

تأثیر الیاف پلی پروپیلن در چسبندگی میان بتن و آرماتور در بتن خودتراکم

سید حمید هاشمی* (استادیار)

سید احسان حسینی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۲، ص. ۱۰۳-۹۷ (یادداشت فنی)

بتن خودتراکم، بتنی بسیار سیال و مخلوطی همگن است. به دلیل ترد بودن و شکنندگی بتن، استفاده از الیاف‌های مختلف در بتن رایج شده است تا با ایجاد شرایط یکنواخت بر شکل‌پذیری آن بیفزاید. در این طرح به بررسی چسبندگی میان بتن و آرماتور و تأثیر الیاف پلی پروپیلن در این چسبندگی پرداخته شده است. پارامتر متغیر در طرح‌های اختلاط، مقدار الیاف پلی پروپیلن است که دارای مقادیر ۰، ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ کیلوگرم در مترمکعب است. جهت بررسی خودتراکمی آزمایش‌های بتن تازه و برای بتن سخت شده، آزمایش مقاومت فشاری، کششی و چسبندگی انجام شده است. نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت چسبندگی به صورت مکعبی با آرماتوری عمودی در مرکز آن تهیه و در دو شرایط خشک و مرطوب نگهداری شدند. حضور الیاف پلی پروپیلن موجب بهبود خاصیت کششی و چسبندگی میان بتن و آرماتور در بتن خودتراکم شده است، در حالی که کارایی بتن تازه را کم کرده است.

h-hashemi@araku.ac.ir
ehsanhoseini65@gmail.com

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، آرماتور، چسبندگی، الیاف پروپیلن، نانو سیلیس.

۱. مقدمه

را بهبود بخشد، اما افزایش بیش از حد حجم الیاف تا حد زیادی از میزان کارایی و کارپذیری مخلوط می‌کاهد.^[۱،۸] این تذکر لازم است که بتن‌های مسلح الیافی در گروه مناسب‌ترین مصالح مورد استفاده در ساخت بناهای مقاوم در برابر ضربه، همچون سازه‌های پناهگاه‌ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره، نیز به شمار می‌روند و بناهای ساخته شده از این نوع بتن قابلیت فوق العاده‌ای در جذب انرژی ضربه دارند.^[۱،۹]

انتقال نیروها در سرتاسر وجه تماس میان بتن و آرماتورهای فولادی در سازه‌های بتنی اهمیت اساسی دارد. چسبندگی به تنش برشی مابین فولاد و بتن اطلاق می‌شود که از طریق انتقال نیرو بین فولاد و بتن اطراف آن به وجود می‌آید و تنش فولادی را در مقاطع مختلف تغییر می‌دهد. با توجه به اهمیت موضوع از همان اوایل کاربرد بتن آرمه، همواره نحوه همکاری و رفتار بتن و آرماتور در کنار یکدیگر مورد توجه دانشمندان و پژوهشگران قرار گرفته است.^[۱۲]

۲. روش تحقیق

۱.۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

در ابتدا طرح مخلوطی که با وجود استفاده از الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس بتواند خواص خودتراکمی را حفظ کند، به دست آمد. جهت بررسی خواص بتن تازه از قبیل شکل‌پذیری یا روانی بتن خودتراکم از آزمایش اسلامپ و جهت بررسی قابلیت

بتن خودتراکم (SCC)^[۱]، بتنی است که تحت اثر وزن خود متراکم می‌شود و نیاز به هیچ لرزاننده‌ی برای ایجاد تراکم ندارد.^[۱] امروزه بتن خودتراکم به خصوص با تولید نسل جدید فوق‌روان‌کننده‌ها و افزودنی‌های بتن در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله مزایای استفاده از بتن خودتراکم می‌توان به افزایش سرعت اجرا، کاهش نیروی انسانی، اطمینان از تراکم کافی بتن در مناطق با تراکم بالای آرماتور، کاهش آلودگی صوتی، بالارفتن کیفیت نهایی محصول و از همه مهم‌تر صرفه‌جویی اقتصادی اشاره کرد.^[۳،۴] از طرفی بتن خودتراکم از نظر خواص معیایی نیز دارد که مهم‌ترین آنها مقاومت کششی کم آن است، به همین دلیل شکل‌پذیری کم و تردی زیاد دارد. در چند دهه‌ی اخیر، از رشته‌های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده می‌شوند، استفاده می‌شود. انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است.^[۵،۶]

امروزه استفاده از الیاف در بتن خودتراکم مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و پژوهش‌هایی در این زمینه آغاز شده است. بتن خودتراکم مسلح به الیاف به دلایلی مانند: لزجت مناسب، روانی بالا، بهبود دوام، پایایی و خواص مکانیکی همچون کرنش جمع‌شدگی و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی و بالارفتن شکل‌پذیری در اهداف گوناگون از جمله نوسازی و بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.^[۸-۶] حضور الیاف در بتن خودتراکم تا حد زیاد می‌تواند خواص رفتارشناسی و مکانیکی مخلوط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۲۹، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱۳.

جدول ۱. دانه بندی شن و ماسه.

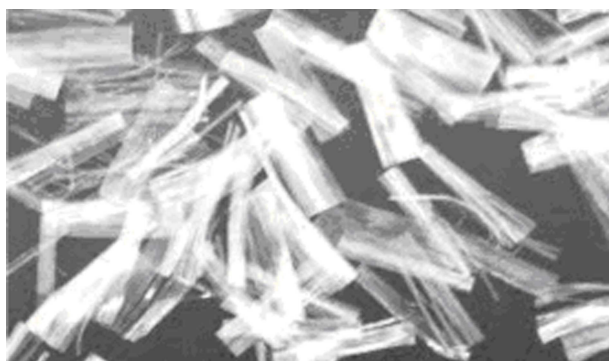
شماره الک	درصد عبوری ماسه	درصد عبوری شن
۱/۲ (اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۳/۸ (اینچ)	۱۰۰	۹۶/۸
۴	۱۰۰	۱۵/۲
۸	۹۱/۸	۰/۴۹
۱۶	۵۷/۵	-
۳۰	۳۹/۷	-
۵۰	۱۱/۲	-
۱۰۰	۲/۳	-

جدول ۲. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس.

خلوص	چگالی	نسبت سطح - حجم	قطر
> ۹۹/۹	< ۰/۱۵	۱۶۰ ± ۲۰	۱۵ ± ۵
درصد	گرم در سانتی متر مکعب	مترمربع بر گرم	نانومتر

جدول ۳. مشخصات فنی الیاف پلی پروپیلن.

شکل ظاهری	طول	قطر	مقاومت کششی	وزن مخصوص
صاف	۱۲ میلی متر	۲۰ میکرون	۳۵۰ مگاپاسکال	۹۰۰ کیلوگرم در مترمکعب



شکل ۱. الیاف پلی پروپیلن مصرفی.

آزمایش قرار گرفتند. برای آزمایش کشش از روش برزیلی و دو نیم شدن استفاده شده است. مقاومت کششی دو نیم شدن با دقت ۰/۵ مگاپاسکال از رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$f_t = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (1)$$

که در آن، P بیشینه نیروی فشاری، L طول نمونه در زیر دستگاه آزمایش، که در حالت فوق ۳۰ سانتی متر (همان ارتفاع نمونه استوانه‌یی) و d نیز قطر نمونه استوانه‌یی (۱۵ سانتی متر) است.

با روش‌های مختلفی می‌توان مقاومت چسبندگی بین فولاد و بتن را آزمایش کرد که یکی از این روش‌ها آزمایش بیرون کشیدگی است. روش آزمایش به این صورت است که آرماتور داخل یک نمونه بتنی مکعبی به صورت عمودی مطابق شکل ۲ قرار می‌گیرد. در نهایت، نمونه‌ها در سنین مشخص با قرار گرفتن در فک ساخته شده

عبور و پایداری بتن خودتراکم در برابر جداشدگی از آزمایش جعبه‌ی I شکل استفاده شده است.

هر طرح مخلوط در آزمایشگاه ساخته و آزمایش‌های بتن تازه بر روی آن انجام شد. سپس بتن در داخل قالب‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری، در قالب‌های استوانه‌یی 15×30 سانتی‌متری برای آزمایش کشش به روش برزیلی و داخل قالب‌های مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر با وجود یک آرماتور به قطر ۱۶ میلی‌متر در مرکز قالب برای آزمایش مقاومت چسبندگی ریخته شد. قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در محیط آزمایشگاه، در دو شرایط d و w نگهداری شدند. در شرایط d ، نمونه‌ها تا سن ۷ روز در آب و بعد در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند و در شرایط w نیز نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز در آب و سپس در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند.

۲.۲. مصالح مصرفی

سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی از نوع شکسته و کوهی بودند که اندازه‌ی سنگ‌دانه‌های درشت ۱۲ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۷۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جذب رطوبت آن ۵/۱٪ است. سنگ‌دانه‌های ریز مصرفی از نوع طبیعی و رودخانه‌یی با وزن مخصوص ۲/۵۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مدول نرمی ۲/۷۹ و جذب رطوبت آن ۴/۷٪ بودند. در جدول ۱، دانه‌بندی شن و ماسه مشخص شده است.

سیمان مصرفی، سیمان نوع II کارخانه‌ی سیمان دلجان با وزن مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، فوق روان‌کننده از نوع PCE^۲ بر پایه‌ی کربوکسیلیت اتر تولید داخل کشور که کدر و ابری رنگ است و در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نانوسیلیس مورد استفاده (۱۰٪-۵٪) با وزن مخصوص ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نانوسیلیس مصرفی در این پژوهش، نانوسیلیس آمورف کلوتیدی محلول در آب با غلظت ۵٪ بر پایه‌ی ذرات سیلیکاتی ۵-۵۰ نانومتری به شکل یک محلول شیری رنگ و PH در محدوده‌ی ۱۰ ساخت شرکت وند شیمی ساختمان است. نانوسیلیس مذکور بیش از ۹۹٪ سیلیس آمورف است، که در جدول ۲ خصوصیات فیزیکی نوع مصرفی آن آمده است، که با ۳٪ وزنی سیمان در طرح اختلاط‌های فوق به کار گرفته شده است. الیاف مصرفی نیز از نوع پلی پروپیلن است و مشخصات آن در جدول ۳ و شکل ظاهری آن در شکل ۱ ارائه شده است.

۳.۲. نسبت مخلوط

در این پژوهش از طرح مخلوطی استفاده شده است که با وجود استفاده از الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس، بتن خواص خودتراکمی را حفظ کند. ۴ طرح مخلوط بتن با مقدارهای ۰، ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ کیلوگرم در مترمکعب الیاف پلی پروپیلن تقویت شده و مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند. مشخصات ۴ طرح مخلوط در جدول ۴ ارائه شده است.

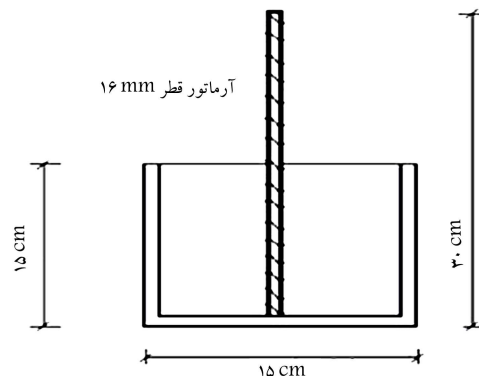
۴.۲. روش‌های آزمایش‌ها

آزمایش‌های بتن تازه از قبیل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش جعبه‌ی I شکل و آزمایش قیف V شکل طبق استاندارد EFNARC انجام شده است.^{۱۳} در آزمایش فشاری، نمونه‌ی مکعبی با وجوه کاملاً صاف در تماس با صفحات ماشین آزمایش قرار گرفت و بار وارد بر نمونه‌ی مکعبی با سرعت ثابت ۰/۲ تا ۰/۴ مگاپاسکال در ثانیه اعمال شد. نمونه‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد

جدول ۴. طرح مخلوط‌های نهایی بتن خودتراکم تقویت‌شده با الیافی پلی پروپیلن (بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب).

طرح	الیاف پروپیلن	سیمان	نانوسیلیس	پودر سنگ	آب	شن	ماسه	فوق روان‌کننده
Sec A	۰							
Sec B	۰٫۶	۴۵۰	۱۳٫۵	۱۵۰	۲۱۶	۸۰۶	۷۴۴	۱۳٫۵
Sec C	۱٫۲							
Sec D	۱٫۸							

که در آن، P بیشینه بار کششی، L طول گیرداری آرماتور داخل بتن (در حالت مذکور ۱۵ سانتی‌متر) و d قطر آرماتور مصرفی (در این پژوهش به قطر ۱۶ میلی‌متر) است.



شکل ۲. نمونه‌ی بتنی همراه آرماتور در آزمایش مقاومت چسبندگی.

۳. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر

۱.۳. آزمایش‌های بتن تازه

برای شناخت رفتار بتن خودتراکم تقویت‌شده با الیاف، آزمایش بتن تازه انجام و نتایج آن‌ها نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که از اعداد این جدول مشخص است، استفاده از الیاف، اثرات منفی در خواص رئولوژی بتن خودتراکم تازه دارند. همچنین در شکل ۴، نمودار خطی بیشینه‌ی قطر پخش‌شدگی بتن هر طرح اختلاط مربوط به آزمایش اسلامپ نشان داده شده است.

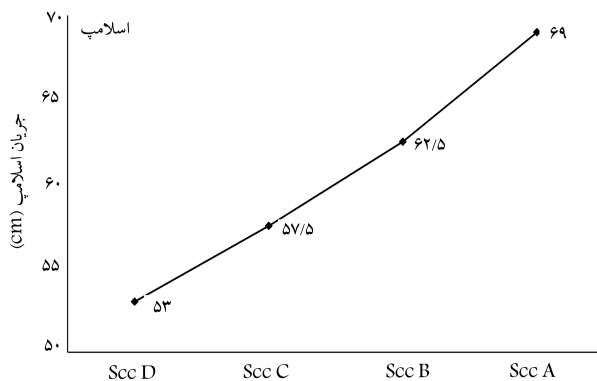
در شکل ۵، نمودارهای مربوط به زمان تخلیه‌ی بتن از قیف V شکل در دو حالت تخلیه بعد از ۱۰ ثانیه و تخلیه بعد از ۵ دقیقه رسم شده است. در شکل ۶ نیز نمودار مربوط به نسبت انسداد در آزمایش جعبه‌ی L شکل برای هر طرح اختلاط مشخص شده است.

افزایش الیاف مصرفی باعث کاهش کارایی بتن تازه شده است. الیاف پلی پروپیلن لزجت مخلوط را به شدت بالا می‌برند و خواص خودتراکمی بتن به خصوص روانی اسلامپ و خاصیت عبورپذیری را از میان شبکه‌ی آرماتورها را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

نکته‌ی قابل توجه که در آزمایش بتن تازه مشاهده شده است، به خصوص در آزمایش جریان اسلامپ، حفظ چسبندگی و عدم جداشوندگی بتن خودتراکم به همراه الیاف بوده است، که این خاصیت از معدود مزیت‌های الیاف پلی پروپیلن بر خواص بتن خودتراکم تازه است.



شکل ۳. دستگاه کششی آرماتورها در آزمایش مقاومت چسبندگی.



شکل ۴. نمودار خطی آزمایش‌های اسلامپ.

طبق شکل ۳ در دستگاه کشش آرماتور قرار می‌گیرند و با سرعت ۱ سانتی‌متر در دقیقه، آرماتور از داخل نمونه‌های بتنی به بیرون کشیده می‌شود. می‌توان به کمک رسام تجهیز شده به دستگاه کشش، منحنی نیروی اعمال‌شده و لغزش آرماتور در داخل بتن را رسم کرد. البته بهتر است لغزش میله در هر دو انتهای آن اندازه‌گیری شود تا خطای ناشی از افزایش طول میله اعمال نشود.^[۱۲، ۱۳، ۱۵] با توجه به بیشینه‌ی نیروی کششی ایجادشده به خارج شدن و یا لغزیدن آرماتور در داخل نمونه‌ی بتنی می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۲، مقاومت چسبندگی میان آرماتور و بتن را محاسبه کرد:^[۱۴]

$$\tau = \frac{P}{\pi L d} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2)$$

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های بتن تازه.

شماره طرح	جریان اسلامپ		قیف V شکل		جعبه‌ی L شکل	
	اسلامپ (cm)	T_{50} cm (s)	$T_{\Delta min}$ (s)	T (s)	$T_{f_{0-20}}$ cm (s)	h_1/h_2
Sec A	۶۹	۱٫۹	۸٫۲	۷٫۶	۱٫۹	۰٫۸۱
Sec B	۶۳	۲٫۱	۸٫۶	۶٫۸	۲٫۳	۰٫۶۷
Sec C	۵۷	۳٫۷	۹٫۷	۶٫۴	۳٫۰	۰٫۵۹
Sec D	۵۳	۷٫۴	۱۲٫۴	۵٫۹	۳٫۲	۰٫۴۳

جدول ۶. مقاومت فشاری (مگاپاسکال) برای شرایط و سنین مختلف.

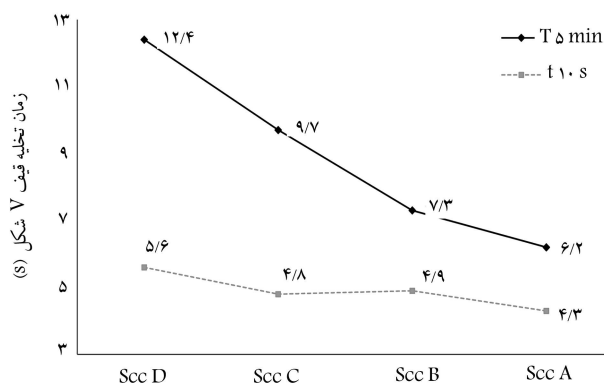
شرایط نگهداری سن (روز)					شرایط نگهداری سن (روز)	نوع
Sec D	Sec C	Sec B	Sec A	Sec A		
۴۹٫۶	۵۰٫۶	۴۹٫۰	۵۰٫۱	۲۸	d	
۵۲٫۸	۵۹٫۴	۵۶٫۹	۵۷٫۸	۵۶		
۵۶٫۱	۶۲٫۷	۵۹٫۳	۶۰٫۵	۹۰		
۱۶٫۳	۱۹٫۲	۲۰٫۹	۲۲٫۳	۳		
۳۲٫۶	۳۴٫۶	۳۸٫۹	۴۱٫۰	۷	w	
۵۳٫۶	۵۸٫۱	۵۵٫۸	۵۷٫۳	۲۸		
۵۶٫۲	۶۴٫۱	۶۰٫۳	۴۳٫۶	۵۶		
۵۷٫۰	۶۷٫۳	۶۳٫۹	۶۵٫۷	۹۰		

جدول ۷. مقاومت کششی (مگاپاسکال) برای شرایط و سنین مختلف.

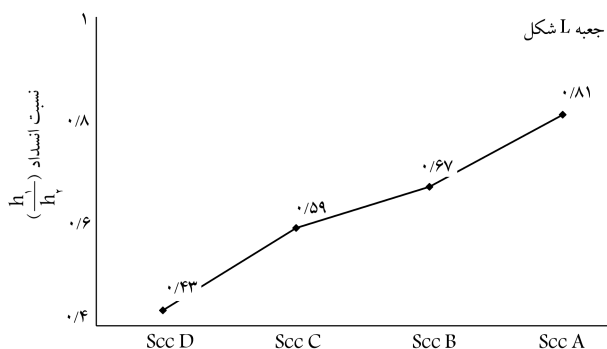
شرایط نگهداری سن (روز)					شرایط نگهداری سن (روز)	نوع
Sec D	Sec C	Sec B	Sec A	Sec A		
۳٫۵۰	۳٫۲۰	۳٫۰۲	۲٫۵۰	۲۸	d	
۳٫۸۱	۳٫۳۵	۳٫۲۰	۲٫۷۲	۵۶		
۳٫۹۱	۳٫۴۲	۳٫۳۱	۲٫۸۴	۹۰		
۳٫۷۵	۳٫۴۱	۳٫۳۵	۲٫۸۰	۲۸	w	
۳٫۹۳	۳٫۶۶	۳٫۵۲	۲٫۸۹	۵۶		
۳٫۹۹	۳٫۷۸	۳٫۵۹	۳٫۰۶	۹۰		

جدول ۸. مقاومت چسبندگی (مگاپاسکال) برای شرایط و سنین مختلف.

شرایط نگهداری سن (روز)					شرایط نگهداری سن (روز)	نوع
Sec D	Sec C	Sec B	Sec A	Sec A		
۵٫۲۶	۵٫۰۰	۴٫۹۴	۴٫۰۹	۳	d	
۷٫۴۳	۷٫۳۷	۷٫۲۴	۶٫۴۳	۷		
۸٫۵۸	۸٫۴۴	۸٫۳۲	۸٫۰۱	۲۸		
۸٫۶۳	۸٫۴۹	۸٫۴۰	۸٫۱۴	۵۶		
۸٫۶۵	۸٫۵۲	۸٫۴۴	۸٫۲۰	۹۰	w	
۵٫۲۶	۵٫۰۰	۴٫۹۴	۴٫۰۹	۳		
۸٫۵۶	۸٫۹۱	۸٫۲۰	۷٫۷۸	۷		
۱۰٫۹۳	۱۰٫۶۱	۱۰٫۱۸	۹٫۹۶	۲۸		
۱۱٫۰۲	۱۰٫۷۲	۱۰٫۳۵	۱۰٫۱۱	۵۶	w	
۱۱٫۱۰	۱۰٫۷۹	۱۰٫۴۱	۱۰٫۱۸	۹۰		



شکل ۵. نمودارهای خطی زمان تخلیه‌ی بتن از قیف V شکل.



شکل ۶. نمودار خطی نسبت انسداد در جعبه‌ی L شکل.

۲.۳. آزمایش‌های بتن سخت شده

در جدول ۶، نتایج آزمایش مقاومت فشاری، در جدول ۷، نتایج آزمایش مقاومت کششی و در جدول ۸، نتایج کسب‌شده‌ی آزمایش مقاومت چسبندگی بتن و آرماتور توسط نمونه‌ها در شرایط نگهداری d و w در سنین مختلف ارائه شده است.

نکته‌ی قابل توجه در آزمایش بتن سخت شده، نحوه‌ی شکست نمونه‌ها بوده است. در آزمایش مقاومت کششی، مود شکست در بتن الیافی از مود شکست بتن معمولی تبعیت نمی‌کند. بر خلاف بتن بدون الیاف، که در آن شکست به صورت آبی و با جداشدن دو قطعه از هم همراه است، در بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن با افزایش میزان الیاف شکست به صورت تدریجی است و با جداشدن دو قطعه از هم همراه نیست.

در آزمایش مقاومت چسبندگی، به علت آجدار بودن آرماتورها در همه‌ی نمونه‌ها شکست با ترک برداشتن و گسیختگی بتن به وقوع می‌پیوندد. در نمونه‌های فاقد الیاف بعد از کشیدن آرماتور و جداشدن آن از بتن، نمونه به ۳ قسمت تقسیم می‌شود و در

منتقل می‌کنند و باعث افزایش مقاومت کششی می‌شوند. با توجه به شکل ۱۲، هر چه مقدار الیاف مصرفی بیشتر شده است، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است. شرایط نگهداری نیز تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت کششی نداشته است. در شکل ۱۲، نمودار خطی مقاومت کششی و در شکل ۱۳، نمودار خطی مربوط به مقاومت چسبندگی بر حسب مقدار الیاف مصرفی در سن ۹۰ روز رسم شده است. در آزمایش مقاومت چسبندگی، با افزایش الیاف مقاومت چسبندگی بین آرماتور و بتن در نمونه‌ها به مقدار ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر شده است. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که تأثیر شرایط نگهداری نسبت به تأثیر افزایش الیاف در مقاومت چسبندگی بیشتر بوده است. اختلاف مقاومت چسبندگی بین طرح Scc D و طرح Scc A فقط ۰/۴ مگاپاسکال در شرایط d و ۰/۹ مگاپاسکال در شرایط w بوده است. این در حالی است که اختلاف مقاومت چسبندگی برای نمونه‌ی طرح Scc D در شرایط w نسبت به شرایط d به ۲/۵ مگاپاسکال در سن ۹۰ روز رسیده است. آهنگ رشد مقاومت چسبندگی در هر دو شرایط نگهداری به یک مقدار است و در بازه‌های زمانی یکسان، اختلاف زیادی ندارند. در جدول ۹، آهنگ رشد مقاومت چسبندگی نمونه‌ها بر حسب مگاپاسکال در روز مشخص شده است. نمونه‌ها بیش از ۹۵٪ مقاومت چسبندگی خود را تا سن ۲۸ روز کسب کرده‌اند و از این سن به بعد به طور نسبی به یک آهنگ رشد می‌رسند.

در شکل ۱۴، نمودارهای خطی مقاومت چسبندگی بر حسب مقاومت فشاری متناظر و در شکل ۱۵، نمودارهای خطی مقاومت چسبندگی بر حسب مقاومت کششی متناظر در سنین بزرگ‌تر از ۲۸ روز برای شرایط نگهداری d و w مشخص شده است.

با توجه به نمودار تغییرات مقاومت فشاری - مقاومت چسبندگی مشاهده می‌شود

نمونه‌های حاوی الیاف گسیختگی فقط با ایجاد ترک همراه است و اثری از فروپاشی بتن مشاهده نمی‌شود. ترک‌ها از پایین شروع و در جهت طولی نمونه به سمت بالا پیش رفته است.

نحوه‌ی شکست نمونه‌ها در آزمایش‌های مقاومت کششی و مقاومت چسبندگی در شکل ۷ مشاهده می‌شود، که الیاف پلی‌پروپیلن در این حالت به شکل‌پذیری نمونه‌ها کمک کرده است. در شکل ۸، نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری و در شکل ۹، نمودار خطی تغییرات مقاومت کششی بر حسب زمان در شرایط نگهداری w و d برای همه‌ی طرح‌های اختلاط نمایش داده شده است. همچنین نمودار میله‌یی مربوط به تغییرات مقاومت چسبندگی بر حسب زمان برای طرح اختلاط‌های مختلف برای شرایط نگهداری w و d در شکل ۱۰ رسم شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای مقاومت فشاری مشاهده می‌شود که بیشترین مقاومت در سن ۳ و ۷ روز مربوط به طرح Scc A است. در سنین ۲۸ روز به بالا در هر دو شرایط نگهداری بیش‌ترین مقاومت را Scc C دارد. در شکل ۱۱، نمودار خطی مقاومت فشاری بر حسب مقدار الیاف مصرفی در سن ۹۰ روز رسم شده است.

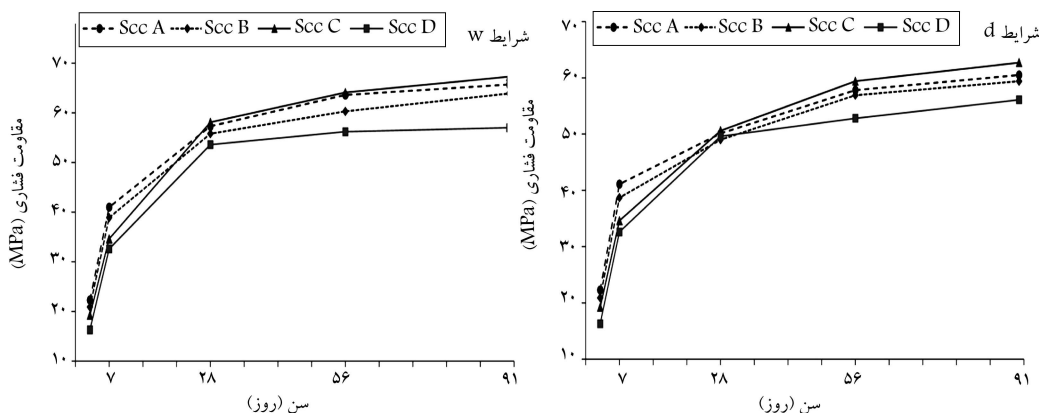
افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر خیلی زیادی در افزایش مقاومت فشاری نداشته است. با افزایش میزان الیاف، این احتمال که الیاف‌ها در کنار هم قرار گیرند، به هم تنیده شوند، پدیده‌ی گلوله‌شدن رخ دهد، و به نقطه‌ضعفی برای ماتریس بتن تبدیل شوند، وجود دارد. طرح Scc D با بیشترین الیاف مصرفی، کمترین مقاومت فشاری را کسب کرده است.

از نتایج مقاومت کششی مشخص است که الیاف مقاومت کششی را تا ۲۵٪ افزایش می‌دهد. وجود الیاف‌ها همانند پل بین دو قطعه عمل و تنش کششی را

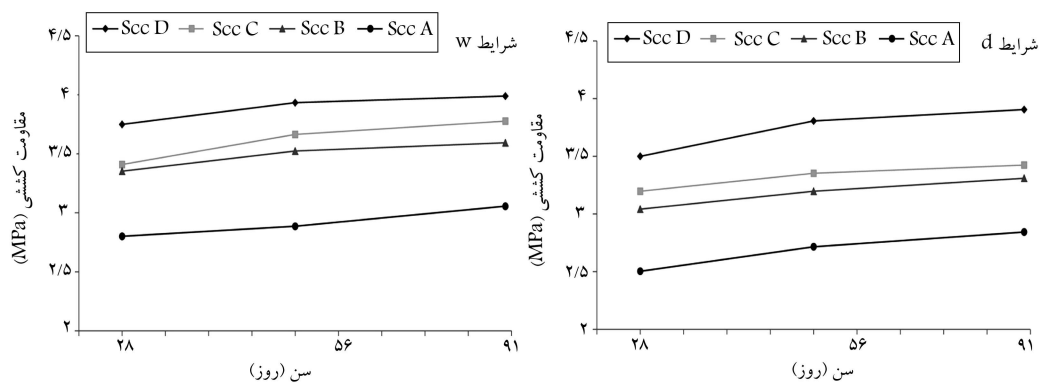


شکست نمونه در آزمایش چسبندگی / شکست نمونه فاقد الیاف در کشش / شکست نمونه با الیاف در کشش

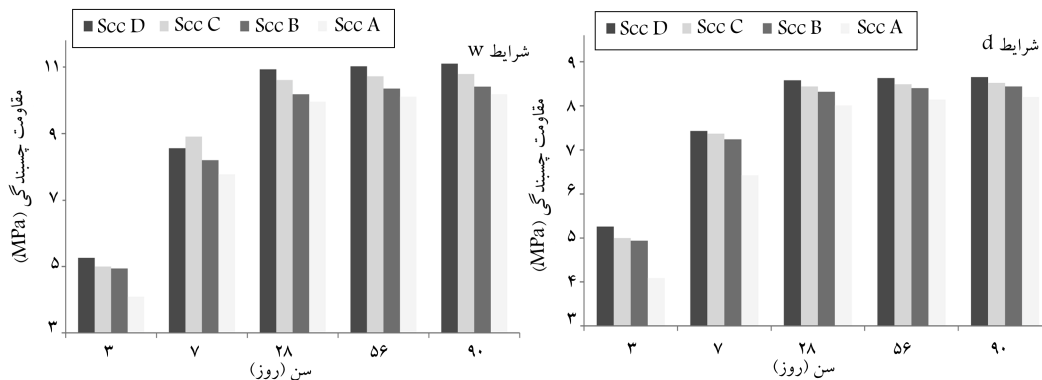
شکل ۷. نمونه‌های شکسته‌شده بعد از آزمایش مقاومت کششی و مقاومت چسبندگی.



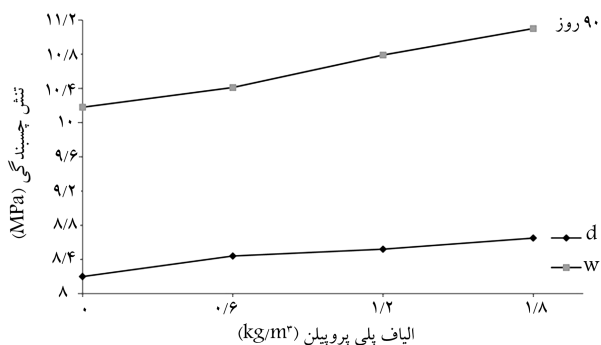
شکل ۸. نمودار خطی مقاومت فشاری بر حسب زمان در شرایط نگهداری مختلف.



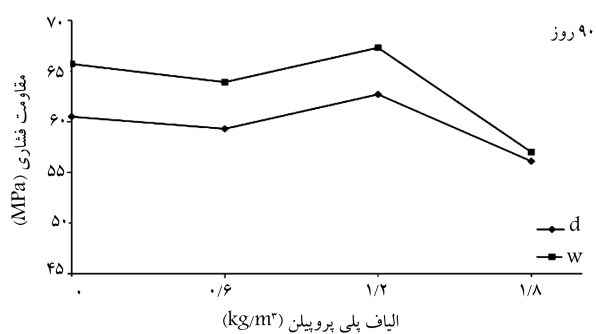
شکل ۹. نمودار خطی مقاومت کششی بر حسب زمان در شرایط نگهداری مختلف.



شکل ۱۰. نمودار میله‌ای مقاومت چسبندگی بر حسب زمان در شرایط نگهداری مختلف.



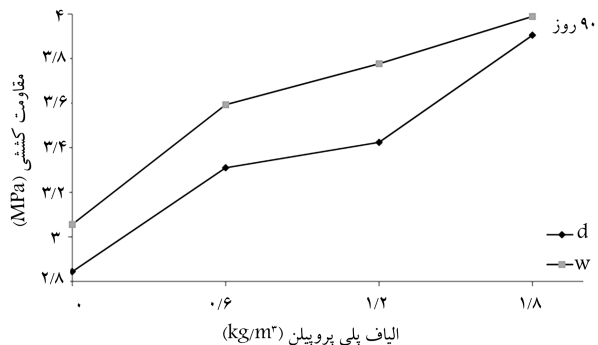
شکل ۱۱. نمودار خطی مقاومت چسبندگی بر حسب الیاف مصرفی.



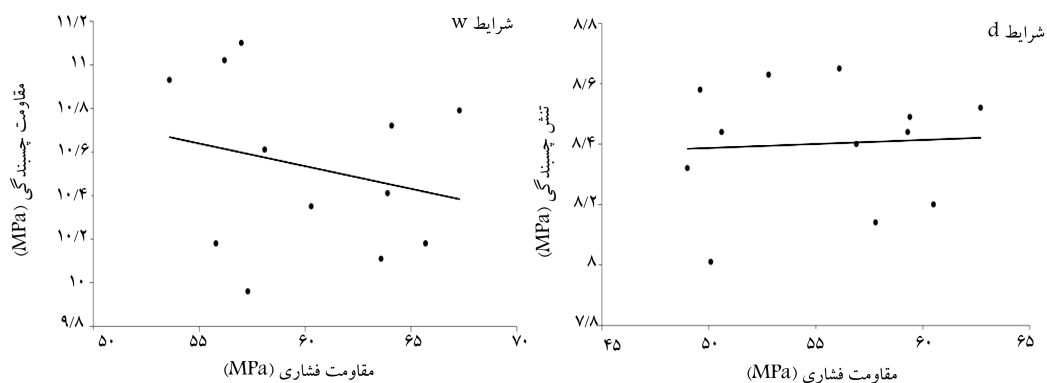
شکل ۱۲. نمودار خطی مقاومت فشاری بر حسب الیاف مصرفی.

جدول ۹. آهنگ رشد تنش چسبندگی در فواصل زمانی مشخص.

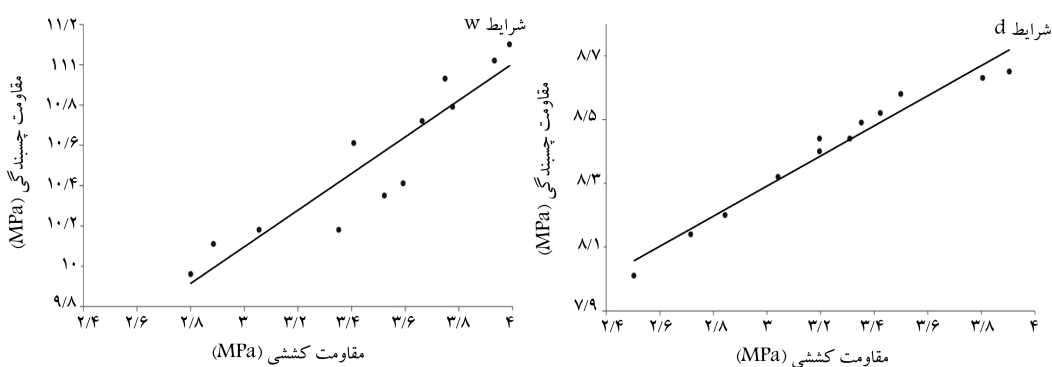
Sec D	Sec C	Sec B	Sec A	آهنگ تغییر
۰/۵۴۳	۰/۵۹۳	۰/۵۷۵	۰/۵۸۵	از ۳ به ۷ روز
۰/۰۵۵	۰/۰۵۱	۰/۰۵۱	۰/۰۷۵	از ۷ به ۲۸ روز
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	از ۲۸ به ۵۶ روز
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	از ۵۶ به ۹۰ روز
۰/۸۲۵	۰/۹۷۸	۰/۸۱۵	۰/۹۲۳	از ۳ به ۷ روز
۰/۱۱۳	۰/۰۸۱	۰/۰۹۴	۰/۱۰۴	از ۷ به ۲۸ روز
۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	از ۲۸ به ۵۶ روز
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	از ۵۶ به ۹۰ روز



شکل ۱۳. نمودار خطی مقاومت کششی بر حسب الیاف مصرفی.



شکل ۱۴. نمودار خطی مقاومت فشاری - مقاومت چسبندگی در هر شرایط نگهداری.



شکل ۱۵. نمودار خطی مقاومت کششی - مقاومت چسبندگی در هر شرایط نگهداری.

می‌یابد. از طرف دیگر پوزولان‌ها با جلوگیری از آب‌روی در لایه‌ی تماس بین الیاف و خمیر سیمان از طریق پرکنندگی و کاهش میزان کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم در سطح تماس از ضخامت ناحیه‌ی انتقال می‌کاهد.

- با توجه به نتایج حاصل از آزمون کشش در طرح اختلاط‌های موجود با افزایش درصد الیاف در بتن خودتراکم شاهد افزایش مقاومت کششی و به دنبال آن افزایش شکل‌پذیری هستیم و همچنین می‌توان به اثر فیبری و پوزولانی نانوسیلیس در تقویت ناحیه‌ی انتقال الیاف و ماتریس سیمان پی برد.
- مقدار بهینه‌ی الیاف پلی‌پروپیلن برای کسب بیشترین مقاومت فشاری برابر ۱/۲ کیلوگرم در مترمکعب است.
- شکست نمونه‌های دارای الیاف در آزمایش مقاومت کششی و مقاومت چسبندگی، نرم‌تر و با شکل‌پذیری بیشتر است.
- در آزمایش مقاومت کششی، تأثیر افزایش الیاف نسبت به شرایط نگهداری بیشتر است. بیشینه‌ی الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی ۲۵٪ مقاومت کششی را افزایش داده است.
- در آزمایش مقاومت چسبندگی، تأثیر شرایط نگهداری نسبت به افزایش الیاف بیشتر است. الیاف پلی‌پروپیلن ۱۰٪ مقاومت چسبندگی را به مقدار بیشینه افزایش داده است.
- نمونه‌هایی که نگهداری کامل‌تری داشته‌اند، یعنی در شرایط w نگهداری شده‌اند، مقاومت فشاری بهتر، مقاومت کششی و مقاومت چسبندگی بالاتری نسبت به نمونه‌های نگهداری‌شده در شرایط d از خود نشان داده‌اند.

که نمی‌توان رابطه‌ی مستقیم بین مقاومت فشاری و مقاومت چسبندگی ایجاد کرد. مقاومت فشاری با افزایش الیاف تا مقدار بهینه افزایش و بیش از مقدار بهینه افت مقاومت پیدا کرده است، در حالی که در مقاومت چسبندگی، افزایش الیاف باعث افزایش چسبندگی شده است. به عبارت دیگر، استفاده‌ی بیش از حد الیاف باعث کاهش مقاومت فشاری شده، در حالی که مقاومت چسبندگی را نیز افزایش داده است. در نمودار تغییرات مقاومت کششی - مقاومت چسبندگی مشخص است که مقاومت چسبندگی و مقاومت کششی با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارند و با افزایش مقاومت کششی، مقاومت چسبندگی نیز افزایش یافته است. افزایش الیاف پلی‌پروپیلن هم باعث افزایش مقاومت کششی و هم باعث افزایش مقاومت چسبندگی شده است.

۴. نتیجه‌گیری

- استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن اثرات منفی در خواص رئولوژی بتن خودتراکم تازه دارند و خاصیت خودتراکمی را کاهش می‌دهند. با توجه به نتایج آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم مشاهده شده است که استفاده از الیاف اثرات منفی در خواص رئولوژی بتن خودتراکم تازه دارد و همچنین استفاده از نانوسیلیس به علت داشتن واکنش‌پذیری بالا، سبب کاهش کارایی، قوام، و لزجت بتن خودتراکم می‌شود.
- با بهره‌برداری از نانوتکنولوژی در این پژوهش نشان داده شده است که روش مذکور می‌تواند راهکاری مناسب جهت بهبود هر چه بیشتر خواص مصالح سیمانی باشد، به طوری که با افزایش تراکم مخلوط، سطح تماس بیشتری بین الیاف و خمیر سیمان فراهم شده است. لذا اصطکاک افزایش و عملکرد الیاف بهبود

پانوشتها

1. self-compacting concrete
2. Poly Carboxylic-Ether

منابع (References)

1. Skarendahl, A. and Petersson, Ö., *Self-Compacting Concrete - State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, Report 23, Published by RILEM Publications s.a.r.l., pp. 141-149 (2001).
2. Domone, P.L. "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", *Cement & Concrete Composites*, **29**(1), pp. 1-12 (2007).
3. ACI Technical Committee 237, *Self-Consolidating Concrete*, American Concrete Institute, Final Draft, pp. 24-34 (2005).
4. Takada, K., Pelova, G.I. and Walraven, J. "Influence of mixing efficiency on the mixture proportion of general purpose self-compacting concrete", International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Cements Sherbrooke, Canada, pp.19-39 (1998).
5. Bonen, D. and Shah, S.P. "Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete", *Progress in Structural Engineering and Materials*, **7**(1), pp. 14-26 (2005).
6. Soroushian, P. "Secondary reinforcement adding cellulose fibers", *ACI Concrete International*, **19**(6), pp. 28-38 (1986).
7. Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S.H. and Hosseinpour, I. "The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, **25**(1), pp. 351-358 (2011).
8. Hemant, B., Dhonde, Y.L., Thomas, T.C. and Vogel, J. "Fresh and hardened properties of self-consolidating fiber-reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, **104**(5), pp. 491-500 (2007).
9. Moncef, N. and Ladanchuk, J.D. "Fiber synergy in fiber reinforced self-consolidating concrete", *ACI Materials Journal*, **101**(6), pp. 508-517 (2004).
10. Sivakumar, A. and Santhanam, M. "A quantitative study on the plastic shrinkage crack in high strength hybrid fiber reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*, **29**(7), pp. 571-581 (2007).
11. Nili, M. and Afroughsabet, V. "The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete", *Construction and Building Materials*, **24**(6), pp. 927-933 (2010).
12. Homayon, H. and Abrishami, D.M. "Simulation of uniform bond stress", *ACI Materials Journal*, **89**(2), pp. 161-168 (1992).
13. EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, <http://www.efnarc.Org> (2005).
14. Tanyildizi, H. "Fuzzy logic model for the prediction of bond strength of high-strength lightweight concrete", *Advances in Engineering Software*, **40**(3), pp. 161-169 (2009).
15. Foroughi-Asl, A., Dilmaghani, S. and Famili, H. "Bond strength of reinforcement steel in self-compacting concrete", *International Journal of Civil Engineering*, **6**(1), pp. 24-33 (2008).