

## بررسی اثر استفاده از الیاف پلی وینیل الکل بر مشخصات مکانیکی بتن

مهدی اسفندی سرافراز \*

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

محمد سجاد مسعودی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

ایوب کریمی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

### چکیده

در چند سال اخیر استفاده از بتن‌های مسلح شده با الیاف رشد زیادی داشته است. بهبود خصوصیات مکانیکی، افزایش میزان جذب انرژی، افزایش مقاومت کششی و خمشی و مقاومت در برابر ضربه بخشی از تأثیر الیاف بر بتن است. الیاف به دلیل خاصیت پل زدن بر روی ریز ترکها، باعث بهبود رفتار بتن بعد از ایجاد اولین ترک می‌شوند. الیاف پلی وینیل الکل (Polyvinyl alcohol fiber) به علت مقاومت کششی و مدول الاستیسیته زیاد و عدم آلاینده‌گی محیط زیست یکی از بهترین انواع الیاف برای تسلیح بتن می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تأثیر الیاف پلی وینیل الکل (PVA) بر مشخصات مکانیکی بتن پرداخته می‌شود. به این منظور پنج مخلوط با مقادیر مختلف PVA (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد حجم بتن) با طول ۱۲ میلی‌متر تهیه و آزمایش شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها، جهت ارزیابی تأثیر درصد حجمی الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن بررسی گردید. این نتایج نشان داد که با افزایش درصد الیاف PVA مقاومت خمشی، مقاومت کششی و میزان جذب انرژی بتن افزایش یافته اما در صورت استفاده از الیاف بیشتر از ۰/۵ درصد حجم بتن، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از درصد بهینه الیاف معادل ۰/۵ درصد حجمی بتن، باعث بهبود مقاومت فشاری به میزان ۱۵ درصد و مقاومت خمشی و کششی به میزان ۲۵ درصد می‌گردد. لذا با توجه به عملکرد مناسب بتن‌های حاوی الیاف PVA در فشار، کشش و خمش می‌توان از این روش در افزایش شکل پذیری و جذب انرژی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، پلی وینیل الکل، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی.

## ۱- مقدمه

محیط زیست به طور کامل تجزیه شده و فاقد آلودگی می باشد [۴]. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا و دوام خوب از دیگر خصوصیات این ماده است که کمتر در دیگر الیاف از قبیل الیاف پلی پروپیلن<sup>۴</sup>، نایلون<sup>۵</sup> و پلی اتیلن<sup>۶</sup> مشاهده می شود [۵-۶]. همچنین PVA در محیط سیمانی با PH زیاد از دوام خوبی برخوردار است. سطح آب دوست<sup>۷</sup> این الیاف با مصالح سیمانی پیوند شیمیایی برقرار کرده، لذا الیاف PVA که معمولاً سخت تر از خمیر سیمان است پیوند محکمی با خمیر سیمان برقرار می کند [۷].

در چند سال گذشته استفاده از این ماده در ساخت کامپوزیت های سیمانی مهندسی<sup>۸</sup> (ECC) رشد چشمگیری داشته است [۷-۱۲]. کامپوزیت های سیمانی مهندسی (ECC) نسل جدید بتن بوده که عموماً از ترکیب سیمان، مصالح سنگی ریز دانه، آب، افزودنی های کاهنده آب، الیاف و خاکستر بادی<sup>۹</sup> ساخته شده و بر خلاف بتن های معمولی مقاومت کششی و شکل پذیری آنها بسیار زیاد است، به گونه ای که کرنش نهایی کششی آنها چند صد برابر کرنش نهایی کششی بتن های معمولی و در حدود ۳ تا ۷ درصد می باشد [۷]. کامپوزیت ECC بر خلاف بتن معمولی فاقد مصالح درشت دانه می باشد. در این ترکیب امکان استفاده از دوده سیلیس<sup>۱۰</sup> نیز همراه یا بجای خاکستر بادی بصورت جایگزین با بخشی از سیمان مورد استفاده در مخلوط وجود دارد. عملکرد خوب این کامپوزیت ها ناشی از پیوستگی بین الیاف و ملات است. مقاومت کششی و خمشی کامپوزیت ECC با نوع و مقدار الیاف مورد استفاده، مقاومت سنگدانه و مشخصات خمیر سیمان ارتباط مستقیم دارد. خرابی ECC ناشی از اندرکنش بین الیاف و ماتریس سیمانی بوده و عموماً بعلافت لغزش الیاف از داخل خمیر سیمان رخ می دهد [۱۱]. لی<sup>۱۱</sup> با مطالعه ریز ساختار کامپوزیت ECC ساخته شده با الیاف PVA نشان داد که چگونه الیاف PVA باعث افزایش شکل پذیری بتن ECC می گردد [۱۲]. کونگ<sup>۱۲</sup> و همکاران به بررسی کامپوزیت ECC خودتراکم ساخته شده با الیاف PVA پرداخته و فرمولاسیون طرح اختلاط بهینه آن را ارائه نمودند [۱۳]. سهاماران<sup>۱۳</sup> نشان داد که

بتن ماده ای ترد با مقاومت فشاری زیاد و مقاومت کششی ناچیز است. رفتار بتن در فشار به گونه ای است که فاقد ظرفیت تحمل کرنش زیاد پس از رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر می باشد. این ویژگی بتن باعث می شود که پس از رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر، بتن بصورت ترد دچار خرابی گردد [۱]. شرایط نگهداری نامناسب و بارگذاری بیش از ظرفیت باعث ایجاد ریز ترک در بتن شده و به هم پیوستن این ریز ترکها در نهایت باعث خرابی و انهدام بتن می گردد. یکی از بهترین روشها برای بهبود رفتار پس از مقاومت حداکثر و ایجاد شکل پذیری مناسب در بتن، افزودن الیاف به آن است. هدف اصلی استفاده از الیاف در بتن کنترل گسترش ترک است، به گونه ای که مقطع پس از تشکیل اولین ترکها توانایی تحمل تغییر شکل و نیروی بیشتری را داشته باشد. الیافی که بصورت تصادفی درون مخلوط بتن توزیع می شود در عرض ترکها پل زده، گسترش آنها را کنترل کرده و از بهم پیوستن آنها جلوگیری می نماید. در این حالت الگوی تشکیل و رشد ترک عامل گسیختگی، از یک ترک بزرگ به تعدادی ترک ریز تغییر می کند. پل زدن الیاف روی ریز ترکها و جلوگیری از تشکیل ترکهای بزرگ، باعث افزایش شکل پذیری و توانایی جذب انرژی بتن می شود [۱]. اولین مطالعات در خصوص استفاده از الیاف در بهبود رفتار بتن در دهه ۱۹۶۰ میلادی انجام گرفت که این تحقیقات منجر به معرفی بتن الیافی<sup>۱</sup> (FRC) شد [۲]. به این منظور محققان از الیاف مختلفی از قبیل الیاف طبیعی، الیاف شیشه، الیاف فولادی و الیاف مصنوعی دارای کربن<sup>۲</sup> (SNFRC) استفاده نمودند [۳]. در میان الیاف مصنوعی دارای کربن (SNFRC)، الیاف پلی وینیل الکل<sup>۳</sup> (PVA) یکی از بهترین مصالح در بهبود رفتار بتن می باشد. پلی وینیل الکل یک پلیمر سنتزی با خواص عالی به شمار می آید که در صنایع مختلف از قبیل نساجی، پزشکی و محصولات غذایی مورد استفاده قرار می گیرد. این محصول در حالت خشک پایدار، بدون بو، غیر سمی و دوستدار محیط زیست بوده و در زمان کوتاهی در

<sup>8</sup> Engineered cementitious composites

<sup>9</sup> Fly ash

<sup>10</sup> Silica fume

<sup>11</sup> Li

<sup>12</sup> Kong

<sup>13</sup> Şahmaran

<sup>1</sup> Fiber-reinforced concrete

<sup>2</sup> Synthetic fibers including carbon fibers

<sup>3</sup> Polyvinyl alcohol fiber

<sup>4</sup> Polypropylene fiber

<sup>5</sup> Nylon fiber

<sup>6</sup> Polyethylene fiber

<sup>7</sup> Hydrophilic

بررسی رفتار کامپوزیت ECC ساخته شده با الیاف PVA متمرکز بوده و مطالعات خاصی در خصوص تأثیر الیاف PVA بر بتن معمولی انجام نگرفته است. همانطور که اشاره شد کامپوزیت ECC بر خلاف بتن معمولی فاقد مصالح درشت دانه بوده و در ساخت آن از خاکستر بادی استفاده می‌شود، به گونه‌ای که مصالح و فرآیند تهیه آنها با بتن معمولی متفاوت می‌باشد. در بسیاری از سازه‌های بتنی با کاربری‌های ویژه که تحت تأثیر بارهای ضربه‌ای یا انفجاری هستند نیاز به بتن با قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری زیاد وجود دارد، اما به دلایل مختلف از قبیل کمبود و هزینه بالای تهیه خاکستر بادی و دوده سیلیس مورد نیاز، امکان بکارگیری و استفاده از بتن‌های توانمند با عملکرد بالا وجود ندارد. بنظر می‌رسد در این شرایط می‌توان با اضافه کردن الیاف به بتن معمولی تا حدودی به شرایط مد نظر دست یافت. لذا در این تحقیق به بررسی تأثیر الیاف PVA بر بتن معمولی (بتن دارای درشت‌دانه و فاقد خاکستر بادی و دوده سیلیس) پرداخته می‌شود. به این منظور پنج طرح اختلاط شامل یک نمونه شاهد و چهار ترکیب با درصد‌های متفاوت الیاف PVA ساخته شده و مشخصات مکانیکی آنها از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، میزان جذب انرژی و منحنی تنش- کرنش آنها با هم مقایسه می‌گردد. در انتها درصد بهینه الیاف مصرفی به گونه‌ای تعیین می‌گردد که مشخصات مکانیکی بتن بهبود یابد.

## ۲- برنامه آزمایش‌ها

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM C33 انتخاب شدند [۲۱]. ماسه مورد استفاده از نوع شکسته با چگالی  $2/51 \text{ gr/cm}^3$  و میزان جذب آب  $3/9$  درصد و شن نیز از نوع شکسته با چگالی  $2/58 \text{ gr/cm}^3$  و میزان جذب آب  $1/5$  درصد می‌باشد. مشخصات دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع دو استفاده شده که ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج تحقیقات گذشته جهت اطمینان خاطر از انتقال

کامپوزیت ECC ساخته شده با الیاف PVA در محیط قلیایی کاملاً با دوام می‌باشد [۱۴-۱۵]. با افزایش بیش از حد حجم الیاف، با وجود اینکه به علت خاصیت پل زدن الیاف بر روی ترک مشخصات ترک بسیار بهبود می‌یابد، اما کارایی کامپوزیت ECC کاهش یافته و حجم هوای داخل مخلوط زیاد می‌شود. افزایش حجم هوای محبوس در بتن باعث کاهش مقاومت، دوام و عمر بهره‌برداری بتن حاوی الیاف می‌گردد [۱۶]. جهت رفع این مشکل در ساخت ECC از فوق روان کننده استفاده می‌شود [۸].

ونگ<sup>۱</sup> و همکاران به بررسی مشخصات مکانیکی کامپوزیت ECC ساخته شده با الیاف PVA پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که مقاومت کششی، خمشی و فشاری این کامپوزیت به ترتیب بیشتر از ۵، ۱۵ و ۷۰ مگاپاسکال بوده و همچنین سرعت کسب مقاومت اولیه آن بالا می‌باشد [۱۷]. نوشینی<sup>۲</sup> و همکاران به بررسی مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده با الیاف PVA پرداختند. الیاف PVA مورد استفاده دارای قطر ۱۶ میکرون و طول ۶ و ۱۲ میلیمتر بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در صورت استفاده از ۰/۲۵ درصد حجمی الیاف PVA، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط حدود ۱۲ درصد رشد می‌کند [۱۸]. همچنین در مخلوط‌های حاوی الیاف با طول کمتر، افزایش بیشتری در مقاومت فشاری مخلوط مشاهده گردید [۱۸]. علت این موضوع مشکل بودن تراکم در مخلوط‌های با الیاف طولی تر می‌باشد.

تأثیر قطر و طول الیاف PVA بر مقاومت خمشی و بازشدگی دهانه ترک توسط احمد<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط‌های حاوی الیاف PVA نازکتر، مقاومت خمشی بیشتری از خود نشان می‌دهند، زیرا عموماً الیاف نازک‌تر از مقاومت و مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به الیاف ضخیم‌تر برخوردار هستند. همچنین در مخلوط‌های حاوی الیاف نازک‌تر، به علت افزایش سطح تماس بین الیاف و بتن نیروی منتقل شده به الیاف بیشتر است [۱۹]. هاموش<sup>۴</sup> به بررسی میزان جابجائی تیرهای بتنی مسلح شده با الیاف PVA پرداخت. نتایج آزمایش خمشی نشان دهنده افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌های دارای الیاف PVA بود [۲۰]. اگر چه پژوهش‌های زیادی در زمینه استفاده از الیاف PVA انجام شده است، اما اکثر تحقیقات گذشته روی

<sup>3</sup> Ahmed

<sup>4</sup> Hamoush

<sup>1</sup> Wang

<sup>2</sup> Noushini

مناسب تر نیرو از بتن به الیاف [۱۹]، از الیاف PVA به طول ۱۲ میلیمتر و قطر ۱۶ میکرون استفاده گردید که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۳ نشان داده شده است. آب مورد استفاده در طرح اختلاط از نوع آب قابل شرب می باشد. جهت کاهش میزان آب مصرفی، کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش کارایی مخلوط‌های ساخته شده، در طرح اختلاط از فوق روان کننده پایه کربوکسیلاتی فاقد یون کلر استفاده شده است. این فوق روان کننده بصورت مایع و با چگالی  $1/1 \text{ gr/cm}^3$  می باشد.

جدول ۱- مقایسه دانه بندی استاندارد ASTM C33 و دانه بندی سنگدانه‌های مصرفی

حداکثر اندازه سنگدانه (mm)		۰/۱۵	۰/۳	۰/۶	۱/۱۸	۲/۳۶	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵
محدوده درصد عبوری مجاز درشت دانه بر اساس ASTM C33	۱۰۰	-	۰-۵	-	۰-۱۰	۵-۳۰	۲۰-۵۵	۹۰-۱۰۰	۱۰۰
درصد عبوری درشت دانه مصرفی	۱۰۰	-	۰	-	۴	۱۲	۳۷	۹۲	۱۰۰
محدوده درصد عبوری مجاز ریزدانه بر اساس ASTM C33	-	۰-۱۰	۵-۳۰	۲۵-۶۰	۵۰-۸۵	۸۰-۱۰۰	۹۵-۱۰۰	۱۰۰	-
درصد عبوری ریز دانه مصرفی	-	۳	۱۳	۳۶	۶۴	۸۶	۹۶	۱۰۰	-

نسبت حجمی مختلف (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد) الیاف PVA ساخته شد. این نسبت حجمی بر اساس تعدادی نمونه پیش ساخته و بصورت آزمون و خطا تعیین شد. بر اساس بررسی آزمون‌های اولیه، استفاده از نسبت حجمی الیاف PVA بیشتر از ۱ درصد، باعث کاهش شدید کارایی بتن و گلوله‌ای شدن<sup>۱</sup> آن گردید. در این حالت الیاف تمایل به متمرکز شدن در یک نقطه داشته و امکان مخلوط کردن آن وجود نداشت. لذا حداکثر الیاف مورد استفاده در این تحقیق ۱ درصد انتخاب گردید. بمنظور بررسی تأثیر الیاف PVA بر خواص مکانیکی بتن، سایر مشخصه‌ها در طرح اختلاط ثابت نگه داشته شد. مقدار سیمان مصرفی و نسبت آب به سیمان در کلیه مخلوط‌ها پس از آزمون و خطا بصورت ثابت برابر با  $450 \text{ Kg/m}^3$  و  $0/45$  در نظر گرفته شد.

از آنجا که انتظار می‌رفت با افزودن الیاف PVA کارایی بتن کاهش یابد و بررسی پیش نمونه‌های ساخته شده نیز این موضوع را تأیید نمود، در طرح اختلاط از فوق روان کننده استفاده گردید. میزان فوق روان کننده مصرفی بگونه‌ای با فرآیند آزمون و خطا تعیین شد که اسلامپ آزمون‌ها همیشه در محدوده  $70 \pm 20$  میلیمتر قرار گیرد. مقادیر و نسبت اجزای سازنده مخلوط‌های مورد بررسی در پژوهش، در جدول ۴ ارائه شده است. در شکل ۱ نمونه‌ای از الیاف مورد استفاده مشاهده می‌شود.

به منظور تسهیل در شناسایی، هر یک از آزمون‌های دارای الیاف PVA بصورت منحصر بفرد با استفاده از یک نام شامل دو بخش معرفی شده است. بخش اول شامل عبارت PVA بوده و بخش

جدول ۲- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان

ترکیب شیمیایی	(%)
SiO <sub>2</sub>	۲۰/۶۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۲۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۳۲
CaO	۶۲/۷۵
MgO	۱/۷۶
SO <sub>3</sub>	۲/۲۶
Na <sub>2</sub> O	۰/۵۱
K <sub>2</sub> O	۰/۶۵
Others	۲/۸۵
مشخصات فیزیکی	
سطح ویژه (cm <sup>2</sup> /gr)	۲۹۳۰
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۳/۱

جدول ۳- مشخصات الیاف پلی وینیل الکل

طول	قطر	چگالی	مقاومت کششی	مدول الاستیسیته	کرنش نهایی
(mm)	(mm)	gr/cm <sup>3</sup>	MPa	(GPa)	(%)
۱۲	۰/۰۱۶	۱/۳	۱۶۰۰	۳۸	۷

## ۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط بر مبنای مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۳۰ مگاپاسکال بوده و بر اساس روش وزنی معرفی شده در استاندارد ACI 211.1 می باشد [۲۲]. در مجموع پنج آزمون بتنی شامل یک آزمون بدون الیاف PVA (آزمون شاهد) و چهار آزمون با

<sup>1</sup> Balling

شده و به مدت ۳۰ ثانیه دیگر با هم مخلوط شدند. در ادامه سیمان مورد نیاز به همراه باقیمانده آب و مقداری فوق روان کننده در دو مرحله به مخلوط کن اضافه شده و کاملاً با هم مخلوط شدند. در انتهای کار الیاف PVA پس از مجزا کردن با دست، به آرامی و بصورت تدریجی به ترکیب بتن در حال مخلوط شدن اضافه گردید. سریع اضافه کردن الیاف باعث می شود که الیاف به سمت هوا منتشر شود. بعد از اتمام اضافه کردن الیاف به بتن، مخلوط کن حدود سه دقیقه با سرعت کم مشغول ترکیب مصالح شده و در این حین جهت رسیدن به کارایی مناسب فوق روان کننده به میزان لازم به مخلوط اضافه شد.

پس از پایان عملیات اختلاط، اسلامپ مخلوطها اندازه گیری و آزمون‌ها قالب گیری شدند. برای آزمایش مقاومت فشاری از قالب استاندارد مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتری، برای آزمایش مقاومت کششی از قالب استاندارد استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلیمتری و برای آزمایش مقاومت خمشی از قالب مکعبی ۴۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلیمتری استفاده شد. پس از قالب گیری، آزمون‌ها روی میز ویریه متراکم شدند. در ادامه آزمون‌های ساخته شده در حدود ۲۴ ساعت درون قالب باقی مانده و در این مدت بطور دائم سطح آنها مرطوب نگه داشته شد. پس از باز کردن قالب، آزمون‌ها تا سن مورد نظر جهت آزمایش در داخل حوضچه آب عمل آوری گردید.

دوم نسبت درصد حجمی الیاف مورد استفاده در طرح (بصورت درصد) را نشان می‌دهد. بعنوان مثال مخلوط PVA-0.5 دارای نیم درصد حجمی الیاف PVA در هر متر مکعب بتن می‌باشد.



شکل ۱- الیاف PVA مورد استفاده

### ۳-۲- ساخت و عمل آوری بتن

برای ساخت آزمون‌ها ابتدا ریز دانه و درشت دانه بطور دقیق توزین شده و در مخلوط کن بصورت خشک به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط گردیدند. سپس بخشی از آب لازم در طرح به آن اضافه

### جدول ۴- مشخصات طرح اختلاط

کد آزمون	نسبت اختلاط ( $kg/m^3$ )				
	سیمان	ماسه	شن	آب	فوق روان کننده
Control	۴۵۰	۸۹۵	۷۵۷	۲۰۲	۱/۱
PVA-0.25	۴۵۰	۸۹۵	۷۵۷	۲۰۲	۲/۳
PVA-0.50	۴۵۰	۸۹۵	۷۵۷	۲۰۲	۲/۷
PVA-0.75	۴۵۰	۸۹۵	۷۵۷	۲۰۲	۳/۳
PVA-1.0	۴۵۰	۸۹۵	۷۵۷	۲۰۲	۴/۳

### ۴-۲- آزمایش‌ها

آزمایش مقاومت فشاری روی آزمون‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتری ۷ و ۲۸ روزه و بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 انجام شد [۲۶]. جهت تعیین مقاومت فشاری از دستگاه کشش و فشار UTM استفاده گردید.

در شکل ۲-الف نحوه انجام این آزمایش مشاهده می‌گردد. اعمال بار به آزمون توسط این دستگاه، بصورت کنترل شونده توسط جابجایی بوده و سیستم بارگذاری توانایی ثبت همزمان نیروی اعمال شده و

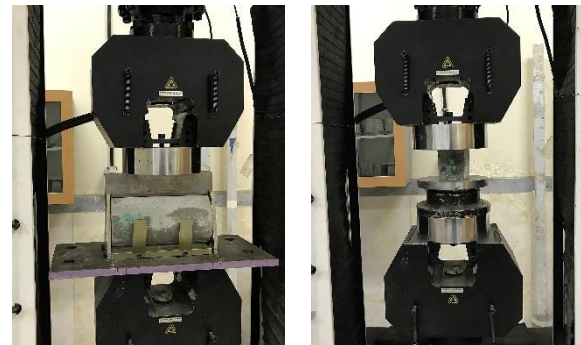
آزمایش‌های بتن تازه شامل آزمایش تعیین اسلامپ، آزمایش تعیین درصد هوا و آزمایش وزن مخصوص بتن تازه است. آزمایش اسلامپ قبل از ریختن مخلوطها در قالب بر اساس استاندارد ASTM C143 انجام گرفت [۲۳]. وزن مخصوص بتن تازه بر اساس استاندارد ASTM C138 اندازه گیری شد [۲۴]. آزمایش تعیین درصد هوای بتن مطابق ASTM C231 انجام شد [۲۵].

مقاومت خمشی بتن، با آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای تعیین می‌شود. این آزمایش بر روی نمونه مکعبی  $100 \times 100 \times 400$  میلیمتری و بر اساس استاندارد ASTM C293 انجام می‌گیرد [۲۸]. در این حالت نمونه بر روی دو تکیه گاه دستگاه UTM با فاصله ۳۵ سانتیمتر بصورت متقارن قرار گرفته و بار نقطه‌ای فشاری در وسط آن با استفاده از دستگاه بارگذاری بصورت کنترل شونده توسط تغییر مکان تا خرابی نهایی اعمال می‌گردد. سیستم بارگذاری توانایی ثبت همزمان نیروی اعمال شده و جابجایی وسط دهانه را دارد. در شکل ۲-ج نحوه انجام این آزمایش مشاهده می‌شود. مدول الاستیسیته بتن ۷ و ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM C469 اندازه‌گیری می‌شود [۲۹].

جابجایی را دارد. با این کار منحنی تنش- کرنش آزمونه در فشار نیز بدست می‌آید. مقاومت کششی بتن یا روش غیر مستقیم برزلی تعیین می‌گردد. این آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد  $150 \times 300$  میلیمتری در سنین ۷ و ۲۸ روزه و بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام می‌گیرد [۲۷]. به این منظور، نمونه استوانه‌ای بصورت افقی در زیر جک قرار گرفته و بار فشاری از طریق دو تیغه در بالا و پایین به آن اعمال می‌شود. سپس نیروی فشاری به تدریج افزایش یافته و در جهت عمود بر امتداد فشار، کشش ایجاد شده و نمونه گسیخته می‌شود. در این حالت باری که باعث گسیختگی می‌شود قرائت شده و با روابطی به تنش گسیختگی کششی تبدیل می‌گردد. در شکل ۲-ب روش انجام این آزمایش نشان شده است.



ج: آزمایش مقاومت خمشی



ب: آزمایش مقاومت کششی

شکل ۲- جزئیات انجام آزمایشها

### ۳- نتایج آزمایش‌ها

#### ۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

با مراجعه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد که برای حفظ اسلامپ در آزمونه PVA-1.0 در محدوده طرح  $(70 \pm 20)$  میلیمتر، نسبت به آزمونه شاهد حدود ۴ برابر فوق روان کننده استفاده شده است. لذا مشخص است که با افزایش حجم الیاف مصرفی مقدار اسلامپ و کارایی بتن کاهش می‌یابد. کاهش کارایی بتن دارای الیاف در تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۱۶]. میزان درصد هوای بتن تازه و نسبت فوق روان کننده به سیمان مصرفی در جدول ۵ و شکل ۳ مشاهده می‌گردد. با توجه به شکل ۳ مشخص است که با افزایش حجم الیاف مصرفی، هم میزان فوق روان کننده مصرفی و هم درصد هوای بتن افزایش می‌یابد. درگیری الیاف PVA با سنگدانه‌ها باعث پیچیده شدن الیاف در اطراف سنگدانه‌ها شده که این موضوع باعث کاهش کارایی بتن می‌گردد. جهت رفع این مشکل نیاز به استفاده بیشتر از فوق روان کننده وجود

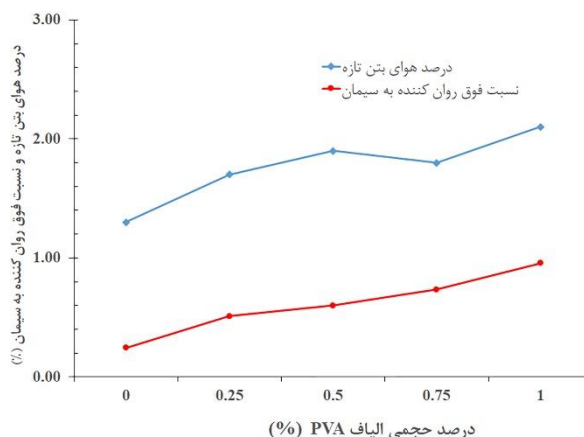
در جدول ۵ نتایج حاصل از آزمایش‌های بتن تازه شامل مقدار اسلامپ، وزن مخصوص و درصد هوای بتن تازه به همراه مقدار فوق روان کننده مورد استفاده در آزمونه‌ها ارائه شده است. تغییرات میزان اسلامپ در تمام مخلوط‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد اسلامپ در تمام آزمونه‌ها در محدوده ۶۵ تا ۸۵ میلیمتر قرار دارد. با بررسی نتایج مندرج در جدول ۵ مشاهده می‌گردد که با افزایش حجم الیاف، مقدار اسلامپ بتن کاهش یافته و همچنین جهت حفظ اسلامپ در محدوده  $20 \pm 70$  میلیمتر میزان مواد کاهنده آب (فوق روان کننده) افزایش می‌یابد، بگونه‌ای که بیشترین مقدار اسلامپ مربوط به آزمونه شاهد و کمترین مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده مربوط به آزمونه PVA-1.0 می‌باشد.

دارد. همچنین مولکولهای هوا در فاصله بین الیاف و سنگدانه‌ها گیر افتاده و سبب افزایش میزان هوای بتن می‌شود [۱۶]. به علت کم بودن چگالی الیاف PVA، با افزایش حجم الیاف چگالی بتن کاهش می‌یابد، بگونه‌ای که بیشترین چگالی مربوط به آزمون شاهد و کمترین چگالی مربوط به آزمون PVA-1.0 (دارای بیشترین حجم الیاف) می‌باشد. چگالی آزمون‌ها در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

کد آزمون	فوق روان کننده ( $kg/m^3$ )	نسبت فوق روان کننده به سیمان (%)	اسلامپ (mm)	چگالی ( $kg/m^3$ )	درصد هوا (%)
Control	۱/۱	۰/۲۵	۸۵	۲۴۳۵	۱/۳
PVA-0.25	۲/۳	۰/۵۲	۸۰	۲۴۲۱	۱/۷
PVA-0.50	۲/۷	۰/۶۰	۷۵	۲۴۰۸	۱/۹
PVA-0.75	۳/۳	۰/۷۳	۷۰	۲۳۹۲	۱/۸
PVA-1.0	۴/۳	۰/۹۶	۶۵	۲۳۷۹	۲/۱

آزمون شاهد کاهش یافته است. یعنی در صورتیکه حجم الیاف مصرفی از مقدار مشخصی بیشتر شود، الیاف PVA نه تنها تأثیری در افزایش مقاومت فشاری بتن ندارد، بلکه سبب کاهش مقاومت می‌شود. نتایج تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان نیز این نتیجه را تأیید می‌نماید [۷]. لی<sup>۱</sup> نشان داد که با افزایش حجم الیاف PVA در کامپوزیت‌های سیمانی، ابتدا مقاومت فشاری افزایش یافته و سپس کم می‌شود. در صورت اضافه کردن الیاف PVA به مخلوط بتن، الیاف روی ریز ترکها پل زده و به این وسیله باعث تأخیر در به هم پیوستن ریز ترکها و ایجاد ترکهای طولی تر شده و مانع خرابی زود رس بتن می‌گردد که این امر افزایش مقاومت فشاری را به دنبال دارد. با افزایش حجم الیاف مصرفی، الیاف بصورت غیر یکنواخت در داخل بتن توزیع شده و میزان تخلخل بتن افزایش می‌یابد. تخلخل بتن ناشی از تأثیر نامناسب الیاف در تراکم‌پذیری بتن و افزایش درصد هوای آن می‌باشد. لذا میزان درگیری الیاف با خمیر سیمان کمتر می‌شود. در این حالت کاهش مقاومت فشاری ناشی از تخلخل، بیشتر از افزایش مقاومت فشاری ناشی از خاصیت پل زدن الیاف بوده و در مجموع مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد [۷]. همچنین خاصیت پل زدن الیاف باعث می‌شود حالت خرابی فشاری بتن از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر تغییر یافته و بتن پس از رسیدن به مقاومت حداکثر قادر به حفظ انسجام و یکپارچگی خود باشد. در شکل ۵-الف آزمون پس از پایان بارگذاری فشاری مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- نمودار تغییرات درصد هوا و مصرف فوق روان کننده با افزایش مصرف الیاف PVA

### ۲-۳- آزمایش‌های بتن سخت شده

#### ۱-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

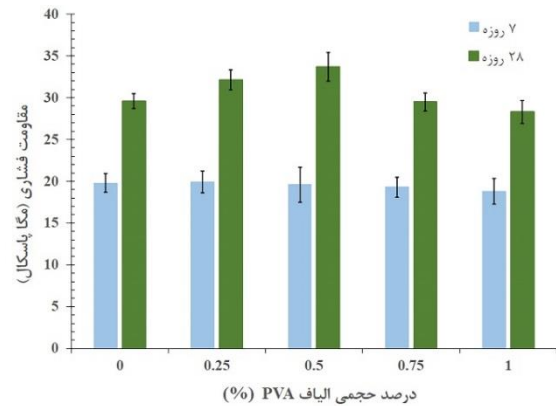
در تمام مخلوط‌ها آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است. این مقادیر، میانگین مقاومت فشاری سه آزمون هستند. در شکل ۴ نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن با افزایش حجم الیاف PVA مشاهده می‌شود. بر اساس این نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون PVA-0.25 حدود ۹ درصد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون PVA-0.50 حدود ۱۴ درصد نسبت به آزمون شاهد افزایش یافته است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های PVA-0.75 و PVA-1.0 به ترتیب حدود ۱ و ۴ درصد نسبت به مقاومت فشاری

<sup>1</sup> Li

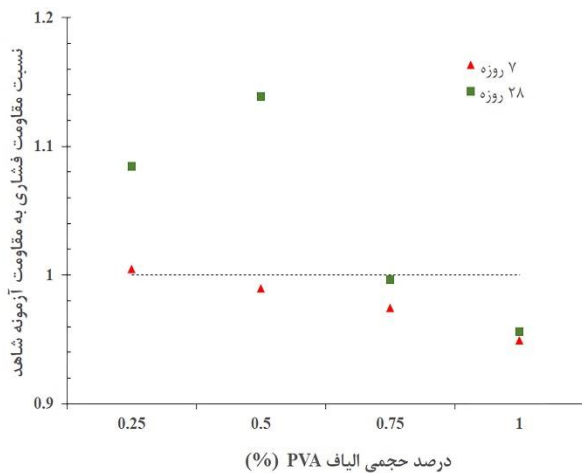
جدول ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته

کد نمونه	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)		مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)		مقاومت کششی (مگا پاسکال)		کرنش معادل تنش فشاری حداکثر
	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	
Control	۱۹/۸	۲۹/۶	۲۸/۹	۳۱/۱	۲/۴	۳/۳	۰/۰۰۲۰۱
PVA-0.25	۱۹/۹	۳۲/۱	۲۷/۱	۳۰/۲	۲/۴	۴/۲	۰/۰۰۱۹۹
PVA-0.50	۱۹/۶	۳۳/۷	۲۶/۲	۲۸/۵	۲/۴	۴/۱	۰/۰۰۲۱۸
PVA-0.75	۱۹/۳	۲۹/۵	۲۴/۸	۲۶/۷	۲/۳	۳/۹	۰/۰۰۲۰۷
PVA-1.0	۱۸/۸	۲۸/۳	۲۳/۵	۲۴/۸	۲/۲	۳/۸	۰/۰۰۲۱

در شکل ۶ نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های دارای الیاف به مقاومت فشاری نمونه شاهد در دو سن ۷ و ۲۸ روزه مشاهده می‌گردد. با توجه شکل ۶ مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از الیاف PVA، سرعت کسب مقاومت در سنین اولیه کاهش یافته ولی سرعت کسب مقاومت ۲۸ روزه افزایش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که اتصال و پیوند کامل بین الیاف PVA و خمیر سیمان فرآیندی زمان‌بر بوده و در حوالی سن ۲۸ روزه به میزان قابل قبول می‌رسد [۷]. با توجه به جدول ۶ و شکل ۶ مشاهده می‌گردد که درصد بهینه الیاف برای افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه معادل ۰/۵ درصد حجمی می‌باشد، بگونه‌ای که در صورت استفاده از این مقدار الیاف PVA، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حدود ۱۴ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن با درصد الیاف مختلف



شکل ۶- نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های دارای الیاف به نمونه شاهد

### ۲-۲-۳- نمودار تنش-کرنش

در شکل ۷ نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری ارائه شده است. از آنجا که مقاومت فشاری بتن مندرج در جدول ۶ میانگین مقاومت فشاری سه نمونه می‌باشد، نمودار تنش-کرنش نمونه‌ای در شکل ۷ ارائه شده است که نزدیکترین



الف: بارگذاری فشاری



ب: بارگذاری کششی

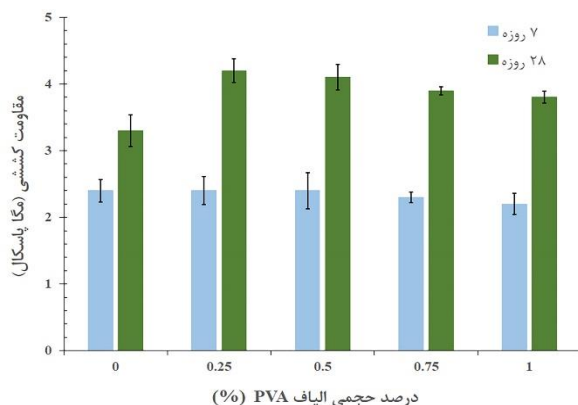
شکل ۵- نمونه‌ها پس از پایان بارگذاری



از ۰/۵ درصد، کرنش نهایی کاملاً افزایش یافته و تا مقدار ۰/۰۱ زیاد می‌شود. همچنین سطح زیر منحنی تنش-کرنش که نشان دهنده میزان انرژی جذب شده توسط آزمون می‌باشد نیز در آزمون‌های با درصد الیاف بیشتر از ۰/۵، بصورت محسوس افزایش یافته است. یعنی حداقل مقدار الیاف برای بهبود در منحنی تنش-کرنش برابر با ۰/۵ درصد می‌باشد.

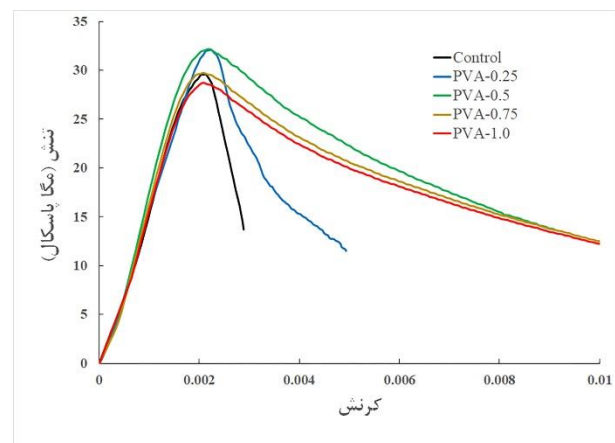
### ۳-۲-۳- آزمایش مقاومت کششی

مقاومت کششی آزمون‌ها بصورت غیر مستقیم با روش تست برزیلی تعیین گردید [۲۷]. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶ و شکل ۸ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۷ مشخص است که در صورت استفاده از الیاف PVA در مخلوط، مقاومت کششی آزمون‌ها به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. علت این موضوع خاصیت پل زدن الیاف روی ریزترکها و افزایش توانایی جذب انرژی بتن می‌باشد. بیشترین مقاومت کششی در آزمون PVA-0.25 با حدود ۲۷ درصد افزایش مشاهده شد و با افزایش درصد استفاده از الیاف PVA در مخلوط‌ها، مقاومت کششی کمتری نسبت به آزمون PVA-0.25 ثبت گردیده است. علت این امر می‌تواند افزایش تداخل در بتن با افزایش حجم الیاف مصرفی باشد. همچنین مشخص است که سرعت کسب مقاومت کششی در سنین اولیه کم بوده و با افزایش سن بتن، افزایش می‌یابد. مشابه این رخداد قبلاً در آزمایش مقاومت فشاری نیز گزارش شده است. در شکل ۵-ب آزمون پس از پایان آزمایش کششی مشاهده می‌گردد.



شکل ۸- نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن با درصد الیاف مختلف

مقاومت فشاری را به مقدار میانگین داشته و دارای کمترین انحراف معیار باشد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌گردد که حالت خرابی آزمون شاهد بصورت ترد بوده، اما نمونه‌های دارای الیاف PVA دارای حالت خرابی شکل پذیر می‌باشند، بگونه‌ای که شاخه کاهش مقاومت منحنی تنش-کرنش، با شیب کم به سمت خرابی پیش می‌رود و با افزایش حجم الیاف PVA، این شیب کمتر می‌شود. همچنین در نمونه‌های دارای الیاف PVA در حین خرابی ترک‌های ریز زیادی مشاهده می‌گردد. نتایج تحقیقات انجام گرفته توسط سایر محققان نیز مؤید این مسئله است. میدان‌شان داد که استفاده از الیاف باعث جلوگیری از شکست ترد و ناگهانی بتن شده و قابلیت جذب انرژی و طاقت<sup>۲</sup> بتن را افزایش می‌دهد [۳۱]. همچنین بر اساس شکل ۶ مشخص است که کرنش معادل مقاومت فشاری حداکثر در آزمون شاهد تقریباً برابر با ۰/۰۰۲ بوده که این مقدار در آزمون‌های دارای الیاف PVA به مقدار جزئی افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به علت حضور الیاف PVA در ناحیه انتقال میان سطحی<sup>۳</sup> (ITZ) و ایجاد ساختار یکپارچه بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد. کرنش معادل تنش حداکثر در سن ۲۸ روزه در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش بتن

با توجه به شکل ۷ و نمودار تنش-کرنش مشخص است که در آزمون شاهد کرنش نهایی بتن در شاخه کاهش مقاومت حدود ۰/۰۰۳ است که این مقدار در صورت استفاده از الیاف PVA بیشتر می‌شود. در آزمون PVA-0.25 کرنش نهایی تا مقدار ۰/۰۰۵ افزایش می‌یابد. در آزمون‌های با درصد حجمی الیاف بیشتر

<sup>3</sup> Interfacial transition zone

<sup>1</sup> Meda

<sup>2</sup> Toughness

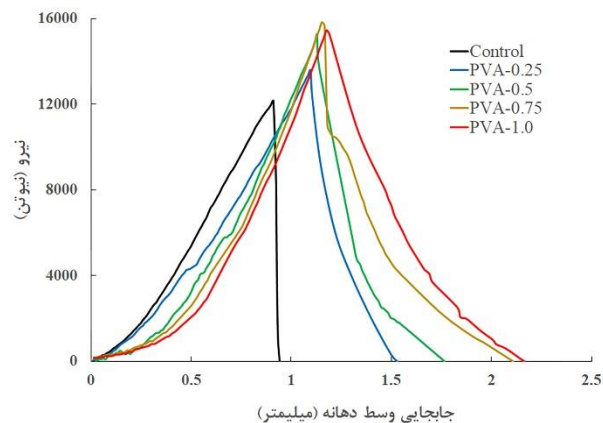
### ۳-۲-۴- آزمایش مدول شکست خمشی

مقاومت خمشی آزمون‌ها با استفاده از آزمون سه نقطه‌ای و مدول گسیختگی آنها بر اساس استاندارد ASTM C293 تعیین گردید [۲۸]. نتایج مربوط به آزمایش بارگذاری خمشی آزمون‌ها از قبیل مدول گسیختگی و میزان جذب انرژی در جدول ۷ و شکل ۹ ارائه شده است. هر کدام از مقادیر ذکر شده در جدول ۷ نشان دهنده مقدار میانگین بدست آمده از آزمایش انجام شده روی سه آزمون بوده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌گردد که مقاومت خمشی آزمون‌ها (مدول شکست خمشی) در صورت استفاده از الیاف PVA افزایش می‌یابد.

جدول ۷- نتایج آزمایش خمشی آزمون‌ها بر اساس استاندارد

ASTM C293 [۲۸]

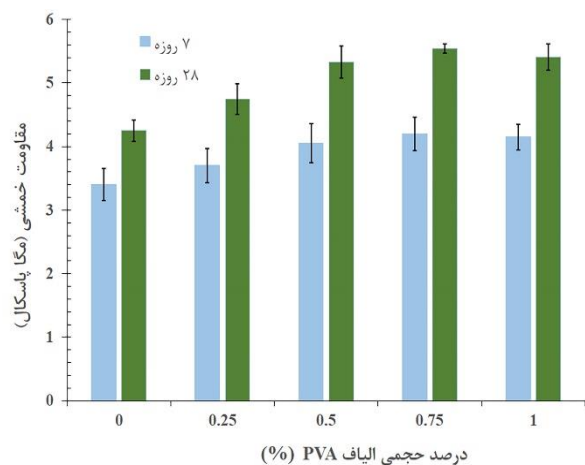
کد آزمون	مدول گسیختگی خمشی (مگا پاسکال)	انرژی جذب شده (ژول)
Control	۶/۴	۴/۹۷
PVA-0.25	۷/۱	۸/۹۲
PVA-0.50	۸/۰	۱۰/۴۸
PVA-0.75	۸/۳	۱۰/۸۸
PVA-1.0	۸/۲	۱۲/۵۸



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی وسط دهانه

شیب نمودار نیرو-جابجایی نشان دهنده سختی خمشی آزمون است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که سختی خمشی بتن دارای الیاف PVA از سختی خمشی آزمون شاهد کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر بتن دارای الیاف PVA نسبت به بتن معمولی در یک میزان نیروی وارده مشخص، از قابلیت جابجایی بیشتری برخوردار بوده و لذا شکل‌پذیری بیشتری دارد.

میزان جذب انرژی در آزمون‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. برای تعیین مقدار جذب انرژی، سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمشی سه نقطه‌ای ارائه شده در شکل ۱۰ محاسبه می‌شود. هر کدام از مقادیر ذکر شده در شکل ۱۰، میانگین بدست آمده از آزمایش سه نمونه می‌باشد. با مراجعه به جدول ۷ مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد الیاف PVA در آزمون‌ها، سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و در نتیجه میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

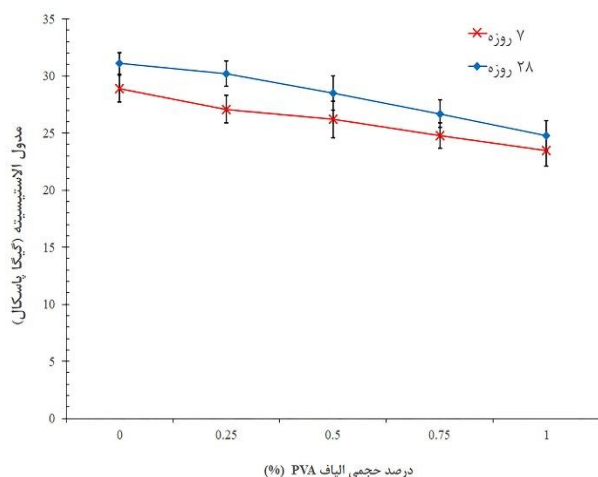


شکل ۹- نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن با درصد الیاف مختلف

مدول گسیختگی آزمون‌های حاوی الیاف PVA بین ۱۱ تا ۳۰ درصد نسبت به آزمون شاهد افزایش یافته است، بگونه‌ای که با افزایش الیاف مصرفی تا درصد حجمی ۰/۷۵ درصد، مدول گسیختگی بیشتر شده و بعد از آن مقداری کم می‌شود ولی در هر حال مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف PVA از مقاومت خمشی بتن معمولی بیشتر است. علت این موضوع قابلیت پل زدن الیاف بر

#### ۴- حجم الیاف بهینه

در انتخاب طرح اختلاط و درصد بهینه الیاف PVA مصرفی، کلیه پارامترهای مورد بررسی بتن تازه و سخت شده مؤثر می‌باشند. بهینه‌ترین طرح اختلاط ترکیبی است که دارای بهترین کارایی، کمترین درصد هوا و بیشترین مقاومت فشاری و خمشی و کششی باشد. بر این اساس و با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، درصد بهینه استفاده از درصد الیاف PVA حدود ۰/۵ درصد حجمی می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از ۰/۵ درصد حجمی الیاف PVA، مقاومت فشاری بتن به حداکثر مقدار خود رسیده و حدود ۱۴ درصد زیاد می‌شود. در این حالت مقاومت کششی ۲۴ درصد، مدول گسیختگی خمشی ۲۵ درصد و میزان جذب انرژی حدود ۱۱۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- نتایج آزمایش تعیین مدول الاستیسیته بتن با درصد الیاف مختلف

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر استفاده از الیاف PVA بر مشخصات مکانیکی بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌های انجام شده موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه‌گیری است:

- استفاده از الیاف PVA باعث کاهش کارایی و اسلامپ بتن می‌شود، بگونه‌ای که هرچه درصد استفاده از الیاف PVA بیشتر شود اسلامپ بتن کمتر شده و نیاز به مصرف فوق روان کننده بیشتر می‌شود.

میزان جذب انرژی آزمون‌های حاوی الیاف PVA بین ۸۰ تا ۱۵۰ درصد نسبت به آزمون شاهد افزایش یافته است، به گونه‌ای که با افزایش حجم الیاف مصرفی میزان جذب انرژی بیشتر می‌شود. علت این موضوع این است که الیاف PVA بر روی اولین ترکهای ایجاد شده پل زده و به دلیل مقاومت کششی بالامانع از رشد و گسترش ترکها شده و به این وسیله انرژی ناشی از بارگذاری مستهلک می‌گردد. بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به آزمون PVA-1.0 با ۱ درصد حجمی الیاف می‌باشد. تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان نیز این نتیجه را تأیید می‌کند. آریسو<sup>۱</sup> و وو<sup>۲</sup> در تحقیقات خود نشان دادند در کامپوزیت‌های ECC حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس و ۱/۵ درصد حجمی الیاف PVA، شکل پذیری تا حدود ۵۰ برابر و مدول گسیختگی خمشی تا حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد [۳۲]. خاصیت جذب انرژی زیاد بتن حاوی الیاف PVA، می‌تواند به نحو مطلوبی خطر خرابی سازه‌های بتنی تحت بارهای لرزه‌ای را کاهش دهد.

#### ۳-۲-۵- مدول الاستیسیته

نتایج حاصل از آزمایش تعیین مدول الاستیسیته در دو سن ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۶ و شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد الیاف PVA، مدول الاستیسیته بتن کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند افزایش تخلخل در بتن با افزایش حجم الیاف مصرفی باشد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان نیز مؤید این موضوع است. کرینالدسی<sup>۳</sup> در تحقیقات خود نشان داد اضافه کردن هر نوع الیاف به بتن خود تراکم در حجم کم، تغییر چندانی در مدول الاستیسیته بتن ایجاد نمی‌کند، اما افزایش درصد الیاف مصرفی باعث کاهش زیاد در مدول الاستیسیته بتن خود تراکم می‌گردد [۳۳]. همچنین بر اساس نتایج تحقیقات گذشته مشخص است که مدول الاستیسیته در بتن متناسب با مقاومت فشاری و درصد هوا می‌باشد، به گونه‌ای که با افزایش مقاومت فشاری و کاهش درصد هوای بتن، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد [۳۴-۳۵]. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته بتن حاوی الیاف PVA نیز از این قاعده پیروی می‌کند.

<sup>3</sup> Corinaldesi

<sup>1</sup> Arisoy

<sup>2</sup> Wo

Magazine of Concrete Research, vol. 63, no. 11, pp. 871–881, 2011.

[2] J. P. Romualdi and J. A. Mandel, "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement," in Journal Proceedings, 1964, vol. 61, no. 6, pp. 657–672.

[3] R. F. Zollo, "Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development," Cement and Concrete Composites, vol. 19, no. 2, pp. 107–122, 1997.

[4] D. Feldman and A. Barbalata, Synthetic polymers: technology, properties, applications. Springer Science & Business Media, 1996.

[5] C. Redon, V. C. Li, C. Wu, H. Hoshiro, T. Saito, and A. Ogawa, "Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 13, no. 6, pp. 399–406, 2001.

[6] T. Horikoshi, A. Ogawa, T. Saito, H. Hoshiro, G. Fischer, and V. Li, "Properties of Polyvinylalcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites," in International RILEM workshop on HPFRCC in structural applications, 2006, p. 147.

[7] V. C. Li, "A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites," Cement and Concrete Composites, vol. 14, no. 2, pp. 131–141, 1992.

[8] V. C. Li, "Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling," Canadian Society for Civil Engineering, pp. 64–97, 1998.

[9] V. C. Li, S. Wang, and C. Wu, "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)," ACI Materials Journal-American Concrete Institute, vol. 98, no. 6, pp. 483–492, 2001.

[10] G. Fischer and V. C. Li, "Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC)," Structural Journal, vol. 99, no. 1, pp. 104–111, 2002.

[11] V. C. Li, "On engineered cementitious composites (ECC)," Journal of advanced concrete technology, vol. 1, no. 3, pp. 215–230, 2003.

[12] V. C. Li and S. Wang, "Microstructure variability and macroscopic composite properties of high performance fiber reinforced cementitious composites," Probabilistic Engineering Mechanics, vol. 21, no. 3, pp. 201–206, 2006.

[13] H.-J. Kong, S. G. Bike, and V. C. Li, "Constitutive rheological control to develop a self-consolidating engineered cementitious composite reinforced with hydrophilic poly (vinyl alcohol) fibers," Cement and Concrete Composites, vol. 25,

- وزن مخصوص بتن حاوی الیاف PVA از وزن مخصوص بتن معمولی کمتر است. با افزایش درصد استفاده از الیاف PVA، میزان کاهش وزن مخصوص بتن بیشتر می‌شود.
- در صورت استفاده از الیاف PVA، مقاومت فشاری بتن زیاد می‌شود. این افزایش مقاومت بگونه‌ای است که با افزایش حجم الیاف PVA ابتدا مقاومت فشاری مخلوط افزایش یافته و سپس کم می‌شود. درصد بهینه الیاف برای افزایش مقاومت فشاری معادل ۰/۵ درصد است و در صورت استفاده از این مقدار الیاف PVA، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حدود ۱۴ درصد افزایش می‌یابد.
- در صورت استفاده از الیاف PVA، شیب شاخه کاهش مقاومت در منحنی تنش-کرنش کاهش یافته و بتن رفتار شکل‌پذیری پس از رسیدن به مقاومت حداکثر از خود نشان می‌دهد.
- کرنش معادل مقاومت فشاری حداکثر و کرنش نهایی در منحنی تنش-کرنش در الیاف PVA افزایش می‌یابد. کرنش نهایی در آزمون‌های دارای الیاف تا ۰/۰۱ نیز می‌رسد.
- مقاومت کشش برزیلی بتن حاوی الیاف نسبت به بتن معمولی افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت کششی در آزمون PVA-0.25 با حدود ۲۷ درصد افزایش بوده و با افزایش درصد استفاده از الیاف PVA مقاومت کششی کمتر می‌شود.
- مشابه مقاومت کششی، مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف نسبت به بتن معمولی افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت خمشی در آزمون PVA-0.75 با حدود ۳۰ درصد افزایش بوده و با افزایش درصد استفاده از الیاف PVA در مخلوط‌ها، مقاومت خمشی کمتر می‌شود.
- در صورت استفاده از الیاف PVA در بتن، میزان جذب انرژی بتن افزایش می‌یابد. در این حالت بتن رفتار شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهد.
- با افزایش حجم الیاف PVA در بتن، مدول الاستیسیته بتن به مقدار جزئی کم می‌شود.

## ۶- مراجع

[1] S. B. Daneti, T.-H. Wee, and T. Thangayah, "Effect of polypropylene fibres on the shrinkage cracking behaviour of lightweight concrete,"

- Conshohocken, PA, 2004.
- [28] ASTM-293-02, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), 2002.
- [29] ASTM-C469, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of concrete in Compression." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [30] Y.-S. Heo, J. G. Sanjayan, C.-G. Han, and M.-C. Han, "Relationship between inter-aggregate spacing and the optimum fiber length for spalling protection of concrete in fire," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 3, pp. 549-557, 2012.
- [31] A. Meda, F. Minelli, and G. A. Plizzari, "Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 8, pp. 2930-2937, 2012.
- [32] B. Arisoy and H.-C. Wu, "Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 4, pp. 635-645, 2008.
- [33] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 5, pp. 596-601, 2011.
- [34] B. D. Liu, W. J. Lv, L. Li, and P. F. Li, "Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 69, pp. 133-142, 2014.
- [35] J. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, "Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 11, pp. 2091-2095, 2004.
- no. 3, pp. 333-341, 2003.
- [14] M. Şahmaran and V. C. Li, "Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 2, pp. 72-81, 2008.
- [15] M. Şahmaran and V. C. Li, "Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash," *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no. 11, pp. 1033-1043, 2009.
- [16] L. Martinie, P. Rossi, and N. Roussel, "Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 2, pp. 226-234, 2010.
- [17] S. Wang and V. C. Li, "Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances," in *RILEM PRO*, 2006, vol. 49.
- [18] A. Noushini, K. Vessalas, and B. Samali, "Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fibre reinforced concrete (PVA-FRC)," *Magazine of Concrete Research*, vol. 66, no. 9, pp. 465-483, 2014.
- [19] S. F. U. Ahmed and H. Mihashi, "Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites," *Materials and structures*, vol. 44, no. 6, pp. 1179-1191, 2011.
- [20] S. Hamoush, T. Abu-Lebdeh, and T. Cummins, "Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 11, pp. 2285-2293, 2010.
- [21] ASTM-C33, "Standard Specification for Concrete Agregates." ASTM International, 2003.
- [22] ACI 211.1, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concrete." ACI, 1991.
- [23] ASTM C-143, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [24] A, "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
- [25] ASTM-C231/C231M, "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [26] BS EN 12390-3, "Testing hardened concrete—part 3: compressive strength of test specimens," British Standards Institution, 2009.
- [27] ASTM-C496M-04, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West

## Effects of polyvinyl alcohol fibers (PVA) on Mechanical Properties of concrete

Mehdi Esfandi Sarafraz \*

Civil engineering departement, Islamic azad university, West tehran branch

Mohammad Sajjad Massoudi

Civil engineering departement, Islamic azad university, West tehran branch

Ayoub Karimi

Civil engineering departement, Islamic azad university, West tehran branch

### Abstract

Concrete is a brittle material and the deficiencies of concrete such as low tensile strength, small ultimate strain and shrinkage are greatly limited the application of concrete. Fiber-reinforced concrete (FRC) is concrete containing fibrous material which increases its structural integrity. It contains short discrete fibers that are uniformly distributed and randomly oriented. Polyvinyl alcohol (PVA) fiber is as one of the most appropriate polymeric fibers to be used for fiber-reinforced concrete. This research demonstrates the effects of PVA fibers on the mechanical properties of concrete mixtures. This paper presents an experimental study on the properties of fresh and hardened concrete that was built with Polyvinyl alcohol fiber. For this purpose, five fiber fractions of PVA (0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1%) were used in the mixtures. The tests include slump, density, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, and modulus of elasticity. Test results showed that after the addition fibers, the workability Property of concrete was reduced. Also, it was seen that PVA fiber meaningfully increase the static properties of concrete as well as improving its post-peak response and ductile behavior. Moreover, high ratios of PVA fiber in the concrete mixture caused negative effects on the compressive strength of concrete. Finally, the optimum percentages of PVA fiber corresponding to the most significant increases in the mechanical properties were presented.

**Keywords:** Fiber reinforced polymer concrete, Polyvinyl alcohol fiber, Compressive strength, Tensile strength, Flexural strength.

---

\* Corresponding Author: sarafraz.m@wtiau.ac.ir