

## Investigating the Size Effect on the Compressive Strength of Self- Consolidating Concrete Containing Taftan Pumice and Micro-Silica

Seyed Roohollah Mousavi<sup>1\*</sup>, Amir Saadatipour<sup>2</sup>, Yasin Mokhtari<sup>3</sup>, Saber Shahnazari avari<sup>4</sup>

1- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sistan and Baluchestan

2- Ph.D Student, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3- MS.c Student, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

4- MS.c Graduated, University of Hatef, Zahedan, Iran

### ABSTRACT

Self-compacting concrete is a special concrete that flows with its weight in the form and does not need to shake. based on experimental findings, its compressive strength decreases with an increase in the specimen size; this phenomenon is called "size effect and its beginning is a nonlinear failure in concrete and other fragile materials. The purpose of this study was to investigate the size effect on compressive strength of cubic and cylindrical specimens in self-compacting concrete containing pozzolanic materials of microsilica and Taftan Pumice. To this end, the least squares (LSM) method and Bezan's Size effect rule have been used to analyze the data. Seven designs consist of 3 different mixing designs of 2.5, 5 and 10% cement weight replaced by micro silica also 3 mixing designs containing 15, 20 and 25% weight of cement replaced by Pumice. An additional design was also made as a reference mix design. All Mix designs were cast in various size-cubic molds and also in standard cylindrical molds. According to the results, Mixes with 5% micro-silicon (M5) and 20% Pumice (P20) showed the highest compressive strength. The compressive strength ratio of cubic to cylindrical specimens was studied in all mixing designs. The results of the experiments show that self-compacting concrete cube specimens have a higher compressive strength than standard cylindrical specimens, and the compressive strength ratio of cubic specimens to standard cylindrical specimens with increasing cubic sizes from 5 to 15 centimeters decrease. On the other hand, the results show that the effect of size has decreased in designs with 5% microsilica and 15% pumice.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 November 2018

**Revise Date:** 16 May 2019

**Accept Date:** 24 May 2019

### Keywords:

Size effect;  
Self-compacting concrete;  
Taftan pumice;  
Micro-silica;  
Compressive strength.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.155905.1706

\*Corresponding author: Seyed Roohollah Mousavi  
Email address: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

## بررسی پدیده اثر اندازه بر روی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس و پومیس تفتان

سید روح‌الله موسوی<sup>۱\*</sup>، امیر سعادت‌پور<sup>۲</sup>، یاسین مختاری<sup>۳</sup>، صابر شاه‌نظری اول

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۴- کارشناس ارشد مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی هاتف

### چکیده

بتن خودتراکم نوعی بتن خاص است که با وزن خود در قالب جاری می‌شود و نیاز به لرزاندن ندارد. بر اساس یافته‌های تجربی با افزایش اندازه نمونه بتنی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد به این پدیده اثر اندازه گفته می‌شود و شروع آن از شکست غیرخطی در بتن و سایر مواد شکننده می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی پدیده اثر اندازه بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای استاندارد در بتن خودتراکم حاوی مواد پوزولانی میکروسیلیس و پومیس تفتان است. بدین منظور از روش حداقل مربعات  $LSM$  و قانون اثر اندازه اصلاح شده بازانت جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. هفت طرح اختلاط بتن خودتراکم شامل سه طرح اختلاط دارای میکروسیلیس (۲/۵، ۵، ۱۰ درصد وزنی) و سه طرح اختلاط دارای پومیس تفتان (۱۵، ۲۰، ۲۵ درصد وزنی) جایگزین سیمان گردید و یک طرح اختلاط به عنوان طرح شاهد ساخته شد. کلیه طرح‌ها در قالب‌های مکعبی با اندازه‌های مختلف و قالب استوانه‌ای استاندارد ریخته شد و پس از ۹۰ روز آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها انجام پذیرفت. مطابق نتایج طرح‌های دارای ۵ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد پومیس تفتان بیشترین مقدار مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد را در بین طرح‌های دارای میکروسیلیس و پومیس تفتان دارد. نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای در همه طرح‌های اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان می‌دهد نمونه‌های مکعب بتن خودتراکم دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد است و نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به نمونه استوانه‌ای استاندارد با افزایش اندازه نمونه‌های مکعبی از ۵ به ۱۵ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. از طرفی نتایج نشان می‌دهد اثر اندازه در طرح‌های دارای ۵ درصد میکروسیلیس و ۱۵ درصد پومیس تفتان کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: اثر اندازه، بتن خودتراکم، پومیس تفتان، میکروسیلیس، مقاومت فشاری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2019.155905.1706					
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.155905.1706	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۰۳	۱۳۹۸/۰۳/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۲۶	۱۳۹۷/۰۸/۲۳
سید روح‌الله موسوی s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

معیار شکست کلاسیک مواد، بر اساس تنش مجاز الاستیک، تجزیه تحلیل محدوده پلاستیک و سایر روابط تشکیل دهنده تنش- کرنش می‌باشد. در معیار شکست کلاسیک مقاومت سازه‌های با شکل مشابه و هر هندسه داده شده مستقل از اندازه سازه است. با این حال نتایج تجربی در سازه‌های بتنی و بطور کلی در سازه‌های ساخته شده از مواد شکننده یک انحراف از این معیار کلاسیک را بدلیل تغییرات در اندازه سازه نشان می‌دهد. این پدیده اثر اندازه نامیده می‌شود و منشاء آن شکست غیرخطی در بتن و سایر مواد شکننده است [۱-۲]. مقاومت فشاری بتن مهمترین ویژگی مورد استفاده در طراحی است. مقاومت فشاری با آزمایش نمونه‌های تولید شده از مخلوطها اندازه-گیری می‌شود. اشکال مختلف از نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری توسط استانداردها و کدهای بین‌المللی متعددی پیشنهاد شده است. بیشتر اشکال رایج از نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای است که نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر به عنوان نمونه استاندارد شناخته شده است.

در طی چهار دهه گذشته بتن خودتراکم پیشرفت چشمگیری داشته است. بتن خودتراکم نوعی بتن خاص است که با وزن خود در قالب جاری می‌شود و نیاز به لرزاندن ندارد. در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی دوام سازه‌های بتنی از موضوعات مورد علاقه محققین به ویژه پژوهشگران ژاپنی بود [۳]. برای ساخت یک سازه بتنی بادوام، بتن تازه می‌بایست به خوبی متراکم و عمل‌آوری گردد که این مهم به ویژه در مقاطعی که تراکم بالای آرماتور وجود داشته و یا عملاً امکان لرزاندن بتن وجود ندارد بسیار دشوار است. این دشواری با تمایل به استفاده از آرماتورهای با قطر کمتر به منظور کنترل ترک‌خوردگی مضاعف شده و باعث کاهش کیفیت کارهای اجرایی گردیده است. وجود این مشکلات و گرانی نیروی کار در ژاپن باعث تقویت ایده ساخت بتن خودتراکم در سال ۱۹۸۶ توسط شخصی به نام اوکامورا گردید [۳]. امروزه خصوصاً با تولید نسل جدید فوق روان‌کننده‌ها و افزودنی‌های بتن، از بتن خودتراکم در بسیاری از پروژه‌ها استفاده می‌شود. از جمله مزایای استفاده از این بتن می‌توان به افزایش سرعت اجرا، کاهش نیروی انسانی، اطمینان از تراکم کافی بتن در مناطق با تراکم بالای آرماتور، کاهش آلودگی صوتی، بالا رفتن کیفیت نهایی محصول و از همه مهم‌تر صرفه‌جویی اقتصادی اشاره کرد.

برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن از مواد افزودنی استفاده می‌شود. یکی از این مواد میکروسیلیکا یا همان میکروسیلیس می‌باشد. میکروسیلیس محصول فرعی احیاء کوارتز بسیار خالص با زغال سنگ کوره قوس الکتریکی در ساخت آلیاژ فروسیلیسیم یا سیلیسیم می‌باشد. حضور میکروسیلیس در بتن، ناحیه بین سطحی ضعیف را با تقویت پیوند خمیر سیمان و سنگدانه و تشکیل یک ساختار میکروبی با تخلخل کمتر و همگن‌تر در منطقه بین سطحی از بین می‌برد [۴]. از آنجا که مواد پودری مورد استفاده در بتن خودتراکم در مقایسه با سایر بتن‌ها بیشتر است، تاثیر جنس و عملکرد این مواد بر خواص بتن از اهمیت بالایی برخوردار است. در همین راستا از پوزولان‌های طبیعی مانند پومیس تفتان به عنوان پرکننده در بتن خودتراکم هم به دلیل نقش تاثیر گذارشان بر خواص بتن خودتراکم و هم به دلیل کاهش هزینه‌های تولید سیمان و کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید کلینکر استفاده می‌شود [۵].

## ۲- پیشینه تحقیق

نسبت‌های مقاومت برای نمونه‌های بتن معمولی توسط نویل در سال ۱۹۹۵ مورد مطالعه قرار گرفت [۶]. نسبت مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با طول ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر به نمونه‌های مکعبی با اضلاع ۱۵ سانتی‌متر برای مخلوط‌های بتن با مقاومت فشاری ۴۰/۷۰، ۴۴/۱۰ و ۵۰/۳۰ مگاپاسکال به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۹۱ و ۰/۹۶ بدست آمدند. در سال ۲۰۰۷ ویسو و همکاران اثر شکل و اندازه نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای را بر روی بتن پر مقاومت مورد ارزیابی قرار دادند [۷]. آنها یک نسبت جدید بین مقاومت استوانه‌ای استاندارد و مقاومت بدست آمده از مکعب‌های با اندازه مختلف پیشنهاد کردند. همچنین نتایج تست وجود اثر اندازه را آشکار کرد. نمونه‌های بزرگ نسبت به نمونه‌های مشابه کوچک بر حسب تنش مقاومت کمتری داشتند و نیز مشاهده شد که اثر اندازه در مکعب‌ها نسبت به استوانه‌ها بیشتر است. برای بتن خودتراکم، نیکبین و همکاران پدیده اثر اندازه را بر روی نمونه‌های مکعبی مورد ارزیابی قرار دادند [۱]. آنها نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر و نیز نمونه استوانه‌ای با طول ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر با سه طرح اختلاط بتن خودتراکم را مورد آزمایش قرار دادند. جهت بارگذاری نیز به عنوان عامل مهم دیگری بر روی خواص مکانیکی بتن مورد ارزیابی قرار گرفته شد. مشخص شد که پارامتر جهت بارگذاری مهم‌تر از اثر اندازه در نمونه بتن خودتراکم است و نسبت

مقاومت مکعب به مقاومت استوانه‌ای برای بتن خودتراکم اندکی بیشتر از بتن‌های معمولی است. در سال ۲۰۱۴ دهستانی و همکاران اثر شکل و اندازه نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای را با در نظر گرفتن نسبت لاغری در بتن خودتراکم مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. آنها نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر و نیز نمونه استوانه‌ای با نسبت لاغری متفاوت ۰/۵ تا ۲ را با سه طرح اختلاط بتن خودتراکم مورد آزمایش قرار دادند. مشخص شد که با کاهش لاغری اثر اندازه تشدید می‌شود. همچنین سطح مقطع عرضی نمونه‌ها تاثیر کمی بر روی مقاومت فشاری داشته است.

در سال ۲۰۱۸ قلهکی و همکاران تاثیر آب مغناطیسی و پوزولان‌های مختلف بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم را مورد بررسی قرار دادند [۹]. آنها در این مطالعه مشاهده کردند که آب مغناطیسی و پوزولان‌های مورد استفاده موجب بهبود شرایط خودتراکمی بتن از لحاظ جریان‌پذیری و ویسکوزیته می‌شوند. بر اساس این مشاهدات آب مغناطیسی می‌تواند میزان مورد نیاز کاهنده شدید آب برای بتن خودتراکم را با حفظ جریان اسلامپ تا ۴۵ درصد کاهش دهد. همچنین نتایج بتن سخت شده نیز حاکی از بهبود خواص مقاومتی و پایایی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و پوزولان‌های مصرفی می‌باشد.

مدندوست و همکاران مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی نانو مواد را با استفاده از روش اولتراسونیک در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در آن مطالعه بتن‌های خودتراکم با ۱۳ طرح اختلاط مختلف حاوی مقادیر بین ۰،۲۵ و ۲ درصد نانو اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و مس که به عنوان ماده چسباننده جایگزین بخشی از سیمان شده است در سن بین ۳ تا ۹۰ روز با مقاومت فشاری بین ۲۰ و ۵۴ مگاپاسکال آزمایش شدند. نتایج آنها نشان داد که نمونه‌های حاوی نانو اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و مس به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان (درصد بهینه)، بیشترین سرعت امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری را دارند. سرعت امواج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی درصد بهینه در سنین اولیه کمتر و در سنین بالاتر بیشتر از نمونه شاهد بدست آمد. روابط نمایی بین مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک برای این نوع بتن‌های خودتراکم تعریف شد که ضرایب آن برای هر نانو مواد استفاده شده متفاوت می‌باشد.

سلطانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ تاثیر رس‌های کلسینه شده و میکروسیلیس را بر روی مقاومت فشاری بتن مورد آزمایش قرار دادند [۱۱]. مشخص شد این نوع پوزولان‌ها می‌توانند سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن شوند، به گونه‌ای که بهترین عملکرد تا سن ۲۸ روز برای مقاومت فشاری، مربوط به جایگزینی ترکیب ۱۰ درصد زئولیت با ۷ درصد میکروسیلیس و برای مقاومت الکتریکی مربوط به جایگزینی ترکیب ۱۰ درصد زئولیت با ۱۰ درصد میکروسیلیس است.

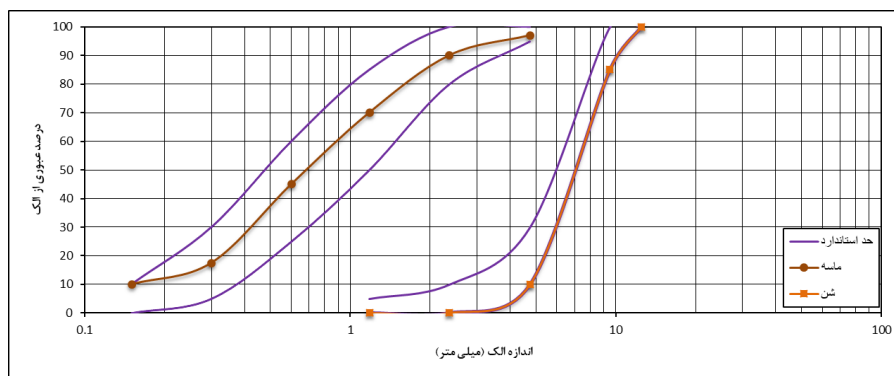
به طور معمول از مواد پوزولانی یا سیمان‌های پوزولانی به منظور تهیه بتن جهت بتن‌ریزی در هوای گرم استفاده می‌شود. همچنین این مواد افزودنی باعث افزایش خواص مکانیکی و دوام بتن ساخته شده می‌شوند. تحقیق حاضر به دنبال بررسی تاثیرات استفاده از مواد پوزولانی شامل میکروسیلیس و پومیس تفتان بر روی پدیده اثر اندازه از طریق آزمایش مقاومت فشاری در بتن خودتراکم می‌باشد. پارامتر مهم مورد نظر در این مطالعه نوع و درصد پوزولان در بتن خودتراکم می‌باشد. بدین منظور هفت طرح اختلاط بتن خودتراکم شامل سه طرح اختلاط دارای میکروسیلیس (۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و سه طرح اختلاط دارای پومیس تفتان (۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی) جایگزین سیمان گردید و یک طرح اختلاط به عنوان طرح شاهد ساخته شد. خواص بتن تازه به وسیله آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان ( $T_{50}$ )، زمان عبور بتن از قیف V و نسبت انسداد ( $h_2/h_1$ ) بررسی می‌گردد. خواص بتن سخت شده با تعیین مقاومت‌های فشاری در سن ۹۰ روزه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها با استفاده از روش حداقل مربعات LSM و تحلیل رگرسیون خطی ثابت‌های تجربی موجود در قانون اثر اندازه ارائه شده توسط بازانته محاسبه شده است. همچنین تاثیر درصد جایگزینی میکروسیلیس و پومیس تفتان در کاهش و یا افزایش اثر اندازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان سیستان با وزن مخصوص ۲/۸۹ و پوزولان‌های میکروسیلیس و پومیس تفتان به عنوان مصالح جایگزین سیمان با وزن‌های مخصوص به ترتیب ۲/۶۵ و ۲/۵۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد استفاده قرار

گرفته‌اند. ترکیب شیمیایی سیمان، پومیس تفتان و میکروسیلیس در جدول ۱ ارائه شده است. درشت‌دانه مصرفی، شن شکسته با حداکثر قطر اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۹۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مطابق با استاندارد ASTM C127 [۱۲] بوده و میزان جذب آب آن ۱/۳۰ درصد می‌باشد. مصالح ریزدانه شامل ماسه شسته با وزن مخصوص ۲/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان جذب آب آن ۰/۹ درصد مطابق با استاندارد ASTM C128 [۱۳] است و همچنین مدول نرمی ماسه ۲/۷ می‌باشد. نتایج دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده با توجه به استاندارد ASTM C33 [۱۴] در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. منبع تامین آب مصرفی برای تولید بتن آب شرب شهر زاهدان است. مشخصات شیمیایی آب مصرفی در جدول ۲ قرار داده شده است. در تمامی اختلاط‌ها به منظور رسیدن به حد روانی مورد نیاز EFNARC [۱۵]، از کاهنده ممتاز آب، نوع دیسپرسیون پلیمری با نام تجاری N260 و وزن مخصوص ۱/۱۲ کیلوگرم بر لیتر مطابق استاندارد ASTM C494 [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی شن و ماسه

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان، پومیس تفتان و میکروسیلیس

میکروسیلیس	پومیس تفتان	سیمان	مواد تشکیل دهنده
۹۵-۹۰	۵۸-۶۰	$21/47 \pm 0/28$	SiO <sub>2</sub> (%)
۰/۶-۱/۲	۱۷-۱۹	$5/4 \pm 0/11$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
۰/۳-۱/۳	-	$3/82 \pm 0/14$	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
۰/۵-۱/۵	۶/۵-۷/۵	$62/52 \pm 0/32$	CaO(%)
۰/۵-۲	<۲/۸	$1/31 \pm 0/24$	MgO(%)
-	<۰/۴	$2/88 \pm 0/14$	SO <sub>3</sub> (%)
۰/۳-۰/۵	-	$0/65 \pm 0/05$	Na <sub>2</sub> O(%)
۰/۲-۰/۵	<۲	$0/43 \pm 0/03$	K <sub>2</sub> O(%)
۰/۴-۳	<۲/۵	$1/52 \pm 0/22$	L.O.I(%)
-	-	$0/72 \pm 0/01$	I.R(%)
-	-	$41/33 \pm 2/48$	C3S(%)
-	-	$30/02 \pm 2/47$	C2S(%)
-	-	$7/84 \pm 0/12$	C3A(%)
-	-	$11/6 \pm 0/4$	C4AF(%)
-	-	$1/49 \pm 0/35$	F.CaO(%)
-	<۰/۰۵	-	CL(%)
۰/۰۲-۰/۰۷	-	-	MnO(%)
۰/۲-۰/۴	-	-	C(%)
۰/۰۴	-	-	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)

جدول ۲: مشخصات شیمیایی آب شرب زاهدان (Mg/Lit)

۵۷۷۰	شوری (us/cm)
۷/۴۳	pH
۰	CO <sub>2</sub>
۳۳۵/۵	HCO <sub>3</sub>
۹۸۳/۷۶	Cl
۱۳۸۹/۶	SO <sub>4</sub>
۱۸۶/۳۷	Ca
۱۸۱/۰۳	Mg
۸۴۷	Na
۱۲۰۷	سختی کل
۳۶۹۳	کل املاح محلول

## ۳-۲- طرح‌های اختلاط مورد استفاده

در این پژوهش، هفت اختلاط متفاوت شامل بتن خودتراکم در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۴ طراحی گردید. سه طرح اختلاط دارای میکروسیلیس با نسبت جایگزینی ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان، سه طرح اختلاط دارای پومیس تفتان با نسبت جایگزینی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی سیمان و یک طرح اختلاط بدون مواد پوزولانی به عنوان طرح شاهد می‌باشد. از پودرسنگ به عنوان پرکننده در کلیه طرح‌های اختلاط استفاده گردیده است. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌ها، در جدول ۳ و توضیحات علائم اختصاری در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده

نام طرح	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	فوق روان کننده % (درصد وزنی سیمان)	میکروسیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	پومیس تفتان (kg/m <sup>3</sup> )	درشت دانه (kg/m <sup>3</sup> )	ریزدانه (kg/m <sup>3</sup> )	پودر سنگ (kg/m <sup>3</sup> )
CS	۴۰۰	۱۷۶	۰/۴۴	۰/۸	۰	۰	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰
M2.5	۳۹۰	۱۷۶	۰/۴۴	۰/۸	۱۰	-	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰
M5	۳۸۰	۱۷۶	۰/۴۴	۰/۸	۲۰	-	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰
M10	۳۶۰	۱۷۶	۰/۴۴	۱	۴۰	-	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰
P15	۳۴۰	۱۷۶	۰/۴۴	۰/۸	-	۶۰	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰
P20	۳۲۰	۱۷۶	۰/۴۴	۰/۸	-	۸۰	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰
P25	۳۰۰	۱۷۶	۰/۴۴	۰/۸	-	۱۰۰	۷۲۴	۸۵۰	۱۸۰

جدول ۴: توضیحات علائم اختصاری

علائم اختصاری	توضیحات	مثال
CS	طرح اختلاط شاهد	طرح اختلاط بدون پومیس تفتان و میکروسیلیس
MX	طرح حاوی X درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان	M5: طرح حاوی ۵٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان
PX	طرح حاوی X درصد پومیس تفتان جایگزین سیمان	P15: طرح حاوی ۱۵٪ پومیس تفتان جایگزین سیمان
W/C	نسبت آب به مواد سیمانی موجود در بتن	-

## ۳-۳- شرح آزمایش

جهت ساخت نمونه‌ها ابتدا شن و ماسه داخل بتونیر ریخته شد و به میزان ۲۵ درصد وزن پودر مصرفی، آب جدا گردید. نصف فوق‌روان-کننده نیز با آب مخلوط و به شن و ماسه داخل بتونیر اضافه شد سپس شن و ماسه به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. در ادامه سیمان و

پرکننده‌ها به بتونیر اضافه و ۶۰ ثانیه دیگر اختلاط ادامه داده شد. باقیمانده آب و فوق‌روان‌کننده با هم مخلوط شده و به مخلوط‌کن اضافه گردید. در انتها بتونیر را روشن نموده تا مواد داخل آن برای مدت ۹۰ ثانیه مخلوط شود. این روند بر اساس روش پیشنهادی Tamimi [۱۷] می‌باشد. سپس برای ارزیابی و حصول اطمینان از ویژگی‌های رئولوژی بتن خودتراکم، آزمایش‌های بتن تازه بر روی آنها انجام گرفت. جهت ارزیابی قابلیت جاری شدن، میزان نرخ جریان، قابلیت پرکنندگی، عبور بتن از بین فضاهای باریک و قابلیت گذرندگی بتن تازه خودتراکم، به ترتیب از آزمایشات جریان اسلامپ،  $T_{50}$ ، قیف V و جعبه L (نسبت انسداد  $(h_2/h_1)$ ) استفاده گردید. نتایج به دست آمده از آزمایشات بتن تازه در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۵ همه مخلوط‌های بتن در این مطالعه در محدوده مجاز دستورالعمل EFNARC قرار دارند.

جدول ۵: نتایج حاصل از آزمایشات بتن تازه

نام طرح	CS	M2.5	M5	M10	P15	P20	P25
جریان	۶۷۰	۶۹۵	۶۸۰	۶۶۵	۶۶۰	۶۶۵	۶۷۵
اسلامپ	۳/۲۸	۲/۵۵	۳/۰۰	۳/۲۰	۴/۸۳	۳/۲۵	۲/۸۰
جعبه L $(h_2/h_1)$	۰/۸۱	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۸	۰/۸۹
قیف V (sec)	۷/۳۰	۶/۴۶	۴/۵۰	۶/۱۳	۷/۵۵	۱۱/۲۳	۱۳/۷۲

بتن‌های ساخته شده پس از انجام آزمایش‌های بتن تازه به منظور تعیین مقاومت فشاری در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متری و استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متری بدون هیچگونه لرزاندن درون قالب ریخته شدند. تمامی نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا سن ۹۰ روز در داخل آب با دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. سپس آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 [۱۸] انجام پذیرفت.

#### ۴- تحلیل و بررسی نتایج

##### ۴-۱- آزمایش‌های بتن تازه

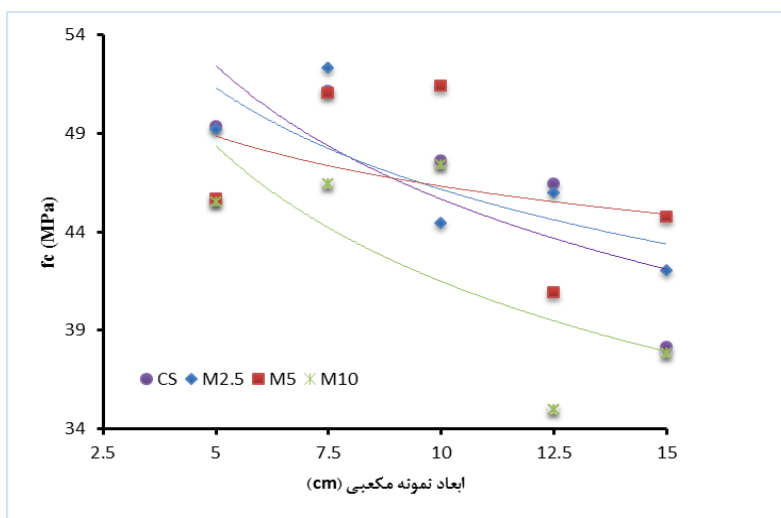
نتایج آزمایش‌های بتن تازه برای طرح‌های شاهد، حاوی میکروسیلیس و پومیس‌تفتان در جدول ۵ ارائه شده است. با جایگزین کردن میکروسیلیس و پومیس‌تفتان در بتن خودتراکم مقدار قطر اسلامپ برای تمامی طرح‌ها بین ۶۶۰ تا ۶۹۵ میلی‌متر می‌باشد که در محدوده مناسب معرفی شده در دستورالعمل EFNARC قرار دارد. تقریباً در کلیه طرح‌ها با جایگزین کردن میکروسیلیس و پومیس‌تفتان به بتن خودتراکم نسبت به طرح شاهد زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر ( $T_{50}$ ) کاهش و نسبت انسداد  $(h_2/h_1)$  افزایش یافته است. در آزمایش ( $T_{50}$ ) بیشترین کاهش در ۲/۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس و در آزمایش نسبت انسداد  $(h_2/h_1)$  بیشترین افزایش ۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس، کمترین افزایش ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس و فقط در طرح ۱۵ درصد جایگزینی پومیس‌تفتان کاهش مشاهده شده است. مطابق نتایج با جایگزین کردن میکروسیلیس و پومیس‌تفتان به بتن خودتراکم آزمایش قیف (V) نسبت به طرح شاهد به ترتیب کاهش و افزایش یافته است که بیشترین کاهش در ۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس و بیشترین افزایش در ۲۵ درصد جایگزینی پومیس‌تفتان ثبت گردیده است.

##### ۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری

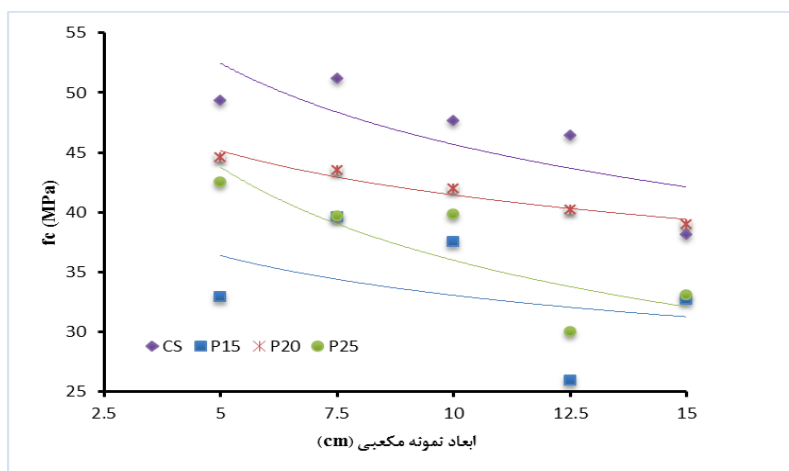
پس از گذشت ۹۰ روز عمل‌آوری در شرایط مرطوب، آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 با نرخ ثابت ۳ کیلونیوتن بر ثانیه انجام گرفت. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق جدول ۶ در طرح اختلاط M2.5 وقتی ۲/۵ درصد وزنی، میکروسیلیس جایگزین سیمان می‌شود مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد تغییر چندانی نسبت به طرح اختلاط شاهد CS نمی‌کند و با افزایش درصد میکروسیلیس از ۲/۵ درصد به ۵ درصد در طرح اختلاط M5 مشاهده می‌شود مقاومت فشاری استوانه‌ای

استاندارد به مقدار ۸/۶ درصد افزایش یافته است. میکروسیلیس از طریق دو مکانیسم باعث ایجاد تغییر در خمیر سیمان می شود اول به دلیل فعالیت پوزولانی بسیار زیاد آن که باعث کاهش هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان پرتلند با آب و افزایش ژل تولیدی در خمیر سیمان خواهد شد از طرف دیگر ریز بودن دانه های میکروسیلیس باعث پر کردن خلل و فرج بین ذرات ژل و خمیر سیمان می گردد. با افزایش درصد میکروسیلیس از ۵ درصد به ۱۰ درصد در طرح اختلاط M10 مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد ۲۷/۳۴ درصد کاهش یافته است. این کاهش در مقاومت فشاری را می توان به دلیل کاهش بیش از حد سیمان، وجود میکروسیلیس آزاد در بتن و فولکوله شدن ذرات میکروسیلیس دانست. در طرح اختلاط های دارای پومیس تفتان با نسبت جایگزینی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی سیمان، مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد نسبت به طرح اختلاط شاهد به ترتیب ۱۹/۲۳ درصد، ۱۰/۱۰ درصد و ۱۵/۲۷ درصد کاهش یافته است. این کاهش در مقاومت به دلیل عدم خاصیت چسبندگی پوزولان جایگزین شده با سیمان می باشد. در طرح های دارای پومیس تفتان با افزایش درصد جایگزینی از ۱۵ به ۲۰ درصد وزنی سیمان، مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد به میزان ۱۱/۳ درصد افزایش یافته است. اما با افزایش درصد پومیس تفتان از ۲۰ به ۲۵ درصد وزنی سیمان، مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد ۵/۷ درصد کاهش یافته است.

شکل های ۲ و ۳ روند تغییر مقاومت فشاری متوسط در طرح های حاوی میکروسیلیس و پومیس تفتان با افزایش ابعاد نمونه مکعبی را نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود مقاومت فشاری با افزایش ابعاد نمونه مکعبی کاهش می یابد.



شکل ۲: تغییر مقاومت فشاری متوسط در طرح های حاوی میکروسیلیس با افزایش ابعاد نمونه مکعبی



شکل ۳: تغییر مقاومت فشاری متوسط در طرح های حاوی پومیس تفتان با افزایش ابعاد نمونه مکعبی



جدول ۶: مشخصات نمونه‌ها و نتایج آزمایشگاهی

نام نمونه	طرح اختلاط	ابعاد (mm)	مقاومت فشاری (MPa)				انحراف معیار	
			آزمونه ۱	آزمونه ۲	آزمونه ۳	میانگین		
CyCS	CS	Φ 150×300	۳۲/۸۸	۳۷/۰۳	۳۴/۰۰	۳۴/۶۳	۲/۱۴	
CyM2.5	M2.5		۳۶/۸۰	۳۴/۲۱	۳۲/۵۳	۳۴/۵۱	۲/۱۵	
CyM5	M5		۴۰/۶۱	۲۹/۴۲	۴۲/۴۶	۳۷/۴۹	۷/۰۵	
CyM10	M10		۳۰/۲۳	۲۹/۵۹	۲۱/۹۲	۲۷/۲۴	۴/۶۲	
CyP15	P15		۲۸/۴۴	۲۶/۷۱	۲۸/۷۸	۲۷/۹۷	۱/۱۱	
CyP20	P20		۳۱/۹۶	۳۳/۶۹	۲۷/۷۵	۳۱/۱۳	۳/۰۵	
CyP25	P25		۲۸/۲۱	۲۹/۲۵	۳۰/۵۷	۲۹/۳۴	۱/۱۸	
C50CS	CS		50×50×50	۵۰/۵۶	۴۶/۴۸	۵۰/۹۷	۴۹/۳۳	۲/۴۸
C50M2.5	M2.5			۵۰/۵۶	۵۳/۴۱	۴۳/۶۳	۴۹/۲۰	۵/۰۲
C50M5	M5			۴۱/۱۸	۵۵/۸۶	۳۹/۹۶	۴۵/۶۶	۸/۸۴
C50M10	M10	۳۸/۳۳		۴۸/۹۳	۴۹/۳۴	۴۵/۵۳	۶/۲۴	
C50P15	P15	۳۴/۶۶		۲۹/۷۷	۳۴/۲۵	۳۲/۹۰	۲/۷۱	
C50P20	P20	۴۶/۰۸		۴۷/۷۱	۳۹/۹۶	۴۴/۵۸	۴/۰۸	
C50P25	P25	۴۲/۰۰		۴۲/۸۱	۴۲/۸۱	۴۲/۵۴	۰/۴۶	
C75CS	CS	75×75×75		۵۴/۱۹	۴۸/۲۰	۵۱/۱۰	۵۱/۱۶	۲/۹۹
C75M2.5	M2.5			۵۰/۹۲	۵۳/۱۰	۵۲/۹۲	۵۲/۳۱	۱/۲۱
C75M5	M5			۴۸/۲۰	۴۹/۶۵	۵۵/۲۷	۵۱/۰۴	۳/۷۳
C75M10	M10		۴۱/۸۶	۴۶/۲۱	۵۱/۲۹	۴۶/۴۵	۴/۷۱	
C75P15	P15		۳۸/۴۲	۳۹/۳۳	۴۰/۹۶	۳۹/۵۶	۱/۲۸	
C75P20	P20		۴۳/۸۶	۴۳/۳۱	۴۳/۳۱	۴۳/۴۹	۰/۳۱	
C75P25	P25		۴۰/۲۳	۴۲/۴۱	۳۶/۴۳	۳۹/۶۹	۳/۰۲	
C100CS	CS		100×100×100	۴۸/۱۱	۴۷/۲۰	۴۷/۶۰	۴۷/۶۳	۰/۴۵
C100M2.5	M2.5			۴۹/۲۴	۴۲/۷۱	۴۱/۳۹	۴۴/۴۴	۴/۲۰
C100M5	M5			۵۳/۰۱	۵۱/۵۸	۴۹/۶۴	۵۱/۴۱	۱/۶۹
C100M10	M10	۴۹/۵۴		۴۵/۵۷	۴۷/۲۰	۴۷/۴۳	۱/۹۹	
C100P15	P15	۳۷/۰۰		۳۸/۴۳	۳۷/۰۰	۳۷/۴۷	۰/۸۲	
C100P20	P20	۴۰/۳۷		۴۱/۷۹	۴۳/۷۳	۴۱/۹۶	۱/۶۸	
C100P25	P25	۳۹/۷۶		۴۱/۳۹	۳۸/۲۳	۳۹/۷۹	۱/۵۸	
C125CS	CS	125×125×125		۴۶/۶۵	۴۶/۲۵	۴۶/۳۹	۴۶/۴۳	۰/۲۰
C125M2.5	M2.5			۴۵/۸۰	۴۷/۰۸	۴۵/۰۸	۴۵/۹۸	۱/۰۱
C125M5	M5			۴۸/۵۴	۳۳/۹۹	۴۰/۱۲	۴۰/۸۸	۷/۳۰
C125M10	M10		۲۵/۲۵	۴۱/۱۷	۳۸/۴۹	۳۴/۹۷	۸/۵۲	
C125P15	P15		۲۲/۸۳	۲۷/۶۰	۲۷/۴۰	۲۵/۹۴	۲/۶۹	
C125P20	P20		۴۰/۷۷	۳۸/۱۰	۴۱/۷۵	۴۰/۲۰	۱/۸۸	
C125P25	P25		۳۳/۸۶	۲۴/۷۳	۳۱/۲۵	۲۹/۹۴	۴/۷۰	
C150CS	CS		150×150×150	۳۹/۶۹	۳۸/۵۱	۳۶/۲۹	۳۸/۱۶	۱/۷۲
C150M2.5	M2.5			۴۰/۶۴	۴۱/۸۲	۴۳/۶۷	۴۲/۰۴	۱/۵۲
C150M5	M5			۳۸/۴۲	۵۲/۱۵	۴۳/۶۳	۴۴/۷۳	۶/۹۳
C150M10	M10	۳۴/۵۲		۴۱/۰۵	۳۷/۹۷	۳۷/۸۴	۳/۲۶	
C150P15	P15	۳۲/۸۵		۳۳/۳۴	۳۱/۷۶	۳۲/۶۵	۰/۸۰	
C150P20	P20	۳۷/۵۶		۳۸/۰۶	۴۱/۳۲	۳۸/۹۸	۲/۰۴	
C150P25	P25	۳۴/۷۰		۳۰/۰۸	۳۴/۳۴	۳۳/۰۴	۲/۵۶	

## ۴-۳- اثر اندازه در شکست فشاری بتن

در بتن و سایر مواد نیمه ترد تحت نیروی فشاری محوری، گسیختگی فشاری بدون آزادسازی انرژی با گسترش ترک‌های محوری رخ می‌دهد [۱۹]. بازانت مکانیسم اصلی شکست فشاری یک ستون بتنی را بصورت یک نوار شکست ارائه داد. این نوار دارای ترک‌های محوری و موازی است که از قسمت‌های جانبی عضو بصورت قائم یا مایل با توجه به جهت اعمال بار گسترش می‌یابد [۲۰]. بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری یک نوع الگوی شکست در مکعب‌های بتن خودتراکم با اندازه‌های مختلف مشاهده می‌شود. در شکل ۴ مکانیسم شکست مکعب‌های بتن خودتراکم نشان داده شده است که مطابق نظریه بازانت می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است با افزایش اندازه مکعب‌های بتن خودتراکم، اندازه نوار ترک در قسمت‌های جانبی نمونه‌های مکعبی افزایش یافته است. نوع شکست در اکثر نمونه‌ها یکسان است. به دلیل این که تشکیل و آرایش ترک‌ها برای مواد نیمه ترد بیشتر وابسته به شرایط بارگذاری است. در واقع شرایط بارگذاری جهت تنش کششی اصلی را تعیین می‌کند.



شکل ۴: وضعیت شکست نمونه‌های مکعبی با اندازه‌های مختلف پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری

مطالعات بسیاری در الگوی شکست و قانون اثر اندازه در رفتار کششی انجام گرفته است، اما قانون اثر اندازه در رفتار فشاری با وسعت زیادی مطرح نشده است. نتیجه تحقیق مقاومت کششی در نمونه‌های بتن با اندازه‌های مختلف منجر به ارائه قانون اثر اندازه اصلاح شده MSEL برای مواد نیمه ترد شد. قانون اثر اندازه ارائه شده توسط بازانت و همکاران [۲۱-۲۰-۱۹] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_N = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \frac{D}{\lambda_0 d_a}}} f'_t + \alpha f'_t \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\sigma_N$  مقاومت کششی اسمی،  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت تجربی،  $D$  ابعاد نمونه،  $d_a$  حداکثر اندازه اسمی سنگدانه و  $f'_t$  مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای استاندارد می‌باشد.  $\lambda_0$  نیز یک ثابت تقریبی بین ۲ تا ۳ می‌باشد.  $\alpha f'_t$  مقدار مقاومت مستقل برای پیش‌بینی مقاومت اعضای بتنی بدون ترک‌های اولیه می‌باشد.

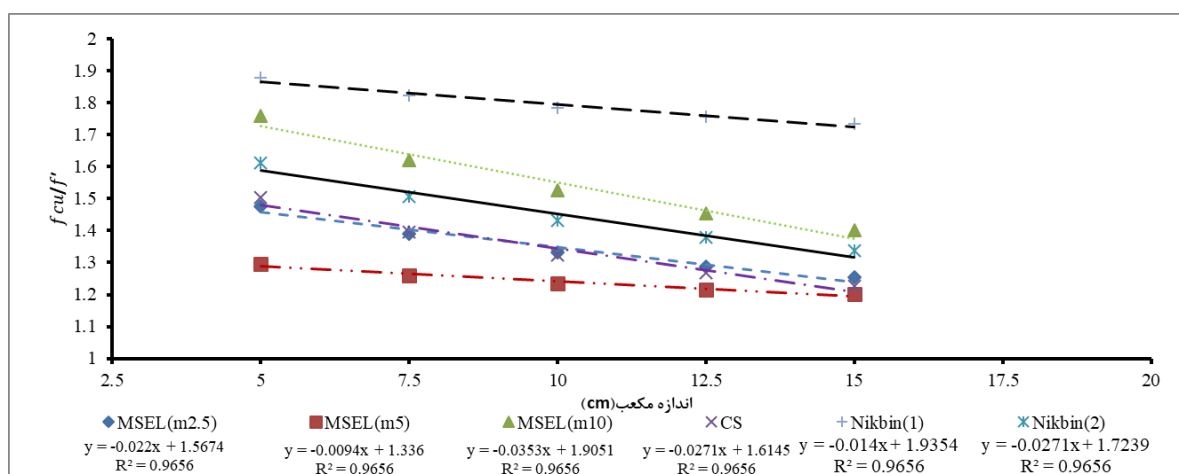
از آنجایی که در این پژوهش اثر اندازه در شکست فشاری بررسی می‌شود باید در قانون اثر اندازه اصلاح شده MSEL از مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد  $f'_c$  به جای پارامتر مقاومت کششی  $f'_t$  استفاده نمود. هر چند که مکانیزم شکست در گسیختگی کششی نسبت به گسیختگی فشاری متفاوت است، اما شکست نهایی هر دو رفتار به علت انتشار ترک‌های بزرگ می‌باشد که نشان دهنده تمرکز کشش یا مود یک شکست است. بنابراین، می‌توان مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد  $f'_c$  را جایگزین مقاومت کششی  $f'_t$  نمود و از قانون اثر اندازه اصلاح شده در شکست فشاری استفاده کرد [۱۹]. مکانیسم شکست فشاری و اثر اندازه در شکست فشاری در مقایسه با شکست کششی به

طور وسیع در پژوهش‌ها بررسی نشده است. در این پژوهش از روش حداقل مربعات LSM برای به دست آوردن ثابت‌های تجربی قانون اثر اندازه اصلاح شده بازانت شامل پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  برای مکعب‌های بتن خودتراکم استفاده شده است. مقدار  $\lambda_0$  طبق توصیه بازانت در تجزیه و تحلیل رگرسیون ۲ در نظر گرفته شده است [۱۹]. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  برای هر طرح اختلاط محاسبه گردیده و در جدول ۷ قرار گرفته است. همچنین جهت مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با روابط بدست آمده توسط آقای نیکبین و همکاران [۱] ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  مطالعه ایشان نیز در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷: پارامترهای قانون اثر اندازه اصلاح شده برای مکعب‌های بتن خودتراکم

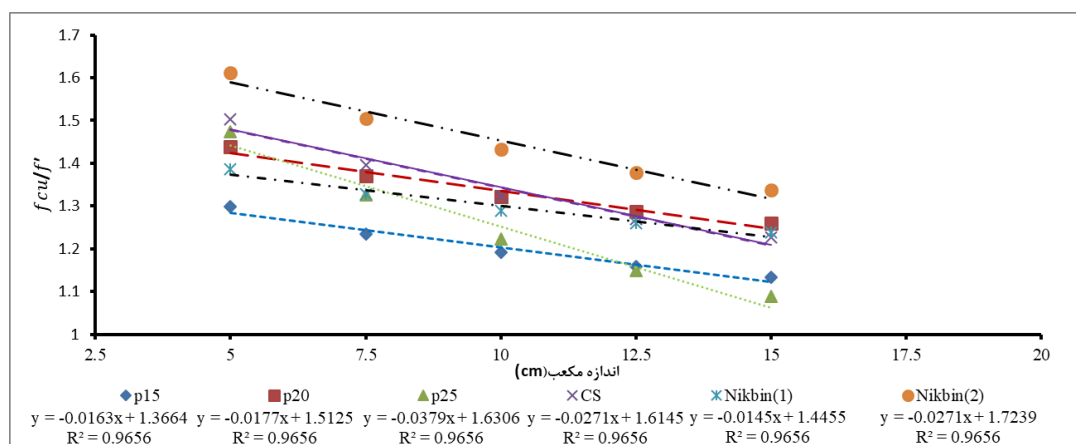
طرح اختلاط	پارامترهای قانون اثر اندازه اصلاح شده
	$\frac{f_{cu}(D)}{f_c} = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \frac{D}{\lambda_0 d_2}}} + \alpha$
CS	$\alpha = 0.70$ $\beta = 1.38$
M2.5	$\alpha = 0.83$ $\beta = 1.12$
M5	$\alpha = 1.02$ $\beta = 0.48$
M10	$\alpha = 0.72$ $\beta = 1.80$
P15	$\alpha = 0.82$ $\beta = 0.83$
P20	$\alpha = 0.92$ $\beta = 0.91$
P25	$\alpha = 0.36$ $\beta = 1.93$
Nikbin(1)	$\alpha = 0.959$ $\beta = 0.739$
Nikbin(2)	$\alpha = 0.816$ $\beta = 1.379$

شکل‌های ۵ و ۶ خط قانون اثر اندازه اصلاح شده را برای درصد‌های مختلف میکروسیلیس، پومیس تفتان و طرح شاهد نشان می‌دهد. به وسیله تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط رابطه اثر اندازه اصلاح شده بازانت MSEL و استفاده از رگرسیون خطی به روش حداقل مربعات LSM، نمودارهای قانون اثر اندازه اصلاح شده بدست آمده است. در شکل‌های ۵ و ۶ نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای استاندارد برای درصد‌های مختلف میکروسیلیس، پومیس تفتان و طرح شاهد مشاهده می‌شود.



شکل ۵: اثر اندازه در نمونه‌های مکعبی حاوی میکروسیلیس

به طور کلی، نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم با اندازه‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر، مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ در کلیه طرح‌ها با افزایش اندازه نمونه‌های مکعبی، نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به نمونه استوانه‌ای استاندارد ( $f_{cu}/f_c$ ) کاهش می‌یابد.



شکل ۶: اثر اندازه در نمونه‌های مکعبی حاوی پومیس تفتان

مطابق شکل ۵ نسبت  $f_{cu}/f_c$  در طرح شاهد برای نمونه‌های مکعبی با اندازه‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر در بازه ۱/۲۲ تا ۱/۵۰ قرار دارد. با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس از ۲/۵ به ۵ درصد، شیب خط نسبت به طرح شاهد کاهش پیدا می‌کند. با کاهش شیب خط، نسبت  $f_{cu}/f_c$  برای نمونه‌های مکعبی ۶۴/۲۸ درصد کاهش می‌یابد و در بازه ۱/۲ تا ۱/۳ قرار می‌گیرد. بنابراین با جایگزین کردن ۵ درصد میکروسیلیس در بتن خودتراکم اثر اندازه کاهش می‌یابد. همچنین نسبت  $f_{cu}/f_c$  برای نمونه‌های مکعبی با اندازه‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۱۳، ۱۰، ۶/۸، ۴/۷ و ۱/۶۴ درصد کاهش یافته است. کاهش پدیده اثر اندازه با اضافه کردن درصد جایگزینی میکروسیلیس از ۲/۵ به ۵ درصد، می‌تواند به دلیل عملکرد میکروسیلیس در بتن خودتراکم با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد، مکعب ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری باشد. کاهش اثر اندازه با افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم مشابه نتایج مطالعات نیکبین و همکاران می‌باشد [۱]. اما با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس از ۵ به ۱۰ درصد، نسبت  $f_{cu}/f_c$  برای نمونه‌های مکعبی با اندازه‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۱۷/۳۰، ۱۵/۷۰، ۱۵/۱۵، ۱۴/۱۷ و ۱۴/۷۰ درصد افزایش یافته و در بازه ۱/۴ تا ۱/۷۶ قرار می‌گیرد. با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس از ۵ به ۱۰ درصد، بازه  $f_{cu}/f_c$  نسبت به طرح شاهد ۲۸/۵۷ درصد افزایش می‌یابد که به صورت افزایش شیب خط در شکل ۵ قابل مشاهده است. در واقع با افزایش ۱۰ درصد میکروسیلیس جایگزین، اثر اندازه در بتن خودتراکم افزایش می‌یابد. که دلیل آن می‌تواند حضور میکروسیلیس آزاد در خمیر سیمان، افزایش خلل و فرج بتن، فولکوله شدن میکروسیلیس آزاد، کاهش قابل ملاحظه سیمان و در مجموع کاهش مقاومت فشاری باشد.

همانگونه که از شکل ۶ مشاهده می‌گردد، افزودن پومیس تفتان به میزان ۱۵ درصد جایگزین سیمان، عامل ایجاد یکنواختی در بتن شده و اختلاف بین مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای استاندارد و نمونه‌های مکعبی را کاهش داده است. در نتیجه نسبت  $f_{cu}/f_c$  برای نمونه‌های مکعبی با اندازه‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۱۳/۳۳، ۱۲/۱۴، ۹/۸۴، ۹/۴۵ و ۷/۳۷ درصد کاهش یافته و در بازه ۱/۱۳ تا ۱/۳ قرار می‌گیرد. بنابراین با جایگزین کردن ۱۵ درصد پومیس تفتان در بتن خودتراکم اثر اندازه کاهش می‌یابد. افزودن درصد جایگزینی پومیس تفتان از ۱۵ به ۲۰ درصد تغییر چندانی در نسبت  $f_{cu}/f_c$  ایجاد نمی‌کند. مطابق شکل ۶ با افزایش درصد جایگزینی پومیس تفتان از ۲۰ به ۲۵ درصد، شیب خط نسبت به طرح شاهد افزایش پیدا می‌کند. با افزایش شیب خط، نسبت  $f_{cu}/f_c$  برای نمونه‌های مکعبی ۳۵/۷۱ درصد افزایش می‌یابد و در بازه ۱/۰۹ تا ۱/۴۷ قرار می‌گیرد. بنابراین با جایگزین کردن ۲۵ درصد پومیس تفتان در بتن خودتراکم اثر اندازه افزایش می‌یابد. همچنین نسبت  $f_{cu}/f_c$  برای نمونه‌های مکعبی با اندازه‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۲، ۵/۷۱، ۷/۵۷، ۱۰/۲۳ و ۱۰/۶۵ درصد کاهش یافته است. افزایش پدیده اثر اندازه با

اضافه کردن درصد جایگزینی پومیس تفتان از ۲۰ به ۲۵ درصد، می تواند به دلیل کاهش بیش از اندازه سیمان و کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم باشد.

با توجه به مقادیر جدول ۷ و شکل های (۵) و (۶)، مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از داده های آزمایشگاهی این پژوهش رفتاری مشابه با رفتار نتایج حاصل از روابط نیکبین و همکاران [۱] را نشان می دهند، اما با توجه به مطالعات بسیاری که در خصوص پدیده اثر اندازه انجام شده است، این پدیده به عوامل بسیار زیادی، از جمله جهت بارگذاری [۱]، نسبت آب به سیمان [۱]، مقاومت بتن [۷]، نوع بتن [۷] و شکل نمونه ها [۸] وابسته می باشد. با توجه حضور افزودنی ها و تفاوت در نوع سیمان و فوق روان کننده، نسبت آب به سیمان و نوع دانه بندی سنگدانه در طرح های اختلاط پژوهش حاضر انتظار نمی رود که این داده ها برهم منطبق باشند اما از رفتار مشابهی پیروی می کنند.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس و پومیس تفتان مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج زیر بدست آمده است.

۱- طرح دارای ۵ درصد میکروسیلیس جایگزین (M5) و ۲۰ درصد پومیس تفتان جایگزین (P20)، بیشترین مقدار مقاومت فشاری نمونه استوانه ای استاندارد را در بین طرح های دارای میکروسیلیس و پومیس تفتان از خود نشان داد.

۲- نوع شکست در اثر نیروی فشاری محوری در نمونه های مکعبی بتن خودتراکم با اندازه های مختلف، الگوی بیان شده توسط نظریه بازانت را نشان می دهد. همچنین با افزایش اندازه مکعب های بتن خودتراکم، اندازه نوار ترک در قسمت جانبی نمونه های مکعبی افزایش یافته است.

۳- به طور کلی نمونه های مکعبی بتن خودتراکم دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه های استوانه ای استاندارد می باشند و نسبت مقاومت فشاری نمونه های مکعبی به نمونه استوانه ای استاندارد  $f_{cu}/f_c$  با افزایش اندازه نمونه های مکعبی از ۵ به ۱۵ سانتی متر کاهش می یابد.

۴- در طرح های دارای میکروسیلیس، بیشترین کاهش اثر اندازه و نسبت  $f_{cu}/f_c$  در بتن خودتراکم با جایگزین کردن ۵ درصد میکروسیلیس به دلیل افزایش مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد، مکعب ۱۰ و ۱۵ سانتی متری می باشد.

۵- با جایگزینی ۱۵ درصد پومیس تفتان اثر اندازه و نسبت  $f_{cu}/f_c$  کاهش می یابد همچنین جایگزینی ۲۵ درصد پومیس تفتان موجب کاهش نسبت  $f_{cu}/f_c$  در بین طرح های دارای پومیس تفتان شده است.

۶- اثر اندازه با جایگزین کردن ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲۵ درصد پومیس تفتان بدلیل کاهش قابل ملاحظه سیمان و کاهش مقاومت فشاری افزایش یافته است.

## ۶- قدردانی

از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان برای کمک های مادی در قالب طرح پژوهشی به شماره ۱۷۸۴۸-۹۵ قدرانی می شود.

## مراجع

- [1] Nikbin, I.M. Dehestani, M. Beygi, M.H.A. Rezvani, M. (2014). Effects of cube size and placement direction on compressive strength of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 59, 144-150.
- [2] Bazant, Zdenek P., and Jaime Planas. (1997) "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials." 16, CRC press,.
- [3] Hajime Okamura and Masahiro Ouchi. (2003) "Self- Compacting Concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1.1, 5-15.
- [4] Siddique, Rafat. (2011). "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties." *Resources, Conservation and Recycling* 55.11, 2011, 923-932.
- [5] Ramezani pour, A. M., Kh Esmaili, S. A. Ghahari, and A. A. Ramezani pour. (2014). "Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete." *Construction and building materials*. 73, 187-194.
- [6] Neville, Adam M. "Properties of concrete." London: Longman, 1995.
- [7] del Viso, J.R. Carmona, J.R. Ruiz, G. (2008) Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, 38.3, 386-395.
- [8] Dehestani, M., I. M. Nikbin, and S. Asadollahi. (2014) "Effects of specimen shape and size on the compressive strength of self-consolidating concrete (SCC)." *Construction and building materials*, 66, 685-691.
- [9] Gholhaki, M., Kheyroddin, A., Hajforoosh, M. (2018). The Effect of Magnetic Water and Different Pozzolanic Materials on The Fresh and Hardened Properties of Self-Compacted Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(1), Page 5-19. 10.22065/JSCE.2017.77396.1073
- [10] Madandoust, R., Deilami Poshtjoui, S. (2018). Compressive Strength assessment of self-compacted concrete with Nano materials using ultrasonic pulse velocity method. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 10.22065/JSCE.2018.129504.1548.
- [11] Soltani, A., Tarighat, A., Rostami, R. (2017) Effects of Calcined clay minerals and Silica fume on the compressive strength of concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(1), Page 33-50. 10.22065/JSCE.2017.43232.
- [12] ASTM C 127. (2004). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- [13] ASTM C 128. (2004). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- [14] Standard, ASTM. "Standard specification for concrete aggregates." C33, Annual Book of Standards 4, 1994.
- [15] EFNARC. "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete," European Federation of National Associations Representing Concrete, 2005.
- [16] ASTM C 494. (2004). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
- [17] Chai, H.W. : "Design and testing of self-compacting concrete," A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy, 1998.
- [18] ASTM C39/C39M-10. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials; 2010.
- [19] Bazant ZP. (1993) Size effect in tensile and compressive quasibrittle failures. *JCI Int Workshop Size Eff Concr Struct*, 141-60.
- [20] Bazant Zdenek P, Xiang Yuyin. (1997) Size effect in compression fracture, splitting crack band propagation. *J Eng Mech ASCE* 123.2, 162-72.
- [21] Kim, Jin-Ken, Seok-Hong Eo, and Hong-Kee Park. (1990) Size effect in concrete structures without initial crack. *Special Publication 118*, 179-196.
- [22] Bazant Zdenek P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. *J Eng Mech ASCE* 110.4, 1984, 518-535.