از استفاده منبسط‌شونده در راستای طولی قالب نسبت داد که باعث افزایش مقاومت کششی ۷ روزه و عدم کاهش چندان در مقاومت ۲۸ روزه بوده است. روندهای مشاهده شده در مقاومت کششی طرح‌های حاوی مقادیر مختلف ماده منبسط‌شونده با دیگر تحقیقات صورت گرفته بر روی بتن‌های حاوی ماده منبسط‌شونده مطابقت قابل قبولی داشته است [۲۶]. به طوری که در تحقیق صورت گرفته بر روی بتن معمولی حاوی منبسط‌شونده، مقاومت کششی ۲۸ روزه طرح‌های حاوی ماده منبسط‌شونده با طرح مینا تقریباً برابر بوده است [۲۶].

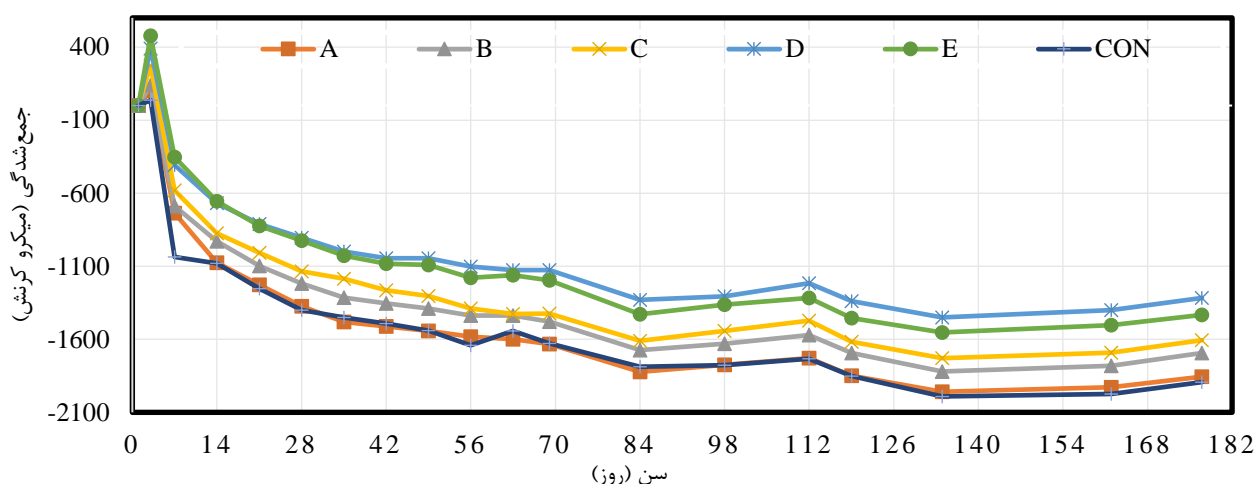


شکل ۷: افت مقاومت خمشی ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌ها نسبت به نمونه مینا.

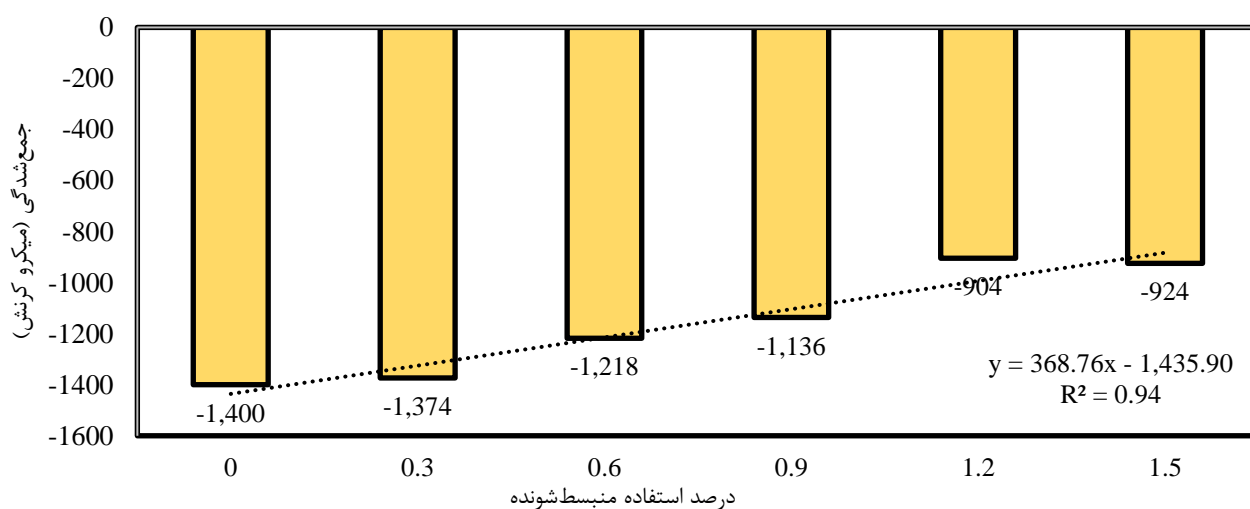
۳-۵- جمع‌شدگی آزاد

در شکل ۸ کرنش جمع‌شدگی آزاد طرح‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل در همه نمونه‌های حاوی ماده منبسط‌شونده کاهش جمع‌شدگی بتن مشاهده می‌شود که این کاهش را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد: (۱) از سن ۱ روز تا ۳ روز، که در

این بازه به علت خاصیت افزایش حجمی ماده منبسطشونده افزایش طول در نمونه‌ها مشاهده شد. این افزایش طول با مقدار ماده منبسطشونده بکار رفته در طرح رابطه‌ای مستقیم و خطی از خود نشان داده است، به طوری که از طرح مینا تا طرح حاوی حداکثر منبسطشونده (۱/۵٪) این انبساط افزایش پیدا کرده است. (۲) از سن ۳ روز تا ۴۹ روز، که در این بازه نیز میزان جمع‌شدگی نمونه‌ها در مقایسه با طرح مینا با افزایش مقدار ماده منبسطشونده کاهش بیشتری یافته است. (۳) از سن ۴۹ روز تا ۱۷۷ روز، که در این بازه میزان اختلاف جمع‌شدگی طرح‌های مختلف دستخوش تغییر زیادی نشده و میزان کاهش جمع‌شدگی بازه قبلی حفظ شده است. برای بررسی میزان جمع‌شدگی ۲۸ روزه نمونه‌ها در شکل ۹ میزان جمع‌شدگی هر نمونه در سن ۲۸ روزه رسم شده است، همان‌طور که از شکل نمایان است در این سن نیز با افزایش مصرف ماده منبسطشونده در طرح شاهد کاهش جمع‌شدگی خواهیم بود به طوری که میزان جمع‌شدگی در سن ۲۸ روز نمونه‌ها برای نسبت‌های ماده منبسطشونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد نسبت به میزان جمع‌شدگی نمونه بدون ماده منبسطشونده (طرح مینا) به ترتیب به میزان ۲، ۱۳، ۱۹، ۳۵ و ۳۴ درصد کاهش یافته است.



شکل ۸: نتایج آزمایش جمع‌شدگی آزاد تا سن ۱۷۷ روز.

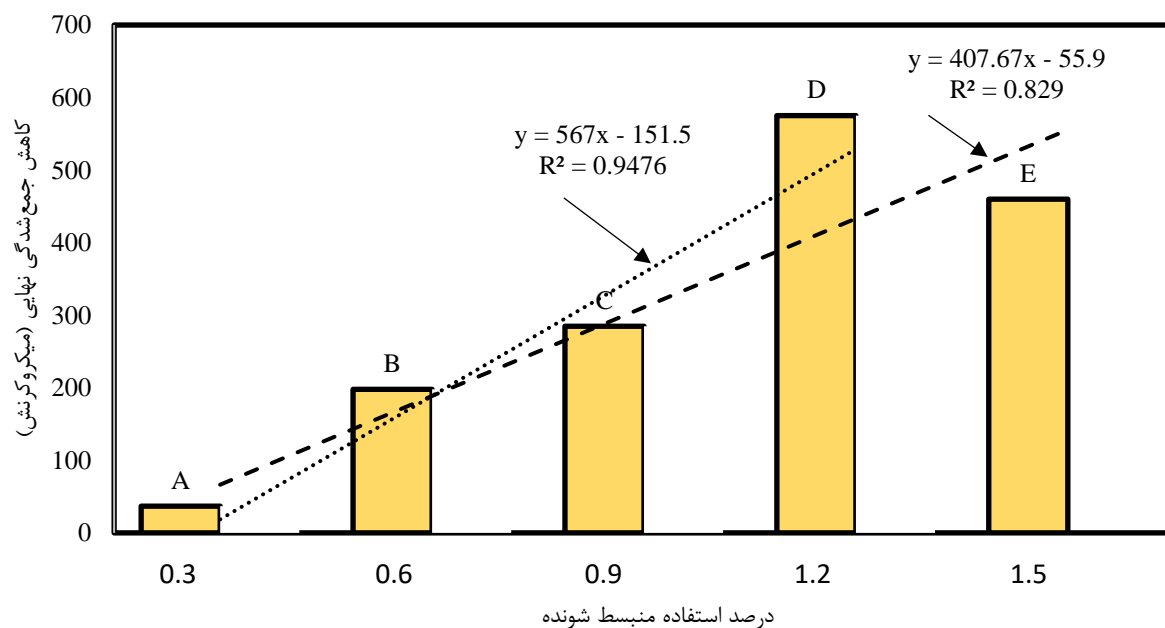


شکل ۹: نتایج آزمایش جمع‌شدگی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز.

استاندارد A23.1 کانادا [۲۷]، کرنش ۳۵ روزه بتن با جمع‌شدگی کم را به ۴۰۰ میکروکرنش (۰/۴ درصد تغییر طول) محدود می‌کند. در نمونه‌های ساخته شده، کلیه نمونه‌ها کرنشی بیش‌تر از ۴۰۰ میکروکرنش دارند که نشان دهنده عدم قرارگیری بتن چاپ

سه بعدی در دسته بتن‌های با جمع‌شدگی کم می‌باشد. با بررسی جمع‌شدگی طرح پایه می‌توان بیان کرد که طرح اختلاط ارائه شده برای بتن چاپ سه بعدی دارای جمع‌شدگی ۱۹۰۰ میکرو کرنش می‌باشد. لازم به ذکر است که روش انجام آزمایش ذکر شده در این استاندارد با روش مورد اشاره در استاندارد ASTM C157 قدری متفاوت است. در این روش نمونه‌ها از سن ۷ روز عمل‌آوری مرطوب در معرض شرایط خشک شدن قرار می‌گیرند در حالی که در استاندارد ASTM C157 نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری مرطوب در معرض شرایط خشک شدن قرار می‌گیرند. لذا با توجه به تفاوت روش اندازه‌گیری جمع‌شدگی آزاد در این تحقیق نمی‌توان مقایسه مستقیمی با محدودیت آیین‌نامه کانادا صورت گیرد. در عین حال با توجه به مقدار بسیار زیاد جمع‌شدگی آزاد مخلوط مبنا می‌توان اطمینان داشت که این مخلوط در رده بتن با جمع‌شدگی زیاد قرار می‌گیرد. مطالعه بتن‌های توانمند با عیارهای ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب نشان دهنده جمع‌شدگی ۴۰۰ تا ۷۰۰ میکرو کرنش در این بتن‌ها بوده است و از مقایسه این اعداد با نتایج بدست آمده از جمع‌شدگی بتن چاپ سه بعدی می‌توان گفت که جمع‌شدگی بتن چاپ سه بعدی به مراتب از بتن‌ها با عیارهای مشابه بیشتر است که نشان دهنده بحرانی بودن و ضرورت کنترل آن می‌باشد [۲۸، ۲۹، ۳۰].

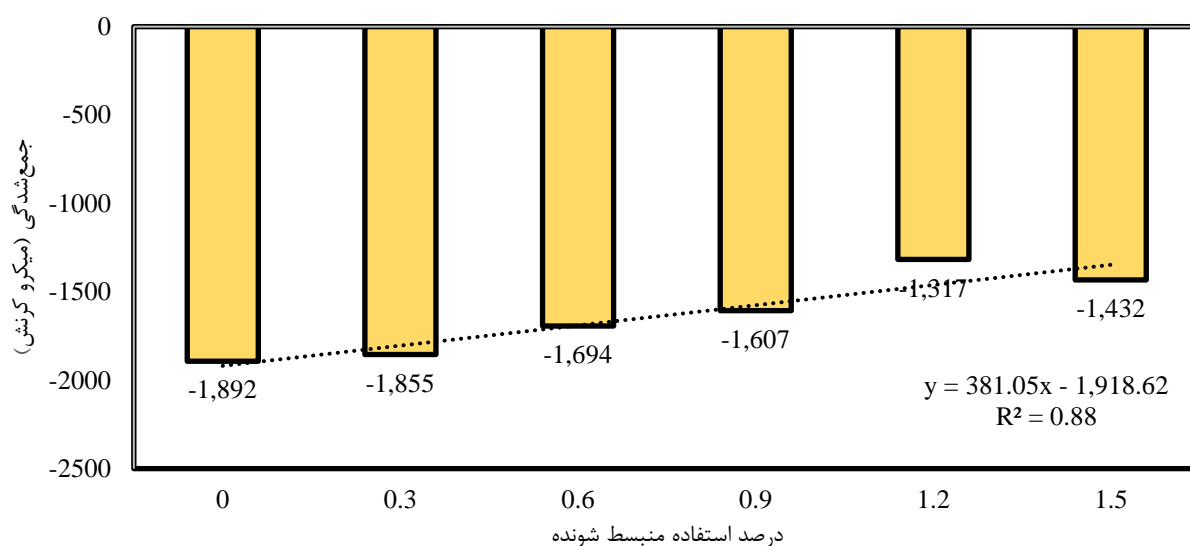
در شکل ۱۰ میزان کاهش جمع‌شدگی طرح‌های حاوی منبسط‌شونده نسبت به طرح مبنا و در شکل ۱۱ میزان جمع‌شدگی نمونه‌ها در سن ۱۷۷ روزگی آورده شده است. با توجه به نتایج و نمودارها میزان کاهش جمع‌شدگی نهایی نمونه‌ها تا سن ۱۷۷ روز برای نسبت‌های ماده منبسط‌شونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد نسبت به میزان جمع‌شدگی نمونه مبنا به ترتیب به میزان ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۲۴ درصد کاهش یافته است. با توجه به مشاهدات طرح حاوی ۱/۲٪ منبسط‌شونده (طرح D) بهترین عملکرد را در کاهش جمع‌شدگی از خود نشان داده است.



شکل ۱۰: کاهش جمع‌شدگی نهایی طرح‌های حاوی مقادیر مختلف منبسط‌شونده نسبت به طرح مبنا.

به صورت میانگین با برآزش یک خط بر داده‌های بدست آمده (از طرح‌های A تا D) می‌توان دریافت که هر ۰/۳٪ استفاده از منبسط‌شونده باعث کاهش ۹٪ در جمع‌شدگی آزاد می‌گردد. به صورت کلی استفاده از ماده منبسط‌شونده اثر به سزایی در کاهش و کنترل جمع‌شدگی به خصوص در سنین اولیه داشته است به طوری که با ایجاد یک انبساط کنترل شده با انقباض ناشی از جمع‌شدگی مقابله کرده و میزان کلی جمع‌شدگی را تا ۳۰٪ کاهش داده است. همچنین میزان کاهش جمع‌شدگی در اثر استفاده از ماده منبسط‌شونده در بتن چاپ سه بعدی در مقایسه با بتن‌های معمولی، کمتر بوده است به صورتی که در تحقیقی تا ۵۰٪ میزان جمع‌شدگی در اثر استفاده از ماده

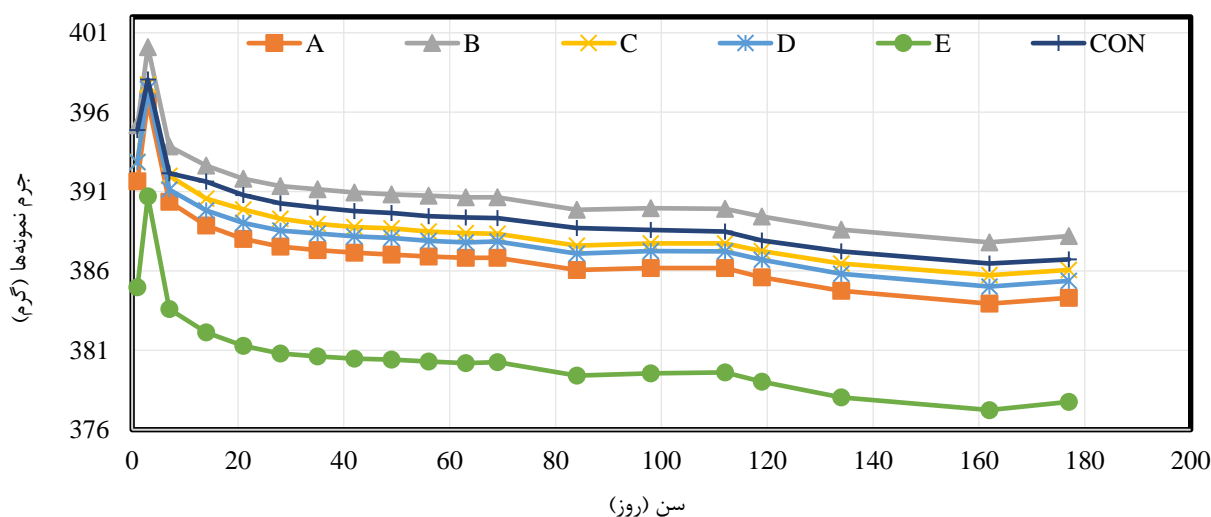
منبسط‌شونده در بتن معمولی کاهش یافته است [۳۱]. این تفاوت در میزان کاهش جمع‌شدگی را می‌توان به عبار بالای سیمان و مقدار مصرف کم سنگ‌دانه در بتن چاپ سه‌بعدی نسبت داد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: جمع‌شدگی نمونه‌ها در سن ۱۷۷ روز.

۴-۵- افت جرم

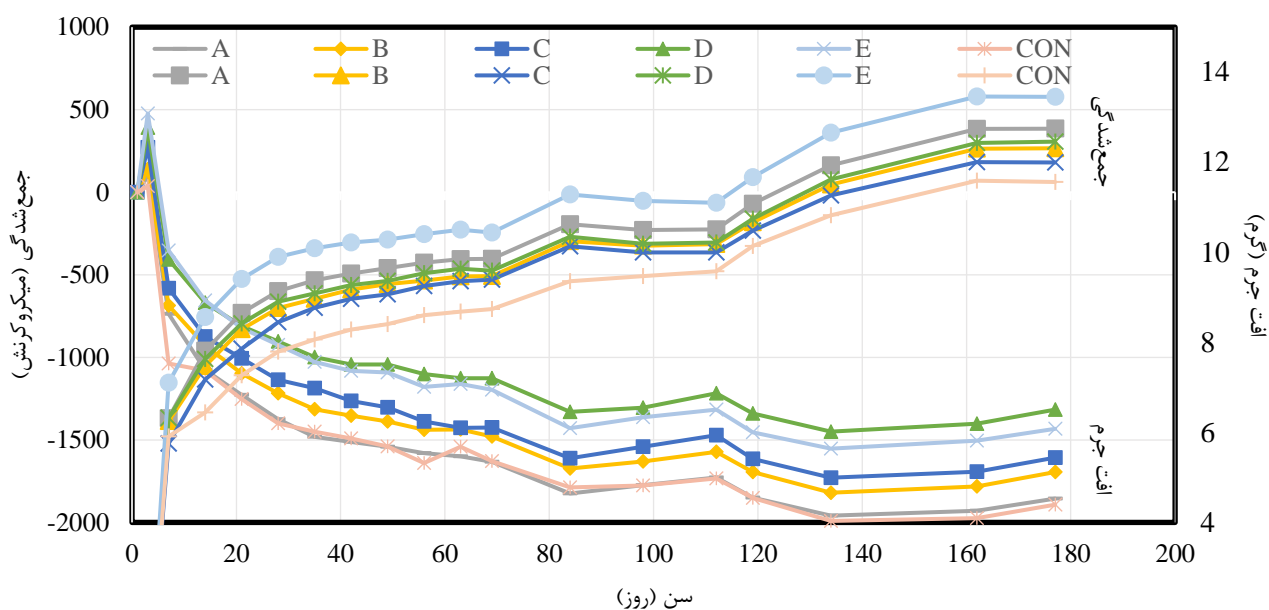
شکل ۱۲ جرم نمونه‌های مورد بررسی با طرح اختلاط مختلف را در گذر زمان نشان می‌دهد. در این نمودار جرم گزارش شده برای هر طرح حاصل میانگین جرم سه نمونه تهیه شده است، که در طول زمان ۱۷۷ روزه اندازه‌گیری شده است. همانطور که مشخص است، به‌علت عدم تاثیر ماده منبسط‌شونده در میزان آب تبخیر شده، در بازه زمانی جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن روند خاصی در نمودار قابل مشاهده نیست، ولی کلیه نمونه‌ها روند مشابهی را در افت جرم طی نموده‌اند.



شکل ۱۲: نتایج آزمایش افت جرم.

برای مقایسه رفتار جمع‌شدگی آزاد و افت جرم و سنجش رابطه این دو آزمایش، در شکل ۱۳ میزان جمع‌شدگی هر طرح در مقابل میزان افت جرم آن رسم شده است. از بررسی این دو نمودار می‌توان برداشت کرد که افت جرم و جمع‌شدگی نمونه‌ها رفتاری مشابه

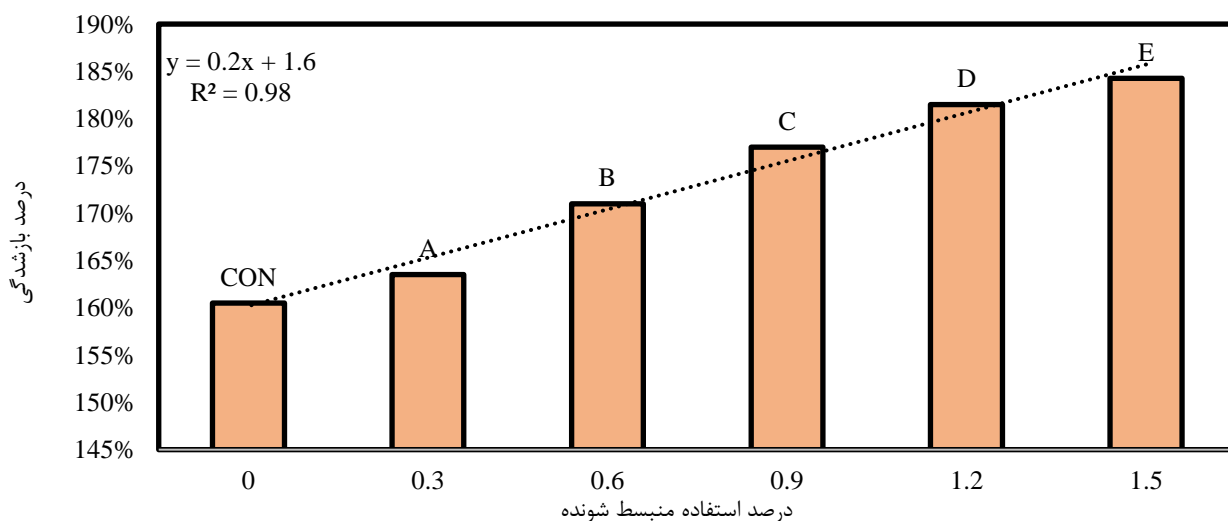
داشته‌اند و رابطه بین آن‌ها خطی است. این رابطه نشان‌دهنده این موضوع است که اکثر جمع‌شدگی‌های مشاهده‌شده ناشی از دست دادن آب است.



شکل ۱۳: نمودار رابطه بین جمع‌شدگی و افت جرم جریان‌پذیری.

۵-۵- جریان‌پذیری

نتایج آزمایش میز جریان در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که افزودن ماده منبسط‌شونده باعث افزایش روانی و جریان‌پذیری بتن می‌شود به طوری که طرح حاوی ۱/۵٪ منبسط‌شونده نسبت به طرح مبنا به میزان ۱۵٪ افزایش روانی داشته است. افزایش میزان بازشدگی آزمایش میز جریان برای نسبت‌های ماده منبسط‌شونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ درصد نسبت به نمونه مبنا به ترتیب ۲، ۷، ۱۰ و ۱۳ درصد بوده است. به صورت میانگین با برآزش یک خط بر داده‌های بدست آمده می‌توان یافت که هر ۰/۳٪ استفاده از منبسط‌شونده باعث افزایش ۳٪ در میزان بازشدگی مخلوط در آزمایش میز جریان شده است.



شکل ۱۴: درصد بازشدگی نمونه‌ها نسبت به قطر اولیه ۱۰ میلی‌متر.

علت افزایش روانی بتن در اثر استفاده از ماده منبسط‌شونده را می‌توان به حباب‌زایی این ماده در بتن تازه نسبت داد که باعث افزایش لغزندگی ذرات بر روی هم می‌گردد. در صورت افزایش مقدار ماده منبسط‌شونده در طرح جهت افزایش کارایی مخلوط می‌توان مقدار آب طرح را کاهش داد تا با این کار از اثر منفی ماده منبسط‌شونده در کاهش قابل توجه مقاومت فشاری جلوگیری کرد.

۵-۶- ساخت پذیری

در ارزیابی ساخت‌پذیری، معیارهایی مانند تعداد لایه‌ها، حفظ شکل نمونه، عدم تغییر شکل لایه‌های پایینی (به جز لایه چایی)، و ساخت یکپارچه در ارتفاع بررسی شدند. نتیجه نشان داد که همه طرح‌ها با معیارهای ذکر شده ساخت‌پذیر هستند.

با توجه به نتایج بدست آمده و مشاهدات صورت گرفته در موقع چاپ، همانطور که در شکل ۱۵ رویت می‌شود، می‌توان بیان کرد که استفاده و افزایش مقدار منبسط‌شونده در ساخت‌پذیری مخلوط تأثیر چندانی نداشته است و با افزایش استفاده از آن تا ۱/۵٪ نسبت به خمیر سیمان، همچنان ساخت‌پذیری طرح مینا قابل دستیابی است.



شکل ۱۵: نمونه چاپ شده (طرح D) برای بررسی کیفی معیارهای ساخت‌پذیری.

۵-۷- چاپ پذیری

با توجه به داده‌های آزمایش چاپ‌پذیری طرح‌های A تا E نشان‌داده‌شده در شکل ۱۶ براساس معیارهای ارزیابی کیفی مورد تایید قرار گرفتند. این معیارها شامل موارد زیر هستند: الف) لایه‌ی چاپ شده باید فاقد هرگونه نقص اعم از انقطاع ناشی از سفتی بیش از حد و یا پیوستگی نامناسب باشد، ب) لبه‌ی لایه‌ها باید تا حد امکان مربعی باشد و ج) ابعاد چاپ شده‌ی لایه باید ثابت باشند (طبق تحقیقات گذشته [۳۲]، مقدار خطای مجاز در پذیرش عرض هر لایه‌ی چاپ شده برابر ۱۰ درصد عرض لایه در نظر گرفته شد).



شکل ۱۶: نمونه‌های چاپ شده برای بررسی کیفی معیارهای چاپ پذیری الف) طرح CON ب) طرح A پ) طرح B ت) طرح C ث) طرح D ج) طرح E.

۸-۵- پمپ پذیری

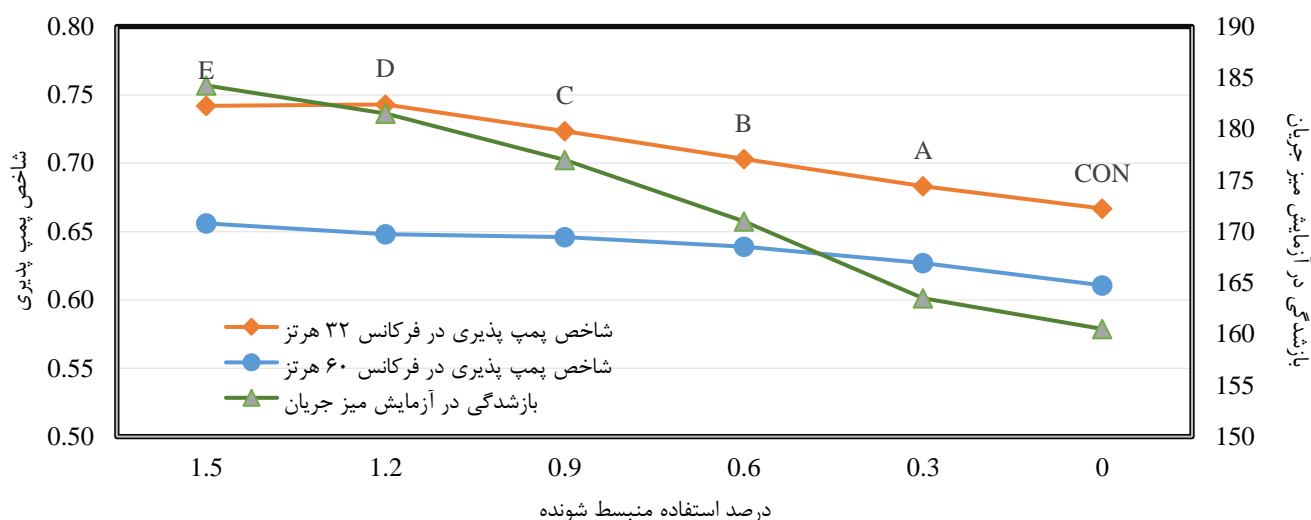
برای بررسی این خصوصیت از بتن‌های چاپ سه بعدی یک پارامتر بی بعد به نام شاخص پمپ پذیری تعریف گردید. بنا به این تعریف، شاخص پمپ پذیری عبارت است از نسبت دبی خروجی مخلوط از پمپ به دبی خروجی آب از آن در سرعت ثابت پمپ. شاخص پمپ پذیری هر کدام از مخلوط‌ها در دو سرعت مختلف پمپ، یعنی ۳۲ و ۶۰ هرتز، در جدول ۹ ارائه گردیده است.

جدول ۹: نتایج آزمایش پمپ پذیری

آب	طرح E	طرح D	طرح C	طرح B	طرح A	طرح CON		
۱	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۷	شاخص پمپ پذیری	فرکانس ۳۲ هرتز
۱	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۶۱	شاخص پمپ پذیری	فرکانس ۶۰ هرتز

شکل ۱۷ روند تغییرات بازشدگی مخلوط‌ها در آزمایش میز جریان، شاخص پمپ پذیری آن‌ها و میزان استفاده منبسط‌شونده در طرح‌ها را به تصویر می‌کشد. از مقایسه این سه پارامتر می‌توان دریافت که میزان بازشدگی و شاخص پمپ پذیری با افزایش مقدار منبسط‌شونده افزایش یافته و این افزایش برای هر دو تقریباً با روند مشابهی طی شده است. در نتیجه شاخص پمپ پذیری و بازشدگی در آزمایش میز جریان رابطه مستقیم دارند و می‌توان تنها با انجام آزمایش میز جریان به رفتار پمپ پذیری بتن نیز دست یافت.

به علاوه، نتایج حاکی از این است که استفاده از ماده منبسط‌شونده تأثیر کمی در افزایش پمپ پذیری دارد به طوری که این افزایش در طرح حاوی ۱/۵٪ منبسط‌شونده (طرح E) نسبت به طرح مبنا به ۱۱ درصد در فرکانس ۳۲ هرتز و ۷ درصد در فرکانس ۶۰ هرتز محدود شده است. نتیجه مشابهی از مشاهدات کیفی آزمایش میز جریان نیز حاصل شد.



شکل ۱۷: روند تغییرات بازشدگی میز جریان، شاخص پمپ پذیری و میزان استفاده منبسط شونده.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی اثر منبسط شونده بر روی خواص بتن چاپ سه بعدی اعم از خواص مکانیکی و خواص چاپی آن پرداخته شد. در این پژوهش پس از راه اندازی یک چاپگر سه بعدی بتن به صورت تمام خودکار و در مقیاس آزمایشگاهی، ابتدا یک طرح اختلاط مناسب برای چاپ بتن به دست آمد. معیارهای مناسب بودن طرح با توجه به استانداردهای موجود و تحقیقات گذشته تعریف شد و مورد بهره برداری قرار گرفت. با توجه به آزمایش های صورت گرفته جمع شدگی بالای بتن چاپی، به عنوان یکی از چالش های استفاده از فناوری بتن چاپ سه بعدی، مورد تایید قرار گرفت. سپس استفاده از ماده منبسط شونده جهت کاهش و کنترل میزان جمع شدگی بتن چاپ سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از آن را می توان به صورت زیر جمع بندی کرد:

افزودن ماده منبسط شونده به طرح اختلاط بتن چاپ سه بعدی باعث کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن می شود، به طوری که کاهش مقاومت فشاری برای نسبت های ماده منبسط شونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد نسبت به نمونه بدون ماده منبسط شونده (طرح مبنا) به ترتیب ۰/۴، ۱، ۹، ۱۴ و ۱۷ درصد در سن ۷ روزه و ۰، ۷، ۱۲، ۱۹ و ۲۵ درصد در سن ۲۸ روزه بوده است. کاهش مقاومت فشاری مشاهده شده را می توان به انبساط حجمی ایجاد شده در اثر استفاده از ماده منبسط شونده نسبت داد که باعث افزایش میزان حفرات داخل بتن می شود.

نتایج حاصل از آزمایش کشش غیرمستقیم (آزمایش خمشی) حاکی از آن است که افزودن ماده منبسط شونده به طرح اختلاط بتن چاپ سه بعدی مقاومت کششی ۷ روزه بتن را افزایش می دهد و بر روی مقاومت کششی ۲۸ روزه آن تاثیر چندانی ندارد. بدین صورت که تغییرات مقاومت کششی برای نسبت های ماده منبسط شونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد نسبت به نمونه بدون ماده منبسط شونده (طرح مبنا) به ترتیب ۸، ۱۵، ۱۷، ۲۳ و ۲۸ درصد به صورت افزایشی در سن ۷ روزه و ۰، ۰، ۶، ۱ و ۱۵ درصد به صورت کاهش در سن ۲۸ روزه بوده است.

استفاده از ماده منبسط شونده اثر به سزایی در کاهش و کنترل جمع شدگی داشته است و این تاثیر در سنین اولیه بیش تر بوده است به طوری که انبساط اولیه کنترل شده با انقباض ناشی از جمع شدگی مقابله کرده و میزان کلی جمع شدگی را تا ۳۰٪ کاهش داده است. همچنین طرح منتخب از دیدگاه کنترل جمع شدگی، طرح حاوی ۱/۲٪ ماده منبسط شونده بوده است.

در این تحقیق یک رابطه خطی بین جمع‌شدگی نمونه‌ها و افت جرم آن‌ها به دست آمد که این افت جرم حاصل از دست‌رفتن آب در نمونه‌های مورد مطالعه است.

افزودن ماده منبسط‌شونده باعث افزایش روانی و جریان‌پذیری بتن خواهد شد به طوری که افزایش میزان بازشدگی آزمایش میز جریان برای نسبت‌های ماده منبسط‌شونده به خمیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد نسبت به نمونه بدون ماده منبسط‌شونده (طرح مینا) به ترتیب ۲، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ درصد بوده است. به صورت میانگین می‌توان گفت که هر درصد از استفاده از این ماده باعث افزایش ۱۱٪ در میزان بازشدگی آزمایش میز جریان می‌شود. علت افزایش روانی بتن در اثر استفاده از ماده منبسط‌شونده را می‌توان حساب‌زایی این ماده در حالت بتن تازه دانست که باعث افزایش لغزندگی ذرات بر روی هم می‌گردد.

برای بررسی ساخت‌پذیری طرح‌های با مقادیر مختلف ماده منبسط‌شونده معیارهایی بر مبنای تحقیقات گذشته تعریف و این معیارها برای یک نمونه چاپ شده ۲۰ لایه از هر طرح سنجیده شد. طبق سنجش‌های انجام گرفته، استفاده از ماده منبسط‌شونده تا میزان ۱.۵ درصد نسبت به خمیر تأثیر چندانی بر روی ساخت‌پذیری نمونه‌ها نگذاشت و کلیه طرح‌ها ساخت‌پذیری مورد قبولی را از خود تا ۲۰ لایه نشان دادند و تنها با افزایش میزان منبسط‌شونده به علت انبساط حجمی، نمونه‌ها ظاهر بهتر و یکنواخت‌تری داشتند.

با توجه به شاخص پمپ‌پذیری در نظر گرفته شده که به صورت نسبت دبی خروجی ماده مورد نظر از پمپ به دبی خروجی آب از آن تعریف شد، می‌توان از نتایج بدست آمده به این جمع‌بندی رسید که استفاده از ماده منبسط‌شونده تأثیر کمی در افزایش پمپ‌پذیری خواهد داشت. به صورت مشخص، هنگام بهره‌برداری از پمپ با سرعت مورد استفاده در چاپ نمونه‌ها، طرح حاوی ۱/۵٪ منبسط‌شونده نسبت به طرح مینا افزایشی ۱۱ درصدی در پمپ‌پذیری از خود نشان داد.

بر مبنای این تحقیق، استفاده از ماده منبسط‌شونده در کاهش میزان جمع‌شدگی، به عنوان یکی از چالش‌های بتن‌های چاپ سه‌بعدی، بسیار موثر است. با این حال، استفاده از این ماده ممکن است باعث کاهش مقاومت فشاری شود که می‌توان با تنظیم مقدار روانی بتن و کاهش میزان آب طرح این کاهش را محدود نمود. استفاده از ماده منبسط‌شونده همچنین موجب بهبود مقاومت کششی با اعمال پیش‌تنیدگی داخلی می‌شود. در مورد خواص چاپی بتن، در این تحقیق، تأثیری منفی ناشی از استفاده از ماده منبسط‌شونده مشاهده نشد. در نتیجه، استفاده از ماده منبسط‌شونده جهت کاستن و کنترل جمع‌شوندگی در بتن‌های چاپ سه‌بعدی مطلوب به نظر می‌رسد.

مراجع

- [1] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558-566.
- [2] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Ferdous, W., Saha, A. K., & Alyousef, R. (2020). 3D-printed concrete: Applications, performance, and challenges. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(3), 127-164.
- [3] Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D., & Tan, M. J. (2018). Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar. *Measurement*, 113, 108-116.
- [4] Paul, S. C., Van Zijl, G. P., Tan, M. J., & Gibson, I. (2018). A review of 3D concrete printing systems and materials properties: Current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 784-798.
- [5] Lee, S. J., & Won, J. P. (2016). Shrinkage characteristics of structural nano-synthetic fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 157, 236-243.
- [6] Eberhardt, A. B. (2011). On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self con-solidating mortars and concretes. Doctoral dissertation. Bauhaus-Universität Weimar.
- [7] Gagné, R. (2016). Expansive agents. In *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 441-456). Woodhead Publishing.
- [8] Composition of Gray Cement Type II, (n.d.). Available at: <http://www.savehcement.com/Files/Gray Cement Type II.png> [Accessed 15 Sep. 2022].
- [9] American Society for Testing and Materials, (2012). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128-12)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 7.
- [10] American Society for Testing and Materials, (2004). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying (ASTM C566-04)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 3.

- [11] Strumix products, (n.d.). Available at: <https://strumix.com/> [Accessed 10 Sep. 2022].
- [12] Iran Ferrosilice Co products, (n.d.). Available at: <https://iran-ifc.com/fa/portfolio/microsilica/> [Accessed 10 Sep. 2022].
- [13] Strumix products, (n.d.). Available at: <https://strumix.com/project/strugrout-es500/> [Accessed 10 Sep. 2022].
- [14] American Society for Testing and Materials, (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure) (ASTM C349-18)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 4.
- [15] American Society for Testing and Materials, (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (ASTM C348-21)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 6.
- [16] American Society for Testing and Materials, (2007). *Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete (ASTM C596-07)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 3.
- [17] American Society for Testing and Materials, (2017). *Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete (ASTM C157-17)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 7.
- [18] American Society for Testing and Materials, (2017). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete (ASTM C490-17)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 5.
- [19] American Society for Testing and Materials, (2015). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar (ASTM C1437-15)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 2.
- [20] American Society for Testing and Materials, (2010). *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement (ASTM C230-10)*. West Conshohocken (PA, United States): ASTM International, 6.
- [21] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45, 1221-1232.
- [22] Ma, G., & Wang, L. (2018). A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12, 382-400.
- [23] 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.
- [24] Safaei, A. S., Ghodrati Amiri, G., Razavi, S. M. H., & Hosseinali Beygi, H. (2022). Influence of Silica Fume and Zeolite on the Mid-Term Behavior of Expansive Self-Compacting Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(12), 184-207.
- [25] Nguyen, T. T., Bui, H. H., Ngo, T. D., & Nguyen, G. D. (2017). Experimental and numerical investigation of influence of air-voids on the compressive behaviour of foamed concrete. *Materials & Design*, 130, 103-119.
- [26] Gao, S., Wang, Z., Wang, W., & Qiu, H. (2018). Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC). *Construction and Building Materials*, 179, 172-185.
- [27] Canadian Standards Association, (2014). *Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete (CSA A23.1-14/A23.2-14)*. Mississauga (Ontario, CA): CSA Group, 690.
- [28] Gedam, B. A., Bhandari, N. M., & Upadhyay, A. (2016). Influence of supplementary cementitious materials on shrinkage, creep, and durability of high-performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015173.
- [29] Li, J., & Yao, Y. (2001). A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(8), 1203-1206.
- [30] Zhao, Y., Gong, J., & Zhao, S. (2017). Experimental study on shrinkage of HPC containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 155, 145-153.
- [31] Monosi, S., Troli, R., Favoni, O., & Tittarelli, F. (2011). Effect of SRA on the expansive behaviour of mortars based on sulphoaluminate agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 485-489.
- [32] Muthukrishnan, S., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2021). Technologies for improving buildability in 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104144.