

## بررسی میزان مقاومت بتن مسلح با الیاف فولادی در محیط‌های سولفات و کلرید

محمدحسین رضائی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

علی دنناز\*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

محمد دنناز

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

### چکیده

بتن یک ماده متخلخل و ناهمگن است و دوام آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دوام بتن مسلح با الیاف فولادی در محیط‌های حاوی یون‌های سولفات و کلرید مورد توجه محققان است. الیاف فولادی به دلیل توانایی در دوخت ترک مقاومت در برابر نفوذ آب را بهبود می‌بخشند. الیاف فولادی و ماتریس بتن با هم از طریق یک رابط ضعیف پیوند می‌خورند و خواص این کامپوزیت تا حد زیادی متأثر از پیوند سطحی الیاف و ماتریس بتن است. نفوذپذیری کمتر باعث حفظ دوام سازه در تماس با مواد مضر مانند یون کلرید، یون سولفات و اسید می‌شود زیرا به راحتی نمی‌توانند به بتن نفوذ کنند. در این مقاله ۳ نوع بتن مسلح با ۱، ۱،۵ و ۲٪ الیاف فولادی تهیه شد و در ۳ محیط سولفات منبذیم، سولفات سدیم و کلرید سدیم به مدت ۶ و ۱۲ ماه قرار گرفت و سپس مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت الکتریکی، نفوذ آب و نفوذ سریع کلرید مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده نمونه حاوی ۲٪ الیاف فولادی در مواجهه با اسیدها در مقایسه با ۲ نمونه دیگر (۱ و ۱،۵٪ الیاف فولادی) عملکرد مکانیکی ضعیف تری را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بتن مسلح، الیاف فولادی، محیط سولفات و کلرید، دوام، خوردگی.

\* نویسنده مسئول: a.delnavaz@qiau.ac.ir

۱- مقدمه

بتن مسلح، نوعی ماده کامپوزیت است که از اختلاط بتن با الیاف جهت بهبود رفتار بتن تشکیل می‌شود. این الیاف به‌طور تصادفی در همه ابعاد بتن پراکنده می‌شوند [۱]. جایگزینی جزئی و یا کلی آرماتورهای معمولی با الیاف فولادی به راه حلی برای ساخت زیرساخت‌های بتنی تبدیل شده است، زیرا این الیاف با جلوگیری از ایجاد ترک‌های بزرگ و انتشار ترک، دوام و عملکرد مکانیکی را بهبود می‌بخشد [۲]. الیاف فولادی به‌دلیل توانایی در دوخت ترک مقاومت در برابر نفوذ آب را بهبود می‌بخشد [۳]. الیاف فولادی و ماتریس بتن با هم از طریق یک رابط ضعیف پیوند می‌خورند و خواص این کامپوزیت تا حد زیادی متأثر از پیوند سطحی الیاف و ماتریس بتن است [۴-۶]. نفوذپذیری کمتر باعث حفظ دوام سازه در تماس با مواد مضر مانند یون کلرید، یون سولفات و اسید می‌شود زیرا به راحتی نمی‌توانند به بتن نفوذ کنند [۷]. علاوه بر این با افزودن الیاف به کامپوزیت سیمانی دوام بتن بهبود می‌یابد [۸]. در تحقیقات سال‌های اخیر الیاف فلزی در مقایسه با سایر الیاف، بیشترین کاربرد در بتن مقاومت بالا داشته است. هدف از اضافه کردن این الیاف به بتن، افزایش چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی، مقاومت در برابر اثرات ضربه، مقاومت برشی، مقاومت خمشی و دیگر خواص مکانیکی آن است، خواص کامپوزیت تقویت شده با الیاف فولادی کوتاه تا حد زیادی به مقدار الیاف، نسبت نسبت طول به قطر الیاف، جهت گیری الیاف و خواص ماتریس بتن بستگی دارد. در واقع با استفاده از الیاف کوتاه در بتن و بتن مسلح، یک پیوند سطحی قوی بین الیاف و ماتریس در جهت افزایش مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری ایجاد می‌شود [۹]. از آنجایی که دوام یک ویژگی مهم در سازه‌های بتنی است، بررسی بیشتر اثر الیاف فولادی بر روی دوام سازه‌های بتنی ضروری است. بنابراین در این تحقیق نمونه‌های بتن با سه دوز مختلف الیاف (۱، ۱.۵ و ۲ درصد حجمی الیاف فولادی) تهیه و در ۳ محیط سولفات منیزیم، سولفات سدیم و کلرید سدیم به مدت ۶ و ۱۲ ماه مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، تأثیر زمان‌های مختلف مواجهه با محیط‌های خورنده و انواع محیط‌های خورنده بر تغییر خواص مکانیکی بتن الیافی فولادی مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت الکتریکی، نفوذ آب و نفوذ سریع کلرید مورد

بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داده شد.

۲- مشخصات مصالح و روش‌های مورد استفاده در تحقیق

۱-۲- مشخصات مصالح سنگی و الیاف فولادی  
در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع II بر اساس ASTM C150 (ASTM 2016a) با وزن مخصوص ۳/۱۹ و نرمی ۳۵۰۰ سانتی متر مربع بر گرم استفاده شد. در جدول ۱، آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مربوط به ترکیب شیمیایی سیمان و خواص فیزیکی سیمان نشان داده شده است. طبق استاندارد ASTM A820 از الیاف فولادی انتهایی قلاب شده تجاری در نمونه‌ها استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان

۲۱،۵۲	سیلیکا (SiO <sub>2</sub> )	
۳،۶۹	آلومینا (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
۲،۷۵	اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
۶۱،۵۱	اکسید کلسیم (CaO)	ترکیب
۴،۷	اکسید منیزیم (MgO)	شیمیایی
۰،۱۵	اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O)	(%)
۰،۶۹	اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O)	
۲،۳۹	اکسید گوگرد (SO <sub>3</sub> )	
۱،۴۴	Loss on ignition (LOI)	
۶۰،۱۲	C <sub>3</sub> S	اجزای
۱۹،۸۷	C <sub>2</sub> S	تشکیل
۳،۴۵	C <sub>3</sub> A	دهنده (%)
۶،۳۷	C <sub>4</sub> AF	
۱۸،۵۲	متوسط اندازه ذرات d50 (µm)	مشخصات
۳،۱۹	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	فیزیکی
۳۵۰۰	مساحت سطح Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	

نمونه‌های بتن حاوی ۱، ۱.۵ و ۲٪ الیاف فولادی تهیه شد و در محیط‌های سولفات منیزیم (MgSO<sub>4</sub>)، سولفات سدیم (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) و کلرید سدیم (NaCl) به مدت ۶ و ۱۲ ماه نگهداری شد. جدول ۲ جزئیات نمونه‌های بتن برای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد، و مشخصات فیزیکی الیاف فولادی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲- جزئیات نمونه‌های بتن

مخلوط سیمان و الیاف	سیمان	نسبت آب به سیمان	آب	ماسه (mm)	شن (mm)	درصد حجمی الیاف
بتن با عیار ۴۰۰ و ۱٪ الیاف	۴۰۰	۰٫۵	۲۰۰	۰-۶	۸-۱۵	۱
بتن با عیار ۴۰۰ و ۱٫۵٪ الیاف	۴۰۰	۰٫۵	۲۰۰	۰-۶	۸-۱۵	۱٫۵
بتن با عیار ۴۰۰ و ۲٪ الیاف	۴۰۰	۰٫۵	۲۰۰	۰-۶	۸-۱۵	۲

جدول ۳- مشخصات فیزیکی الیاف فولادی

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	دانسیته (Kg/m <sup>3</sup> )	نسبت طول به قطر	مقاومت کششی الیاف (M Pa)	مدول یانگ (G Pa)	شکل هندسی
فولاد	۳۵	۰٫۸	۸۰۰۰	۴۳٫۷۵	۸۰۰	۲۰۰	قلاب انتهایی

هدف اصلی این مقاله تعیین اثر یون کلرید و سولفات بر بتن حاوی الیاف فولادی می‌باشد و به این منظور مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، مقاومت در برابر نفوذ آب، نفوذ سریع کلرید و سولفات، مقاومت خمشی و مهاجرت سریع کلرید در بتن با الیاف فولادی اندازه‌گیری شد.

۲-۲- نسبت‌های اختلاط طرح اختلاط بتن نمونه‌های مرجع در جدول ۴ (در هر متر مکعب بتن) آورده شده است. مخلوط مرجع بتن معمولی بدون الیاف فولادی است. نسبت آب به سیمان مساوی ۰٫۵ می‌باشد.

جدول ۴- نسبت مخلوط بتن در نمونه‌های مرجع

نمونه مخلوط	شن	ماسه	سیمان	آب	فوق روان کننده	الیاف
نمونه مرجع	۷۲۰	۱۰۸۰	۴۰۰	۲۰۰	۲	-
۱ درصد حجمی الیاف	۷۲۰	۱۰۸۰	۴۰۰	۲۰۰	۲	۷۸
۱٫۵ درصد حجمی الیاف	۷۲۰	۱۰۸۰	۴۰۰	۲۰۰	۲	۱۱۷
۲ درصد حجمی الیاف	۷۲۰	۱۰۸۰	۴۰۰	۲۰۰	۲	۱۵۶

### ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و محلول نمک‌ها

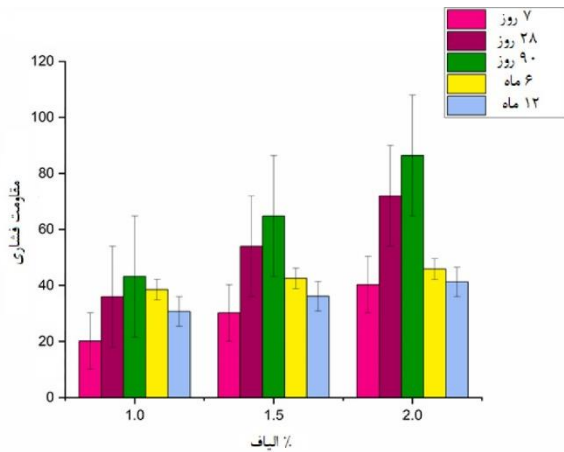
برای اختلاط مواد از میکسر آزمایشگاهی استفاده شد. ابتدا شن و ماسه را به میکسر اضافه کرده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط کرده، سپس سیمان، آب و فوق روان کننده را اضافه کرده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط کرده و در نهایت الیاف فولادی مخلوط شد. پس از اختلاط کامل، تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و سپس به مدت ۲۸ روز در آب پخت قرار گرفتند. برای مقاومت فشاری یک نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شد، برای مقاومت خمشی نمونه با عرض ۷۵ میلی‌متر، عمق ۷۵ میلی‌متر و طول ۲۸۰ میلی‌متر بود. یک نمونه مکعب با اندازه ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر برای مقاومت الکتریکی ساخته شد. برای آزمایش مهاجرت سریع کلرید یک نمونه استوانه‌ای با اندازه ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر تهیه شد. یک نمونه مکعب با اندازه ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر برای مقاومت در برابر نفوذ آب و مهاجرت سریع کلرید، محلولی حاوی ۲٪ کلرید سدیم و ۵٪ سولفات منیزیم و ۲٪ کلرید سدیم و ۵٪ سولفات سدیم تهیه شد. برای تست مقاومت خمشی محلولی حاوی ۳٪ کلرید سدیم و ۵٪ سولفات منیزیم و ۳٪ کلرید سدیم و ۵٪ سولفات سدیم تهیه شد. در تمامی آزمایشات، نمونه‌ها به مدت ۶ ماه و ۱۲ ماه در محیط‌های حاوی نمک قرار گرفتند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰mm<sup>3</sup> بر اساس استاندارد ASTM C39 به مدت ۶ و ۱۲ ماه تعیین شد. تمامی

ماتریس باشد. اما پس از رسیدن به درجه خاصی از خوردگی (پس از ۶ ماه)، خواص مکانیکی کاهش می یابد. در واقع آسیب فولاد در الیاف در اثر خوردگی در این مرحله باعث بدتر شدن خواص مکانیکی می شود.



شکل ۲- مقاومت فشاری در محلول سولفات منیزیم و کلرید سدیم

### ۳-۲- مقاومت الکتریکی

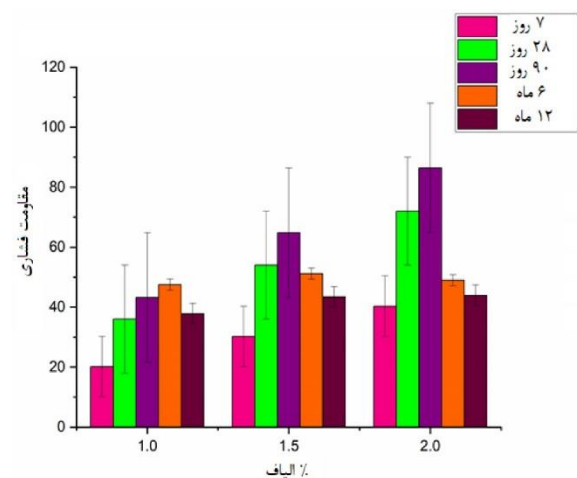
مطالعات نشان داده است که رابطه قوی بین مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن وجود دارد [۱۱]. در این روش غیر مخرب مقاومت الکتریکی نمونه‌های مرجع و نمونه‌هایی که به مدت ۶ و ۱۲ ماه در محلول سولفات سدیم - کلرید سدیم و سولفات منیزیم - کلرید سدیم نگهداری شدند اندازه‌گیری شد. مکعب اشباع (۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی متر مکعب) در هر آزمایش به مدت ۶ و ۱۲ ماه برای مقایسه با نمونه‌های اشباع مرجع استفاده شد. این آزمایش به روش حجمی انجام شد. فاصله آرایه پروب ۱۵۰ میلی متر بود. مقاومت الکتریکی بتن، تحرک یون‌هایی مانند کلرید و سولفات را در محلول pore نشان می دهد. بنابراین، ارتباط بین مقاومت الکتریکی و نفوذ یون در بتن منطقی است. شکل ۳ و ۴ نشان می دهد که خوردگی الیاف فولادی نقش بسزایی در هدایت بتن دارد. سرعت خوردگی از طریق اثر تحرک یون‌ها بین مناطق کاتدی و آنودی است.

بنابراین، برای نمونه های مرجع با افزایش مقدار فیبر، رسانایی نیز افزایش می یابد و هنگامی که رسانایی افزایش می یابد، مقاومت الکتریکی کاهش می یابد. پس از غوطه ور شدن در محیط‌های تهاجمی، مقاومت الکتریکی بالاتری به دلیل تبادل یونی بین محلول‌ها و نمونه‌های بتن به دست آمد.

نمونه‌ها تا روز آزمایش در محلولی حاوی یون‌های کلرید و سولفات و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

آزمایش مقاومت فشاری روشی ساده برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی بتن است. مکانیسم تخریب بتن در حضور همزمان یون‌های کلرید و سولفات به شرح زیر است: ۱- وجود سولفات به همراه کلرید باعث کاهش اتصال و انتشار کلرید در ملات سیمان و کاهش تشکیل نمک فریدل می شود. ۲- وجود کلرید نیز به نوبه خود حمله سولفات به ملات سیمان را کاهش داده و مقادیر بسیار کمتری از محصولات خورنده مانند اترینگیت و گچ تشکیل می‌شود. هنگامی که دو یون  $(SO_4^{2-}, Cl^-)$  در محیط وجود داشتند، اتصال یون سولفات نسبت به یون کلرید توسط فاز هیدراته در لایه رسوب ترجیح داده شد [۱۰].

با توجه به شکل ۱ و ۲، در شرایط عادی، مقاومت فشاری بتن تا ۹۰ روز (زمان پخت) افزایش یافت، سپس نمونه‌ها به مدت ۶ و ۱۲ ماه، در مخلوطی از سولفات سدیم - کلرید سدیم و در مخلوطی از محلول های سولفات منیزیم - کلرید سدیم غوطه ور شدند که منجر به کاهش مقاومت فشاری شد.



شکل ۱- مقاومت فشاری در محلول سولفات سدیم و کلرید سدیم

نتایج نشان داد که کاهش معنی دار مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی ۲ درصد الیاف در مواجهه با سولفات سدیم - کلرید سدیم و سولفات منیزیم - کلرید سدیم مشاهده می‌شود. پس از ۱۲ ماه، نتایج مشابهی برای نمونه‌ها مشاهده شد. در واقع، در مراحل اولیه خوردگی، خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به طور کلی بهبود می یابد (از ۹۰ روز تا ۶ ماه) که می تواند به دلیل پیامد انبساط الیاف فولادی در اثر خوردگی و در نتیجه لنگر انداختن بهتر آنها در

الیاف فولادی در معرض کلریدها را می توان به دو مرحله تقسیم کرد: الف) انتشار، در این مرحله انتقال کلرید به بتن برای رسیدن به میله های فولادی و ب) شروع، زمانی که غلظت کلرید از مقدار آستانه فراتر رفت و شروع به خوردگی فولاد کرد [۱۲].

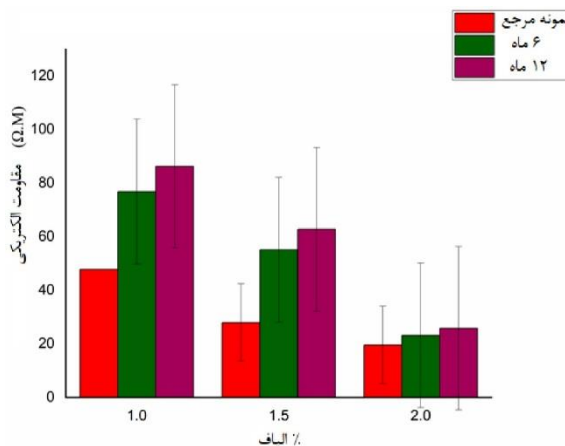
### ۳-۴- مقاومت خمشی

نمونه های تیر تحت آزمایش های خمشی، طبق دستورالعمل های استاندارد ASTM C-293 برای بتن الیافی فولادی (SFRC) قرار گرفتند. بر اساس مشخصات این روش استاندارد، سرعت بارگذاری برای PC ۱۳۰ نیوتن بر ثانیه بود و در طول آزمایش برای همه نمونه ها ثابت ماند. سرعت متوسط برای SFRC تعیین شده بر حسب جابجایی برابر با ۱ میلی متر در دقیقه بود که با محدوده سرعت نرخ بارگذاری پیشنهادی در ASTM C-293 مطابقت دارد. بارگذاری آزمایش یک نقطه واحد است که همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است به آرامی و بدون ضربه وارد قسمت میانی تیرها می شود. تعداد نمونه های قرار داده شده در هر محلول ۵ عدد بود.

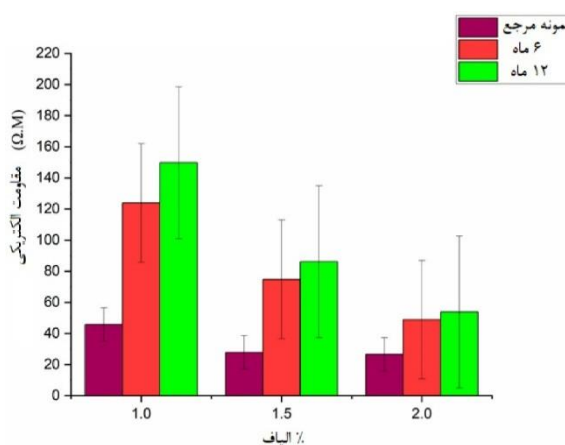


شکل ۵- تست مقاومت خمشی تک نقطه ای

این مطالعه در دو محیط خورنده (سولفات سدیم- کلرید سدیم و سولفات منیزیم- کلرید سدیم) در شرایط عادی انجام شد (شکل ۶ و ۷). این ارقام نشان می دهد که افزایش محتوای الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی می شود، در حالی که مقاومت خمشی تیرهای بتنی در محلول های سولفات سدیم- کلرید سدیم و سولفات منیزیم- کلرید سدیم بعد از ۶ و ۱۲ ماه به دلیل تشکیل اترینگیت در بتن به دلیل یون های سولفات کاهش یافته است. اترینگیت باعث افزایش حجم بتن و ایجاد ترک هایی در سطح بتن



شکل ۳- مقاومت الکتریکی در محلول سولفات سدیم و کلرید سدیم



شکل ۴- مقاومت الکتریکی در محلول سولفات منیزیم و کلرید سدیم

### ۳-۳- نفوذ سولفات سدیم، سولفات منیزیم و کلرید سدیم

نمونه های بتن مسلح با الیاف فولادی با ابعاد ۷,۵×۷,۵×۲۸ سانتی متر مکعب تهیه شد. سپس یک میلگرد در نمونه های تیر بتنی قرار گرفت و خوردگی میلگرد به عنوان خوردگی الیاف فولادی در نظر گرفته شد. برای تسریع سرعت خوردگی نمونه ها، جریان الکتریکی با ولتاژ ۱۲ ولت نیز در محیط های سولفات سدیم، سولفات منیزیم و کلرید سدیم اعمال شد. نمونه ها به مدت ۶ و ۱۲ ماه در محلول های فوق نگهداری شدند.

به دلیل قلیائیت بالای بتن، فولاد تعبیه شده در بتن غیرفعال می ماند. ورود و تجمع یون های کلرید به ماتریکسی که فولاد را در بر می گیرد، لایه غیرفعال را مختل می کند و باعث کاهش موضعی pH در سطح فولاد می شود و منجر به انحلال آهن می شود و باعث ایجاد خوردگی حفره ای می شود.

با توجه به مفهوم کلی خوردگی فولاد در بتن، زوال بتن مسلح با

یافته است. کاهش مقاومت خمشی در محیط‌های مختلف برای نمونه های حاوی الیاف فولادی ۱، ۱٫۵ و ۲ درصد در جدول ۵ نشان داده شده است.

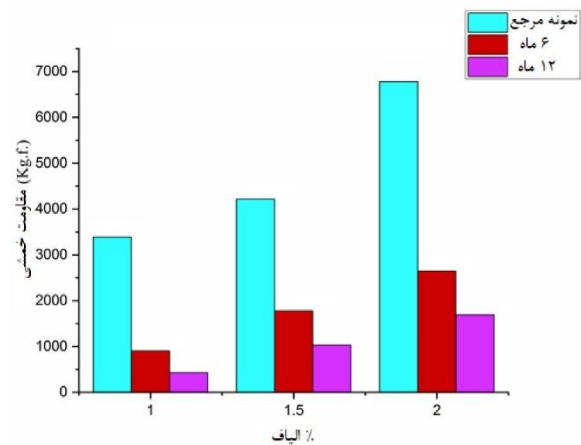
### ۳-۵- مقاومت در برابر نفوذ آب

آزمایش نفوذ آب به‌طور کلی برای تعیین نفوذپذیری بتن استفاده می‌شود. این تست توسط DIN1048-5 مشخص شده است. برای این منظور فشار آب ۰٫۵ مگاپاسکال به مدت ۷۲ ساعت بر روی سطح نمونه ۱۵۰ میلی متری مکعبی بتن اعمال شد. سپس نمونه ها خارج و به دو نیمه تقسیم شدند. در نهایت پروفیل نفوذ روی سطح بتن مشخص شد و حداکثر عمق نفوذ ثبت شد. درصد فیبر بالاتر به دلیل افزایش سطح انتقال منجر به نفوذ آب بیشتر شد (جدول ۶).

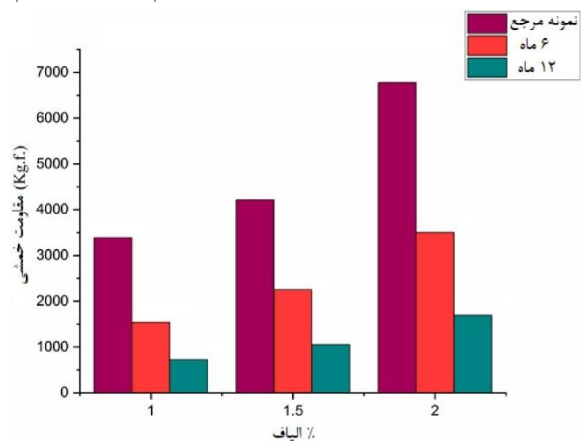
### ۳-۶- آزمایش مهاجرت سریع کلرید

آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCM)، استاندارد شده در Nord Test NT-Build 492، برای بررسی نفوذ کلرید به بتن استفاده شد. این روش یک آزمون مهاجرت غیر پایدار شناخته می‌شود. یک طرف نمونه در معرض محلول NaCl و طرف دیگر در معرض محلول NaOH 0.3N قرار گرفت. در دو طرف نمونه از الکترودهای صفحه فولادی ضد زنگ استفاده شد. یک ولتاژ DC برای وادار کردن یون‌های کلرید منفی به نمونه اعمال شد. پس از انجام آزمایش، نمونه ها شکافته شدند و با محلول  $AgNO_3$  0.01N اسپری شدند تا ورود کلرید به نمونه مشاهده شود. نتایج نهایی آزمایش RCM در شکل ۸ نشان داده شده است. مهاجرت یونهای کلرید از محلول سولفات منیزیم بیشتر از محلول سولفات سدیم بود. علاوه بر این، افزایش محتوای فیبر منجر به مهاجرت بیشتر کلرید شد (شکل ۹).

شد، همچنین نفوذ یون کلرید به داخل بتن افزایش یافت و اثر این نفوذ خوردگی الیاف فولادی در داخل بتن است.



شکل ۶- مقاومت خمشی در محلول سولفات سدیم و کلرید سدیم



شکل ۷- مقاومت خمشی در محلول سولفات منیزیم و کلرید سدیم

بنابراین، قرار گرفتن طولانی‌تر بتن در برابر محلول‌های نمکی باعث کاهش بیشتر مقاومت خمشی می‌شود. به عنوان مثال، استحکام خمشی نمونه مرجع با الیاف ۱٪  $3388,577$  (Kg.f) است، در حالی که نمونه‌هایی که در محلول سدیم سولفات-کلرید سدیم به مدت ۶ و ۱۲ ماه نگهداری می‌شوند به ترتیب ۷۳٪ و ۸۷٪ کاهش

جدول ۵- کاهش مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف در محیط‌های مختلف نمک

محلول سولفات منیزیم و کلرید سدیم			محلول سولفات سدیم و کلرید سدیم			محلول
۲	۱٫۵	۱	۲	۱٫۵	۱	درصد حجمی الیاف
۶۷۷۷,۱۵۴	۴۲۱۵,۱۳۵	۳۳۸۸,۵۷۷	۶۷۷۷,۱۵۴	۴۲۱۵,۱۳۵	۳۳۸۸,۵۷۷	مقاومت خمشی نمونه مرجع
% ۴۸	% ۴۷	% ۵۵	% ۶۱	% ۵۷	% ۷۳	کاهش مقاومت خمشی بعد از ۶ ماه
% ۷۵	% ۷۵	% ۷۸	% ۷۵	% ۷۵	% ۸۷	کاهش مقاومت خمشی بعد از ۱۲ ماه

جدول ۶- تست مقاومت در برابر نفوذ آب در محلول‌های مختلف نمک

متوسط عمق نفوذ در نمونه شاهد (mm)	عمق نفوذ در نمونه شاهد (mm)	متوسط عمق نفوذ در محلول سولفات سدیم و کلرید سدیم (mm)	عمق نفوذ در محلول سولفات سدیم و کلرید سدیم (mm)	متوسط عمق نفوذ در محلول سولفات منیزیم و کلرید سدیم (mm)	عمق نفوذ در محلول سولفات منیزیم و کلرید سدیم (mm)	درصد حجمی الیاف
۲,۱۶	۲,۲, ۲,۵	۶	۶, ۶, ۶	۶,۶۶	۶, ۷,۵, ۶,۵	۱%
۲,۶۶	۳, ۲,۵, ۲,۵	۴,۱۶	۴, ۴,۵, ۴	۵,۶۶	۵,۵, ۶, ۵,۵	۱,۵%
۲,۶۶	۲,۵, ۳,۵, ۲	۵,۱۶	۵, ۵,۵, ۵	۷,۶۶	۸, ۷,۵, ۷,۵	۲%

بتن مسلح با الیاف فولادی مشاهده نشد. با این حال، رنگ نارنجی روشن سطح نمونه به قهوه‌ای تیره تغییر کرد.

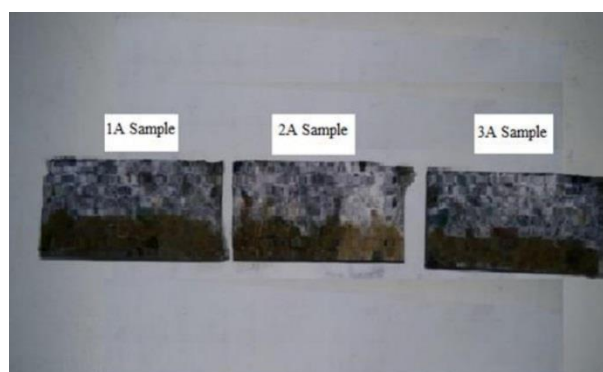
الیاف تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری ندارند. بیشترین کاهش مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی ۲ درصد الیاف فولادی در معرض محلول‌های مخلوط سولفات سدیم-کلرید سدیم و سولفات منیزیم-کلرید سدیم به مدت ۶ ماه مشاهده شد. نتایج مشابهی نیز پس از ۱۲ ماه مشاهده شد.

برای نمونه‌های مرجع با افزایش مقدار الیاف، رسانایی نیز افزایش می‌یابد و هنگامی که رسانایی افزایش می‌یابد، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. پس از غوطه‌ور شدن در محیط‌های تهاجمی، مقاومت الکتریکی بالاتری به دلیل تبادل یونی بین محلول‌ها و نمونه‌های بتن به دست آمد.

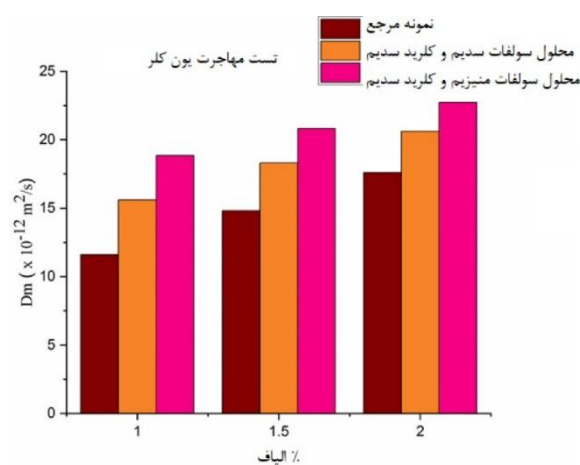
مقاومت خمشی تیرهای بتنی در محلول‌های سولفات سدیم-کلرید سدیم و سولفات منیزیم-کلرید سدیم بعد از ۶ و ۱۲ ماه به دلیل تشکیل اترینگیت در بتن به دلیل یون‌های سولفات کاهش یافت. اترینگیت باعث افزایش حجم بتن و ایجاد ترک‌هایی در سطح بتن شد، همچنین نفوذ یون کلرید به داخل بتن افزایش یافت و اثر این نفوذ خوردگی الیاف فولادی در داخل بتن است. بنابراین، قرار گرفتن طولانی‌تر بتن در برابر محلول‌های نمکی باعث کاهش بیشتر مقاومت خمشی می‌شود.

درصد الیاف بالاتر به دلیل افزایش سطح انتقال منجر به نفوذ بیشتر آب شد.

مهاجرت یون‌های کلرید از محلول سولفات منیزیم بیشتر از محلول سولفات سدیم بود. علاوه بر این، افزایش محتوای الیاف



شکل ۸- تست مهاجرت سریع کلر در نمونه‌های شکسته شده



شکل ۹- تست مهاجرت یون کلر

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر الیاف فولادی بر خواص بتن در محلول سولفات سدیم و سولفات منیزیم مخلوط با NaCl مورد بررسی قرار گرفت. نتایج می‌تواند به شکل ذیل خلاصه شود:

در طول دوره آزمایش هیچ‌گونه ترک خوردگی بر روی سطح

[11] P. Azarsa and R. Gupta "Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, 2017.

[12] C. G. Berrocal, K. Lundgren, and I. Löfgren, "Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: state of the art," *Cement and Concrete Research*, vol. 80, pp. 69-85, 2016.

منجر به مهاجرت بیشتر کلرید شد.

#### ۵- مراجع

[1] A. H. Algburi, M. N. Sheikh, and M. N. Hadi, "Mechanical properties of steel, glass, and hybrid fiber reinforced reactive powder concrete," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 998-1006, 2019.

[2] R. Balendran, F. Zhou, A. Nadeem, and A. Leung, "Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete," *Building and environment*, vol. 37, no. 12, pp. 1361-1367, 2002.

[3] M. Hoseini, V. Bindiganavile, and N. Banthia, "The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 4, pp. 213-220, 2009.

[4] S. H. Park, G. S. Ryu, K. T. Koh, and D. J. Kim, "Effect of shrinkage reducing agent on pullout resistance of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 49, pp. 59-69, 2014.

[5] V. M. Cunha, J. A. Barros, and J. Sena-Cruz, "An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 1, pp. 64-76, 2011.

[6] A. Abrishambaf, J. A. Barros, and V. M. Cunha, "Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels," *Cement and Concrete Research*, vol. 51, pp. 57-66, 2013.

[7] H. B. Poorsaheli, A. Behravan, and S. T. T. Aghda, "Durability performance of hybrid reinforced concretes (steel fiber+ polyolefin fiber) in a harsh marine tidal zone of Persian Gulf," *Construction and Building Materials*, vol. 266, p. 121176, 2021.

[8] V. Marcos-Meson, G. Fischer, C. Edvardsen, T. L. Skovhus, and A. Michel, "Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack—A literature review," *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 490-501, 2019.

[9] O. Dügenci, T. Haktanir, and F. Altun, "Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 82-88, 2015.

[10] H. Sun et al., "Degradation mechanism of cement mortar exposed to combined sulfate–chloride attack under cyclic wetting–drying condition," *Materials and Structures*, vol. 54, no. 4, pp. 1-17, 2021.



## Investigating the durability of steel fiber reinforced concrete composite in sulfate and chloride environments

Mohammadhosain Rezaei

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin.

Ali Delnavaz \*

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin.

Mohammad Delnavaz

Department of Civil Engineering, Kharazmi University.

### Abstract

Concrete is an unprecedented porous and highly heterogeneous composite material. The durability of reinforced concrete with steel fibers in chloride and sulfate environments is of interest for engineers, infrastructure owners, maintainers, and researchers. Steel fibers and concrete matrices are bonded together through a weak bond, and the properties of this composite are largely due to the surface bonding of the fibers and the concrete matrix. Less permeability maintains the durability of the structure in contact with harmful substances such as chloride ions, sulfate ions and acids because it cannot easily penetrate. In this paper, three types of steel fiber reinforced concrete (1, 1.5 and 2% steel fiber) were prepared and used in 3 environments, i.e. magnesium sulfate, sodium sulfate, and sodium chloride, for 6 and 12 months. Compressive strength, flexural strength, electrical resistance, water penetration, and rapid penetration of chloride were also examined. According to the results, the sample containing 2% steel fiber when exposed to acids showed more mechanical performance deterioration compared to the two other samples, i.e. 1% and 1.5% steel fiber.

**Keywords:** Reinforced concrete, Steel fiber, Sulfate and Chloride environment, Durability, Corrosion.

---

\* Corresponding Author: a.delnavaz@qiau.ac.ir

