

تحقیقات بتن

سال سیزدهم، شماره چهارم

زمستان ۹۹

ص ۹۹ - ۱۱۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۱۸

## روابط تنش- کرنش بتن سبک حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری

سوده اکبرپور \*

استادیار موسسه غیرانتفاعی سارویه.

هوشنگ دباغ

استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه کردستان.

### چکیده

یکی از موارد مورد نیاز جهت شبیه‌سازی و تعیین مدل رفتاری برای سازه‌ها در شرایط مختلف داشتن داده‌های آماری رفتار مصالح است. بتن به‌عنوان ماده‌ای ناهمگن دارای رفتار بسیار پیچیده‌ای است و خصوصیات رفتاری آن به نحوه بارگذاری و نوع مصالح تشکیل دهنده آن وابسته است. با تعیین رفتار بتن تحت بارهای مختلف می‌توان رفتار اعضای ساخته شده از این مصالح را با استفاده تحلیل عددی اجزا محدود شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود. در این تحقیق منحنی تنش-کرنش بتن سبک حاوی الیاف فولادی و پوزولان تقویت‌کننده نانوسیلیس به صورت تک و ترکیبی تحت اثر بارگذاری دوره‌ای فشاری بررسی شده است. منحنی باربرداری و بارگذاری مجدد، نقطه مشترک، کرنش پلاستیک، کرنش باربرداری و بارگذاری مجدد از جمله پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق می‌باشند. با توجه به تأثیر قابل توجه نانوسیلیس و الیاف فولادی بر منحنی‌های تنش-کرنش بتن سبک، مدل‌های رفتاری فشاری دوره‌ای در خصوص این نوع بتن ارائه شده است.

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

\* نویسنده مسئول: so.akbarpour@gmail.com

## ۱- مقدمه

آزمایشگاهی و عددی پرداختند [۱۰]. بارگذاری نمونه‌ها در محدوده فشاری بوده و مقاومت فشاری بتن مورد آزمایش بین ۲۰ الی ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده بود. این تحقیقات بر روی ۴۸ نمونه بتنی استوانه‌ای صورت گرفته است. این محققین در مدل ارائه شده خود به این نتیجه رسیدند که منحنی بارگذاری را می‌توان با یک معادله درجه دوم و منحنی بارگذاری مجدد را با یک خط راست مدل کرد. کارسان و جیرسا<sup>۲</sup> تحقیقاتی بر روی ستون‌های مستطیلی تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری انجام دادند [۱۱]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که یک منحنی پوش وجود دارد که می‌تواند با منحنی بارگذاری یک‌نواخت منطبق باشد. بان و شو<sup>۳</sup> به صورت آزمایشگاهی به تحقیق درباره‌ی بارگذاری دوره-ای در محدوده فشاری بتن پرداختند [۱۲]. آن‌ها نمونه‌های استوانه-ای به ابعاد ۱۵۲×۷۶ میلی‌متر را مورد آزمایش قرار داده و سپس مدل‌هایی مطابق با نتایج آزمایشگاهی ارائه نمودند. پالمو و ویکو<sup>۴</sup> [۱۳] نیز روابط و مدل‌هایی برای رفتار بتن تحت اثر بارگذاری دوره‌ای با رویکرد میدان فشاری ارائه دادند. سیما و همکاران<sup>۵</sup> یک مدل رفتاری بتن تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری و کششی ارائه داده‌اند. در تعیین این مدل به مقاومت و کاهش سختی در هر سیکل بارگذاری کششی و فشاری و شکل منحنی‌های بارگذاری و بارگذاری توجه ویژه‌ای شده است. در مدل رفتاری پیشنهادی کلیه داده‌های ورودی مورد نیاز را می‌توان از طریق منحنی‌های تنش- کرنش یکنواخت فشاری و کششی بدست آورد [۱۴]. لی و همکاران<sup>۶</sup> به بررسی رفتار تنش-کرنش بتن معمولی الیافی تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری تک محوری پرداخته‌اند. ۳۶ نمونه استاندارد استوانه‌ای با درصد‌های حجمی مختلف الیاف فولادی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌های الیافی سطح تنش تحت بارگذاری دوره‌ای در مقایسه با حالت بارگذاری یکنواخت، کاهش اندکی داشته است. هم‌چنین افزودن الیاف فولادی منجر به کاهش قابل توجه‌ای در کرنش پلاستیک و افزایش سختی الاستیک شده است [۱۵].

مدل نمودن رفتار سازه‌ها در شرایط مختلف نیازمند داده‌های آماری از رفتار مصالح در آن محیط‌ها می‌باشد. طبق مطالعه پیشینه

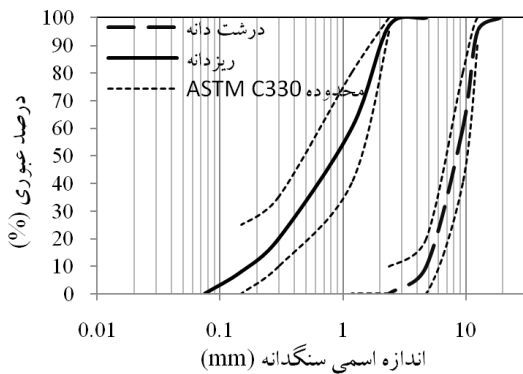
کاربرد بتن سبک سازه‌ای با توجه به مزایای متعدد آن و لزوم سبک‌سازی ساختمان‌ها ضرورت زیادی دارد. شکنندگی و مقاومت کم سبک‌دانه‌ها در ساخت بتن سبک سازه‌ای، منجر به کاهش خصوصیات مقاومتی و شکست ناگهانی بتن سبک می‌شود. استفاده از الیاف به‌ویژه الیاف فولادی در مواد شکننده مانند بتن سبک یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها بوده و سبب تأمین شکل‌پذیری، بهبود خصوصیات مکانیکی و قابلیت جذب انرژی بتن می‌شود [۱ و ۲]. از طرف دیگر، برای جبران اثر کاهش مقاومت ناشی از به‌کاربردن سبک‌دانه نیز می‌توان از پوزولان‌های تقویت‌کننده بتن 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 به‌وجود می‌آورد نیز بستگی دارد [۳]. در میان نانو ذرات، نانوسیلیس در زمینه سیمان و بتن برای بهبود مقاومت بتن کاربرد موثرتری دارد [۴ و ۵] و استحکام فشاری خمیر سخت شده سیمان و استحکام پیوندی سنگ‌دانه و الیاف را با خمیرسیمان به‌طور مؤثری بهبود می‌بخشد [۶ و ۷]. استفاده همزمان از افزودنی‌های ذکر شده در صورت ترکیب مناسب می‌تواند به توانمندسازی بتن سبک بیانجامد.

نوع و مواد تشکیل‌دهنده بتن و نحوه بارگذاری از پارامترهای بسیار مؤثر در تعیین رفتار بتن است [۸ و ۹]، لذا برای پیش‌بینی رفتار اعضای سازه‌ای در تحلیل محاسباتی اجزا محدود، نیاز به مدل‌های رفتاری دقیق مصالح می‌باشد. نبود مدل‌های رفتاری مناسب و اعتبار سنجی شده برای این نوع بتن سبک، لزوم تحقیق در این زمینه را بیشتر نشان می‌دهد.

بارگذاری دوره‌ای حالت خاصی از بارگذاری است که در محدوده تنش‌های کششی و فشاری به‌صورت هم‌زمان و یا جداگانه اعمال می‌گردد. این نوع بارگذاری‌ها می‌توانند به‌صورت پیوسته و یا گسسته در نظر گرفته شوند و در خصوص شبیه‌سازی بارگذاری لرزه‌ای در تحلیل‌های عددی کاربرد دارند.

سینها و همکارانش<sup>۱</sup> اولین پژوهش‌گرانی بودند که به مطالعه رفتار بتن تحت بارگذاری دوره‌ای در محدوده فشاری به صورت

<sup>4</sup>Vecchio and Palermo<sup>5</sup>Sima et al<sup>6</sup>Li et al<sup>1</sup>Sinha et al<sup>2</sup>Karsan and Jirsa<sup>3</sup>Bahn and Hsu



شکل ۲- نمودار دانه بندی سبکدانه های مورد استفاده

سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ I و دارای وزن مخصوص ۳۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد [۱۸]. در این تحقیق از فوق روان کننده نسل سوم بر پایه کربوسیلیکات با نام تجاری POWERPLAST-ES استفاده شده است [۱۹]. این ماده، به رنگ قهوه ای روشن بوده و دارای جرم مخصوص ۱۰۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نقطه انجماد صفر، غیر قابل اشتعال و فاقد کلر می باشد. نانوسیلیس مصرفی در این تحقیق بصورت پودری با وزن مخصوص ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد [۲۰] و عکس میکروسکوپ الکترونی (TEM) در شکل (۳) نشان داده شده است. الیاف فولادی از دو نوع تجاری متداول در اشکال مستقیم با انتهای قلاب دار با طول ۴۰ میلی متر و موج دار با طول ۲۰ میلی متر و به ترتیب با نسبت منظر (نسبت طول به قطر) حدود ۵۰ و ۳۰ استفاده شده [۲۱] که در شکل (۴) نشان داده شده است.

## ۲-۲- طرح اختلاط

بتن های سبک سازه ای باید دارای مقاومت و وزن مخصوص کافی باشند، به گونه ای که بتوان از آنها در اعضای سازه ای استفاده کرد. طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، بتن سبک سازه ای دارای وزن مخصوصی بین  $1900-1400 \text{ kg/m}^3$  بوده و حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای آن  $17 \text{ MPa}$  است [۲۲]. طرح اختلاط بتن سبک سازه ای، براساس شیوه پیشنهاد شده در دستورالعمل ACI 211.2 [۲۳] تعیین شد. در تعیین طرح اختلاط حداکثر بعد سنگ دانه  $12/5$  میلی متر و اسلامپ هدف بین ۵۰ تا ۷۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. مقادیر و نسبت اجزای سازنده بتن سبک در جدول (۲) ارائه شده است. طرح های استفاده شده در این تحقیق شامل طرح شاهد (LC)، طرح حاوی نانوسیلیس با درصد

پژوهش، در خصوص تاثیر نانوسیلیس و اثر همزمان نانوسیلیس و الیاف فولادی بر منحنی تنش- کرنش دوره ای فشاری بتن سبک سازه ای تحقیقات در خور توجه ای صورت نگرفته است. بارگذاری دوره ای فشاری شامل سیکل های باربرداری و بارگذاری مجدد در محدوده تنش های فشاری می باشد. در این تحقیق برای زمینه سازی کاربرد این نوع بتن سبکدانه در سازه ها، منحنی تنش- کرنش این نوع بتن تحت اثر بارگذاری دوره ای فشاری ارائه شده و پارامتر- هایی که در تحلیل محاسباتی و پیش بینی رفتار اعضای سازه ای بتن سبک تأثیر گذار می باشند، مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- برنامہ آزمایشگاهی

### ۱-۲- مشخصات مصالح مصرفی

درشت دانه و ریزدانه مورد استفاده در این تحقیق در ساخت بتن سبک، پوک معدنی اسکریا حاصل از فعالیت های آتشفشانی واقع در شهر قروه و استان کردستان می باشد (شکل (۱)) [۱۶]. آزمایش های وزن مخصوص و جذب آب مصالح درشت دانه و ریزدانه سبک بر اساس استاندارد ASTM C330 [۱۷] انجام گرفته است (جدول (۱)). در این تحقیق بزرگ ترین بعد سنگدانه  $12/5$  میلی متر بوده و آزمایش دانه بندی جهت تعیین نحوه توزیع اندازه دانه های سنگ بر اساس استاندارد ASTM C330 صورت گرفته است (شکل (۲)).



شکل ۱- پوک معدنی اسکریا

جدول ۱- مشخصات سبکدانه اسکریا قروه بر طبق استاندارد

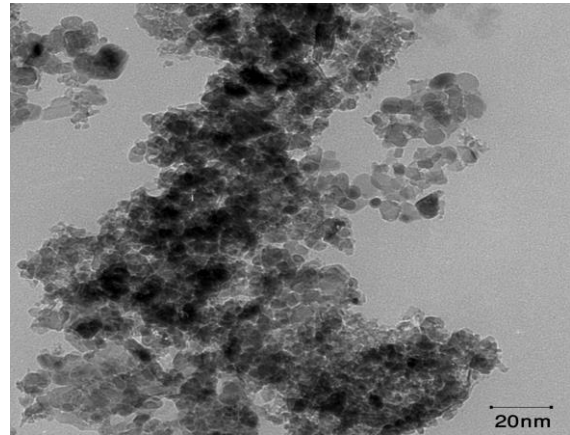
### ASTM C330

مصالح	چگالی توده ای		درصد
	متراکم	غیرمتراکم	
	$(\text{kg/m}^3)$		چگالی ظاهری
	$(\text{kg/m}^3)$		جذب آب
سبک دانه درشت	۶۸۰	۶۳۴	۱۱٪
سبک دانه ریز	۷۷۲	۷۴۷	۱۴٪

وزنی مختلف ۱٪، ۳٪ به صورت جایگزین با سیمان (LC-N3) (LC-N1)، با الیاف فولادی تنها با درصد حجمی ثابت ۱٪ (LC-F1) و در مدل ترکیبی الیاف و نانوسیلیس (LC-N3F1, LC-N1F1) ساخته شده است [۲۴]. طبق تحقیقات صورت گرفته در این نوع بتن، ترکیب الیاف فولادی بصورت ۰/۷٪ الیاف مستقیم و



شکل ۴- انواع مختلف الیاف فولادی مصرفی



شکل ۳- عکس TEM نانوسیلیس مصرفی

جدول ۲- طرح اختلاط بتن سبک (بر حسب  $\text{kg/m}^3$ )

نام طرح	سیمان	درشت دانه	ریزدانه	آب	فوق روان کننده	در صد حجمی الیاف فولادی (%)	نانوسیلیس (%) (درصد وزنی سیمان)
LC	۴۶۰	۵۳۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۴	-	-
LC-F1	۴۶۰	۵۳۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۶	۱	-
LC-N1	۴۶۰	۵۳۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۶	-	۱
LC-N3	۴۶۰	۵۳۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۸	-	۳
LC-N1F1	۴۶۰	۵۳۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۸	۱	۱
LC-N3F1	۴۶۰	۵۳۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳	۱	۳

### ۳-۲- روش انجام آزمایش

در این تحقیق برای تعیین منحنی‌های تنش-کرنش فشاری، از دستگاه بارگذاری ELE با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. قبل از انجام آزمایش دو انتهای نمونه‌های استوانه‌ای با ملات گوگرد به منظور ایجاد سطحی صاف برای توزیع یکنواخت بار، مطابق دستورالعمل ASTM C617 کلاهک گذاری شده‌اند [۲۷].

برای تعیین تغییر طول محوری نمونه و کرنش‌های مورد نیاز در رسم منحنی‌های تنش-کرنش، دو LVDT با دقت  $1\mu\text{m}$  که موازی نمونه‌های استوانه‌ای نصب شده‌اند، بکار گرفته شده است (شکل ۶). کرنش در هر لحظه از تقسیم میانگین اعداد اندازه گیری

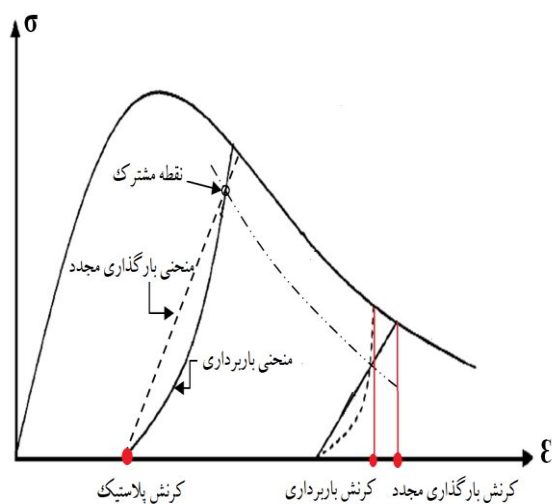


شکل ۵- اختلاط کامل کلیه مصالح با یکدیگر

در این تحقیق از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتری در سن ۲۸ روز استفاده شده است [۲۶] و تعداد آزمونه‌ها برای هر آزمایش حداقل سه عدد می‌باشد.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی رفتار دوره‌ای فشاری بر کلیه طرح‌ها پرداخته می‌شود و تأثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر این منحنی‌ها ارزیابی می‌گردد. پارامترهای اصلی جهت تعریف رفتار بتن تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری مطابق شکل (۸) شامل منحنی باربرداری و بارگذاری مجدد، کرنش پلاستیک، کرنش باربرداری، کرنش بارگذاری مجدد و نقاط مشترک می‌باشند. قابل ذکر است نتایج به‌دست آمده در خصوص نمونه‌های بتن سبک شامل درصد مشخصی از الیاف فولادی (۰ و ۱ درصد) و نانو سیلیس (۰ تا ۳ درصد) می‌باشد.



شکل ۸- پارامترهای مؤثر بر منحنی تنش-کرنش دوره‌ای فشاری بصورت شماتیک [۱۲]

### ۳-۱- منحنی پوش

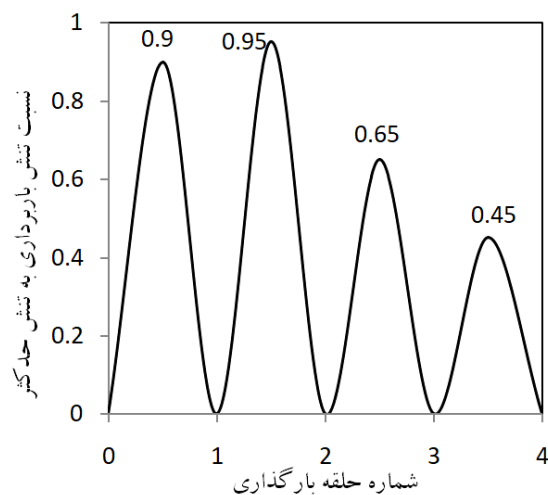
رفتار عمومی بتن تحت بارگذاری دوره‌ای می‌تواند توسط یک منحنی به نام منحنی پوش تعریف شود که منحنی بارگذاری دوره-ای در ناحیه زیر این منحنی قرار می‌گیرد و منحنی تنش-کرنش یکنواخت می‌تواند به‌عنوان منحنی پوش در نظر گرفته شود. منحنی تنش-کرنش دوره‌ای نمونه‌ها و منحنی پاسخ یکنواخت در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در کلیه نمونه‌ها، منحنی بارگذاری دوره‌ای فشاری پایین‌تر از منحنی یکنواخت قرار گرفته است و منحنی یکنواخت می‌تواند به‌عنوان پوش برای بارگذاری دوره‌ای استفاده گردد. در جدول (۳) پارامترهای تأثیرگذار بر منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری یکنواخت فشاری در کلیه نمونه‌ها ارائه شده است.

شده توسط دو LVDT که با داده نگار نشان داده شده، بر فاصله بین محل اتصال قطعه محصور کننده نمونه به‌دست آمد.

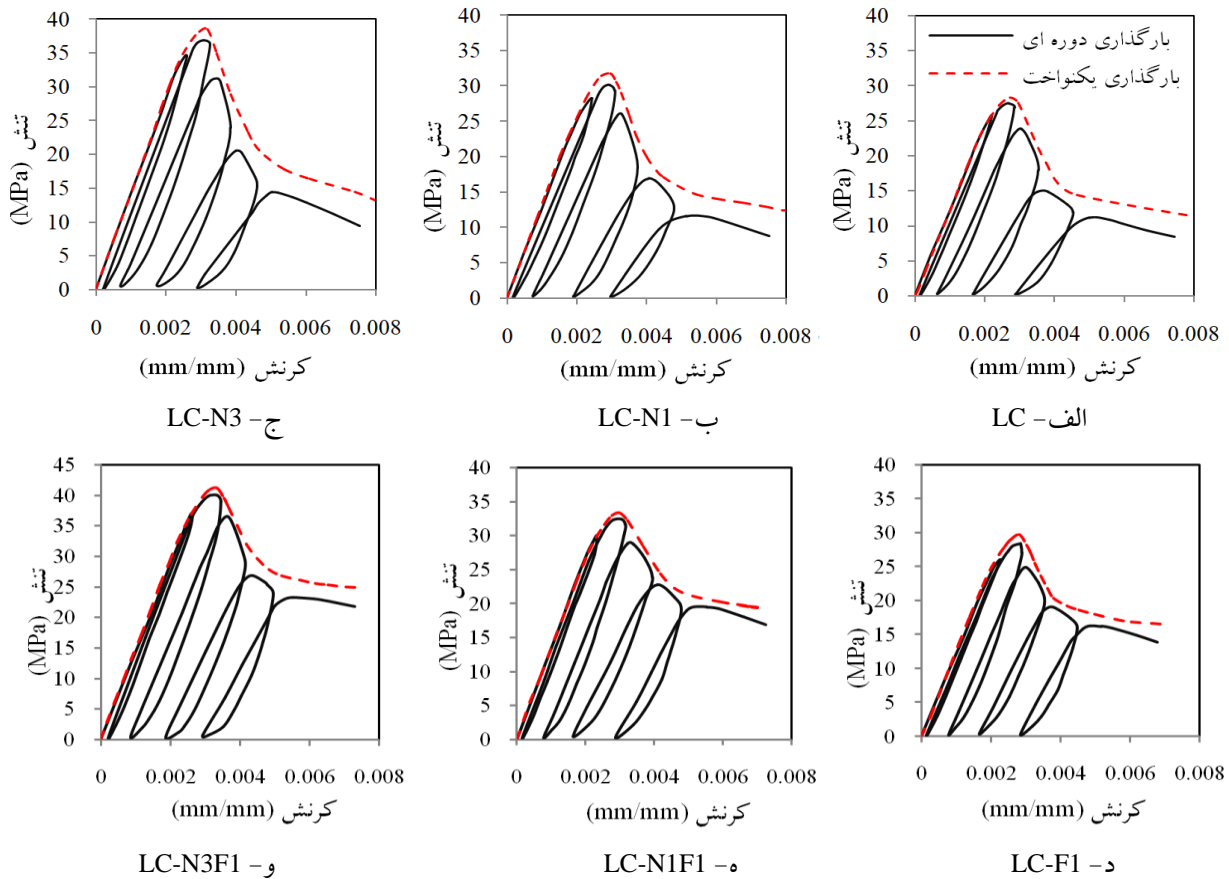


شکل ۶- جزئیات و نحوه قرارگیری نمونه برای تعیین منحنی تنش-کرنش فشاری

در این تحقیق پروتکل بارگذاری دوره‌ای فشاری شامل چهار سیکل باربرداری و بارگذاری مجدد می‌باشد، به‌طوری که در تنش-های باربرداری مشخص، یک سیکل در شاخه صعودی و سه سیکل در شاخه نزولی ایجاد شود. نسبت تنش باربرداری به تنش حداکثر برای هر سیکل بارگذاری در شکل (۷) ارائه شده است. برای تشکیل هر حلقه، پس از رسیدن تنش به مقدار از پیش تعیین شده، باربرداری انجام می‌شود تا تنش به تراز صفر برسد و سپس بارگذاری مجدد اعمال می‌گردد.



شکل ۷- پروتکل بارگذاری دوره‌ای فشاری



شکل ۹- منحنی تنش-کرنش بتن سبک حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت بارگذاری یکنواخت و دوره‌ای فشاری

به طوری که اگر باربرداری در تنش‌هایی پایین این حد صورت گیرد، باعث ایجاد کرنش‌های پلاستیک کمتری می‌شود [۱۰]. نقاط مشترک نمونه‌های مورد بررسی در شکل (۱۰) ارائه شده است.

با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود در کلیه نمونه‌ها نقطه مشترک در هر چرخه نسبت به چرخه قبلی در تراز تنش پایین‌تری قرار می‌گیرد. افزودن الیاف فولادی به بتن سبک (نمونه LC-F1) باعث بالا رفتن سطح تنش در نقاط مشترک به خصوص در قسمت بعد از نقطه پیک (بخش نزولی نمودار) شده است. افزودن نانوسیلیس به تنهایی (نمونه‌های LC-N1 و LC-N3) اثر بیشتری در حفظ سطح تنش در قسمت قبل از پیک داشته در حالی که بعد از تنش حداکثر یعنی در قسمت نزولی نمودار، تراز تنش کاهش زیادی داشته است. با افزودن هم‌زمان نانوسیلیس و الیاف فولادی در نمونه LC-N3F1 تنش در نقاط مشترک در قسمت صعودی و نزولی نمودار بیشتر از سایر نمونه‌ها افزایش یافته است که نشان دهنده حفظ سطح تنش بالاتر نمونه بتن سبک حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری می‌باشد.

جدول ۳- پارامترهای موثر بر منحنی تنش-کرنش یکنواخت فشاری

طرح	مقاومت فشاری fc (MPa)	مدول الاستیسیته Ec (GPa)	کرنش در تنش حداکثر ε <sub>o</sub> (mm/mm)
LC	۲۸/۲	۱۲/۱۸	۰/۰۰۲۷۴
LC-F1	۲۹/۶	۱۲/۴۸	۰/۰۰۲۹۰
LC-N1	۳۱/۷	۱۳/۰۴	۰/۰۰۲۹۷
LC-N3	۳۸/۵	۱۴/۴۵	۰/۰۰۳۱۸
LC-N1F1	۳۳/۲	۱۳/۶۲	۰/۰۰۲۹۹
LC-N3F1	۴۱/۱	۱۵/۳۲	۰/۰۰۳۳۴

### ۳-۲- نقطه مشترک

نقطه مشترک محل برخورد منحنی باربرداری و بارگذاری مجدد در هر سیکل می‌باشد. منحنی بارگذاری مجدد تا این نقاط تقریباً به صورت خطی می‌باشد و پس از این نقاط رفتار بتن غیر خطی می‌شود. اتصال این نقاط یک حدی از تنش (حد پایداری) را ایجاد می‌کند



باربرداری می‌باشند. همچنین  $V_f$  درصد حجمی الیاف فولادی ( $\sigma$ ) و  $N$  درصد وزنی نانوسیلیس ( $\sigma$ )، ۱ و ۳ درصد می‌باشد. در شکل (۱۱) مقادیر کرنش‌های نرمال شده حاصل از روابط ارائه شده، در نمونه بتن سبک شاهد (LC) نشان داده شده است.

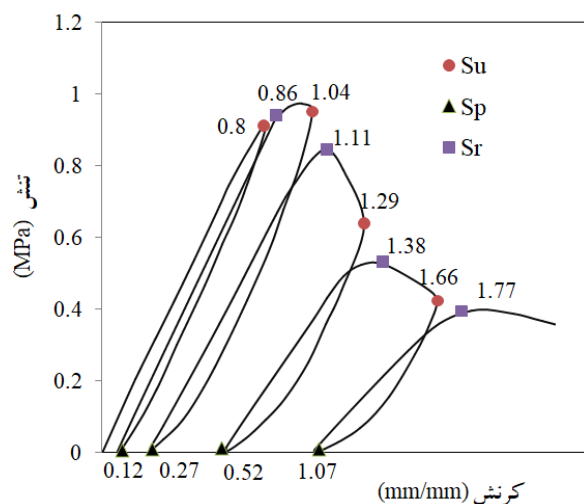
### ۳-۴- منحنی باربرداری و بارگذاری مجدد

با بررسی مدل‌های موجود، رابطه پیشنهاد شده توسط بان و شو [۱۲] به‌عنوان مبنایی برای تعیین معادله مشخصه مناسب در شاخه‌های باربرداری و بارگذاری مجدد منحنی تنش-کرنش فشاری بتن سبک با در نظر گرفتن اثر نانوسیلیس و الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت.

مدل پیشنهادی برای شاخه باربرداری بصورت رابطه (۳) می‌باشد:

$$U = (U_u) \left( \frac{S - S_p}{S_u - S_p} \right)^{n_u} \quad (3)$$

که در این رابطه  $U$  تنش نرمال شده نسبت به حداکثر تنش و  $S$  کرنش نرمال شده نسبت به کرنش متناظر با حداکثر تنش و  $S_p$  و  $S_u$  به ترتیب کرنش پلاستیک نرمال شده، کرنش باربرداری نرمال شده و تنش باربرداری نرمال شده می‌باشند.

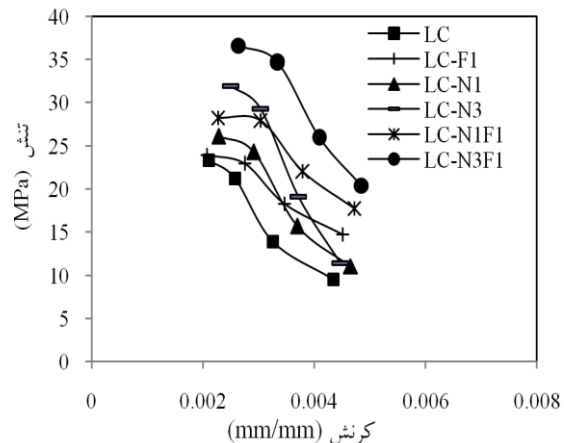


شکل ۱۱- پارامترهای کرنش پلاستیک  $S_p$ ، کرنش باربرداری  $S_u$ ، کرنش بارگذاری مجدد  $S_r$  نرمال شده در نمونه بتن سبک شاهد

با در نظر گرفتن اثر نانوسیلیس و الیاف فولادی عامل توانی  $n_u$  با استفاده از روابط (۴) الی (۶) محاسبه می‌شود:

$$n_u = a + b \sqrt{S_p} \quad (4)$$

$$a = 38.17 N - 44.5 V_f + 0.98 \quad (5)$$



شکل ۱۰- نقاط مشترک بتن سبک حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری

### ۳-۳- کرنش باربرداری، کرنش بارگذاری مجدد و کرنش پلاستیک

در این بخش ارتباط بین کرنش پلاستیک با کرنش باربرداری و بارگذاری مجدد پرداخته شده و تأثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی در نمونه‌های بتن سبک مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نقطه باربرداری در منحنی تنش-کرنش بتن و بر اساس خصوصیات رفتاری بتن، کرنش پلاستیک متفاوتی در انتهای منحنی باربرداری ایجاد می‌شود. کرنش بارگذاری مجدد پارامتر موثر دیگری است که تحت تأثیر نقطه باربرداری بوده و می‌توان توسط آن رفتار بتن تحت بارگذاری دوره‌ای را بررسی کرد. اختلاف کرنش باربرداری و بارگذاری مجدد با افزودن الیاف فولادی کاهش و با افزودن نانوسیلیس افزایش می‌یابد. برای تعریف کرنش پلاستیک و کرنش بارگذاری مجدد برحسب کرنش باربرداری و در نظر گرفتن تأثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی رابطه‌های (۱) و (۲) پیشنهاد می‌شود:

$$S_p = c_p (S_u)^{n_p}, \quad (1)$$

$$c_p = 0.235 - 1.49 N + 2 V_f$$

$$n_p = 3 + 16.34 N - 23.27 V_f$$

$$S_r = c_r S_u, \quad (2)$$

$$c_r = 1.07 + 0.22 N - 1.73 V_f$$

که در این روابط  $S_p$ ،  $S_u$  و  $S_r$  به ترتیب کرنش پلاستیک نرمال شده، کرنش باربرداری نرمال شده و کرنش بارگذاری مجدد نرمال شده، نسبت به کرنش متناظر با حداکثر تنش می‌باشند.  $n_p$  و  $c_p$  ضریب کرنش پلاستیک و درجه بهینه معادله و  $c_r$  ضریب کرنش

$$C = 3.91N - 8.66 V_f + 0.0182 \quad (A)$$

$$b = 201.8 N - 1.5 V_f + 1.087 \quad (B)$$

(6)

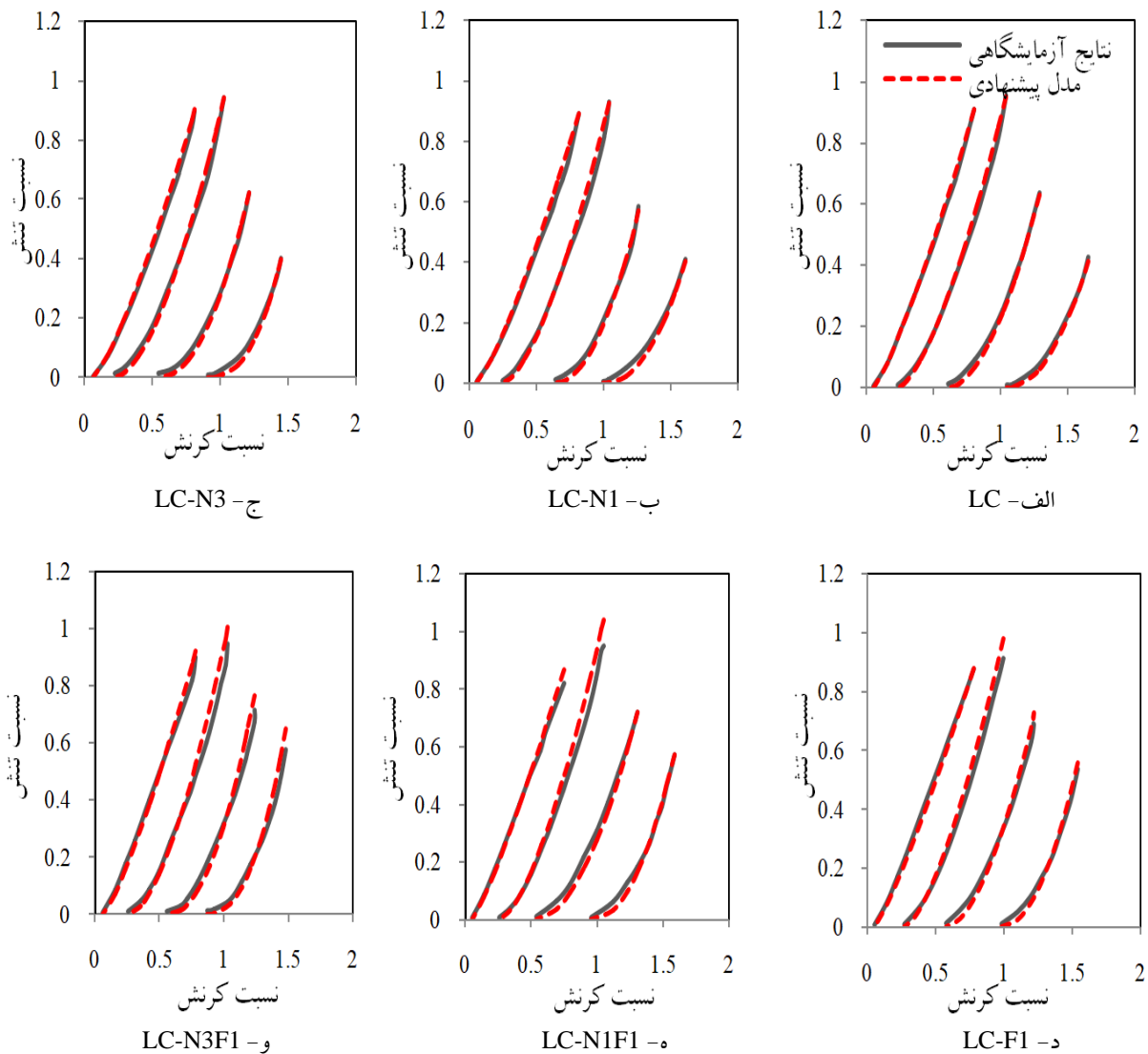
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مقایسه منحنی باربرداری و بارگذاری مجدد را در نمونه‌های مختلف بتن سبک توسط مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود انطباق قابل ملاحظه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در شاخه‌های باربرداری و بارگذاری مجدد وجود دارد که نشان از مناسب بودن مدل پیشنهادی دارد.

مدل پیشنهادی برای شاخه بارگذاری مجدد بصورت رابطه (۷) می‌باشد:

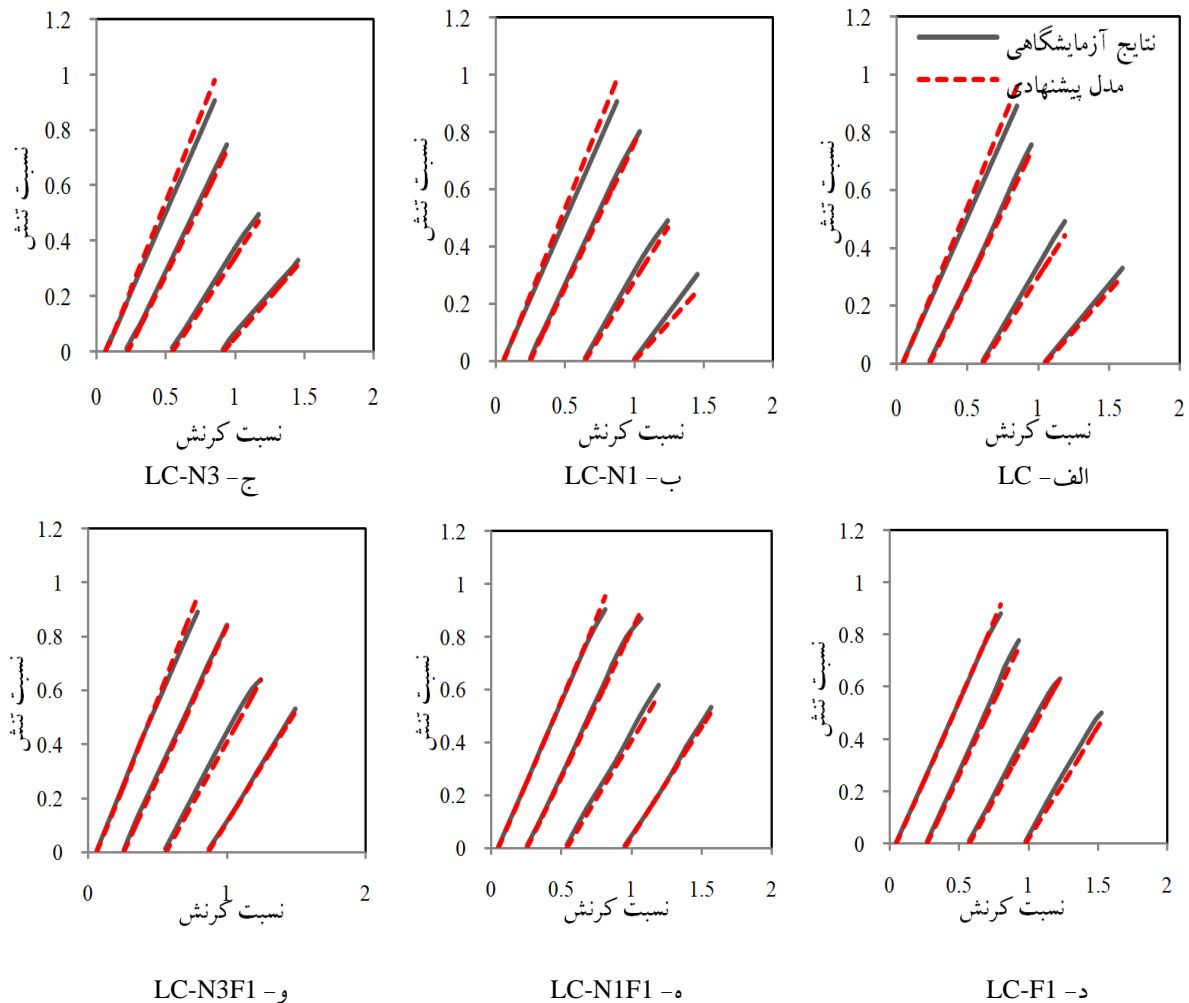
$$U = (U_{er}) \left( 1 - c \left( \frac{S}{S_p} \right)^{0.5} \right) \left( \frac{S - S_p}{S_{er} - S_p} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه  $U_{er}$  نسبت تنش بارگذاری مجدد بر روی منحنی پوش و  $S_{er}$  نسبت کرنش بارگذاری مجدد پوش است. با در نظر گرفتن اثر نانوسیلیس و الیاف فولادی ضریب  $C$  با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:



شکل ۱۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی برای منحنی باربرداری نمونه‌های بتن سبک تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری





شکل ۱۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی برای منحنی بار گذاری مجدد نمونه‌های بتن سبک تحت بار گذاری دوره‌ای

تشکیل شده‌اند. با افزودن الیاف فولادی (LC-F1)، ترک‌هایی با عرض کمتر در بخش میانی نمونه ایجاد است که به علت محصورشدگی بتن در حضور الیاف می‌باشد. در نمونه حاوی نانوسیلیس و الیاف (LC-N3F1 و LC-N3F1) امتداد گسترش ترک‌ها بصورت مایل بر جهت بارگذاری تغییر کرده است. همچنین افزودن نانوسیلیس به نمونه حاوی الیاف باعث بهبود عملکرد الیاف در کاهش عرض ترک و محدود نمودن گسترش ترک‌ها شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر رفتار بتن سبک سازه‌ای تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری پرداخته شده است. در محدوده آزمایش‌ها و بررسی‌های صورت گرفته در این

#### ۳-۵- نحوه شکست نمونه‌ها تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری

در این بخش نحوه شکست نمونه‌های استوانه‌ای بتن سبک تحت بار دوره‌ای فشاری در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به نحوه شکست نمونه‌های استوانه‌ای مشاهده می‌شود در نمونه بتن سبک شاهد (LC) ترک‌ها به صورت عمودی در ارتفاع نمونه و سطح شکستی بصورت مایل در ابتدای نمونه ایجاد شده است.

نانوسیلیس با خاصیت پرکنندگی باعث متراکم شدن ماتریس سیمان و افزایش مقاومت ناحیه انتقالی بین سنگدانه و سیمان می‌شود لذا در نمونه‌های دارای نانوسیلیس (LC-N1 و LC-N3)، با افزایش مقدار نانوسیلیس درصد بالاتری از سطح شکست از میان سبکدانه‌ها عبور کرده و ترک‌ها بطور عمودی در کل ارتفاع نمونه

- تحقیق ( نمونه‌هایی با ۰ و ۱ درصد الیاف فولادی و ۰ تا ۳ درصد نانو سیلیس)، می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:
- منحنی پوش بتن سبک برای بارگذاری دوره‌ای می‌تواند به وسیله‌ی پاسخ بتن تحت اثر بارگذاری یکنواخت نشان داده شود.
- در بتن سبک حاوی نانو سیلیس تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری تراز تنش کاهش زیادی در قسمت نزولی نمودار داشته است. در حالیکه افزودن هم‌زمان نانو سیلیس و الیاف فولادی باعث حفظ سطح تنش بالاتر قبل و بعد از نقطه پیک شده است.
- در منحنی تنش- کرنش بتن سبک تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری، افزودن الیاف فولادی باعث کاهش اختلاف کرنش باربرداری و بارگذاری مجدد و نانو سیلیس باعث افزایش آن شده است. همچنین کرنش پلاستیک و کرنش بارگذاری مجدد تابعی از کرنش باربرداری می‌باشد.
- با توجه به تأثیر قابل توجه نانو سیلیس و الیاف فولادی بر منحنی‌های تنش-کرنش، مدل‌های رفتاری فشاری دوره‌ای بتن سبک (منحنی باربرداری و بارگذاری مجدد) با در نظر گرفتن اثر نانو سیلیس و الیاف فولادی استخراج شده که تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



LC-N3



LC-N1



LC



LC-N3F1



LC-N1F1



LC-F1

شکل ۱۴- شکست نمونه‌های استوانه‌ای بتن سبک حاوی نانو سیلیس و الیاف فولادی تحت بارگذاری دوره‌ای فشاری

[3] Birgisson, B., Mukhopadhyay, A., Geary, G., Khan, M. and Sobolev, K. "Nanotechnology in Concrete Materials", Transportation Research Circular, 2012.  
 [4] Kawashima, S., Hou, P., Corr, D.J. and Shah, S.P. "Modification of Cement-Based Materials with Nanoparticles", Cement and Concrete Composites, 36, 8-15, 2013.  
 [5] Reches, Y. "Nanoparticles as Concrete Additives: Review and Perspectives", Construction and Building Materials, 175, 483-495, 2018.

#### ۵- مراجع

[1] Hassanpour, M., Shafigh, P. and Mahmud, H.B. "Lightweight Aggregate Concrete Fiber Reinforcement-A Review", Construction and Building Materials, 37, 452-461, 2012.  
 [2] Choi, J., Zi, G., Hino, S., Yamaguchi, K. and Kim, S. "Influence of Fiber Reinforcement on Strength and Toughness of All-lightweight Concrete", Construction and Building Materials, 69, 381-389, 2014.

- [20] [www.fadakgroup.ir](http://www.fadakgroup.ir)
- [21] <http://www.meisoon.com/>
- [۲۲] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان-های بتن آرمه، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی، ۱۳۹۲.
- [23] ACI 211.2-04. "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete", Farmington Hills, American Concrete Institute, 2004.
- [۲۴] دباغ، ه. اکبریور، س. "رفتار بتن سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی تحت اثر بارگذاری یکنواخت فشاری"، مجله تحقیقات بتن، سال دهم، شماره اول، ص ۳۵-۴۶، ۱۳۹۶.
- [۲۵] دباغ، ه و اکبریور، س. "اثر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح سبک"، رساله دکتری عمران-سازه، دانشگاه کردستان، ۱۳۹۷.
- [26] ASTM C39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", West Conshohocken, American Society for Testing and Materials, 2018.
- [27] ASTM C617, "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens", West Conshohocken, American Society for Testing and Materials, 2015.
- [6] Balapour, M., Joshaghani, A. and Althoey, F. "Nano-SiO<sub>2</sub> Contribution to Mechanical, Durability, Fresh and Microstructural Characteristics of Concrete: A Review", Construction and Building Materials, 181, 27-41, 2018.
- [7] Yu, R., Tang, P., Spiesz, P. and Brouwers, H.J.H. "A Study of Multiple Effects of Nano-Silica and Hybrid Fibres on The Properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) Incorporating Waste Bottom Ash (WBA)", Construction and Building Materials, 60, 98-110, 2014.
- [8] Almusallam, T.H. and Alsayed, S.H. "Stress-Strain Relationship of Normal, High-Strength and Lightweight Concrete", Magazine of Concrete Research, 47:170, 39-44, 1995.
- [9] Tasnimi, A.A. "Mathematical Model for Complete Stress-Strain Curve Prediction of Normal, Light-Weight and High-Strength Concretes", Magazine of Concrete Research, 56:1, 23-34, 2004.
- [10] Sinha, B.P., Gerstle, K.H. and Tulin, L.G. "Stress-strain Relations for Concrete under Cyclic Loading", In Journal Proceedings, 61: 2, 195-212, 1964.
- [11] Karsan, I.D. and Jirsa, J.O. "Behavior of Concrete under Compressive Loadings", Journal of the Structural Division, 1969.
- [12] Bahn, B.Y. and Hsu, C.T.T. "Stress-strain Behavior of Concrete under Cyclic Loading", Materials Journal, 95:2, 178-193, 1998.
- [13] Palermo, D. and Vecchio, F.J. "Compression Field Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Reversed Loading: Formulation", Structural Journal, 100:5, 616-625, 2003.
- [14] Sima, J.F., Roca, P. and Molins, C. "Cyclic Constitutive Model for Concrete", Engineering Structures, 30:3, 695-706, 2008.
- [15] Li, B., Xu, L., Chi, Y., Huang, B. and Li, C. "Experimental Investigation on The Stress-strain Behavior of Steel Fiber reinforced Concrete Subjected to Uniaxial Cyclic Compression", Construction and Building Materials, 140, 109-118, 2017.
- [16] [www.pokehkimya.ir](http://www.pokehkimya.ir)
- [17] ASTM C330. "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete", American Society for Testing and Materials, 2017.
- [18] Saman Cement Company, <http://www.samancement.com/>.
- [19] Construction Chemicals Manufactures, <https://www.abadgarangroup.net/>.

## **Stress-Strain Relationships of Lightweight Concrete Containing Nano-Silica and Steel Fibers under Compressive Cyclic Loading**

**Soodeh Akbarpour \***

**Assistant Professor, Saroyeh Institute of Higher Education.**

**Hooshang Dabbagh**

**Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan.**

### **Abstract**

Modelling and simulation of the response of a structure under different conditions requires statistical data from the material behavior. Concrete, as a non-homogenous material has a complex behavior pattern. The loading condition and the ingredients of mix compositions affect the concrete behavior. In order to accurately predict the structural response of concrete members by finite element analysis, the effect of materials used on the behavior of concrete under various loading conditions should be determined. Hence, this research investigates the improvement of the material properties of lightweight aggregate concrete (LWAC) for structural applications and deals with the effects of nano-silica (NS) and steel fibers on the compressive behaviour of LWAC under cyclic loading. The key parameters of compressive stress-strain curve under cyclic loading, namely reloading and unloading curves, common point, plastic strain, unloading and reloading strains were investigated. Results showed that the cyclic compressive behavior of lightweight concrete was affected by nano-silica and fiber reinforcement. According to the experimental findings, empirical stress- strain models were proposed considering the effects of NS and steel fiber to simulate the structural behavior of concrete. The comparative studies indicated an acceptable agreement between the experimental data and proposed models for cyclic compressive stress-strain curve.

**Keywords:** Lightweight concrete, Nano-silica, Steel fiber, Stress-strain curve, Compressive cyclic loading.

---

\* Corresponding Author: so.akbarpour@gmail.com