

تأثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر رفتار کششی بتن سبک سازه‌ای

سوده اکبرپور^۱، هوشنگ دباغ^۲، حسن گلستانه^۳

۱-استادیار موسسه غیرانتفاعی سارویه

۲-استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه کردستان

۳-دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- راه و ترابری موسسه غیرانتفاعی سارویه

(so.akbarpour@gmail.com)

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. عملکرد مصالح مورد استفاده از پارامترهای موثر در تعیین رفتار اعضا سازه‌ای می‌باشد. لذا برای پیش‌بینی رفتار اعضای سازه‌ای در تحلیل محاسباتی اجزا محدود، نیاز به مدل‌های رفتاری دقیق مصالح می‌باشد. در این تحقیق رفتار کششی بتن سبک سازه‌ای شامل الیاف فولادی (با درصد حجمی ثابت ۱٪) و پوزولان تقویت‌کننده نانوسیلیس (با درصد وزنی ۱٪ و ۳٪)، بررسی شده و پارامترهای موثر بر آن شامل مقاومت کششی و کرنش متناظر با حداکثر تنش ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور توام الیاف فولادی و نانوسیلیس بیشترین تأثیر را در بهبود رفتار کششی بتن سبک داشته است. بطوریکه با افزودن ۳٪ نانوسیلیس و ۱٪ الیاف فولادی، مقاومت کششی مستقیم بتن سبک به میزان ۷۴٪ افزایش یافته است. هم چنین در کلیه نمونه‌ها مقاومت کششی غیر مستقیم به مقدار جزئی بیشتر از مقاومت کششی مستقیم می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن سبک سازه‌ای، الیاف فولادی، نانو سیلیس، کشش مستقیم

۱. مقدمه

بتن سبک سازه‌ای علاوه بر کاهش بار مرده ساختمان و کاهش نیروهای وارد بر سازه در اثر شتاب زلزله، دارای ویژگیهایی چون عایق صوتی و حرارتی نیز می‌باشد و کاربرد آن باعث کوچکتر شدن مقاطع و آسیب کمتر در اثر زلزله می‌شود. لازمه ساخت بتن سبک، استفاده از سبکدانه مناسب با ویژگی‌های مورد نیاز است. برای جبران اثر کاهش مقاومت ناشی از بکاربردن سبکدانه و هم چنین تأمین شکل‌پذیری و افزایش قابلیت جذب انرژی بتن سبک، می‌توان از مواد پوزولانی و الیاف استفاده کرد. نانو ذرات که نتیجه‌ای از فناوری نانو به عنوان یک پوزولان مصنوعی بسیار فعال در تکنولوژی بتن توانسته‌اند با کاربرد در ساخت مصالح با پایه سیمانی ساختار آنها را تحت تأثیر قرار داده و بهبود بخشند. در میان نانو ذرات موجود، نانوسیلیس در زمینه سیمان و بتن برای بالا بردن خواص بتن بطور موثر و کارآمدتری استفاده می‌شود [۵-۱]. از طرفی استفاده از الیاف در بتن باعث بهبود خواص مکانیکی بتن از جمله افزایش مقاومت کششی، مقاومت خمشی و چقرمگی می‌گردد [۶-۸]. در میان انواع مختلف الیاف، الیاف فولادی در بهبود خصوصیات بتن سبک کاربرد موثرتری نسبت به دیگر الیاف دارد [۶-۸].

نوع و مواد تشکیل‌دهنده بتن از پارامترهای بسیار موثر در تعیین رفتار بتن است [۹]. در خصوص شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار اعضای سازه‌ای بتنی با استفاده از روش اجزاء محدود، نیاز به تعیین خصوصیات رفتاری بتن بوده که از دو دیدگاه میکروسکوپی و ماکروسکوپی قابل بررسی می‌باشد. در دیدگاه ماکروسکوپی با استفاده از داده‌های آماری از رفتار بتن (منحنی تنش-کرنش)، می‌توان مدل‌های رفتاری را برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌ای اعضای بتنی ارائه داد. با آنالیز داده‌های تجربی می‌توان به بررسی عددی و توسعه مدل‌های موجود در تعیین رفتار این نوع بتن (منحنی تنش-کرنش) پرداخت. بنابراین لازم است

تا بانکی از داده‌های تجربی جهت اعتبارسنجی مدل‌های بکار رفته ایجاد گردد. عدم وجود مدل‌های رفتاری مناسب و اعتبارسنجی شده برای این نوع بتن سبک تحت بارگذاری کشش، لزوم تحقیق در این زمینه را بیشتر نشان می‌دهد. اکثر محققین نشان دادند رابطه‌ی الاستیک خطی نشان دهنده رفتار مناسبی برای بتن در کشش در شاخه قبل از حداکثر تنش می‌باشد [۱۰-۱۲]. برای مدل‌سازی رفتار بتن در کشش بعد از حداکثر تنش، سقوط ناگهانی به تنش صفر می‌باشد (مصلح کاملاً ترد) که این ساده‌سازی در رفتار بعد از حداکثر تنش مطابق با نتایج آزمایشگاهی نیست و نتایج ناپیوسته‌ای وقتی که در مدل محاسباتی اعمال می‌شود، ایجاد می‌کند. چندین عبارت برای نمایش شاخه نرم شدگی از جمله: خطوط مستقیم، منحنی‌های چندخطی، منحنی‌های نمایی، منحنی‌های چندجمله‌ای و ترکیبی از آن‌ها وجود دارند [۱۰-۱۴]. در تحقیقی بر روی بتن معمولی آزمایش‌هایی برای بدست آوردن مقاومت کششی انجام گرفت. آن‌ها در این آزمایش از دو ورق فولادی چسبیده به نمونه جهت اعمال کشش استفاده می‌شود. این امر موجب می‌گردد که تنش بصورت یکنواخت به نمونه اعمال شود. مقاومت کششی تحت آزمایش برزلی و تحت آزمایش کشش خالص گرفته شد و نتایج حاصل با مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی مقایسه گردید. برخی از آزمایش‌هایی که بر روی نمونه‌هایی با مقاومت فشاری ۵۵ مگاپاسکال انجام گرفت نشان داد که مقاومت کشش مستقیم، مقدار جزئی کمتر از مقاومت کشش برزلی می‌باشد [۱۵]. درخصوص تاثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر رفتار کششی 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 کششی ارائه شده و پارامترهای موثر بر منحنی‌های تنش-کرنش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

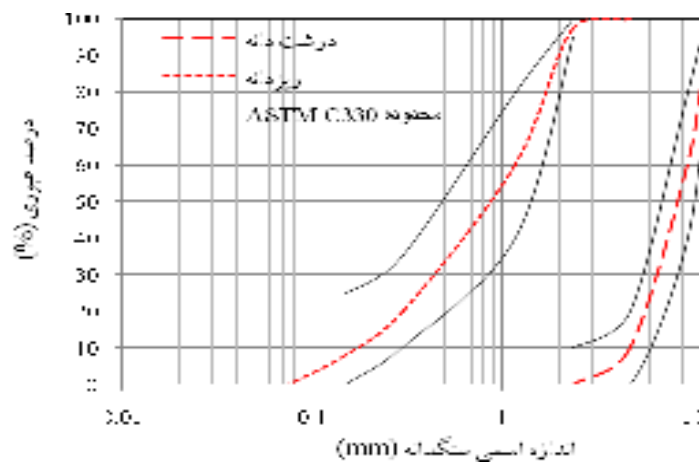
۱.۲. مشخصات مصالح مصرفی

۱.۱.۲. مصالح سنگی

در این پژوهش درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده در ساخت بتن سبک، پوکه معدنی اسکریا قروه کردستان می‌باشد. آزمایش‌های وزن مخصوص و جذب آب مصالح درشت‌دانه و ریزدانه سبک بر اساس استاندارد ASTM C۳۳۰ انجام گرفته است [۱۶]. خصوصیات پوکه‌ی مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. آزمایش دانه‌بندی جهت تعیین نحوه توزیع اندازه دانه‌های سنگی بکارگرفته می‌شود که از طریق جدایش به کمک الک براساس استاندارد ASTM C۳۳۰ صورت می‌گیرد. در این تحقیق بزرگترین بعد سنگدانه ۱۲/۵ میلیمتر بوده و محدوده دانه‌بندی درشت دانه و ریزدانه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM C۳۳۰ تعیین شده است (شکل ۱). درضمن در این تحقیق از دستگاه لرزاننده جهت الک نمودن دانه‌ها استفاده شده است. مصالح ریزدانه و درشت‌دانه دانه‌بندی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سبکدانه اسکریا برطبق استاندارد ASTM C۳۳۰

مصالح	چگالی توده‌ای (kg/m^3)		چگالی ظاهری (kg/m^3)	درصد جذب آب (۲۴ ساعت)
	متراکم	غیرمتراکم		
سبک‌دانه درشت	۶۸۰	۶۳۴	۱۵۳۰	٪۱۲
سبک‌دانه ریز	۷۷۲	۷۴۷	۱۶۵۰	٪۱۶



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه و شن مصرفی



شکل ۲- سبکدانه‌های دانه‌بندی شده

۲.۱.۲. سیمان

سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ I کارخانه سیمان سامان غرب کرمانشاه می‌باشد. خواص فیزیکی و شیمیایی این سیمان به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲- آزمایش‌های فیزیکی سیمان ۱-۴۲۵ [۱۷]

مقدار موجود	مشخصات فیزیکی
۱۲۰ دقیقه	زمان گیرش اولیه
۲۲۰ دقیقه	زمان گیرش نهایی
220 kg/cm^2	مقاومت ۲ روزه
440 kg/cm^2	مقاومت ۷ روزه
530 kg/cm^2	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
3150 kg/cm^2	چگالی

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ [۱۷]

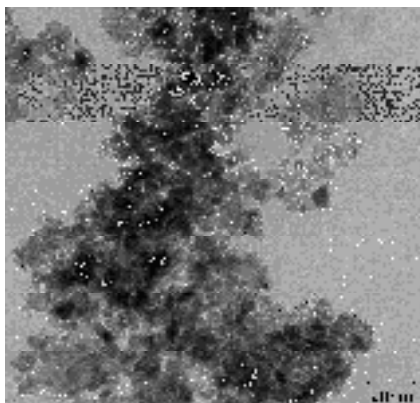
مقدار موجود در سیمان (%)	مشخصات شیمیایی
۲۰/۷	SiO _۲
۵/۲	Al _۲ O _۳
۴/۶	Fe _۲ O _۳
۶۵	CaO
۱/۸	MgO
۲/۲	SO _۳
۰/۵۵	K _۲ O
۰/۱۵	Na _۲ O

۳،۱،۲. فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده نسل سوم بر پایه کربوسیلیکات با نام تجاری Power Plast-ES محصول شرکت شرکت صنایع شیمی ساختمان آبادگران استفاده شده است [۱۸]. این ماده، به رنگ قهوه‌ای روشن بوده و دارای جرم مخصوص ۱۰۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نقطه انجماد صفر، غیر قابل اشتعال و فاقد کلر می‌باشد.

۴،۱،۲. نانوسیلیس

نانوسیلیس مصرفی در این تحقیق بصورت پودری محصول مجتمع فناوری نوین فدک اصفهان می‌باشد [۱۹]. وزن مخصوص نانوسیلیس مصرفی ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب با اندازه ذرات ۱۰ الی ۲۰ نانومتر و درجه خلوص ۹۹٪ می‌باشد که عکس SEM آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- عکس SEM نانوسیلیس مصرفی

۵.۱.۲. الیاف فولادی

در این تحقیق از دو نوع تجاری متداول 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 در شکل ۴ نشان داده شده است. جزئیات بیشتر در مورد مشخصات مکانیکی و فیزیکی این الیاف در جدول ۴ ارائه شده است.



ب- موجدار با انتهای مستقیم (SF_۲)



الف- صاف با انتهای قلابدار (SF_۱)

شکل ۴- انواع مختلف الیاف فولادی مصرفی

جدول ۴- مشخصات الیاف فولادی مصرفی [۲۰]

نام الیاف	شکل ظاهری	سطح مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	مقاومت کششی (MPa)
SF _۱	صاف با انتهای قلابدار	دایره	۴۰	۰/۸	۱۲۰۰
SF _۲	موجدار با انتهای مستقیم	دایره	۲۰	۰/۷	۱۱۴۰

۲.۲. طرح اختلاط

بتن‌های سبک سازه‌ای باید دارای مقاومت و وزن مخصوص کافی باشند، به‌گونه‌ای که بتوان از آنها در اعضای سازه‌ای استفاده کرد. طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، بتن سبک سازه‌ای دارای وزن مخصوصی بین $1400-1900 \text{ kg/m}^3$ بوده و حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای آن 17 MPa است [۲۱]. براساس آیین‌نامه ۳۱۸.۱۴ ACI، بتن سبک سازه‌ای بتنی است که دارای حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای 17 MPa و حداکثر وزن مخصوص 1840 kg/m^3 باشد [۲۲]. طرح اختلاط بتن سبک سازه‌ای، براساس شیوه پیشنهاد شده در دستورالعمل ۲۱۱.۲ ACI [۲۳] تعیین شد. در تعیین طرح اختلاط حداکثر بعد سنگدانه $12/5$ میلیمتر و اسلامپ هدف بین ۵۰ تا ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی با ثابت نگه داشتن مقدار آب و افزایش درصد فوق روان‌کننده اسلامپ در محدوده اسلامپ مورد نظر باقی می‌ماند. در این تحقیق، نانوسیلیس با درصد وزنی مختلف ۱٪، ۳٪ بصورت جایگزین با سیمان و الیاف فولادی با درصد حجمی ثابت ۱٪ به طرح اختلاط معرفی شده اضافه شدند. خواص مکانیکی بتن الیافی تحت تأثیر نوع، درصد، نسبت طول به قطر معادل و شکل الیاف قرار دارد. طبق تحقیقات صورت گرفته در خصوص این نوع بتن، ترکیب الیاف فولادی بصورت ۰/۷٪ الیاف مستقیم و ۰/۳٪ الیاف موجدار بیشترین تأثیر را در بهبود خصوصیات مکانیکی این نوع بتن سبک داشته

است [۲۳]. لذا در این تحقیق به منظور بهبود بیشتر خصوصیات مکانیکی بتن از ترکیب الیاف بصورت فوق استفاده است. وزن مخصوص نمونه‌های بتن سبک بدون الیاف تقریباً برابر 1730 kg/m^3 و نمونه‌های حاوی الیاف حدود 1815 kg/m^3 می‌باشد که در محدوده مجاز آیین نامه‌ای قرار دارد. مقادیر و نسبت اجزای سازنده بتن سبک در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط بتن سبک (اجزا بتن بر حسب kg/m^3)

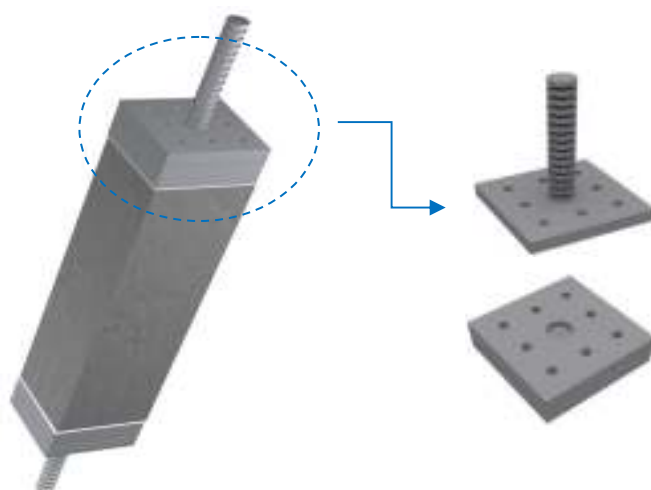
نمونه‌ها	سیمان	درشت دانه	ریزدانه	نسبت آب به سیمان	فوق روان کننده	الیاف	نانو سیلیس	مقاومت فشاری (MPa)
LC	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۴	-	-	۲۸/۲
LC-F ^۱	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۸	۱٪	-	۲۹/۶
LC-N ^۱	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۲/۸	-	۱٪	۳۱/۷
LC-N ^۳	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳	-	۳٪	۳۸/۵
LC-N ^۱ F ^۱	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳	۱٪	۱٪	۳۳/۲
LC-N ^۳ F ^۱	۴۶۰	۵۲۸	۵۸۴	۰/۳۱	۳/۲	۱٪	۳٪	۴۱/۱

۳.۲. ابزار و روش‌های آزمایش

در این تحقیق مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق ASTM C۴۹۶ [۲۴] روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر آزمایش شد (شکل ۵). آزمایش کشش مستقیم نیز بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد $100 \times 100 \times 400$ میلی مترانجام گرفت. در این آزمایش یک جفت قطعه برای دو انتهای نمونه طراحی گردید. هر کدام از قطعات شامل ورق‌های فولادی داخلی و خارجی هم بعد مقطع نمونه‌ها و به ترتیب با ضخامت ۳۰ و ۱۵ میلی‌متر می‌باشند که توسط پیچ‌هایی به همدیگر متصل می‌گردند. همچنین یک میله آج‌دار با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر به مرکز هر کدام از ورق‌ها وصل گردید (شکل ۶). قبل از چسباندن ورق‌ها به نمونه، سطح مقطع نمونه از هر دو طرف به اندازه‌ی حدوداً ۲ سانتی‌متر صیقل داده شده تا درشت‌دانه‌ها در سطح نمونه ظاهر گردند که در شکل ۷ نشان داده شده است. نیروی کششی وارده از طریق دستگاه به میله وارد شده و سپس توسط پیچ‌ها به ورق داخلی و سرانجام به نمونه می‌رسد. برای تعیین تغییر طول محوری نمونه و کرنش‌های موردنیاز در رسم منحنی‌های تنش-کرنش، دو LVDT با دقت $1 \mu\text{m}$ که موازی نمونه‌های منشوری نصب شده‌اند، بکار گرفته شده است. جزییات نمونه و نحوه‌ی قرارگیری در دستگاه در شکل ۸ نشان داده شده است. بارگذاری کشش مستقیم به دلیل محدودیت دستگاه بارگذاری تا نقطه پیک انجام شده است. تعداد نمونه‌ها در این آزمایش برای هر طرح سه عدد می‌باشد که در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و در گزارش میانگین این سه عدد آمده است. قابل ذکر است آزمایش‌ها در آزمایشگاه دانشگاه کردستان انجام گرفته است.



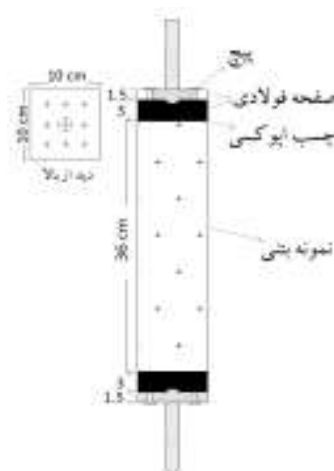
شکل ۵- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم



شکل ۶- قطعات فولادی تهیه شده برای انجام آزمایش کشش مستقیم



شکل ۷- آماده سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش کشش مستقیم



شکل ۸- جزییات و نحوه‌ی قرارگیری نمونه در دستگاه کشش مستقیم

۴.۲. نحوه ساخت، عمل‌آوری و نگهداری 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 فوق روان‌کننده و الیاف فولادی به تدریج به مخلوط اضافه شدند. در نهایت پس از اختلاط کامل مصالح با یکدیگر در میکسر (شکل ۹)، بتن تازه در قالب‌های موردنظر که از قبل روغن کاری شده‌اند، در سه لایه ریخته شد. عملیات متراکم کردن مخلوط‌های بتن توسط میز لرزان انجام گرفت. بعد از آماده کردن سطح 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 نایلون خیس پوشانده تا آب بتن تبخیر نشود و عمل هیدراتاسیون به صورت 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 عمل‌آوری قرار گرفتند.

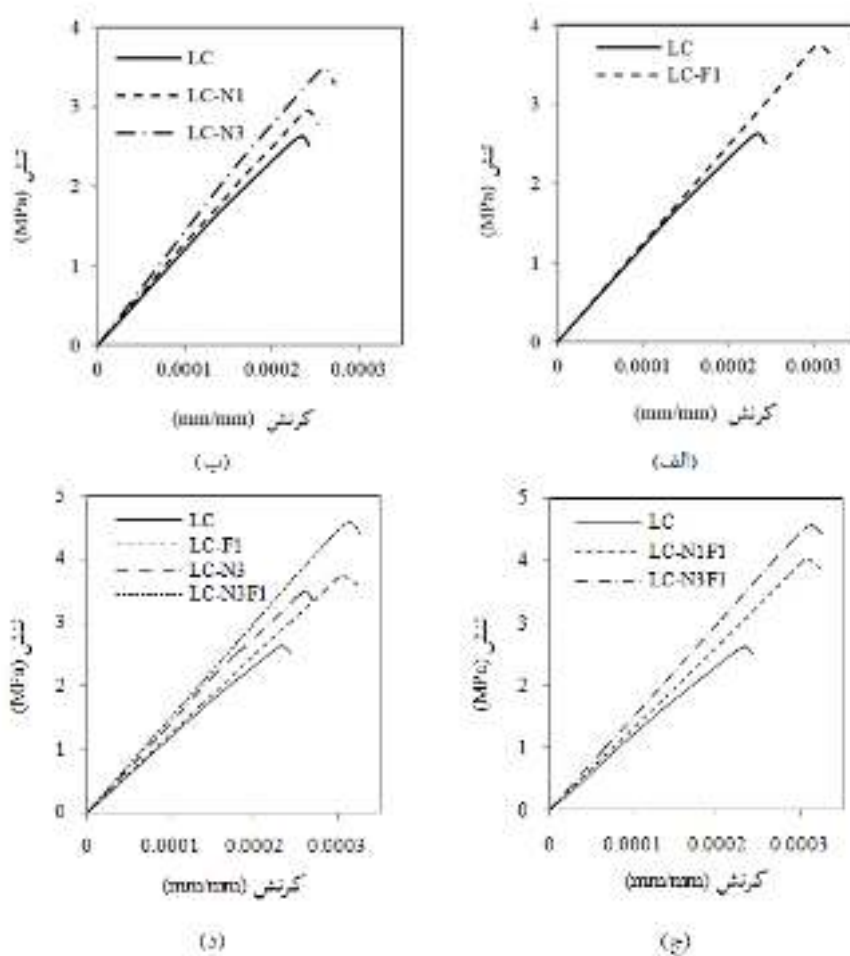


شکل ۹- نمونه‌ای از اختلاط کامل کلیه مصالح با یکدیگر

۳. نتایج و بحث

۱,۳. آزمایش کشش مستقیم

در این بخش منحنی‌های تنش-کرنش کلیه نمونه‌ها تحت کشش مستقیم در شاخه صعودی (شکل ۱۰) ارائه شده و پارامترهای موثر بر آن شامل مقاومت کششی مستقیم و کرنش در حداکثر تنش کششی بررسی شده است (جدول ۶).



شکل ۱۰- مقایسه منحنی تنش-کرنش کششی بتن سبک شاهد (LC) با نمونه‌های حاوی الف- الیاف فولادی، ب- نانوسیلیس، ج- ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی، د- ترکیبات مختلف.

جدول ۶- پارامترهای موثر بر منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها تحت کشش مستقیم

نمونه‌ها	مقاومت کششی مستقیم	کرنش در حداکثر تنش کششی
	f_t (MPa)	ϵ_{t0} (mm/mm)
LC	۲/۶۳	۰/۰۰۰۲۳۵
LC-F ^۱	۳/۷۴	۰/۰۰۰۳۰۷
LC-N ^۱	۲/۹۵	۰/۰۰۰۲۴۳
LC-N ^۳	۳/۴۹	۰/۰۰۰۲۶۱
LC-N ^۱ F ^۱	۴/۰۲	۰/۰۰۰۳۰۹
LC-N ^۳ F ^۱	۴/۵۷	۰/۰۰۰۳۱۲

همانطوریکه از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود نمودار تنش-کرنش کششی کلیه نمونه‌های بتن سبک قبل از نقطه پیک بصورت خطی است. مقاومت بتن سبک شاهد (LC) تحت کشش مستقیم ۲/۶۳ مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۶ و شکل ۱۰ مشخص است با افزودن یک درصد الیاف فولادی (نمونه LC-F^۱) باعث افزایش ۴۲ درصدی مقاومت کششی شده و به مقدار ۳/۷۴ مگاپاسکال رسیده است (شکل ۱۰-الف). با افزودن ۱ و ۳ درصد نانوسیلیس به تنهایی مقاومت کششی بتن سبک به میزان حدوداً ۱۲ و ۳۲ درصد افزایش یافته و به مقدار ۲/۹۵ و ۳/۴۹ مگاپاسکال رسیده است (شکل ۱۰-ب). افزودن نانوسیلیس به نمونه حاوی الیاف فولادی، به دلیل افزایش تراکم مخلوط و ایجاد سطح تماس و چسبندگی بیشتر بین الیاف و خمیرسیمان باعث بهبود عملکرد الیاف شده است (شکل ۱۰-ج). ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی در طرح LC-N^۳F^۱ بیشترین تاثیر را بر افزایش مقاومت کششی داشته و به میزان ۷۴ درصد نسبت به نمونه شاهد LC افزایش یافته است و به بیشترین مقدار برابر با ۴/۵۷ مگاپاسکال رسیده است (شکل ۱۰-د). نانوسیلیس باعث تغییر ناچیزی در کرنش متناظر با حداکثر تنش کششی شده درحالیکه با افزودن الیاف فولادی کرنش‌های بزرگتر کششی در بتن سبک ایجاد شده است. شکست تعدادی از نمونه‌ها تحت کشش مستقیم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- شکست تعدادی از نمونه‌های منشوری بتن سبک تحت کشش مستقیم

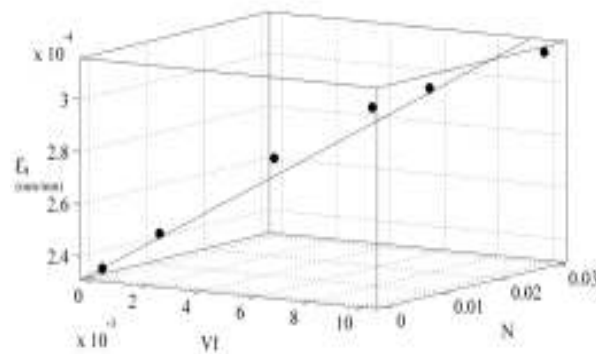
با توجه به داده‌های آزمایشگاهی رفتاری کششی این نوع بتن در شاخه صعودی بصورت خطی بوده و می‌توان از رابطه (۱) برای مدل سازی رفتار کششی بتن در ناحیه صعودی استفاده کرد:

$$\sigma = E \left(\frac{f_t}{E_t} \right) \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_t \quad (1)$$

که در این رابطه σ و به ترتیب تنش و کرنش کششی، f_t و E_t به ترتیب مقاومت کششی و کرنش متناظر با آن می‌باشد. در خصوص تخمین کرنش متناظر با حداکثر تنش کششی E_t برای نمونه‌های بتن سبک موجود در این تحقیق، رابطه‌ای در قالب رابطه (۲) با استفاده از تحلیل رگرسیون ارائه شده است (شکل ۱۲):

$$E_t = E_{t0} + (6,58 V_f + 0,638 N) \times 10^{-3} \quad R^2 = 0,97 \quad (2)$$

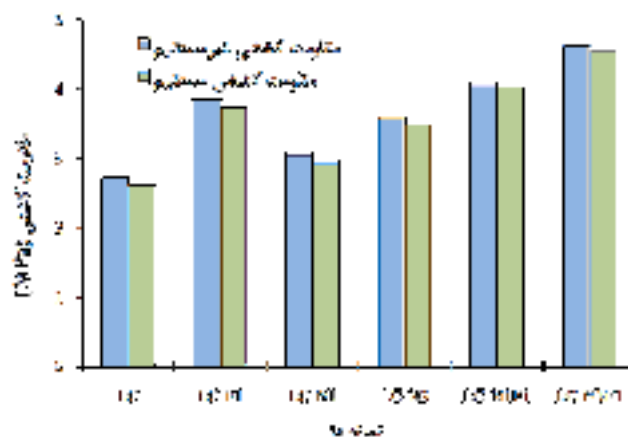
در این رابطه، E_{t0} کرنش در تنش ماکزیمم کششی و E_{t0} کرنش در تنش ماکزیمم کششی نمونه بتن سبک شاهد برحسب V_f , درصد حجمی الیاف فولادی و N درصد وزنی نانوسیلیس می‌باشد.



شکل ۱۲- رابطه بین کرنش در حداکثر تنش کششی، درصد الیاف فولادی و نانوسیلیس

۲.۳. آزمایش کشش غیر مستقیم

در شکل ۱۳ می‌توان روند افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم را در اثر افزودن نانوسیلیس و الیاف فولادی مشاهده کرد. کلیه آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که مقاومت کشش مستقیم، مقدار جزئی کمتر از مقاومت کشش غیر مستقیم می‌باشد.



شکل ۱۳- تاثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر مقاومت کششی غیرمستقیم بتن سبک در مقایسه با کشش مستقیم

با افزودن نانوسیلیس به میزان ۱ و ۳ درصد به ترتیب در نمونه های LC-N^۱ و LC-N^۳ مقاومت کششی بتن سبک به ترتیب به میزان حدوداً ۱۲ و ۳۱ درصد افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است با افزایش الیاف فولادی شاهد بهبود مقاومت کششی هستیم بطوریکه افزودن الیاف فولادی (نمونه LC-F^۱) باعث افزایش ۴۰ درصدی مقاومت کششی شده که به مقدار ۳/۸۵ مگاپاسکال رسیده است. این میزان بهبود با افزایش درصد نانوسیلیس تقویت شده بطوریکه ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی در طرح LC-N^۳F^۱ بیشترین تاثیر را بر افزایش مقاومت کششی داشته و به میزان ۶۹ درصد نسبت به نمونه شاهد LC افزایش یافته است و به بیشترین مقدار برابر با ۴/۶۲ مگاپاسکال رسیده است. در این تحقیق نشان داده شده که بهره‌گیری از نانوتکنولوژی می‌تواند راهکاری مناسب جهت بهبود هرچه بیشتر خواص مصالح سیمانی باشد بطوریکه با افزایش تراکم مخلوط، سطح تماس بیشتری بین الیاف و خمیر سیمان فراهم شده و عملکرد الیاف بهبود می‌یابد. در تست کشش غیرمستقیم برای بتن‌های سبک فاقد الیاف به صورت دو نیم شدن ترد، گسیخته شده و برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی به صورت یک ترک‌زیر بار وارده در راستای قطر مقطع صورت می‌گیرد (شکل ۱۴). لذا افزودن الیاف به بتن سبک، باعث کاهش چشمگیری در خردشدگی بتن می‌شود و آن می‌تواند به این دلیل باشد که الیاف، ماتریس بتن را در میان خود نگهداری کرده و مانع از خردشدن بتن می‌شود که یکی از فواید بسیار مهم استفاده از الیاف در هنگام وقوع زلزله است.



شکل ۱۴- نحوه شکست نمونه‌ها با و بدون الیاف تحت آزمایش کشش غیرمستقیم

۴. نتیجه گیری

- در این پژوهش به بررسی تاثیر نانوسیلیس و الیاف فولادی بر رفتار کششی تحت بارگذاری یکنواخت پرداخته شده است. در محدوده آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:
- نمودار تنش- کرنش کششی کلیه نمونه‌های بتن سبک قبل از نقطه پیک بصورت خطی است.
 - افزودن یک درصد الیاف فولادی باعث افزایش ۴۲ درصدی مقاومت کششی مستقیم شده است.
 - ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی بیشترین تاثیر را بر افزایش مقاومت کششی داشته و مقاومت کششی مستقیم در نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس و الیاف فولادی به میزان ۷۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و به مقدار ۴/۵۷ مگاپاسکال رسیده است.
 - نانوسیلیس باعث تغییر ناچیزی در کرنش متناظر با حداکثر تنش کششی شده درحالی‌که با افزودن الیاف فولادی کرنش‌های بزرگتر کششی در بتن سبک ایجاد شده است.
 - در کلیه نمونه‌ها مقاومت کششی مستقیم به مقدار جزئی کمتر از مقاومت کششی غیر مستقیم می‌باشد.

- [۱] Oertel, T., Hutter, F., Tänzer, R., Helbig, U. & SEXTL, G. (۲۰۱۳). "Primary Particle Size and Agglomerate Size Effects of Amorphous Silica on Ultra-High Performance Concrete". Cement and Concrete Composites, Vol. ۳۷, pp ۶۱-۶۷.
- [۲] Kawashima, S., Hou, P., CORR D. J. & Shah, S. P. (۲۰۱۳). "Modification of Cement-Based Materials with Nanoparticles". Cement and Concrete Composites, Vol. ۳۶, pp ۸-۱۵.
- [۳] Haruehansapong, S., Pulngern, T. & Chucheeepsakul, S. (۲۰۱۴). "Effect of The Particle Size of Nanosilica on The Compressive Strength and The Optimum Replacement Content of Cement Mortar Containing Nano-SiO₂". Construction and Building Materials, Vol. ۵۰, pp ۴۷۱-477.
- [۴] Amin, M. & K. Abu el-Hassan, K. (۲۰۱۵). "Effect of Using Different Types of Nano Materials on Mechanical Properties of High Strength Concrete". Construction and Building Materials, Vol. ۸۰, pp ۱۱۶-۱۲۴.
- [۵] Du, H., Du S. & Liu, X. (۲۰۱۵). "Effect of Nano-Silica on The Mechanical and Transport Properties of Lightweight Concrete". Construction and Building Materials, Vol. ۸۲, pp ۱۱۴-۱22.
- [۶] Hassanpour, M., Shafigh, P. & Mahmud, H. B. (۲۰۱۲). "Lightweight Aggregate Concrete Fiber Reinforcement—A Review". Construction and Building Materials, Vol. ۳۷, pp ۴۵۲-۴61.
- [۷] Choi, J., Zi, G., Hino, S., Yamaguchi, K. & Kim, S. (۲۰۱۴). "Influence of Fiber Reinforcement on Strength and Toughness of All-Lightweight Concrete". Construction and Building Materials, Vol. 69, pp 381-389.
- [۸] Wang, H. T. & Wang, L. C. (۲۰۱۳). "Experimental Study on Static and Dynamic Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete". Construction and Building Materials, Vol. ۳۸, pp ۱۱۴۶-۱۱۵۱.
- [۹] Tasnimi, A. (۲۰۰۴). "Mathematical Model for Complete Stress–Strain Curve Prediction of Normal, Light-Weight and High-Strength Concretes". Magazine of Concrete Research, Vol. ۵۶, pp ۲۳-34.
- [۱۰] Vecchio, F.J. & Collins, M.P. (۱۹۸۶). "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear". ACI Journal, Vol. ۸۳(۲), pp ۲۱9-231.
- [۱۱] Belarbi, A. & Hsu, T.T. (۱۹۹۴). "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete". ACI Structural Journal, Vol. ۹۱(۴), pp ۴۶۵-۴۷۴.
- [۱۲] Hillerborg, A., Modéer, M. & Petersson, P.E. (۱۹۷۶). "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements". Cement and concrete research, Vol. ۶(۶), pp ۷۷۳-۷۸۱.
- [۱۳] Gopalaratnam, V.S. and Shah, S.P. (۱۹۸۵). "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension". In Journal Proceedings, Vol. ۸۲(۳), pp ۳10-323.
- [۱۴] Yankelevsky, D.Z. & Reinhardt, H.W. (۱۹۸۷). "Response of Plain Concrete to Cyclic Tension". Materials Journal, Vol. ۸۴(۵), pp ۳۶۵-۳۷۳.
- [۱۵] Zheng, W., Kwan, A.K.H. & Lee, P.K.K. (۲۰۰۱). "Direct Tension Test of Concrete". Materials Journal, Vol. ۹۸(۱), pp ۶۳-۷۱.
- [۱۶] ASTM C۳۳۰. (۲۰۱۷). "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, American Society for Testing and Materials". West Conshohocken.
- [۱۷] Saman Cement Company, <http://www.samacement.com/>.
- [۱۸] Construction Chemicals Manufactures, <https://www.abadgarangroup.net/>.
- [۱۹] www.fadakgroup.ir

[۲۰] <http://www.meisoona.com/>

[۲۱] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی.

[۲۲] ACI ۳۱۸-۱۴ (۲۰۱۴). "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". American Concrete Institute.

[۲۳] ACI ۲۱۱,۲-۰۴. (۲۰۰۴). "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete". Farmington Hills, American Concrete Institute.

[۲۴] ASTM C۴۹۶. (۲۰۱۷). "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens". West Conshohocken, American Society for Testing and Materials.

The Effect of Nano Silica and Steel Fibers on the Tension Behavior of Structural Lightweight Concrete

Soodeh Akbarpour¹, Hooshang Dabbagh², Hasan Golestaneh³

¹Assistant Professor, Saroyeh Institute of Higher Education

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan

³MSc Student, Road and Transportation Engineering, Saroyeh Institute of Higher Education

(so.akbarpour@gmail.com)

Abstract:

Relatively weak mechanical properties of lightweight aggregate (LWA) such as brittleness and low strength discourage further application of lightweight aggregate concrete (LWAC) in structural members. The helpful method to enhance mechanical properties of concrete is the use of pozzolanic and reinforcing materials. The incorporation of admixtures affect the concrete behavior, so experimental data of the stress-strain curve is required to simulate the structural behavior of concrete. In this paper, the effects of nano-silica (1% and 3%) and steel fibers (constant volume fraction of 1%) on the tension behavior of LWAC are evaluated. Furthermore, the key parameters controlling tension behavior of concrete including tension strength and strain at peak stress were evaluated under monotonic loading. Results indicate that the optimized combination of steel fibers and Nano-silica has significant effect on improvement of tension behavior of LWAC. The direct tension strength in the mix containing 3% Nano-silica and 1% steel fiber increased by 44% compared to the plain mixture. Also, indirect tensile strength tends to be slightly higher than direct tension strength in all specimens.

Keywords: Lightweight aggregate concrete, Steel fiber, Nano-silica, Direct tension.