

رفتار مکانیکی پوسته های استوانه‌ای جدار نازک کامپوزیت سیمانی مسلح به الیاف تحت بارگذاری داخلی یکنواخت

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^{۱*}، اشکان سرادار^۲، بهزاد طهمورسی^۳

۱- استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

با پیشرفت و توسعه صنعت بتن، ساخت سازه‌های مدرن با بهره‌وری فنی و اقتصادی بالا به امری اجتناب ناپذیر تبدیل شده که از جمله آن‌ها می‌توان به سازه‌های پوسته‌ای بتنی اشاره کرد. سازه‌های پوسته‌ای بتنی که اغلب "پوسته جدار نازک" نامیده می‌شوند، عناصر سازه‌ای مناسب برای احداث زیرساخت‌های بزرگ تاسیساتی مانند مخازن نفت و آب، سیلوها و غیره هستند. در این تحقیق رفتار مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک کامپوزیت سیمانی مسلح به الیاف تحت بارگذاری یکنواخت داخلی از نوع هیدرواستاتیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین منظور ۳۶ مدل کوچک از پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک حاوی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ دوده سیلیسی (جایگزین وزن سیمان) و ۰٪، ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ الیاف شیشه با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ ساخته و پس از ۲۸ روز عمل آوری در شرایط مرطوب، آزمایش شدند. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و نیز مقاومت خمشی نمونه‌های منشوری برای ایجاد ارتباط با نتایج پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شدند. نتایج نشان داده است که استفاده از دوده سیلیسی موجب افزایش مقاومت های فشاری و خمشی به ترتیب تا ۲۷٪ و ۳۲٪ می‌شود. همچنین حضور الیاف اثر قابل توجهی بر افزایش مقاومت فشاری نداشته اما موجب افزایش مقاومت خمشی تا ۲۱٪ می‌شود. در استوانه‌های جدار نازک افزودن دوده سیلیسی موجب افزایش مقاومت کششی حلقوی تا ۱۰٪ و کاهش کرنش تا ۲۸٪ می‌شود. همچنین افزودن ۲/۵٪ و ۰/۵٪ الیاف شیشه به ترتیب موجب افزایش ۷/۴ برابری کرنش نهایی و رشد ۳۷٪ مقاومت کششی حلقوی می‌شود.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی، پوسته استوانه‌ای جدار نازک، بارگذاری هیدرواستاتیک، الیاف شیشه، دوده سیلیسی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.83333.1153	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.83333.1153	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۶/۰۶/۰۲	۱۳۹۶/۰۲/۰۷
سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد					*نویسنده مسئول:	
h.mosavi@guilan.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Mechanical behavior of fiber reinforced cementitious composite thin- wall cylindrical shells under internal loading uniform

S. Hosein Ghasemzadeh Mosavinejad^{1*}, Ashkan Saradar², Behzad Tahmouresi³

1- Assistant Professor of Civil Engineering Department, Technical Faculty, University of Guilan., Rasht, Iran.

2- M.Sc in Structural Engineering, University Campus, University of Guilan., Rasht, Iran.

3- M.Sc in Structural Engineering, Technical Faculty, University of Guilan., Rasht, Iran.

ABSTRACT

With the advancement and development of the concrete industry, the construction of modern structures with high technical and economic efficiency is inevitable, that among which can be cited concrete shell structures. Concrete shell structures that often referred to as 'thin- wall shells' are suitable structural elements for building spacious infrastructures facilities such as oil and water tanks, silos and etc. In this study, the mechanical behavior of fiber-reinforced cementitious composite thin-wall cylindrical shells under uniform hydrostatic loading has been studied. For this purpose, 36 small sized model of thin-walled cylindrical shells continuing 0%, 5%, 10% sf (partial cement replacement) and 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% glass fiber with w/c=0.38 were made and tested after 28 days of wet curing conditions. The compressive and flexural strengths of composite samples were tested to relating concrete strengths with the results of cylindrical shells. Results showed that, the use of silica fume has increased compressive and flexural strength up to 27% and 32%, respectively. Moreover, it also showed that the presence of fiber had no significant effect on compressive strength but increased flexural strength to 21%. In cylindrical shells the addition of sf has increased annular tensile strength to 10% and reduced a strains to 28%. Furthermore, addition of 2.5% and 0.5% glass fiber has raised ultimate strain 7.4 times and annular tensile strength up to 37%, respectively.

ARTICLE INFO

Received: 24/07/2017

Revised: 24/08/2017

Accepted: 15/09/2017

Keywords:

Cementitious composite,
Thin- wall cylindrical shell,
Hydrostatic loading,
Glass fiber,
Silica Fume.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.83333.1153

*Corresponding author: S. Hosein Ghasemzadeh Mosavinejad.

Email address: h.mosavi@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

بتن ماده‌ای مرکب با مقاومت کششی و کرنش پایین است [۱]. افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی، ضمن کنترل انواع ترک‌ها (سازه‌ای و انقباضی)، خواص مهندسی آن از جمله مقاومت‌های کششی و خمشی، مقاومت در برابر ضربه، خستگی، شکل پذیری، سختی و ظرفیت پسا ترک را به طور قابل توجهی می‌تواند بهبود بخشد [۳ و ۲]. همین امر موجب استفاده روز افزون و گسترده از بتن الیافی (FRC) و کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف (FRCC) در زیرساخت‌های عمرانی از جمله فرودگاه‌ها، بزرگراه‌ها، سقف‌های صنعتی، عرشه پل‌ها، دال‌های مرتفع، بسترهای بتنی، جداربندهای تونل، و قطعات پیش ساخته شده است [۵ و ۴]. از این رو استفاده از انواع الیاف‌های آلی و معدنی مورد توجه محققان قرار گرفته است. از الیاف‌های در دسترس و پرکاربرد می‌توان به الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه اشاره کرد که مورد اخیر در این تحقیق استفاده شده است. در سال‌های اخیر مطالعه بر روی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف، شدت و تنوع بیشتری یافته است و پژوهشگران مختلفی انواع الیاف و رفتار آن‌ها در ماتریس سیمانی را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۸-۶]. تاسو و لوبل [۹] در تحقیقی خواص مکانیکی بتن حاوی الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری یا مدول الاستیسیته ندارد اما به طور قابل توجهی باعث افزایش مقاومت خمشی و مقاومت برشی مستقیم می‌شود که این موضوع با افزودن مقدار الیاف شدت پیدا می‌کند. در تحقیق دیگری با موضوع اثر حرارت بر مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف نشان داده شد که افزودن الیاف شیشه به کامپوزیت سیمانی موجب افزایش خیز (ظرفیت) خمشی تا ۱۸٪ و ۱۶۵٪ به ترتیب در دمای اتاق و حرارت‌های بالا می‌شود، اما اثر آن بر مقاومت فشاری نامطلوب گزارش شد [۱۰].

با توسعه و پیشرفت در حوزه مهندسی سازه و مکانیک و ترکیب آن‌ها با صنعت بتن، انواع جدیدی از فرآورده‌های سیمانی با هندسه و مکانیزم عملکرد مختلف و پیچیده ظهور پیدا کرده است که از جمله آن‌ها می‌توان به رویه‌ها و پوسته‌های جدار نازک اشاره کرد [۱۱].

سازه‌های پوسته‌ای از گذشته تا کنون مورد توجه معماران و مهندسان عمران بوده‌اند که از نمونه‌های مشهور تاریخی آن‌ها می‌توان گنبد‌ها را نام برد. در طی سال‌ها، این سازه‌ها با شکل‌ها و کاربردهای مختلف همچون: گنبد‌ها، مخازن، سیلوها، لوله‌ها، سقف‌های منحنی انواع ساختمان‌ها و بناهای کوچک و بزرگ یا سازه‌های هنری و نمادین با بتن ساخته شده‌اند. آنچه این سازه‌ها را از نظر مهندسی سازه مورد توجه قرار می‌دهد، بهره‌وری باربری، نسبت مقاومت به وزن بسیار بالا، ارائه حجم فضایی مطلوب و سطح تحت پوشش زیاد با مصرف نسبتاً کم مصالح است که ضمن خلق زیبایی معماری، نوعی بهینه‌سازی ذاتی در خود به همراه دارد. با گسترش فن‌آوری‌های بتن و ساخت سازه‌های بتنی، افزایش کیفیت و مقاومت مصالح بتنی، این نوع سازه‌ها روز به روز با ضخامت‌های کمتر، هندسه‌های پیچیده‌تر و استحکام و پایداری بیشتر ساخته می‌شوند. حرکت به سمت ضخامت‌های کمتر، طراحی این گونه سازه‌ها را با علوم تحلیل و طراحی پوسته‌های نازک امکان پذیر ساخته است [۱۲].

نخستین آثار سازه‌های پوسته‌ای را می‌توان در تمدن‌های کهن ایران و روم یافت. اولین سد پوسته‌ای جهان حدود دوهزار سال قبل در شهر ایزدخواست استان فارس و معبد پانتئون نیز حدود سه دهه پیش از میلاد (یکی از گنبد‌های زیبای به جا مانده از دوره رومیان) ساخته شدند. اولین سازه پوسته‌ای بتنی در سال ۱۹۲۲ توسط باورزفیلد و دیچینگر در آلمان ساخته شد که موجب شکل‌گیری تئوری پوسته‌های بتنی شد [۱۳ و ۱۴].

رویه‌های منحنی فضایی سازه‌های پوسته‌ای را می‌توان به روش‌های مختلفی طبقه بندی نمود که انواع رایج آن عبارتند از: منحنی‌های گاوسی، منحنی‌های هندسی و منحنی‌های غیرهندسی (بار-مبنا). هر یک از این طبقه بندی‌ها کاربردهای خاص خود را دارند و برای طراحی در شرایط مشخصی در نظر گرفته می‌شوند. بسته به انحای رویه، پوسته‌ها به انواع استوانه‌ای (غیردایروی و دایروی)، مخروطی، کره‌ای و غیره تقسیم بندی می‌شوند. دو دسته متفاوت پوسته از نظر ضخامت وجود دارد: پوسته‌های ضخیم و پوسته‌های نازک. برای گستره وسیعی از کاربردهای مهندسی، پوسته‌هایی که مشخصات آن‌ها در رابطه زیر صدق کند، از نظر مهندسی پوسته نازک محسوب می‌شوند [۱۵].

¹ fiber reinforced concrete

² fiber reinforced cementitious composites

$$\frac{1}{1000} \leq \frac{h}{R} \leq \frac{1}{20} \quad (1)$$

در رابطه فوق، h ضخامت پوسته و R شعاع قوس رویه است.

مطالعات بسیاری بر روی رفتار پوسته‌ها و تئوری آن‌ها مانند پوسته‌های آلیاژی (لوله‌ها) در شکل‌ها و پیکرهای مختلف انجام شده است. با وجود فراوانی منابع علمی در زمینه تحلیل و طراحی پوسته‌ها، آزمایش‌های تجربی و میدانی کمی بر روی پوسته‌های بتنی و سیمانی انجام شده است. از جمله برنامه‌های آزمایشگاهی انجام شده مطالعات مهتا در سال ۱۹۷۶ بود که بر روی مخروط‌های ناقص و ظرفیت باربری آن‌ها تحقیقاتی را انجام داد [۱۶]. نتایج کار او شامل بررسی رفتار پوسته تحت بار خارجی در ناحیه الاستیک، غیرالاستیک و پیشروی تا گسیختگی کامل بود. از دیگر کارهای اولیه انجام شده نیز می‌توان به پژوهش بیلینگتون و همکارانش در سال ۱۹۸۱ اشاره کرد [۱۷].

در سال ۲۰۰۶ ماتون و لیمام خرابی پوسته‌های استوانه‌ای نازک فولادی در معرض فشار داخلی و خمش خالص را مطالعه کردند [۱۸]. آن‌ها سیستم بارگذاری نسبتاً پیچیده‌ای را برای آزمایش پوسته فولادی به کار بردند، به طوری که استوانه‌ها همزمان تحت فشار یکنواخت داخلی و خمش خالص بودند. به عنوان نتیجه کلی گزارش دادند که برای اهداف طراحی ضروری است تا خرابی کمانش‌های موضعی یا کلی سازه درگیر در نظر گرفته شود.

تحقیقات بر روی انواع پوسته‌های بتنی به طور محدود انجام شده که از آن جمله می‌توان پوسته گنبدی کروی شکل را نام برد. چنگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ رفتار کوتاه مدت گنبد بتنی جدار نازک با مقیاس واقعی و تحت فشار یکنواخت خارجی را مورد آزمایش قرار دادند [۱۹]. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که در خلال بارگذاری فشاری، گنبد بتنی به طور قابل توجهی رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد و ناحیه بحرانی برای گسیختگی، فاصله بین تاج و لبه گنبد است (حداکثر تنش فشاری). همچنین گسیختگی گنبد به دلیل کمانش غیر متقارن در ناحیه موضعی، تحت تاثیر خم شدن، نوع مصالح و رفتار غیر خطی هندسی اتفاق می‌افتد.

توسعه مدل‌های پوسته‌ای را در آزمایش‌های مربوط به تحقیق و رویمپ و همکارانش می‌توان مشاهده نمود [۲۰]. به دنبال استفاده از مصالح مسلح کننده جهت افزایش پایداری و کاهش هزینه‌ها، منسوجات بافته شده موجب کاهش ضخامت سازه‌های پوسته‌ای می‌شود که رویمپ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بر روی این موضوع و چالش اصلی آن یعنی کمانش تحقیق کردند. پوسته‌هایی با هندسه‌های پیچیده‌تر نیز ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بولستر و همکاران در سال ۲۰۰۷ پوسته‌های هایپربولیک را به منظور کاربرد در ساخت و ساز سبک مورد آزمایش قرار دادند [۲۱]. رفتار خطی پوسته‌های بتنی تقویت شده با پارچه در بارگذاری، یکی از نکات قابل توجه در نمودارهای نمایش داده شده در پژوهش آن‌ها می‌باشد. در ده سال گذشته با پیشرفت فن آوری کامپوزیت سیمانی، انواع افزودنی‌ها و ریز شدن حداکثر اندازه سنگدانه، راه برای ساخت مدل‌های عملی آزمایشگاهی و آزمون‌های تخصصی در حوزه پوسته‌های جدار نازک هموارتر شده است.

باتوجه به مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در پژوهش‌های پیشین به دلیل عدم وجود مدل هندسی برای ارزیابی پوسته‌های نازک استوانه‌ای با پایه سیمانی، در پژوهش حاضر با طراحی و ساخت مدلی نوین از یک لوله نازک کامپوزیتی، سیستم بارگذاری و سیستم اندازه‌گیری، تلاش شده تا با ابداع روشی جدید رفتار نوع خاصی از پوسته‌های جدار نازک ارزیابی شود. اهداف مورد مطالعه در تحقیق حاضر عبارتند از: (الف) ابداع مدلی نوین برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌های استوانه‌ای جدار نازک از جنس کامپوزیت سیمانی الیافی، (ب) بررسی رفتار مقاومتی پوسته‌های استوانه‌ای، (پ) تعیین رابطه بین مقاومت فشاری و خمشی تحت بارگذاری استاتیکی با مقاومت کششی حلقوی تحت بارگذاری فشار هیدرواستاتیکی و (پ) اثر بخشی پوزولان معدنی دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان در مخلوط‌های سیمانی.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱.۲. مواد و مصالح

در این پژوهش از سیمان تیپ ۴۲۵-۱ مطابق ASTM C150 و دوده سیلیسی شرکت فروسیلیس ایران مطابق ASTM C1240 در طرح اختلاطها استفاده شده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها در جدول ۱ آورده شده است. سنگدانه مصرفی جهت ساخت طرحها، تهیه شده از ماسه بادی تمیز ساحل بندرانزلی و رد شده از الک نمره ۶۰ (کوچکتر از ۲۵۰ میکرون) بود. دانه بندی استفاده شده مطابق مرجع [۲۲] انتخاب شد. جهت رسیدن به کارایی مطلوب و پخش مناسب الیاف شیشه در مخلوطهای سیمانی، از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات با نام تجاری P10-3R استفاده شد. الیاف شیشه از نوع خرد شده با طول ۶ میلی متر و قطر حدود ۱۴ میکرومتر استفاده شد که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده است. الیاف شیشه مصرفی تهیه شده از شرکت ایران کامپوزیت بود که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

برای ساخت مخلوطهای سیمانی حاوی مواد پوزولانی، از دوده سیلیسی (SF) در نسبت‌های جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ وزنی سیمان و از الیاف شیشه (GF) به میزان ۰٪، ۰/۱۵٪، ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪ و ۰/۲۵٪ حجم مخلوط استفاده شد. لازم به ذکر است که درصدهای انتخاب شده برای دوده سیلیسی و الیاف شیشه بر اساس توصیه برخی از تحقیقات پیشین می باشد [۲۳].

جدول ۱: خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی مواد سیمانی

ترکیبات شیمیایی (% وزنی)								خواص فیزیکی	
SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	سطح ویژه (m ² /kg)	چگالی (gr/cm ³)
۲/۱	۰/۵	۰/۸۲	۲	۳/۶۴	۵/۳۶	۲۱/۰۸	۶۴/۳۴	۳۱۰	۳/۱۵
۰	۰	۰	۲	۲	۱	۹۰	۱/۵	۱۹۵۰	۲/۲



شکل ۱: الیاف شیشه خرد شده

جدول ۲: مشخصات الیاف شیشه مصرفی

قطر (میکرون)	طول (میلی متر)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	جرم حجمی (kg/m ³)	کرنش (%)
۱۴	۶	۳۴۴۵	۲/۵۸	۲/۴

۲-۲- ساخت و عمل آوری کامپوزیت های سیمانی

برای تهیه مخلوطها ابتدا سیمان و دوده سیلیسی به صورت خشک با هم مخلوط می شوند تا پودری با ظاهر یکنواخت و همگن حاصل گردد. سپس آب در مدت ۳۰ ثانیه در میکسر با سرعت ۸۰ دور بر دقیقه اضافه گردید و پس از آن اختلاط با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه ادامه یافت تا خمیر یکنواختی در مدت ۲ دقیقه حاصل شود. سپس ماسه در مدت ۳۰ ثانیه به تدریج به خمیر اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط همزده می شود. در ادامه فوق روان کننده به مخلوط اضافه گشته و به مدت ۲ دقیقه با سرعت بالا هم زدن ادامه می یابد. الیاف شیشه به صورت دستی و تدریجی در مدت ۲۰ ثانیه در بخش های مختلف ظرف روی مخلوط ریخته می شود. در پایان همزدن با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳ دقیقه ادامه می یابد. معیار توزیع مناسب الیاف، پهنه بندی مخلوط تازه به نواحی مساوی و ارزیابی چشمی در جهت بررسی عدم وجود توده های الیافی در مخلوط بوده است. با افزایش درصد الیاف، جهت حفظ روانی تقریباً یکسان، از فوق روان کننده با درصد های متفاوت استفاده شده است. با توجه به عدم دقت و نتایج نادرست آزمون های متعارف برای روانی ملات و بتن کامپوزیت های الیافی به ویژه در درصد های بالای الیاف، از یک آزمون ساده برای تعیین روانی مطلوب استفاده شده بدین صورت که دو ورق شیشه ای به ابعاد ۲۵۰ در ۲۵۰ میلی متر و با فاصله ۶ میلی متر برای سنجش میزان جریان پذیری و خودتراکمی مخلوط در فاصله هوایی بین ورق ها، مورد استفاده قرار گرفتند [۲۴]. قالب استفاده شده برای ساخت پوسته استوانه ای پس از طی مراحل طراحی نرم افزاری با دستگاه CNC ساخته شد که دارای صلبیت کافی جهت تحمل وزن مخلوط تازه می باشد. عملیات قالب گیری به صورت یکپارچه و بدون ویبره به وسیله یک قیف پلاستیکی در قالب صورت گرفت. شکل ۲ قالب استوانه ای استفاده شده را نشان می دهد. قالب مورد نظر پس از ۲۴ ساعت با رعایت شرایط خاص و بر اساس تمهیدات ویژه تعبیه شده بر روی آن، باز گردید. نمونه ها مطابق با الزامات ASTM C192، پس از ۲۴ ساعت عمل آوری از قالب خارج شده و در حوضچه های آب آهک اشباع با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند.

طرح های اختلاط کامپوزیت های ساخته شده در جدول ۳ نشان داده شده اند. در قسمت "کد طرح" اعداد جلوی حروف نشان دهنده مقدار مصرفی مواد در مخلوط است، به عنوان مثال "SF10G1" نشان دهنده ۱۰٪ (وزن سیمان) دوده سیلیسی و ۱٪ (حجم مخلوط) الیاف شیشه در مخلوط سیمانی است.



شکل ۲: قالب استفاده شده برای ساخت پوسته استوانه ای

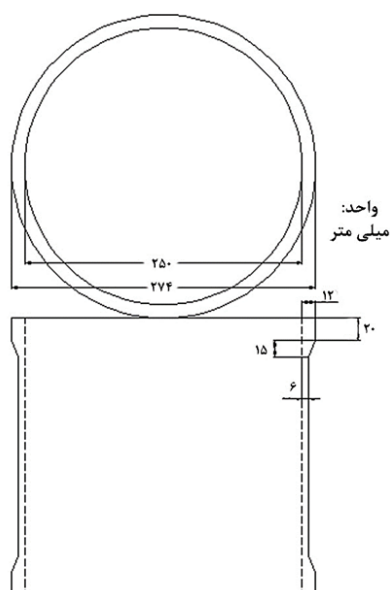
³ computer numerical control

جدول ۳. نسبت طرح اختلاط کامپوزیت های سیمانی الیافی برای یک متر مکعب

کد طرح	آب به مواد سیمانی	سیمان (Kg)	دوده سیلیسی (Kg)	ماسه (Kg)	فوق روان کننده (Kg)	مقدار حجمی الیاف (%)	مقدار جرمی الیاف (Kg)
SF0G0	۰/۳۸	۸۰۰	۰	۱۱۶۵	۴/۸	۰	۰
SF5G0	۰/۳۸	۷۶۰	۴۰	۱۱۵۳	۶/۴	۰	۰
SF10G0	۰/۳۸	۷۲۰	۸۰	۱۱۳۹	۶/۴	۰	۰
SF0G0.5	۰/۳۸	۸۰۰	۰	۱۱۶۵	۵/۶	۰/۵	۱۲/۹
SF5G0.5	۰/۳۸	۷۶۰	۴۰	۱۱۵۳	۶/۴	۰/۵	۱۲/۹
SF10G0.5	۰/۳۸	۷۲۰	۸۰	۱۱۳۹	۷/۲	۰/۵	۱۲/۹
SF0G1	۰/۳۸	۸۰۰	۰	۱۱۶۵	۶/۴	۱	۲۵/۸
SF5G1	۰/۳۸	۷۶۰	۴۰	۱۱۵۳	۷/۲	۱	۲۵/۸
SF10G1	۰/۳۸	۷۲۰	۸۰	۱۱۳۹	۸	۱	۲۵/۸
SF0G1.5	۰/۳۸	۸۰۰	۰	۱۱۶۵	۷/۲	۱/۵	۳۸/۷
SF5G1.5	۰/۳۸	۷۶۰	۴۰	۱۱۵۳	۸	۱/۵	۳۸/۷
SF10G1.5	۰/۳۸	۷۲۰	۸۰	۱۱۳۹	۸/۸	۱/۵	۳۸/۷
SF0G2	۰/۳۸	۸۰۰	۰	۱۱۶۵	۸/۸	۲	۵۱/۶
SF5G2	۰/۳۸	۷۶۰	۴۰	۱۱۵۳	۹/۶	۲	۵۱/۶
SF10G2	۰/۳۸	۷۲۰	۸۰	۱۱۳۹	۱۰/۴	۲	۵۱/۶
SF0G2.5	۰/۳۸	۸۰۰	۰	۱۱۶۵	۱۰/۴	۲/۵	۶۴/۵
SF5G2.5	۰/۳۸	۷۶۰	۴۰	۱۱۵۳	۱۱/۳	۲/۵	۶۴/۵
SF10G2.5	۰/۳۸	۷۲۰	۸۰	۱۱۳۹	۰/۰۱۶	۲/۵	۶۴/۵

۲-۳- مدل هندسی پوسته استوانه‌ای

پوسته استوانه‌ای طراحی شده با ضخامت جداره ۶ میلی‌متر و قطر داخلی و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر، خصوصیات هندسی یک پوسته نازک را برآورده می‌سازد [۲۵]. استفاده از المان‌های حلقه‌ای ضخم تر از جداره (ماهیچه) در دو لبه انتهایی جهت ناچیز کردن تمرکز تنش در لبه‌ها و یکنواخت کردن تنش در سطح پوسته، در نظر گرفته شد. شکل ۳ جزئیات و اندازه‌گذاری مقاطع دو بعدی پوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ابعاد و جزئیات پوسته استوانه‌ای

۲-۴- روش های آزمون

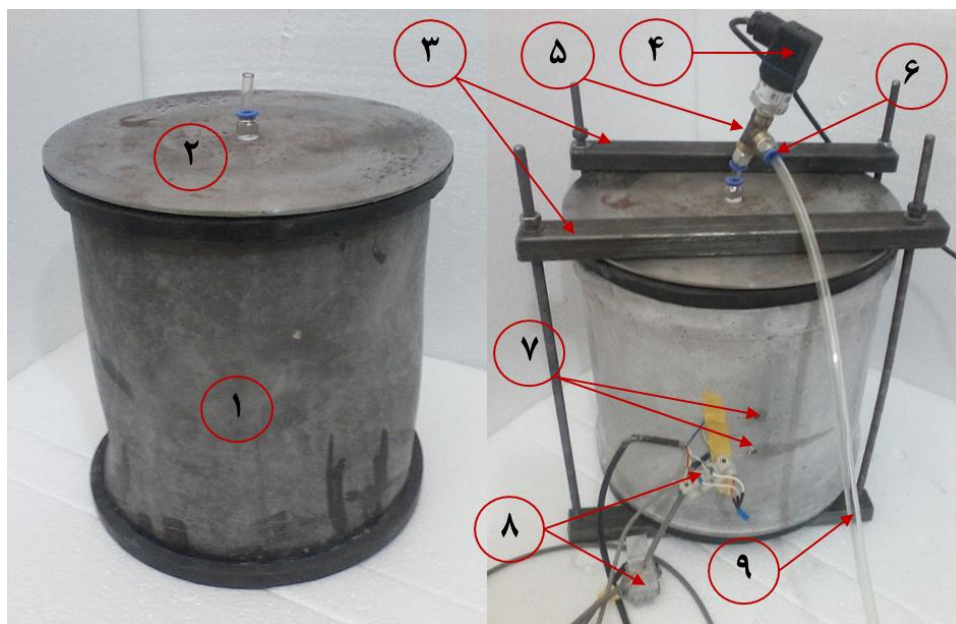
۲-۴-۱- مقاومت فشاری و خمشی

آزمون مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی بر روی نمونه‌های مکعبی با بُعد ۵۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز بر اساس ASTM C109 انجام شد [۲۶]. سرعت بارگذاری بکار گرفته شده در این آزمایش ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه بود. نتایج متوسط سه آزمون مکعبی به عنوان نتیجه آزمایش مقاومت فشاری گزارش شد.

آزمون مقاومت خمشی روی نمونه‌های منشوری ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز بر اساس ASTM C348 اندازه‌گیری شد [۲۷]. نمونه‌های خمشی با سرعت ثابت یک میلی‌متر بر دقیقه تا مرحله گسیختگی بارگذاری شدند. نتایج متوسط سه آزمون منشوری به عنوان نتیجه آزمایش مقاومت خمشی گزارش شد.

۲-۴-۲- بارگذاری روی پوسته استوانه ای

سیستم بارگذاری شامل کمپرسور هوای ۵۰ لیتری پر قدرت، لوله‌ها و شیرهای مخصوص فشار قوی، اتصالات، تیوب بارگذاری و قاب فولادی می‌باشد. کمپرسور با ظرفیت بالا امکان بارگذاری حجم تیوب تا فشار بحرانی را بدون روشن شدن پمپ و با کمترین خطا امکان پذیر می‌سازد. کلیه شیلنگ‌ها و اتصالات برای فشار ۱۰ بار (Bar) طراحی شده‌اند و در فشارهای مورد نظر خطای ناچیزی دارند. تیوب بارگذاری که لوله لاستیکی استوانه‌ای با حداقل فاصله ممکن با جداره پوسته می‌باشد (مماس با جداره وارد لوله می‌شود)، از دو طرف با دیسک‌های فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر جهت مهار تغییر شکل تیوب در راستای محور استوانه، پوشانده شده است. قاب فولادی شامل دو چارچوب فولادی قابل تنظیم با پیچ و مهره است که صرفاً جابجایی محوری (طولی) تیوب را مقید می‌کند و به این ترتیب فشار بر جداره داخلی پوسته استوانه ای وارد می‌شود. سیستم اندازه گیری شامل حسگرهای فشار و کرنش سنجش، کابل‌ها و اتصالات و داده بردار (Data Logger) است. حسگر فشار ۱۰ بار، در نزدیک‌ترین فاصله ممکن به تیوب جهت سنجش فشار داخلی تیوب نصب شده است. کرنش سنج‌ها با فاصله ۲۵ میلی‌متر از تار حلقوی میانه پوسته به موازات تار حلقوی دایره‌ای و در یک راستا (محور طولی استوانه) نصب شده‌اند تا علاوه بر کنترل خطا و اطمینان از نتایج دریافتی، کرنش رویه خارجی پوسته را در راستای محیط آن به دست دهند. همچنین برای کاهش اختلالات (noise) در اندازه‌گیری و ثبت داده با دقت بالا از پل و تستون (اندازه گیری مقاومت مجهول)، ما بین کرنش سنج و داده بردار استفاده شده است. در فرآیند بارگذاری جهت تنظیم سرعت، شیر گاز مینیاتوری ۱/۴ به کار برده شد که با نرخ کرنش 2×10^{-7} بر ثانیه، سرعت افزایش فشار داخلی تیوب تنظیم شد. داده بردار ۲۴ بیتی طراحی شده برای این مجموعه اطلاعات نرخ اندازه‌گیری دو نمونه بر ثانیه را با دقت بالا در رایانه ذخیره می‌کند. در شکل ۴ حسگرهای نصب شده بر روی نمونه دیده می‌شود.



۱: تیوپ لاستیکی، ۲: درپوش فلزی، ۳: قاب نگهدارنده فلزی، ۴: منتقل کننده فشار (Transmitter)، ۵: سه راهی ۱/۴ اینچ، ۶: فیتینگ، ۷: کرنش سنج (Strain Gauge)، ۸: پل و تستون، ۹: شیلنگ هوا

شکل ۴: نمونه استوانه ای و تجهیزات نصب شده بر روی آن

۳- نتایج و بحث

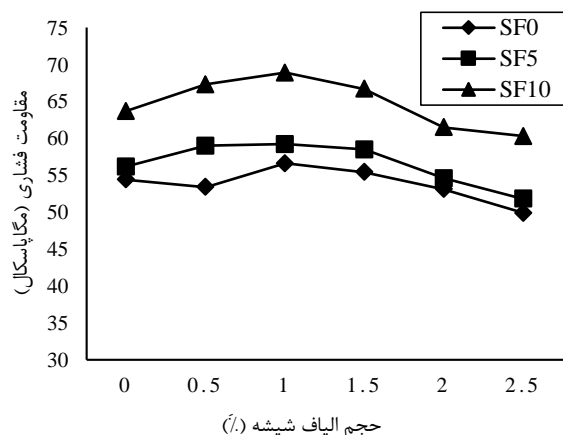
۳-۱- مقاومت های فشاری و خمشی

نتایج مقاومت فشاری کامپوزیت های سیمانی حاوی درصد های مختلف الیاف و دوده سیلیسی در شکل ۵ نشان داده شده است. تحقیقات نشان داده اند که استفاده از پوزولان های معدنی یا صنعتی می تواند با کاهش مقدار آهک کریستالی تشکیل شده در ساختار ماتریس های پایه سیمانی و تبدیل آن به ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در افزایش مقاومت فشاری آن ها موثر باشد. همچنین حضور این مواد موجب کاهش رشد پرتلندیت یا اترینگایت و تخلخل در مرز خمیر سیمان با سنگدانه ها یا الیاف می شود که باعث بهبود تراکم و هموار شدن ساختار ماتریس های سیمانی می گردد [۲۸].

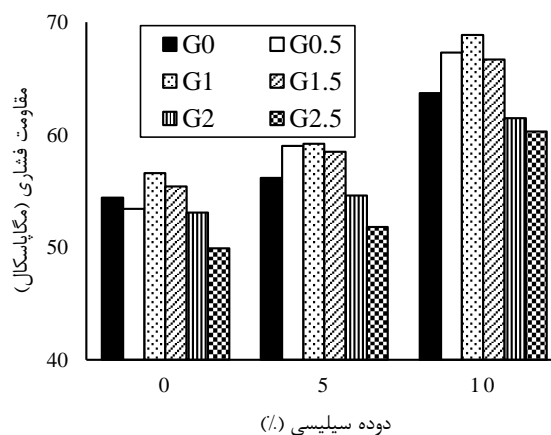
با توجه به شکل ۵- الف اثر مثبت دوده سیلیسی بر افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت های سیمانی به خوبی مشهود است. حضور ۱۰٪ دوده سیلیسی در مخلوط های فاقد الیاف تا ۱۸٪ و در مخلوط های حاوی الیاف تا ۲۷٪ موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. نرخ افزایش مقاومت فشاری مخلوط های حاوی ۵٪ دوده سیلیسی و رساندن آن به ۱۰٪ دوده سیلیسی در مقایسه با مخلوط های فاقد دوده و رساندن آن به ۵٪ دوده، بالاتر می باشد که نقش مهم ۵٪ دوده سیلیسی در دستیابی مخلوط سیمانی به بسته بندی ایده ال (Ideal packing) را نشان می دهد.

شکل ۵- ب اثر مقادیر مختلف الیاف شیشه بر مقاومت فشاری را نشان می دهد. ملاحظه می شود که افزودن الیاف تاثیر چشمگیری بر افزایش مقاومت فشاری نداشته و در اغلب موارد موجب کاهش آن شده است. در مخلوط های حاوی ۱۰٪ دوده سیلیسی حداکثر مقاومت فشاری مربوط به مخلوط حاوی ۱٪ الیاف است که مقاومتی برابر ۷۰ مگاپاسکال دارد. در مخلوط های حاوی ۵٪ دوده سیلیسی، حضور ۰/۵٪ تا ۱/۵٪ الیاف عملکرد مشابه و مثبتی بر مقاومت فشاری دارد. در مخلوط های فاقد دوده سیلیسی، افزودن ۰/۵٪ الیاف موجب کاهش مقاومت فشاری شده اما با افزایش الیاف تا ۱٪، نمونه ها رشد مقاومت ۱۰٪ را تجربه می کنند.

در تمام مخلوط‌های با و بدون دوده سیلیسی بالاترین مقاومت کسب شده مربوط به مخلوط‌های حاوی ۱٪ الیاف است که با افزایش آن (مقدار حجمی الیاف)، مقاومت فشاری روند نزولی را در پیش می‌گیرد. شدت افت در نمونه‌های حاوی ۵٪ دوده سیلیسی به نظر محسوس‌تر است.



(ب)



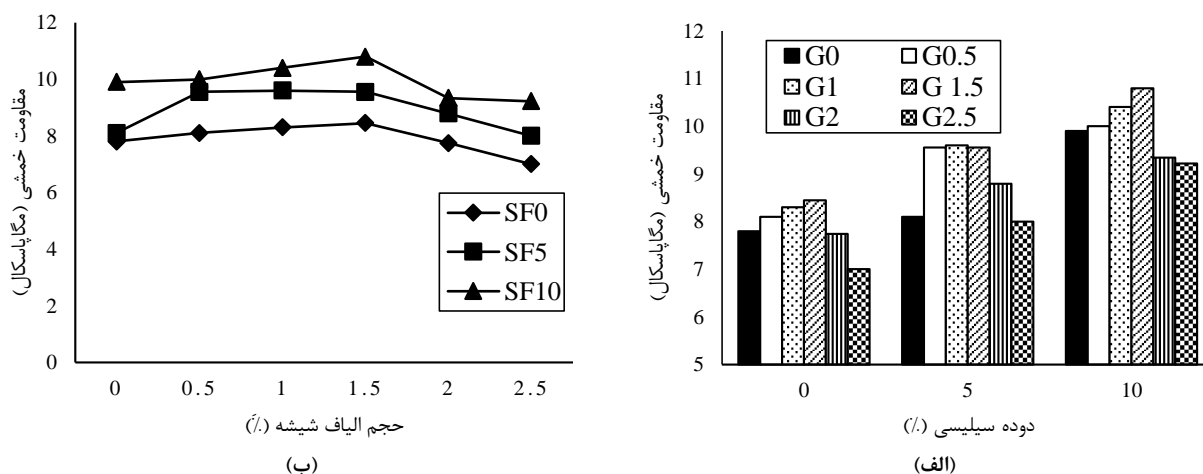
(الف)

شکل ۵: تاثیر دوده سیلیسی و الیاف شیشه بر مقاومت فشاری کامپوزیت های سیمانی

شکل ۶ نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. اثر دوده سیلیسی بر مقاومت خمشی مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف شیشه در شکل ۶- الف ارائه شده است. نتایج برآمده نشان می‌دهد که با حضور دوده سیلیسی مقاومت خمشی رفتار و عملکردی مشابه با مقاومت فشاری دارد به طوری که افزودن ۱۰٪ دوده سیلیسی موجب رشد مقاومت خمشی تا ۳۲٪ شده است.

شکل ۶- ب اثر درصد‌های مختلف الیاف شیشه بر مقاومت خمشی مخلوط‌های سیمانی با و بدون دوده سیلیسی را نشان می‌دهد. برای مخلوط‌های حاوی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ دوده سیلیسی افزودن الیاف شیشه تا ۱/۵٪ موجب افزایش مقاومت خمشی به ترتیب تا ۲۱٪، ۱۸٪ و ۱۰٪ شده است. درصد بهینه الیاف شیشه برای تمامی مخلوط‌های با و بدون دوده سیلیسی ۱/۵٪ است که با افزایش مقدار آن، مقاومت افت می‌کند.

در کامپوزیت‌های سیمانی زمانی که تنش کششی ناشی از خمش، به مقاومت کششی ماتریس می‌رسد، کامپوزیت دچار ترک خوردگی می‌شود و ظرفیت پسا ترک با ایجاد پل بندی توسط الیاف تحمل می‌شود. ظرفیت پل بندی الیاف به دلیل بیرون آمدگی (Pullout) یا مقاومت شکست هر رشته الیاف، محدود می‌شود. این موضوع بیانگر این است که پس از مصرف مقدار معینی الیاف پایداری و تغییر شکل خمشی کاهش پیدا می‌کند و از سویی دیگر عرض ترک‌ها افزایش می‌یابد [۲۹].



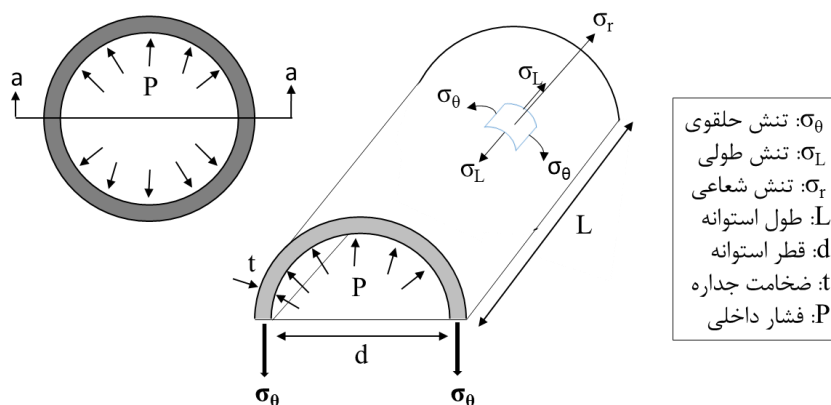
شکل ۶: تاثیر دوده سیلیسی و الیاف شیشه بر مقاومت خمشی کامپوزیت های سیمانی

۳-۲- مقاومت پوسته استوانه ای

وقتی لوله ها (استوانه های جدار نازک) تحت فشار داخلی قرار می گیرند سه نوع تنش اصلی در آن ها به وجود می آید که شامل تنش شعاعی، تنش حلقوی و تنش طولی است. در شکل ۷ جهت اثر تنش ها بر المانی از پوسته جدار نازک مشخص شده است. به طور کلی در صورتی که یک المان تحت اثر دو تنش اصلی قرار گیرد، بردار تنش برشی نیز در المان تولید و به مرزهای آن اعمال می شود. این نظریه اساس تحلیل تنش لوله بر پایه تنش برشی است. با توجه به تنش صفر در جداره بیرونی استوانه و نیز باز بودن دو انتهای آن مقدار تنش های شعاعی و طولی صفر می باشد. در علم تئوری الاستیسیته و پلاستیسیته با فرض "بلند بودن" استوانه های جدار نازک، کرنش به صورت مسطح فرض می شود. نیروی فشاری داخلی در استوانه ها تبدیل به تنش حلقوی از نوع کششی می شود که در معادله ۲ آمده است [۳۰]. در این پژوهش، از ارائه روابط و معادلات اضافی برای اثبات معادله ۲ اجتناب شده است.

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr_0}{t} \quad (۲)$$

که در آن σ_{θ} تنش کششی حلقوی، P فشار داخل استوانه، r_0 میانگین شعاع داخلی و خارجی و t ضخامت استوانه می باشد.



شکل ۷: تنش های به وجود آمده در استوانه جدار نازک تحت فشار داخلی یکنواخت

نتایج حاصل از بارگذاری یکنواخت داخلی پوسته به صورت منحنی‌های فشار- کرنش در شکل ۸ و خلاصه نتایج مقاومت مکانیکی در جدول ۴ آمده است. شکل ۸- الف اثر مقدار دوده سیلیسی بر نمودار فشار- کرنش استوانه‌های فاقد الیاف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزودن دوده سیلیسی تا ۱۰٪، مقدار فشار وارده (فشار تحمل شده توسط استوانه) در مقایسه با استوانه فاقد دوده سیلیسی تا ۱۰٪ افزایش می‌یابد در صورتی که مقدار کرنش تا ۲۸٪ افت داشته است.

شکل های ۸- ب تا ۸- ج، اثر افزودن الیاف شیشه بر رفتار مقاومتی استوانه‌های حاوی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ دوده سیلیسی را نشان می‌دهد. می‌توان دید که افزودن ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ الیاف موجب افزایش مقدار کرنش به ترتیب تا ۲/۳، ۳/۶، ۴/۸، ۵/۷۳ و ۷/۴ برابر نسبت به طرح شاهد شده که نشان دهنده تاثیر مثبت و قابل ملاحظه الیاف می‌باشد.

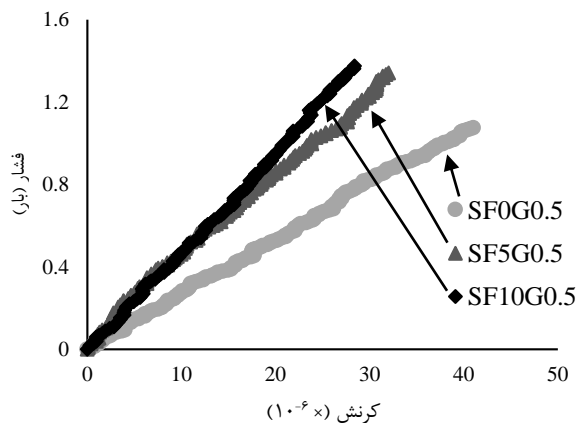
در تمامی نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی دوده سیلیسی مقدار فشار و متناسب با آن تنش کششی حلقوی نیز افزایش می‌یابد. مطابق نمودارهای فشار- کرنش و متناسب با نمودار تنش- کرنش، مشاهده می‌شود که با افزودن دوده سیلیسی شیب نمودارها افزایش می‌یابد که نشان تاثیر مثبت بر مدول الاستیسیته است. این موضوع همچنین بر رفتار شکست آن‌ها تاثیر داشت به طوری که مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استوانه‌های حاوی مقادیر بالای دوده سیلیسی گسیختگی تردتری را تجربه می‌کنند. این رفتار در نمودارها نیز قابل مشاهده است که میزان انرژی جذب شده آن‌ها (مساحت زیر منحنی فشار- کرنش) به نسبت کمتر است. حضور الیاف علیرغم تاثیر مثبت بر کرنش کششی استوانه‌ها، اثری بر رفتار پسا ترک نداشته و هیچکدام از نمونه‌ها دچار کرنش سخت شونده و یا نرم شونده نمی‌شوند. ماهیت و مواد استفاده شده در الیاف شیشه می‌تواند دلیلی بر این موضوع باشد. استفاده از الیاف‌هایی هم‌چون پلی وینیل الکل یا فولادی عملکرد بالاتری در بروز ظرفیت تحمل بار پسا ترک از خود نشان می‌دهند [۱].

مقدار تغییرات فشار یا تنش کششی حلقوی در طرح‌های فاقد الیاف همراه با یا بدون دوده سیلیسی چندان قابل توجه نیست و کمتر از ۱۲٪ است. مقدار فوق برای طرح‌های حاوی ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ الیاف شیشه به ترتیب ۳۷٪، ۱۴٪، ۲۴٪، ۲۹٪ و ۲۰٪ است که نشان دهنده اثر هم‌افزایی بین دوده سیلیسی و الیاف است.

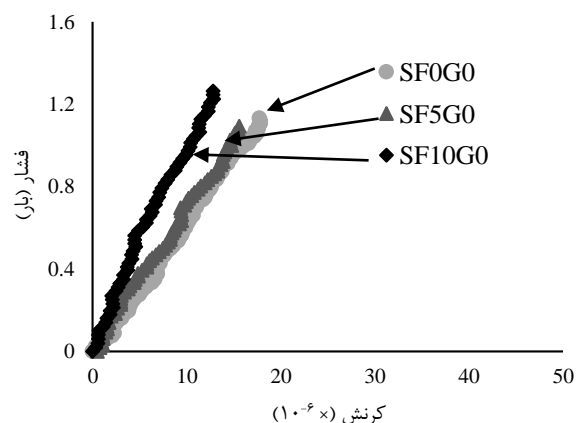
جدول ۴: خلاصه نتایج مقاومت مکانیکی استوانه‌های جدار نازک

کد طرح	فشار نهایی (بار)	کرنش نهایی $\times 10^{-6}$ (ϵ_u)	تنش کششی نهایی حلقوی (MPa)	نسبت ϵ_u به ϵ_0	نسبت σ_{0u} به σ_{00}
*SF0G0	۱/۱۳	۱۷/۸۷	۴/۹۳	۱	۱
SF5G0	۱/۱	۱۵/۵۶	۴/۸	۰/۸۷	۰/۹۷
SF10G0	۱/۲۶	۱۲/۸	۵/۵	۰/۷۲	۱۲/۱
SF0G0.5	۱/۰۷	۴۱/۰۶	۴/۶۷	۲/۳	۰/۹۵
SF5G0.5	۱/۳۴	۳۲/۰۴	۵/۸۵	۱/۷۹	۱/۱۹
SF10G0.5	۱/۳۷	۲۸/۴	۵/۹۸	۱/۵۷	۱/۳۱
SF0G1	۱/۲۲	۶۴/۰۷	۵/۳۳	۳/۶	۱/۰۸
SF5G1	۱/۲۵	۴۹/۰۶	۵/۴۶	۲/۷۵	۱/۱۱
SF10G1	۱/۳۸	۴۳/۰۵	۶/۰۳	۲/۴	۱/۲۲
SF0G1.5	۱/۱	۸۵/۷۵	۴/۸	۴/۸	۰/۹۷
SF5G1.5	۱/۳۶	۶۷/۵	۵/۹۴	۳/۸۷	۱/۲
SF10G1.5	۱/۵۱	۵۶/۸۵	۶/۵۹	۳/۱۸	۱/۳۴
SF0G2	۱/۰۷	۱۰۲/۴۲	۴/۶۷	۵/۷۳	۰/۹۵
SF5G2	۱/۲۲	۸۵/۶۴	۵/۳۳	۴/۸	۱/۰۸
SF10G2	۱/۲۹	۷۵/۶۹	۵/۶۳	۴/۲۴	۱/۱۴
SF0G2.5	۱	۱۳۲	۴/۳۷	۷/۴	۰/۸۹
SF5G2.5	۱/۰۶	۱۰۵/۵۷	۴/۶۳	۵/۹	۰/۹۴
SF10G2.5	۱/۲	۹۰/۸۶	۵/۲۴	۵/۰۸	۱/۰۶

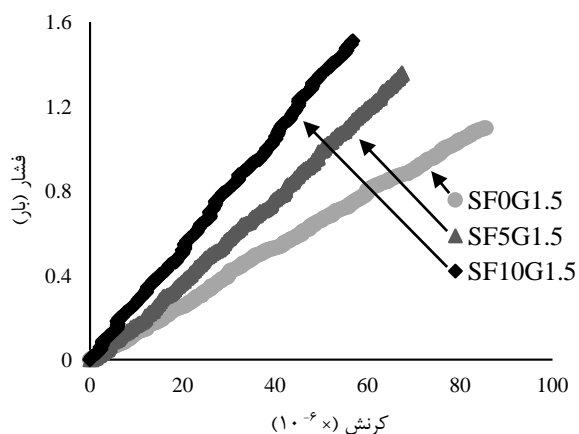
*: طرح شاهد، ϵ_0 : ۱: کرنش طرح شاهد که برابر $17/87 \times 10^{-6}$ است، σ_{0u} : ۲: تنش کششی نهایی، σ_{00} : ۳: تنش کششی نهایی طرح شاهد



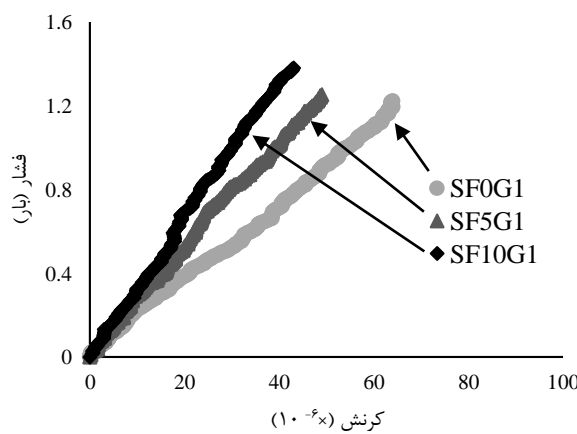
(ب) ۰/۵٪ الیاف شیشه - ۰/۵٪، ۱۰٪ دوده سیلیسی



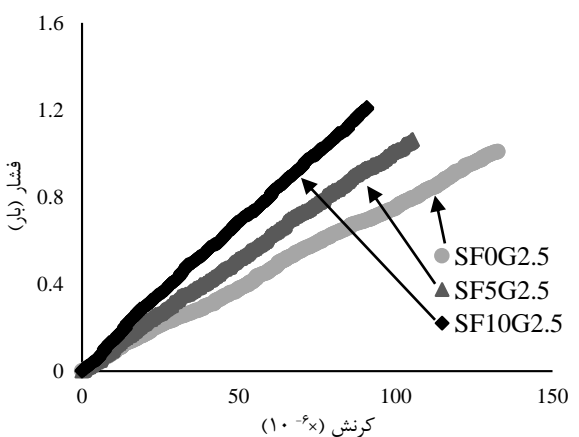
(ف) ۰٪ الیاف شیشه - ۰/۵٪، ۱۰٪ دوده سیلیسی



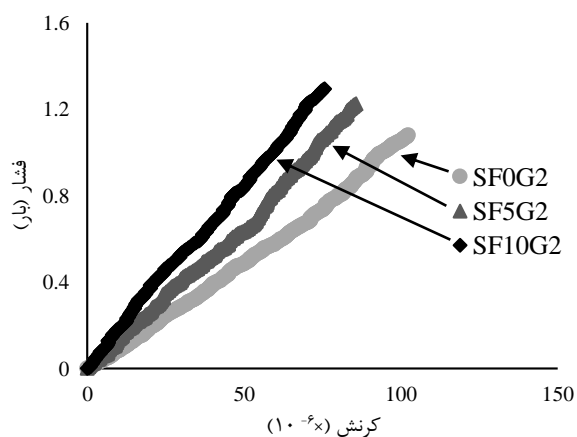
(ت) ۱/۵٪ الیاف شیشه - ۰/۵٪، ۱۰٪ دوده سیلیسی



(پ) ۱٪ الیاف شیشه - ۰/۵٪، ۱۰٪ دوده سیلیسی



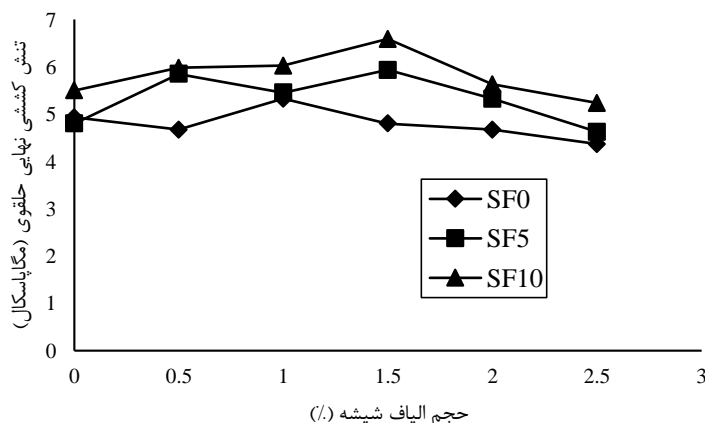
(ج) ۲/۵٪ الیاف شیشه - ۰/۵٪، ۱۰٪ دوده سیلیسی



(ث) ۲٪ الیاف شیشه - ۰/۵٪، ۱۰٪ دوده سیلیسی

شکل ۸: نمودارهای فشار-کرنش پوسته های استوانه ای جدار نازک

شکل ۹ اثر درصد های مختلف الیاف شیشه را بر تنش کششی حلقوی مخلو های با و بدون دوده سیلیسی را نشان می دهد. در مخلوط های فاقد دوده سیلیسی، مقدار الیاف بهینه ۱٪ می باشد که مشابه درصد بهینه مقاومت فشاری می باشد. در مخلوط های حاوی دوده سیلیسی مقدار بهینه الیاف ۱/۵٪ می باشد اما برای مقاومت فشاری مقدار ۱٪ الیاف بهینه است.



شکل ۹. اثر الیاف شیشه بر تنش کششی حلقوی

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر دوده سیلیسی و الیاف شیشه بر رفتار مکانیکی پوسته های استوانه های جدار نازک کامپوزیت سیمانی تحت بارگذاری داخلی یکنواخت بررسی شد که نتایج زیر قابل استخراج است:

۱- استفاده از دوده سیلیسی به دلیل واکنش پوزولانی آن و تولید ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) موجب افزایش مقاومت های فشاری و خمشی بترتیب تا ۲۷٪ و ۳۲٪ می شود.

۲- افزودن الیاف شیشه تاثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت فشاری نداشته و در مواردی موجب کاهش آن می شود. حضور ۵٪ تا ۱۵٪ الیاف عملکرد مطلوب داشته (افزایش مقاومت تا ۱۰٪) که با افزایش درصد الیاف مقاومت فشاری افت پیدا می کند.

۳- افزودن الیاف شیشه تا ۱۵٪ موجب افزایش مقاومت خمشی ۲۱٪ می شود. درصد بهینه الیاف شیشه برای تمامی مخلوط های با و بدون دوده سیلیسی ۱/۵٪ است که با افزایش مقدار آن، مقاومت خمشی افت می کند.

۴- در استوانه ها افزودن دوده سیلیسی در طرح های فاقد الیاف موجب افزایش فشار وارده (مقاومت کششی حلقوی) تا ۱۰٪ می شود حال آنکه مقدار کرنش تا ۲۸٪ افت داشته است. افزودن الیاف شیشه موجب افزایش مقدار کرنش تا ۷/۴ برابر و افزایش فشار وارده (مقاومت کششی حلقوی) تا ۳۷٪ نسبت به طرح شاهد می شود.

۵- مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد که استوانه های حاوی مقادیر بالای دوده سیلیسی گسیختگی تردتری را تجربه می کنند. حضور الیاف علیرغم تاثیر مثبت بر کرنش کششی استوانه ها، اثری بر رفتار پسا ترک نداشته و هیچکدام از نمونه ها دچار کرنش سخت شونده و یا نرم شونده نمی شوند.

توصیه: با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات بسیار محدودی با رویکرد مشابه پژوهش حاضر انجام شده، مطالعه حاضر می تواند به عنوان مرجعی مناسب برای انجام تحقیقات آینده و بسط آن به مدل های هندسی پیچیده تر باشد.

مراجع

- [1] Kang, S. T., Lee, Y., Park, Y. D., & Kim, J. K. (2010). Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Composite Structures*, 92(1), 61-71.
- [2] Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214-220.
- [3] Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214-220.
- [4] Tomlinson, D., & Fam, A. (2014). Experimental investigation of precast concrete insulated sandwich panels with glass fiber-reinforced polymer shear connectors. *ACI Structural Journal*, 111(3), 595.
- [5] Shah, A. A., & Ribakov, Y. (2011). Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Materials & Design*, 32(8), 4122-4151.
- [6] Kim, J., Kim, D. J., Park, S. H., & Zi, G. (2015). Investigating the flexural resistance of fiber reinforced cementitious composites under biaxial condition. *Composite Structures*, 122, 198-208.
- [7] Tian, H., Zhang, Y. X., Ye, L., & Yang, C. (2015). Mechanical behaviours of green hybrid fibre-reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 95, 152-163.
- [8] Yoo, D. Y., Lee, J. H., & Yoon, Y. S. (2013). Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 106, 742-753.
- [9] Tassew, S. T., & Lubell, A. S. (2014). Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 215-224.
- [10] Çavdar, A. A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), pp.2452-2463 (2012).
- [11] Meleka, N. N., Safan, M. A., Bashandy, A. A., & Abd-Elrazek, A. S. (2013). Repairing and strengthening of elliptical paraboloid reinforced concrete shells with openings. *Archives of Civil Engineering*, 59(3), 401-420.
- [12] Andres, M., & Harte, R. (2006). Buckling of concrete shells: a simplified numerical approach. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. IASS Publ, 47(3).
- [13] Melaragno, M. (2012). *An introduction to shell structures: The art and science of vaulting*. Springer Science & Business Media.
- [14] Kurrer, K. E. (2008). The history of the theory of structures: from arch analysis to computational mechanics. *International Journal of Space Structures*, 23(3), 193-197.
- [15] Ter Maten, R. N. (2011). *Ultra high performance concrete in large span shell structures* (Doctoral dissertation, Master's thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences. 47, 68).
- [16] Mehta, H. C. (1976). *Testing of thin shell concrete cones*, no date.
- [17] Billington, D. P., & Harris, H. G. (1981). Test methods for concrete shell buckling. *Special Publication*, 67, 187-231.
- [18] Mathon, C., & Limam, A. (2006). Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending. *Thin-Walled Structures*, 44(1), 39-50.
- [19] Chang, Z. T., Bradford, M. A., & Gilbert, R. I. (2011). Short-term behaviour of shallow thin-walled concrete dome under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 49(1), 112-120.
- [20] Verwimp, E., Tysmans, T., Mollaert, M., & Berg, S. (2015). Experimental and numerical buckling analysis of a thin TRC dome. *Thin-Walled Structures*, 94, 89-97.
- [21] De Bolster, E., Cuypers, H., Van Itterbeeck, P., Wastiels, J., & De Wilde, W. P. (2009). Use of hypar-shell structures with textile reinforced cement matrix composites in lightweight constructions. *Composites Science and Technology*, 69(9), 1341-1347.
- [22] Fischer, G., Wang, S., Li, V.C. (2003). Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements. *Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites*, pp. 29-36. Warsaw, Poland.
- [23] Abdellahi, S.B. and Hejazi, S.M., (2015). Effect of glass and polypropylene fibers in cementitious composites containing waste stone powder. *Journal of Industrial Textiles*, 45(1), 152-168.
- [24] ACI 544.2R-99, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete".
- [25] Ventsel E., Krauthammer T., (2001) "Thin Plates and Shells: Theory, Analysis and Applications" Marcel Dekker, Inc., New York, Basel.
- [26] ASTM C109. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM C348. (201). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, West Conshohocken, PA.

- [28] Marikunte, S., & Soroushian, P. (1995). Statistical evaluation of long-term durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites. *Materials Journal*, 91(6), 607-616.
- [29] Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992). *Fiber-reinforced cement composites*.
- [30] Sadd, M. H. (2009). *Elasticity: theory, applications, and numerics*. Academic Press.