



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۴۹ تا ۲۵۹  
Vol. 48, No. 3, Fall 2016, pp. 249-259



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## اثر مقدار و چند نوع مختلف افزودنی‌های معدنی بر تغییرات تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک بتن خودتراکم

پرویز قدوسی<sup>۱\*</sup>، علی‌اکبر شیرزادی جاوید<sup>۲</sup>، مهدی لطفی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۱۳)

### چکیده

در این تحقیق، بتن‌های خودتراکم با مقادیر متفاوت پودر سنگ آهک و مقدار و نوع افزودنی‌های مختلف ساخته شده و آزمایش‌های کارایی و مؤلفه‌های رئولوژی مخلوط‌ها بررسی شدند. بر این اساس، مخلوط‌هایی با نسبت آب به سیمان متفاوت و مقادیر مختلف پودر سنگ آهک و سیمان با جایگزینی میکروسیلیس، سرباره و متاکائولن ساخته شده است. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده منحصر به آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نسبت آب به سیمان موجب کاهش هر دو مؤلفه می‌شود و از طرفی دیگر، افزایش در مقدار پودر سنگ آهک منجر به کاهش تنش جاری مخلوط‌ها می‌گردد. در حالی که ویسکوزیته پلاستیک تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب پودر سنگ آهک و سپس افزایش را نشان می‌دهد. با جایگزینی ۸ درصد میکروسیلیس، تنش جاری افزایش یافت و ویسکوزیته پلاستیک تغییری نکرد؛ در حالی که متاکائولن موجب افزایش هر دو مؤلفه و جایگزینی سرباره تا ۱۵ درصد موجب افزایش تنش جاری شد. اما تغییری در ویسکوزیته پلاستیک ایجاد نگردید. تنش جاری (استاتیکی و دینامیکی) با گذشت زمان افزایش می‌یابد که این افزایش در زمان‌های سکون بیشتر، برجسته‌تر است؛ در حالی است که گذشت زمان بر ویسکوزیته پلاستیک تأثیر چندانی نداشته و مستقل از زمان تغییر می‌کند.

### کلمات کلیدی:

بتن خودتراکم، رئولوژی، تنش جاری، ویسکوزیته پلاستیک، پودر، افزودنی‌های معدنی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please site this article using:  
Ghoddousi, P., Shirzadi-Javid, A. A., and Lotfi, M., 2016. "The Effect of Amount and Type of Mineral Admixtures on the Yield Stress and Plastic Viscosity of Self Consolidating Concretes". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 249-259.

DOI: 10.22060/ceej.2016.671

URL: [http://ceej.aut.ac.ir/article\\_671.html](http://ceej.aut.ac.ir/article_671.html)

E-mail: [ghoddousi@iust.ac.ir](mailto:ghoddousi@iust.ac.ir) نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات:



## ۱- مقدمه

دادند که افزایش مقدار فوق‌روان‌کننده‌های مختلف موجب کاهش تنش جاری می‌شود؛ در حالی که تغییرات ویسکوزیته پلاستیک اندک است. عموماً تغییر در نتایج آزمایش‌های بتن تازه با تغییرات مؤلفه‌های رئولوژی بتن خودتراکم سازگار و همسو است. محققین بسیاری [۱۸-۱۶] به بررسی رابطه بین مؤلفه‌های رئولوژی و آزمایش‌های بتن تازه پرداختند و بیشترین ارتباط را بین تنش جاری با قطر جریان اسلامپ و همچنین ویسکوزیته پلاستیک با زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر در آزمایش جریان اسلامپ و زمان عبور از قیف  $V$  بیان کردند.

بیشتر محققین در مقالات خود نشان دادند که نتایج آزمایش اسلامپ (جریان اسلامپ) بیشترین ارتباط را با تنش جاری در میان آزمایش‌های حالت تازه بتن دارد. تاترسال و بانفیل<sup>۹</sup> [۱۹] ارتباط بین تنش جاری و اسلامپ را خطی بیان کردند. همچنین زربینو و همکارانش<sup>۱۰</sup> [۲۰] ارتباط بین تنش جاری و جریان اسلامپ را خطی با شیب نزولی اعلام کرده و ویسکوزیته پلاستیک را با دیگر آزمایش‌ها، لگاریتمی بیان نمودند.

در این تحقیق به بررسی اثر مقدار پودر سنگ آهک و افزودنی‌های معدنی بر روی خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم، به ویژه تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک با استفاده از دستگاه رئومتر و ارتباط میان دو مؤلفه مذکور با آزمایش‌های بتن تازه و مقاومت فشاری پرداخته شده است و در آخر نیز رئوگراف راهنما برای رسیدن به تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک هدف ارائه شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی برای ساخت مخلوط‌های بتن خودتراکم از نوع سیمان نوع ۲ بوده و پودر سنگ آهک مصرفی در این تحقیق دارای چگالی ۲۶۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب با جذب آب ۱۱ درصد است. میکروسیلیس یکی دیگر از مصالح مصرفی بوده که باید قبل از اضافه‌نمودن این افزودنی‌های معدنی به مخلوط بتنی همراه با سیمان، به صورت جداگانه با آب مخلوط آمیخته شده و میکروسیلیس به صورت همگن درآید. این کار به علت ریز بودن و جذب آب بالای این افزودنی‌های معدنی و دوری از کلوخه‌شدن است. سرباره مورد استفاده، محصول فرعی و حاصل از تولید فولاد در صنعت فولادسازی اصفهان بوده که با دمیدن هوای سرد بر روی آن سخت شده و سپس با آسیاب‌شدن و تبدیل آن به پودر قابل استفاده است. چگالی این محصول ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. متاکائولین که رس کلسینه‌شده نامیده می‌شود، یکی از افزودنی‌های معدنی سیلیکات آلومینیوم فعال بوده که بر اثر حرارت کائولینیت در رژیم دمایی مناسبی به دست می‌آید و وزن مخصوص آن ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. ترکیب شیمیایی و دانه‌بندی سیمان و پودر سنگ آهک و افزودنی‌های معدنی مصرفی به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۱) آمده است. دانه‌بندی

کیفیت بتن و در نتیجه سازه بتنی، وابسته به ویژگی‌های رئولوژی بتن تازه در هنگام ریختن درون قالب دارد. همچنین خواص رئولوژی یا سیال‌شناسی بتن خودتراکم در خواص مکانیکی و دوام بتن نقش مؤثری را دارد. رئولوژی علمی است که با تغییر شکل و جاری‌شدن مواد ارتباط دارد. مخلوط بتن خودتراکم تازه را می‌توان به عنوان ذرات معلق سنگدانه‌ها در خمیر سیمان و رفتار آن را به عنوان سیال غیرنیوتونی در نظر گرفت. رفتار جریان این بتن را با مدل بینگام نشان می‌دهند [۱-۶].

یاهیا و همکاران<sup>۱</sup> [۷] مقدار پودر (سیمان همراه با پودر سنگ) مناسب برای دستیابی به خواص رئولوژیکی مطلوب را در نسبت‌های آب به سیمان مختلف بیان کردند. برای نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ مقدار مناسب پودر برابر با ۲۳ تا ۲۹ درصد حجم ملات، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ مقدار مناسب پودر برابر با ۲۵ تا ۳۵ درصد حجم ملات و برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مقدار مناسب پودر برابر با ۲۳ تا ۳۸ درصد حجم ملات است. والویک و مولر<sup>۲</sup> [۸] نشان دادند که با افزایش مقدار پودر سنگ، تنش جاری کاهش می‌یابد؛ در حالی که ویسکوزیته پلاستیک تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. هاسن و همکارانش<sup>۳</sup> [۹] با جایگزینی متاکائولین با درصد‌های (۳، ۸، ۱۵ و ۲۵ درصد) و همچنین ۸ درصد میکروسیلیس با سیمان بیان کردند که بیشترین تنش جاری مربوط به مخلوط حاوی میکروسیلیس است (حدود ۶۰ پاسکال)؛ در حالی که ویسکوزیته پلاستیک این مخلوط تغییری نسبت به بتن مرجع نشان نداده است. همچنین با افزایش مقدار متاکائولین، هر دو مؤلفه رئولوژی افزایش یافته‌اند؛ به طوری که در جایگزینی ۲۵ درصد، تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک به ترتیب حدود ۳/۳ و ۲/۴ برابر شده‌اند. لاسکار و همکارانش<sup>۴</sup> [۱۰] نشان دادند که جایگزینی میکروسیلیس در درصد‌های مختلف با سیمان با توجه به اجزای مخلوط بتن می‌تواند اثرات متفاوتی را بر مؤلفه‌های رئولوژی داشته باشد. کالدرون و همکارانش<sup>۵</sup> [۱۱] بیان کردند که بتن حاوی متاکائولین، فوق‌روان‌کنندگی، چسبندگی کمتر و سطح بهتری از بتن حاوی میکروسیلیس را نشان می‌دهد. بوکنداکجی و همکارانش<sup>۶</sup> [۱۳، ۱۲] در دو تحقیق جداگانه، با جایگزینی سرباره در درصد‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ با سیمان، اظهار داشتند که مؤلفه‌های رئولوژی با افزایش سرباره کاهش می‌یابد و همچنین بهینه مقدار سرباره را با توجه به آزمایش‌های بتن تازه و تغییرات تنش و ویسکوزیته پلاستیک، ۱۵ درصد بیان کردند. همچنین شی و همکارانش<sup>۷</sup> [۱۴] کاهش مؤلفه‌های رئولوژی را با افزایش سرباره گزارش داده‌اند. فولر و کولر<sup>۸</sup> [۱۵] نشان

<sup>1</sup> Yahia et al.

<sup>2</sup> Mueller and Wallevik

<sup>3</sup> Hassan et al.

<sup>4</sup> Laskar et al.

<sup>5</sup> Caldaron et al.

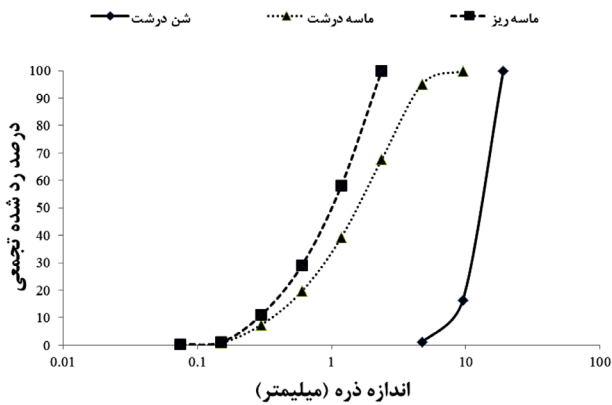
<sup>6</sup> Boukendakdji et al.

<sup>7</sup> Shi YX et al.

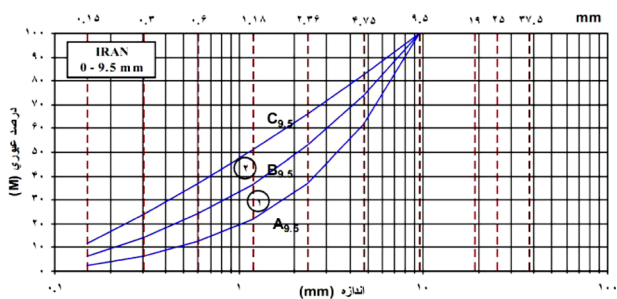
<sup>8</sup> Fowler and Koehler

<sup>9</sup> Tattersall and Banfill

<sup>10</sup> Zerbino et al.



شکل (۲): منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی درشت و ریز



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده‌شده منطبق بر منحنی  $C_{9.5}$

### ۲-۳- نسبت‌های مخلوط

نسبت‌های مخلوط انواع بتن خودمتراکم ساخته‌شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

### ۲-۴- روش‌های آزمایش

#### ۲-۴-۱- آزمایش‌های خواص بتن تازه

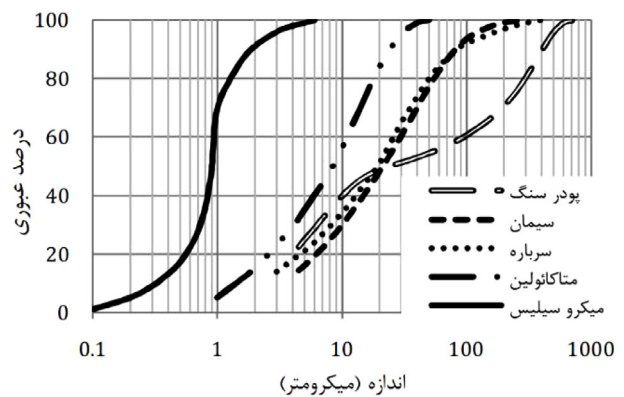
آزمایش‌های ارزیابی کارایی بتن خودمتراکم شامل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش جعبه  $L$ ، آزمایش جعبه  $U$ ، آزمایش حلقه  $J$ ، آزمایش کیف  $V$  و آزمایش شاخص پایداری چشمی مطابق دستورالعمل مرجع [۲۲] انجام شده است. برای انجام آزمایش رئولوژی، دستگاه رئومتر (شکل (۴)) ویژه این بتن که برای اولین بار در ایران و در دانشگاه علم و صنعت توسط قدوسی و همکاران ساخته شده، مورد استفاده قرار گرفته است. رئومتر در واقع گشتاور پیچشی پره داخل بتن را در سرعت‌های مختلف چرخش گزارش می‌کند و با معادل قرار دادن عوامل بینگهام و رئومتر، تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک به دست می‌آید. نمونه‌ای از محاسبات عوامل رئولوژی در شکل (۴) ترسیم شده است.

برای محاسبه تنش تسلیم استاتیکی، پره رئومتر با سرعت کم و ثابت  $0.25$  دور بر ثانیه می‌چرخد. افزایش گشتاور بر اساس تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود. بیشترین گشتاور اندازه‌گیری‌شده در طول آزمایش به عنوان تنش تسلیم استاتیکی ثبت می‌شود. برای رسم منحنی جریان

مواد افزودنی پودری و سیمان از روش موسوم به تفرق لیزر توسط ارسال نمونه به کارخانه سیمان آبیگ انجام شده است. سنگدانه‌های مصرفی استفاده‌شده در این تحقیق، از نوع شکسته برای سنگدانه‌های درشت و نوع گرد گوشه طبیعی برای سنگدانه‌های ریز و از معادن شهریار تأمین شده است. همچنین از افزودنی شیمیایی فوق روان‌کننده با پایه پلی‌کربوکسیلاتی و اصلاح‌کننده ویسکوزیته بکار رفته است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک و افزودنی‌های معدنی

ترکیب شیمیایی	سیمان	پودر سنگ	میکروسلیس	سرباره	متاکائولین
$SiO_2$	۲۰/۷۴	۲/۸۰	۹۴	۳۶/۰۶	۵۲/۸۰
$Al_2O_3$	۴/۹۰	۰/۳۵	۱	۹/۱۶	۳۶/۳۰
$Fe_2O_3$	۳/۵۰	۰/۵۰	۰/۱	۰/۷۰	۴/۲۱
$MgO$	۱/۲۰	۱/۸۰	۰/۶	۱۰/۲۱	۰/۸۱
$CaO$	۶۲/۹۵	۵۱/۲۲	۱	۳۶/۹۱	۰/۱ >
$SO_3$	۳/۰۰	۱/۲۴	۱/۲	۱/۱۵	-
کسر وزن در اثر سرخ‌شدن	۱/۵۶	۴۲/۰۶	-	-	۳/۵۳
باقی‌مانده نامحلول	۰/۷۴	۲/۸۰	-	-	-



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی سیمان و پودر سنگ آهک و افزودنی‌های معدنی

### ۲-۲- دانه‌بندی سنگدانه‌ها

منحنی دانه‌بندی مورد استفاده برای ساخت مخلوط‌های بتن خودمتراکم در این تحقیق، منحنی  $C_{9.5}$  بر مبنای روش طرح ملی مخلوط ایران بوده است [۲۱]. در این آزمایش، شن و ماسه به طور جداگانه الک شده (منحنی‌های دانه‌بندی (شکل (۲)) و با افزودن مقادیر اصلاحی از الک زیر ۸ منطبق بر منحنی  $C_{9.5}$  است. شکل (۳) منحنی مذکور را نشان می‌دهد. شن و ماسه استفاده‌شده کاملاً خشک بوده و به ترتیب دارای جذب آب  $1/8$  و  $4/1$  درصد و وزن مخصوص شن  $2540$  و ماسه  $2440$  کیلوگرم بر متر مکعب است.

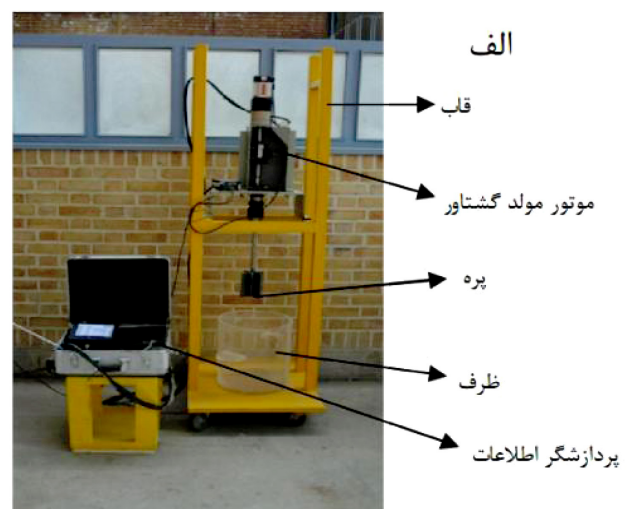
جدول (۲): ترکیب نسبت‌های مختلف مخلوط‌های بتن خودتراکم

شناسه مخلوط	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	درصد و نوع افزودنی معدنی	پودر سنگ آهک (کیلوگرم بر متر مکعب)	W/C	مصالح سنگی (کیلوگرم بر متر مکعب)	فوق‌روان کننده (لیتر بر متر مکعب)	اصلاح کننده ویسکوزیته (لیتر بر متر مکعب)
SCC1	۴۵۰	-	صفر	۰/۴۵	۱۶۳۰	۴	۰/۴۳
SCC2	۴۰۰	-	صفر	۰/۴۵	۱۷۴۳	۱/۸	۰/۴۳
SCC3	۴۵۰	-	صفر	۰/۵	۱۵۸۳	۲/۳۳	۰/۶۷
SCC4	۴۰۰	-	صفر	۰/۵	۱۶۹۰	۱/۶	۰/۵
SCC5	۴۵۰	-	صفر	۰/۴	۱۷۰۴	۵	۰/۲۶
SCC6	۴۰۰	-	صفر	۰/۴	۱۷۹۴	۳/۳۳	۰/۲
SCC7	۴۰۰	-	۱۰۰	۰/۴۵	۱۶۳۰	۲/۲	صفر
SCC8	۴۵۰	-	۱۰۰	۰/۴۵	۱۵۴۳	۲/۱۷	صفر
SCC9	۴۰۰	-	۱۰۰	۰/۴	۱۷۰۰	۴/۵	صفر
SCC10	۴۰۰	-	۱۰۰	۰/۵	۱۵۹۳	۱/۸۳	صفر
SCC11	۴۰۰	-	۲۰۰	۰/۴۵	۱۵۴۵	۲/۷	صفر
SCC12 (REF)	۴۰۰	-	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۲۱	۲/۴۷	صفر
SCC13	۴۵۰	-	۱۵۰	۰/۴۵	۱۴۹۵	۲/۲۳	صفر
SCC14	۴۰۰	-	۱۵۰	۰/۵	۱۵۴۲	۱/۳	صفر
SCC15	۴۰۰	-	۱۵۰	۰/۴	۱۶۴۶	۳/۶۷	صفر
SCC16	۳۶۸	میکروسیلیس (۰/۸٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۰۸	۳/۶۷	صفر
SCC17	۳۶۸	سرباره (۰/۸٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۱۹	۲/۵۰	صفر
SCC18	۳۶۸	متاکائولین (۰/۸٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۱۲	۳/۰۳	صفر
SCC19	۳۴۰	سرباره (۰/۱۵٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۱۵	۲/۶۰	صفر
SCC20	۲۸۰	سرباره (۰/۳۰٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۱۱	۲/۷۰	صفر
SCC21	۳۴۰	متاکائولین (۰/۱۵٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۶۰۹	۳/۶۷	صفر
SCC22	۲۸۰	متاکائولین (۰/۳۰٪)	۱۵۰	۰/۴۵	۱۵۹۴	۴/۰۷	صفر

با شکست دوره‌ای به وسیله چرخش پره از کمترین تا بیشترین سرعت شروع می‌شود. این عمل به علت شکست هرگونه ساختار تقلیل‌پذیری که ممکن است در تاریخچه بتن موجود باشد، انجام می‌گیرد. سپس سرعت پره در تعداد گام‌های خاصی که به وسیله کاربر مشخص می‌شود، کاهش می‌یابد (حداقل شش گام توصیه شده است). در طی هر گام، سرعت ثابت نگه داشته شده و گشتاور و سرعت چرخش ثبت می‌شود. این آزمایش برای تعیین تنش تسلیم دینامیک و ویسکوزیته مخلوط به کار می‌رود.

#### ۲-۴-۲- آزمایش بتن سخت شده

آزمایش مقاومت فشاری طبق دستورالعمل استاندارد<sup>۱</sup> [۲۳] انجام گرفت. برای آزمایش بتن سخت شده، سه نمونه قالب‌گیری شد و در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت. میانگین نتایج سه نمونه به عنوان نتیجه



شکل (۴): دستگاه رئومتر ساخته شده در دانشگاه علم و صنعت

<sup>۱</sup> BS 1881-Part 116

آزمایش در نظر گرفته شد.

زمان‌های  $T_{50}$  و  $T_V$  می‌شود. بدیهی است که این موضوع، درباره متاکائولین و میکروسیلیس با توجه به اندازه ذراتشان (شکل (۱)) مشهودتر بوده و بهترین نتایج نیز مربوط به مخلوط‌های حاوی این پوزولان‌ها است.

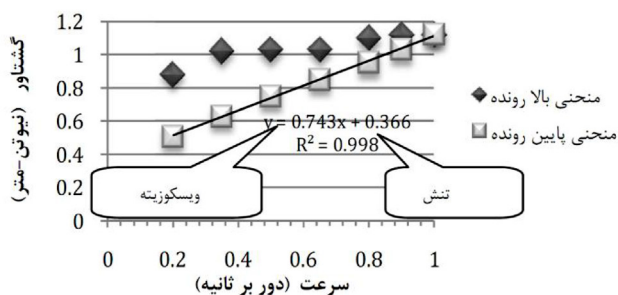
### ۳- نتایج

#### ۳-۱- آزمایش‌های کارایی

نتایج آزمایش‌های کارایی مخلوط‌های ساخته شده در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، هرچه مقدار پودر سنگ افزایش پیدا کند، بتن حاصل از نظر کارایی بهبود می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار حلقه  $J$  کاهش و نسبت  $h2/h1$  در آزمایش جعبه  $L$  افزایش یافته است. این امر به دلیل افزایش مقدار ریزدانه و همچنین افزایش مقدار خمیر و کاهش اصطکاک داخلی و کاهش برخورد درشت دانه‌ها است و در واقع، این افزایش پودر سنگ نقش روغن کاری و در نتیجه افزایش قابلیت حرکت و جریان از بین میلگردها را سبب می‌شود [۲۴]. با توجه به جدول (۳) تأثیر مقدار و نوع افزودنی‌های معدنی بر خواص بتن تازه مشخص بوده و این ارتباط بستگی زیادی به توزیع اندازه ذرات افزودنی‌های معدنی مصرفی دارد؛ به طوری که با افزایش سطح مخصوص بخش ریزدانه، کارایی بتن بالا می‌رود. هرچه افزودنی‌های معدنی ریزتر باشد (مانند میکروسیلیس و متاکائولین)، مخلوط ساخته شده راحتتر از بین موانع و میلگردها حرکت می‌کند و به دلیل ریز بودنشان، موجب ایجاد چسبندگی و ویسکوزیته در مخلوط شده و سبب بالا رفتن

#### ۳-۲- تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک

شکل (۵) رابطه تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک مخلوط‌های ساخته شده با مقادیر مختلف پودر سنگ آهک را نشان می‌دهد. در شکل (۶-الف) دیده می‌شود که با افزایش مقدار پودر سنگ، تنش جاری کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل افزایش در مقدار فوق‌روان کننده باشد. با توجه به جدول (۲)، مشخص است که با افزایش

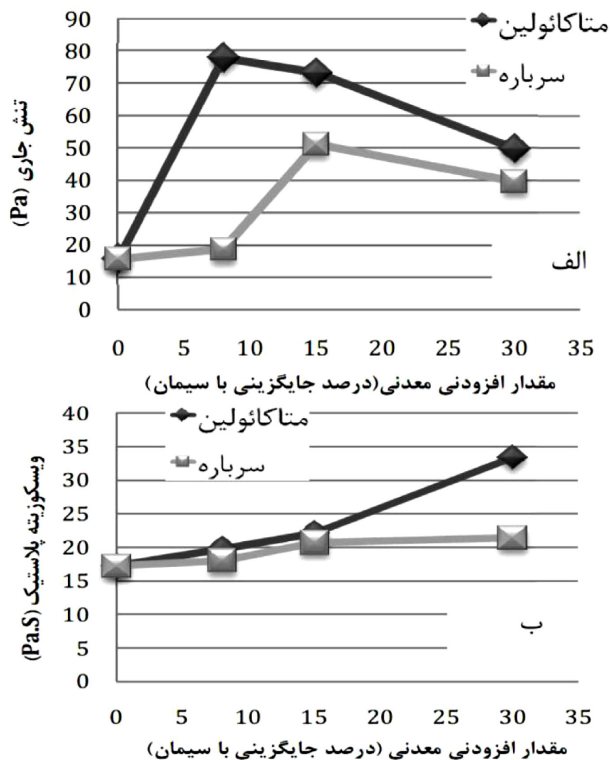


شکل (۵): نمونه‌ای از محاسبات تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک (SCC1)

جدول (۳): نتایج آزمایش‌های کارایی و مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده

مقاومت فشاری (پاسکال)	شاخص پایداری چشمی (VSI)	جریان اسلامپ		V قیف (S)	جعبه L (h2/h1)	حلقه J (میلی‌متر)	شناسه مخلوط
		T <sub>50</sub> (S)	قطر جریان اسلامپ (میلی‌متر)				
۴۸/۸	صفر	۱	۶۵۰	۲	۰/۹	۴	SCC1
۴۵/۵	۱	۱/۵	۶۶۰	۲/۵	۰/۸۱	۱۴	SCC2
۴۴/۳	صفر	۱	۶۲۰	۱/۵	۰/۹۵	۳	SCC3
۴۲/۱	صفر	۱	۶۴۰	۱/۸	۰/۹۲	۴	SCC4
۵۵/۲	۰/۵	۲	۶۴۰	۳/۶	۰/۸۳	۱۲	SCC5
۵۲/۱	۱/۵	۲/۵	۵۶۰	۴	۰/۷۵	۲۵	SCC6
۴۸/۸	۱	۱	۶۷۵	۲/۷	۰/۸۵	۸	SCC7
۵۰/۳	صفر	۱	۷۱۰	۱/۷	۰/۹۲	۲	SCC8
۴۸/۴	۱/۵	۳/۵	۶۳۰	۳/۱	۰/۷۵	۲۰	SCC9
۴۳/۱	صفر	۱	۶۷۰	۱/۵	۰/۹	۴	SCC10
۴۴/۹	صفر	۱/۲	۶۹۰	۱/۸	۰/۹۲	۳	SCC11
۴۸/۱	۱/۵	۱/۱	۶۶۰	۱/۹	۰/۸۷	۷	SCC12
۴۹/۴	صفر	۰/۷	۷۵۰	۱/۳	۰/۹۵	۱	SCC13
۴۴/۲	صفر	۰/۹	۶۹۰	۱/۵	۰/۹۵	۲	SCC14
۵۱/۷	۱	۲/۱	۶۵۰	۴	۰/۸۷	۸	SCC15
۵۴/۵	۱	۱/۹	۶۴۰	۶/۸	۰/۹۴	۴	SCC16
۴۴/۴	۱	۱/۱	۶۵۰	۳/۱	۰/۸۵	۷	SCC17
۴۳/۹	۱/۵	۱/۵	۶۶۰	۴/۲	۰/۹۱	۵	SCC18
۳۶/۸	۱/۵	۰/۹	۶۶۰	۲/۹	۰/۸۸	۶	SCC19
۵۱/۸	۱	۱	۶۶۰	۳/۰	۰/۹۰	۵	SCC20
۵۲/۱	صفر	۱/۴	۶۵۰	۵/۱	۰/۹۳	۴	SCC21
۴۹/۸	صفر	۱/۷	۶۵۰	۵/۸	۰/۹۵	۳	SCC22



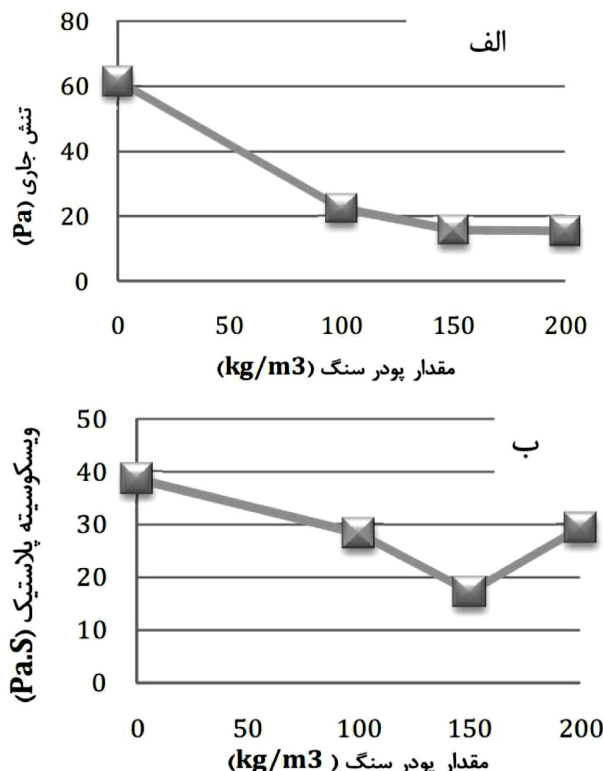


شکل (۷): تأثیر متاکائولین و سرباره بر مؤلفه‌های رئولوژی

سیمان و همچنین کاهش اندک فوق‌روان‌کننده نسبت به گام قبلی مربوط باشد.

در جایگزینی ۳۰ درصد افزودنی معدنی با سیمان هر دو افزودنی معدنی کاهش را نشان داده‌اند؛ در حالی که برای هر دو افزودنی معدنی مصرف فوق‌روان‌کننده افزایش داشته و البته کاهش تنش جاری برای متاکائولین با توجه به مصرف بیشتر فوق‌روان‌کننده، بیشتر بوده است. در شکل (۷-ب) با افزایش درصد جایگزینی متاکائولین با سیمان، ویسکوزیته پلاستیک افزایش می‌یابد و این افزایش در درصدهای بالاتر جایگزینی مشهودتر است. همچنین مشخص است که مقدار فوق‌روان‌کننده تأثیر چندانی را بر مقدار ویسکوزیته پلاستیک ندارد. این نتایج با تحقیق هاسن و همکارانش [۹] مطابقت دارد. طبق تحقیق انجام‌شده، ویسکوزیته پلاستیک با افزایش مقدار متاکائولین، افزایش یافته و فوق‌روان‌کننده تأثیری بر مقدار آن ندارد. از طرفی دیگر، مشاهده شد که با تغییر در مقدار جایگزینی سرباره تأثیر چندانی در میزان ویسکوزیته مشاهده نمی‌شود؛ در حالی که کولر و فولر [۱۵] با ۲۰ درصد جایگزینی، افزایش در ویسکوزیته و سپس کاهش آن را بیان کرده‌اند. بیشترین تنش جاری مربوط به مخلوط ساخته شده با ۸ درصد میکروسیلیس بوده (حدود ۸۰ پاسکال) که می‌تواند به دلیل ریزی آن باشد. از طرفی دیگر، ویسکوزیته پلاستیک این مخلوط تغییر چندانی نکرده است. این نتایج با گزارش هاسن و همکارانش [۹] مطابقت دارد.

پودر سنگ، مقدار فوق‌روان‌کننده و در نتیجه جریان اسلامپ افزایش یافته است که این موضوع، منجر به کاهش تنش جاری می‌گردد. در شکل (۶-ب) با افزایش پودر سنگ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ویسکوزیته پلاستیک کاهش و بعد از آن افزایش را منجر می‌شود. این نتایج با تحقیق والویک و مولر [۸] هم‌خوانی دارد.



شکل (۶): تأثیر مقدار پودر سنگ بر مؤلفه‌های رئولوژی، (الف) تنش جاری، (ب) ویسکوزیته پلاستیک

در شکل (۷)، تأثیر دو افزودنی معدنی متاکائولین و سرباره بر مؤلفه‌های رئولوژی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که متاکائولین تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد که می‌تواند به مساحت ویژه بالای آن مربوط باشد.

در شکل (۷-الف) در جایگزینی ۸ درصد برای هر دو افزودنی معدنی، افزایش در تنش جاری مشاهده خواهد شد که این افزایش، برای متاکائولین بسیار مشهود است و علت آن، می‌تواند به ریزتر بودن این پوزلان مربوط باشد. رفتارهای متفاوتی در ۱۵ درصد جایگزینی افزودنی معدنی با سیمان مشاهده می‌شود. متاکائولین کاهش نامحسوس داشته؛ ولی تنش جاری سرباره افزایش دارد. با توجه به جدول (۲) علت کاهش تنش جاری برای متاکائولین را می‌توان افزایش در مقدار فوق‌روان‌کننده مصرفی دانست. این در حالی است که مقدار فوق‌روان‌کننده برای سرباره تغییر چندانی نکرده؛ پس همچنان افزایش تنش جاری برای سرباره رخ می‌دهد که می‌تواند به اندکی ریزتر بودن این افزودنی معدنی نسبت به

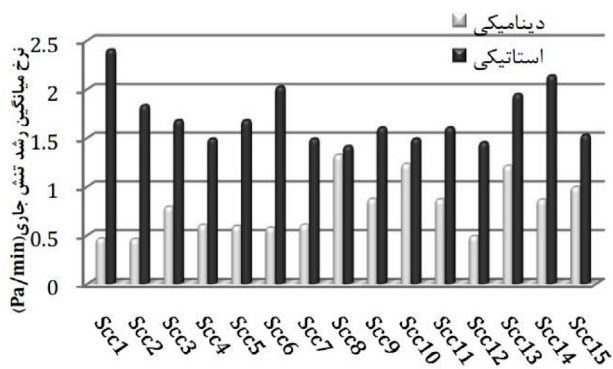
#### ۴- تفسیر

##### ۴-۱- ارتباط زمان با تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک

در این تحقیق، تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک در زمان‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ دقیقه برای مخلوط‌های ۱ تا ۱۵ اندازه‌گیری شده و زمان صفر بعد از ساخت مخلوط و هنگام ریختن در دستگاه رنومتر در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) میانگین نتایج مخلوط‌های ساخته شده رسم شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۸-الف) مشخص است، تنش جاری دینامیکی با گذشت زمان افزایش می‌یابد که این مقدار افزایش به ترکیبات مخلوط مانند مقدار آب، سیمان، مواد ریزدانه، مقدار اصلاح‌کننده ویسکوزیته و غیره بستگی دارد. این نتایج با گزارش *ICAR* در سال ۲۰۰۷ که توسط کولر و فولر [۱۵] ارائه شده است، همخوانی دارد. آن‌ها تنش جاری را برای مخلوط‌ها با انواع فوق‌روان‌کننده و در زمان‌های مختلف محاسبه کردند و برای همه آن‌ها نیز افزایش را گزارش نمودند که البته شیب این افزایش با توجه به نوع فوق‌روان‌کننده برای مخلوط‌های ساخته شده، متفاوت بود. همچنین بیلبرگ<sup>۱</sup> [۲۵] با توجه به روند ساخت ساختار بتن، افزایش تنش جاری استاتیکی را نسبت به زمان گزارش کرد و پتیت و همکارانش<sup>۲</sup> [۲۶] نیز رابطه بین تنش و زمان برای ملات را به صورت خطی و برای بتن را به صورت نمایی بیان نمودند.

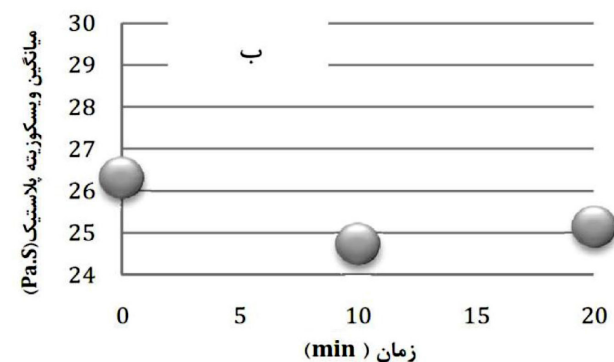
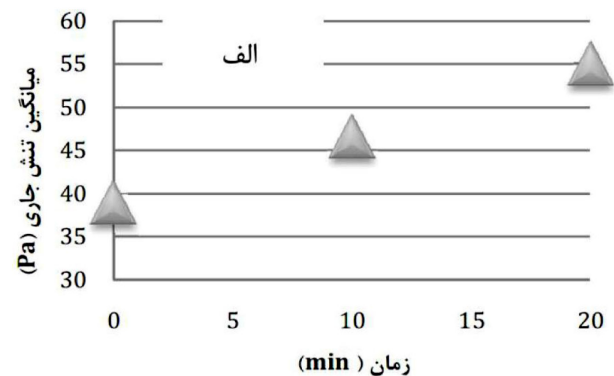
در شکل (۹) نرخ افزایش شیب متوسط تنش‌های جاری استاتیکی و دینامیکی در زمان برای مخلوط‌های مختلف رسم شده است. با توجه

به اندازه‌گیری این مؤلفه‌ها در زمان‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ دقیقه، شیب متوسط از میانگین شیب‌های صفر تا ۱۰ دقیقه و ۱۰ تا ۲۰ دقیقه به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نرخ افزایش برای تنش جاری استاتیکی به صورت محسوس بیشتر از تنش جاری دینامیکی بوده که مطابق اظهارات کوولر و روسل<sup>۳</sup> [۲۷] است. آن‌ها بیان نمودند که با توجه به تاریخچه جریان (کامیون مخلوط‌کن، دوره‌های زمانی سکون و فاز ریختن در قالب و غیره) مقدار تنش جاری استاتیکی به طور پیوسته رشد می‌کند؛ در حالی که مقدار تنش جاری دینامیکی ارتباط زیادی با طرح مخلوط مواد دارد و تغییر زیادی نمی‌کند. از این گفته می‌توان چنین برداشت نمود که تنش جاری استاتیکی به زمان وابستگی زیادی داشته و با گذشت آن افزایش می‌یابد؛ حال آن‌که تنش جاری دینامیکی بیشتر به خود طرح مخلوط و مواد به کار رفته در آن بستگی دارد و اندکی به گذشت زمان وابسته است. با توجه به بحث‌های انجام شده، در شکل (۸) مشاهده می‌شود که شیب افزایش مقدار تنش جاری استاتیکی با گذشت زمان از شیب افزایش مقدار تنش جاری دینامیکی به طور محسوس بیشتر است و با گفته‌های محققین نام برده نیز همخوانی دارد.



شکل (۹): نرخ میانگین افزایش تنش جاری استاتیکی و دینامیکی در طول زمان

افزایش تنش جاری استاتیکی در اولین ساعت بتن‌ریزی (یعنی قبل از شروع روند هیدراسیون)، مهمترین نقش را در رفتارهای رئولوژی بتن دارد [۲۸]. در ادامه چند مثال برای درک بهتر اثر زمان بر تنش جاری استاتیکی بیان شده است. مقدار تنش جاری استاتیکی برای مخلوط *SCC16* بعد از گذشت ۲۰ دقیقه برابر مخلوطی است که حاوی ۸ درصد میکروسیلیس در زمان صفر است و همچنین مقدار تنش جاری استاتیکی مخلوط *SCC8* بعد از گذشت ۲۰ دقیقه برابر مخلوطی بوده که حاوی ۸ درصد متاکائولین در زمان صفر است. محققین این‌طور بیان کردند که اگر مقدار تنش جاری استاتیکی لایه قدیم از حد بحرانی بیشتر شود، مانع اختلاط دو لایه قدیم و جدید شده و سبب چندلایه شدن و ایجاد درز سرد در سازه می‌شود [۲۹].



شکل (۸): تغییرات الف) تنش جاری بر حسب زمان، ب) ویسکوزیته پلاستیک بر حسب زمان

<sup>۱</sup> Billberg

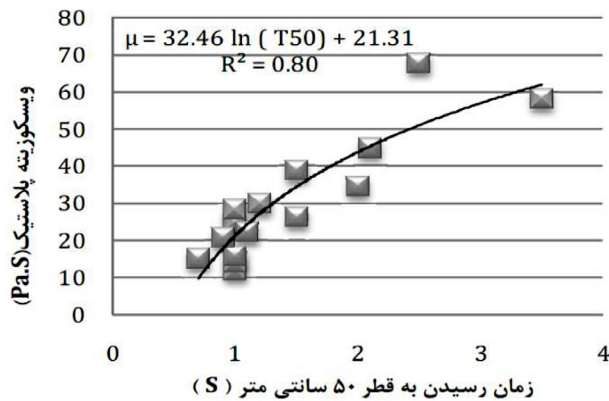
<sup>۲</sup> Petit et al.

<sup>۳</sup> Kovler and Roussel

چیدایک و همکارانش<sup>۱</sup> [۱۷] ارتباط نظری بین تنش جاری و اسلامپ بتن خودتراکم را به صورت رابطه (۱) بیان کرده‌اند:

$$\tau_y = \frac{4gV\rho}{\sqrt{3\pi}S_f^2} = 39.7 \times 10^{-3} \frac{\rho}{S_f^2} \quad (1)$$

که در آن،  $\rho$  وزن مخصوص بتن و  $S_f$  جریان اسلامپ است. برای مقایسه نتایج با رابطه بیان شده، از شکل (۱۱) کمک گرفته می‌شود. در این شکل، محور عمودی تنش جاری به دست آمده از دستگاه رنومتر در این تحقیق و محور افقی نیز تنش جاری حاصل از رابطه (۱) است. طبق این رابطه، هرچه اسلامپ جاری بیشتر شود، تنش جاری با نرخ سریع‌تری کاهش می‌یابد که این روند کاهش در شکل (۱۰) دیده می‌شود. از طرفی دیگر، در شکل (۱۱) با توجه به رگرسیون  $0.39$  ارتباط نسبتاً پایینی بین رابطه نظری و نتایج دیده می‌شود. همچنین با مقایسه رگرسیون شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، دیده می‌شود که رابطه بین تنش جاری و جریان اسلامپ به غیرخطی بودن نزدیکتر بوده و رابطه بیان شده توسط چیدایک و همکارانش [۱۷] همخوانی بهتری را با نتایج این تحقیق داشته است. ویسکوزیته پلاستیک عاملی است که با قابلیت عبور و سرعت حرکت بتن خودتراکم در ارتباط است. با توجه به این که  $T_{50}$  سرعت حرکت بتن را نشان می‌دهد و با ویسکوزیته بتن ارتباط دارد (همان‌طور که در شکل (۱۲) نیز مشاهده می‌شود)، ویسکوزیته پلاستیک بتن با افزایش  $T_{50}$  افزایش می‌یابد.

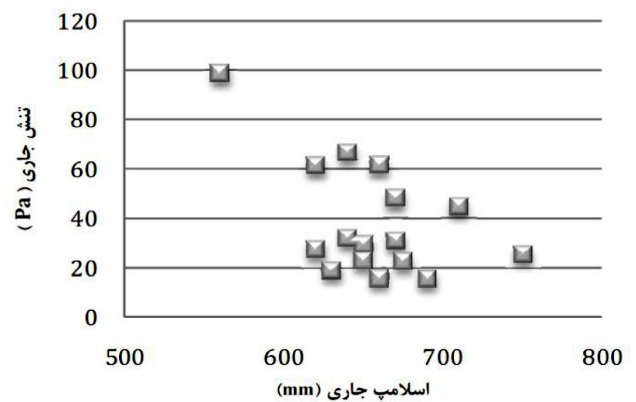


شکل (۱۲): ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک و  $T_{50}$

این نتایج منطبق بر نتایجی است که کولر و فولر [۱۵] در گزارشی که در سال ۲۰۰۷ منتشر شد، به آن اشاره نمودند. در نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که بهترین ارتباط ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش‌های بتن تازه توسط نمودارهای لگاریتم طبیعی بیان شده است که این نتایج با نتایج زیرینو و همکارانش [۲۰] مطابقت دارد. آن‌ها نیز ارتباط بین ویسکوزیته پلاستیک با زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی‌متر را به صورت رابطه (۲) بیان کردند:

#### ۴-۲- ارتباط بین تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک با آزمایش‌های بتن تازه

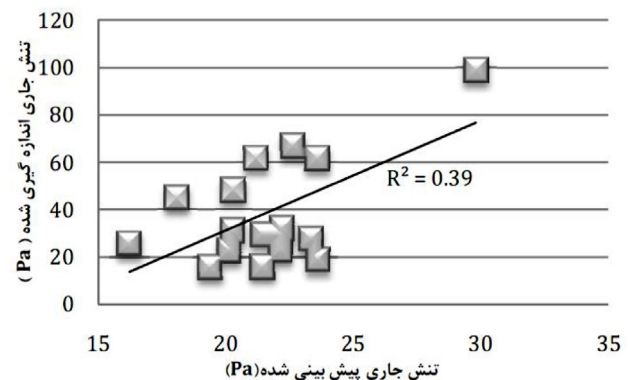
اغلب تغییر در نتایج آزمایش‌های بتن تازه، با تغییرات عوامل رئولوژی بتن خودتراکم سازگار و همسو است. با افزایش تنش جاری، از روانی بتن کم شده و بتن با سرعت کمی شروع به حرکت می‌کند. بالا رفتن میزان تنش در مخلوط‌های ساخته شده، می‌تواند دلایل متعددی نظیر مقدار سیمان، پودر سنگ، فوق‌روان‌کننده، سنگدانه و نسبت آب به سیمان داشته باشد. مثلاً تنش جاری در مخلوط شماره (۶) با توجه به پایین بودن نسبت آب به مواد ریزدانه و بالا بودن حجم سنگدانه دارای مقدار بالایی است. در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که قطر جریان اسلامپ با افزایش مقدار تنش کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰): ارتباط بین تنش جاری و جریان اسلامپ

اگر فرض کنیم که بین تنش جاری و اسلامپ جاری رابطه‌ای خطی وجود دارد، این نتایج را می‌توان با نتایج تحقیق کولر و فولر [۱۵] مقایسه نمود. آن‌ها نیز با در نظر گرفتن رابطه خطی، رگرسیون  $0.25$  را در نتایج خود اعلام کردند. در شکل (۱۱) رگرسیون با فرض رابطه خطی برابر  $0.39$  است.

بیشتر روابط گفته شده در مراجع، یا ارتباط بین تنش جاری را با اسلامپ بتن معمولی بیان کرده‌اند و یا روابط تجربی ارائه نموده‌اند.



شکل (۱۱): ارتباط میان نتایج تنش جاری و اسلامپ جاری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده

<sup>۱</sup> Chidiac et al.



کمترین تنش جاری ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین بیشترین اثر پودر سنگ بر تنش جاری مشاهده می‌شود؛ درحالی که تأثیر زیادی را بر ویسکوزیته نشان نمی‌دهد. همچنین تغییر نسبت آب به سیمان بر تنش جاری و به خصوص بر ویسکوزیته پلاستیک اثرگذار است. استفاده از پودر سنگ آهک (۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) به همراه افزودنی‌های معدنی مانند متاکائولین و میکروسیلیس موجب تغییرات محسوس بر تنش جاری و در واقع افزایش آن شده است؛ در صورتی که ویسکوزیته پلاستیک تغییر زیادی را نشان نداده است؛ به طوری که با اضافه نمودن این افزودنی‌های معدنی، تغییرات در رئوگراف به صورت عمودی مشاهده می‌شود که به مفهوم تغییر در تنش جاری و نامحسوس بودن تغییرات برای ویسکوزیته پلاستیک است. به عنوان مثال، برای دست‌یافتن به تنش جاری زیر ۲۰ پاسکال و ویسکوزیته پلاستیک ۴۵ پاسکال-ثانیه می‌توان از مخلوطی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و مقدار پودر سنگ آهک ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده نمود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

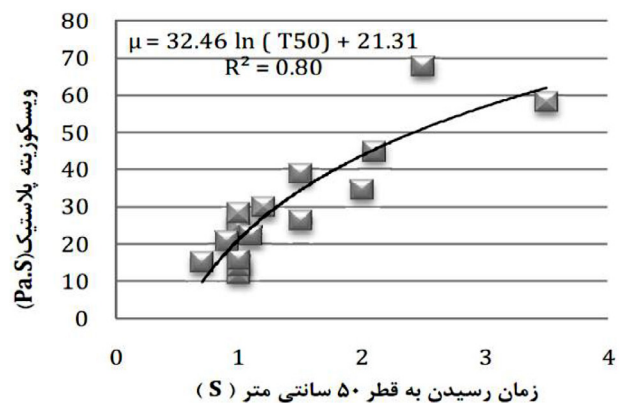
بر پایه مطالب مطرح‌شده در این تحقیق، نتایج زیر بیان می‌شود:

- استفاده از میکروسیلیس و متاکائولین بهترین نتایج را در آزمایش‌های بتن تازه نشان داده است. در مورد متاکائولین، نتایج نزدیکی با جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد با سیمان به دست آمده است. سپس با جایگزینی ۱۵ درصد متاکائولین با سیمان می‌توان به نتایج مورد نظر در آزمایش‌های بتن تازه دست یافت.
- مشاهده شد که با افزایش مقدار پودر سنگ آهک، تنش جاری کاهش یافت. از طرفی دیگر، ویسکوزیته پلاستیک با افزایش پودر سنگ آهک تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش و بعد از آن افزایش نشان داد.
- در میان مخلوط‌های حاوی افزودنی معدنی، مخلوط دارای ۸ درصد میکروسیلیس بیشترین تنش جاری (۷۹/۶۸ پاسکال) را نشان داده است؛ در حالی که اثر محسوسی را بر ویسکوزیته پلاستیک نداشته است.
- با جایگزینی متاکائولین تا ۸ درصد، تنش جاری افزایش و تا ۱۵ درصد کاهش نامحسوس نشان نداد و از آن به بعد، تنش جاری کاهش یافت. از طرفی دیگر، افزایش مقدار متاکائولین موجب افزایش ویسکوزیته پلاستیک شده است.
- با افزایش در جایگزینی سرباره تا ۱۵ درصد، تنش جاری افزایش و بعد از آن کاهش یافت. در حالی که تغییر مقدار سرباره بر ویسکوزیته پلاستیک تأثیر محسوسی را نشان نداد.
- اثر متاکائولین نسبت به سرباره بر مؤلفه‌های رئولوژی محسوس‌تر بوده است.
- تنش جاری (استاتیکی و دینامیکی) با گذشت زمان افزایش می‌یابد که این افزایش، در زمان‌های سکون بیشتر و برجسته‌تر است؛ در حالی که گذشت زمان بر ویسکوزیته پلاستیک تأثیر چندانی نداشته و مستقل از زمان تغییر می‌کند.

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{T_{50}}{0.68}\right)}{0.019} \quad (2)$$

#### ۴-۳- رئوگراف

رئوگراف ترسیم تغییرات در رابطه بین تنش جاری (محور y) و ویسکوزیته پلاستیک (محور x) بوده که تابعی از ویژگی‌های ماده، زمان، افزودنی و دیگر موارد است. در واقع استفاده از رئوگراف، تعیین راهی سیستماتیک به منظور مشخص کردن اثر عوامل مختلف در رفتار رئولوژی است. در شکل (۱۳)، رئوگراف مربوط به مخلوط‌های ساخته‌شده در این تحقیق با توجه به رئومتر به کار رفته ترسیم شده است. افزایش نسبت آب به سیمان، موجب کاهش محسوس ویسکوزیته پلاستیک و تنش جاری شده است؛ به نحوی که افزایش در نسبت آب به سیمان در نسبت‌های پایین موجب نصف شدن تنش جاری شده است. همچنین افزایش پودر سنگ آهک نیز موجب کاهش عوامل ذکر شده می‌شود؛ به طوری که در همه مخلوط‌های ساخته‌شده، افزودن پودر سنگ آهک، منجر به کاهش تنش جاری شده است؛ در صورتی که ویسکوزیته پلاستیک در بیشتر مخلوط‌ها تغییر محسوسی نداشته است. در شکل (۱۳) مشخص است که با بکارگیری ترکیب مناسبی از مقدار پودر سنگ آهک و نسبت آب به سیمان می‌توان به تنش جاری پایین (حدود ۱۵ پاسکال) و ویسکوزیته مناسب دست یافت.



شکل (۱۳): رئوگراف راهنمای اثر اجزا بتن برای رسیدن به مقدار تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک مورد نظر

مشاهده می‌شود که پودر سنگ آهک بیشتر بر تنش جاری مخلوط‌ها اثر گذاشته است و تقریباً همه مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب پودر سنگ آهک، تنش جاری زیر ۳۰ پاسکال را نشان داده‌اند و افزودن پودر سنگ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب تغییر محسوسی را در مقدار تنش جاری نشان نمی‌دهد. از طرفی دیگر، مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب پودر سنگ، تنش جاری زیر ۵۰ پاسکال را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است بهینه مقدار پودر سنگ آهک برای دستیابی به

- [11] Caldarone, M. A.; Gruber, K. A. and Burg, R. G.; "High-Reactivity Metakaolin: A New Generation Mineral Admixture", *Concrete International*, Vol. 16, No. 11, pp. 37–40, 1994.
- [12] Boukendakdji, O.; Kenai, S.; Kadri, E. H. and Rouis, F.; "Effect of Slag on the Rheology of Fresh Self-Compacted Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2593–2598, 2009.
- [13] Boukendakdji, O.; Kadri, E. H. and Kenai, S.; "Effects of Granulated Blast Furnace Slag and Superplasticizer Type on the Fresh Properties and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, pp. 583–590, 2012.
- [14] Shi, Y. X.; Matsui, I. and Guo, Y. J.; "A Study on the Effect of Fine Mineral Powders with Distinct Vitreous Contents on the Fluidity and Rheological Properties of Concrete," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 34, pp. 1381–1387, 2004.
- [15] Eric P. Koehler and David W. Fowler; "Aggregates in Self-Consolidating Concrete," *ICAR Project 108-2F*, 2007.
- [16] Ferraris, C. and Brower L.; "Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000," *NISTIR 6819*, p. 147, 2001.
- [17] Chidiac, S. E. and Habibbeigi, F.; "Modelling the Rheological Behaviour of Fresh Concrete: An Elasto-Viscoplastic Finite Element Approach," *Computers and Concrete*, Vol. 2, No. 2, pp. 97–110, 2005.
- [18] Domone, P.; "The Slump Flow Test for High-Workability Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 177–182, 1998.
- [19] Tattersall, G. H. and Banfill, P. F. G.; "The Rheology of Fresh Concrete," *Pitman Publishing*, 1983.
- [20] Zerbino, R.; Barragan, B.; Garcia, T.; Agullo, L. and Gettu, R.; "Workability Tests and Rheological Parameters in Self-Compacting Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 42, pp. 947–960, 2009.
- [21] Road, Housing and Development Research Center; "The National Method for Concrete Mix Design," 2008 (in Persian).
- [22] PCI, "Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete Institute Member Plants," *PCI*, 2003.
- [23] BS Standard; "Standard Test Method for Compressive Strength of Cubic Concrete Specimens," Part 116, 1881.
- [24] Gesoglu, M.; Güneysi, E. and Özbay, E.; "Properties - با مقایسه تنش جاری استاتیکی و دینامیکی، مشاهده شد که نرخ افزایش در تنش جاری استاتیکی بیشتر از تنش جاری دینامیکی است و این اختلاف در نرخ، با گذشت زمان بیشتر نیز می‌شود.
- ۶- مراجع**
- [1] Hanehara, S. and Yamada, K.; "Rheology and Early Age Properties of Cement Systems," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, p. 175, 2008.
- [2] Wallevik, O. H. and Wallevik, J. E.; "Rheology as a Tool in Concrete Science: The Use of Rheographs and Workability Boxes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, p. 1279, 2011.
- [3] ACI 237R-07, "Self-Consolidating Concrete," *American Concrete Institute*, 2007.
- [4] ACI 238.1R-08, "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete," *American Concrete Institute*, 2008.
- [5] Jau, W. C. and Yang, C. T.; "Development of a Modified Concrete Rheometer to Measure the Rheological Behavior of Conventional and Self Consolidating Concretes," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, pp. 450–460, 2010.
- [6] Ferraris, C. F.; "Measurement of The Rheological Properties of High Performance Concrete; State of The Art Report," *Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology*, Vol. 104, p. 461, 1999.
- [7] Yahia, A.; Tanimura, M. and Shimoyama, Y.; "Rheological Properties of Highly Flowable Mortar Containing Limestone Filler-Effect of Powder Content and W/C Ratio," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 532–539, 2005.
- [8] Florian V. Mueller and Olafur H. Wallevik; "Effect of Limestone Filler Addition in Eco-SCC: Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete," *Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada*, 26–29 September, 2010.
- [9] Hassan, A. A. A.; Lachemi, M. and Hossain, K. M. A.; "Effect of Metakaolin on the Rheology of Self-Consolidating Concrete-Design, Production and Placement of Self Consolidating Concrete," *RILEM State of the Art Reports*, Vol. 1, No. 3, pp. 103-112, 2010.
- [10] Islam Laskar, A. and Talukdar, S.; "Rheological Behavior of High Performance Concrete with Mineral Admixtures and their Blending," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 2345–2354, 2008.

*Research*, pp. 655–670, 2007.

[27] Kovler, K. and Roussel, N.; “Properties of Fresh and Hardened Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 775–792, 2011.

[28] Roussel, N.; “Rheology of Fresh Concrete: from Measurements to Predictions of Casting Processes,” *Materials and Structures*, Vol. 40, pp. 1001–1012, 2007.

[29] Roussel, N. and Cussigh, F.; “Distinct Layer Casting of SCC: The Mechanical Consequences of Thixotropy,” Accepted for Publication in *Cem. Concr. Res.*

of Self-Compacting Concretes Made with Binary, Ternary, and Quaternary Cementitious Blends of Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Silica Fume,” *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1847–1854, 2009.

[25] Billberg, P.; “Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete-Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest,” *Division of Concrete Structures*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006.

[26] Petit, J.; Wirquin, E.; Vanhove, Y. and Khayat, K.; “Yield Stress and Viscosity Equation for Mortars and Self Consolidating Concrete,” *Cement and Concrete*