

# ارزیابی خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC)

علی صدر ممتازی<sup>۱\*</sup>، بهزاد طهمورسی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

\*sadrmtazi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۲/۰۶]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۸/۰۹]

## چکیده

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)، نوعی فرآورده سیمانی با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا است. بروز رفتار کرنش - سخت شونده و ترک خوردگی متعدد به جای ترک‌های عمیق و گسترده در اثر اعمال بارهای کششی و خمشی، از جمله خواص خاص آن محسوب می‌شود که موجب افزایش علاقه به استفاده از آن شده است. در این پژوهش کارایی، خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های مختلف ECC حاوی دو ماده معدنی (سرباره آهن‌گدازی/ خاکستر بادی) به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان و دو نوع سنگدانه (ماسه سیلیسی/ رودخانه‌ای) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی با وجود مقاومت مکانیکی پایین‌تر در مقایسه با مخلوط‌های حاوی سرباره، به طور قابل توجهی عملکرد بالاتری در بروز رفتار کرنش - سخت شونده در ناحیه پسا- ترک از خود نشان دادند. عملکرد مخلوط‌های ECC در برابر آزمایش‌های دوام (نفوذ تسریع شده یون کلر، مقاومت ویژه الکتریکی، انقباض خشک و خوردگی تسریع شده میلگرد) مطلوب ارزیابی شد و به لحاظ کمی به صورت سرباره خاکستر بادی بود. در این پژوهش برای محاسبه مقاومت کشش مستقیم مخلوط‌های ECC، یک مدل جدید (هندسه متفاوت) نسبت به دیگر مدل‌های استفاده شده به وسیله پژوهشگران، پیشنهاد و آزمایش شد. نتایج نشان داد که مقاومت کششی اندازه‌گیری شده با مدل جدید نسبت به مدل پیشین، بین ۱۰٪ تا ۱۷٪ بالاتر بود.

**واژگان کلیدی:** کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، خواص مکانیکی، دوام

## ۱- مقدمه

سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای غلبه بر این مشکلات انجام گرفته است [1, 2].

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) نوع پیشرفته‌ای از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند هستند که دارای ظرفیت کرنش کششی بالا و رفتار کرنش سخت‌شونده (ترک خوردگی مویی متعدد قبل از تمرکز ترک و گسیختگی نهایی) است. ظرفیت کرنش کششی مواد ECC حاوی الیاف پلی‌اتیلن و یا الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) با بیشینه مقدار حجمی ۲٪ الیاف در محدوده ۳٪ تا ۵٪ گزارش شده است [3, 4]. در کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف،

از عمده ضعف بتن می‌توان به رفتار شکست ترد در خمش، کششی و شکل پذیری پایین اشاره کرد. رفتار شکنندگی به عنوان یک تنگنا، مانع عملکرد بهتر سازه از نظر ایمنی، دوام و پایداری، شده است. بسیاری از مشکلات مربوط به زوال زیرساخت‌ها و تاسیسات زیربنایی را می‌توان به عملکرد ضعیف بتن در برابر بارگذاری‌های خمشی یا کششی و رفتار نامطلوب در ناحیه پساترک، نسبت داد. در

شکل ۱. رفتار شمانیک کامپوزیت‌های سیمانی توانمند مسلح به الیاف تحت کشش

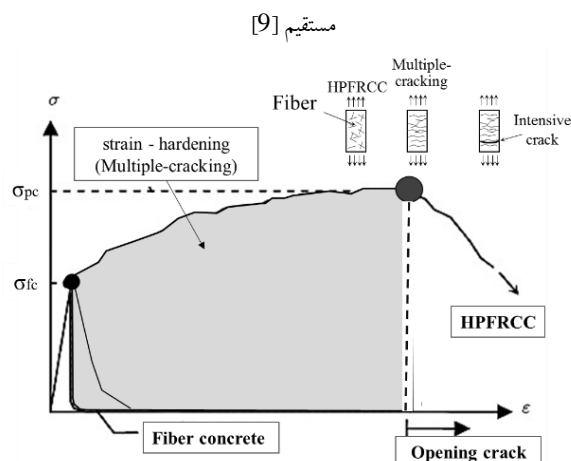


Fig. 1 Schematic behavior of fiber reinforced cementitious composites under direct tension [9]

برخی از خواص کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف‌های مختلف، به وسیله پژوهشگران بررسی شده است. از اولین پژوهش‌های انجام شده روی ECC، می‌توان به پژوهش Maalej و Li [9] در سال ۱۹۹۴ اشاره کرد. آن‌ها در مقایسه رفتار خمشی و کششی بین کامپوزیت ECC و کامپوزیت‌های مسلح به الیاف فولادی/ پلی پروپیلن، نشان دادند که، کامپوزیت‌های ECC به طور قابل توجهی در بروز رفتار کرنش-سخت شونده، ترک خوردگی متعدد و افزایش نقطه گسیختگی چقرمگی، برتری داشتند. Wang و Li [5] اثر مقادیر بالای خاکستر بادی در کامپوزیت ECC را بررسی کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش حجم به کارگیری خاکستر بادی، موجب کاهش پیوند و اصطکاک ناحیه انتقال میان سطحی بین الیاف PVA شده و مانع از رسیدن چقرمگی ماتریس به بیشترین ظرفیت کرنش کششی می‌شود. Sahmaran و همکاران [11] تاثیر نوع سنگدانه و اندازه‌ی آن، بر شکل پذیری و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ECC را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که مخلوط ECC تولید شده با ریزدانه سنگ آهک دولومیتی به همراه مقادیر بالای خاکستر بادی، رفتار کرنش-سخت شونده و شکل پذیری بالایی را نشان می‌دهد. همچنین تاثیر زیادی در کاهش سرعت انقباض خشک دارد.

## ۲- طراحی و خواص میکرو مکانیک

### کامپوزیت‌های ECC

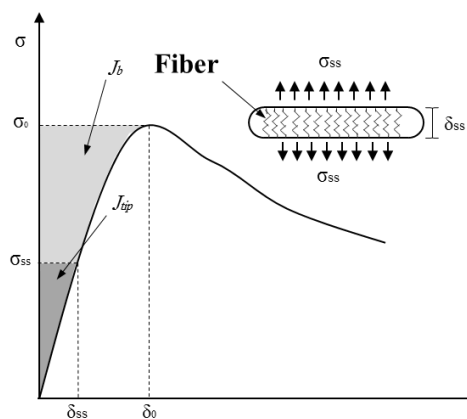
مهندسی مواد در ECC از ارتباط میان میکروسازه‌ها، فرآیند ساخت، مشخصات مصالح و کارایی تشکیل شده است. در واقع

کرنش‌های بزرگ با توسعه پی‌درپی ترک‌های متعدد به جای افزایش مداوم دهانه باز شده یک ترک، رخ می‌دهند. چقرمگی بالا و عرض کنترل شده ترک (معمولاً زیر ۱۰۰ میکرون)، کامپوزیت‌های ECC را به یک مصالح ایده‌آل برای بهبود سرویس دهی و دوام تاسیسات زیرساختی، تبدیل کرده است. شکل (۱) رفتار بتن الیافی (فولادی) و کامپوزیت‌های سیمانی توانمند مسلح به الیاف، تحت بارگذاری کششی را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که بتن الیافی با رسیدن به مقاومت ترک‌خوردگی خود ( $\sigma_{fc}$ ) رفتار کرنش-نرم شونده بروز می‌دهد، اما در کامپوزیت‌های سیمانی توانمند مسلح به الیاف (کامپوزیت‌های ECC) در ناحیه پسا ترک، رفتار کرنش-سخت شونده (به دلیل ترک خوردگی متعدد)، تا نقطه گسیختگی از خود نشان می‌دهد (ناحیه سایه خورده در شکل ۱). در سال‌های اخیر، زمینه‌های بکارگیری کامپوزیت‌های ECC افزایش یافته است. کامپوزیت ECC به طور موفقیت‌آمیزی در تعمیر سدها، پوشش عرشه پل، تیرهای هم‌بند ساختمان بلند مرتبه و دیگر عناصر سازه‌ای و سیستم‌ها، به کار برده شده است [5, 6].

مواد ECC در مقایسه با بتن معمولی، بطور قابل توجهی مقدار سیمان بالاتری (به طور متوسط دو تا سه برابر) دارند. مقدار بالای مواد سیمانی در کامپوزیت‌های ECC موجب کنترل مقدار کارایی برای توزیع هرچه بهتر الیاف در آن است و بیشتر از آن، برای بروز رفتار کرنش-سخت شونده و افزایش چقرمگی ماتریس در ناحیه پسا ترک ضروری است. در کامپوزیت‌های ECC از کاربرد درشت دانه‌ها اجتناب شده است که حاصل آن مخلوطی با مقدار مواد سیمانی بالا در مقایسه با بتن معمولی است. در واقع، مواد ECC ترکیبی از خمیر سیمان یا ملات با ماسه ریز است که عیار سیمان آن، ۸۳۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب است [7, 8].

در چند دهه گذشته، از مواد افزودنی معدنی، مانند خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان، به دلیل داشتن مزایا و آثار مثبت بر بتن و فرآورده‌های سیمانی استفاده می‌شود. به تازگی، استفاده از این مواد در کامپوزیت‌های ECC نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی و سرباره تاثیر مثبتی بر محیط زیست دارد. استفاده از مقادیر بالای خاکستر بادی موجب بهبود توانایی کامپوزیت ECC در بروز رفتار شکل پذیری کششی (در ناحیه پسا-اوج و یا پسا-ترک) می‌شود [10].

شکل ۲. نمودار  $\sigma_0$  کامپوزیت با رفتار کرنش سخت شونده گی (ناحیه سایه روشن: انرژی تکمیل  $[J/b]$  و ناحیه سایه تیره: طاق نوک ترک  $[J_{tip}]$  را نشان می‌دهد) [5].



**Fig. 2** Curve of strain hardening behavior of composites  $\sigma_0$  (lighting area: energy supplementation  $[J/b]$  and dark shadow area show: crack a tip bear  $[J_{tip}]$ ) [5].

کنترل چقرمگی و میزان انرژی برای دست یابی به طراحی دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به طوری که نسبت  $J/b / J_{tip}$  می‌تواند به عنوان شاخص بالقوه متعدد ترک خوردگی متعدد در نظر گرفته شود [15]. دومین شرط برای بروز رفتار کرنش-سخت شونده آن است که مقاومت اولین ترک کششی  $\sigma_{fc}$  از بیشترین تنش پل زدگی الیاف  $\sigma_0$ ، کمتر باشد [16]. در طراحی ECC سه عامل اساسی الیاف، ماتریس و ناحیه انتقال میان سطحی بین این دو، اثر گذارند. عامل الیاف شامل درصد حجمی  $V_f$ ، طول  $L_f$ ، قطر  $d_f$ ، مدول الاستیسته کشسانی  $E_f$  و مقاومت کششی  $\sigma_{fc}$  الیاف است. عامل ماتریس بر اساس چقرمگی شکست  $K_m$ ، مدول کشسانی  $E_m$  و توزیع اندازه حفرات  $a_0$  و عامل ناحیه انتقال بر اساس تنش اصطکاک مرزی  $\tau_0$  و چسبندگی شیمیایی  $G_d$  استوار است [17]. رفتار لغزش-سخت شونده پارامتر دیگری است که در ECC ارزیابی شده و با  $\beta$  نشان داده می‌شود و خاصیت آب دوست بودن الیاف PVA و ویژگی‌های ریزساختاری آن را وارد مدل سازی می‌کند [18, 19]. با توجه به عدم بررسی ریز ساختار در این پژوهش، از ارائه روابط و مطالب اضافی جلوگیری می‌شود.

### ۳- اهمیت پژوهش

شناخت و توسعه مصالح پایدار از مباحث مهم در رشته‌های فنی و مهندسی محسوب می‌شود که از جمله آن می‌توان به مواد با عملکرد

میکرومکانیک برقرار کننده پل ارتباطی میان ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت و مشخصات مصالح است. پارامترهای میکرو مکانیکی بر اساس اندرکنش میان الیاف، ماتریس و ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) دومعیار لازم برای دست‌یابی به رفتار ویژه ECC را مقدر می‌سازد. این دومعیار برپایه مقاومت ماتریس و حالت ترک پایا استوارند. در واقع دستیابی به این حالت تضمین کننده کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با کارایی بالا و رفتار کرنش-سخت شونده است [12].

از نخستین کارهای انجام شده در زمینه طراحی مواد ECC می‌توان به پژوهش Marshall و Cox [13] "مطالعه روی کامپوزیت‌های الیاف پیوسته" و بعد از آن به پژوهش Li و Leung [14] روی الیاف‌های ناپیوسته اشاره کرد. اساسی‌ترین معیار برای بروز رفتار کرنش-سخت شونده، رخ دادن حالت ترک خوردگی پایدار تحت بار گذاری است. در این حالت اگر پس از اولین ترک خوردگی، عرض ترک تحت بارگذاری شروع به افزایش کند، به دلیل متناسب بودن اصطکاک در ناحیه انتقال میان سطحی الیاف و ماتریس با تنش گسیختگی الیاف، این ترک به اصطلاح محبوس می‌شود و با عرض ثابت پیشروی می‌کند. در چنین حالتی، رابطه میان تنش ترک پایدار  $\sigma_{ss}$  و طاق نوک ترک  $J_{tip}$ ، مطابق شکل (۲)، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\sigma_{ss} \delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta = j_{tip} \quad (1)$$

که  $J_{tip}$  با رابطه  $K_m^2/E_m$  تخمین زده می‌شود ( $K_m$ : چقرمگی شکست،  $E_m$ : مدول الاستیسته ماتریس). شرایطی که لازمه شکل‌گیری ترک جدید و پی‌درپی است، ارضاء رابطه (۲) است:

$$j_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv j'_b \quad (2)$$

که در آن  $\delta_0$  بازشدگی ترک متناظر با بیشترین تنش پل زدگی  $\sigma_0$  است. عبارت سمت راست رابطه (۲) انرژی مکمل رابطه تنش پل زدگی و بازشدگی ترک است.

ثانیه به مخلوط اضافه شد و پس از آن اختلاط به مدت ۴ دقیقه ادامه یافت تا خمیر یکنواختی حاصل شد. در نهایت الیاف به صورت دستی و تدریجی در مدت ۲۰ ثانیه به مخلوط اضافه شد و اختلاط پس از ۴ دقیقه خاتمه یافت. پس از انجام آزمایش کارایی، مخلوط به داخل قالب‌ها ریخته شد. نمونه‌ها مطابق با الزامات ASTM C192 [2016]، پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری، بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب آهک اشباع با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند.

## ۴- برنامه آزمایشگاهی

### ۴-۱- مصالح

در این پژوهش از سیمان تیپ ۱-۴۲۵ مطابق ASTM C 150/150M [2016]، خاکستر بادی کلاس F مطابق الزامات ASTM C 612 [2014] و سرباره آهن‌گذاری مطابق الزامات ASTM C 989 [۲۰۱۴] در مخلوط‌های ECC استفاده شد که ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) آن‌ها در جدول (۱) آمده است. سنگدانه مصرفی برای ساخت کامپوزیت‌ها شامل ماسه سیلیسی (با بیشینه قطر ۰/۳ میلی‌متر، عبوری از الک شماره ۵۰) و ماسه رودخانه‌ای (با بیشینه قطر ۰/۶ میلی‌متر عبوری از الک شماره ۳۰) بود. الیاف PVA با نام تجاری RMS702 به مقدار ۲٪ حجمی مخلوط بکار برده شد، که ویژگی‌های آن به صورت (طول: ۹ میلی‌متر، قطر: ۳۹ میکرون، مدول الاستیسیته: ۳۹ گیگا پاسکال، مقاومت کششی: ۱۶۲۰ مگاپاسکال) و هماهنگی بر الزامات ASTM C1116 [2010] بود. برای رسیدن به کارایی مطلوب و پخش مناسب الیاف PVA در مخلوط‌های ECC، از افزودنی فوق‌راون‌کننده (S.P) بر پایه پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری P10-3R استفاده شد.

جدول ۲. طرح‌های اختلاط ECC

Mix ID	SL-RS	SL-SS	FA-RS	FA-SS
	0.26	0.26	0.26	0.26
cement	1	1	1	1
Fly ash	0	0	2.2	2.2
slag	2.2	2.2	0	0
River sand	1.16	0	1.16	0
Silica sand	0	1.16	0	1.16
S.P	0.0125	0.011	0.011	0.011

Table 2. ECC mixture design

### ۴-۳ روش‌های آزمون

آزمایش کارایی شامل اندازه‌گیری اسلامپ و  $T_{50}$  به عنوان شاخصی برای ارزیابی جریان‌پذیری و قابلیت پرمکنندگی بدون نیاز به لرزش، بود مشابه استاندارد ASTM C1611 [2009] انجام شد.

آزمون مقاومت فشاری بر اساس ASTM C109 [2013] روی نمونه‌های مکعبی با بُعد ۵۰ میلی‌متر در سن ۷ و ۲۸ روزه انجام شد.

آزمون مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای بر اساس ASTM C1609 [2012] روی نمونه‌های منشوری ۳۵۰×۷۰×۵۰ میلی‌متر در سن ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. به منظور اندازه‌گیری خیز وسط دهانه نمونه‌های منشوری، از دو LVDT متصل به وسط دو وجه نمونه و با سرعت بارگذاری (۰/۰۰۵ میلی‌متر بر ثانیه) استفاده شد.

با توجه به عدم وجود استاندارد مشخص برای انجام آزمایش کشش مستقیم کامپوزیت‌های سیمانی، روش‌های متعددی به وسیله پژوهشگران بکار گرفته شده است. در این پژوهش از دو مدل دمبلی شکل یا (dogbone)، با پیکربندی‌های متفاوت استفاده شد. مدل ۱: دارای طول ۳۴۰ میلی‌متر، ضخامت ۱۶ میلی‌متر، عرض ۶۰ میلی‌متر در انتها و ۳۰ میلی‌متر در وسط بود. همچنین مدل ۲ (طراحی و

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مواد سیمانی

Composition (%)	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO+Na <sub>2</sub> O
cement	21.08	64.37	5.36	3.64	2.5
Fly ash	59.3	8.6	23.4	4.8	3.8
slag	35.2	39.1	11.1	0.65	11.1

Table 1. Chemical composition of cementitious materials

### ۴-۲ طرح اختلاط و ساخت مخلوط‌های ECC

طرح اختلاط مخلوط‌های ECC به صورت درصد وزنی، در جدول (۲) نشان داده شده است. برای تهیه مخلوط‌ها ابتدا سیمان، خاکستر بادی/سرباره و سنگدانه به صورت خشک به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط شدند. سپس محلول آب و فوق‌راون‌کننده در مدت ۳۰

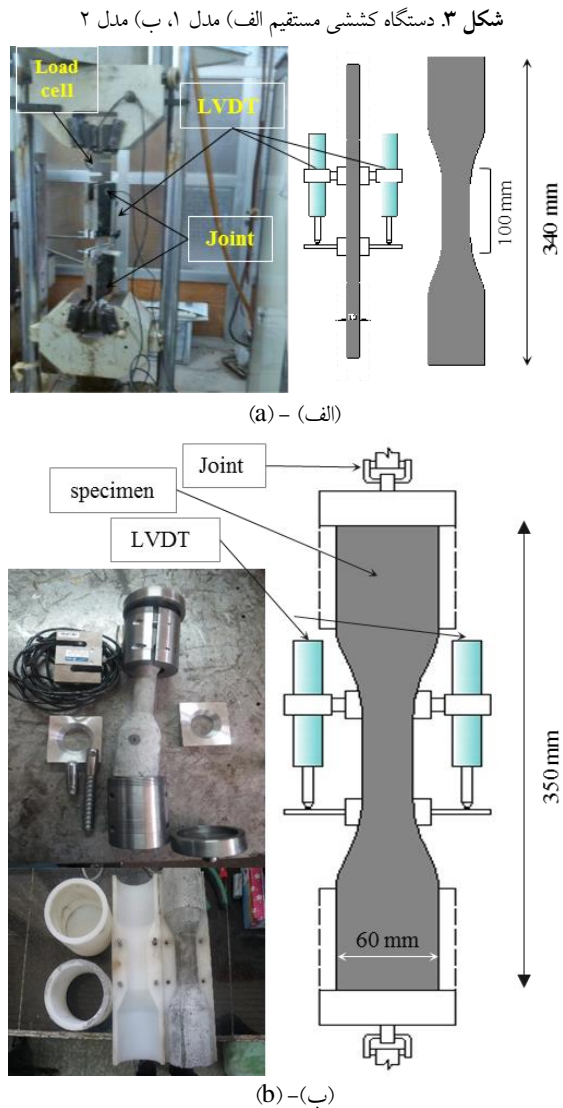


Fig. 3. Direct tensile setup: a) model 1, b) model 2

آزمونه‌های بکار رفته در این آزمایش استوانه‌های به قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، به همراه میلگرد قرار گرفته در مرکز آنها، به قطر اسمی ۱۲ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر بود. این آزمایش روی نمونه‌های ۲۸ روزه تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۳۰ ولت به مدت ۱۴ روز انجام شد شکل (۴). استوانه‌ها در داخل مخزن حاوی محلول ۵٪ وزنی سدیم کلراید و صفحه توری فلزی ضد زنگ و به صورت ۵۰ میلی‌متر بالاتر از تراز محلول قرار گرفتند. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از آزمایش‌های خواص مکانیکی و دوام بر اساس مقدار متوسط نتیجه حداقل سه نمونه برای هر طرح اختلاط بود.

ساخته شده به وسیله صدر ممتازی و طهمورسی - دانشگاه گیلان): دارای طول ۳۵۰ میلی‌متر، قطر ۶۰ میلی‌متر در انتها و قطر ۲۵ میلی‌متر در وسط بود (شکل ۳). هندسه نمونه‌ها در محل کاهش سطح مقطع، موجب ایجاد تنش‌های کششی یکنواخت و جلوگیری از گسیختگی‌های زودرس به دلیل تمرکز تنش کششی یا فشاری، می‌شود. برای حذف نیروهای احتمالی خمشی، پیچشی و برشی حول محورهای افقی و عمودی از دو مفصل تویی شکل، در دو انتهای فک‌های کششی متصل به نمونه کامپوزیت سیمانی استفاده شد. برای اندازه‌گیری تغییر مکان از دو LVDT متصل به قاب آلومینیومی پین شده به نمونه با سرعت بارگذاری (۰/۰۰۵ میلی‌متر بر ثانیه) استفاده شد. لازم به ذکر است که مساحت نمونه‌ها در وسط مقطع تقریباً برابر در نظر گرفته شد (مدل ۱: ۴۸ میلی‌متر مربع، مدل ۲: ۴۹ میلی‌متر مربع).

برای انجام آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر (RCPT)، بر اساس استاندارد ASTM C 1202 [2012] از استوانه بتنی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر، سه نمونه با ضخامت ۵۰ میلی‌متر تهیه شد. آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی (ESR) نمونه‌ها با استفاده از دو الکترود برنجی به صورت ورق در تماس با دو سطح جانبی و روبروی هم در نمونه مکعبی مقاومت فشاری (قبل از شکست) در حالت اشباع از آب و با اعمال جریان، مطابق رابطه (۳) تعیین شد.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)،  $R$  مقاومت الکتریکی (اهم)،  $L$  طول بین دو الکترود (ارتفاع نمونه) (متر) و  $A$  سطح تماس الکترودها با نمونه (سطح مقطع نمونه) (متر مربع) است. اندازه‌گیری در سن ۲۸ روز انجام شد.

آزمایش انقباض خشک مطابق استاندارد ASTM C157 [2014] روی نمونه‌های منشوری ۲۵×۲۵×۲۸۵ میلی‌متر به مدت ۹۱ روز انجام شد. آزمایش خوردگی تسریع شده میلگرد (ARC)، مشابه روش فلوریدا [20] و پژوهش‌های انجام شده توسط برخی پژوهشگران [21, 22] انجام شد.

تویب شدن الیاف می‌شود. به همین منظور، برای حفظ یکنواختی مخلوط، مقدار افزودنی فوق روان‌کننده به صورت محدود استفاده شد.

### ۵-۲- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مخلوط‌های ECC در جدول (۴) آمده است. مطابق نتایج، مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی سرباره بیشتر از مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی است. در سن ۷ روزه، مقاومت فشاری نمونه SL-SS در مقایسه با نمونه‌های حاوی خاکستر بیشتر از ۱۲٪ بالاتر بود، که سرعت کم فعالیت پوزولانی خاکستر بادی دلیل آن است. در سن ۲۸ روزه نیز مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی سرباره، کمینه ۱۵٪ در مقایسه با مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی بیشتر بود. حضور سرباره موجب کاهش رشد پرتلندیت و تخلخل ناحیه انتقال میان سطحی بین ماتریس- سنگدانه می‌شود که در نهایت بهبود کیفیت پیوند را به دنبال دارد [23]. حضور ماسه سیلیسی در مخلوط‌های ECC موجب افزایش مقاومت فشاری تا ۱۶٪ در مقایسه با مخلوط‌های حاوی ماسه رودخانه‌ای شده است که نوع ساختار و بافت سطحی ماسه سیلیسی و نیز بالاتر بودن سختی آن می‌تواند دلیلی بر این موضوع باشد.

### ۵-۳- آزمایش مقاومت خمشی

نتایج مقاومت خمشی و خیز وسط دهانه نمونه منشوری (در لحظات مختلف) در جدول (۴) آمده است. مخلوط‌های حاوی سرباره به نسبت مقاومت خمشی بالاتری را کسب کرده‌اند، که این اتفاق در مقاومت فشاری نیز رخ داد. مقاومت خمشی و متناسب با آن مدول گسیختگی، در ناحیه پسا اوج و پسا ترک، تابع ظرفیت پل زدگی الیاف و کیفیت پیوند بین تار و ماتریس است.

شکل ۴. شماتیک آزمایش خوردگی تسریع شده

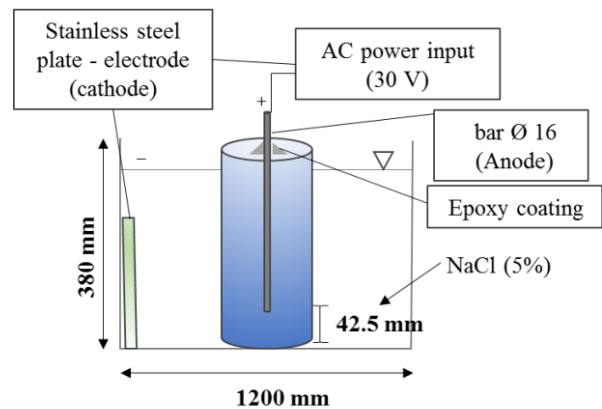


Fig. 4 Schematic of accelerated corrosion test

### ۵-۵- بحث و بررسی نتایج

#### ۵-۱- کارایی

نتایج جریان اسلامپ و  $T_{50}$  در جدول (۳) آمده است. مشاهده می‌شود که خاکستر بادی در اسلامپ عملکرد مطلوبی در مقایسه با سرباره از خود نشان می‌دهد. با نسبت آب به سیمان یکسان، با افزایش در مقدار فوق روان‌کننده در مخلوط حاوی سرباره نشانه‌هایی از آب انداختگی مشاهده می‌شود.

جدول ۳. نتایج اسلامپ و  $T_{50}$  مخلوط‌های ECC

Mix ID	Slump (mm)	$T_{50}$ (s)
FA-SS	535	2.87
FA-RS	515	3.5
SL-SS	480	-
SL-RS	470	-

Table 3: Results of ECC mixtures slump and  $T_{50}$

به دلیل گرد گوشگی کم ذرات سرباره در مقایسه با خاکستر بادی، سرعت بازشدگی قطر مخلوط در آزمون  $T_{50}$ ، بیشتر از ۵ ثانیه بود. همچنین مشاهد شد که افزودن مازاد فوق روان‌کننده موجب تجمع الیاف در بخش‌های مختلف مخلوط شده و به اصطلاح موجب

جدول ۴. خلاصه نتایج خواص مکانیکی

Mix ID	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)		Deflection corresponding to different stages of loading (mm)			Energy KN-failure (mm)	Toughness index
	7 days	28 days	7 days	28 days	First crack	Ultimate strength	Rupture		
FA-SS	27.4	55.3	10.2	12.3	0.42	5.46	3.6	49.5	39
FA-RS	24.5	49.5	8.8	11.25	0.44	4.45	5.27	37.4	29.6
SL-SS	30.7	73.8	13.1	15.1	0.46	1.2	2	19.8	7.4
SL-RS	26.5	63.5	10.8	13.5	0.56	1.6	2.2	16.5	13

Table 4. Summarizes results of mechanical properties



بعد از مقاومت پل زدگی الیاف، گسیخته شد.

شکل ۶. تغییر شکل و ترک خوردگی‌های متعدد نمونه ECC

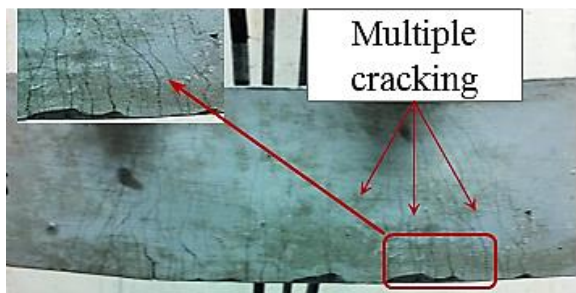


Fig. 6 Deformation and multiple cracking of ECC

انرژی شکست میزان مساحت زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های خمشی است. شاخص چقرمگی نیز، نسبت انرژی شکست به انرژی اولین نقطه ترک خوردگی، گفته می‌شود که خاصیت کرنش- سخت شوندگی مصالح را نشان می‌دهد. در جدول (۴) مقایسه بین مقاومت فشاری و انرژی شکست/ شاخص چقرمگی (بعد واحد) مخلوط‌های ECC را نشان می‌دهد، که مخلوط‌های حاوی خاکستر از پتانسیل بالایی برای بروز رفتار کرنش- سخت شونده برخوردارند. با توجه به رابطه مستقیم بین تنش اصطکاکی  $\tau_0$  و مقاومت فشاری، لازم است که مقدار کیفی اصطکاک در سطح مشترک ماترس/ الیاف کنترل شود، زیرا افزایش بیش از اندازه تنش اصطکاکی موجب گسیختگی زود رس الیاف تحت کشش (کاهش تنش پل زدگی)، که موجب کاهش  $J'$  می‌شود.

#### ۴-۵- آزمایش کشش مستقیم

منحنی‌های تنش کششی- کرنش مخلوط‌های ECC در شکل (۷) برای مدل کششی نوع ۱ و نوع ۲ آمده است. مانند نتایج حاصل شده در آزمایش خمشی، مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی سرباره از خود نشان دادند. در کشش مستقیم مدل نوع ۱ نمونه‌های حاوی خاکستر بادی و سرباره به ترتیب، بیشینه تا ۴٪ و ۳٪ کرنش و ۵/۴ و ۶/۳ مگاپاسکال مقاومت کششی از خود نشان دادند اما در کشش مستقیم نوع ۲ رفتار متفاوت و بهتری را از خود نشان دادند، به گونه‌ای که برای نمونه‌های حاوی خاکستر بادی کمینه ۵۱٪ کرنش و برای سرباره کمینه ۱۱٪ مقاومت کششی بالاتر بود. دلیل

حضور سرباره در مخلوط‌های ECC به شدت بر میزان خیز تاثیر داشته و نسبت به خاکستر بادی، عملکرد ضعیف‌تری داشته است، اما حضور ماسه سیلیسی تا حدودی میزان خیز را در مقایسه با مخلوط حاوی ماسه رودخانه‌ای افزایش داده است. حضور خاکستر بادی موجب کاهش پیوند شیمیایی بین سطح مشترک ماترس- الیاف و طاقت کششی شده است، از طرفی این موضوع موجب افزایش پتانسیل بروز رفتار کرنش- سخت شونده می‌شود [5].

منحنی‌های مقاومت خمشی- خیز مخلوط‌های ECC در شکل (۵) آمده است. با توجه به منحنی‌ها، سه نقطه برای آن‌ها قابل تعریف است. نقطه (I)، رفتار خطی. نقطه (II): شروع اولین ترک خوردگی، بروز رفتار غیر خطی و کاهش تدریجی مدول کشسانی (شیب نمودار) است، که کمی بعد از آن نمودار دچار افت و خیز شده که دلیل آن ایجاد ترک و سپس محبوس شدن آن و دوباره ایجاد ترک در نقطه دیگر است. نقطه (III): رفتار کرنش- سخت شونده و رسیدن به مقاومت نهایی، پس از این مرحله نمونه وارد ناحیه کرنش نرم شونده و گسیختگی می‌شود.

شکل ۵. منحنی مقاومت خمشی- خیز مخلوط‌های ECC

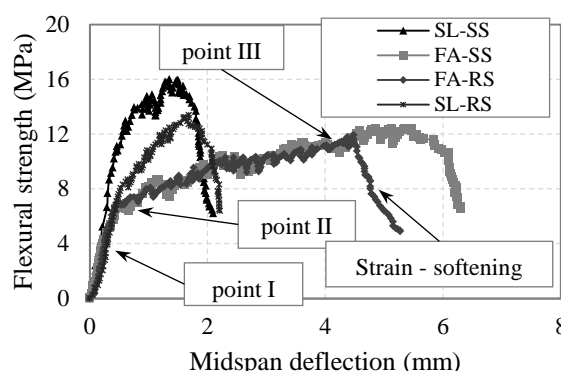
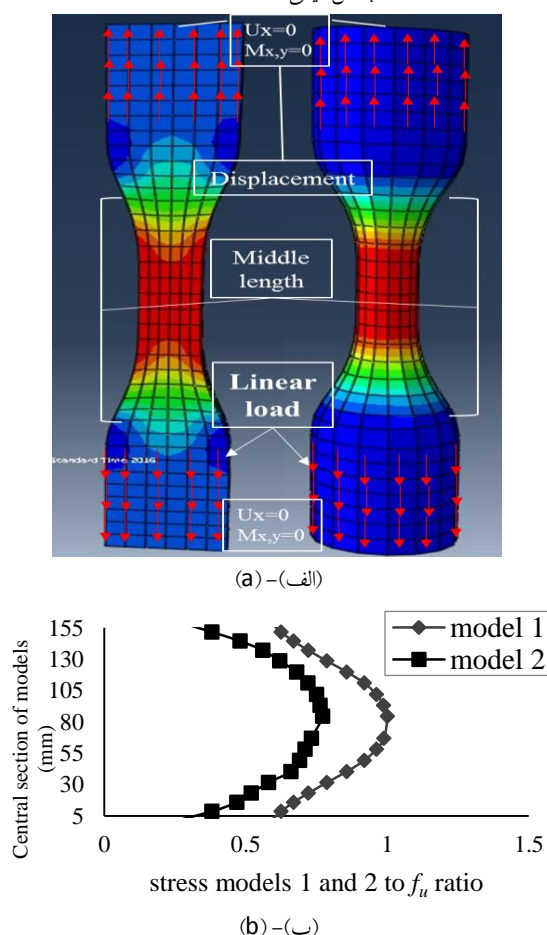


Fig. 5 Curve of deflection- flexural strength ECC mixture

در شکل (۶) نمونه منشوری حاوی خاکستر بادی تحت بارگذاری خمشی شبیه ورق فلزی انعطاف پذیر، تغییر شکل پلاستیک داده است. مشاهدات نشان داد که عمده ترک‌های اولیه از نوع ترک خمشی بودند، با افزایش بار، میکرو ترک متعددی شکل گرفت و با تجمع شدن آن‌ها، نمونه خمشی تغییر شکل پلاستیک را تجربه کرد. با ایجاد اولین ترک خوردگی، عرض ترک با افزایش تغییر شکل، به سرعت رشد کرد و با تشکیل متعدد میکرو ترک‌های بعدی، مقدار عرض ترک‌های اولیه در محدوده ۴۵ تا ۱۰۰ میکرون ثابت ماند. در نهایت با افزایش میکرو ترک‌ها و صعود آن‌ها به بالا، نمونه منشوری

شکل ۸ الف) مدل اجزاء محدود کشش مستقیم (چپ: مدل ۱، راست مدل ۲)،  
ب) نسبت تنش مدل ۱ و ۲ به  $f_{tu}$  (بیشینه تنش موجود در وسط ارتفاع  
بخش میانی مدل ۱ است)



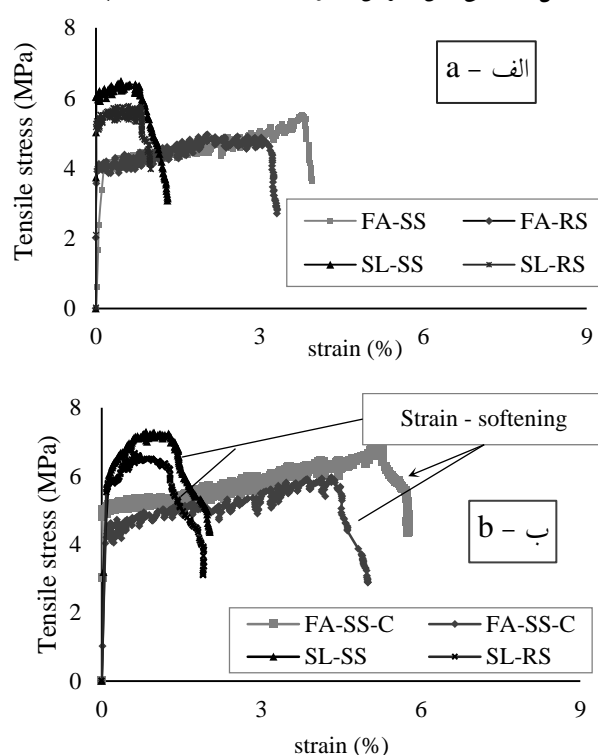
**Fig. 8** A) direct tension finite element model (left: model 1, right: model 2), b) stress models 1 and 2 to  $f_{tu}$  ratio. ( $f_{tu}$ : maximum tension in middle height of model 1 central section)

مشاهده می‌شود با وجود مساحت یکسان در قسمت میانی دو نمونه، تنش به وجود آمده در مدل ۱ نسبت به مدل ۲، تا ۲۲٪ بالاتر است که این مقدار در نتایج آزمایشگاهی حدود ۱۷٪ بود. وجود تمرکز تنش در حجم مدل ۱ و عدم کنترل و توزیع مناسب نیرو در سطح نمونه دلیل آن است به طوری که مقدار تنش در گوشه‌های کناری (کنج) مدل ۱ برخلاف مدل ۲ با مقدار تنش در مرکز اختلاف داشت. این نتایج به شناخت هر چه بهتر رفتار نزدیک به واقعیت مواد سیمانی با یا بدون الیاف، تحت مقاومت‌های کششی کمک می‌کند.

در نمونه‌های کشش مستقیم فاصله میان اولین ترک تا شکست نمونه، به همراه رفتار کرنش-سخت شونده، ترک‌های متعددی با عرض کمتر از ۳۵ تا ۴۰ میکرون در قسمت وسط نمونه‌ها در

این رفتار، عملکرد بهتر مدل نوع ۲ در انتقال و توزیع تنش‌های به وجود آمده در حجم نمونه است. همچنین با توجه به خواص سطوح هندسی دایره (در مدل ۲) تمرکز تنش کمتری را سبب می‌شود.

شکل ۷. منحنی تنش-کرنش مخلوط‌های ECC، الف) مدل ۱، ب) مدل ۲



**Fig. 7** Stress-strain curve of mixtures ECC, a) model 1, b) model 2

#### ۵-۴-۱- مدل سازی کشش مستقیم

برای درک بهتر مقایسه بین مقاومت کشش مستقیم مدل‌های ۱ و ۲ با استفاده از تحلیل اجزاء محدود مدلسازی شدند. لازم به ذکر است که هدف از مدلسازی نشان دادن اثر هندسه (ناحیه باریک شدگی) بر توزیع تنش و جرایان ورودی و خروجی نیرو بوده است. با فرض توزیع یکنواخت الیاف در سرتا سر حجم ماده و همچنین جهت‌گیری تصادفی الیاف‌ها می‌توان ECC را یک ماده همگن فرض کرد که ویژگی‌های کشسانی آن می‌تواند در جهات مختلف یکسان باشد. ضریب کشسانی  $E$  از نمودار تنش کرنش در کشش و فشار قابل محاسبه است، بر اساس مطالعات دیگران [۳، ۵ و ۶] با فرض قابل قبولی ضریب پواسون نیز ۰/۲ در نظر گرفته شد.

شکل ۸) مدل اجزاء محدود و نسبت تنش در قسمت میانی نمونه‌ها را تحت نیروی برابر نشان می‌دهد.



نیز کمتر است و برای یک ولتاژ ثابت شار عبوری بیشتر خواهد بود، با توجه به این موضوع با وجود یکسان بودن این دو آزمایش به لحاظ پایه فیزیکی، رابطه حاکم بین آن‌ها به صورت نمایی است.

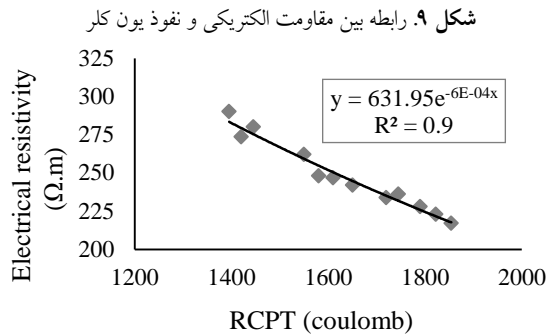


Fig. 9 Relationship between electrical resistivity and RCPT

#### ۵-۶- انقباض خشک

شکل (۱۰) میزان انقباض خشک مخلوط‌های ECC در مدت ۹۱ روز را نشان می‌دهد. ذرات هیدراته نشده خاکستر بادی/ سرباره در داخل ماتریس به عنوان سنگدانه عمل می‌کنند (موجب کاهش انقباض و حجم حفره‌ها) که این موضوع موجب کاهش نیروهای کشش سطحی هلال‌گون می‌شود، در نتیجه نیروهای انقباضی کمتری در اطراف خمیر سیمان ایجاد شده و انقباض کمتری اتفاق می‌افتد. بیشینه جمع‌شدگی نمونه‌های ECC، در محدوده ۱۰۸۶ تا ۱۲۲۰ میکرون بود که بیشترین آن مربوط به نمونه FA-RS و کمترین SL-SS است. همچنین، اثر اندازه سنگدانه‌ها تفاوت محسوسی در مقدار انقباض نداشت.

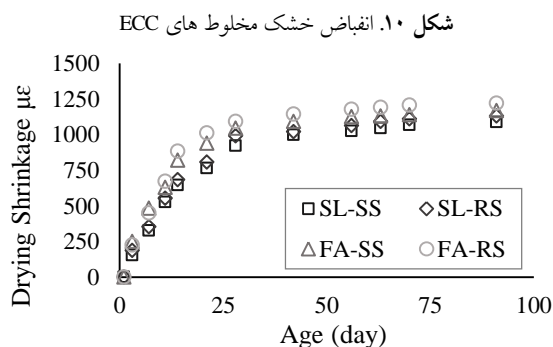


Fig. 10 Drying shrinkage of ECC mixtures

#### ۵-۷- خوردگی تسریع شده میلگرد

هنگامی که تش‌های کششی ایجاد شده توسط محصولات خوردگی، از مقاومت کششی مخلوط‌های بتن ECC، بیشتر می‌شود در قسمت بتن

فواصل نزدیک به هم ظاهر شد. میزان گستردگی و تعداد ترک‌های به وجود آمده در نمونه کششی مدل نوع ۲ در مقایسه با مدل نوع ۱ بیشتر بود و رفتار به نسبت نرم‌تری در زمان گسیختگی نسبت به مدل ۱ از خود نشان دادند (منحنی مخلوط‌های ECC در شکل (۸-ب) رفتار کرنش-نرم شونده داشتند که بازگو کننده این موضوع است).

#### ۵-۵- نفوذ تسریع شده یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی

شار الکتریکی عبوری از مخلوط‌های ECC در جدول (۵) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مخلوط‌های حاوی سرباره در مقایسه با مخلوط‌های حاوی خاکستریادی عملکرد بهتری داشته‌اند، به گونه‌ای که، تا حدود ۲۲٪ موجب کاهش شار عبوری شده است. که عمده دلایل آن در بخش نتایج خواص مکانیکی آورده شده است. تاثیر تفاوت در نوع سنگدانه‌ها، بر مقدار نفوذ کلراید چندان محسوس نیست.

مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط‌های ECC در جدول (۵) آمده است. مقاومت ویژه الکتریکی یکی از ویژگی‌های ذاتی ماده است که نشان دهنده توانایی انتقال بار الکتریکی در فضای درونی کامپوزیت است و عمدتاً به ساختار شیمیایی سنگدانه‌ها و ماتریس سیمانی، نوع و شکل حفره‌ها و ترکیب محلول حفره‌ای بستگی دارد. خواص مقاومت ویژه الکتریکی مشابه نفوذ یون کلراید است که رابطه غیر مستقیم میان شان حاکم است.

جدول ۵. خلاصه نتایج نفوذ تسریع شده یون کلر، مقاومت ویژه الکتریکی و درصد

کاهش جرم میلگرد

Mix ID	Mass loss (%)			ESR (Ω.m)	RCPT (Coulombs)
	14 days	9 days	5 days		
FA-SS	24.8	15.9	3.5	236	1695
FA-RS	25.1	16.2	3.8	223	1822
SL-SS	22.9	14.3	2.8	30.5	1420
SL-RS	23.9	15.7	3.1	263	1580

Table. 5 Summarizes results of RCPT, electrical resistivity and reinforcement mass loss

رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و نفوذ یون کلراید در شکل (۹) آمده است که به صورت نمایی و با ضریب همبستگی  $R = 0.9$  است. قابل ذکر است که ولتاژ بالای به کار رفته در آزمایش نفوذ یون کلراید، منجر به افزایش دمای قابل توجهی می‌شود. هر قدر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون‌ها کمتر باشد مقاومت الکتریکی آن

شده با نفوذ یون کلر تسریع شده (با ضریب همبستگی  $R=0.73$ ) و مقاومت ویژه الکتریکی (با ضریب همبستگی  $R=0.74$ ) را نشان می‌دهد.

پس از شکستن استوانه‌های تحت خوردگی، میلگرد فلزی از داخل آن خارج شده و میزان کاهش جرم آن (در سنین ۵، ۹ و ۱۴ روزه) اندازه‌گیری شد. قبل از توزین، میلگردها ابتدا ۵ ساعت در محلول آب و اسید هیدروکلریک قرار گرفت و با برس و آب مقطر شستشو شدند تا هم اثر اسید خشی شود و هم زنگار پاک شود. میزان درصد کاهش جرم میلگرد در جدول (۵) آمده است. در ساعات اولیه کاهش جرم بسیار کم بود (حدود ۱٪) و با رسیدن به انتهای آزمایش، میزان افت جرم، کمینه ۲۲٪ و بیشینه ۲۵٪ رسید.

شکل ۱۲. رابطه جریان عبوری با: الف) نفوذ یون کلراید و ب) مقاومت الکتریکی

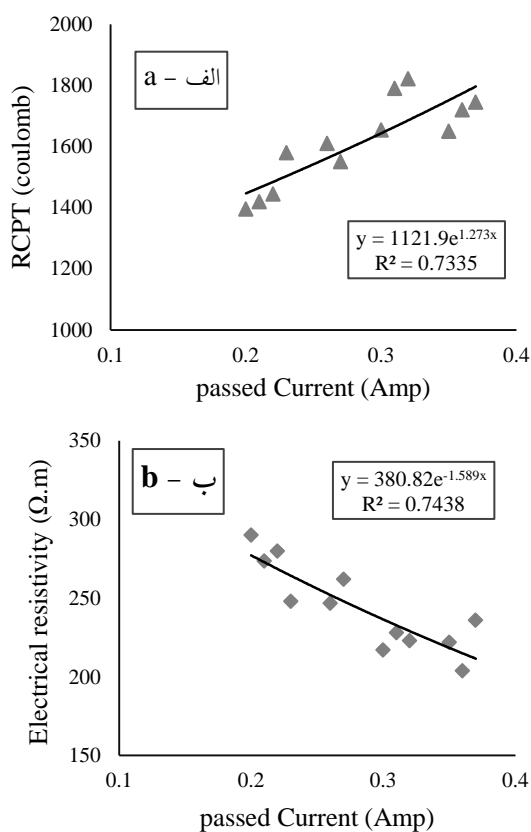


Fig. 12. Passed current relation with: a) RCPT and b) electrical resistivity

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش کارایی، خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) بررسی شد که نتایج زیر قابل استخراج است:

پوشش ترک‌خورده و خوردگی بیشتری در فولاد اتفاق می‌افتد. ترک‌خوردگی، موجب نفوذ محلول کلراید به داخل ماتریس، و ایجاد تماس مستقیم آن با سطح میلگرد می‌شود که افزایش جریان عبوری را به دنبال دارد. افزایش جریان (آمپر) عبوری با ولتاژ ثابت افت مقاومت الکتریکی را به همراه دارد و نیز موجب افزایش سرعت فرآیند خوردگی می‌شود. نتایج جریان به عنوان تابعی از زمان، تحت اختلاف پتانسیل ثابت در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

شکل ۱۱. نمودار جریان-زمان مخلوط‌های ECC

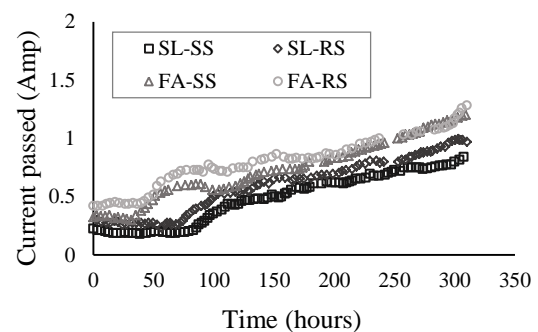


Fig. 11 Corrosion current- time curve of ECC mixtures

مقدار جریان عبوری از زمان آغاز آزمایش، در هر لحظه ثبت شد (منحنی جریان- زمان). مشاهده می‌شود که جریان عبوری از نمونه‌های ECC بسیار پایین است و تا پنجاه ساعت اول جریان عبوری در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ آمپر است. در کامپوزیت‌های ECC، نرخ پایین آب به مواد سیمانی، و استفاده از مواد معدنی پوزولانی (خاکستر بادی/ سرباره کوره) موجب افزایش تراکم ماتریس، انسداد ریز کانال‌ها، کاهش حجم حفره‌ها و کاهش ضخامت ناحیه انتقال میان سطحی بین الیاف- ماتریس می‌شود که می‌توان علت پایین بودن جریان عبوری را توجیه کند. در طول اندازه‌گیری جریان اولیه نمونه‌ها مشاهده شد که شروع ترک ابتدا پس از ثابت بودن جریان در یک بازه زمانی، با تغییر ناگهانی جریان اتفاق می‌افتد که این امر ناشی از وقوع ترک‌های ریز در بتن و برقراری ارتباط بیشتر محلول با آرماتور است افزایش آنی جریان (آمپر) برای نمونه‌های حاوی خاکستر بادی در زمان ۳۰ و ۴۰ ساعت نخست و نیز برای مخلوط‌های حاوی سرباره در زمان ۶۰ و ۸۰ ساعت نخست روی داد. جریان عبوری اولیه تسریع شده با مقاومت الکتریکی رابطه معکوس و با میزان انتشار یا نفوذ یون کلراید رابطه مستقیم دارد. شکل (۱۲- ب، پ) به ترتیب رابطه بین جریان عبوری اولیه تسریع

## References

## مراجع

- [1] Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G, Swamy RN. Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 46:31-38.
- [2] Barros JA, Cunha VM, Ribeiro AF, Antunes JA. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2005;38(1):47-56.
- [3] Li VC, Wu C, Wang S, Ogawa A, Saito T. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*. 2002;99(5):463-472.
- [4] Yang EH, Sahmaran M, YINGZI Y, Li VC. Rheological control in production of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 2009;106(4):357-366.
- [5] Wang S, Li VC. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal*. 2007;104(3):233-241.
- [6] Ranade R, Zhang J, Lynch JP, Li VC. Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*. 2014; 58:1-2.
- [7] Yildirim G, Sahmaran M, Al-Emam MK, Hameed RK, Al-Najjar Y, Lachemi M. Effects of Compressive Strength, Autogenous Shrinkage, and Testing Methods on Bond Behavior of High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 2015;112(3).
- [8] Zhang Q, Li VC. Development of durable spray-applied fire-resistive Engineered Cementitious Composites (SFR-ECC). *Cement and Concrete Composites*. 2015; 60:10-16.
- [9] Maalej M, Li VC. Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1994;6(4):513-28.
- [10] Pan Z, Wu C, Liu J, Wang W, Liu J. Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*. 2015; 78:397-404.
- [11] Şahmaran M, Lachemi M, Hossain KM, Ranade R, Li VC. Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*. 2009;106(3):308-16.
- [12] Yang EH, Li VC. Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. *Construction and Building Materials*. 2010;24(2):130-9.
- [13] Marshall DB, Cox BN. A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites. *Mechanics of materials*. 1988;7(2):127-133.
- [14] Li VC, Leung CK. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*. 1992;118(11):2246-2264.
- [15] Kanda T, Li VC. New micromechanics design theory for pseudo strain hardening cementitious composite. *Journal of engineering mechanics*. 1999;125(4):373-381.
- [16] Li VC, Wu HC. Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. *Applied Mechanics Reviews*. 1992;45(8):390-398.
- [17] Redon C, Li VC, Wu C, Hoshiro H, Saito T, Ogawa A. Measuring and modifying interface properties of PVA fibers
- خاکستر بادی در آزمایش کارایی (اسلامپ/  $T_{50}$ ) عملکرد بهتری در مقایسه با سرباره از خود نشان داد. همچنین استفاده بیش از اندازه از فوق روان کننده موجب تویی شدن الیاف و در مخلوطهای حای سرباره موجب بروز آب انداختی شد.
- حضور سرباره در مخلوطها موجب افزایش کمیته ۱۵٪ مقاومت فشاری، در مقایسه با مخلوطهای حاوی خاکستر بادی شد. همچنین جایگزینی ماسه سیلیسی با ماسه رودخانه تا ۱۶٪ موجب بهبود مقاومت فشاری شد.
- مخلوطهای حاوی خاکستر بادی مقاومت خمشی کمتری در مقایسه با سرباره داشتند، اما عملکرد آنها به طور قابل توجهی در بروز رفتار کرنش- سخت شونده در ناحیه پسا ترک بالاتر بود. همچنین حضور خاکستر بادی کمیته ۲/۴ برابر خیز و ۲/۲ برابر انرژی شکست را افزایش داد.
- مقایسه بین دو مدل اندازه گیری مقاومت کشش مستقیم مخلوطهای ECC، نشان داد که مدل نوع ۲ (شبهه استوانه)، کمیته ۱۱٪ مقاومت کششی و ۵۱٪ کرنش (تا ناحیه گسیختگی) بالاتری داشت و در نقطه گسیختگی، شکست نرم تری با بروز رفتار کرنش- نرم شونده، داشتند. نتایج مدل سازی و تحلیل اجزاء محدود نشان داد که تحت بارگذاری یکسان، حدود ۲۲٪ تنش بیشتری در مدل نوع ۱ به وجود می آید که در نتایج آزمایشگاهی این عدد حدود ۱۷٪ بود.
- مخلوطهای حاوی سرباره تحت آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید، در مقایسه با مخلوط های حاوی خاکستر بادی عملکرد بهتری داشته اند، به طوری که، تا حدود ۲۲٪ موجب کاهش شار عبوری شده است. همچنین در آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی تا ۳۶٪ مقاومت بالاتری از خود نشان دادند.
- کرنش مخلوطهای ECC تحت آزمایش انقباض خشک، در محدوده ۱۰۸۶ تا ۱۲۲۰ میکرون بود که بیشترین آن مربوط به نمونه FA-RS و کمترین SL-SS است.
- جریان عبوری از نمونه های ECC تحت آزمایش خوردگی تسریع شده، تا پنجاه ساعت اول در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ آمپر بود. اولین میکرو ترک برای نمونه های حاوی خاکستر بادی و سرباره به ترتیب در زمان ۳۰ - ۴۰ و ۶۰-۸۰ ساعت نخست روی داد. همچنین میزان بیشینه کاهش جرم میلگرد مدفون در مخلوطهای مختلف کمیته ۲۲٪ و بیشینه ۲۵٪ بود.

- [21] Hassan AA, Lachemi M, Hossain KM. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement and concrete composites*. 2012;34(6):801-7.
- [22] Binici H, Aksogan O, Durgun MY. Corrosion of basaltic pumice, colemanite, barite and blast furnace slag coated rebars in concretes. *Construction and Building Materials*. 2012; 37:629-37.
- [23] Duan, P., Shui, Z., Chen, W. and Shen, C., Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 44:1-6.
- in ECC matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2001;13(6):399-406.
- [18] Li VC, Wang Y, Backer S. Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites*. 1990;21(2):132-140.
- [19] Lin Z, Li VC. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1997;45(5):763-787.
- [20] Florida DO. Florida method of test for an accelerated laboratory method for corrosion testing of reinforced concrete using impressed current. FM 5. 2000;522.

# Evaluation of Mechanical Properties and Durability of Engineered Cementitious Composites (ECC)

A. Sadrmomtazi<sup>1\*</sup>, B. Tahmouresi<sup>2</sup>

1. Associate Professor of Civil Engineering, Technical Faculty, University of Guilan

2. M.Sc in Civil Engineering, Technical Faculty, University of Guilan

\*sadrmtazi@yahoo.com

## Abstract:

One major weakness of concrete is the brittle fracture behavior in tension, with low tensile strength and ductility. This brittleness has been recognized as a bottleneck hindering structural performances in terms of safety, durability and sustainability. The lack of structural ductility is due to brittle nature of concrete in tension which may lead to loss of structural integrity. Many infrastructure deterioration problems and failures can be traced back to the cracking and brittle nature of concrete. Many attempts have been made in recent years to overcome these problems. To effectively solve these severe problems in recent decades, a new type of composite, called Engineered Cementitious Composites (ECC), reducing the brittle behavior of concrete, has been developed. ECC with its flexible processing has emerged from laboratory testing to field applications leading to speedy construction, reduced maintenance and a longer life span for structures. Micromechanical design allows optimization of ECC for high performance, resulting in extreme tensile strain capacity, while minimizing the amount of reinforcing fibers typically to less than 2% of volume. Tensile strain capacity exceeding 5% has been demonstrated on ECC reinforced with polyethylene and polyvinyl alcohol (PVA) fibers. Unlike ordinary cement-based materials, ECC strain hardens after first cracking, similar to a ductile metal, and demonstrates a strain capacity 350 to 550 times greater than normal concrete. Even at large imposed deformation, crack widths of ECC remain small, i.e. less than 80  $\mu\text{m}$ . With intrinsically tight crack width and high tensile ductility, ECC represents a new generation of high performance concrete (HPC) material that offers significant potential to naturally resolving the durability problem of reinforced concrete structures. In the past few decades, substitution of mineral admixtures, such as fly ash (FA) and Ground Blast-Furnace Slag (GBFS), has been of great interest and gradually applied to practical applications of ECC. It has been found that incorporating high amount of FA can reduce the matrix toughness and improve the robustness of ECC in terms of tensile ductility. Additionally, Unhydrated FA particles with small particle size and smooth spherical shape serve as filler particles resulting in higher compactness of the fiber/matrix interface transition zone that leads to a higher frictional bonding. This aids in reducing the steady-state crack width beneficial for long-term durability of the structure. In this study, the workability, mechanical properties and durability of ECC different mixtures contains two mineral materials (slag / fly ash) as to replace part of the cement weight and two types aggregate (Silica/ River sand) were evaluated. The results showed that mixtures containing fly ash, despite their lower mechanical strength compared to mixtures containing slag, have significantly higher performance in strain-hardening behavior at post-cracking portion. ECC mixtures performance was appropriate in the durability test (Rapid chloride penetration, Electrical Specific Resistivity, Drying Shrinkage and Accelerated Reinforcement Corrosion) and formed slag fly ash. In this study, in order to calculate the direct tensile strength of ECC mixtures, a new model with different geometry -compared to other models used by previous researchers- was proposed and tested. Results showed that the tensile strength, measured in the new model, was 10% to 17% higher compared to the previous models

**Keywords:** Engineered cementitious composites, Mechanical properties, durability