

## رفتار بتن سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت اثر بارگذاری یکنواخت فشاری

هوشنگ دباغ\*

استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

سوده اکبرپور

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

### چکیده

مقاومت کم سبکدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن سبک و شکنندگی آن مانعی برای رفتار شکل‌پذیر سازه‌ها در معرض بارهای لرزه‌ای می‌باشد. استفاده از مواد تقویت‌کننده و الیاف برای جبران اثر کاهش مقاومت ناشی از بکاربردن سبکدانه و جلوگیری از شکست ناگهانی بتن، می‌تواند به توانمندی بتن سبک بیانجامد. از طرفی بتن به‌عنوان ماده‌ای ناهمگن دارای رفتار پیچیده‌ای بوده و خصوصیات رفتاری آن کاملاً به نحوه بارگذاری و نوع مصالح تشکیل‌دهنده آن وابسته است. لذا در این تحقیق برای بهبود خواص و زمینه‌سازی کاربرد بتن سبکدانه در سازه‌ها، منحنی تنش-کرنش بتن سبک شامل الیاف فولادی (با درصد حجمی ثابت ۱٪) و پوزولان تقویت‌کننده نانوسیلیس (با درصد وزنی ۱٪، ۳٪ و ۵٪)، تحت اثر بارگذاری یکنواخت فشاری مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفته و پارامترهای موثر بر آن شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با حداکثر تنش بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد الیاف فولادی و نانوسیلیس باعث تغییر رفتار بتن سبک شده و حضور توام آن‌ها در ترکیب بهینه، بیشترین تأثیر را در بهبود رفتار و خواص بتن سبک داشته است. بطوریکه با افزودن ۳٪ نانوسیلیس و ۱٪ الیاف فولادی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن سبک به میزان ۴۶٪ و ۲۶٪ افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: بتن سبک، نانوسیلیس، الیاف فولادی، منحنی تنش-کرنش، بارگذاری یکنواخت فشاری.

\* نویسنده مسئول: h.dabbagh@uok.ac.ir

## ۱- مقدمه

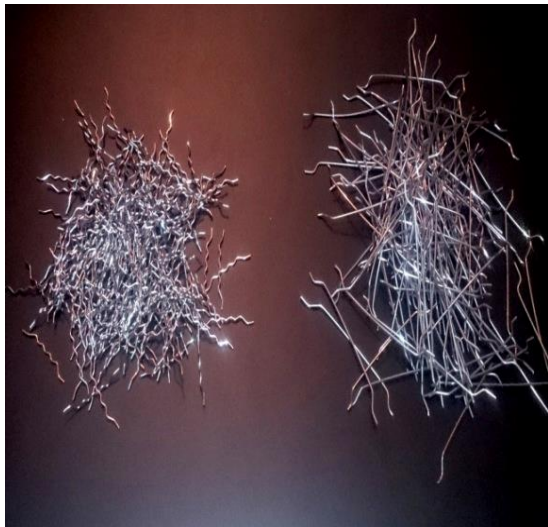
مناسب از این نوع الیاف فولادی ۱/۵-۱٪ پیشنهاد شده است [۱۰-۱۳]. طبق تحقیقات صورت گرفته در میان انواع مختلف الیاف، الیاف فولادی در بهبود خصوصیات بتن سبک کاربرد موثرتری نسبت به دیگر الیاف دارد [۱۰]. استفاده همزمان از افزودنی‌های ذکر شده می‌تواند در صورت ترکیب مناسب به توانمندسازی بتن سبک بیانجامد. لذا در این تحقیق به منظور بهبود خواص بتن سبک و فراهم نمودن زمینه توسعه کاربرد آن در اعضای سازه‌ای، از نانوسیلیس و الیاف فولادی استفاده شده است. از سوی دیگر از پارامترهای موثر در کاربرد سازه‌ای بتن، بررسی خصوصیات رفتاری آن می‌باشد. نوع و مواد تشکیل دهنده بتن و نوع بارگذاری از پارامترهای بسیار موثر در تعیین رفتار بتن است [۱۴ و ۱۵]. لذا شبیه‌سازی و مدل نمودن رفتار سازه‌ها در شرایط مختلف نیازمند داده‌های آماری از رفتار مصالح می‌باشد. محققین بسیاری تاثیر الیاف فولادی را بر منحنی تنش-کرنش بتن سبک سازه‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. طبق بررسی‌های صورت گرفته افزودن الیاف فولادی در بتن سبک به طور قابل توجهی در بخش نزولی منحنی تنش-کرنش تاثیر می‌گذارد ولی این الیاف تاثیر بسیار ناچیزی در بخش صعودی منحنی تنش-کرنش بتن سبک دارد [۱۶-۱۸]. در خصوص تاثیر نانوسیلیس و اثر همزمان نانوسیلیس و الیاف فولادی بر منحنی تنش-کرنش بتن سبک سازه‌ای تحقیقات قابل ملاحظه‌ای صورت نگرفته است. بنابراین در این مقاله به منظور پیش‌بینی رفتار این نوع بتن، خصوصیات رفتاری بتن سبک حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت اثر بارگذاری یکنواخت فشاری ارائه شده و پارامترهای موثر بر منحنی‌های تنش-کرنش از جمله مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر حداکثر تنش مورد بررسی قرار گرفته است که در تحلیل محاسباتی و پیش‌بینی رفتار اعضای سازه‌ای بتن سبک تاثیر گذار می‌باشند.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

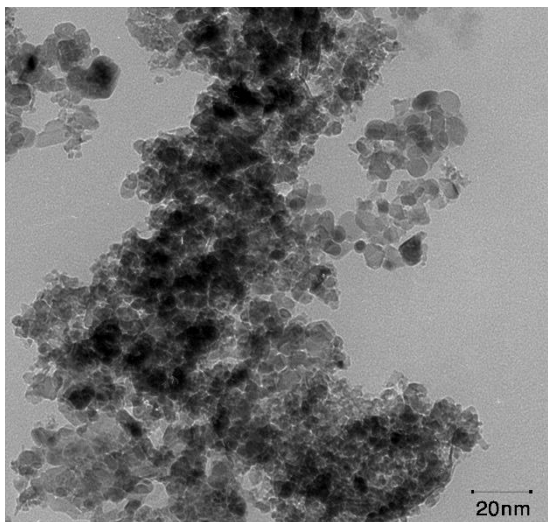
## ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

برای ساخت بتن سبک سازه‌ای از سبکدانه (درشت‌دانه و ریزدانه) اسکریا قروه استفاده شده است. برای تعیین محدوده دانه‌بندی سبکدانه‌های مورد استفاده، طبق ASTM C330 [۱۹] عمل شده که حدود دانه‌بندی در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده است. میزان درصد جذب آب سبکدانه‌ها برای درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۱۱

وزن المان‌های سازه‌ای در ساختمان‌ها به‌عنوان بخش عمده‌ای از بارهای مرده یکی از مهمترین عوامل موثر بر جذب نیروی ناشی از زلزله است. کاربرد بتن سبک سازه‌ای باعث اقتصادی شدن مقاطع و آسیب کمتر در اثر زلزله می‌شود. لازمه ساخت بتن سبک، استفاده از سبکدانه مناسب با ویژگی‌های مورد نیاز است. سنگدانه‌ها به علت اینکه نسبت حجمی بیشتری را در بتن اشغال می‌کنند، تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی بتن دارند. از طرفی شکنندگی و مقاومت کم سبکدانه‌ها منجر به کاهش خصوصیات مقاومتی و شکست ناگهانی بتن سبک می‌شود. برای جبران اثر کاهش خصوصیات مکانیکی بتن سبک ناشی از بکاربردن سبکدانه، می‌توان از مواد پوزولانی و الیاف استفاده کرد. به علت نانو ساختار چند فازی بتن، خصوصیات مکانیکی بتن به نانو ساختار بتن و سیمانی که چسبندگی، پیوستگی و یکپارچگی بتن را به وجود می‌آورد بستگی دارد. بنابراین افزودن نانو ذرات مناسب به داخل بتن می‌تواند باعث تغییر خیلی از ویژگی‌های بتن شود [۱]. در میان نانو ذرات موجود، نانوسیلیس در زمینه سیمان و بتن برای بهبود خواص بتن بطور موثر و کارآمدتری استفاده می‌شود [۲-۷]. در سال‌های اخیر نیز تحقیقاتی در خصوص اثر نانوسیلیس بر خصوصیات فیزیکی و برخی خصوصیات مکانیکی بتن سبک صورت گرفته که نشان دهنده تاثیر نانوسیلیس بر کاهش کارایی و بهبود خواص مکانیکی بتن سبک بوده است [۸ و ۹]. از طرف دیگر، استفاده از الیاف در مواد شکننده مانند بتن سبک یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها بوده و بخصوص باعث تامین شکل‌پذیری، افزایش مقاومت کششی، مقاومت خمشی و بهبود قابلیت جذب انرژی بتن سبک می‌شود [۱۰ و ۱۱]. خاصیت جذب انرژی و طاقبت بتن به نحو مطلوبی می‌تواند خطر شکست سازه‌های بتنی بخصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد. در تحقیقاتی نمونه-های بتن سبک دارای درصد حجمی مختلف الیاف فولادی برای بررسی اثر الیاف بر خواص مکانیکی بتن سبک مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن الیاف فولادی می‌تواند تا حد زیادی خواص مکانیکی بتن سبک شامل مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه را بهبود بخشد، اما اثر کمی بر روی مقاومت فشاری دارد. هم‌چنین نسبت حجمی

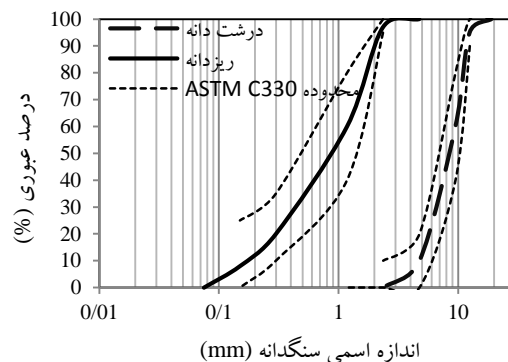


شکل ۲- الیاف فولادی مورد استفاده



شکل ۳- عکس SEM نانوسیلیس

و ۱۴ درصد و چگالی توده‌ای متراکم درشت‌دانه و ریزدانه سبک اسکرپا به ترتیب ۶۸۰ و ۷۷۲ کیلوگرم بر متر مکعب و منطبق با ASTM C330 [۱۹] می‌باشد. در ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ یک کارخانه سامان کرمانشاه با وزن مخصوص  $3140 \text{ kg/m}^3$  و سطح مخصوص  $320 \text{ m}^2/\text{kg}$  استفاده شده است. فوق‌روان‌کننده مصرفی از محصولات آبادگران با نام تجاری POWER PLAST-ES از نوع کاهنده قوی آب بر پایه پلی‌کربوکسیلات فاقد یون کلر و با وزن مخصوص  $1080 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. در این تحقیق از الیاف فولادی در دو شکل صاف با انتهای قلاب‌دار با نسبت طول به قطر ۵۰ و موجدار با نسبت طول به قطر حدود ۳۰ استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۲) و شکل (۲) ارائه شده است. نانوسیلیس مصرفی در این تحقیق بصورت پودری می‌باشد که عکس SEM آن در شکل (۳) نشان داده شده است. دیگر خصوصیات نانوسیلیس مصرفی در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی سبکدانه‌های مورد استفاده

جدول ۱- مقایسه دانه‌بندی استاندارد ASTM C330 با دانه‌بندی مصالح مصرفی

ماکزیمم اندازه سنگدانه (mm)	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۱/۱۸	۰/۳	۰/۱۵
درصد عبوری سبکدانه درشت (ASTM C330)	۹۰-۱۰۰	۴۰-۸۰	۰-۲۰	۰-۱۰	-	-	-
درصد عبوری درشت‌دانه مصرفی	۹۵	۶۰	۱۰	۰	-	-	-
درصد عبوری سبکدانه ریز (ASTM C330)	-	-	-	۹۵-۱۰۰	۴۰-۸۰	۱۰-۳۵	۵-۲۵
درصد عبوری ریزدانه مصرفی	-	-	-	۹۷	۶۰	۲۰	۸

جدول ۲- مشخصات الیاف فولادی مصرفی

الیاف	نام الیاف	شکل ظاهری	سطح مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت طول به قطر	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	کارخانه سازنده
فولادی	SF <sub>1</sub>	صاف با انتهای قلاب‌دار	دایره	۴۰	۰/۸	۵۰	۱۲۰۰	۷۸۰۰	BASF Iran
	SF <sub>2</sub>	موجدار با انتهای مستقیم	دایره	۲۰	۰/۷	۳۰	۱۱۴۰	۷۸۰۰	Ganzho Daye

جدول ۳- مشخصات نانوسیلیس مصرفی

رنگ ظاهری	اندازه ذرات (nm)	PH	درجه خلوص (%)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )
پودر سفید	۱۰-۲۰	۶-۷	۹۹	۱۵۰

### ۲-۲- طرح اختلاط

بتن‌های سبک سازه‌ای باید دارای مقاومت و وزن مخصوص کافی باشند، به گونه‌ای که بتوان از آنها در اعضای سازه‌ای استفاده کرد. طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، بتن سبک سازه‌ای دارای وزن مخصوصی بین ۱۹۰۰-۱۴۰۰ kg/m<sup>3</sup> بوده و حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای آن ۱۷ MPa است [۲۰]. براساس آیین‌نامه ACI 318.11، بتن سبک سازه‌ای بتنی است که دارای حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای ۱۷ MPa و حداکثر وزن مخصوص ۱۸۴۰ kg/m<sup>3</sup> باشد [۲۱]. طرح اختلاط بتن سبک سازه‌ای، بر اساس شیوه پیشنهاد شده در دستورالعمل ACI 211.2 [۲۲] تعیین شد. در تعیین طرح اختلاط حداکثر بعد سنگدانه ۱۲٫۵ میلیمتر و اسلامپ هدف بین ۵۰ تا ۷۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. مقادیر و نسبت اجزای سازنده بتن سبک در جدول (۴) ارائه شده است. در این تحقیق،

جدول ۴- طرح اختلاط بتن سبک (بر حسب kg/m<sup>3</sup>)

شماره طرح	نام طرح	سیمان	درشت‌دانه	ریزدانه	نسبت آب به سیمان	فوق روان کننده	در صد حجمی الیاف فولادی (%)		نانوسیلیس (%) (درصد وزنی سیمان)
							SF <sub>1</sub>	SF <sub>2</sub>	
۱	Ref	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۴	-	-	-
۲	F1	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۶	۰/۷	۰/۳	-
۳	N1	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۶	-	-	۱
۴	N3	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۸	-	-	۳
۵	N5	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳	-	-	۵
۶	N1+F1	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۸	۰/۷	۰/۳	۱
۷	N3+F1	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳	۰/۷	۰/۳	۳
۸	N5+F1	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳/۲	۰/۷	۰/۳	۵

وزن سبکدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) می‌باشد

### ۳-۲- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

ابتدا برای توزیع یکنواخت پودر نانوسیلیس، آن را با بخشی از آب اختلاط با سرعت بالا مخلوط نموده تا زمانیکه یک مخلوط یکنواخت بدست آید. برای ساخت مخلوط بتن، ابتدا درشت‌دانه و سپس ریزدانه درون میکسر ریخته شده و با هم مخلوط شده

سپس به ترتیب سیمان، آب حاوی نانوسیلیس به همراه فوق‌روان-کننده و الیاف فولادی به تدریج به مخلوط اضافه شدند. در نهایت پس از اختلاط کامل مصالح با یکدیگر در میکسر، بتن تازه در قالب‌های مورد نظر در سه لایه ریخته شد. عملیات متراکم کردن مخلوط‌های بتن توسط میز لرزان انجام گرفت. بعد از آماده کردن

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- منحنی تنش- کرنش یکنواخت فشاری

در کاربردهای سازه‌ای بتن سبک، اطلاعات مربوط به منحنی تنش-کرنش بتن اهمیت بسیاری دارد. در این بخش منحنی‌های تنش-کرنش بتن سبک تحت بارگذاری یکنواخت فشاری برای نمونه‌ها در شکل (۵) ارائه شده است. همانطوریکه از شکل (۵) مشاهده می‌شود نمونه شاهد (Ref) دارای افت مقاومت بعد از تنش حداکثر و در نتیجه رفتار شکننده و شکست ترد می‌باشد. قسمت صعودی نمودار تنش-کرنش بتن سبک تا نزدیکی تنش ماکزیمم بصورت خطی است. افزودن الیاف به تنهایی (نمونه F1)، تاثیر چندانی بر شیب قسمت صعودی و نقطه پیک منحنی تنش-کرنش نداشته، در حالیکه قسمت بعد از تنش حداکثر منحنی تنش-کرنش بطور قابل توجه‌ای تحت تاثیر افزودن الیاف می‌باشد (شکل ۵-۵a). بخش نزولی منحنی تنش-کرنش یک عنصر کلیدی اساسی در تحلیل‌های غیرخطی و طراحی اعضای بتن مسلح تحت بارهای فشاری می‌باشد [۱۵]. حضور الیاف فولادی، رفتار بتن سبک را بطور قابل ملاحظه‌ای بصورت شکست نرم اصلاح کرده و در نتیجه باعث افزایش شکل‌پذیری بتن سبک شده است که به علت عملکرد پل‌زدن میان ترک‌ها توسط الیاف فولادی و جلوگیری از گسترش ترک‌ها می‌باشد (شکل ۶). افزودن نانوسیلیس بر قسمت صعودی و نزولی (قبل و بعد از نقطه پیک) منحنی تنش-کرنش بتن سبک تاثیرگذار می‌باشد (شکل ۵-۵b). به‌عنوان نمونه، قسمت صعودی منحنی تنش-کرنش طرح N3 حاوی ۳٪ نانوسیلیس، خطی‌تر و شیب بیشتری دارد. همچنین نقطه پیک و کرنش در تنش ماکزیمم افزایش یافته و قسمت نزولی منحنی با شیب تندتری همراه است. افزایش شیب و افت ناگهانی مقاومت بعد از نقطه پیک منحنی تنش-کرنش نمونه بتن سبک دارای نانوسیلیس، نشان دهنده رفتار ترد این نوع بتن و از عوامل موثر در مدل‌سازی رفتار آن می‌باشد. افزودن همزمان الیاف فولادی و نانوسیلیس به بتن سبک سازه‌ای، تاثیر مثبت و موثری بر هر دو قسمت صعودی و نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری بتن سبک داشته بطوریکه علاوه بر افزایش نقطه پیک و شیب قسمت صعودی نمودار، از افت ناگهانی مقاومت در قسمت نزولی منحنی تنش-کرنش جلوگیری می‌کند که نشانگر بهبود همزمان خصوصیات بتن سبک قبل و بعد از نقطه پیک است (شکل ۵-۵c).

نمونه‌ها و قراردادن آن‌ها در یک فضای مناسب از جهت دما، قالب را روی یک سطح صاف قرار داده و روی آن را با یک پارچه خیس پوشانده تا آب بتن تبخیر نشود و عمل هیدراتاسیون به‌صورت مناسب انجام گیرد. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شدند و در حوضچه‌های نگهداری آب با دمای تقریبی ۲۵- ۲۰ درجه سانتیگراد تا رسیدن به سن معین (۲۸ روز)، تحت عمل-آوری قرار گرفتند. در این تحقیق از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتری استفاده شده است و تعداد آزمونه‌ها برای هر آزمایش حداقل سه عدد می‌باشد.

#### ۲-۴- ابزار و روش‌های آزمایش

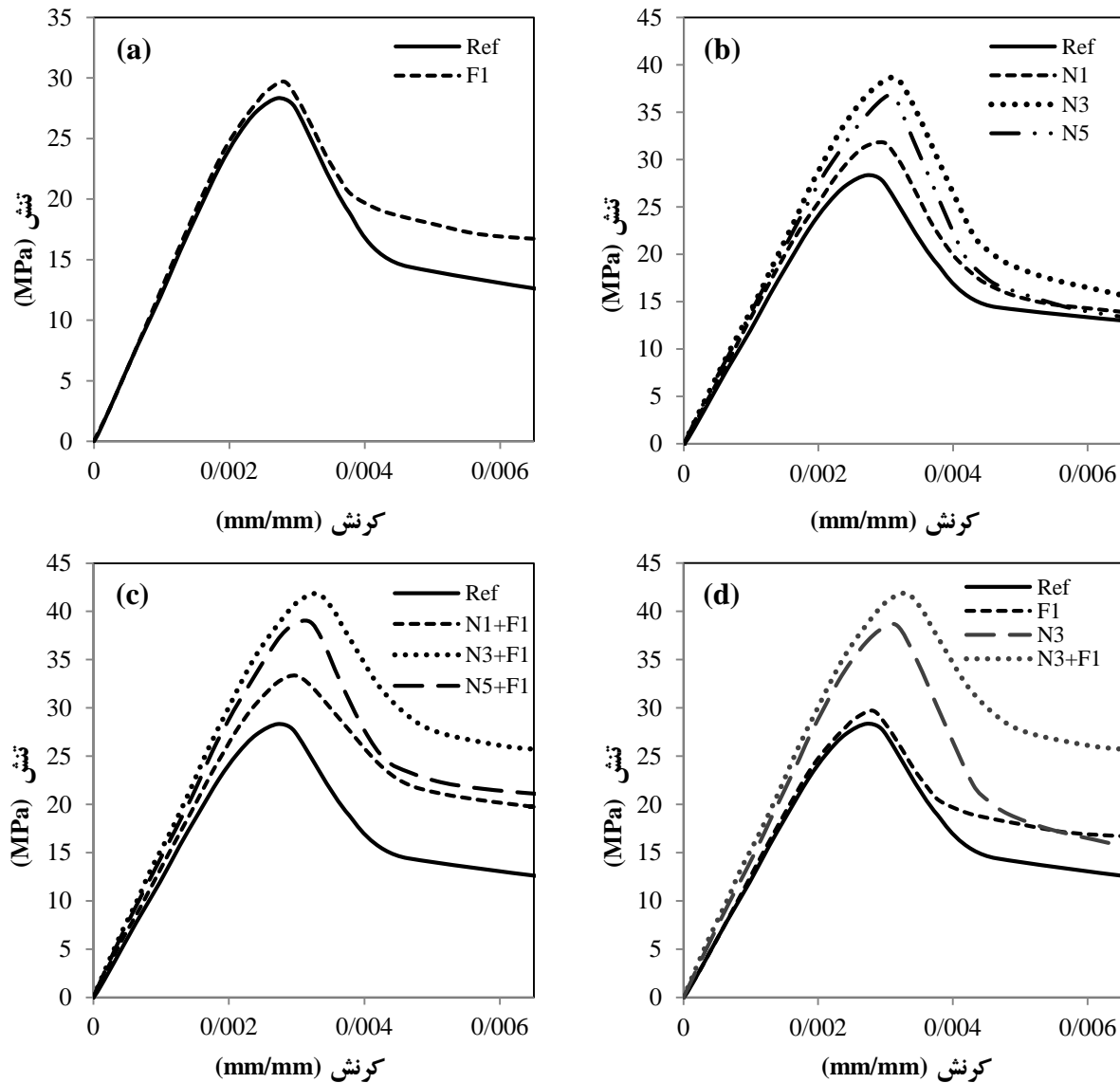
در این تحقیق برای تعیین منحنی‌های تنش-کرنش فشاری و پارامترهای موثر بر آن شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با حداکثر تنش، از دستگاه بارگذاری ELE از نوع نیرو-کنترل با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. نرخ اعمال بار در طول بارگذاری ثابت و برابر ۴/۴ KN/sec می‌باشد. قبل از انجام آزمایش دو انتهای نمونه‌های استوانه‌ای با ملات گوگرد به منظور ایجاد سطحی صاف برای توزیع یکنواخت بار، مطابق دستور کار C617 کلاهک گذاری شده‌اند [۲۴]. برای تعیین تغییر طول محوری نمونه و کرنش‌های مورد نیاز در رسم منحنی-های تنش-کرنش، دو LVDT با دقت  $1 \mu m$  که موازی نمونه-های استوانه‌ای نصب شده‌اند، بکار گرفته شده است (شکل ۴). مقاومت فشاری  $f_c$  و مدول الاستیسیته  $E_c$  نمونه‌ها به ترتیب طبق استاندارد ASTM C39 [۲۵] و ASTM C469 [۲۶] تعیین شده است.



شکل ۴- نحوه قرارگیری نمونه برای تعیین منحنی تنش-کرنش

در قسمت نزولی می‌باشد (شکل ۵-۵). مقایسه منحنی تنش- کرنش نمونه‌ها بیانگر این نکته است که نانوسیلیس و الیاف فولادی بر شکل منحنی تنش-کرنش بتن سبک تاثیر قابل ملاحظه‌ای گذاشته است (شکل ۵-۵d). لیکن ضروری است برای هر نوع از ترکیبات بکار گرفته شده در ساخت بتن سبک، مدل-های رفتاری مرتبط و سازگار با آن مصالح در اهداف طراحی بکار گرفته شود.

قابل ذکر است در میان کلیه نمونه‌ها، افزودن ۳٪ نانوسیلیس به همراه الیاف فولادی (در طرح N3+F1)، بیشترین تاثیر را در بهبود رفتار بتن در قسمت صعودی و نزولی منحنی تنش-کرنش داشته است. در نمونه حاوی الیاف فولادی با افزایش نانوسیلیس تا ۵ درصد (N5+F1) روند بهبود رفتار بتن سبک نسبت به نمونه N3+F1 کاهش یافته است، بطوریکه منحنی تنش-کرنش آن دارای مقاومت کمتری در نقطه پیک و شیب بیشتری



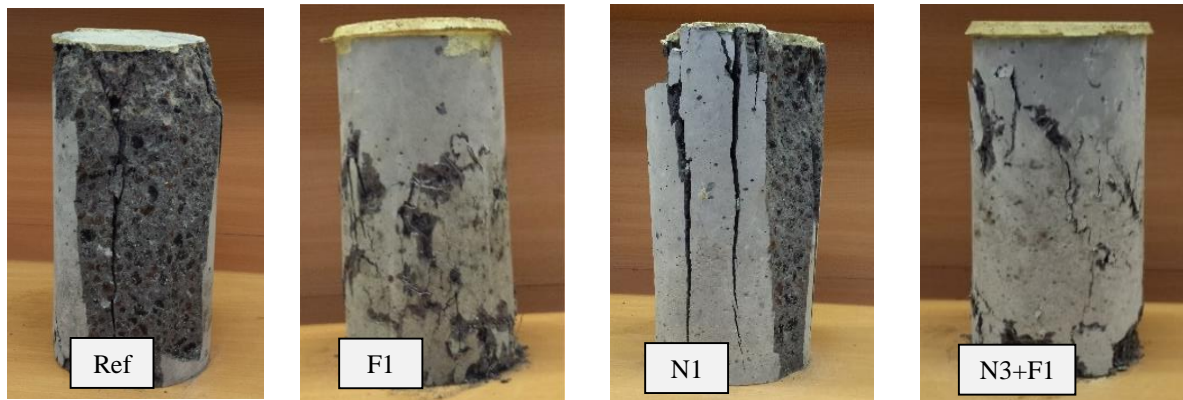
شکل ۵- مقایسه منحنی تنش-کرنش فشاری بتن سبک شاهد با نمونه‌های حاوی:

a- الیاف فولادی، b- نانوسیلیس، c- نانوسیلیس و الیاف فولادی، d- ترکیبات مختلف

ارائه شده است. کلیه پارامترها به تفصیل در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نحوه شکست نمونه‌های استوانه‌ای (شکل ۶)، مشاهده می‌شود در نمونه بتن سبک

پارامترهای اصلی در تعیین منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری یکنواخت فشاری شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر با حداکثر تنش، در تمامی نمونه‌ها در جدول (۵)

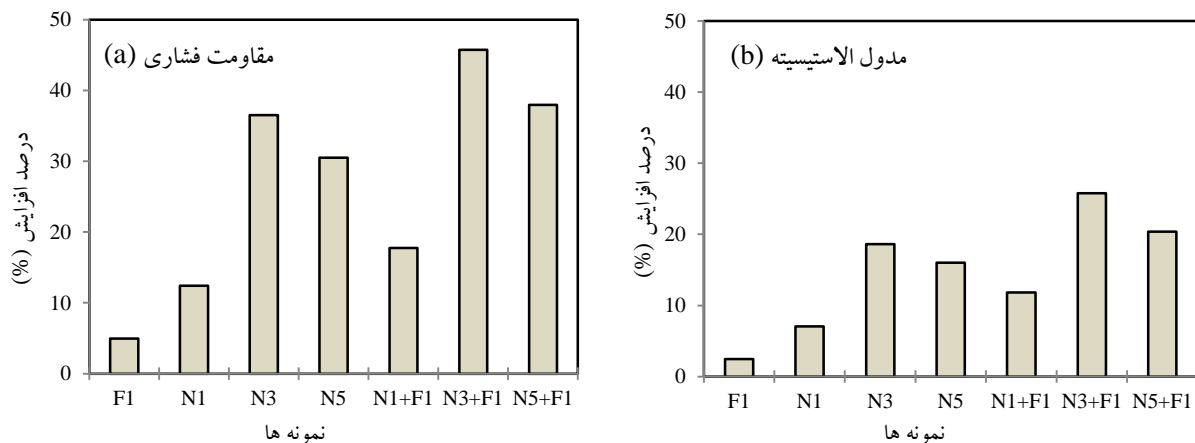
شاهد (Ref) و نمونه حاوی نانوسیلیس (N3) ترک‌ها بصورت عمودی و در طول نمونه ایجاد شده در صورتیکه با افزودن الیاف فولادی (F1)، امتداد گسترش ترک‌ها بصورت مایل بر جهت بارگذاری تغییر کرده و عرض ترک‌ها نیز کاهش می‌یابد که به علت محصورشدگی بتن در حضور الیاف می‌باشد. افزودن نانوسیلیس به نمونه حاوی الیاف (N3+F1) باعث بهبود عملکرد الیاف در کاهش عرض ترک و محدود نمودن گسترش ترک‌ها می‌شود.



شکل ۶- شکست نمونه‌های استوانه‌ای بتن سبک تحت بارگذاری یکنواخت فشاری

جدول ۵- پارامترهای موثر بر منحنی تنش- کرنش فشاری نمونه‌ها

نمونه‌ها	مقاومت فشاری $f_c$ (MPa)	مدول الاستیسیته $E_c$ (GPa)	کرنش در تنش حداکثر $\epsilon_0$ (mm/mm)
Ref	۲۸/۲	۱۲/۱۸	۰/۰۰۲۷۴
F1	۲۹/۶	۱۲/۴۸	۰/۰۰۲۹۰
N1	۳۱/۷	۱۳/۰۴	۰/۰۰۲۹۷
N3	۳۸/۵	۱۴/۴۵	۰/۰۰۳۱۸
N5	۳۶/۸	۱۴/۱۳	۰/۰۰۳۰۶
N1+F1	۳۳/۲	۱۳/۶۲	۰/۰۰۲۹۹
N3+F1	۴۱/۱	۱۵/۳۲	۰/۰۰۳۳۴
N5+F1	۳۸/۹	۱۴/۶۶	۰/۰۰۳۱۹



شکل ۷- درصد افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها نسبت به بتن سبک شاهد

### ۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری طرح F1 حاوی ۱٪ الیاف، برابر با ۲۹/۶ مگاپاسکال که تنها به میزان ۵٪ افزایش یافته است. در نمونه‌های حاوی ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی (طرح‌های N1+F1، N3+F1 و N5+F1) که به ترتیب حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیلیس و ۱٪ الیاف فولادی می‌باشند، با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۳٪ دارای رشد صعودی در مقاومت فشاری می‌باشند. بطوریکه بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح N3+F1 می‌باشد (۴۱/۱ MPa)، که افزایش ۴۶ درصدی نسبت به طرح مبنا داشته است. با افزودن نانوسیلیس به نمونه دارای الیاف بدلیل خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس و افزایش تراکم مخلوط، سطح تماس بیشتری بین الیاف و خمیر سیمان فراهم شده و لذا عملکرد الیاف بهبود می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانوسیلیس دارای مقاومت کمتری نسبت نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس می‌باشند. به این علت که با توجه به عیار سیمان مصرفی در ساخت بتن، مقدار مشخصی کریستال هیدروکسید کلسیم طی واکنش آب با سیمان تولید می‌شود که در اثر ترکیب با نانوسیلیس، ژل متراکم و پرمقاومت ژل کلسیم - سیلیکات - هیدرات را تولید می‌کند. با افزودن نانوسیلیس بیش از حد مورد نیاز برای ترکیب با هیدروکسید کلسیم، اضافه نانوسیلیس مصرفی دچار بیرون روی شده و با جایگزین شدن با سیمان مصرفی باعث کاهش مقاومت خمیر سیمان و کاهش چسبندگی مابین سبکدانه و الیاف با خمیر سیمان می‌شود. دلیل دیگر این کاهش مقاومت می‌تواند عدم توزیع یکنواخت نانوسیلیس در درصدهای بالاتر باشد که در تحقیقات دیگر نیز مشاهده شده است [۲۸، ۲۹].

### ۳-۳- مدول الاستیسته

نتایج نشان می‌دهد که با تغییر مقاومت فشاری بین ۲۸/۲ تا ۴۱/۱ مگاپاسکال، مدول الاستیسته در محدوده ۱۲/۱۸ تا ۱۵/۳۲ گیگاپاسکال تغییر می‌یابد. در این تحقیق کلیه سبکدانه‌ها (درشت - دانه و ریزدانه)، سبکدانه می‌باشند. لذا به علت مدول الاستیسته پایین و تخلخل بالای سبکدانه‌ها، مدول الاستیسته این بتن سبک پایین می‌باشد. با توجه به جدول (۵) و شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود با افزودن نانوسیلیس تا ۳ درصد، روند افزایشی در مدول الاستیسته بتن سبک ایجاد شده است. افزودن الیاف به تنهایی کمترین تاثیر (۲/۵٪ افزایش) و افزودن ۳٪ نانوسیلیس به همراه

در این تحقیق با ترکیبات مختلف نانوسیلیس و الیاف فولادی بتن سبک با مقاومت فشاری در محدوده ۲۸/۲ تا ۴۱/۱ مگاپاسکال بدست آمده است. ابتدا به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن شاهد (Ref) پرداخته می‌شود. با توجه به جدول (۵) و شکل (۷-ا) مشاهده می‌شود با افزودن نانوسیلیس تا ۳ درصد، روند افزایشی در مقاومت فشاری بتن سبک ایجاد شده است و بعد از آن یعنی با افزودن ۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. بهبود مقاومت فشاری در اثر افزایش نانوسیلیس تا ۳ درصد را می‌توان با مکانیزمی به شرح زیر که سبب بهبود ریز ساختار و در نتیجه افزایش ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن می‌شود، بیان نمود [۲۷]:

- واکنش پوزولانی: مقدار زیادی کریستال هیدروکسید کلسیم طی واکنش سیمان و آب تولید می‌شود. کریستال  $Ca(OH)_2$  کریستالی شش گوشه است و در میان ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و ماتریس خمیر سیمان قرار دارد و این امر برای مقاومت‌های بتن مضر می‌باشد. نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالای خود بسیار واکنش پذیر است، در نتیجه با  $Ca(OH)_2$  به سرعت واکنش داده و ژل کلسیم - سیلیکات - هیدرات را تولید می‌کند، پس در این واکنش پوزولانی اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد و ژل متراکم و پرمقاومت  $C-S-H$  که حاصل واکنش پوزولانی است، با پر کردن فضاهای خالی باعث افزایش چگالی ناحیه انتقالی می‌شود و در نتیجه مقاومت و دوام بتن افزایش می‌یابد.

- خاصیت ریز پرکنندگی: قطر میانگین ذرات ژل  $C-S-H$  تقریباً برابر ۱۰ نانومتر می‌باشد لذا با خاصیت پرکنندگی خلل و فرج موجود، باعث ایجاد یک ماتریس خمیر چسبنده متراکم تر می‌شود. - کنترل کریستال سازی: در صورتی که مقدار نانو ذرات و فواصل بین آن‌ها مناسب باشد، روند کریستال سازی کریستال‌ها مانند:  $Ca(OH)_2$  در ناحیه انتقالی کاهش یافته و در نتیجه ماتریس خمیر سیمان یکنواخت تر و متراکم تر می‌گردد.

در این تحقیق با افزودن نانوسیلیس تا مقدار ۳ درصد، مقاومت فشاری بتن سبک نسبت به بتن شاهد تا حدود ۳۷٪ افزایش یافته و به مقدار ۳۸/۵ مگاپاسکال رسیده است. با توجه به جدول (۵) و شکل (۷-ا) می‌توان دریافت که افزودن الیاف فولادی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن سبک نداشته است. بطوریکه مقدار



نتایج حاصل از رابطه (۱) تطابق مناسبی با این نوع بتن و مصالح مصرفی در آن دارد (جدول ۶). قابل ذکر است از داده‌های مربوط به طرح‌های حاوی ۵٪ نانوسیلیس (N5 و N5+F1) به علت وجود نانوسیلیس بیش از حد بهینه صرف نظر شده است.

### ۳-۴- کرنش در حداکثر تنش فشاری

کرنش در حداکثر تنش یکی از پارامترهای اصلی و تاثیرگذار بر منحنی تنش-کرنش بتن می‌باشد. با افزایش مقاومت فشاری بتن سبک در محدوده ۲۸/۲ تا ۴۱/۱ مگاپاسکال، کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری از ۰/۰۰۲۷۴ تا ۰/۰۰۳۳۴ تغییر می‌کند. با توجه به نتایج جدول (۵)، مشاهده می‌شود با افزودن الیاف به تنهایی تغییر ناچیزی در کرنش متناظر با حداکثر تنش فشاری ایجاد شده، درحالیکه افزودن نانوسیلیس باعث ایجاد کرنش‌های بزرگتری در حداکثر تنش بتن سبک می‌شود. در خصوص تخمین بهتر کرنش متناظر با حداکثر تنش برای نمونه‌های بتن سبک موجود در این مقاله، رابطه‌ای در قالب رابطه (۲) با استفاده از تحلیل رگرسیون ارائه شده است:

$$\epsilon_0 = [0.982 f_{c0} + 1.13 V_f + 1.46 N] \times 10^{-4}, R^2 = 0.96 \quad (2)$$

در این رابطه،  $\epsilon_0$  کرنش در تنش ماکزیمم بر حسب mm/mm،  $f_c$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتن سبک شاهد بر حسب مگاپاسکال،  $V_f$  درصد حجمی الیاف فولادی و  $N$  درصد وزنی نانوسیلیس (حداکثر ۳٪) می‌باشد.

### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر رفتار بتن سبک سازه‌ای تحت بارگذاری یکنواخت فشاری پرداخته شده است. در این راستا بتن سبک با رفتار و خصوصیات مکانیکی بهبود یافته تولید شده است. در محدوده آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- افزودن الیاف فولادی به تنهایی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن سبک نداشته است و فقط قسمت بعد از تنش حداکثر منحنی تنش-کرنش را تحت تاثیر قرار داده و منجر به تغییر مود خرابی ترد به شکل پذیر شده است.

الیاف فولادی بیشترین تاثیر را بر مدول الاستیسیته بتن سبک (۲۶٪ افزایش) داشته‌اند. بنابراین افزودن الیاف به تنهایی به بتن سبک راه حل مناسبی به منظور افزایش مدول الاستیسیته نمی‌باشد. با توجه به اینکه مدول الاستیسیته بتن تحت تأثیر مدول الاستیسیته اجزای تشکیل‌دهنده آن از جمله خمیر سیمان قرار دارد، بنابراین افزایش مدول الاستیسیته با افزایش نانوسیلیس (تا ۳٪) که با کاهش تخلخل خمیر سیمان و افزایش مقاومت فشاری همراه است، بدیهی می‌باشد و به علت ایجاد بتن متراکم‌تر، سختی بتن و در نتیجه مدول الاستیسیته افزایش یافته است. بطوریکه طرح N3+F1 دارای بیشترین مقدار مدول الاستیسیته با مقدار ۱۵/۳۲ گیگاپاسکال می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد خصوصیات مکانیکی بتن سبک به نوع سبکدانه و مصالح مصرفی بستگی دارد. آیین‌نامه-ها و محققان معادلات متفاوتی را برای ارتباط مقاومت فشاری با مدول الاستیسیته بتن سبک ارائه نمودند [۲۱، ۳۰، ۳۱]. در این مقاله با تحلیل رگرسیون بر روی داده‌های تجربی، رابطه‌ای برای تعیین مدول الاستیسیته بر حسب مقاومت فشاری بتن سبک شاهد، درصد الیاف فولادی و نانوسیلیس ارائه شده است:

$$E_c = 0.43 f_{c0} + 0.55 V_f + 0.84 N, R^2 = 0.98 \quad (1)$$

در این رابطه،  $E_c$  مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال و  $f_{c0}$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتن سبک شاهد بر حسب مگاپاسکال،  $V_f$  درصد حجمی الیاف فولادی و  $N$  درصد وزنی نانوسیلیس (حداکثر ۳٪) می‌باشد.

جدول ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و رابطه پیشنهادی در

خصوص مدول الاستیسیته

نمونه‌ها	مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش	مدول الاستیسیته از رابطه پیشنهادی
	Ec (GPa)	Ec (GPa)
Ref	۱۲/۱۸	۱۲/۱۳
F1	۱۲/۴۸	۱۲/۶۷
N1	۱۳/۰۴	۱۲/۹۷
N3	۱۴/۴۵	۱۴/۶۴
N1+F1	۱۳/۶۲	۱۳/۵۱
N3+F1	۱۵/۳۲	۱۵/۲۰

- [3]. Oertel, T., Hutter, F., Tänzer, R., Helbig, U. and SEXTL, G. "Primary particle size and agglomerate size effects of amorphous silica on ultra-high performance concrete", *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 61-67, 2013.
- [4]. S. Kawashima, P. Hou, D. J. Corr and S. P. Shah, "Modification of cement-based materials with nanoparticles", *Cement and Concrete Composites*, 36, pp. 8-15, 2013.
- [5]. R. Yu, P. Spiesz and H. J. H. Brouwers, "Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount", *Construction and Building Materials*, 65, pp. 140-150, 2014.
- [6]. S. Haruehansapong, T. Pulngern and S. Chucheeprakul, "Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>", *Construction and Building Materials*, 50, pp. 471-477, 2014.
- [7]. M. Amin and K. Abu el-Hassan, "Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete", *Construction and Building Materials*, 80, pp. 116-124, 2015.
- [8]. Y. Gao and C. Zou, "Experimental study on segregation resistance of nanoSiO<sub>2</sub> fly ash lightweight aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 93, pp. 64-69, 2015.
- [9]. H. Du, S. Du and X. Liu, "Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 82, pp. 114-122, 2015.
- [10]. M. Hassanpour, P. Shafiq and H. B. Mahmud, "Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement—a review", *Construction and Building Materials*, 37, pp. 452-461, 2012.
- [11]. J. Choi, G. Zi, S. Hino, K. Yamaguchi, and S. Kim, "Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 69, pp. 381-389, 2014.
- [12]. D. J. Kim, A. E. Naaman and S. El-Tawil, "Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites", *Cement and Concrete Composites*, 30, pp. 917-928, 2008.
- [13]. H. T. Wang and L. C. Wang, "Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 38, pp. 1146-1151, 2013.
- [14]. T. H. Almusallam and S. H. Alsayed, "Stress-strain relationship of normal, high-strength and lightweight concrete", *Magazine of Concrete Research*, 47, pp. 39-44, 1995.

- مقاومت فشاری بتن سبک با افزودن ۳ درصد نانوسیلیس به میزان ۳۷ درصد افزایش یافته است که تاثیر قابل توجهی می‌باشد. بنابراین با افزودن مقدار کافی از ذرات نانوسیلیس به علت ایجاد ژل متراکم و پرمقاومت C-S-H، ناحیه تماس خمیر سیمان با سنگدانه بهبود یافته و بتنی منظم‌تر و متراکم‌تر با افزایش مقاومت خواهیم داشت بطوریکه افزایش مدول الاستیسته بتن سبک را نیز در پی داشته است (۱۹ درصد افزایش). ایجاد کرنش بزرگتر در حداکثر تنش از تاثیرات دیگر نانوسیلیس بر بتن سبک می‌باشد.

- افزودن نانوسیلیس به تنهایی باعث بهبود رفتار بتن سبک در قسمت صعودی منحنی تنش-کرنش شده در حالیکه اثر منفی در قسمت نزولی آن گذاشته و شکست تردتری را در بتن سبک ایجاد کرده است.

- افزودن نانوسیلیس به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، به دلیل افزایش تراکم مخلوط و ایجاد سطح تماس و چسبندگی بیشتر بین الیاف و خمیر سیمان، باعث بهبود رفتار بتن سبک شده است. بطوریکه با ترکیب ۳ درصد نانوسیلیس و یک درصد الیاف فولادی بیشترین مقاومت فشاری (۴۶ درصد افزایش) و مدول الاستیسته (۲۶ درصد افزایش) برای بتن سبک در این تحقیق حاصل شده است.

- حضور توام الیاف فولادی و نانوسیلیس، با افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسته و همچنین تغییر مود شکست و افزایش شکل‌پذیری بتن سبک، بهبود کلی رفتار بتن سبک در قبل و بعد از نقطه پیک به همراه داشته است.

در نهایت با توجه به تاثیر قابل توجه نانوسیلیس و الیاف فولادی بر منحنی تنش-کرنش بتن سبک نیاز به ارائه مدل‌های رفتاری جدید در تحلیل محاسباتی اجزا محدود برای پیش‌بینی رفتار اعضای سازه‌ای این نوع بتن می‌باشد.

## ۵- مراجع

- [1]. Birgisson, B., Mukhopadhyay, A., Geary, G., Khan, M., and Sobolev, K. "Nanotechnology in concrete materials", *Transportation research circular*, E-C170, 2012.
- [2]. Kong, D., Du, X., Wei, S., Zhang, H., Yang Y. and Shah, S. P. "Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials", *Construction and Building Materials*, 37, pp. 707-715, 2012.

- [28]. M. Bolhassani and M. Samani, "Effect of type, size, and dosage of nanosilica and microsilica on properties of cement paste and mortar", *ACI Material Journal*, 112, pp. 1-6, 2015.
- [29]. S. Haruehansapong, T. Pulngern and S. Chucheeesakul, "Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>". *Construction and Building Materials*, 50, pp. 471-477, 2014.
- [30]. M. H. Zhang and O. E. Gjvovr, "Mechanical properties of high-strength lightweight concrete", *ACI Material journal*, 88, pp. 240-247, 1991.
- [31]. P. T. Wang, S. P. Shah and A. E. Naaman, "Stress-strain curve for normal and lightweight concrete in compression", *American Concrete Institute*, 75, pp. 603-611, 1978.
- [15]. A. Tasnimi, "Mathematical model for complete stress-strain curve prediction of normal, light-weight and high-strength concretes", *Magazine of Concrete Research*, 56, pp. 23-34, 2004.
- [16]. O.A. Duzgun, R. Gul and A.C. Aydin, "Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete", *Materials Letters*, 59, pp. 3357-3363, 2005.
- [17]. G. Campione, C. Cucchiara L.L. Mendola and M. Papia, "Steel-concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions", *Engineering Structures*, 27, pp. 881-902, 2005.
- [18]. F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea and R.N. Swamy, "Stress-strain behavior of steel fiber reinforced concrete in compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, pp. 255-63, 2008.
- [19]. ASTM C330/ C330M-14, "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", *American Society for Testing and Materials*, 2014.
- [۲۰]. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، "طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه"، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی، ۱۳۹۲.
- [21]. ACI 318-11, "Building code requirements for structural concrete and commentary", *American Concrete Institute*, 2011.
- [22]. ACI 211.2-98, "Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete", *American Concrete Institute*, 1998, Reapproved 2004.
- [۲۳]. ه. دباغ، س. اکبرپور و ک. عمورضایی، "تاثیر خصوصیات هندسی الیاف فولادی بر خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای"، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۵.
- [24]. ASTM C617 / C617M-15, "Standard practice for capping cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, 2015.
- [25]. ASTM C39/C39M-15, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *American Society for Testing and Materials*, 2015.
- [26]. ASTM C469/C469M-14, "Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression", *American Society for Testing and Materials*, 2014.
- [۲۷]. م. ح. بیگی، ج. برنجیان و ا. لطفی، "بررسی خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم الیافی حاوی ذرات نانوسیلیس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۹۰.

## Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano Silica and Steel Fibers under Compressive Monotonic Loading

H. Dabbagh\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

S. Akbarpour

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

### Abstract

The weak mechanical properties of lightweight aggregate concrete (LWAC) such as low strength and brittleness discourage its vast application in structural members. An effective method to improve the mechanical properties of concrete is the use of pozzolanic and reinforcing materials. The loading condition and the ingredients of mix compositions affect the concrete behavior, so more extensive and detailed research into the effects of type of concrete material on the stress-strain curve is required in order to predict the accurate response of structural members. In this paper, various amounts of Nano-Silica (1, 3 and 5 percent by weight of cement) and steel fiber with constant volume fraction of 1% were added to mixtures and the effects of these parameters on the compressive stress-strain curves were investigated. Furthermore, the key parameters that control the concrete behavior under compressive monotonic loading, including compressive strength, modulus of elasticity and strain at peak stress were evaluated. Results indicate that the optimized combined use of steel fibers and Nano-silica has significant effect on the improvement of compressive behavior of LWAC. The compressive strength and modulus of elasticity in the mix containing 3% Nano-silica and 1% steel fiber increase by about 46% and 26% compared to the plain LWAC mix.

**Keywords:** Lightweight Aggregate Concrete, Nano-silica, Steel Fiber, Stress- strain Curve, Compressive Monotonic Loading.

---

\* Corresponding Author: h.dabbagh@uok.ac.ir