



## مقایسه آزمایش‌های مربوط به بتن خود تراکم تازه حاوی نانو ذرات

علی قربانی<sup>۱\*</sup>، امین قربانی<sup>۲</sup>، فاطمه شوکتی گورابی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

پست الکترونیکی:

[ghorbani@pnu.ac.ir](mailto:ghorbani@pnu.ac.ir)

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

پست الکترونیکی:

[aghorbani@pnu.ac.ir](mailto:aghorbani@pnu.ac.ir)

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، مدیریت ساخت، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

پست الکترونیکی:

[fshokati@gmail.com](mailto:fshokati@gmail.com)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵

### چکیده

صنعت ساخت و ساز با توجه به نیازهای خود از نظر مقاومت، دوام و نیز کارایی بالا، از استفاده‌کنندگان مهم مواد نانو ساختار به شمار می‌رود در این تحقیق به بیان و تفسیر نتایج بدست آمده در زمینه خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خود تراکم تازه حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس پرداخته می‌شود و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های حالت تازه جریان اسلامپ،  $50T$ ، زمان قیف  $V$ ، و جعبه  $L$  می‌باشد. براساس نتایج حاصله برای، تمام طرح‌های ساخته شده در این پروژه، جریان اسلامپ نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. با استفاده از نانومس این کاهش اسلامپ بسیار بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. همچنین با توجه به کاهش اسلامپ مقدار زمان  $50T$  با افزودن نانومواد شاهد افزایش آن بودیم که با افزودن نانومس، این افزایش زمان بیشتر از طرح‌های حاوی نانو سیلیس می‌باشد و در این تحقیق زمان قیف عبوری با افزودن نانو مواد افزایش می‌یابد که این افزایش در نمونه‌های حاوی نانو مس بسیار واضح‌تر می‌باشد. هرچند وجود میکروسیلیس و متاکائولن در تمامی نمونه‌های خود موجب افزایش زمان عبوری می‌شود و همچنین نسبت عبوری در  $L.Box$  با افزودن نانو مواد کاهش یافته و این کاهش در طرح حاوی ۳٪ نانومس به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به طور کلی استفاده از نانو و افزایش درصد استفاده آن در بتن، موجب کاهش کارایی بتن خودتراکم می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم تازه، نانو ذرات، خواص رئولوژیکی

## ۱- مقدمه

با پیشرفت صنعت ساخت و ساز با توجه به نیازهای خود از نظر مقاومت، دوام و نیز کارایی بالا، از استفاده کنندگان مهم مواد نانو ساختار به شمار می‌رود. همه نانو مواد از ریزدانه‌هایی تشکیل شده‌اند که به نوبه خود از اتم‌های زیادی ساخته شده‌اند. این دانه‌ها را بسته به اندازه‌شان، با استفاده از چشم غیرمسلح، می‌توان دید و یا نمی‌توان دید. مواد رایج، حاوی دانه‌هایی هستند که اندازه آن‌ها در هر عمقی و در هر جایی از نمونه ماده، از چند صد میکرون تا چند سانتیمتر تغییر می‌کند. نانو مواد را گاهی اوقات، وقتی که متراکم و فشرده نشده باشند، نانو پودر می‌نامند، که اندازه دانه‌های آن‌ها حداقل در یک بعد و یا معمولاً در سه بعد، در محدوده ۱۰۰-۱ nm می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی، با افزودن مواد پودری به بتن و همچنین نانو و کاربرد آن در علوم مختلف، محققین درصدد استفاده از این ذرات در بتن برآمدند. با استفاده از نانوذرات سیلیس می‌توان میزان تراکم ذرات را در بتن افزایش داده که این به افزایش چگالی میکرو و نانو ساختارهای تشکیل دهنده بتن و در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی می‌انجامد استفاده از میکروسیلیس با سطح بالایی از ذرات ریز و خصوصاً کروی شکل منجر به چسبندگی خوب و بهبود مقاومت در برابر جداشدگی می‌گردد. همچنین میکروسیلیس در محدود کردن آب انداختن مفید است. متاکائولن، پوزولان‌های طبیعی، سرباره سرد شده توسط هوا و دیگر فیلرهای ریز می‌توانند در بتن خودتراکم<sup>۱</sup> استفاده شوند اما باید توجه نمود که آثار دراز مدت این فیلرها در بتن قبل از مصرف به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

ویژگی بتن خودتراکم تازه در مقایسه با بتن معمولی به این موضوع ارتباط پیدا می‌کند که منظور از خودتراکم شونددگی چیست و چگونه تعریف می‌شود. در بیان مکانیزم، چنین ویژگی به رفتار رئولوژی بتن تازه و در بیان کاربردی به پارامترهای کارایی مرتبط می‌شود. بنابراین به منظور درک بهتر ویژگی‌های بتن تازه خودتراکم، نیاز به نگرش صحیح از رفتار رئولوژی و کارایی بتن خودتراکم می‌باشد [۱۵].

خاصیت اصلی تاثیرگذار بر عملکرد بتن تازه در هنگام بتن‌ریزی و در حین متراکم شدن همان رئولوژی آن می‌باشد. تئوری روانی یا همان رئولوژی برای فهم و گسترده SCC مناسب و سودمند است و روانی ابزاری برای ارزیابی بتن و مقیاسی برای فهم و تسهیل بهینه‌یابی بتن خودتراکم می‌باشد. بتن تازه را می‌توان مانند ذرات معلق در نظر گرفت، هر چند پیچیده‌تر است، زیرا دارای پراکندگی بسیار وسیعی در اندازه ذرات بوده و خواص آن به دلیل واکنش‌های شیمیایی وابسته به زمان می‌باشد. در صورت معلق فرض کردن آن، تعریف فازهای ذره و مایع آن می‌تواند به دلیل پراکندگی اندازه ذرات تغییر کند، به عنوان مثال می‌توان درشتدانه‌ها در یک ملات (فاز شامل آب، سیمان و ریزدانه) و یا ذرات ماسه را در یک خمیر مایع (فاز متشکل از آب، سیمان و دیگر ذرات پودری) در نظر گرفت. بنابراین ارزیابی رفتار رئولوژی وابسته به اندازه ذرات نیز می‌باشد. کارایی مجسم‌کننده ویژگی‌های رئولوژی بتن با در نظر گرفتن شرایط خاص کارگاهی می‌باشد. از نظر کارایی خودتراکم شونددگی به صورت توانایی بتن برای جاری شدن فقط تحت شتاب ثقل پس از خروج از پمپ و همچنین قابلیت آن برای پر کردن فضاهای مورد نظر در قالب به منظور دستیابی به بتنی بینقص و با کیفیت یکنواخت و همگن تعریف می‌گردد.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که دامنه طرح اختلاط و مواد ترکیبی در انواع بتن خودتراکم بسیار گسترده می‌باشد و محدوده فراوانی از مخلوط‌های مناسب بتن خودتراکم برای کاربردهای مختلف و با توجه به نیازمندی‌های متفاوت تعریف شده است [۵]. بر اساس طرح اولیه اصلی اکامورا و ازوا در کل ۳ نوع بتن خودتراکم می‌تواند وجود داشته باشد [۱۳].

نوع اول: روش پودری؛ در این روش تولید بتن خودتراکم با افزایش حجم مواد پودری در بتن امکان‌پذیر است. نوع دوم: روش استفاده از فوق روان کننده و اصلاح ویسکوزیته؛ در این روش برای تولید بتن خودتراکم از یک عامل چسباننده و لزج ساز در بتن استفاده می‌شود که خاصیت ویسکوزیته مخلوط را افزایش می‌دهد. نوع سوم: روش ترکیبی؛ در این روش برای تولید بتن خودتراکم با ترکیب ۲ روش گفته شده یعنی هم افزایش مواد پودری و هم استفاده از فوق روان کننده و ماده لزج ساز در بتن می‌باشد. روند فعلی تولید SCC به طور عمومی، تجربی می‌باشد. این طرح اختلاط بر اساس تجربه‌ای در ژاپن، اروپا و آمریکا بنا نهاده شده است.

<sup>۱</sup> Self Compacting Concrete; SCC

از تحقیقات انجام شده به نظر می‌رسد که نسبت‌های اختلاط در اکثر موارد براساس نوع دوم و یا نوع سوم می‌باشد که البته از اصلاح ویسکوزیته نیز استفاده شده است. همچنین در برخی تحقیقات ادعا شده است که با استفاده از روش دوم حساسیت مخلوط‌های SCC نسبت به تغییرات رطوبتی مثل رطوبت سنگدانه‌ها کمتر می‌باشد زیرا مخلوط‌های SCC که هیچ روان‌کننده‌ای در آن‌ها استفاده نشده باشد گاهی اوقات حتی با تغییر ۱ درصد در رطوبت سنگدانه‌ها تغییرات فاحشی در آزمایشات بتن تازه SCC نشان داده می‌شود [۵].

اکامورا و کاگوا در سال ۱۹۹۵ نیز یک روش ساده برای نسبت‌های اختلاط با فرض تولید کلی در کارگاه پیشنهاد کردند [۱۸]. در این روش مقدار مصالح سنگدانه درشت و ریز ثابت نگه داشته می‌شود و بتن خودتراکم می‌تواند به آسانی با تنظیم نسبت‌های آب، پودر و روان‌کننده تهیه شود.

در این تحقیق به بیان و تفسیر نتایج بدست آمده در زمینه خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خود تراکم تازه حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس پرداخته می‌شود و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های حالت تازه جریان اسلامپ،  $T_5$ ، زمان قیف V، و جعبه L می‌باشد.

## ۲- روش کار

در این پروژه برای تولید بتن از فوق روان‌کننده بهره گرفته شده است و نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح‌ها ثابت و برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. ساخت بتن در میکسر با ظرفیت ۰/۱ متر مکعب انجام شد (در این تحقیق از آب شرب شهرستان رشت جهت ساخت بتن استفاده گردید که با توجه به مصرف آشامیدنی آن برای ساخت بتن بدون مشکل است).

برای این کار ابتدا مصالح مورد نیاز توزیه گردیده و سپس وارد مرحله ساخت شده‌اند. برای ساخت ابتدا شن و ماسه وارد میکسر شد و پس از یک ربع مخلوط شدن، نصف آب اختلاط به مخلوط اضافه گردید و بعد از چند دقیقه مصالح سیمانی (اعم از سیمان و میکروسیلیس، متاکائولن، نانو سیلیس و نانو مس بسته به طرح مورد نظر) به مخلوط اضافه شده و سپس فوق روان‌کننده که با مابقی آب اختلاط مخلوط شده وارد مخلوط بتن گردید. پس از رسیدن بتن به حالت مناسب، ابتدا آزمایشات بتن تازه به عمل می‌آید و پس از تایید آن، مخلوط در قالب‌های مورد نظر ریخته شد و بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شده و در دمای اتاق به مدت مورد نظر در حوضچه‌های آب نگهداری شده تا در روز مورد نظر آزمایش از حوضچه‌ها خارج شوند. برای هر طرح ۳ نمونه مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متری برای آزمایش فشار و ۳ نمونه مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متری برای آزمایش جذب آب با رنگ پلی اورتان پوشیده که به مدت ۴۸ در فضای بیرون خشک شده و سپس در آب قرار می‌دهیم و ۶ نمونه مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  نفوذپذیری که ۳ نمونه با رنگ پوشیده شده و ۳ نمونه به صورت معمول می‌باشد. در ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزگی و ۳ نمونه استوانه‌ای  $15 \times 30$  سانتی‌متر برای آزمایش کششی ۲۸ روزه ساخته شد. در هر روز نمونه‌های مورد نظر برای انجام آزمایش از حوضچه‌ها خارج شده و پس از خشک شدن سطح آن‌ها در فضای باز، برای انجام آزمایش استفاده شدند. در تمامی طرح‌ها نمونه‌های مکعبی به منظور اندازه‌گیری چگالی پس از خشک شدن در فضای باز توزین شدند.

### ۲-۱- آماده‌سازی رنگ پلی اورتان

رنگ پلی اورتان و هاردنر آن را به نسبت مناسب مخلوط کرده و توسط تینر مربوطه تا رسیدن به ویسکوزیته مورد نظر رقیق نمائید. رنگ‌های پلی اورتان را هنگام آماده‌سازی و قبل از مصرف باید کاملاً تکان داد؛ به دلیل داشتن Pot Life فقط به مقدار لازم باید رنگ آماده گردد زیرا سرعت خشک شدن بالایی دارند (عمر مفید رنگ آماده شده ۶ ساعت است). وزن مخصوص رنگ پلی اورتان  $1.2/1 \text{ g/cm}^3$ ، حجمی:  $19/4$  درصد وزنی:  $65$  درصد، نرمی ذرات:  $10$  میکرون، پوشش:  $8-12$  متر مربع بر لیتر،  $30-40$  میکرون می‌باشد.

مدت زمان خشک شدن آن در سه مرحله، زمان خشک شدن سطحی: ۱ ساعت در ۲۵ درجه سیلسیوس، خشک شدن کامل: ۴۸ ساعت در ۲۵ درجه سیلسیوس و سخت شدن نهایی: ۶ روز در ۲۵ درجه سیلسیوس می‌باشد.

### ۳- تجزیه و تحلیل

#### ۳-۱- طرح اختلاط بتن خودتراکم

اصولاً مطالعه خواص بتن به منظور طرح مخلوط آن می‌باشد. خواص لازم برای بتن سخت شده توسط طراحان سازه مشخص می‌گردد، ولی خواص بتن تازه تابع نوع عضو، نحوه حمل و انتقال بتن و روش بتن‌ریزی می‌باشد. این دو گروه از الزامات با در نظر گرفتن درجه کنترلی که در کارگاه اعمال خواهد شد، مهندس کارگاه را قادر به تعیین ترکیب مخلوط بتن می‌نماید. بنابراین می‌توان طرح اختلاط بتن را به عنوان عمل انتخاب مواد متشکله مناسب و تعیین مقادیر نسبی آن‌ها دانست. با این هدف که بتن تولید شده، اقتصادی بوده و دارای حداقل خواص لازم، به خصوص کارایی، مقاومت و دوام باشد تعریف نمود.

تمامی مقادیر وزنی به کیلوگرم می‌باشد. نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. درصد‌های یاد شده نسبت وزنی ماده مذکور به سیمان شاهد می‌باشد. نانو سیلیس و نانو مس به صورت وزنی جایگزین سیمان شده و درصد مذکور نسبت وزنی نانو سیلیس و نانو مس به سیمان شاهد می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۱؛ طرح اختلاط‌ها

شماره طرح	نام طرح	سیمان	میکروسیلیس و متاکائولن	نانو سیلیس %	نانو مس %	شن	ماسه	فوق روان کننده	آب
۱	Ctrl	۴۰۵	۲۵	۰	۰	۹۱۰	۹۷۰	۰/۸	۱۸۰
۲	SNS1	۴۰۰	۲۵	۱	۰	۹۱۰	۹۷۰	۱/۱	۱۸۰
۳	SNS2	۳۹۶	۲۵	۲	۰	۹۱۰	۹۷۰	۱/۵	۱۸۰
۴	SNS3	۳۹۱	۲۵	۳	۰	۹۱۰	۹۷۰	۱/۷	۱۸۰
۵	SCNC1	۴۰۰	۲۵	۰	۱	۹۱۰	۹۷۰	۱	۱۸۰
۶	SCNC2	۳۹۶	۲۵	۰	۲	۹۱۰	۹۷۰	۱/۲	۱۸۰
۷	SCNC3	۳۹۱	۲۵	۰	۳	۹۱۰	۹۷۰	۱/۴	۱۸۰

از آنجایی که یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهم در سنجش کیفیت بتن، کارایی و قابلیت کار با آن می‌باشد، لذا سعی بر آن شد تا ابتدا، کارایی بتن مورد ارزیابی قرار گیرد به طوری که از حداقل کیفیت مورد نظر به جهت دارا بودن قابلیت‌های خود تراکمی اطمینان حاصل گردد. از آنجایی که عمده تفاوت فیزیکی و مکانیکی بتن خود تراکم با بتن نرمال، تفاوت در کارایی و سهولت حمل و قالب‌ریزی آن می‌باشد، لذا کنترل کارایی آن امری ضروری به نظر می‌رسد.

خواص تازه بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس توسط آزمایش‌های فوق‌الذکر، مطالعه شده و در جدول (۲) بطور خلاصه ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود جریان اسلامپ برای مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس mm ۶۹۵-۷۲۰ و برای مخلوط‌های حاوی نانومس mm ۶۸۰-۷۱۵ بوده است، که این نتیجه در راستای مطالعات انجام شده می‌باشد که دلالت بر کاهش جریان اسلامپ در حضور میکروسیلیس دارد.

مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس می‌توانند ناپایداری را توسط افزایش چسبندگی کنترل کنند اما باعث کاهش سیالیت مخلوط

نیز می‌گردند.



جدول ۲؛ نتایج آزمایشات حالت تازه برای بتن‌های خودتراکم

MIX CODE	جریان اسلامپ (mm)	T <sub>50</sub> (Sec)	قیف V (Sec)	نسبت انسداد	VSI
Ctrl	740	2/44	9/58	0/92	1
SNS1	720	2/64	10/16	0/89	1
SNS2	700	2/88	10/72	0/8	1
SNS3	695	3/07	13/4	0/7	0
SNC1	715	3	9/84	0/91	0
SNC2	700	3/46	11/68	0/84	1
SNC3	680	4/41	15/4	0/68	0

شاخص پایداری چشمی<sup>۲</sup> در آزمایش جریان اسلامپ به عنوان ساده‌ترین روش شناخت پایداری استفاده می‌شود. بر اساس این شاخص خود تراکمی بتن به چهار گروه بین ۰ (پایداری بالا) تا ۳ (ناپایداری زیاد) دسته‌بندی می‌شود. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، تمامی طرح‌های ساخته شده بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس دارای شاخص پایداری چشمی ۰ و ۱ هستند. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، تمامی طرح‌های ساخته شده بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس دارای شاخص پایداری چشمی ۰ و ۱ هستند.

جدول ۳؛ استانداردهای جریان اسلامپ، ویسکوزیته و قابلیت عبور EFNARC

Class					
Slump flow classes		Viscosity classes		Passing ability classes	
SF1	550-650		T <sub>50</sub> (S)	V-funnel time(s)	PA1 ≥ 0.8 with two rebar
SF2	660-750	VSI/VF1	≤ 2	≤ 8	PA2 ≥ 0.8 with three rebar

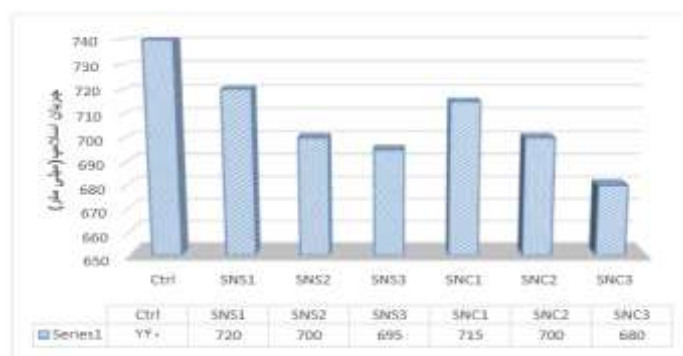
بر اساس آنچه از نتایج آزمایش جعبه L در جدول (۲) مشاهده می‌شود، نسبت انسداد جعبه L بتن خودتراکم حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس در محدوده ۰/۶۸-۰/۹۲ متغییر است. علاوه بر اینکه مقادیر حاصله میزان توصیه شده در EFNARC را ارضا می‌کند (جدول ۳)، همچنین مشاهدات عینی حاکی از عدم تمایل به انسداد بین میلگردها بوده است. هر چند که Felekoglu و همکاران گزارش کرده‌اند که نسبت انسداد بالاتر از ۰/۶ برای رسیدن به قابلیت مناسب پرکنندگی در SCC پذیرفتنی است [۶]. نتایج آزمایش جریان اسلامپ به تفکیک استفاده میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس در نمودار (۱) ارائه شده است.

### ۳-۲- نتایج آزمایش جریان اسلامپ

همانطور که در نمودار (۱) مشخص است جریان اسلامپ نسبت به طرح مرجع با افزایش نانو به جای سیمان کاهش می‌یابد و البته این کاهش جریان اسلامپ در نانومس بیشتر از نانوسیلیس می‌باشد. در کل با گذشت زمان مخلوط شدن، افت جریان اسلامپ اتفاق می‌افتد

<sup>۲</sup> VSI

که از جمله دلایل آن می‌توان به جذب آب آزاد مخلوط بتن توسط واکنش‌های هیدراتاسیون، توسط سطح محصولات هیدراته سیمان و نیز توسط تبخیر اشاره داشت.



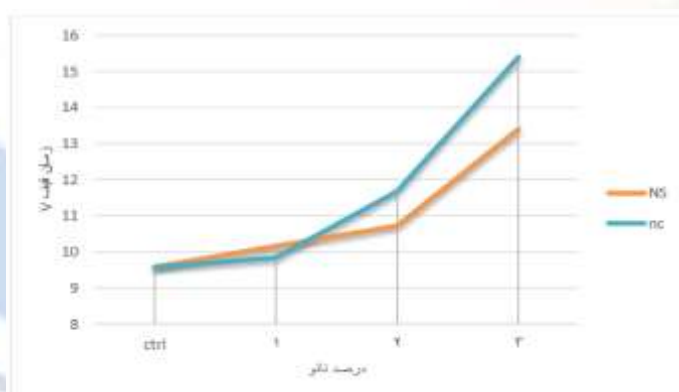
نمودار ۱؛ آزمایش جریان اسلامپ در درصد‌های متفاوت نانو

این مطلب می‌تواند بصورت افت قابلیت جریان یافتن بتن تازه با گذر زمان تعریف شود. این مسئله یک پدیده طبیعی است که به طبیعت ذاتی بتن بر می‌گردد [۱۲،۹].

برای غلبه بر افت جریان اسلامپ، عموماً دو روش ترمیمی عمده انجام می‌گیرد. یکی از این دو روش شروع کار با یک اسلامپ اولیه بالاتر از نیاز است و روش دیگر افزودن آب اضافی یا فوق روان‌کننده دقیقاً قبل از جابجایی بتن است. در حالت کلی بتن خود تراکم با مقدار جریان اسلامپ کمتر از ۵۰۰ میلیمتر نمی‌تواند به طور کامل از میان آرماتورهای زیاد مقاطع پر فولاد عبور کند. کاهش جریان اسلامپ می‌تواند منجر به سخت‌شدگی غیرمعمول در بتن تازه، کاهش مقاومت و دوام، ایجاد دشواری در پمپ کردن و جای‌گیری بتن گردد [۱۱].

مکانیزم عمل سیمان پرتلند کاهنده شدید آب در ابتدا شامل جذب سطحی و سپس شامل نیروی دافعه الکترواستاتیک می‌شود. در بتن مهمترین پارامتر در اندر کنش سیمان افزودنی میزان جذب سطحی در واحد جرم کلینکر نیست، بلکه میزان جذب سطحی در واحد رویه خمیر سیمان هیدراته است [۱۹].

### ۳-۳- نتایج آزمایش قیف



نمودار ۲؛ تاثیر میزان استفاده از نانوسیلیس و نانو مس بر زمان قیف V

نمودار (۲) نشان می‌دهد که با حضور نانو افزایش زمان عبوری از قیف V شکل نسبت به حالت کنترل افزایش می‌یابد. این می‌تواند به علت افزایش سطح مخصوص مواد نانو بتن باشد. نانوسیلیس دارای خلوص ۹۸ درصد، میانگین اندازه ذرات ۶۰-۷۰ نانومتر، سطح مخصوص ۱۶۰ مترمربع بر گرم و چگالی واقعی ۲/۴ گرم بر سانتی متر مکعب است. نانومس دارای خلوص ۹۹/۹ درصد، میانگین اندازه ذرات ۲۰ نانومتر، سطح مخصوص ۱۳۸ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۹/۸ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد.

به دلیل نیروی دافعه الکترواستاتیک بوجود آمده بین ذرات سیمان، توسط جذب سطحی مولکول‌های پلیکربوکسیلات بر روی ذرات سیمان، سیالیت سیستم بطور قابل ملاحظه‌ای در حضور افزودنی کاهنده شدید آب، افزایش می‌یابد. بنابراین میزان مولکول‌های جذب شده در سطح ذرات سیمان، شدت سیالیت مخلوط را مشخص می‌کند.

همانطور که در نمودار (۲) مشاهده می‌شود با افزایش میزان نانو زمان عبوری از قیف V نیز افزایش می‌یابد هر چند این افزایش زمان در استفاده از نانو سیلیس کمتر بوده است  $L_1$  و همکاران [۱۰] نشان دادند که افزایش هر دوی تنش تسلیم و لزجت ظاهری بتن در زمانی که در شرایط استراحت به سر می‌برد مناسبتر از شرایطی است که بتن در حال چرخش است. به همین دلیل زمانی که احساس می‌شود بتن ساخته شده دارای ویسکوزیته مناسب نیست، زمانی در حدود یک الی دو دقیقه میکسر را خاموش کرده و به بتن استراحت داده شد است.

برای تولید بتنی با کیفیت پایدار، باید یک میکسر مناسب انتخاب شود. بتن‌های خود تراکم نیازمند توجه ویژه‌ای در زمینه مخلوط کردن و روش‌های انتقال بتن می‌باشند. زیرا نسبت آب به مواد سیمانی آن‌ها کمتر است و لذا حساسیت این بتن‌ها بالاتر و بیشتر است [۴]. به دلیل سیالیت بالای این نوع بتن، مخلوط شدن آن باید در میکسری صورت گیرد که حجم بتن ساخته شده از ۸۰٪ حجم میکسر تجاوز نکند. توجه به این مسئله باعث می‌شود که در طی زمان انتقال یا امتداد یافتن زمان مخلوط شدن، بتن از میکسر بیرون نریزد [۱]. در تحقیق حاضر، تمامی طرح‌های اختلاط دارای حجم ۷۵ lit بوده که کمتر از ۸۰٪ کل حجم میکسر می‌باشد.

Felekoglu و همکاران [۹] گزارش کردند که رفتار ویسکوز بتن خود تراکم در سرعت پایین چرخش میکسر مشهود است در حالیکه در سرعت‌های بالاتر چرخش این رفتار سیال گون بتن است که غالب می‌باشد. زمانی که بتن در حال چرخش است، اثر رقیق کردن برشی، شکل‌گیری رفتار ویسکوز بالای بتن در حالت استراحت را می‌شکند.

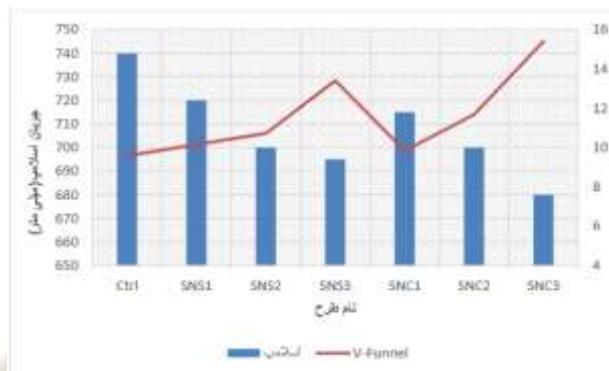
به بیان دیگر، زمانی که جریان توسط برش محلی یا ویریه کردن تسهیل می‌یابد. لزجت ظاهری از طریق افزایش نرخ کرنش، کاهش می‌یابد [۷]. به عبارت دیگر ناپایداری دینامیکی توسط وارد شدن انرژی به سیستم به علت ادامه چرخش می‌تواند به وجود آید و به تبع آن منجر آب افتادگی و جداشدگی در حالت تازه بتن گردد.

نمونه این اتفاق می‌تواند در کامیون‌های حمل و انتقال بتن (تراک میکسر) رخ دهد. لازم به ذکر است که یک بتن با جریان‌پذیری بالا که پایداری کافی در حالت درجا از خود نشان داده است ممکن است هنگام پمپاژ یا پخش در محل بتن ریزی دچار مقداری جدا شدگی گردد. این بدان علت است که لزجت ظاهری در این لحظات به دلیل طبیعت شبه پلاستیک بتن پایین‌تر از زمانی است که بتن در حالت استراحت قرار دارد. مطالعات کمی در این زمینه یعنی اثر طولانی شدن زمان اختلاط بتن بر خواص رئولوژیکی و پایداری انجام گرفته است. بخصوص در مورد بتن‌های خود تراکم [۱۷، ۱۰].

### ۳-۴- بررسی همزمان نتایج جریان اسلامپ و قیف V

در نمودار (۳) به بررسی همزمان نتایج جریان اسلامپ و زمان عبوری از قیف V شکل حاوی نانوسیلیس و نانومس می‌پردازد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌گردد، با توجه به آنکه مقدار جریان اسلامپ  $SNS_2$  و  $SNC_2$  یکسان است اما زمان قیف  $SNC_2$  بیشتر می‌باشد. که این مطلب که جریان اسلامپ به تنهایی برای مشخص کردن ویژگی‌های حالت تازه بتن خود تراکم کافی نمی‌باشد را مورد تایید قرار می‌دهد.

زمان قیف V تمامی مخلوطها بین ۹-۱۵ ثانیه قرار دارد. بر اساس EFNARC زمان قیف V بالاتر از ۲۵ ثانیه توصیه نمی‌گردد. همانطور که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌ها الزامات این استاندارد را ارضا می‌کنند.

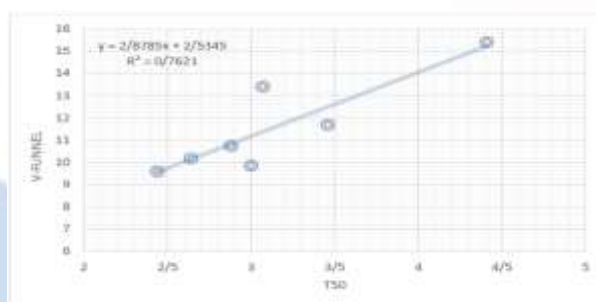


نمودار ۳؛ بررسی همزمان نتایج جریان اسلامپ و قیف V در مخلوط‌های با درصد‌های مختلف نانو

Soo-Duck Hwang و همکارانش عنوان می‌کنند نتایج قیف V نمی‌تواند به خوبی گویای مقادیر قابلیت پرمکنندگی باشد [۲]. این مطلب با یافته‌های سایر محققین نیز مطابقت دارد [۸، ۱۴]. از طرفی قابلیت عبور تعیین شده توسط آزمایش قیف V برای ارزیابی قابلیت جاری شدن بتن خود تراکم در نواحی با محدودیت بالا (المان‌های لاغر و نازک یا مقاطع پرآرماتور) کافی نمی‌باشد. بررسی توام زمان قیف V و جریان اسلامپ می‌تواند در جهت ارزیابی قابلیت پرمکنندگی SCC به کار گرفته شود [۱۶].

### ۳-۵-ارتباط بین زمان قیف V و T<sub>50</sub>

در نمودار (۴) ارتباط بین زمان قیف V شکل و T<sub>50</sub> برای مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس و نانومس نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، افزایش درصد نانو باعث افزایش زمان عبور قیف V شده است. با افزودن نانوسیلیس به علت افزایش سطح مخصوص مخلوط قابلیت تراکمی افزایش یافته و سبب افزایش زمان عبور از قیف V می‌گردد. ارتباط مناسب و البته معنادار بین زمان قیف V و T<sub>50</sub> در سری‌های ساخته شده با نانوسیلیس و نانومس در نمودار (۴) قابل ملاحظه است. همانطور که از رابطه ارائه شده مشخص است، این ارتباط معناداری آن توسط ضریب همبستگی بالای ۰/۷۵ بیان شده است.



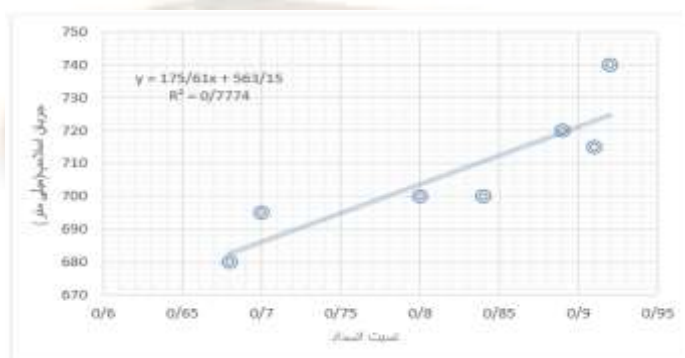
نمودار ۴؛ ارتباط بین زمان قیف V و T<sub>50</sub> در مخلوط‌های با درصد‌های مختلف نانو

همانطور که در نمودار (۴) مشاهده می‌شود، ارتباط خوبی بین T<sub>50</sub> جریان اسلامپ در مقابل زمان قیف V برقرار شده است. Felekoglu و همکارانش [۶] یک ارتباط قابل قبول بین زمان قیف V و T<sub>50</sub> برای SCC حاوی پودر سنگ آهک را گزارش کرده‌اند.



### ۳-۶- بررسی ارتباط بین نسبت انسداد و جریان اسلامپ

در نمودار (۵) به بررسی ارتباط بین جریان اسلامپ و نسبت انسداد برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانومس پرداخته شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود بین جریان اسلامپ و نسبت انسداد رابطه بسیار خوبی وجود دارد که با نشان دادن ضریب همبستگی  $0.77$  می‌توان آن را قابل قبول دانست. براساس این تحقیق ظرفیت کششی بالاتر از  $80\%$  برای کاربردهای سازهای SCC مناسب است در حالی که جریان پذیری بالایی و پایداری داشته و هیچ نشانی از انسداد در آن دیده نمی‌شود. استفاده توامان آزمایش جعبه L و جریان اسلامپ تغییر شکل پذیری SCC را در نواحی محدود به خوبی ارزیابی می‌کند. بدین ترتیب در نمودار (۵) به بررسی همزمان جعبه L و جریان اسلامپ در بتن‌های خود تراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس پرداخته شده است و ارتباط فی ما بین توسط روابط خطی ارائه گردیده است.



نمودار ۵: بررسی ارتباط بین نسبت انسداد و جریان اسلامپ در مخلوط‌های حاوی ذرات نانو

Soo-Duck Hwang و همکارانش [۳] با بررسی ارتباط بین مقادیر حاصله از آزمایش جعبه L و جریان اسلامپ، که از  $70\%$  طرح SCC بدست آمده است، پارامتری با عنوان ظرفیت پرکنندگی را معرفی می‌کنند. آن‌ها ظرفیت پرکنندگی را مرتبط به قابلیت پرکنندگی (حاصله از آزمایش جعبه L) و قابلیت عبور (حاصله از آزمایش جریان اسلامپ) دانسته‌اند. Khatay و همکارانش [۸] توسط روش‌های رگرسیون چندگانه، برای تخمین ظرفیت پرکنندگی براساس نتایج آزمایش قیف V و جریان اسلامپ، فرمول‌هایی ارائه داده‌اند. یکی از دلایل انتخاب حداکثر اندازه سنگدانه  $12/5\text{ mm}$  برای این تحقیق، جلوگیری از رخداد انسداد در آزمایش جعبه L بوده است. زیرا فاصله ما بین میلگردهای با قطر  $14\text{ mm}$  دستگاہ جعبه L،  $40\text{ mm}$  بوده و در صورت افزایش حداکثر اندازه سنگدانه، احتمال انسداد سنگدانه پشت آرماتورها نیز افزایش می‌یافت.

### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

رئولوژی بتن، ملات و خمیر همگی ابزارهای ارزشمندی در درک رفتار و پروسه بهینه‌سازی تلقی می‌گردند. همان دیگر مواد معلق، برقراری تعادل بین خواص رئولوژی و جدایی در ارزیابی رئولوژی خروجی است. شکل و هندسه سطح پرکننده‌ها و واکنش‌پذیری آن‌ها و نسبت آب به مواد پودری از فاکتورهای مهمی هستند که رئولوژی خمیر را شامل می‌شود. میزان آب زیاد در بتن، غشاء نازکی در اطراف ذرات به وجود می‌آورد و تاثیر سطح پرکننده‌ها، که مهمترین فاکتور در رئولوژی بتن است را کاهش می‌دهد و این مشخص می‌کند که ضخامت غشاء آب، پارامتری بسیار مهم در رفتار رئولوژی بتن می‌باشد.

براساس نتایج حاصله برای، تمام طرح‌های ساخته شده در این پروژه، جریان اسلامپ نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. با استفاده از نانومس این کاهش اسلامپ بسیار بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. همچنین با توجه به کاهش اسلامپ مقدار زمان  $T_5$  با افزودن نانومواد شاهد افزایش آن بودیم که با افزودن نانومس، این افزایش زمان بیشتر از طرح‌های حاوی نانو سیلیس می‌باشد. در تمام طرح‌های بتن خودتراکم ساخته شده در این تحقیق زمان قیف عبوری با افزودن نانو مواد افزایش می‌یابد که این افزایش در نمونه‌های حاوی نانو مس بسیار واضح‌تر می‌باشد. هرچند وجود میکروسیلیس و متاکائولن در تمامی نمونه‌های خود موجب افزایش زمان عبوری می‌شود و همچنین نسبت عبوری در L.Box با افزودن نانو مواد کاهش یافته و این کاهش در طرح حاوی ۳٪ نانومس به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به طور کلی استفاده از نانو و افزایش درصد استفاده آن در بتن، موجب کاهش کارایی بتن خودتراکم می‌شود.

## ۵-پیشنهادهات

- ۱) بررسی تأثیر حرارت‌های بالا در بتن حاوی نانوسیلیس و نانومس
- ۲) بررسی ترکیب نانوسیلیس و نانومس و مقایسه تاثیر استفاده همزمان آن‌ها
- ۳) بررسی تأثیر نسبت‌های آب به سیمان متفاوت در بتن خودتراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس
- ۴) بررسی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس با حضور الیاف شیشه

## مراجع و منابع

۱. ACI Committee ۲۳۷, "Self-Consolidating Concrete (ACI ۲۳۷R-۰۷)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, ۲۰۰۷;۲۰.
۲. Aldea, C.M, Shah, S.P., and Karr, A. (۱۹۹۹). "Effect of Microcracking on Durability of High-Strength Concrete," Transportation Research Board, Transportation Research Record No. ۱۶۶۸, pp. ۸۶-۹۰.
۳. Aulia T.B. and Deutschmann K (۱۹۹۹)., "Effect of Mechanical Properties of Aggregate on the Ductility of High Performance Concrete ", Leipzig University, LACER No.۴.
۴. Diawara H, Ghafoori N. Influence of hauling time on fresh properties of selfconsolidating concrete. ACI Mater J ۲۰۱۱;۱۰۸(۳).
۵. Domone .P.L , " self compacting concrete : an analysis of ۱۱ years of case studies" cem & con composite , Vol ۲۸ Issue ۶, pp.۱۹۷-۲۰۸, (۲۰۰۶).
۶. Felekoglu B, Turkel S, Baradan B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Build Environ ۲۰۰۷;۴۲:۱۷۹۵-۸۰۲.
۷. Ghafoori N, Barfield M. Effects of hauling time on air-entrained selfconsolidating concrete. ACI Mater J ۲۰۱۰;۱۰۷:۲۷۵-۸۱.
۸. Khayat, K. H.; Ghezal, A.; and Hadriche, M. S., "Factorial Design Models for Proportioning Self-Consolidating Concrete," *Materials and Structures* ۱۹۹۹;۳۲:۶۷۹-۶۸۶.
۹. Kosmatka, S. H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W. C., *Design and Control of Concrete Mixtures*, fourteenth edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, ۲۰۰۲;۳۵۸.
۱۰. Li Z, Ohkubo T, Tanigawa Y. Theoretical analysis of time-dependence and thixotropy for high fluidity concrete. J Mater Civ Eng ASCE ۲۰۰۴;۱۶(۳):۲۴۷-۵۶.
۱۱. Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M., *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ ۲۰۰۲;۱۸: ۴۵۰-۵۴۸.

۱۲. Neville, A. M., and Brooks, J. J., Concrete Technology, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, ۱۹۸۷; ۴۵۶.
۱۳. Okamura .H, Ozawa K. " Mix design for self compacting concrete " Concrete library of JSCE ۲۵ , pp. ۱۰۷-۱۲۰ (۱۹۹۵).
۱۴. Ozawa, K.; Sakata, N.; and Okamura, H., "Evaluation of Self- Compactibility of Fresh Concrete using the Funnel Test," JSCE Concrete Library, ۱۹۹۵; ۲۵:۵۹-۷۵.
۱۵. Professor A. Skarendhal, Orjan- Peterson " State of the art report of RILEM Technical committee ۱۷۴. RILEM Report No ۲۳, (۲۰۰۰).
۱۶. Soo-Duck Hwang, Kamal H. Khayat, and Olivier Bonneau, " Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications" . ACI Materials Journal, V. ۱۰۳, No. ۲, March-April ۲۰۰۶.
۱۷. Struble LJ, Chen CT. Effect of continuous agitation on concrete rheology. J ASTM Int ۲۰۰۵; ۲(۹):۱-۱۹.
۱۸. Tarun R. N, Rakesh K, Bruce W. R, Fethullah C "Development of high-strength, economical self-consolidating concrete" Construction and Building Materials ۲۰ pp. ۴۶۳-۴۶۹ (۲۰۱۲).
۱۹. Yamada, K., and Hanehara, S., "Working Mechanism of Polycarboxylate Superplasticizer Considering the Chemical Structure and Cement Characteristics,"

