

# بررسی آزمایشگاهی اثر پوزولانهای میکروسیلیس و نانو سیلیس بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتنی متخلخل مسلح به الیاف

مهندس محمد کوچک زاده قرا، کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی

دکتر مرتضی حسینی بیگی، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دکتر امیر مدرس، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

## چکیده:

روسازی بتنی برای ساخت راه های مختلفی استفاده می شود. چنانچه روسازی های بتنی با مصالح با دوام و پایدار طراحی و ساخته شوند، می توانند مدت زیادی را بدون هیچ تعمیری و یا با تعمیر اندک سپری کنند. بتن عموماً هزینه های ابتدایی بالایی نسبت به آسفالت دارد اما عمر بیشتر و هزینه های تعمیر و نگهداری کمتری دارد اما با توجه به مشکلات روسازی های آسفالتی در محورهای پرترافیک که اغلب دارای خرابی هایی از جمله ناهمواری ها، ترک و اضمحلال زود هنگام می باشند، کاربرد روسازی های بتنی سبب رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات می گردد.

در این مطالعه به بررسی استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس به عنوان جایگزین درصدی از وزن سیمان در ترکیبات بتن پرداخته شد. علاوه بر آن از الیاف های فولادی (۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد حجمی) و PPS (۰٫۱، ۰٫۱۵ و ۰٫۲ درصد حجمی) به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل استفاده شد. نتایج آزمون های خصوصیات مکانیکی بتن های حاوی میکرو و نانوسیلیس و الیاف بیانگر افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری، کششی و خمشی بوده است. همچنین در همه مخلوط ها مقاومت فشاری، کششی و خمشی در بتن حاوی الیاف و پوزولان به یک صورت بوده .

در تمام طرح ها با افزایش درصد نانوسیلیس تا درصد بهینه ۴ درصد و میکروسیلیس تا ۸ درصد در بتن های حاوی الیاف، مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف بهبود یافت. الیاف نسبت به میکرو و نانوسیلیس تأثیر چندانی بر نفوذپذیری و تخلخل نداشته و این در حالی است که با افزایش مقدار میکرو و نانوسیلیس نفوذپذیری و تخلخل به سرعت کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: میکرو و نانوسیلیس، روسازی بتنی متخلخل، مشخصات مکانیکی، الیاف فلزی و PPS

## مقدمه

روسازی بتنی برای ساخت راهها، فرودگاه های نظامی، خیابان ها، جاده های با اهمیت زیاد و توقفگاه های روباز، محوطه های روباز و انواع دیگر کف سازی ها بکار می روند. چنانچه روسازی های بتنی با مصالح با دوام و پایدار طراحی و ساخته شوند، می توانند دهه های زیادی را بدون هیچ تعمیری و یا با تعمیر اندک سپری کنند. بتن عموماً هزینه های ابتدایی بالایی نسبت به آسفالت دارد اما عمر بیشتر و هزینه های تعمیر و نگهداری کمتری دارد.

به هر حال، در بعضی موارد به علت خطاهای طراحی یا ضعف های اجرایی و یا انتخاب مصالح ضعیف، عمر روسازی بتنی بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. از این رو دقت در انتخاب مصالح و آگاهی مناسب در مورد نسبت اختلاط ها، طراحی و جزییات مربوطه، روش های اجرایی و عملکرد و کاربرد روسازی های بتنی، برای مهندسان راه مهم است.

امروزه اکثر رویه های راهها در ایران از نوع آسفالتی می باشند که از دلایل بارز این امر منابع غنی نفت و قیر فراوان در ایران می باشد. تجربیات کشورهای پیشرفته در این زمینه نشان می دهد عمدتاً راهها یا به صورت آسفالتی و یا بتنی می باشند و یا ترکیبی از آنها.

اما با توجه به مشکلات روسازی های آسفالتی در محورهای پرترافیک که اغلب دارای خرابی هایی از جمله ناهمواری ها، ترک و اضمحلال زود هنگام می باشند، کاربرد دال های بتنی به عنوان روسازی بادوام سبب رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات می گردد. طبق تعریف NRMCA بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل بالا که کاربرد آن در مناطق مسطح بوده و به آب اجازه می دهد به داخل آن نفوذ کند، بنابراین رواناب را در یک منطقه کاهش داده تا ایمنی رانندگان به سبب افزایش مقاومت لغزشی تامین شود و همچنین سبب افزایش ذخیره آب زیرزمینی می شود [۱]. این نوع بتن به بتن بدون ریزدانه معروف بوده و ترکیبی از سیمان پرتلند، درشت دانه، آب، افزودنی و مقدار کمی یا بدون ریزدانه می باشد. مشخصه نفوذپذیری بالای بتن متخلخل سبب شده

به مزیت مدیریت بر آب باران کمک کند، هر چند خصوصیات مکانیکی مانند مقاومت فشاری این نوع بتن به دلیل این مشخصه کاهش پیدا کرده و آن را به راه‌های با ترافیک سبک محدود کرده است. استفاده از بتن متخلخل در طراحی سایتهای ساختمانی می‌تواند کمکی به فرایند ساختمان در جهت مدیریت بر انرژی و مسائل زیست‌محیطی نماید [۱]. به دلیل مزایای فراوان بتن غلطکی و خصوصاً متخلخل خصوصیات این نوع بتن توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۲-۶].

در میان افزودنی‌های پوزولانی به نظر میرسد دوده سیلیس که محصول جانبی کوره‌های قوس الکتریکی است، بهترین کارایی را در بتن‌های توانمند داشته باشد. رفتار آن به دلیل داشتن مقدار زیادی سیلیس بی‌شکل (بیش از ۹۰٪) به صورت دانه‌های کروی با ابعاد بین ۰/۱ تا ۱ میکرو متر است. ماده پوزولانی جدیدی که در این تحقیق معرفی می‌شود، نانو سیلیس نام دارد. این ماده به شکل جامد و یا امولسیون در آب در بازار موجود است که به آن سیلیس ابر ریز بی‌شکل کلئیدی (Ultra-Fine Amorphous Colloidal Silica) نیز می‌گویند. به نظر میرسد این ماده به دلیل میزان بالاتر سیلیس بی‌شکل (بیش از ۹۰٪) و اندازه کوچکتر ذرات (۱ تا ۵۰ نانومتر) عملکرد بهتری نسبت به دوده سیلیس داشته باشد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی بکار رفته در روسازی بتنی متخلخل شامل مصالح سنگی درشت‌دانه (شن) و مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) از معادن آمل می‌باشد. شن به عنوان درشت‌دانه نقش بسیار مهمی در تحمل بارهای وارده بر بتن دارد. لذا به کارگیری دانه‌های شن با مقاومت بالاتر نظیر دانه‌های گرانیتی، در افزایش مقاومت بتن تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین ماسه به عنوان ریزدانه جهت پر نمودن فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها بکار گرفته می‌شود، البته با این تفاوت که در بتن متخلخل به مقدار کمی از ریزدانه استفاده می‌شود.

دانه‌بندی که معمولاً برای روسازی بتنی متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد طبق استاندارد ASTM C33 بوده و شامل (۴,۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر) # ۶۷ و (۱,۱۸ تا ۹,۵ میلی‌متر) # ۸۹ و (۲,۳۶ تا ۹,۵ میلی‌متر) # ۸ می‌باشد که در تحقیق حاضر از دانه‌بندی # ۶۷ استفاده شده است [۱۷]. مصالح سنگی مصرفی در این مطالعه از نوع شکسته بوده است. مشخصات سنگ دانه‌های ریز و درشت طبق روشهای تست C1۲۸, C1۲۷, C۳۳ از استاندارد ASTM تعیین شده است. حداکثر قطر سنگ دانه آن ۱۲/۵ mm بوده است. همچنین چگالی واقعی ریزدانه نیز طبق استاندارد ASTM C1۲۸ برابر  $gr/cm^3$  ۷۹/۲ محاسبه شده است. مشخصات فیزیکی و سنگ دانه‌ها در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سنگ دانه‌های ریز (ماسه) و درشت (شن)

سنگ دانه	شن	ماسه
چگالی ظاهری ( $gr/cm^3$ )	۲/۶	۲/۶۵
وزن مخصوص ظاهری ( $Kg/m^3$ )	۱۵۸۱/۳	۱۷۲۸/۹
رطوبت نسبی (%)	۰/۲	۰/۴
رطوبت اشباع با سطح خشک (%)	۰/۵	۰/۷
مدول نرمی (F.M)	-	۲/۷۹
ارزش ماسه‌ای (S.E) (%)	-	۷۸

### ۲-۲ سیمان

سیمان استفاده‌شده در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان نکا بوده که با توده ویژه‌ی  $gr/cm^3$  ۱۴/۳ و سطح ویژه (سطح بلین)  $gr/cm^2$  ۳۰۵۰ می‌باشد.

### ۲-۳ دوده سیلیس

دوده سیلیس به کار رفته از شرکت تولیدی آلیاژ فرو-سیلیکون ازنا، با چگالی ویژه ۲ و طوسی رنگ میباشد که در ساخت آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی دوده سیلیس نیز در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲) ترکیبات شیمیایی دوده سیلیس

مصالح	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%SO <sub>3</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%L.O.I
دوده سیلیس	۹۳/۱۶	۱/۱۳	۰/۷۲	-	۱/۶	۰/۰۵	-	-	۱/۵۸

## ۲-۴ نانو سیلیس

نانو سیلیس مصرفی در این تحقیق نانو سیلیس آمورف کلونیدی محلول در آب با غلظت ۵۰ درصد است. نانو سیلیس مذکور دارای بیش از ۹۹ درصد سیلیس آمورف بوده که در جدول (۳) خصوصیات فیزیکی این نانو سیلیس آمده است، که با ۲، ۴، ۶ درصد وزن سیمان در سری های مختلف بکار گرفته شد.

جدول (۳): مشخصات فیزیکی نانو سیلیس

حالت	رنگ	pH	نقطه نوب و جوش °C	وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup>	ویسکوزیته mPa.s
مایع	شیری	۹-۱۱	۱۰۰۰۰	۱/۴۰۰-۱/۵۰۰	<۵۰

## ۲-۵ فوق روان کننده مصرفی

در این تحقیق از فوق روان کننده (SP) نسل سوم بر پایه کربوکسیلیک اتر، استفاده شده است این ماده، کدر و ابری رنگ بوده و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد.

## ۲-۶ الیاف

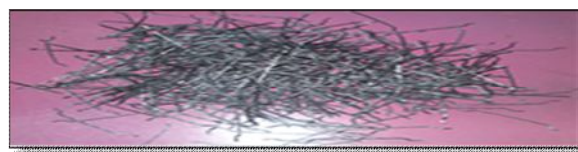
الیاف هایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند عبارتند از:

### ۲-۶-۱ الیاف مصنوعی

الیافی مصنوعی مصرفی از نوع پلی فنیلین سولفاید (PPS) (شکل ۱). جزئیات بیشتر در مورد مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف PPS در جدول (۴) ارائه شده است.

### ۲-۶-۲ الیاف فولادی

الیاف فلزی موجود با قطر ۰/۷ میلی متر و طول ۳۶ میلی متر، به صورت دو طرف قلاب دار با وزن مخصوص ۷/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شده است.



شکل (۱): انواع مختلف الیاف مصرفی، الف) الیاف فولادی ب) الیاف پلی فنیلین سولفاید ((PPS))

جدول (۴): مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی

نسبت منظر	قطر (mm)	طول (mm)	مقاومت کششی kg/cm <sup>2</sup>	مدول یانگ kg/cm <sup>2</sup> × 10 <sup>5</sup>	وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup>	شکل ظاهری	جنس الیاف
-	-	۵۰-۵۴	۲۷۵۰۰	۳/۵	۰/۹۰	صاف	PPS
۵۰	۰/۷	۳۶	۲۱۰۰۰	۱۶	۷/۸	دو طرف قلابدار	فولادی

### ۳- طرح‌های اختلاط بتن

Tennis در جدول ۵ محدوده مقدار مصالح مورد نیاز جهت ساخت بتن متخلخل را پیشنهاد داده است [۷].

جدول (۵): محدوده مقدار مصالح مورد نیاز جهت ساخت بتن متخلخل

مصالح	مقدار مصالح $kg/m^3$
مواد سیمانی	۲۷۰-۴۱۵
سنگدانه	۱۱۹۰-۱۴۸۰
نسبت آب به سیمان	۰/۲۷-۰/۳۴
نسبت سنگدانه به سیمان	۴:۱-۴/۵:۱

همان گونه که در جداول (۶) و (۷) مشاهده می شود ۷ سری طرح اختلاط A, B, C, D, E, F, G در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط سری A1 بتن شاهد بوده و طرح های A تا AV مخلوط های حاوی الیاف و فاقد پوزولان می باشند که مقادیر و جنس الیاف مورد استفاده در جدول (۷) آورده شده است. در مخلوط های سری B, C, D علاوه بر الیاف به ترتیب از ۲و۶،۴ درصد نانو سیلیس استفاده شده است که به صورت وزنی جایگزین سیمان شده است. که به علت اینکه درجه خلوص محلول نانو سیلیس ۵۰٪ می باشد، مقادیر وزنی محلول نانو سیلیس موجود به صورت خالص نبوده، در واقع ۵۰٪ وزنی آن آب و ۵۰٪ آن نانو سیلیس می باشد). در مخلوط های سری E, F, G نیز علاوه بر الیاف به ترتیب از ۴و۱۲،۸ درصد میکروسیلیس استفاده شده است که به صورت وزنی جایگزین سیمان شده است. نسبت آب به مواد پودری در تمامی مخلوطهای نام برده ثابت میباشد. به منظور امکان مقایسه خواص سخت شده بتن های ساخته شده نیاز است اسلامپ تمامی مخلوط ها ثابت نگه داشته شود. باتوجه به اینکه سطح مخصوص میکروسیلیس در مقایسه با سیمان بسیار زیادتر میباشد در نتیجه مقادیر اسلامپ این مخلوط ها باافزودن فوق روان کننده مصرفی ثابت نگه داشته شده است. (%). Vf موجود در جدول های زیر درصد حجمی الیاف یعنی نسبت حجم الیاف به حجم بتن می باشد.

جدول (۶): طرح اختلاط

MIX .NO	Series	Nano Silica (%)	Micro Silica (%)	Fiber (%) Vf	Gravel	Sand	Micro Silica	Cement	Nano Silica	Water	SP
1	A	0	0	-	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
2				0.2	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
3				0.3	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
4				0.5	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
5				0.1	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
6				0.2	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
7				0.2	1386	101	0	350	0	122.5	1.3
1	B	2	0	-	1386	101	0	336	14	115.5	1.3
2				0.2	1386	101	0	336	14	115.5	1.3
3				0.3	1386	101	0	336	14	115.5	1.3
4				0.5	1386	101	0	336	14	115.5	1.3
5				0.1	1386	101	0	336	14	115.5	1.3
6				0.2	1386	101	0	336	14	115.5	1.3
7				0.2	1386	101	0	366	14	115.5	1.3
1	C	4	0	-	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
2				0.2	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
3				0.3	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
4				0.5	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
5				0.1	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
6				0.2	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
7				0.2	1386	101	0	322	28	108.5	1.3
1	D	6	0	-	1386	101	0	308	42	101.5	1.3
2				0.2	1386	101	0	308	42	101.5	1.3
3				0.3	1386	101	0	308	42	101.5	1.3
4				0.5	1386	101	0	308	42	101.5	1.3
5				0.1	1386	101	0	308	42	101.5	1.3
6				0.2	1386	101	0	308	42	101.5	1.3
7				0.2	1386	101	0	308	42	101.5	1.3

جدول (۷): طرح اختلاط

MIX NO	Series	Nano Silica (%)	Micro Silica (%)	Fiber (%) Vf	Gravel	Sand	Micro Silica	Cement	Nano Silica	Water	SP
1	E	0	4	-	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
2				0.2	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
3				0.3	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
4				0.5	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
5				0.1	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
6				0.2	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
7				0.2	1386	101	14	336	0	122.5	1.7
1	F	0	8	-	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
2				0.2	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
3				0.3	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
4				0.5	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
5				0.1	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
6				0.2	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
7				0.2	1386	101	28	322	0	122.5	2.6
1	G	0	12	-	1386	101	42	308	0	122.5	3.9
2				0.2	1386	101	42	308	0	122.5	3.9
3				0.3	1386	101	42	308	0	122.5	3.9
4				0.5	1386	101	42	308	0	122.5	3.9
5				0.1	1386	101	42	308	0	122.5	3.9
6				0.2	1386	101	42	308	0	122.5	3.9
7				0.2	1386	101	42	308	0	122.5	3.9

### ۳-۱- آزمایش بتن تازه

#### ۳-۱-۱- آزمایش اسلامپ

برای سنجش ویژگی بتن های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C143 استفاده شده است. این تست برای اندازه-گیری ویسکوزیته مخلوط در حالت تازه مطرح میشود.

#### ۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

به طور کلی دو نوع نمونه آزمایش فشاری بکار برده می شود که عبارت است از مکعب و استوانه. در انگلیس و آلمان و بسیاری از کشورهای اروپایی نمونه های مکعبی مورد استفاده قرار می گیرد، در استانداردهای آمریکا، فرانسه و استرالیا نمونه های استوانه ای شکل توصیه شده است. در این تحقیق از انواع مختلف نمونه های استوانه ای طبق استاندارد ASTM C39 برای اندازه گیری مقاومت فشاری استفاده شده است.

#### ۳-۳- آزمایش کشش غیرمستقیم

این آزمایش که به آزمایش برزلی نیز معروف است جهت تعیین مقاومت کششی دو نیم شدن بتن بر اساس استاندارد ASTM C496 بکار برده می شود. بدین منظور از نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵ به ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده گردید.

#### ۳-۴- آزمایش مقاومت خمشی و طاقت خمشی

در این آزمایش هدف تعیین مدول گسیختگی و طاقت خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C78 و ASTM C 1018-b94 می باشد که بر روی نمونه های منشوری ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی متر توسط دستگاه (Universal) که مکانیزم آن (Strain Control) بوده و با سرعت ۰/۵ انجام شد. مهم ترین پارامتر مورد استفاده در ارزیابی مقاومت روسازی ها، مقاومت خمشی می باشد. مقاومت خمشی بتن مطابق با استانداردهای ASTM C78 (بارگذاری سه نقطه ای) تعیین می شود. این در حالی است که در بعضی از موسسات تحقیقاتی از آزمایش مقاومت خمشی نقطه مرکزی درج شده در استانداردهای ASTM C293 و یا AASHTO T177 خصوصاً دارای ارزیابی آماده بودن روسازی ها برای بهره برداری های ترافیکی استفاده می شود. سیستم بارگذاری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- سیستم بارگذاری خمشی

### ۳-۵- آزمایش نفوذپذیری بتن متخلخل

بهترین توصیف برای بتن متخلخل و نفوذپذیر، خواص نفوذپذیری و تخلخل آن است. نفوذپذیری بازتابی از چگونگی ارتباط میان منافذ می‌باشد. برای مشخص کردن نفوذپذیری یک جسم، باید ضریب نفوذپذیری آن تعیین شود که عبارت است از میزان جریان مایع عبوری در واحد زمان از واحد سطح مقطع، تحت یک شیب هیدرولیکی واحد که معمولاً بر حسب سانتیمتر بر ثانیه بیان می‌شود. نفوذپذیری بتن متخلخل را می‌توان با استفاده از آزمایش هد افتان تعیین کرد در چنین آزمایشی سطوح جانبی یک نمونه بتنی پوشانده شده و آب تحت فشار بر سطح فوقانی نمونه اعمال می‌شود. زمانی که جریان پایدار پدید آمد مقدار آبی که از ارتفاع معین در مدت زمان مشخصی عبور کرده است، اندازه‌گیری می‌شود. میزان ضریب نفوذپذیری متوسط، طبق رابطه (۱) و بر اساس قانون دارسی و فرض جریان لایه‌ای محاسبه می‌شود. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌تر، به عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش می‌شود.

رابطه (۱)

$$k = aL / At \ln(h_1 / h_2)$$

$k$ : ضریب نفوذپذیری (سانتی‌متر بر ثانیه)

$a$ : مساحت سطح مقطع لوله آب (سانتی‌متر مربع)

$L$ : طول نمونه (سانتی‌متر)

$A$ : مساحت سطح مقطع نمونه (سانتی‌متر مربع)

$t$ : زمان لازم برای رسیدن ارتفاع آب از سطح  $h_1$  به  $h_2$  (ثانیه).

$h_1$ : ارتفاع اولیه آب در لوله (سانتی‌متر)

$h_2$ : ارتفاع نهایی آب در لوله (سانتی‌متر)

### ۳-۶- آزمایش تخلخل بتن

تخلخل مقدار منافذ و حفرات داخل بتن است که به صورت درصدی از مجموع حجم ماده می‌باشد. برای اندازه‌گیری میزان تخلخل نمونه‌های آزمایشی به روش اختلاف بین وزن غوطه وری و وزن نمونه خشک و طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود. ابتدا نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود با توزین آن، وزن خشک  $W_2$  به دست می‌آید. سپس نمونه خشک‌شده در آب وزن شده و وزن غوطه‌وری  $W_1$  به دست می‌آید سپس با استفاده از رابطه (۲) تخلخل نمونه محاسبه می‌شود متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌تر، به عنوان درصد تخلخل گزارش خواهد شد.

رابطه (۲)

$$P(\%) = 100 \left( 1 - \frac{W_2 - W}{Vol \cdot \rho} \right)$$

$P$ : تخلخل کل (%)

$W_1$ : وزن نمونه در آب (کیلوگرم)       $W_2$ : وزن نمونه خشک در هوا (کیلوگرم)

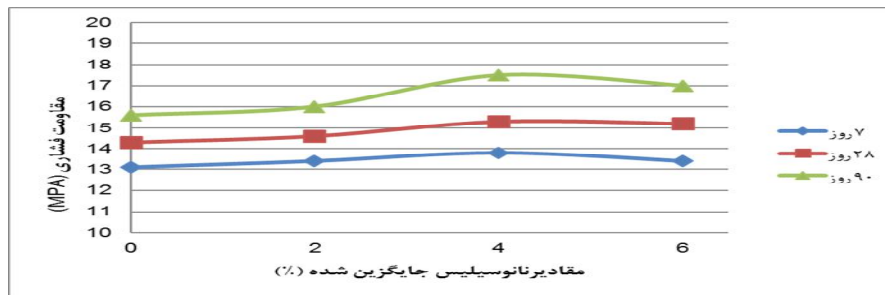
$Vol$ : حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب)       $\rho$ : دانسیته آب در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

## ۴- نتایج آزمایش و تفسیر

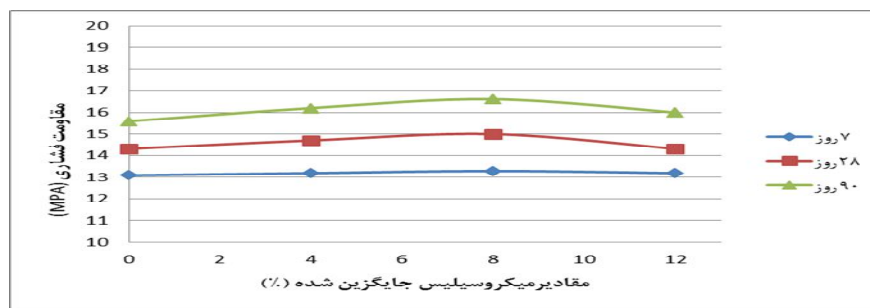
### ۴-۱- نتایج مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای  $15 \times 30$  سانتی‌متری در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز انجام گردید. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مذکور در شکل‌های (۳) و (۴) به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.

تمام نمونه‌ها یک روز پس از ساخت، قالب برداری شده و در حوضچه آب طبق استاندارد ASTM C192 و در دمای  $20^\circ\text{C}$  عمل آوری شده‌اند. شایان ذکر است از هر مخلوط تعداد ۳ نمونه برای قالب‌های استوانه‌ای ساخته شده است.



شکل (۳): نمودار مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی نانو سیلیس فاقد الیاف



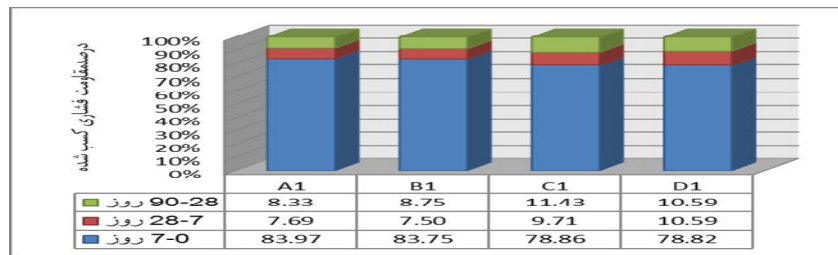
شکل (۴): نمودار مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی میکرو سیلیس فاقد الیاف

ابتدا به بررسی تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری بتن شاهد (A1) می‌پردازیم. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های (۳) و (۴) در طرح اختلاط‌های بتن‌های فاقد الیاف با افزایش (۲ تا ۴) درصد نانو سیلیس (درصد وزن سیمان) شاهد افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد هستیم و بعد از آن یعنی با افزایش ۶ درصد نانو سیلیس شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم در خصوص مخلوط‌های حاوی میکرو سیلیس نیز افزایش جایگزینی آن تا ۸ درصد وزنی سیمان سبب بهبود مقاومت فشاری شده و افزایش بیش از این مقدار تأثیر قابل توجهی در پی نداشت و تا حدودی باعث کاهش مقاومت فشاری شد.

بنابراین در طرح اختلاط‌های فاقد الیاف و میکرو سیلیس (D1, C1, B1, A1) که به ترتیب حاوی ۰ و ۲ و ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس هستند و با توجه به نتایج (۳) با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴٪ شاهد رشد صعودی مقاومت فشاری تا حدود ۱۴٪ مقاومت بتن شاهد، هستیم. با مصرف بیشتر از ۴ درصد نانو سیلیس شاهد نه تنها افزایش مقاومت نیستیم بلکه با کاهش مواجه می‌شویم، و این کاهش را می‌توان به این علت دانست که: از یک طرف مکانیزم عملکرد نانو سیلیس در بتن همان‌طور که بیان شد سبب ایجاد ساختاری متراکم‌تر و خلل و فرج کمتر می‌شود، و از طرف دیگر نانو ذرات با داشتن سطح ویژه بسیار بالای خود که وقتی مقدارشان از حد معینی (مقدار بهینه ۴ درصد در این پروژه) بیشتر شود می‌توانند با یک واکنش فیزیکی، به هم چسبیده و کلوخه‌های ناپایدار را ایجاد کنند. بنابراین می‌توان ۴ درصد نانو سیلیس را درصد بهینه دانست. که این روند در تمام سنین مشهود بوده و مقاومت در تمامی درصدهای نانو سیلیس در سنین مختلف بالاتر از بتن شاهد بوده است. با توجه به روند کسب مقاومت فشاری که در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است،

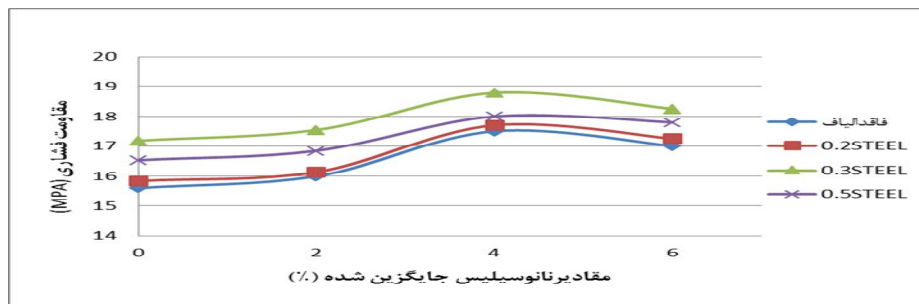
سرعت کسب مقاومت نمونه‌های حاوی نانو سیلیس تا سن ۷ روز بیشترین مقدار بوده و با افزایش سن نمونه‌ها کاهش می‌یابد، بطوریکه در نمونه‌های حاوی ۴ درصد نانو سیلیس بیش از ۷۶ درصد مقاومت نهایی خود را تا سن ۷ روز کسب کرده اند.

با کاهش اندازه ذرات و ریز تر کردن آن به ساختار نانو، درجات ناهمواری اتمی زیادی به وجود می‌آیند که واکنش شیمیایی را تشدید می‌کنند. بنابراین نانو سیلیس انرژی سطحی زیادی دارد و اتم‌ها در سطح فعالیت بالایی قرار دارند که منجر به این می‌شود که اتم‌ها با اتم‌های دیگر بیرونی واکنش دهند و در نتیجه فعالیت پوزولانی نانو سیلیس در سنین پایین بسیار بالا رود.

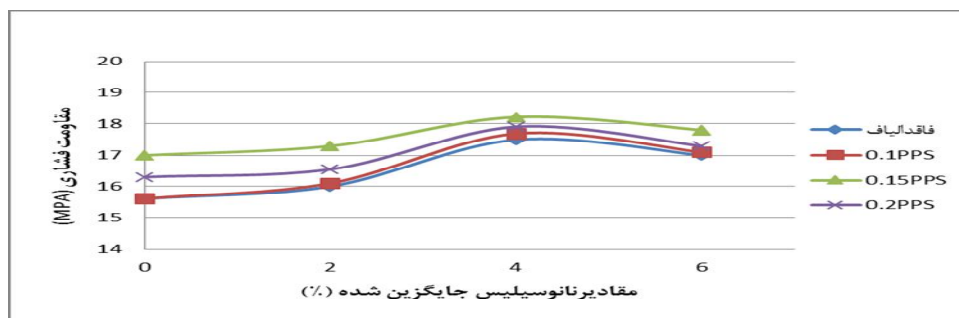


شکل (۵): نمودار درصد مقاومت فشاری کسب شده بتن متخلخل حاوی نانو سیلیس فاقد الیاف

حال به بررسی اثر الیاف و سپس اثر توام نانو سیلیس و الیاف بر مقاومت فشاری بتن شاهد (A1) می‌پردازیم: با بررسی نتایج شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان دریافت که با افزایش درصد الیاف فلزی تا درصد حجمی ۰/۳٪ با افزایش مقاومت فشاری و بعد از آن (در ۰/۵ درصد حجمی) با کاهش مقاومت فشاری مواجه هستیم. و در شکل (۷) و (۹) شاهد روند نزولی مقاومت فشاری با افزایش درصد الیاف PPS می‌باشیم. همچنین شکل‌های (۷) و (۹) نشان می‌دهد که با افزایش الیاف به میزان ۰/۱۵ درصد حجمی مقاومت فشاری افزایش و بعد از آن مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. که در تمام طرح‌ها با افزایش درصد نانو سیلیس تا درصد بهینه ۴ درصد و میکروسیلیس تا ۸ درصد در بتن‌های حاوی الیاف، شاهد تقویت مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف هستیم.



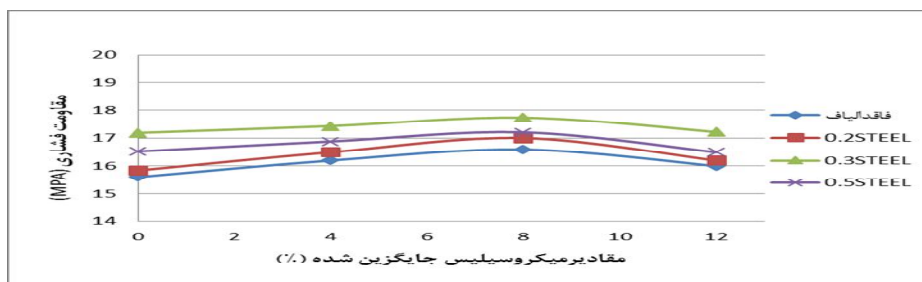
شکل (۶): نمودار مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی نانو سیلیس و الیاف فلزی



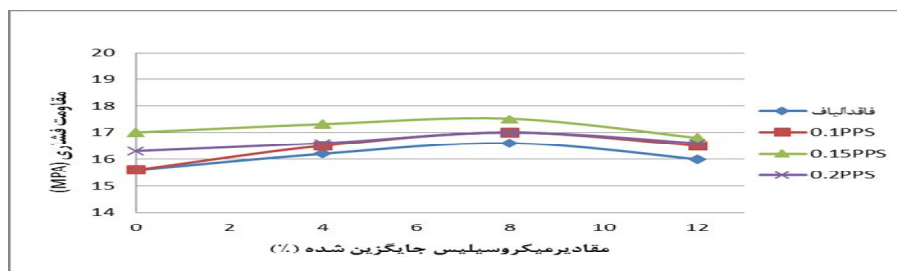
شکل (۷): نمودار مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی نانو سیلیس و الیاف PPS



در طرح اختلاط‌های بتن حاوی الیاف، افزایش مقاومت فشاری ناشی از افزایش درصد الیاف را می‌توان به علت جای‌گیری مناسب الیاف‌ها و توزیع یکنواخت آنها در ماتریس سیمان یا به عبارتی میزان بهینه الیاف مورد نظر در بتن دانست. با توجه به نتایج حاصله از این تحقیق آزمایشگاهی در بتن‌های حاوی الیاف فلزی، مقدار ۰/۳ درصد حجمی، مقدار بهینه برای توزیع مناسب الیاف در بتن می‌باشد. روند کاهش مقاومت فشاری در بتن ناشی از افزایش درصد حجمی الیاف را می‌توان به علت پدیده گلوله شدن (میل الیاف به متمرکز شدن در یک نقطه) الیاف دانست که اگر درصد افزایش الیاف از مقدار بهینه بیشتر شود شاهد توزیع غیر یکنواخت الیاف و به دنبال آن درگیری نامناسب الیاف با ماتریس سیمان می‌باشیم که این امر امکان تأثیرگذاری الیاف را در بهبود ساختار بتن کاهش می‌دهد.



شکل (۸): نمودار مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی میکروسیلیس و الیاف فلزی



شکل (۹): نمودار مقاومت فشاری بتن متخلخل حاوی میکروسیلیس و الیاف PPS

## - نتیجه‌گیری

- در این بررسی به منظور امکان مقایسه بهتر نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های مختلف اسلامپ مخلوط‌ها در محدوده ۸-۱۰ سانتی‌متر ثابت نگهداشته شد. این کار با تغییر در مقدار فوق روان کننده مصرفی در مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس انجام شد و به معنای کاهش شدید میزان اسلامپ در این مخلوط‌ها می‌باشد.
- مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس میزان فوق روان کننده بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها به خود اختصاص داد و این مورد به دلیل سطح مخصوص بسیار بالای ذرات میکروسیلیس در مقایسه با سیمان می‌باشد که باعث خاصیت جذب آب بسیار بالای آن می‌باشد.
- از آنجایی که در ساخت بتن متخلخل از ریزدانه کمتری استفاده می‌شود بنابراین خواص مقاومتی این نوع بتن تا حدود بسیار زیادی وابسته به ترکیبات سیمانی می‌باشد بنابراین با افزایش مقادیر سیلیکات‌های کلسیم و آلومینیم هیدراته (انجام واکنش‌های پوزولانی) خصوصیات مقاومتی بهبود می‌یابد.
- استفاده از میکرو نانوسیلیس سبب افزایش سیلیکات‌های کلسیم و آلومینیم هیدراته شده و این مورد باعث افزایش سطح تماس مواد سیمانی با سنگدانه‌ها شده که در نتیجه آن خواص مکانیکی بتن متخلخل بهبود یافت.

- درصد بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس در این تحقیق برای مخلوط های بتن متخلخل فاقد الیاف به ترتیب ۸ و ۴ درصد وزنی سیمان برآورد شد.
- درصد بهینه میکرو و نانوسیلیس در مخلوط های بدون الیاف بامخلوط های حاوی الیاف تفاوتی نداشت. این بدان معناست که افزودن الیاف به بتن متخلخل حاوی میکرو و نانوسیلیس مقدار بهینه را چندان تحت تاثیر قرار نمی دهد.
- با افزایش درصد الیاف فلزی تا درصد حجمی ۰/۳٪ با افزایش مقاومت فشاری و بعد از آن (در ۰/۵ درصد حجمی) با کاهش مقاومت فشاری مواجه هستیم
- با افزایش الیاف PPS به میزان ۰/۱۵ درصد حجمی مقاومت فشاری افزایش و بعد از آن مقاومت فشاری کاهش می یابد.
- در تمام طرح ها با افزایش درصد نانوسیلیس تا درصد بهینه ۴ درصد و میکروسیلیس تا ۸ درصد در بتن های حاوی الیاف، مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف بهبود یافت.
- با توجه به نتایج حاصله از این تحقیق آزمایشگاهی در بتن های حاوی الیاف فلزی، مقدار ۰/۳ درصد حجمی، مقدار بهینه برای توزیع مناسب الیاف در بتن می باشد.
- با توجه به نتایج حاصله از این تحقیق آزمایشگاهی در بتن های حاوی الیاف PPS، مقدار ۰/۱۵ درصد حجمی، مقدار بهینه برای توزیع مناسب الیاف در بتن می باشد.
- روند کاهش مقاومت فشاری در بتن ناشی از افزایش درصد حجمی الیاف را می توان به علت پدیده گلوله شدن (میل الیاف به متمرکز شدن در یک نقطه) الیاف دانست که اگر درصد افزایش الیاف از مقدار بهینه بیشتر شود شاهد توزیع غیر یکنواخت الیاف و به دنبال آن درگیری نامناسب الیاف با ماتریس سیمان می باشیم که این امر امکان تاثیر گذاری الیاف را در بهبود ساختار بتن کاهش می دهد.
- است با افزایش درصد الیاف فلزی ۰ تا ۰/۵ درصد، با روند صعودی مقاومت کششی مواجه بوده به طوری که در ۰/۵ درصد الیاف فلزی، مقاومت کششی حدود ۴۵ درصد نسبت به مقاومت کششی نمونه شاهد افزایش می یابد
- الیاف نسبت به میکرو و نانوسیلیس تأثیر آن چنانی بر نفوذپذیری و تخلخل نداشته و این در حالی است که با افزایش مقدار میکرو و نانوسیلیس نفوذپذیری و تخلخل به سرعت در حال کاهش می باشد
- نفوذپذیری و تخلخل رابطه مستقیمی با یکدیگر داشته به طوری که با افزایش مقدار تخلخل مقدار ضریب نفوذپذیری افزایش پیدا می کند.

## مراجع

- [۱] NRMCA “CIP 38 –pervious concrete”. 2010, brochure of National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA).
- [۲] Offenber M, 2008. “Is pervious concrete ready for structural applications?” Structure Magazine, February, p. 48.
- [۳] Johnston K. (2009). “Pervious concrete: past, present and future.” Green Building, Concrete Contractor .
- [۴] Schaefer V. R, Suleiman M. T., Wang K, Kevern J. T., and Wiegand P, 2006. “An overview of pervious concrete applications in storm water management and pavement systems .”
- [۵] Yang J. and Jiang. G., 2003. “Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials.” Cement and Concrete Research, vol. 33, pp. 381-386.
- [۶] Amir Modarres, Zeinab Hosseini. December 2014, “ Mechanical properties of roller