

## تأثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن سبک الیافی\*

(یادداشت پژوهشی)

یاسر قربانی شمشاد سرا<sup>(۲)</sup>سید حسین قاسم‌زاده موسوی نژاد<sup>(۱)</sup>

**چکیده** بتن سبک به واسطه ویژگی‌های خاص خود از جمله سبک‌سازی سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. این مقاله تأثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس را روی خواص مکانیکی بتن الیافی حاوی سبکدانه اسکوریا مورد ارزیابی قرار می‌دهد. میکروسیلیس و نانوسیلیس در مقادیر مختلف جایگزین وزنی سیمان شده است. مقدار مصرف الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با نسبت‌های حجمی و طول به قطر مختلف، متفاوت می‌باشد. در این مطالعه هفده طرح مختلف تحت آزمایش‌های مقاومت مکانیکی و جذب آب و وزن مخصوص قرار گرفتند که نتایج به دست آمده درصد جایگزینی بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس را به ترتیب ۱۰ و ۳ درصد و تأثیر الیاف فولادی را بهتر از الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن سبک نشان می‌دهد.

**واژه های کلیدی** سبکدانه اسکوریا، میکروسیلیس، نانوسیلیس، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، خواص مکانیکی.

### Effect of Silica Fume and Nano Silica on Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Lightweight Concrete

S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad

Y. Ghorbani Shemshad sara

**Abstract** Lightweight concrete has significant importance due to its special features including weight reduction of structures. This article aims to study the effect of silica fume (SF) and nano silica (Na) on mechanical properties of fiber reinforced concrete containing lightweight scoria aggregates. SF and Na are replaced by different amounts of cement weight. The used amounts of Steel and polypropylene fibers having different length to diameter ratios are different. For this study, seventeen different lightweight mixtures were made and tested for mechanical strengths, water absorption and density. Results show that optimized replacement amount of SF and Na is 10% and 3%, respectively. Steel fiber in comparison to Polypropylene fiber had better effect on mechanical characteristics of lightweight concrete.

**Key Words** Lightweight Scoria, Silica Fume, Nano Silica, Steel and Polypropylene Fibers, Mechanical Properties.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۱۱/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۱۲/۱۵ می‌باشد.

Email : hossghas@yahoo.com

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

(۲) کارشناسی ارشد مهندسی عمران، موسسه غیرانتفاعی دیلمان لاهیجان.

## مقدمه

نانو سیلیس به عنوان موادی در ابعاد نانومتری می تواند با بلورهای هیدروکسید کلسیم  $(Ca(OH)_2)$  واکنش دهد و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید کند و مقاومت سنن اولیه خمیر سخت شده سیمان و بتن را افزایش می دهد [۹].

Qing و همکاران [10] با بررسی و مقایسه افزایش مقاومت نانوسیلیس با دوده سیلیس مشاهده کردند که فعالیت پوزولانی نانوسیلیس در سنن پایین بسیار بیشتر از دوده سیلیسی است. تحقیق Li [11] نشان داد که مقدار کمی نانو ذرات سیلیس مقاومت های فشاری، خمشی و سایشی را افزایش می دهد. Ji و همکاران [12] دریافتند که کمترین میزان تراوش در نمونه ای که بیش ترین میزان نانو سیلیس را دارا بود، رخ داده است. همکاران Gesoglu [13] دریافتند که استفاده توأم از میکروسیلیس (MS) و الیاف فولادی (S) سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می گردد. Kilic و همکارانش [14] نشان دادند که میکروسیلیس با جایگزینی ۱۰٪ وزن سیمان عملکرد بهتری نسبت به خاکستر بادی دارد.

با کاهش وزن بتن، خواص مکانیکی آن در مقایسه با بتن معمولی کاهش می یابد. در سال های اخیر پژوهش های فراوانی در ارتباط با تاثیر الیاف بر بهبود مشخصات مکانیکی بتن از جمله توسط Yazici و همکارانش [15] صورت گرفته که نکته مشترک آنها تأیید تأثیر مثبت الیاف فولادی بر خواص مکانیکی بتن سبک می باشد. همچنین ماهوتیان و همکارانش [۱۶] تأثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بر روی بتن مطالعه کردند که نتایج نشانگر تأثیر نسبتاً کم الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با الیاف فولادی در بهبود مقاومت فشاری است.

## برنامه آزمایشگاهی

## مصالح مورد استفاده

سیمان مورد استفاده از پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان هگمتان و دارای توده ویژه  $3150 \text{ kg/m}^3$  و سطح مخصوص  $2900 \text{ cm}^2/\text{gr}$  می باشد. همچنین، دوده

بررسی زلزله های اخیر ایران نشان می دهد که اکثر خرابی های سازه ای به خاطر شکل گیری نیروی اینرسی بزرگ در سازه ها و عدم تحمل آنها در برابر این نیرو بوده است [۱]. بتن سبک به واسطه ویژگی های خاص برای کاربردهای مختلف از جمله سازه های بلندمرتبه، پل های چنددهانه ای بزرگ و نیز سازه های نظامی مدفون (به عنوان جاذب و مستهلک کننده انرژی) مدنظر قرار می گیرد [2].

روش های مختلفی برای تولید بتن سبک شامل حذف بخش ریزدانه از کل سنگدانه های موجود در بتن و راه دیگر تولید آن ایجاد حباب های هوا از طریق افزودنی های شیمیایی مواد کف زا است. متداول ترین روش برای ساخت بتن سبک استفاده از سنگدانه های سبک در بتن است [3,4].

اسکوریا، نوعی سنگ آذرین با ساختار متخلخل، ظاهری گوشه دار است که حاصل فرایند فوران آتشفشان ها و سرد شدن سریع در هوا و عموماً به رنگ های قرمز تا قهوه ای موجودند [5].

بتن سبک سازه ای طبق آیین نامه ACI 318-14 به طور کلی به بتنی اطلاق می شود که چگالی خشک آن کمتر از  $1840 \text{ kg/m}^3$  بوده و مقاومت فشاری استوانه ای ۲۸ روزه آن بیشتر از  $17/2 \text{ MPa}$  باشد. وزن مخصوص بتن سبک طبق آیین نامه 1-1045 DIN و BS EN 206:2013 شامل اغلب کشورهای اتحادیه اروپا در محدوده  $800 \text{ تا } 2000 \text{ kg/m}^3$  محدود شده است [6].

تولید سیمان منجر به انتشار گازهای گلخانه ای، آلودگی محیط زیست و غیره می شود. یکی از راه حل های این مشکلات استفاده از مواد پوزولانی در بتن است. پوزولان ها خواص مکانیکی و شیمیایی خمیر سیمان را بهبود می دهند [7].

میکروسیلیس ماده ای بسیار ریز و آمورف که باعث بهبود پایایی و مقاومت بتن می گردد. Shannag نشان داد که با افزایش مقدار میکروسیلیس به ۱۵ درصد مقاومت بتن افزایش می یابد [8].

سیلیس (ازنا) به‌عنوان ماده پوزولانی در همه طرح‌ها استفاده شده است. توده ویژه  $MS = 2120 \text{ kg/m}^3$  و مشخصات شیمیایی آن و سیمان در جدول (۱) آمده است. مشخصات نانوسیلیس (Nanocebin30) در جدول (۲) آورده شده است. حداکثر قطر ذرات ماسه رودخانه‌ای  $4/75$  میلی‌متر و وزن مخصوص ظاهری  $SSD = 2520 \text{ kg/m}^3$  و جذب آب آن  $3\%$  است. از فوق روان کننده P10-3R با مشخصات جدول (۳) استفاده شد. مشخصات الیاف های فولادی و پلی پروپیلن در جدول (۴)، دانه‌بندی ماسه و اسکوریای مصرفی به ترتیب در شکل (۱) و (۲) و دیگر مشخصات آن‌ها در جدول (۵) آمده است.

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
سیمان	۲۱/۵۴	۶۳/۲۴	۴/۹۵	۳/۸۲	۱/۵۵	۲/۴۳
میکروسیلیس	۹۵/۱	۰/۴۹	۱/۳۲	۰/۸۷	۰/۹۷	۰/۱

جدول ۲ مشخصات نانوسیلیس

Parameter	Sales Specifications	Test method
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.203-1.215	AP-005D
S <sub>i</sub> O <sub>2</sub> (weight%)	29.6-31	AP-054
PH(at20 <sup>0</sup> C)	9.6-10.2	AP-009
Specific Surface Area	200-240	AP-011

جدول ۳ مشخصات فوق روان کننده

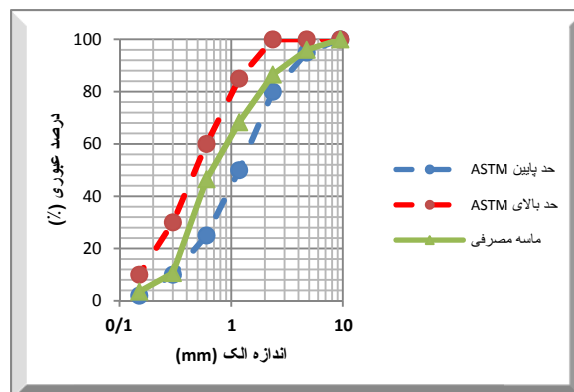
P10-3R	نام
پلی کربوکسیلیک اتر اصلاح شده	نوع
سبز تیره	ظاهر
$1.1 \pm 0.02$	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
$7 \pm 1$	PH
مایع	حالت فیزیکی
آنیونی	طبیعت یونی

جدول ۴ مشخصات الیاف

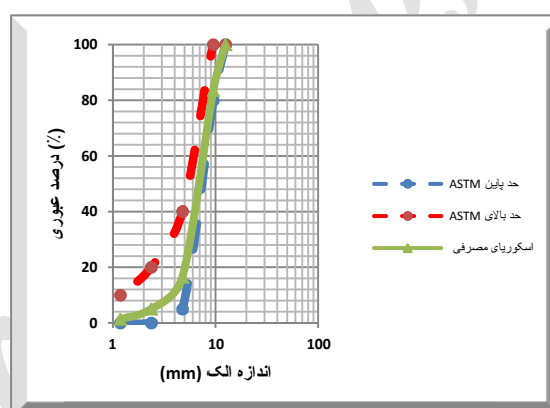
الیاف پلی پروپیلن	الیاف فولادی	نام
صاف	قلاب دار	شکل
12	50	طول (mm)
200	800	قطر (μm)
0.9	7.85	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )

جدول ۵ مشخصات فیزیکی سنگدانه

سنگدانه	جذب آب (%)		وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )	
	۳۰ دقیقه	۲۴ ساعته	خشک	اشباع با سطح خشک (SSD)
ماسه	۳		۲۳۸۰	۲۵۲۰
اسکوریا (۹/۵ mm)	۱۰/۱۵	۱۵/۳	۱۵۴۲	۱۶۵۰



شکل ۱ دانه‌بندی ماسه



شکل ۲ دانه‌بندی اسکوریا

ماسه و مخلوط کردن با سبکدانه، مواد سیمانی به مخلوط اضافه شد و نهایتاً، آب به همراه فوق روان کننده به مخلوط اضافه گردید. پس از ساخت بتن و پر کردن قالب‌ها، نمونه‌ها در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  -  $25^{\circ}\text{C}$  در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده به طوری که نمونه‌ها تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری مرطوب در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند. طرح‌های اختلاط در جدول (۶) آمده است.

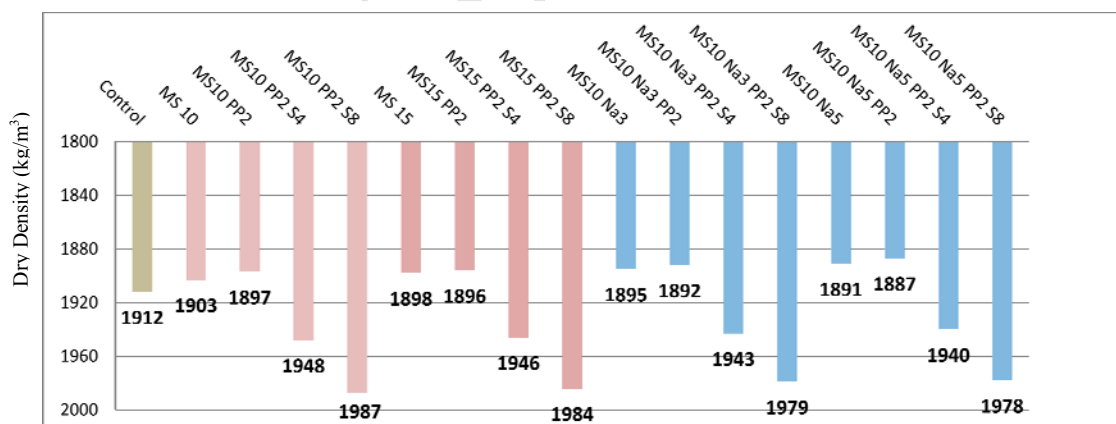
### طرح‌های اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

نسبت آب به مواد سیمانی در همه طرح‌ها ثابت و برابر  $0/3$  و مواد سیمانی جایگزین با MS ۱۰ و ۱۵ درصد است. طول الیاف فولادی قلاب‌دار ۵۰ میلی‌متر و پلی‌پروپیلن ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. ترتیب ساخت اختلاط مصالح به این گونه بود که ابتدا قسمتی از آب اختلاط به سبکدانه‌های خشک جهت پیش مرطوبی که ۳۰ دقیقه به طول انجامید افزوده شد. پس از آن با افزودن

جدول ۶ طرح‌های اختلاط

کد طرح	سیمان kg/m <sup>3</sup>	میکروسیلیس kg/m <sup>3</sup>	نانوسیلیس kg/m <sup>3</sup>	آب kg/m <sup>3</sup>	ماسه kg/m <sup>3</sup>	اسکور یا kg/m <sup>3</sup>	روان کننده kg/m <sup>3</sup>	الیاف پلی پروپیلن kg/m <sup>3</sup>	الیاف فولادی kg/m <sup>3</sup>
Control	۵۰۰	۰	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۷۶	۲/۵	۰	۰
MS 10	۴۵۰	۵۰	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۶۱	۴	۰	۰
MS10 PP2	۴۵۰	۵۰	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۵۷	۴	۱/۸	۰
MS10 PP2 S4	۴۵۰	۵۰	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۴۹	۵	۱/۸	۳۱/۴
MS10 PP2 S8	۴۵۰	۵۰	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۴۱	۶	۱/۸	۶۲/۸
MS 15	۴۲۵	۷۵	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۵۳	۵	۰	۰
MS15 PP2	۴۲۵	۷۵	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۵۰	۵	۱/۸	۰
MS15 PP2 S4	۴۲۵	۷۵	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۴۱	۶	۱/۸	۳۱/۴
MS15 PP2 S8	۴۲۵	۷۵	۰	۱۵۰	۷۰۵	۶۳۳	۷	۱/۸	۶۲/۸
MS10 Na3	۴۳۵	۵۰	۱۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۴۶	۵	۰	۰
MS10 Na3 PP2	۴۳۵	۵۰	۱۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۴۳	۵	۱/۸	۰
MS10 Na3 PP2 S4	۴۳۵	۵۰	۱۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۳۵	۶	۱/۸	۳۱/۴
MS10 Na3 PP2 S8	۴۳۵	۵۰	۱۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۲۷	۷	۱/۸	۶۲/۸
MS10 Na5	۴۲۵	۵۰	۲۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۳۸	۵	۰	۰
MS10 Na5 PP2	۴۲۵	۵۰	۲۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۳۵	۵	۱/۸	۰
MS10 Na5 PP2 S4	۴۲۵	۵۰	۲۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۲۷	۶	۱/۸	۳۱/۴
MS10 Na5 PP2 S8	۴۲۵	۵۰	۲۵	۱۵۰	۷۰۵	۶۱۸	۷	۱/۸	۶۲/۸

MS: Silica Fume Na: Nano Silica S: Steel Fiber PP: Polypropylene



طرح‌های اختلاط

شکل ۳ نمودار چگالی خشک نمونه‌ها

افزایش وزن مخصوص بتن گردید. تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز وزنی (زیر  $2000 \text{ kg/m}^3$ ) قرار دارند. شکل (۳) نمودار تغییرات چگالی بتن را مطابق

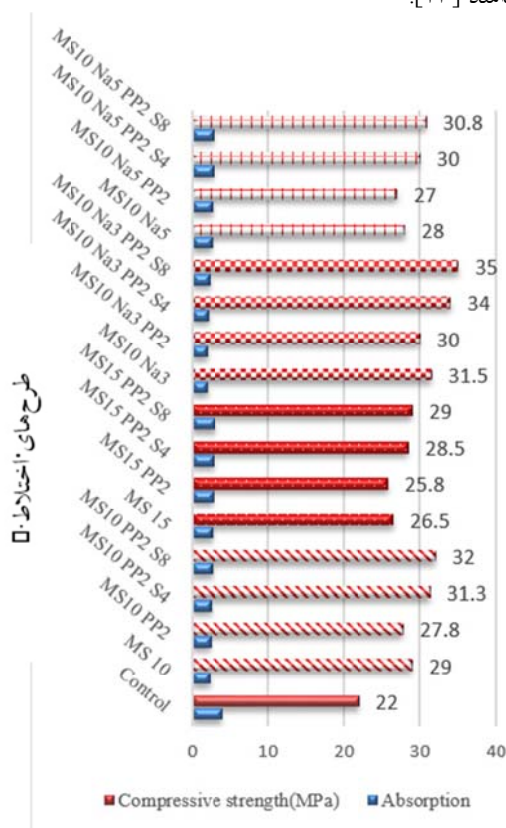
### نتایج آزمون‌های بتن سخت شده چگالی

نمودار نشان می‌دهد که حضور الیاف فولادی باعث

استاندارد ASTM C567 نشان می‌دهد.

تحت تأثیر الیاف PP بواسطه محبوس شدن هوا

می باشد [۲۳].



شکل ۴ نمودار مقاومت فشاری و جذب آب طرح‌های اختلاط

### مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر مطابق استاندارد ASTM C39 نشان می‌دهد که می‌توان به مقاومت سازه‌ای حداقل دست‌یافت. از شکل (۴) و جدول (۷) مشاهده می‌شود که با جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که بیش‌ترین افزایش آن برای ۱۰٪ MS و ۳٪ Na به ترتیب در حدود ۳۲٪ و ۴۳٪ می‌باشد. لذا درصد بهینه MS و Na به ترتیب الیاف PP موجب کاهش و ترکیب الیاف های S و pp موجب افزایش مقاومت فشاری گردیده است که در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است [22]. افزایش مقاومت فشاری تحت تأثیر الیاف S باعث به تأخیر افتادن رشد ریزترک‌ها و افزایش مقاومت و کرنش تحت بار حداکثر خواهد شد. دلیل کاهش مقاومت فشاری ۱۰ و ۳ درصد می‌باشد. تأثیر MS و Na بر افزایش مقاومت فشاری در تحقیقات دیگران نیز آمده است [17-21].

جدول ۷ مقادیر مقاومت فشاری و جذب آب طرح‌های اختلاط

مقاومت فشاری (MPa)				کد طرح	مقاومت فشاری (MPa)				
جذب آب		مقاومت فشاری (MPa)			جذب آب		مقاومت فشاری (MPa)		
نهایی	اولیه	۲۸ روزه	۷ روزه	کد طرح	نهایی	اولیه	۲۸ روزه	۷ روزه	کد طرح
۱/۹۵	۱/۴۲	۳۱/۵	۲۶/۸	MS10 Na3	۳/۸۹	۲/۲۱	۲۲	۱۹	Control
۲	۱/۴۴	۳۰	۲۵/۵	MS10 Na3 PP2	۲/۳۱	۱/۵۸	۲۹	۲۴	MS 10
۲/۱۱	۱/۵۸	۳۴	۲۸/۸	MS10 Na3 PP2 S4	۲/۳۷	۱/۶۲	۲۷/۸	۲۳	MS10 PP2
۲/۳	۱/۷۶	۳۵	۲۹	MS10 Na3 PP2 S8	۲/۵۱	۱/۷۷	۳۱/۳	۲۶	MS10 PP2 S4
۲/۵۳	۱/۷۴	۲۸	۲۴/۵	MS10 Na5	۲/۶۵	۱/۸۹	۳۲	۲۵/۸	MS10 PP2 S8
۲/۶۲	۱/۷۵	۲۷	۲۳/۲	MS10 Na5 PP2	۲/۶۶	۱/۷۹	۲۶/۵	۲۲/۵	MS 15
۲/۷۸	۱/۹۱	۳۰	۲۶	MS10 Na5 PP2 S4	۲/۷۴	۱/۸۴	۲۵/۸	۲۱/۲	MS15 PP2
۲/۸۳	۲/۰۲	۳۰/۸	۲۶/۵	MS10 Na5 PP2 S8	۲/۸۲	۱/۹۷	۲۸/۵	۲۳/۸	MS15 PP2 S4
					۲/۹۸	۲/۰۹	۲۹	۲۵	MS15 PP2 S8

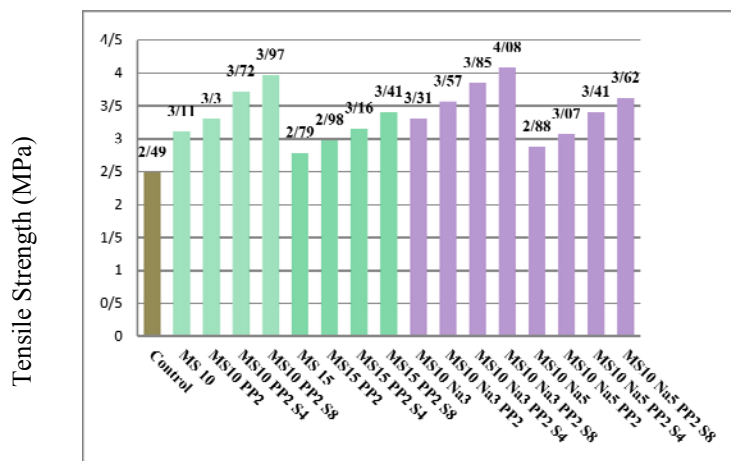
## جذب آب

جذب آب به‌عنوان معیاری برای کیفیت تراکم بتن مورد قضاوت قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری جذب آب نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر مطابق استاندارد ASTM C948 استفاده شد. به‌طورکلی در بتن با سنگدانه‌های سبک میزان جذب آب توسط محققین بالای ۱۰٪ گزارش شده است [24]. کیفیت بتن توسط CEB [25] به سه رده ضعیف، متوسط و خوب به ترتیب بر مبنای جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد تقسیم‌بندی شده است. با این وجود، بر اساس رده‌بندی CEB بیشتر نمونه‌ها در محدوده خوب طبقه‌بندی می‌شوند. متوسط اندازه حفرات در بتن حاوی سبکدانه بالاتر از بتن فاقد سبکدانه است و مقادیر مناسب جذب آب را می‌توان با استفاده از MS و Na تغییر داد. شکل (۴) نمودار و جدول (۷) مقادیر جذب آب طرح‌های ساخته‌شده را نشان می‌دهد. نتایج جذب آب نشان می‌دهد که تمامی بتن‌های حاوی MS و Na در محدوده خوب قرار دارند. همچنین وجود الیاف باعث افزایش جذب آب می‌شود.

### مقاومت کششی به روش دومین شدن استوانه

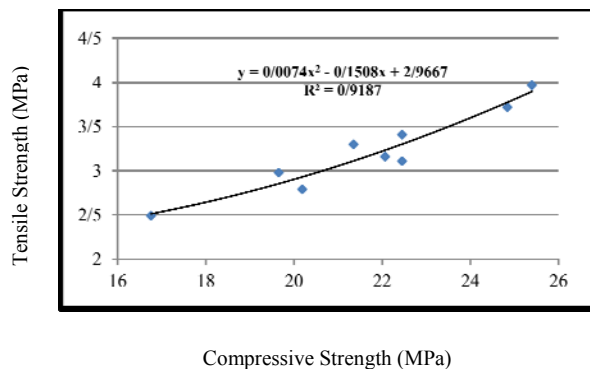
این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C496 انجام شد. نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل (۵) مقادیر مقاومت کششی را نشان می‌دهد که حضور الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش مقاومت کششی بتن در حدود ۷٪ گردید. ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن سبب افزایش مقاومت کششی و بیش‌ترین مقدار افزایش آن در حدود ۲۷٪ می‌باشد و این افزایش مقاومت در کار محققین دیگر از جمله Kayali و همکاران [26] دیده شده است. علت افزایش مقاومت ناشی از الیاف فولادی می‌تواند به‌واسطه افزایش تحمل کرنش کششی از طریق انتقال تنش‌ها از ماتریس به الیاف باشد. بیشترین افزایش برای جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس به صورت مجزا ۲۵٪ و ترکیبی با ۳٪ نانوسیلیس بجای سیمان مقاومت کششی ۳۳٪ افزایش می‌یابد. تأثیر مثبت میکروسیلیس و نانوسیلیس در افزایش مقاومت کششی در مطالعات دیگران نیز اشاره شده است [17-27-31].

با توجه به شکل (۶) و (۷) از رابطه بین مقاومت‌های کششی و فشاری انتظار می‌رود که این دو نوع مقاومت به‌طور نزدیکی با یکدیگر مرتبط باشند.

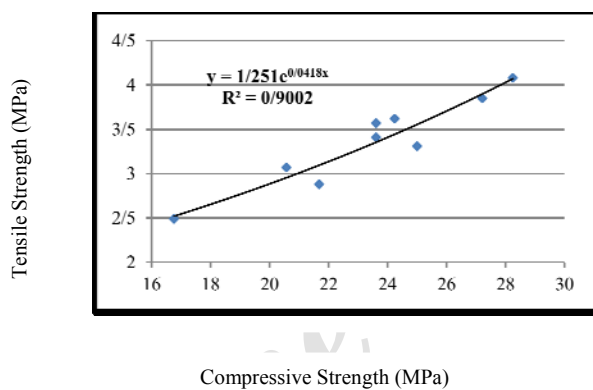


طرح‌های اختلاط

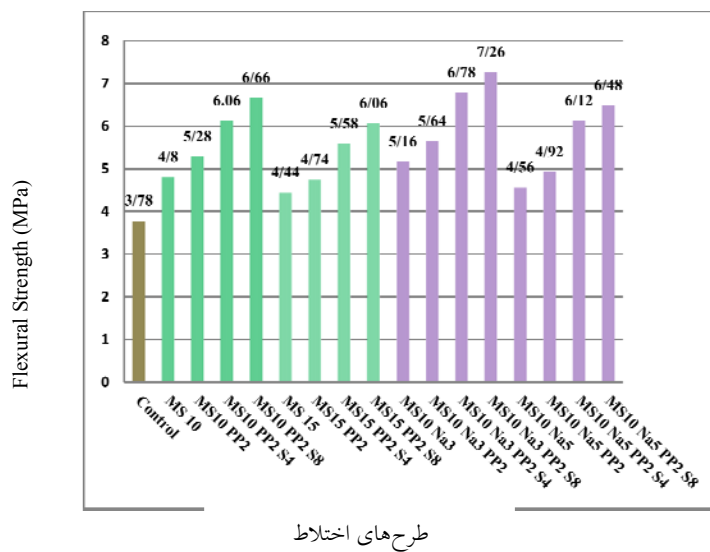
شکل ۵ نمودار مقاومت کششی طرح‌های اختلاط



شکل ۶ نمودار مقاومت فشاری برحسب مقاومت کششی بتن حاوی میکروسیلیس

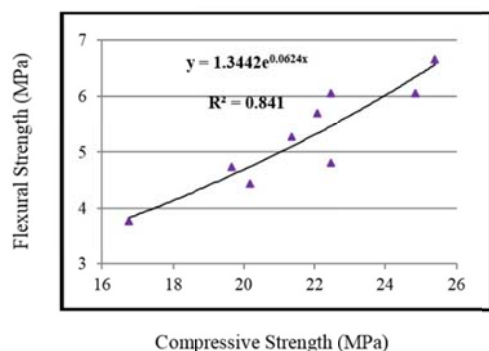


شکل ۷ نمودار مقاومت فشاری برحسب مقاومت کششی بتن حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس

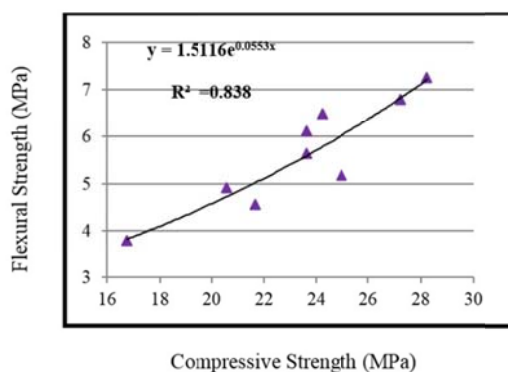


شکل ۸ نمودار مقاومت خمشی طرح‌های اختلاط





شکل ۹ نمودار مقاومت فشاری برحسب مقاومت خمشی بتن حاوی میکروسیلیس

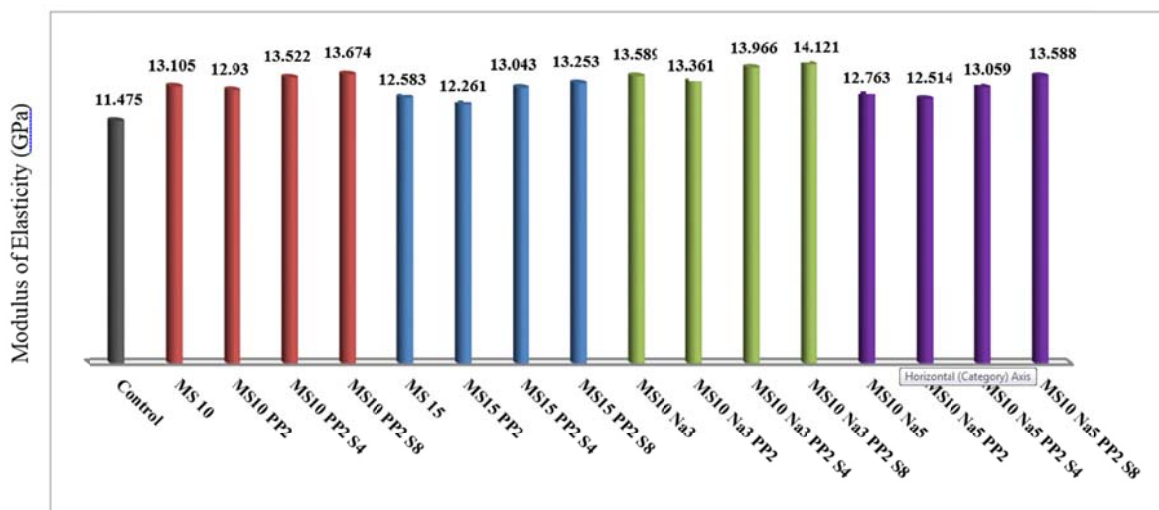


شکل ۱۰ نمودار مقاومت فشاری برحسب مقاومت خمشی بتن حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس

## مقاومت خمشی

مقادیر مقاومت خمشی نمونه ها به روش سه نقطه‌ای برای تعیین مدول گسیختگی بتن مطابق استاندارد ASTM C293 در شکل (۸) ارائه شده است. افزایش مقاومت خمشی با حضور الیاف و MS ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب افزایشی در حدود ۱۰٪ و ۶۷٪ مشاهده شد. همچنین بیشترین افزایش مقاومت خمشی با ترکیب الیاف های S و PP در حدود ۳۸/۷۵٪ و با جایگزینی میکروسیلیس به صورت تنها و ترکیبی با نانوسیلیس به جای سیمان به ترتیب در حدود ۲۷٪ و ۳۷٪ می باشد که این تأثیر ترکیبی در مطالعات دیگران نیز آمده است [17,28,32,33].

با توجه به شکل های (۹) و (۱۰) می توان مشاهده کرد که علت عدم نزدیک شدن ضریب همبستگی  $R^2$  را می توان به الیاف PP نسبت داد و لذا وجود الیاف باعث کاهش اندک ضریب همبستگی نسبت به کشش گردید. با توجه به شکل های (۹) و (۱۰) می توان مشاهده کرد. علت عدم نزدیک شدن ضریب همبستگی  $R^2$  را می توان به الیاف PP نسبت داد و لذا وجود الیاف باعث کاهش اندک ضریب همبستگی نسبت به کشش گردید.



طرح های اختلاط

شکل ۱۱ نمودار مدول الاستیسیته طرح های اختلاط

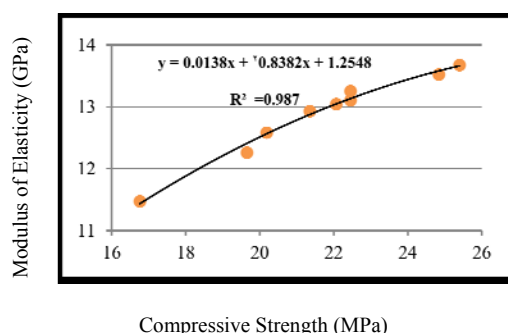
### نتیجه گیری

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، تأثیر درصدهای مختلف MS (۱۰٪، ۱۵٪) و Na (۳٪ و ۵٪) به صورت تکی و ترکیبی در بتن سبک سازه‌ای با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ همراه با دو درصد مختلف بتن الیافی PP (۲/۰٪) به صورت تکی و ترکیب با الیاف S (۴/۰٪ و ۸/۰٪) در زیر خلاصه شده است:

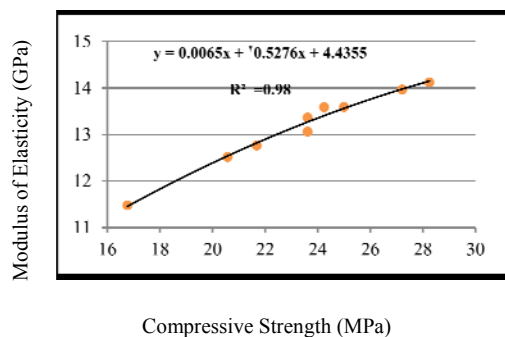
۱. حضور الیاف S باعث افزایش چگالی بتن می‌گردد.
۲. با جایگزینی ۱۰٪ MS به صورت جداگانه و ترکیبی با ۳٪ Na به جای سیمان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که بیش‌ترین افزایش آن به ترتیب در حدود ۳۲٪ و ۴۳٪ می‌باشد.
۳. الیاف PP موجب کاهش مقاومت فشاری گردیده و ترکیب الیاف S و PP موجب افزایش مقاومت شده است.
۴. بیش‌ترین افزایش مقاومت کششی با جایگزینی MS تنها و ترکیبی با ۳٪ Na به جای سیمان به ترتیب در حدود ۲۵٪ و ۳۳٪ می‌باشد.
۵. با افزایش MS از ۱۰٪ به ۱۵٪ و Na از ۳٪ به ۵٪ مقاومت کششی کاهش یافته است.
۶. افزایش مقاومت کششی بتن با حضور الیاف PP از ۰ به ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب در حدود ۷٪ و ترکیب الیاف S و PP سبب بیش‌ترین مقدار افزایش آن در حدود ۲۷٪ گردید.
۷. با جایگزینی ۱۰٪ MS به صورت تکی و ترکیبی با ۳٪ Na به جای سیمان مقاومت خمشی افزایش می‌یابد که بیش‌ترین افزایش به ترتیب در حدود ۲۷٪ و ۳۷٪ می‌باشد.
۸. حضور الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی گردید. با افزایش الیاف PP از ۰ به ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب برای MS ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب افزایشی در حدود ۱۰٪ و ۶/۷٪ مشاهده شد. همچنین، ترکیب الیاف S و PP با ۱۰٪ MS به حداکثر مقدار مقاومت خمشی در حدود ۳۸/۷۵٪ افزایش یافته است.
۹. MS و Na باعث افزایش مدول الاستیسیته می‌شود که

### مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته در شکل (۱۱) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر مطابق استاندارد ASTM C469 نشان داده شده است. مطابق شکل، مدول الاستیسیته با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. از نمودار مشاهده می‌شود که MS تکی به همراه Na به ترتیب به میزان ۲/۱۴٪ و ۴/۱۸٪ باعث افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. همچنین تأثیر الیاف بر مدول الاستیسیته بسیار کم بوده و در مطالعات دیگران نیز آمده است [17,30]. شکل (۱۲) و (۱۳) نمودار مقاومت فشاری استوانه‌ای معادل برحسب مدول الاستیسیته می‌باشد. از شکل‌ها پیداست ضریب همبستگی مقاومت فشاری و کششی بسیار خوب می‌باشد چراکه با افزایش مقاومت فشاری مدول الاستیسیته هم افزایش یافته است.



شکل ۱۲ نمودار مقاومت فشاری برحسب مدول الاستیسیته بتن حاوی میکروسیلیس



شکل ۱۳ نمودار مقاومت فشاری برحسب مدول الاستیسیته بتن حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس

با این وجود، بر اساس رده‌بندی CEB بیشتر نمونه‌ها در محدوده خوب طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین کاهش جذب آب این بتن‌ها توسط MS کمتر از Na می‌باشد.

بیش‌ترین افزایش به  $14/2\%$  برای  $10\%$  MS و در ترکیب با  $3\%$  Na به حدود  $18/5\%$  می‌رسد.  $10\%$  همچنین تأثیر الیاف بر مدول الاستیسیته بسیار کم بوده است.  $11\%$  حضور الیاف باعث افزایش مقدار جذب آب گردید.

## مراجع

۱. برگی، خسرو، "اصول مهندسی زلزله"، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸۰).
2. Babu, D. S., Babu, K. G., Tiong-Huan, W., "Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete", *Cement & Concrete Composites*, 28, 520-527, (2006).
3. Demirboga, R., Orung, I., Gul, R., "Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes", *Cement and Concrete Research* 31:1627-32, (2001).
4. Al-Khaiat, H., Haque, M. N., "Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete", *Cement and Concrete Research* 28 (6) 859- 866, (1998).
5. Demirdag, S., Gunduz, L., "Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units", *Construction and Building Materials* 22, 135-142, (2008).
6. BS EN 206:2013, "Concrete - Specification, performance, production and conformity (English version). Brussels", European Committee for Standardization, (2013).
7. Dotto, J. M. R., et al., "Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars", *cement and concrete composites* 26(1): pp 31-39, (2004).
8. Shannag, M. J., "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", *Cement & Concrete Composites* 22 399-406, (2000).
۹. مهرآوران، محسن، سهرابی، محمدرضا، "بهبود خواص بتن حاوی پوزولان تفتان با استفاده از نانوسیلیس"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، (۱۳۸۹).
10. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C., "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials* 21, 539-545, (2007).
11. Li, H., Zhang, M-H., Ou, J-P., "Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement", *Wear* 260, 1262-1266, (2006).
12. Ji, T., Mirzayee, A., Zangeneh-Madar, Z., Zangeneh-Madar, E., "Preliminary study on water infiltration of concrete containing nano-SiO<sub>2</sub> and silicone", 8th International Congress, on Civil Engineering, May 11-13, Shiraz University, Shiraz, Iran, (2009).
13. Gesoglu, M., Guneyisi, E., Alzebaree, R., Mermerdas, K., "Effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of the concretes produced with cold bonded fly ash aggregates", *Construction and Building Materials* 40, 982-990, (2013).

14. Kılıc, A., Atis, C. D., Yas, E., Özcan, F., "High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures", *Cement and Concrete Research* 33, 1595–1599, (2003).
15. Yazıcı, S., Inan, G., Tabak, V., "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC", *Construction and Building Materials* PP1250–1253, (2007).
۱۶. ماهوتیان، مهرداد. بهرادی یکتا، سجاد، "تأثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مشخصات مکانیکی بتن سبکدانه حاوی لیکا و پومیس"، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، دانشگاه تهران، (۱۳۹۰).
17. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", *Construction and Building Materials* 41, 879–888, (2013).
18. Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., Brooks, J. J., "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement & Concrete Composites* 26, 347–357, (2004).
19. Ahmadi, B., & Shekarchi, M., "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement & Concrete Composites* 32, 134–141, (2010).
20. Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H., Park, J. B., "Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles", *Construction and Building Materials* 21, 1351–1355, (2007).
21. Behfarnia, K., Salemi, N., "The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal Concrete", *Construction and Building Materials* 48, 580–584, (2013).
22. Ali Libre, N., Shekarchi, M., Mahoutian, M., Soroushian, P., "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice", *Construction and Building Materials* 25, 2458–2464, (2011).
۲۳. حسینعلی بیگی، مرتضی، پور نیک‌بین، محمد، باباجانی، میلاد، "بررسی تأثیر الیاف‌های مختلف بر روی خصوصیات مکانیکی بتن خود متراکم سبک"، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، دانشگاه تهران، (۱۳۸۸).
24. Rossignolo, J. A., Agnesini, M. V. C., "Durability of Polymer-modified lightweight aggregate concrete", *Cement & Concrete Composites* 26, 375-380, (2004).
25. CEB-FIP, "Diagnosis and assessment of concrete structures – state of the art report", *CEB Bull* 192, 83–5, (1989).
26. Kayali, O., Haque, M. N., Zhu, B., "Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash", *Cement and Concrete Research* 29, 1835–1840, (1999).
27. Nili, M., Afroughsabet, V., "The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete", *Construction and Building Materials* 24, 927–933, (2010).
28. Cakır, Ö., Sofyanl, Ö.Ö., "Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete", *Housing and Building National Research Center*, (2014).
29. Shekari, A. H., Razzaghi, M. S., "Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete", *Procedia Engineering* 14, 3036–3041, (2011).
30. Amin, M., Abu el-hassan, K., "Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of

- high strength concrete", *Construction and Building Materials* 80,116–124, (2015).
31. Mukharjee, B. B., V. Barai, S., "Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials* 55, 29–37, (2014).
  32. Bhanjaa, S., Sengupta, B., "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete", *Cement and Concrete Research* 35, 743–747, (2005).
  33. Nazari, A., Riahi, Sh., "The effects of SiO<sub>2</sub> nano particles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete", *Composites: Part B* 42, 570–578, (2011).

Archive of SID