

تأثیر الیاف فولادی (cold-drawn crimped-end) بر خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام روکش‌های بتنی

علیرضا پورخورشیدی^{۱*} و جعفر سبحانی^۲

^۱ عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

*آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (alip_208@yahoo.com)

چکیده

روکش بتنی، لایه بتنی است که بر روی رویه موجود اجراء می‌شود و به عنوان یک راه حل مطمئن و کم هزینه برای بهبود مدیریت روسازی موجود می‌باشد. در این مقاله خواص روکش‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی از نوع cold-drawn crimped-end مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت بررسی اثر الیاف فولادی، مخلوط‌های آزمایشی با مقادیر الیاف ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و با استفاده از الیاف با قطر ۰/۸ و ۱ میلی‌متر با نسبت آب به سیمان ۰/۵ در مقایسه با بتن مرجع ساخته شده است. خواص مهندسی این نوع بتن‌ها در حالت تازه و خواص بتن سخت‌شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، عمق نفوذپذیری تحت فشار آب، و مقاومت ضربه‌ای و سایشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در سنین اولیه افزودن الیاف فولادی تأثیر چندانی در مقاومت فشاری نداشته است اما در سنین بالاتر، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند. همچنین استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن گردیده و مقاومت ضربه‌ای و همچنین مقاومت سایشی نمونه‌های دارای الیاف در مقایسه با نمونه‌های شاهد، خصوصاً در سنین بالاتر چشمگیرتر است.

کلمات کلیدی: الیاف فولادی، مشخصات فیزیکی-مکانیکی، دوام، روکش بتن الیافی

۱- مقدمه

تقاضا برای روش‌های نوین مهندسی به‌منظور حفظ و نگهداری روسازی‌های کشور همواره وجود دارد. با کاهش بودجه، افزایش بار و حجم ترافیک عبوری و نیز تمرکز جدی برای پایداری زیرساخت‌ها و حفاظت از روسازی، باعث شده است که شرکت‌های راهسازی به دنبال ارزان‌ترین و موثرترین روش برای مدیریت روسازی باشند که در این بین استفاده از روکش‌های بتنی می‌تواند به‌عنوان یک راه حل مطمئن و کم هزینه برای بهبود مدیریت روسازی موجود باشد که خود شامل حفاظت، بازسازی و نوسازی می‌شود [۱]. استفاده از روکش‌های بتنی به دلیل مزایای زیادی که نسبت به نوع آسفالتی دارند از قبیل: راحتی در اجراء، هزینه ترمیم و نگهداری کمتر، مزایای زیست‌محیطی، محدود بودن منابع تولید قیر و ... روزبه‌روز در حال افزایش است. روکش‌های بتنی هم برای ترمیم با عمر کوتاه‌مدت (۵ تا ۱۵) سال و نیز بلندمدت (۲۰ تا ۳۵) سال مناسب هستند [۱-۲]. ضخامت روکش از ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر یا بیشتر متغیر است و بستگی به شرایط روسازی موجود، ترافیک طراحی، بستر روسازی و عمر طراحی آن دارد [۲-۳]. باتوجه به شکل ۱ از روکش‌های بتنی برای ترمیم روسازی‌های آسفالتی، مرکب و بتنی و به‌صورت‌های مقید و غیرمقید و در مواردی نیمه‌مقید استفاده می‌شود. [۱].



شکل ۱- شکل شماتیکی از نحوه‌ی ترمیم با روکش‌های بتنی مقید و غیرمقید [۱]

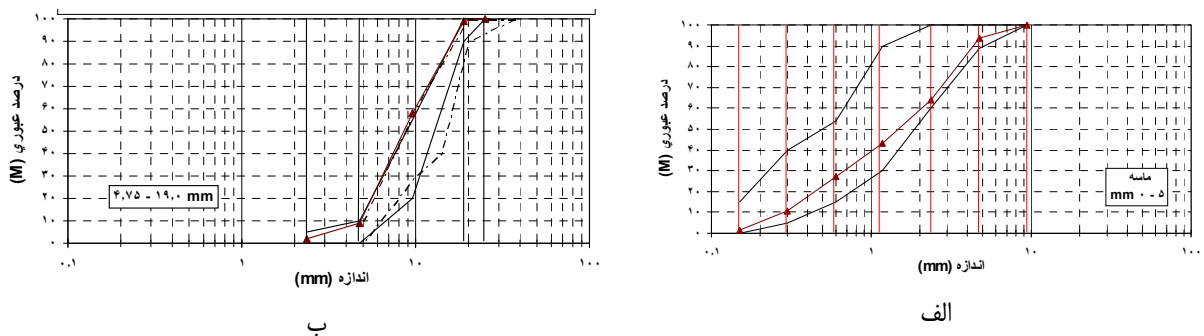
تاکنون مطالعات زیادی روی الیاف‌های فلزی صورت گرفته است، در تحقیقات جامعی که بر روی مشخصات بتن‌های الیافی حاوی الیاف‌های فلزی ماکرو و میکرو تحقیقاتی انجام گرفته است، نشان داده شد که افزودن الیاف فلزی به بتن تاثیر اندکی روی مقاومت فشاری آن دارد اما باعث می‌شود نوع شکست بتن از حالت ترد به شکل پذیر تغییر یابد، به گونه‌ای که بعد از اتمام آزمون مقاومت فشاری، بتن الیافی برخلاف بتن معمولی می‌تواند یکپارچگی خود را حفظ کرده و خرد نشود. با افزایش درصد و طول الیاف فلزی، شکل پذیری بتن الیافی افزایش می‌یابد. با مقایسه عملکرد خمشی بتن‌های الیافی معلوم شد که بتن‌های حاوی الیاف فلزی کوتاه بعد از ترک خوردگی رفتاری نرم از خود نشان می‌دهند، در حالی که بتن‌های حاوی الیاف فلزی بلند بعد از ترک خوردگی رفتاری سخت شونده داشته و باعث افزایش بار حداکثر می‌شوند. با افزایش درصد الیاف فلزی در بتن، شکل پذیری، حداکثر بار اولیه و مقاومت خمشی افزایش می‌یابد اما تاثیر زیادی روی مقاومت فشاری آن ندارد [۳-۵].

در تحقیقات دیگری تاثیر الیاف‌های متفاوت با درصدهای مختلف روی مشخصات مکانیکی بررسی شده است. در این مطالعات، انواع الیاف از جمله الیاف فلزی، الیاف پلی پروپیلن و الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۵]. بر اساس نتایج این مطالعات، مقاومت فشاری بتن الیافی با الیاف شیشه و همچنین الیاف فلزی در تمامی درصدهای حجمی، بیشتر از مقاومت فشاری بتن شاهد بوده و با افزایش درصد الیاف، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد به عنوان یک نتیجه گیری کلی می‌توان گفت: با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

- مواد و مصالح

سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها در دو بخش ریزدانه طبیعی (۰-۵ میلیمتر) و درشت‌دانه تیز گوشه (۵-۲۰ میلیمتر) و مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ بوده است. منحنی دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه مورد مصرف در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- منحنی دانه بندی الف- ریزدانه و ب- درشت دانه

الیاف فولادی تولیدی یکی از شرکت‌های تولید کننده داخلی و از دسته Crimped-End Wire و نوع Type I (Cold-drawn wire) مطابق استاندارد ASTM A۸۲۰ می‌باشند. مشخصات الیاف مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات الیاف فولادی مصرفی

نوع الیاف	قطر (mm)	نسبت طول بر سطح (mm^2)	مقاومت کششی (MPa)	حداقل مقاومت کششی لازم (۳۱۰ مگاپاسکال >)
الیاف با قطر ۰/۸ میلی‌متر	۰/۸۲	۰/۵۱	۱۲۲۰	OK.
الیاف با قطر ۱/۰ میلی‌متر	۰/۹۹	۰/۷۹	۱۲۰۱	OK.

در این مطالعه آزمایشگاهی، از الیاف فولادی با قطر ۰/۸ و ۱/۰ میلی‌متر در ساخت نمونه‌های آزمایشی استفاده شده است. در این مطالعه سیمان مصرفی در ساخت کلیه نمونه‌ها، سیمان نوع ۲ تهران بوده و آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها، آب شرب تهران می‌باشد.

- طرح مخلوط

مخلوط نمونه‌های بتن شاهد برای دستیابی به رده مقاومتی معمولی طراحی گردید. کلیه خواص نمونه بتن‌های آزمایشی نسبت به خواص این مخلوط سنجیده خواهد شد. جهت بررسی اثر الیاف فولادی مزبور، مخلوط‌های آزمایشی با مقادیر الیاف ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و با استفاده از الیاف با قطر ۰/۸ و ۱ میلی‌متر ساخته شده است. طرح مخلوط‌های بتن شاهد و آزمایشی در جدول ۲ ارائه گردیده است. عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C۱۹۲ انجام گرفت.

جدول ۲- مقادیر اجزاء مصالح در طرح مخلوط‌های بتن آزمایشی و شاهد*

آب (kg/m ³)	ماسه** (kg/m ³)	شن** (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	الیاف فولادی (kg/m ³)	مشخصه مخلوط	کد مخلوط
۱۷۵	۹۶۰	۸۵۰	۳۵۰	-	مخلوط شاهد	SW
۱۷۵	۹۶۰	۸۵۰	۳۵۰	۱۵	دارای الیاف با قطر ۰/۸ میلی‌متر	SW۰,۸-۱۵
۱۷۵	۹۶۰	۸۵۰	۳۵۰	۲۵	دارای الیاف با قطر ۰/۸ میلی‌متر	SW۰,۸-۲۵
۱۷۵	۹۶۰	۸۵۰	۳۵۰	۱۵	دارای الیاف با قطر ۱/۰ میلی‌متر	SW۱,۰-۱۵
۱۷۵	۹۶۰	۸۵۰	۳۵۰	۲۵	دارای الیاف با قطر ۱/۰ میلی‌متر	SW۱,۰-۲۵

* نسبت آب به سیمان کلیه مخلوط ۰/۵۰ می‌باشد.
** مصالح در حالت اشباع با سطح خشک می‌باشد.

مشخصات بتن تازه مطابق استاندارد ASTM C۱۳۸ و ASTM C۲۳۱ تعیین گردید و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات بتن تازه

مشخصه مخلوط	درصد هوای بتن تازه (درصد)	وزن مخصوص بتن تازه (kg/m ³)
SW	۱/۵	۲۳۴۵
SW۰,۸-۱۵	۲/۴	۲۳۶۵
SW۰,۸-۲۵	۲/۶	۲۳۷۵
SW۱,۰-۱۵	۲/۵	۲۳۶۹
SW۱,۰-۲۵	۲/۷	۲۳۸۰

۳- نتایج آزمایش‌ها

-تعیین مقاومت فشاری

آزمایش اندازه‌گیری مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز، بر اساس استاندارد ASTM C۳۹ انجام و نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- نتایج مقاومت فشاری

مقاومت فشاری (MPa)			مشخصه مخلوط
۵۶ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	
۳۳/۰	۳۲/۰	۲۱/۵	SW
۳۷/۴	۳۵/۶	۲۲/۰	SW۰,۸-۱۵
۳۸/۰	۳۵/۸	۲۳/۰	SW۰,۸-۲۵
۳۸/۵	۳۶/۸	۲۳/۵	SW۱,۰-۱۵
۳۸/۶	۳۶/۹	۲۴/۰	SW۱,۰-۲۵

- تعیین مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C۴۹۶ انجام گرفته است. نتایج مقاومت کششی در سن ۷، ۲۶ و ۵۶ روز در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج مقاومت کششی

مقاومت کششی (MPa)			مشخصه مخلوط
۵۶ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	
۳/۵	۳/۴	۲/۸	SW
۵/۴	۴/۸	۳/۰	SW _{۰,۸-۱۵}
۶/۷	۶/۵	۳/۵	SW _{۰,۸-۲۵}
۵/۶	۵/۵	۳/۱	SW _{۱,۰-۱۵}
۷/۸	۷/۷	۳/۶	SW _{۱,۰-۲۵}

- تعیین مقاومت خمشی

مقاومت خمشی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C۷۸ انجام گرفته است. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج مقاومت خمشی

مقاومت خمشی (Mpa)			مشخصه مخلوط
۵۶ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	
۴/۵	۴/۳	۲/۲	SW
۶/۰	۵/۸	۲/۸	SW _{۰,۸-۱۵}
۷/۹	۷/۷	۳/۱	SW _{۰,۸-۲۵}
۶/۲	۵/۹	۳/۶	SW _{۱,۰-۱۵}
۸/۰	۷/۹	۴/۵	SW _{۱,۰-۲۵}

- تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی

مدول الاستیسیته استاتیکی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C۴۶۹ انجام گرفته است. نتایج مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روز در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج مدول الاستیسیته استاتیکی

مدول الاستیسیته استاتیکی ۲۸ روزه (GPa)	مشخصه مخلوط
۲۹/۰	SW
۳۵/۴	SW _{۰,۸-۱۵}
۳۹/۵	SW _{۰,۸-۲۵}
۳۶/۵	SW _{۱,۰-۱۵}
۵۱/۳	SW _{۱,۰-۲۵}

-تعیین مقاومت ضربه‌ای

مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها مطابق روش آزمایش سقوط وزنه (وزنه افتان) ارائه شده در آیین‌نامه ACI ۵۴۴,۲R انجام گرفته است. نتایج مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها در سن ۲۸ روز در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج مقاومت ضربه‌ای

تعداد ضربات تحمل شده برای وقوع اولین ترک	مشخصه مخلوط

۱۷	SW
۲۵	SW۰,۸-۱۵
۳۱	SW۰,۸-۲۵
۲۷	SW۱,۰-۱۵
۳۳	SW۱,۰-۲۵

- تعیین عمق نفوذپذیری تحت فشار آب

آزمون نفوذپذیری تحت فشار آب مطابق با استاندارد EN ۱۲۳۹۰-part ۸ صورت گرفت. اصول این آزمایش بدین صورت است که سطحی از بتن سخت شده به مدت (۷۲ ± ۲) hr تحت فشار آب (۵۰ ± ۵۰) kpa قرار می‌گیرد. سپس نمونه شکسته شده و حداکثر عمق نفوذ آب اندازه‌گیری می‌گردد. نتایج میزان نفوذپذیری تحت فشار آب، در سن ۲۸ و ۵۶ روز در جدول ۹ ارائه گردیده است.

جدول ۹- نتایج میزان نفوذپذیری تحت فشار آب

حداکثر عمق نفوذپذیری تحت فشار آب (میلی‌متر)		مشخصه مخلوط
۲۸ روزه	۵۶ روزه	
۱۴	۱۶	SW
۱۶	۱۷	SW۰,۸-۱۵
۱۷	۱۹	SW۰,۸-۲۵
۱۷	۱۸	SW۱,۰-۱۵
۱۸	۱۹	SW۱,۰-۲۵

- تعیین مقاومت سایشی

برای تعیین مقاومت سایشی نمونه‌ها، از روش استاندارد ASTM C۷۷۹، (روش A: آزمون دیسک چرخان) استفاده شد. در این روش، مقاومت سایشی سطوح افقی بتنی اندازه‌گیری می‌شود. در روش آزمون مذکور، شبیه‌سازی شرایط سایش انجام شده است و برای تخمین سایش ناشی از تردد بارهای ترافیکی مناسب می‌باشد. اساس کار دستگاه دیسک چرخان بر پایه ایجاد سایش، به کمک سه عدد دیسک به قطر ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. هر کدام از این دیسک‌ها، توسط یک محور که عمود بر سطح دیسک است به موتور دستگاه وصل شده و در نتیجه می‌توانند به دور محور خود بچرخند. هر سه دیسک، علاوه بر حرکت دورانی به دور محور خود، حول محور دستگاه نیز دوران می‌نمایند. قطر داخلی مسیر دوران ۱۵۵ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۲۷۵ میلی‌متر است. شیارهای روی دیسک به صورت ردیف‌های عمود بر هم بوده و عمق آنها ۵ میلی‌متر و عرض آنها ۶ میلی‌متر است. دیسک‌ها با سرعت ۱۲ دور در دقیقه، حول محور دستگاه و با سرعت ۲۸۰ دور در دقیقه، حول محور خود می‌چرخند. بار وارده بر روی هر کدام از دیسک‌ها ۲۲ نیوتن است. در حین چرخش دیسک‌ها، مواد ساینده سیلیکون کارباید (Silicon Carbide) با دانه‌های شماره ۶۰، از مخزن دستگاه از یک سوراخ به قطر ۳ میلی‌متر بر روی سطح نمونه ریخته می‌شود. مواد سایشی باید با نرخ ۴ تا ۶ گرم در دقیقه بر روی سطح نمونه ریخته شود.

دستگاه اندازه‌گیری عمق سایش، شامل یک میله (چهارسو) فولادی به پهنای ۲۵ میلی‌متر و به طول ۳۰۰ میلی‌متر است که توسط پایه‌هایی بر روی نمونه قرار می‌گیرد. در روی میله فولادی یک شیار وجود دارد که در آن ده عدد سوراخ به قطر ۳ میلی‌متر و به فاصله ۶ میلی‌متر از یکدیگر ایجاد شده است. برای تعیین عمق سایش، ابتدا توسط یک میکرومتر به عمق مؤثر ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۲۵ میلی‌متر، قرائت اولیه صورت گرفته و سپس در پایان آزمون و بعد از سایش نمونه‌ها نیز

مجدداً قرائت انجام می‌شود و از تفاضل قرائت اولیه از قرائت ثانویه، عمق سایش تعیین می‌گردد. نتایج تعیین مقاومت سایشی بر روی نمونه‌ها با سن ۲۸ روز در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰- میانگین نتایج آزمون تعیین عمق سایش بر روی نمونه‌های شاهد و آزمایشی در سن ۲۸ روز

میانگین عمق سایش (میلی‌متر)		مقدار سایش نمونه
بعد از ۱۵ دقیقه	بعد از ۳۰ دقیقه	
۱/۱	۱/۶	SW
۰/۷۹	۰/۸۳	SW _{۰,۸-۱۵}
۰/۷۵	۰/۷۷	SW _{۰,۸-۲۵}
۰/۸۱	۰/۸۳	SW _{۱,۰-۱۵}
۰/۷۴	۰/۷۵	SW _{۱,۰-۲۵}

۴- تحلیل نتایج

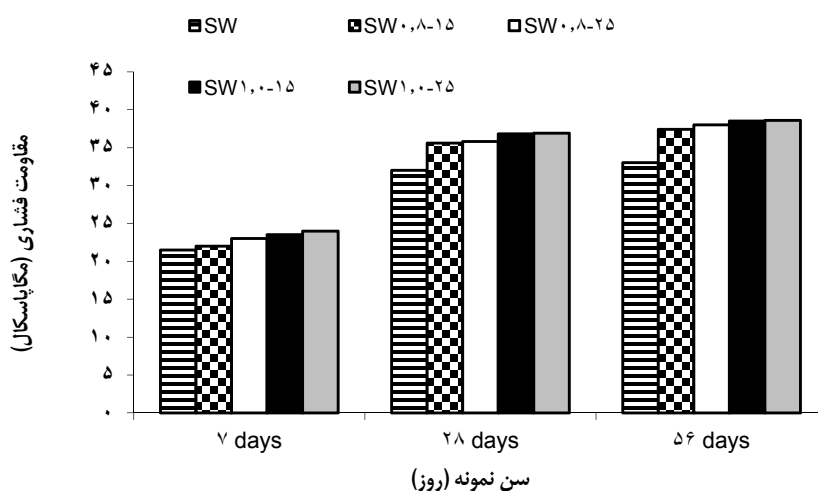
- خواص بتن تازه

استفاده از الیاف فولادی در مخلوط‌های بتنی، باعث افزایش روانی و کارایی مخلوط گردیده است.

- خواص بتن سخت‌شده

- مقاومت فشاری

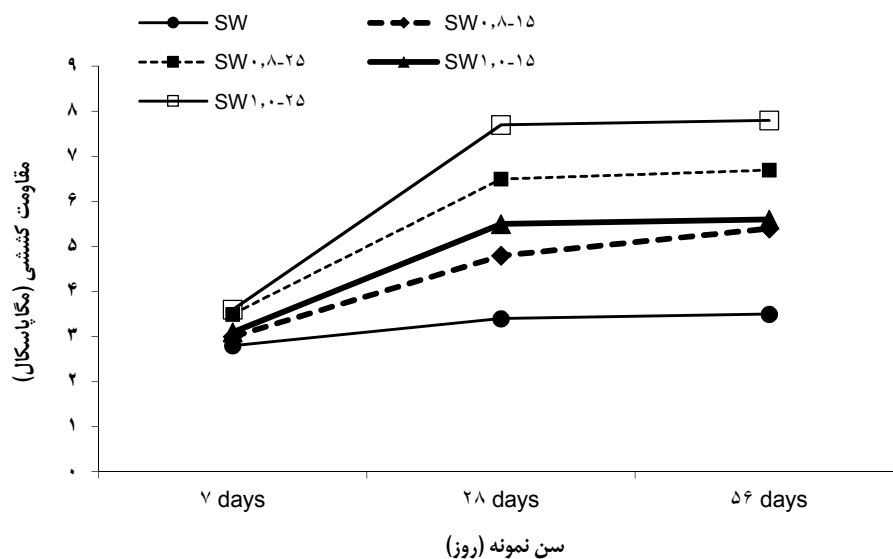
همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اگرچه در سن ۷ روز، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی افزایش مقاومت فشاری چندانی در مقایسه با بتن شاهد ندارند، اما در سن ۲۸ و ۵۶ روز، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند.



شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و آزمایشی در سنین مختلف

مقاومت کششی

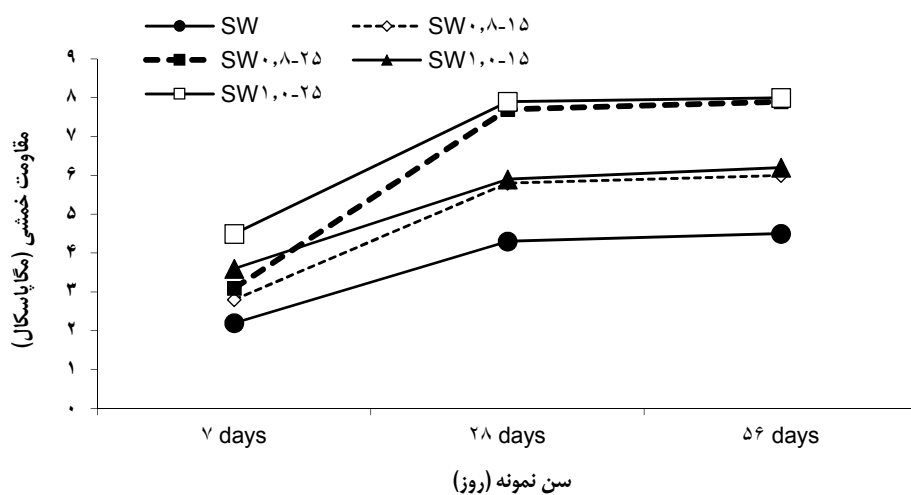
همانطور که در شکل ۴ مشخص است، استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی در سنین ۲۸ و ۵۶ روز گردیده است. افزایش مقاومت کششی در حدود دو برابر در نمونه‌های دارای الیاف در سن ۲۸ و ۵۶ روز نسبت به نمونه‌های شاهد دیده می‌شود.



شکل ۴- مقاومت کششی نمونه‌های شاهد و آزمایشی در سنین مختلف

مقاومت خمشی

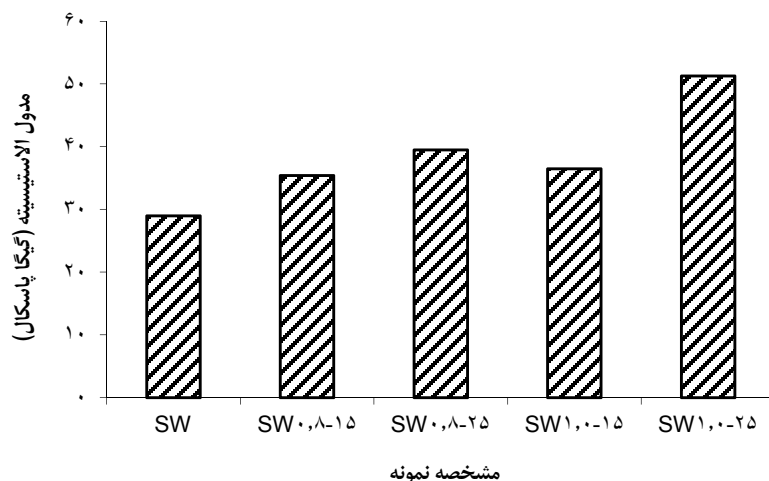
همانطور که در شکل ۵ مشخص است، استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت خمشی گردیده است. افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در سنین ۲۸ و ۵۶ روز نسبت به نمونه شاهد، بیش از ۱۰۰ درصد می‌باشد.



شکل ۵- مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد و آزمایشی در سنین مختلف

– مدول الاستیسیته

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن گردیده است. افزایش مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی الیاف با افزایش مقدار مصرف الیاف نیز بیشتر شده است.



شکل ۶- مدول الاستیسیته نمونه‌های شاهد و آزمایشی در سن ۲۸ روز

– عمق نفوذپذیری تحت فشار آب

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی اثر ناچیزی بر روی عمق نفوذپذیری تحت فشار آب داشته است.

– مقاومت ضربه‌ای و سایشی

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۸ و ۱۰، مقاومت ضربه‌ای و همچنین مقاومت سایشی نمونه‌های دارای الیاف در مقایسه با نمونه‌های شاهد، بیشتر است. افزایش مقاومت ضربه‌ای و سایشی در سنین بالاتر بسیار چشمگیرتر می‌باشد. نتایج نفوذپذیری در سن ۵۶ روز، اثر استفاده از الیاف فولادی در بتن سخت شده را اثبات می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از الیاف فولادی بر روی خواص مکانیکی و دوام روکش‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس موارد ذیل قابل نتیجه‌گیری می‌باشد:

- استفاده از الیاف فولادی در مخلوط‌های بتنی، باعث افزایش روانی و کارایی مخلوط گردیده است.
- اگرچه در سن ۷ روز، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی افزایش مقاومت فشاری چندانی در مقایسه با بتن شاهد ندارند، اما در سن ۲۸ و ۵۶ روز، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند.

- استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی در سنین ۲۸ و ۵۶ روز گردیده است. افزایش مقاومت کششی در حدود دو برابر در نمونه‌های دارای الیاف در سن ۲۸ و ۵۶ روز نسبت به نمونه‌های شاهد دیده می‌شود.

- استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت خمشی گردیده است. افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در سنین ۲۸ و ۵۶ روز نسبت به نمونه شاهد، بیش از ۱۰۰ درصد می‌باشد.

- استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن گردیده است. افزایش مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی الیاف با افزایش مقدار مصرف الیاف نیز بیشتر شده است.

- استفاده از الیاف فولادی اثر ناچیزی بر روی عمق نفوذپذیری تحت فشار آب داشته است.

- مقاومت ضربه‌ای و همچنین مقاومت سایشی نمونه‌های دارای الیاف در مقایسه با نمونه‌های شاهد، بیشتر است. افزایش مقاومت ضربه‌ای و سایشی در سنین بالاتر بسیار چشمگیرتر می‌باشد.

- نتایج نفوذپذیری در سن ۵۶ روز، اثر استفاده از الیاف فولادی در بتن سخت‌شده را اثبات می‌کند.

قدردانی

این مقاله با حمایت مادی و معنوی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی صورت گرفته است. بدین ترتیب نویسندگان کمال تشکر و قدرانی خود را اعلام می‌دارند.

مراجع

- [۱] Dale Harrington and Gary Fick; Guide to Concrete Overlays, Third Edition, APCPA, May ۲۰۱۴.
- [۲] Isla, F., B. Luccioni, G. Ruano, M. C. Torrijos, F. Morea, G. Giaccio, and R. Zerbino. "Mechanical response of fiber reinforced concrete overlays over asphalt concrete substrate: experimental results and numerical simulation." *Construction and Building Materials* ۹۳ (۲۰۱۵): ۱۰۳۲-۱۰۳۳.
- [۳] Yang H. Huang; Pavement Analysis and Design, Second Edition, Pearson prentice Hall, ۲۰۰۴.
- [۴] Torres, H. N., J. Roesler, R. Otto Rasmussen, and D. Harrington. "Guide to the Design of Concrete Overlays Using Existing Methodologies." Iowa State University, National Concrete Pavement Technology Center (۲۰۱۲).
- [۵] Medina-Chavez, C. I., S. C. Choi, and M. Won. "Concrete Pavement Overlays and Failure Mechanisms", Center for Transportation Research. Report No. ۰-۴۸۹۲-۲, ۲۰۰۷.
- [۶] Olivito, R. S., and F. A. Zuccarello. "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete." *Composites Part B: Engineering* ۴۱, no. ۳ (۲۰۱۰): ۲۴۶-۲۵۵.
- [۷] Kim, Young Kyu, and Seung Woo Lee. "Performance evaluation of bonded concrete overlay." *Construction and Building Materials* ۴۹ (۲۰۱۳): ۴۶۴-۴۷۰.
- [۸] Simões, T., H. Costa, D. Dias-da-Costa, and E. Júlio. "Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes." *Construction and Building Materials* ۱۳۷ (۲۰۱۷): ۵۴۸-۵۵۶.
- [۹] Rasmussen, Robert Otto, and Dan K. Rozycki; Thin and ultra-thin whitetopping: A synthesis of highway practice. Vol. ۳۳۸. Transportation Research Board, ۲۰۰۴.