



## تاثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر روانی و مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن

امیرحسین ابنا، موسی مظلوم\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

### کلمات کلیدی:

میکروسیلیس  
الیاف پلی پروپیلن  
نانوسیلیس  
مقاومت فشاری  
بتن خودتراکم

**خلاصه:** با توجه به گسترش بتن خودتراکم و لزوم کاهش عیار سیمان و افزایش مقاومت بتن، در این مطالعه اثر میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن بر بتن خودتراکم بررسی شد. در واقع میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن به صورت تکی، دوتایی و ترکیب سه تایی در طرح مخلوط بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ۲۳ طرح مخلوط ساخته شد. در راستای بررسی خواص خودتراکمی بتن آزمایش‌های حلقه J، قیف V، جریان اسلامپ و T<sub>50</sub> انجام شد. همچنین آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی بتن سخت شده در سن ۲۸ روزه بررسی گردید. نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که میکروسیلیس و نانوسیلیس علاوه بر کاهش کارایی بتن خودتراکم، مقاومت فشاری، کششی و خمشی آن را افزایش می‌دهند. الیاف پلی پروپیلن مشخصات مکانیکی بتن، به خصوص مقاومت کششی و خمشی آن، را افزایش داد. همچنین با افزودن همزمان میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم بهبود مضاعف یافت. بهترین طرح با بیشترین مقاومت فشاری، نمونه دارای ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱/۵ درصد الیاف بود. مقاومت فشاری این طرح نسبت به نمونه شاهد ۴۰ درصد افزایش یافت. همچنین طرح بهینه در مقاومت کششی و خمشی دارای ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف بود. مقاومت کششی و خمشی این طرح نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۶ و ۲۸ درصد افزایش داشت. به دلیل روان تر بودن این طرح مخلوط نسبت به طرح دارای ۱/۵ درصد الیاف، کار کردن با آن آسان تر بود. کاهش مقاومت فشاری آن هم نسبت به طرح دارای ۱/۵ درصد الیاف کمتر از ۳ درصد بود. بنابراین بهترین طرح مخلوط این تحقیق شامل ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن بود.

### ۱- مقدمه

به دلایل مختلف، بخش قابل توجهی از بتن همواره ترک می‌خورد. دلیل ترک خوردگی می‌تواند سازه‌ای یا غیرسازه‌ای باشد. لیکن عمده ترک‌ها ناشی از ضعف ذاتی این ماده در کشش هستند. برای مثال، جمع شدگی در بتن دارای قید، ترک ایجاد می‌کند [۶]. بیشتر وزن بتن را مصالح درشت‌دانه و ریزدانه آن تشکیل می‌دهد، و معمولاً حدود ۶۰ درصد از حجم بتن خودتراکم<sup>۱</sup> (SCC) را شامل می‌شود [۷-۹]. حجم زیاد سیمان مصرفی در بتن خودتراکم، هم از نظر اقتصادی و هم از نظر مسائل زیست محیطی مناسب نمی‌باشد [۱۰]. علاوه بر آن عیار زیاد سیمان، دمای هیدراتاسیون را بیش از حد بالا می‌برد، و بتن ترک می‌خورد [۱۱]. به منظور کاهش اثرهای زیست‌محیطی و کاهش عیار سیمان، از پوزولان به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان استفاده می‌شود. استفاده از پوزولان، مقاومت فشاری و کششی بتن

بتن به عنوان پرکاربردترین و مهم‌ترین مصالح ساختمانی در ساخت و ساز استفاده می‌شود [۱]. به دلیل پیشرفت علم و تکنولوژی ساخت، سیستم‌های جدید سازه‌ای و همچنین گسترش ساخت و ساز، نیاز به مصالح ساختمانی جدید و با کارایی بیشتر، بسیار محسوس می‌باشد [۲]. یکی از پیشرفت‌های دو دهه اخیر در زمینه ساخت بتن، بتن خود تراکم می‌باشد [۴] و [۳]. بتن خود تراکم به نحوی تعریف شده است که احتیاج به هیچ نوع ویبره داخلی و خارجی نداشته باشد، و توسط وزن خود متراکم شود. زمانی که این بتن در داخل قالب جاری می‌شود، به طور کامل هواگیری می‌گردد و فقط با استفاده از نیروی جاذبه، قالب را پر نموده، آرماتورهای موجود را پوشانده و همزمان یکنواختی خود را نیز حفظ می‌نماید [۵].



و خمشی بتن بازی نمی‌کنند. الیاف ماکرو به دلیل دارا بودن خصوصیات مکانیکی مناسب، علاوه بر کنترل ماکرو ترک‌ها، موجب تسلیح و ارتقای خصوصیت‌های مکانیکی بتن نیز می‌شوند [۲۳]. عملکرد الیاف در هنگام ترک خوردگی بتن به عوامل متعددی وابسته می‌باشد. از جمله‌ی این عوامل جنس الیاف، طول و سطح مقطع آن‌ها، جهت قرارگیری الیاف، و چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی هستند. در واقع به کمک روش‌ها و آزمون‌های مختلفی، اثر این عوامل مورد ارزیابی قرار گرفته شده است [۲۳]. این طرح بر اساس استاندارد ۱-۱۹۷ EFNARC [۲۴] از نوع خودتراکم می‌باشد. با توجه به کاربرد فراوان بتن خودتراکم در ساخت و ساز، علاوه بر سبک سازی ساختمان، کاهش عیار سیمان و افزایش مقاومت بتن مورد نظر محققان است. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن بر خواص بتن تازه و مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم الیافی است. نوآوری این تحقیق بررسی اثر میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن به صورت جداگانه و ترکیبی، بر مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم می‌باشد و در نهایت بهترین طرح مخلوط با بالاترین مقدار پارامترهای مقاومتی ارائه شده است.

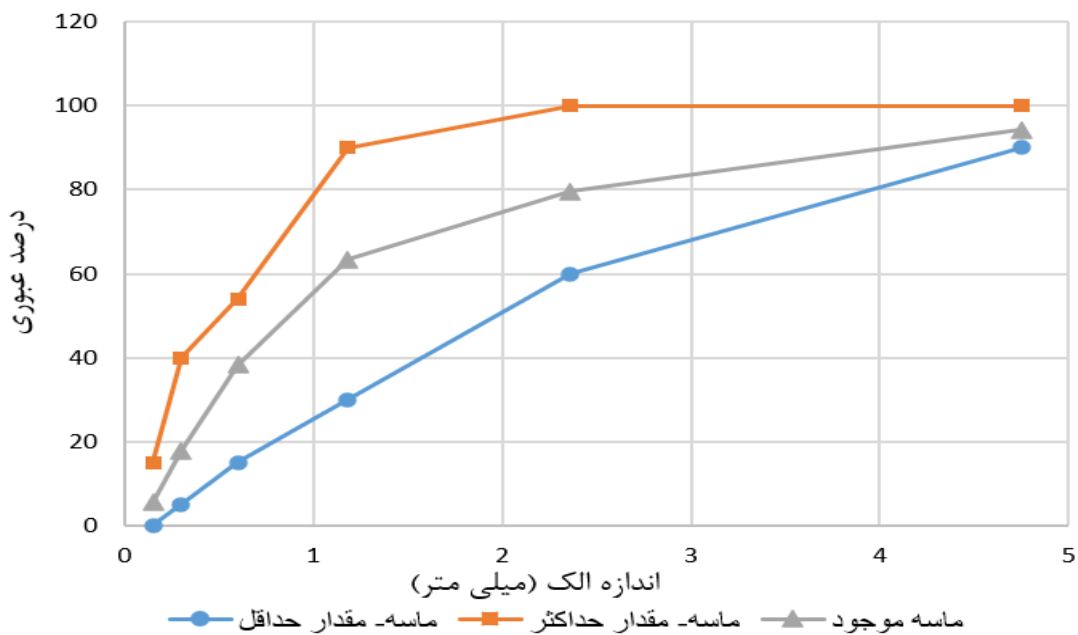
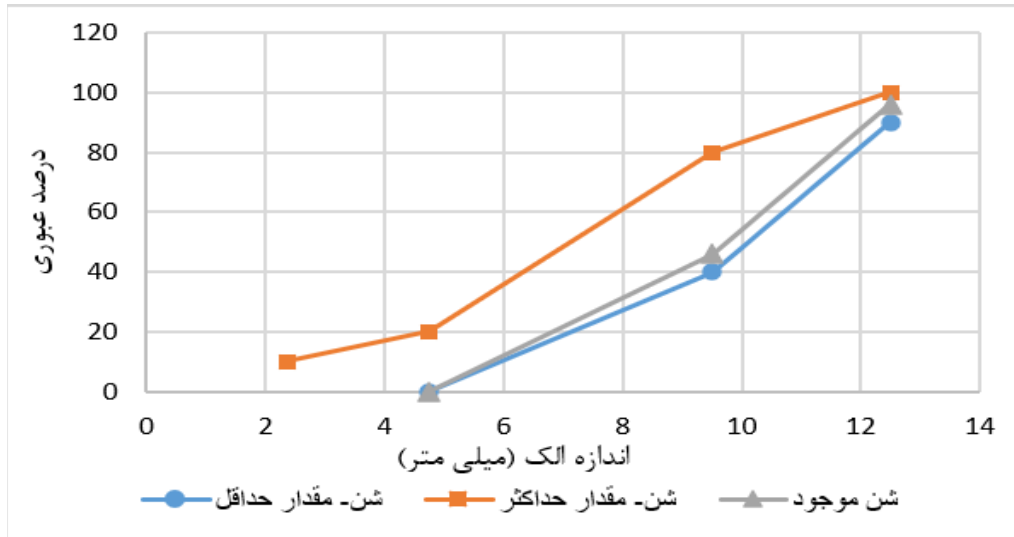
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

در این تحقیق، از سیمان تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان تهران با وزن مخصوص ۳/۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نرمی بلین ۳۲۹۰ سانتی‌متر مربع بر گرم استفاده شده است. همچنین مشخصات شیمیایی سیمان در جدول ۱ آمده است. میکروسیلیس مصرفی از کارخانه فروسیلیس شهریار و با وزن مخصوص ۲/۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است، و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. پودر سنگ مصرفی با چگالی ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب محصول کارخانه قم می‌باشد و مشخصات شیمیایی و دانه‌بندی آن به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. درشت‌دانه مصرفی دارای حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر و وزن مخصوص خشک ۲/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و دانه‌بندی آن طبق ASTM C33 [۲۵] می‌باشد. از ماسه رودخانه‌ای دارای چگالی ۲/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است. همچنین نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل ۱ مشخص شده است.

را بهبود می‌بخشد [۱۲]. در تحقیقات اخیر رابطه‌ی بین کارایی و استحکام بتن مطالعه شده است [۱۳]. در این بررسی‌ها از میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان و از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده شده است. در واقع آن‌ها اشاره می‌کنند که میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری بتن SCC شده است. در مطالعه‌ی مظلوم و همکاران، اثر میکروسیلیس بر بتن سبک خودتراکم بررسی شده است [۱۴]. در نهایت آن‌ها اعلام کردند که میکروسیلیس دوام و خواص مکانیکی این بتن را افزایش داده است [۱۵-۱۷].

ضعف اساسی بتن در کشش را در عمل با مسلح کردن آن با آرماتورهای فولادی برطرف می‌کنند. شایان ذکر است که در موارد متعددی، جهت نیروهای کششی به طور دقیق معلوم نیست. همچنین با عنایت به اینکه آرماتور، بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع هموزن و ایزوتروپ باشد، صحیح نخواهد بود [۱۸]. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن، استفاده از الیاف نازک و نسبتاً طویل، متداول شده است [۱۹]. الیاف جهت کنترل ترک در اثر تغییرات حجمی ناشی از انقباض، انبساط و تنش‌های حرارتی و نیز جهت افزایش مقاومت کششی، قابلیت جذب انرژی و فراهم‌آوری یک سیستم یکپارچه استفاده می‌شوند. امروزه صدها نوع الیاف تولید می‌شوند که فقط تعدادی از آن‌ها برای استفاده در بتن مناسب می‌باشند [۲۰]. از آنجا که امروزه از مصالح بتنی به وفور استفاده می‌گردد، حتی پیشرفت و بهبود اندکی در خصوصیات آن، تأثیر قابل توجهی و چشمگیری در فن‌آوری دارد، و مزایای اقتصادی نیز به همراه می‌آورد. در این راستا، مصالح مدرن مانند بتن مسلح الیافی می‌تواند نقش مهمی ایفا کند [۲۱]. موضوع استفاده از الیاف تقویت کننده برای غلبه بر تردی، افزایش مقاومت، شکل‌پذیری و دوام، در پروژه‌های تحقیقاتی بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۲]. الیاف در بتن به صورت تصادفی و در جهت‌های مختلف توزیع می‌گردند؛ از این رو می‌توانند با ایجاد پل بین دو لبه‌ی ترک، در نواحی و جهت‌های مختلف مانع از ایجاد و رشد ترک شوند [۲۳]. ترک‌های بتن از نظر اندازه در دو مقیاس میکرو و ماکرو طبقه‌بندی می‌شوند. گسترش و به هم پیوستن ترک‌های میکرو، ترک‌های ماکرو را شکل می‌دهند. از این رو بهتر است الیاف نیز در دو مقیاس مختلف در بتن مورد استفاده قرار گیرند. الیاف میکرو نقش کنترل ترک را بر عهده دارند، و به دلیل خصوصیات مکانیکی پایین نسبت به الیاف ماکرو، نقش تعیین کننده‌ای را در بهبود خصوصیات کششی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شن (سمت چپ) و ماسه (راست) [۲۵]

Fig. 1 Gradation curve of Gravel (Top) and sand (Bottom)

است، و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین در این بتن از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر استفاده شده است. مشخصات فیزیکی آن در جدول ۶ دیده می‌شود.

نانوسیلیس مصرفی از شرکت فناوری‌های نوین فدک اصفهان تهیه شده است، و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۴ ارائه شده‌اند. الیاف مورد استفاده، از نوع پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلی‌متر

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس [۲۶ و ۱۷]

Table 1. Chemical properties of cement and microsilica

ترکیب	سیمان (درصد)	میکروسیلیس (درصد)	نانوسیلیس (درصد)
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۳۰	۹۶/۴	۹۸/۶
CaO	۶۳/۴۸	۰/۴۹	۰/۳۹۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۱۳	۱/۳۲	۰/۰۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۴۷	۰/۸۷	۰/۲۹۴
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۳۲۸
MgO	۲/۵۱	۰/۹۷	۰/۰۵
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	۰/۱۶	۰/۰۲۹
SO <sub>3</sub>	۱/۶۷	۰/۱۰	۰/۱۸۵
K <sub>2</sub> O	۰/۵۶	۱/۰۱	۰/۰۸
SiC	-	۰/۵	-
C	-	۰/۳	-
CL	-	۰/۰۴	۰/۰۴۴
H <sub>2</sub> O	-	۰/۰۸	-
CuO	-	-	۰/۰۲۰
ZnO	-	-	۰/۰۲۱
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	۰/۰۲۹
TiO <sub>2</sub>	-	-	۰/۰۶۴

جدول ۲. مشخصات شیمیایی پودر سنگ آهک [۲۴ و ۱۶]

Table 2. Chemical properties of limestone powder

ترکیب	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
درصد	۵۵/۰۷	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۳۴	۰/۱۱

جدول ۳. دانه‌بندی پودر سنگ [۲۴ و ۱۶]

Table 3. Stone powder granulation

اندازه الک (میکرومتر)	درصد عبوری
۲۳۶۰	۱۰۰
۱۱۸۰	۹۵
۶۰۰	۸۰
۳۰۰	۶۱
۱۵۰	۴۰

جدول ۴. مشخصات فنی نانوسیلیس [۱۶]

Table 4. Technical specifications of nanosilica

مشخصات	میزان
رنگ	آبی تا شیری رنگ
مقدار	۳۵٪
چگالی	۱/۴ g/cm <sup>3</sup>
PH	۹-۱۰/۵
اندازه ذرات (میکرومتر)	۱۰-۳۰

جدول ۵. مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلن [۲۷ و ۲۲]

Table 5. Physical properties of polypropylene fibers

خصوصیت	چگالی حجمی (kg/m <sup>3</sup> )	قطر (μm)	طول (mm)	نقطه ی ذوب (°C)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
الیاف پلی پروپیلن	۹۱۰	۲۳	۱۲	۱۶۵	۲/۷	۴۰۰

جدول ۶. مشخصات فوق روان کننده ی ADMIX SR<sup>۳۴۰</sup>P [۲۸ و ۱۳]

Table 6. Specifications of ADMIX SR340P superplasticizer

شکل ظاهری	مایع قهوه‌ای روشن
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۱/۱-۱/۰۸
یون کلر	کمتر از ۰/۱ درصد
pH	۵-۶
درجه اشتعال	غیرآتش زا
درجه انجماد	+۲

## ۲-۲- طرح مخلوط و ساخت نمونه‌ها

شدند. همچنین برای آزمایش مقاومت الکتریکی و جذب آب در هر طرح مخلوط، ۱ نمونه ساخته شد. با توجه به اینکه بخش زیادی از مقاومت بتن تا سن ۲۸ روزه کسب می‌شود، و همچنین به منظور بررسی دقیق پارامترهای ذکر شده در شرایط ثابت، تمامی آزمایش‌ها در سن ۲۸ روزه انجام شدند. در واقع، در مجموع ۳۲۲ نمونه بتنی ساخته شدند.

به منظور بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن، نانوسیلیس و میکروسیلیس بر خصوصیت‌های مقاومتی و پارامترهای شکست بتن خودتراکم الیافی، ۲۳ طرح مخلوط مختلف بتن ساخته شدند. برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی و مدول الاستیسیته برای هر طرح ۳ نمونه تهیه

جدول ۷. طرح مخلوط نمونه‌های بتن خودتراکم

Table 7. Mix design of self-compacting concrete samples

شمار	نام نمونه	شن (kg)	ماسه (kg)	پودر (kg)	سیما (kg)	آب (kg)	نانوسیلیس (kg %)	میکروسیلیس (kg %)	الیاف PP (kg %)	روان کننده (kg)
۱	MIX0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۵۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۱۳/۵
۲	M0N1P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۴۵/۵	۱۸۰	۱	۴/۵	۰	۱۳/۵
۳	M0N2P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۴۱	۱۸۰	۲	۹	۰	۱۳/۵
۴	M0N3P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۳۶/۵	۱۸۰	۳	۱/۵	۰	۱۳/۵
۵	M0N4P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۳۲	۱۸۰	۴	۱۸	۰	۱۳/۵
۶	M4N0P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۳۲	۱۸۰	۰	۴	۱۸	۰
۷	M8N0P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۱۴	۱۸۰	۰	۸	۳۶	۰
۸	M10N0P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۰۵	۱۸۰	۰	۱۰	۴۵	۰
۹	M12N0P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۳۹۶	۱۸۰	۰	۱۲	۵۴	۰
۱۰	M16N0P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۳۷۸	۱۸۰	۰	۱۶	۷۲	۰
۱۱	M5N0.5P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۲۵/۳	۱۸۰	۰/۵	۵	۲۲/۵	۰
۱۲	M5N0.75P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۲۴/۱	۱۸۰	۱/۷۵	۵	۲۲/۵	۰
۱۳	M5N1P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۲۳	۱۸۰	۱	۴/۵	۰	۰
۱۴	M5N1.5P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۱۸/۵	۱۸۰	۲	۹	۰	۰
۱۵	M0N2P0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۴۱	۱۸۰	۲	۹	۰	۴/۵۵
۱۶	M0N2P0.1	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۴۱	۱۸۰	۲	۹	۰	۹/۱
۱۷	M0N2P0.15	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۴۱	۱۸۰	۲	۹	۰	۱/۶۵
۱۸	M10N0P0.05	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۰۵	۱۸۰	۰	۱۰	۴۵	۰/۵
۱۹	M10N0P0.1	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۰۵	۱۸۰	۰	۱۰	۴۵	۹/۱
۲۰	M10N0P0.15	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۰۵	۱۸۰	۰	۱۰	۴۵	۱/۶۵
۲۱	M5N0.75P0.0	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۲۴/۱	۱۸۰	۱/۷۵	۵	۲۲/۵	۴/۵۵
۲۲	M5N0.75P0.1	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۲۴/۱	۱۸۰	۱/۷۵	۵	۲۲/۵	۹/۱
۲۳	M5N0.75P0.1	۳۴۰	۱۰۸	۲۷۲	۴۲۴/۱	۱۸۰	۱/۷۵	۵	۲۲/۵	۱/۶۵

درصد میکروسیلیس، مقاومت و خواص خودتراکمی بهتری داشت. بنابراین طرح‌های ۱۱ تا ۱۵ الیاف نداشتند، و حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به همراه ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نانوسیلیس بودند. میزان بهینه نانوسیلیس در طرح‌های تکی ۲ درصد بود. به این دلیل طرح‌های ۱۶ تا ۱۸ دارای ۲ درصد نانوسیلیس به همراه ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن بودند. به همین ترتیب در طرح‌های حاوی میکروسیلیس، نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس بهینه بود. پس طرح‌های ۱۹ تا ۲۱ دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس همراه با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن بودند. به منظور بررسی تاثیر ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن، نمونه شامل ۵ درصد میکروسیلیس و ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس به همراه ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن در طرح‌های ۲۲ تا ۲۴ دیده می‌شوند. جزئیات این طرح مخلوطها در جدول ۷ قابل مشاهده است.

برای رسیدن به حالت خودتراکمی از توصیه‌های آیین‌نامه ACI 237R [۲۹] استفاده شده است. به منظور بررسی اثر الیاف پلی پروپیلن بر بتن خودتراکم حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس طرح‌هایی به شرح زیر ارائه گردید. طرح شماره ۱ به عنوان نمونه شاهد که بدون میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف می‌باشد. طرح‌های ۲ تا ۵ نیز فاقد الیاف و میکروسیلیس بوده، به ترتیب ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد نانوسیلیس داشتند. طرح‌های ۶ تا ۱۰ نانوسیلیس و الیاف نداشتند، و به ترتیب دارای ۴، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۶ درصد میکروسیلیس بودند. برای بررسی تاثیر الیاف، میکروسیلیس و نانوسیلیس در این بتن، میزان فوق روان کننده ثابت و برابر ۳ درصد وزن مصالح سیمانی بود. همچنین برای ساختن نمونه‌های ترکیبی، با توجه به اینکه خواص میکروسیلیس و نانوسیلیس تا حدودی مشابه بودند، از ۰/۵ درصد نانوسیلیس به همراه ۵ و ۸ درصد میکروسیلیس استفاده شد. نمونه دارای ۵



شکل ۲. نمونه تحت آزمایش اسلاپ

Fig. 2. Picture of slump test

بدون انسداد طراحی شده است. این زمان باید در محدوده تعیین شده EF NARC 197-1 [۲۴] باشد. بلافاصله بعد از انجام آزمایش‌های بتن تازه، و جهت بررسی خواص مکانیکی، بتن‌ها در قالب ریخته شدند، و نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از آن، تا زمان انجام آزمایش در دمای آزمایشگاه تحت عمل‌آوری مرطوب در حوضچه‌ی آب قرار گرفتند. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متری با نرخ بارگذاری برابر  $0.3$  مگاپاسکال بر ثانیه مطابق با BS: part 116, 1881 [۳۰] انجام گرفت. آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر با نرخ بارگذاری  $0.2$  مگاپاسکال بر ثانیه طبق BS: part 116, 1881 [۳۰] انجام شد.

برای تعیین مقاومت خمشی ۴ نقطه‌ای دستگاه مورد استفاده، دستگاه یونیورسال (zwick roell) ساخت کشور آلمان می‌باشد. این آزمون بر روی نمونه‌های به ابعاد  $10 \times 10 \times 35$  سانتی‌متر مکعب منطبق بر استاندارد ASTM C1609 [۳۱] صورت گرفته است. همچنین سرعت بارگذاری به روش کنترل تغییر مکان به میزان  $0.5$  میلی‌متر بر دقیقه بوده است. همچنین کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شده‌اند.

در نام‌گذاری این مخلوط‌ها، نمونه شاهد بدون الیاف، میکروسیلیس و نانوسیلیس با MIX0 نمایش داده شده‌اند. نمونه‌های دارای میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب با M، N و P مشخص شده‌اند.

### ۲-۳- آماده‌سازی و شرح آزمایش نمونه‌ها

در این تحقیق آزمایش حلقه J<sup>۱</sup> به منظور ارزیابی قابلیت عبوری بتن انجام شد. همچنین آزمایش‌های جریان اسلامپ<sup>۲</sup>، T50 و قیف V<sup>۳</sup> مطابق با روند EFNARC 197-1 [۲۴] انجام گرفت. با دستگاه آزمایش جریان اسلامپ زمان رسیدن مخلوط SCC به قطر ۵۰۰ mm که جریان‌پذیری را نشان می‌دهد، و قطر نهایی پخش شدن (Dt) که توانایی پرکنندگی و جریان‌پذیری را می‌سنجد، اندازه‌گیری می‌شود. آزمون حلقه J برای مشخص کردن توانایی عبور بتن از بین آرماتورهای متراکم موجود در قالب می‌باشد. تغییر بیشتر در اختلاف ارتفاع قبل و بعد از میلگردها، نشان دهنده قابلیت عبور کم می‌باشد، که می‌تواند منجر به پدیده انسداد گردد. آزمون قیف V برای ارزیابی مدت زمان نهایی جریان‌پذیری و عبور از مکان‌های محدود

- 1 J-ring test
- 2 Slump flow test
- 3 V-funnel



جدول ۸. نتایج آزمایش‌های بتن تازه بتن خودتراکم

Table 8. Results of fresh concrete tests of self-compacting concrete

شماره طرح	کد نمونه	قیف V (s)	حلقه J (mm)	T50 (s)	جریان اسلامپ (mm)
۱	MIX0	۸/۵	۵/۳	۳/۳	۷۸۰
۲	M0N1P0	۹/۶	۵/۸	۳/۸	۷۶۵
۳	M0N2P0	۱۰/۱	۶/۱	۴	۷۶۰
۴	M0N3P0	۱۱	۶/۶	۴/۲	۷۴۵
۵	M0N4P0	۱۲/۳	۷/۲	۴/۳	۷۳۰
۶	M4N0P0	۸/۹	۷/۹	۳/۹	۷۷۰
۷	M8N0P0	۹/۴	۶/۴	۴/۲	۷۶۰
۸	M10N0P0	۹/۸	۶/۸	۴/۵	۷۵۵
۹	M12N0P0	۱۰/۳	۷/۱	۴/۴	۷۴۵
۱۰	M16N0P0	۱۱/۵	۷/۴	۴/۲	۷۴۰
۱۱	M5N0.5P0	۱۳	۶/۹	۳/۹	۷۶۰
۱۲	M5N0.75P0	۱۴/۵	۷/۲	۴/۳	۷۵۵
۱۳	M5N1P0	۱۶	۷/۵	۴/۶	۷۴۵
۱۴	M5N1.5P0	۱۵	۷/۸	۴/۷	۷۴۰
۱۵	M0N2P0.5	۱۴/۵	۷	۴/۹	۷۵۰
۱۶	M0N2P1	۱۳	۸/۲	۴/۸	۷۲۰
۱۷	M0N2P1.5	۱۳/۵	۸/۵	۵	۶۹۰
۱۸	M10N0P0.5	۱۲/۵	۶/۸	۳/۸	۷۶۰
۱۹	M10N0P1	۱۵/۲	۷/۷	۴/۱	۷۴۰
۲۰	M10N0P1.5	۱۳	۸/۵	۴/۴	۷۱۰
۲۱	M5N0.75P0.5	۱۶/۵	۸/۸	۵/۲	۶۸۰
۲۲	M5N0.75P1	۱۵/۸	۹/۲	۵/۴	۶۴۰
۲۳	M5N0.75P1.5	۱۷/۲	۹/۶	۵/۶	۶۰۰

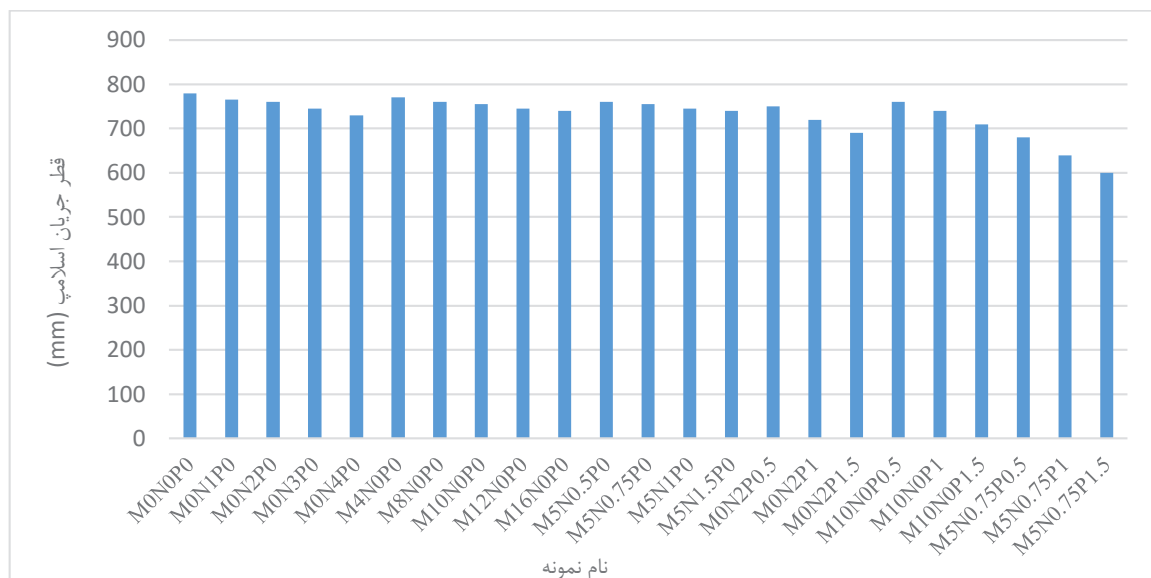
۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

آزمایش‌های بتن تازه شامل آزمایش جریان اسلامپ، حلقه J و قیف V برای بررسی خواص خود تراکمی تمامی نمونه‌ها بود. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۸ ارائه گردیده‌اند. نمونه بتن تحت آزمایش اسلامپ در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین نمودار قطر جریان اسلامپ و T50 به قیف V به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. طبق آیین‌نامه EFNARC 197-1 [۲۴] و با توجه به جدول ۸ و نمودار شکل ۱، قطر نهایی جریان اسلامپ برای تمامی نمونه‌ها در محدوده ۷۸۰-۶۰۰mm قرار داشت. با

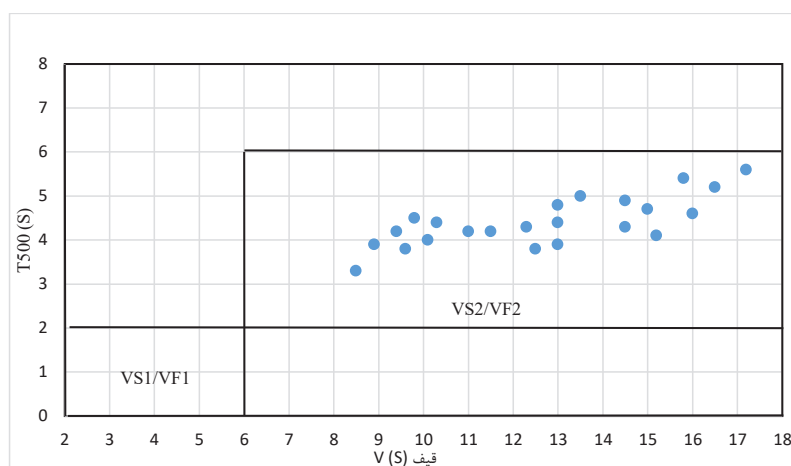
افزودن میکروسیلیس و نانوسیلیس به نمونه‌ها، قطر جریان اسلامپ کاهش یافته است، و می‌توان گفت که میکروسیلیس و نانوسیلیس باعث کاهش کارایی نمونه‌ها می‌شوند. با ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس نیز اثر کاهش کارایی تشدید شد. همچنین با توجه به نمونه‌های ۱۶ تا ۲۱ در جدول ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش الیاف، مدت زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر، که لزجت خمیری بتن تازه را نشان می‌دهد، افزایش می‌یابد. البته زمان مذکور برای تمامی نمونه‌ها در محدوده آیین‌نامه EFNARC 197-1 [۲۴] قرار دارد. آزمون حلقه J بر مبنای اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بتن قبل و بعد از شبکه آرماتورها است. اختلاف ارتفاع حلقه J برای تمامی





شکل ۳. نمودار قطر جریان اسلامپ

Fig. 3. Diagram of slump flow diameter



شکل ۴. نمودار قیف V به T500

Fig. 4. V-Funnel to T500 diagram

نمونه‌ها هم در محدوده آیین‌نامه EFNARC 197-1 [۲۴] قرار دارد. همچنین اختلاف ارتفاع حلقه J با افزایش میکروسیلیس و نانوسیلیس، افزایش یافت، که نشان دهنده کاهش روانی نمونه‌ها بود. البته با افزایش این اختلاف ارتفاع، احتمال انسداد افزایش می‌یابد. آزمون قیف V برای ارزیابی مدت زمان نهایی برای جریان‌پذیری و عبور از مکان‌های محدود بدون انسداد مخلوط‌ها طراحی شده است. زمان جریان قیف V تمامی نمونه‌ها در محدوده آیین‌نامه EFNARC 197-1 [۲۴] قرار دارد. با افزایش میکروسیلیس و نانوسیلیس مدت زمان جریان قیف V افزایش یافته است، و از روانی بتن کاسته شده است. با توجه به شکل ۳، بتن‌ها در محدوده VS2/

قرار گرفته‌اند، و احتمال آب انداختگی و جدایش دانه‌ها در آن‌ها کم می‌باشد. در نهایت با بررسی نتایج آزمایش‌ها، تمامی طرح‌های ساخته شده خواص خودتراکمی مورد قبولی داشته‌اند.

### ۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

آزمایش‌های بتن سخت شده شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه‌ها انجام شد، و نتایج آن در ذیل شرح داده شده است.

جدول ۹. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Table 9. Compressive strength test results

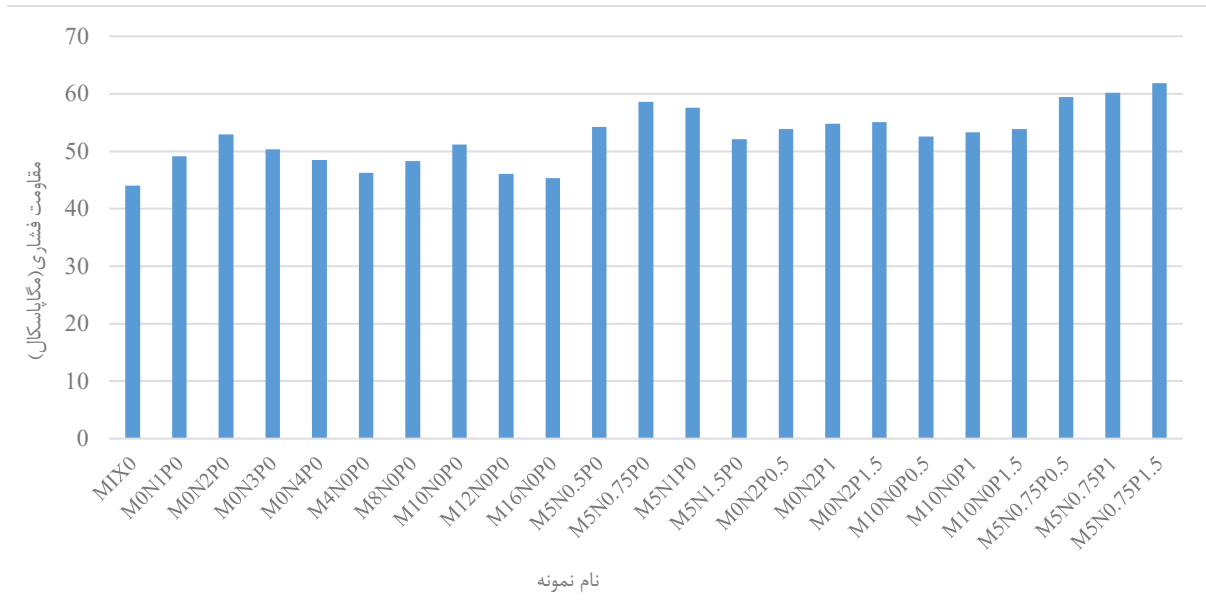
شماره	کد نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	درصد تغییرات مقاومت فشاری	شماره	کد نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	درصد تغییرات مقاومت فشاری
۱	MIX0	۴۴	۰	۱۳	M5N1P0	۵۷/۶	۳۰/۹
۲	M0N1P0	۴۹/۱	۱۱/۶	۱۴	M5N1.5P0	۵۲/۱	۱۸/۴
۳	M0N2P0	۵۲/۹	۲۰/۲	۱۵	M0N2P0.5	۵۳/۹	۲۲/۵
۴	M0N3P0	۵۰/۳	۱۴/۳	۱۶	M0N2P1	۵۴/۸	۲۴/۵
۵	M0N4P0	۴۸/۵	۱۰/۲	۱۷	M0N2P1.5	۵۵/۱	۲۵/۲
۶	M4N0P0	۴۶/۲	۵	۱۸	M10N0P0.5	۵۲/۶	۱۹/۵
۷	M8N0P0	۴۸/۳	۹/۸	۱۹	M10N0P1	۵۳/۳	۲۱/۱
۸	M10N0P0	۵۱/۲	۱۶/۴	۲۰	M10N0P1.5	۵۳/۹	۲۲/۵
۹	M12N0P0	۴۶/۱	۴/۸	۲۱	M5N0.75P0.5	۵۹/۴	۳۵
۱۰	M16N0P0	۴۵/۳۵	۳/۱	۲۲	M5N0.75P1	۶۰/۲	۳۶/۸
۱۱	M5N0.5P0	۵۴/۲	۲۳/۲	۲۳	M5N0.75P1.5	۶۱/۸	۴۰/۵
۱۲	M5N0.75P0	۵۸/۶	۳۳/۲				

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۹ و نمودار شکل ۵ ارائه شده است. همچنین درصد تقویت نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه شاهد در نمودار شکل ۶ مشخص شده است. لازم به ذکر است در شکل ۶ نمونه‌های بتن خودتراکم الیافی دارای میکروسیلیس با (SF-sample)، نمونه‌های دارای نانوسیلیس و الیاف با (NF-sample) و نمونه‌های ترکیبی با (SNF-sample) نشان داده شده‌اند. نمونه MIX0 که میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف نداشت، دارای مقاومت فشاری ۴۴ مگاپاسکال بود. با توجه به جدول ۹، با افزایش مقدار نانوسیلیس در نمونه‌های تکی فاقد الیاف، ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش یافته است. در نمونه‌های تکی حاوی نانوسیلیس، نمونه دارای ۲ درصد نانوسیلیس دارای بیشینه مقاومت فشاری بود و با مقاومت ۵۲/۹ حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در نمونه‌های دارای میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی، ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس مقداری کاهش یافت. در بین نمونه‌های دارای میکروسیلیس، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس دارای بیشینه مقاومت فشاری بود، و با مقاومت ۵۱/۲ مگاپاسکال، حدود ۱۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. همچنین در نمونه‌های دارای نانوسیلیس و

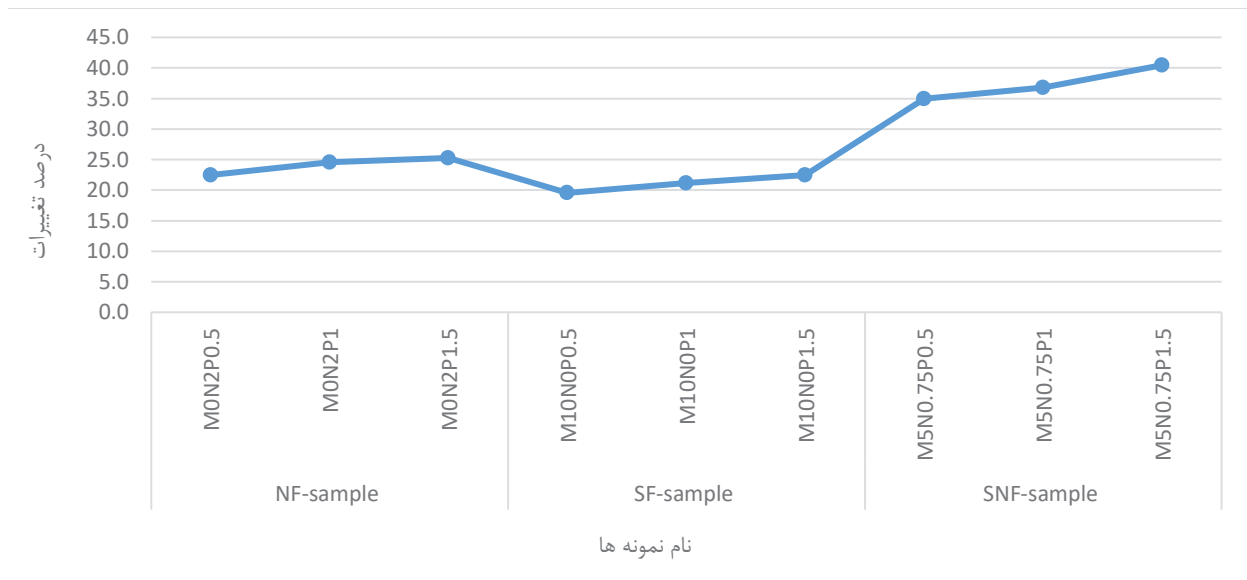
مقادیر متفاوت الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی ۲ درصد نانوسیلیس و ۱/۵ درصد الیاف دارای بیشینه مقاومت فشاری بود، و با مقاومت ۵۵/۱ مگاپاسکال حدود ۲۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. همچنین از بین نمونه‌های فاقد الیاف و دارای ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس، نمونه حاوی ۵ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس بیشینه مقاومت فشاری را داشت. این نمونه با مقاومت ۵۷/۶ مگاپاسکال حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت.

در بین نمونه‌های دارای میکروسیلیس و مقادیر متفاوت الیاف، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱/۵ درصد الیاف دارای بیشینه مقاومت فشاری بود و با مقاومت فشاری ۵۳/۹ مگاپاسکال حدود ۲۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در نمونه‌های ترکیبی شامل میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای بیشینه مقاومت فشاری بود. این نمونه دارای بیشترین مقاومت فشاری در بین کل نمونه‌ها هم بود. در واقع نمونه فوق با مقاومت فشاری، ۶۱/۸ مگاپاسکال حدود ۴۰ درصد نسبت به نمونه شاهد قوی‌تر بود. همچنین نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم

Fig. 5. Diagram of compressive strength percentage changes of self-compacting concrete specimens



شکل ۶. نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم الیافی

Fig. 6. Percentage diagram of compressive strength changes of fiber self-compacting concrete samples

الیاف و دارای ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس، نمونه حاوی ۵ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس بیشینه مقاومت کششی را داشت. این نمونه با مقاومت ۳/۹۲ مگاپاسکال، حدود ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. همچنین در نمونه‌های دارای نانوسیلیس و مقادیر متفاوت الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی ۲ درصد نانوسیلیس و ۱/۵ درصد الیاف دارای بیشینه مقاومت کششی بود، و با مقاومت ۴/۲۲ مگاپاسکال، حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در بین نمونه‌های دارای میکروسیلیس و مقادیر متفاوت الیاف، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱/۵ درصد الیاف دارای بیشینه مقاومت کششی بود و با مقاومت کششی ۴/۰۵ مگاپاسکال، حدود ۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در نمونه‌های ترکیبی شامل میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای بیشینه مقاومت کششی بود. در واقع نمونه فوق دارای بیشترین مقاومت کششی در بین کل نمونه‌ها بود. این نمونه با مقاومت کششی ۴/۴۹ مگاپاسکال، حدود ۲۶ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود مقاومت کششی داشت.



شکل ۷. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 7. Compressive strength testing machine

### ۳-۲-۳- آزمایش مدول گسیختگی

آزمایش مدول گسیختگی یا مقاومت کششی ناشی از خمش بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۱۱ و نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است. همچنین درصد پیشرفت نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه شاهد در نمودار شکل ۱۱ مشخص شده است. لازم به ذکر است در شکل ۱۱ نمونه‌های بتن خودتراکم الیافی دارای میکروسیلیس با (SF-sample)، نمونه‌های دارای نانوسیلیس و الیاف با (NF-sample) و نمونه‌های ترکیبی با (SNF-sample) نشان داده شده‌اند. نمونه MIX0 که میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف نداشت، دارای مقاومت کششی ناشی از خمش ۴/۹۱ مگاپاسکال بود. با توجه به جدول ۱۱، با افزایش مقدار نانوسیلیس در نمونه‌های تکی فاقد الیاف، ابتدا مدول گسیختگی افزایش و سپس کاهش یافته است. در نمونه‌های تکی حاوی نانوسیلیس، نمونه دارای ۳ درصد نانوسیلیس دارای بیشینه مدول گسیختگی بود و با مقاومت ۵/۳۸ حدود ۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در نمونه‌های دارای میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی، ابتدا مقاومت خمشی افزایش و سپس مقداری کاهش یافت. در بین نمونه‌های دارای میکروسیلیس، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس دارای بیشینه

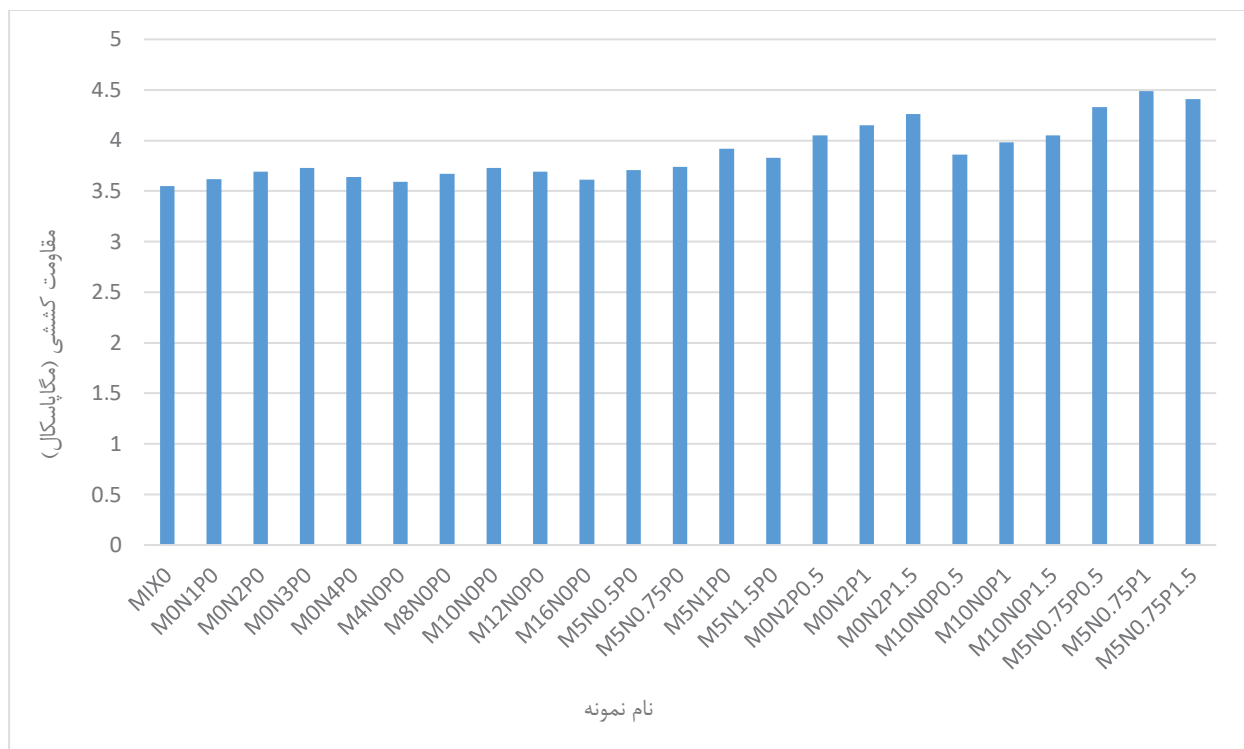
### ۳-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم یا دو نیمه شدن بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۱۰ و نمودار شکل ۸ ارائه شده‌اند. همچنین درصد پیشرفت نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه شاهد در نمودار شکل ۹ مشخص شده است. لازم به ذکر است در شکل ۹ نمونه‌های بتن خودتراکم الیافی دارای میکروسیلیس با (SF-sample) و نمونه‌های دارای نانوسیلیس و الیاف با (NF-sample) و نمونه‌های ترکیبی با (SNF-sample) نشان داده شده‌اند. نمونه MIX0 که میکروسیلیس، نانوسیلیس و الیاف نداشت، دارای مقاومت کششی ۳/۵۵ مگاپاسکال بود. در نمونه‌های تکی حاوی نانوسیلیس، نمونه دارای ۳ درصد نانوسیلیس دارای بیشینه مقاومت کششی بود، و با مقاومت ۳/۷۳ مگاپاسکال حدود ۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در نمونه‌های دارای میکروسیلیس، با افزایش درصد جایگزینی، ابتدا مقاومت کششی افزایش و سپس مقداری کاهش یافت. در بین نمونه‌های دارای میکروسیلیس، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس دارای بیشینه مقاومت کششی بود. این مخلوط با مقاومت ۳/۷۶ مگاپاسکال، حدود ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. همچنین از بین نمونه‌های فاقد

جدول ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

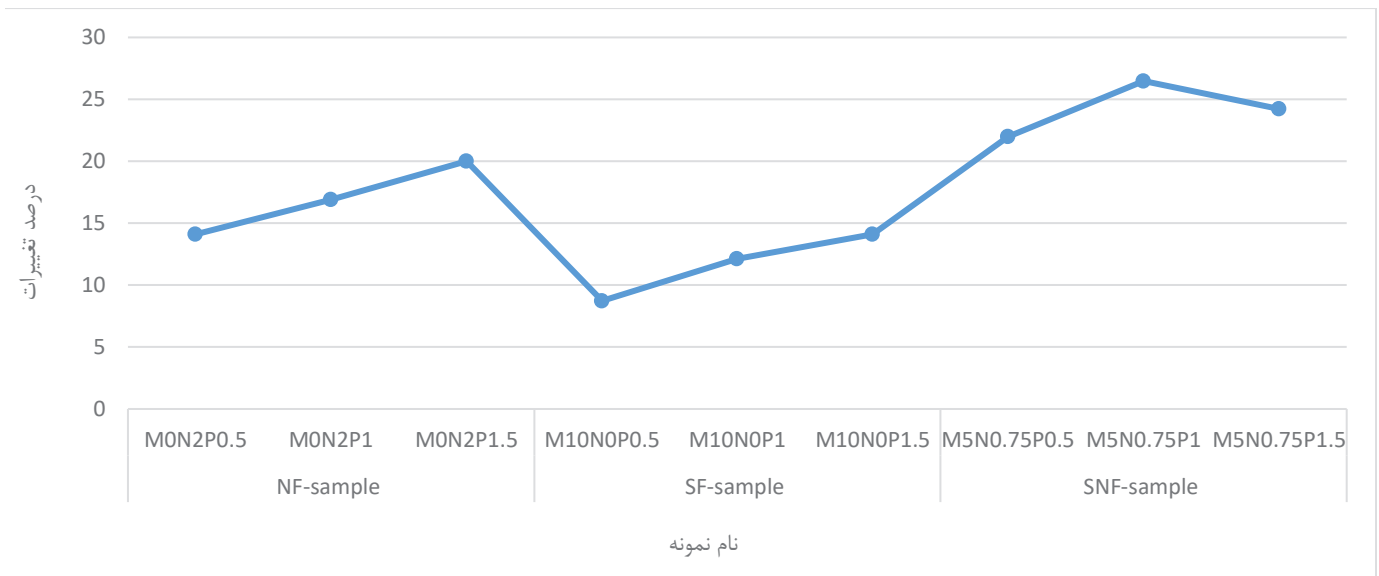
Table 10. Indirect tensile strength test results

شماره	کد نمونه	مقاومت کششی (MPa)	درصد تغییرات مقاومت کششی	شماره	کد نمونه	مقاومت کششی (MPa)	درصد تغییرات مقاومت کششی
۱	MIX0	۳/۵۵	۰	۱۳	M5N1P0	۳/۹۲	۱۰
۲	M0N1P0	۳/۶۲	۲	۱۴	M5N1.5P0	۳/۸۳	۸
۳	M0N2P0	۳/۶۹	۴	۱۵	M0N2P0.5	۴/۰۵	۱۴
۴	M0N3P0	۳/۷۳	۵	۱۶	M0N2P1	۴/۱۵	۱۷
۵	M0N4P0	۳/۶۴	۳	۱۷	M0N2P1.5	۴/۲۶	۲۰
۶	M4N0P0	۳/۵۹	۱	۱۸	M10N0P0.5	۳/۸۶	۹
۷	M8N0P0	۳/۶۷	۳	۱۹	M10N0P1	۳/۹۸	۱۲
۸	M10N0P0	۳/۷۶	۶	۲۰	M10N0P1.5	۴/۰۵	۱۴
۹	M12N0P0	۳/۶۹	۴	۲۱	M5N0.75P0.5	۴/۳۳	۲۲
۱۰	M16N0P0	۳/۶۱	۲	۲۲	M5N0.75P1	۴/۴۹	۲۶
۱۱	M5N0.5P0	۳/۷۱	۵	۲۳	M5N0.75P1.5	۴/۴۱	۲۴
۱۲	M5N0.75P0	۳/۷۴	۵				



شکل ۸. نمودار مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم

Fig.8. Tensile strength diagram of self-compacting concrete specimens



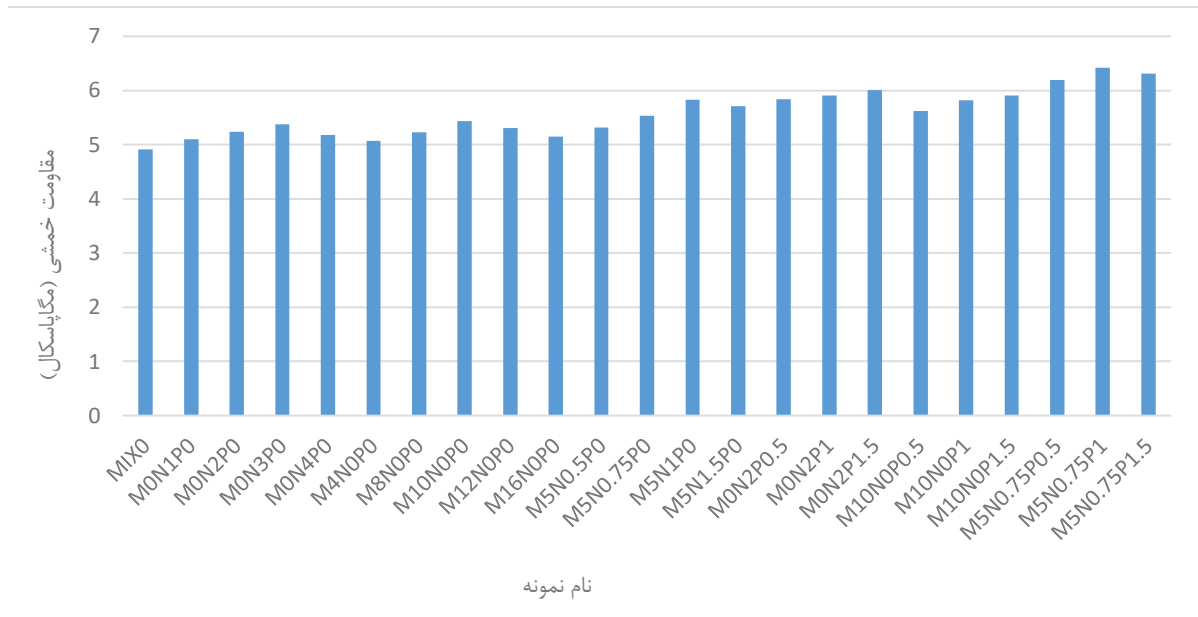
شکل ۹. نمودار درصد تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم الیافی

Fig. 9. Graph of percentage changes in tensile strength of fiber reinforced self-compacting concrete samples

جدول ۱۱. نتایج آزمایش مدول گسیختگی

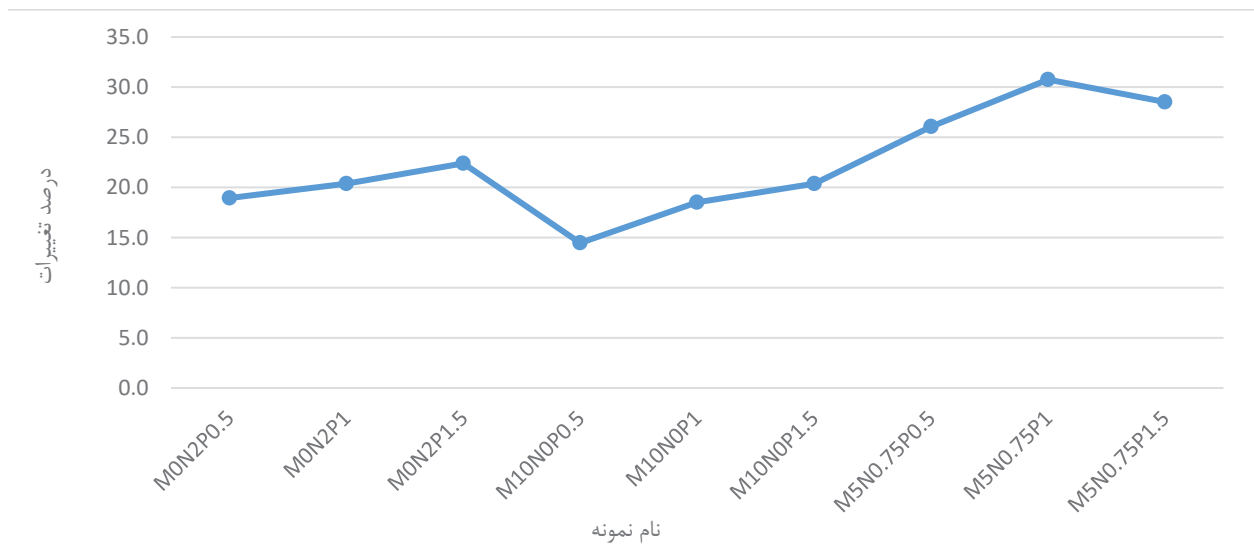
Table 11. Flexural strength test results

شماره	کد نمونه	مدول گسیختگی (MPa)	درصد تغییرات مقاومت خمشی	شماره	کد نمونه	مدول گسیختگی (MPa)	درصد تغییرات مقاومت خمشی
۱	MIX0	۴/۹۱	۰	۱۳	M5N1P0	۵/۸۳	۱۸/۷
۲	M0N1P0	۵/۱	۳/۹	۱۴	M5N1.5P0	۵/۷۱	۱۶/۳
۳	M0N2P0	۵/۲۴	۶/۷	۱۵	M0N2P0.5	۵/۸۴	۱۸/۹
۴	M0N3P0	۵/۳۸	۹/۶	۱۶	M0N2P1	۵/۹۱	۲۰/۴
۵	M0N4P0	۵/۱۸	۵/۵	۱۷	M0N2P1.5	۶/۰۱	۲۲/۴
۶	M4N0P0	۵/۰۷	۳/۳	۱۸	M10N0P0.5	۵/۶۲	۱۴/۵
۷	M8N0P0	۵/۲۳	۶/۵	۱۹	M10N0P1	۵/۸۲	۱۸/۵
۸	M10N0P0	۵/۴۳	۱۰/۶	۲۰	M10N0P1.5	۵/۹۱	۲۰/۴
۹	M12N0P0	۵/۳۱	۸/۱	۲۱	M5N0.75P0.5	۶/۱۹	۲۶/۱
۱۰	M16N0P0	۵/۱۵	۴/۹	۲۲	M5N0.75P1	۶/۴۲	۳۰/۸
۱۱	M5N0.5P0	۵/۳۲	۸/۴	۲۳	M5N0.75P1.5	۶/۳۱	۲۸/۵
۱۲	M5N0.75P0	۵/۵۳	۱۲/۶				



شکل ۱۰. نمودار مقاومت خمشی نمونه‌های بتن خودتراکم

Fig. 10. Flexural strength diagram of self-compacting concrete specimens



شکل ۱۱. نمودار درصد تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های بتن خودتراکم الیافی

Fig.11. Graph of percentage changes in flexural strength of fiber reinforced self-compacting concrete specimens



### ۳-۲-۴- جمع بندی نتیجه‌های آزمایش‌های بتن سخت شده

در این تحقیق میکروسلیس باعث افزایش کلیه مقاومت‌ها شده است. همچنین همه نمونه‌های حاوی نانوسلیس دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه شاهد بودند. موضوع فوق به دلیل خاصیت پوزولانی قابل توجه این مواد می‌باشد. در تحقیقات سایر پژوهشگران نیز میکروسلیس باعث بهبود مشخصات مکانیکی از جمله، انرژی شکست، مقاومت فشاری، کششی و خمشی شده است [۳۲]. Pachideh و همکاران در تحقیقی تاثیر سرباره کوره آهن گدازی و میکروسلیس را در دماهای مختلف بررسی کردند و اذعان داشتند در دمای تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، میکروسلیس مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را بهبود می‌بخشد [۳۳ و ۳۴]. Horszczaruk و همکاران [۳۵] نشان داده‌اند که نانو ذرات سیلیس در تراکم ناحیه انتقال<sup>۱۱</sup> و بهبود مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب حدود ۲۷ و ۸ درصد موثرند. در مطالعه‌ای مظلوم و همکاران اثر میکروسلیس را بر بتن سبک خودتراکم بررسی کردند [۱۵]. آن‌ها در نهایت اعلام کردند که میکروسلیس باعث افزایش دوام و بهبود خواص مکانیکی این بتن شده است. در واقع این ماده مقاومت‌های فشاری و کششی را به ترتیب ۴۳ و ۲۳ درصد بهبود بخشیده است [۱۵].

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر میکروسلیس و نانوسلیس بر روی روانی و مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم الیافی بررسی شد. بدین منظور آزمایش‌های بتن تازه برای بررسی خواص خودتراکمی بتن انجام شد، و در نهایت مشخصات مکانیکی بتن فوق بررسی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق در ذیل ارائه شده است.

در طرح‌های اولیه، با افزودن میکروسلیس یا نانوسلیس، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن خودتراکم افزایش یافتند. در طرح‌های ترکیبی شامل میکروسلیس و نانوسلیس، مقاومت‌های فوق بیش از نمونه‌های اولیه بهتر شدند. طرح ترکیبی حاوی ۵ درصد میکروسلیس و ۱ درصد نانوسلیس از همه طرح مخلوط‌ها بهتر بود. مقاومت فشاری، کششی و خمشی این نمونه نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳۰، ۱۰ و ۱۸ درصد افزایش داشت.

با افزودن الیاف به نمونه‌های ترکیبی حاوی میکروسلیس و نانوسلیس، میزان تغییرات مثبت مشخصات مکانیکی افزایش یافت. بهترین نمونه ترکیبی در مقاومت فشاری، دارای ۵ درصد میکروسلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسلیس



شکل ۱۲. نمونه تحت خمش با دستگاه zwick roell

Fig. 12. Sample under bending with zwick roell machine

مقاومت خمشی و با مقاومت ۵/۴۳ مگاپاسکال، حدود ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. همچنین از بین نمونه‌های فاقد الیاف و دارای ترکیب میکروسلیس و نانوسلیس، نمونه حاوی ۵ درصد میکروسلیس و ۱ درصد نانوسلیس بیشینه مدول گسیختگی را داشت. این نمونه با مقاومت ۵/۸۳ مگاپاسکال، حدود ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. همچنین در نمونه‌های دارای نانوسلیس و مقادیر متفاوت الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی ۲ درصد نانوسلیس و ۱/۵ درصد الیاف دارای بیشینه مدول گسیختگی بود، و با مقاومت ۶/۰۱ مگاپاسکال، حدود ۲۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در بین نمونه‌های دارای میکروسلیس و مقادیر متفاوت الیاف، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسلیس و ۱/۵ درصد الیاف دارای بیشینه مقاومت کششی ناشی از خمش بود، و با مقاومت ۵/۹۱ مگاپاسکال، حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. در نمونه‌های ترکیبی شامل میکروسلیس، نانوسلیس و الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی ۵ درصد میکروسلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسلیس و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای بیشینه مقاومت خمشی بود. نمونه فوق دارای بیشترین مقاومت خمشی در بین کل نمونه‌ها هم بود. این نمونه با مقاومت کششی ناشی از خمش ۶/۴۲ مگاپاسکال، حدود ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود مقاومت داشت. همچنین نمونه تحت خمش در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

1 (Interfacial transition zone (ITZ<sup>۱</sup>)

- fracture properties, Composites Part B: Engineering, 41 (2010) 17–24.
- [9] A. Caggiano, M. Cremona, C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 832–840.
- [10] İ. B. Topçu, T. Uygunoğlu, Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC), *Construction and Building Materials*, 24(7) (2010) 1286-1295.
- [11] C. L. Hwang, V. A. Tran, A study of the properties of foamed lightweight aggregate for self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 87 (2015) 78-85.
- [12] G. Pachideh, M. Gholhaki, H. Ketabdari, Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars, *Journal of Building Engineering*, 29 (2020) 101178.
- [13] M. Mazloom, A. A. Ramezani-pour, J. J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4) (2004) 347-357.
- [14] M. Mazloom, A. Ranjbar, Relation between the workability and strength of self-compacting concrete, 35th Conference on Our World in Concrete and Structures, (2010) 315-322.
- [15] M. Mazloom, A. Allahabadi, M. Karamloo, Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC, *Advances in Concrete Construction*, 5(6) (2017), 587-611.
- [16] O.A. Naniz, M. Mazloom, Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete, *Journal of Building Engineering*, 20 (2018) 400-410.
- [17] M. Mazloom, H. Salehi, The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2018). سسس
- [18] C. L. Hwang, V. A. Tran, A study of the properties of و ۱/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن بود. مقاومت فشاری این نمونه با ۶۱/۸ مگاپاسکال حدود ۴۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. بهترین نمونه ترکیبی در مقاومت کششی و خمشی، دارای ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن بود. مقاومت کششی و خمشی این نمونه به ترتیب برابر ۴/۴۹ و ۶/۴۲ مگاپاسکال بود که نسبت به نمونه شاهد ۲۶ و ۲۸ درصد بهبود داشت. به دلیل روان‌تر بودن این طرح مخلوط نسبت به طرح دارای ۱/۵ درصد الیاف، کار کردن با آن آسان‌تر بود. کاهش مقاومت فشاری آن هم نسبت به طرح دارای ۱/۵ درصد الیاف، کمتر از ۳ درصد بود. بنابراین بهترین طرح مخلوط این تحقیق شامل ۵ درصد میکروسیلیس، ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن بود.

### منابع

- [1] V. Afroughsabet, High-performance fiber-reinforced concrete: a review, *Materials Science*, 51 (2016) 6517–6551.
- [2] S. Shin, W. Ghosh, J. Moreno, Flexural ductility of ultra-high-strength concrete members, *ACI Structural Journal*, 86 (1989) 394-400.
- [3] O. Lotfi Omran, Investigation of mechanical properties of fiber self-compacting concrete containing nano silica particles, M.Sc. Thesis, University of Technology, (2011), Babol, in Persian.
- [4] Y. Mallah, Experimental study of mechanical properties of self-reinforcing concrete and flexural behavior of reinforced concrete beams made of SCC, Master Thesis, Iran University of Science and Technology, (2005), in Persian.
- [5] A. Skarendahl, O. Petersson, Self compacting concrete, State of the Art Report of RILEM Technical committee 174, (2000), RILEM Report No 23.
- [6] M. Mazloom, Estimating long-term creep and shrinkage of high-strength concrete, *Cement & Concrete Composites*, 30 (2008) 316-326.
- [7] H. Byung, C.Ji, C.Young, Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers, *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (2007) 243–257.
- [8] F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea, R. Swamy, Experimental evaluation of fiber reinforced concrete

- [28] ASTM, ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete, in, ASTM West Conshohocken, PA, USA, )2005(.
- [29] ACI 237, Self-consolidating concrete. American Concrete Institute, (2007).
- [30] BSI, BS 1881-124: 1988: Testing concrete–Part 124: Methods for analysis of hardened concrete, in, BSI London, UK, (1988).
- [31] ASTM C1609/M-05, Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using Beam with Third-point loading). ASTM International, (2006).
- [32] J. Massana, E. Reyes, J. Bernal, N. León, E. Sánchez-Espinosa, Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 93-103.
- [33] G. Pachideh, M. Gholhaki, Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag, *Journal of Structural Fire Engineering*, (2020).
- [34] G. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100757.
- [35] E. Horszczaruk, E. Mijowska, K. Cendrowski, P. Sikora, Influence of the new method of nanosilica addition on the mechanical properties of cement mortars, *Cement Wapno Beton*, 5(2014) (2014) 66.
- foamed lightweight aggregate for self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 87 (2015) 78-85.
- [19] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Fracture of fibre-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures, *Magazine of Concrete Research*, (2019): 1-36.
- [20] ACI committee 544 Report, Design Consideration for SFRC, *ACI Structural Journal*, (1994), pp 563-530, 1988.
- [21] S. P. Shah, G. B. Batson, *Fiber-Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP105, ACI, p597, (1987).
- [22] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers, *Advances in Material Research*, 8(2) (2019) 137-154.
- [23] M. Rashid Hameed, Contribution of metallic fibers on the performance of reinforced concrete structures for the seismic application, Thesis for P.H.D, University of Toulouse, (2010).
- [24] EFNARC, Specifications and guidelines for self-compacting concrete, (2002), ISBN0 953973344.
- [25] ASTM C33. Standard specification for concrete aggregates. ASTM International. (2018).
- [26] ASTM C1240, Standard specification for silica fume for use in hydraulic-cement concrete and mortar, ASTM Philadelphia,) 1993(.
- [27] ASTM C1116, Standard specification for fiber-reinforced concrete ASTM International. (2015).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. H. Abna, M. Mazloom, *The effects of silica fume and nano-silica on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete containing polypropylene fibers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 1101-1118.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19252.7115](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19252.7115)

