

# طراحی و ساخت کامپوزیت ECC با الیاف پلی وینیل الکل و برآورد آزمایشگاهی و تحلیلی ویژگی های مهندسی کامپوزیت جدید

ایوب دهقانی\* (استادیار)

دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

فریبرز ناطقی الهی (استاد)

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص ۴۵-۵۷)  
دربی ۲-۳، شماره ۱/۱، ص ۴۵-۵۷

خصوصیات کششی، فشاری و خمشی یک کامپوزیت سیمانی توانمند با نام کامپوزیت سیمانی مهندسی یا ECC که مسلح به الیاف پلی وینیل الکل است، با استفاده از چیدمان های دقیق آزمایشگاهی برآورد شده و نمودارهای تنش - کرنش کششی، فشاری و رفتار سخت شوندگی کرنشی آن ارزیابی شده است. نتایج نشان دهنده رفتار منحصر به فرد این ماده در کشش و ظرفیت کرنشی بسیار زیاد ناشی از ترک خوردگی های متعدد است. همچنین رفتار خمشی این ماده با آزمایش خمش چهار نقطه‌یی برآورد و با عملکرد خمشی بتن الیافی معمولی مقایسه شده است، که ظرفیت تغییرشکلی بسیار بالا به همراه رفتار سخت شوندگی خمشی ECC را در مقایسه با ظرفیت تغییرشکلی کم و رفتار نرم شوندگی خمشی بتن الیافی معمولی تأیید می کند. نتایج نشان دهنده قابلیت استفاده از این ماده در مقاوم سازی سازه هاست. همچنین روشی برای مدل سازی تحلیلی این ماده بر مبنای مدل ترک پخش شده با کرنش تجزیه شده و رفتار چند خطی سخت شوندگی در کشش و خمیرسانی دراگر-پراگر پیشنهاد شده است. نتایج تحلیلی اجزاء محدود نشان می دهد که روش مدل سازی پیشنهادی می تواند با دقت قابل قبولی رفتار این ماده را در بارگذاری های مختلف پیش بینی کند.

واژگان کلیدی: کامپوزیت سیمانی مهندسی، رفتار سخت شوندگی کرنشی، ترک خوردگی های متعدد، مدل ترک پخش شده.

a.dehghani@pgu.ac.ir  
nat.eghi@iiees.ac.ir

## ۱. مقدمه

کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC)<sup>۱</sup> نوع منحصر به فردی از کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند است، که به صورت مهندسی و بر اساس علم میکرومکانیک مواد طراحی شده است؛ تا در بارگذاری های کششی و برشی شکل پذیری بالاتر از ۳ تا ۴ درصد از خود نشان دهد.<sup>[۱،۲]</sup> ECC دارای ۲٪ حجمی الیاف های پلی وینیل الکل<sup>۳</sup> با طول ۸ یا ۱۲ میلی متر است، که سبب می شود این کامپوزیت خصوصیات ویژه‌یی مانند خود تراکم بودن و یا قابلیت بتن پاشی<sup>۵</sup> را داشته باشد.<sup>[۴]</sup> چنین شکل پذیری بالایی با بهینه سازی ریزساختار کامپوزیت با استفاده از مدل های میکرومکانیکی که اندرکنش میان الیاف، ماتریس و مرز میان این دو را مدل سازی می کند، حاصل شده است.<sup>[۵]</sup> مدل های میکرومکانیک ضوابطی را برای متناسب کردن این سه فاز در اختیار طراح قرار می دهند تا با کمک آن و فقط با استفاده از مقدار حجمی متوسطی از الیاف (۲٪ حجمی)، کامپوزیت ساخته شده عملکرد مطلوبی داشته باشد. بنابراین ECC را می توان یک کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی توانمند بهینه سازی شده به حساب آورد.

کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC)<sup>۱</sup>، دسته‌ی خاصی از کامپوزیت های سیمانی الیافی را تشکیل می دهند، که در بارگذاری کششی مستقیم پس از اولین ترک خوردگی، رفتار سخت شوندگی کرنشی همراه با ترک خوردگی های متعددی را قبل از تمرکز ترک و گسیختگی نهایی از خود نشان می دهند.<sup>[۱]</sup> به طور کلی هدف از به کار بردن صفت توانمند برای این مواد، متمایز ساختن آنها از مواد سنتی است، که در حال حاضر به طور گسترده در ساخت سازه ها استفاده می شوند و فرایند ساخت و یا تولید آنها شناخته شده و در دسترس است. از ویژگی های متمایز این مواد نسبت به بتن های معمولی و یا بتن های الیافی<sup>۲</sup> می توان به شکل پذیری، ظرفیت جذب انرژی، و دوام زیاد اشاره کرد؛ که در سال های اخیر سبب توجه پژوهشگران مهندسی زلزله به این مواد شده است.

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱/۲۱، پذیرش ۱۳۹۱/۸/۲۷.

نتایج پژوهش‌ها مختلف انجام شده بر روی کاربردهای ECC در المان‌های سازه‌یی، گویای این واقعیت است که این ماده می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای بتن‌های معمولی و یا بتن‌های الیافی در اعضای باشد که قابلیت‌های خاصی همچون شکل‌پذیری زیاد و یا ظرفیت زلزله و مقاومت‌سازی از جمله نقاطی است که زمینه‌های کاربردی مهندسی زلزله و مقاوم‌سازی از جمله نقاطی است که پتانسیل استفاده از ECC را به خوبی دارد. از جمله اعضای سازه‌یی ساخته شده با این کامپوزیت که رفتار آنها تحت بارگذاری‌های سیکلی و یکنواخت با آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی شده است، شامل: تیر، [۷۶] ستون، [۸] اتصال تیر به ستون، [۹] قاب، [۱۰] و تیرهای کوبه [۱۱] هستند.

پارامترهای رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف‌های مختلف تا حدودی توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مثال، برخی پژوهشگران رفتار کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با درصد‌های متفاوتی از الیاف فولادی کوتاه را مورد بررسی قرار دادند. [۱۲] آنها همچنین رفتار سخت‌شوندگی و نسبت مقاومت خمشی به کششی ECC ساخته شده با الیاف‌های PE و PVA را با استفاده از آزمایش‌های کشش مستقیم و خمش چهارنقطه‌یی<sup>۶</sup> برآورد کرده‌اند. [۱۳، ۱۴] رفتار چرخه‌یی این مواد نیز در پژوهش دیگری مطالعه شده است، [۱۵] و نشان داده شده است که رفتار ECC تحت بارگذاری کششی مستقیم دارای تطابق خوبی با پوش رفتار چرخه‌یی است. عملکرد مکانیکی ECC با قابلیت بتن پاشی، به منظور معرفی این ماده برای تعمیر و تقویت سازه‌ها با استفاده از تست‌های کششی و خمشی در پژوهش دیگری مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله از آن نشان داده است که این ماده در حالت پاشیده شده، رفتار مشابهی نسبت به حالت درجا ریخته شده از خود نشان می‌دهد. [۱۶]

از آنجا که اجزاء سازنده کامپوزیت سیمانی می‌تواند متناسب با نیاز طرح تغییر کند، مطالعاتی نیز بر اساس تغییر اجزاء سازنده این مواد شامل تغییر در اجزاء ماتریس سیمانی و تغییر در نوع الیاف انجام شده است. برای مثال، در پژوهشی تأثیر افزایش میزان خاکستر بادی<sup>۷</sup> در رفتار مکانیکی ECC با فرض ثابت بودن دیگر اجزاء سازنده کامپوزیت، به صورت کاهش مقاومت کششی گزارش شده است. [۱۷] در پژوهش دیگری نیز عملکرد کامپوزیت سیمانی با الیاف پلیمری و فولادی تحت بارگذاری کششی دینامیکی و ضربه‌یی آزمایش شده است، [۱۸] و این نتیجه به دست آمده است که الیاف فولادی فقط می‌توانند ضامن نیاز طراح به مقاومت نهایی باشند و برای رسیدن به ظرفیت کرنشی مورد نظر، شکست شکل‌پذیر و عدم پاشیدگی کامپوزیت تحت بارهای ضربه‌یی نیاز به استفاده از الیاف‌های پلیمری همچون PVA و PE است. اگرچه استفاده از الیاف فولادی سبب کاهش شکل‌پذیری کامپوزیت و حتی از میان رفتن رفتار سخت‌شوندگی آن می‌شود، اما برخی پژوهشگران نشان دادند که با ترکیب صحیح این دو الیاف همچنان می‌توان رفتار سخت‌شوندگی کرنشی را برای کامپوزیت تضمین کرد. [۱۹] تأثیر نوع سنگدانه و اندازه آن، که یکی از اجزاء اساسی ECC به شمار می‌رود، در خصوصیات مکانیکی این ماده در پژوهشی بررسی شده است. [۲۰] نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان سنگدانه‌های سیلیسی با قطر بیشینه‌ی ۲۰ میکرومتر را که ممکن است کمتر در دسترس باشند، با سنگدانه‌های درشت‌تر جایگزین کرد و رفتار کششی شکل‌پذیر و ترک‌خوردگی‌های متعدد را همچنان از کامپوزیت ECC انتظار داشت.

از آنجا که بیشتر تحقیقات اشاره شده به بخش خاصی از خصوصیات رفتاری ECC پرداخته‌اند و کمتر پارامترهای مکانیکی این ماده با یک طرح اختلاط یکسان در قالب یک پروژه‌ی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، مؤلفان این نوشتار بر آن شدند تا در حد امکان پارامترهای رفتاری ECC را با توجه به مصالح در دسترس

در کشور و با انجام آزمایش‌های بسیار دقیق به دست آورند. خصوصیات رفتاری به دست آمده در این پژوهش می‌تواند برای دیگر پژوهشگران به‌عنوان یک مبنای مقایسه قرار گیرد. همچنین مدل‌سازی اجزاء محدود این مواد که عموماً نیازمند پارامترهای دقیق آزمایشگاهی است، می‌تواند بر اساس نتایج این پژوهش استوار شود.

## ۲. اهمیت پژوهش

ترد شکن بودن بتن و برخی از کامپوزیت‌های سیمانی به‌عنوان اساسی‌ترین عامل در جلوگیری از عملکرد مطلوب اعضای سازه‌یی، مانند شکل‌پذیری تحت نیروهای برشی و کششی، شناخته شده است. اگرچه بتن‌های الیافی متعارف با رفتار نرم‌شوندگی کششی اندکی این مشکل را کمتر کرده‌اند، اما عملکرد سازه‌یی بسیار مطلوبی که از کامپوزیت‌های سیمانی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی مشاهده شده و برخی از آنها در بخش مقدمه آورده شده است، هرگز از طریق بتن‌های الیافی متعارف قابل دست‌یابی نیست.

در این پژوهش یکی از کامپوزیت‌های سیمانی با نام ECC که دارای ۲٪ حجمی الیاف پلی‌وینیل الکل است، ساخته شده و آزمایش‌های مصالح بر روی آن با موفقیت انجام شده است. این پژوهش نشان می‌دهد که ECC را می‌توان به سادگی و با توجه اقتصادی تولید کرد و با توجه به درصد کم الیاف پلیمری و کارایی بسیار بالای آن در اعضای مختلف سازه‌یی همچون اتصالات تیر-ستون، تیرهای هم‌بند، بخش‌هایی از دیوار برشی، و همچنین در مقاوم‌سازی سازه‌ها به کار برد.

## ۳. اصول طراحی ECC از دیدگاه میکرومکانیک

اصول طراحی و متناسب‌سازی ریزساختار یک کامپوزیت برای رسیدن به عملکرد مورد نظر بر اساس درک اندرکنش مکانیکی میان فازهای الیاف، ماتریس و مرز میان این دو است و اگر یک کامپوزیت بر پایه‌ی چنین بینشی طراحی شده باشد، در اصطلاح به آن کامپوزیت مهندسی شده گفته می‌شود و به چنین فلسفه‌یی، طراحی بر پایه‌ی عملکرد کامپوزیت گفته می‌شود. اندرکنش میان سه فاز در ECC با استفاده از مدل‌های میکرومکانیک که در واقع ارتباط میان عملکرد کامپوزیت و پارامترهای میکرومکانیکی مصالح را نشان می‌دهد، به صورت کثی در مدارک فنی معرفی شده است. [۵] در طراحی ECC سه مجموعه پارامتر وابسته به فازهای الیاف، ماتریس و مرز این دو مشارکت دارند. پارامترهای الیاف شامل درصد حجمی  $V_f$ ، طول  $L_f$ ، قطر  $d_f$ ، مدول کشسانی  $E_f$  و مقاومت کششی  $\sigma_{fu}$  الیاف است. فاز ماتریس بر اساس پارامترهای طاقت شکست  $K_m$ ، مدول کشسانی  $E_m$  و توزیع اندازه‌ی حفره‌ها  $a_c$ ، و فاز مرزی بر اساس تنش اصطکاکی مرزی  $\tau_c$  و چسبندگی شیمیایی  $G_d$  شناخته می‌شوند. [۲۱] رفتار سخت‌شوندگی لغزشی پارامتر دیگری است که در ECC ارزیابی شده است، که با  $\beta$  نشان داده می‌شود و خاصیت آب دوست بودن الیاف PVA و خصوصیات ریزساختاری آن را وارد مدل‌سازی می‌کند. [۲۲] پارامترهای یادشده در واقع کلیه پارامترهایی هستند که در طراحی کامپوزیت سیمانی نقش دارند و هدف از بیان آنها، معرفی خصوصیات مکانیکی سه فاز تشکیل‌دهنده کامپوزیت است که در عملکرد سازه‌یی اعضای ساخته شده از آن تأثیر مستقیم دارند. از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی ریزساختار کامپوزیت سیمانی نیست، از بیان روابط مرتبط خودداری می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به آنکه رفتار نرم‌شوندگی و ظرفیت کرنشی کم در اغلب مواد سیمانی به‌عنوان دو عامل اصلی در

همچنین رابطه‌ی تنش - بازشدگی ترک  $\sigma(\delta)$  که به‌منزله‌ی یک قانون ساختاری برای کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی به‌شمار می‌رود، با استفاده از ابزارهای تحلیلی مکانیک شکست، میکرومکانیک، و آماری به‌دست آمده است. برای مثال، با استفاده از روابط حاکم بر انرژی فعال‌شده به دلیل انتشار ترک تونلی در مرز الیاف و ماتریس، فرایند جدایش الیاف از ماتریس و نیروی پل‌بندی یک الیاف با طول مغروق مشخص، به‌صورت کمی درآورده شده است.<sup>[۲۵]</sup> همچنین برای توصیف توزیع تصادفی درزهای اولیه در ماتریس و نیز موقعیت و جهت‌گیری تصادفی الیاف‌ها از علم آمار کمک گرفته شده است.<sup>[۲۶، ۲۷]</sup> به‌علاوه طبیعت جهت‌گیری تصادفی الیاف‌ها، ضرورت استفاده از علم میکرومکانیک در محاسبه‌ی اندرکنش میان یک الیاف مورب و ترک ماتریس را بیان می‌کند.

دومین شرط برای بروز رفتار سخت‌شوندگی کرنشی آن است که مقاومت اولین ترک کششی  $\sigma_{fc}$  از بیشینه‌ی تنش پل‌بندی الیاف  $\sigma$  تجاوز نکند. به عبارت دیگر باید رابطه‌ی ۴ برقرار باشد:

$$\sigma_{fc} < \sigma \quad (4)$$

که در آن،  $\sigma_{fc}$  بر اساس بیشینه‌ی اندازه‌ی درزها در ماتریس  $\text{Max}[a_0]$  و طاقت شکست ماتریس  $K_m$  قابل تعریف است.<sup>[۲۸]</sup> بنابراین اگر در یک کامپوزیت سیمانی الیافی دو رابطه‌ی ۳ و ۴ برقرار باشد، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی قابل حصول است و در غیر این صورت باید انتظار رفتار نرم‌شوندگی کرنشی بتن‌های الیافی معمولی را داشت. مطالعات عددی به کمک مدل‌های میکرومکانیک ذکرشده به منظور برآورد پارامترهای ریزساختار ECC با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی انجام شده است،<sup>[۲۹]</sup> که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره خواهد شد. الیاف باید دارای مقاومت کششی بیشتر از ۱۰۰۰ مگاپاسکال و کرنش کمینه‌ی ۰.۵٪ باشد و بهتر است قطر آن به ۳۰ تا ۵۰ میکرومتر محدود شود. طول الیاف با توجه به محدودیت‌های فرایند ساخت کامپوزیت و انتقال نیروی مؤثر از الیاف به ماتریس سیمانی حدود ۸ تا ۱۲ میلی‌متر برآورد شده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داده است که با توجه به آنکه اندازه‌ی درزهای اولیه در ماتریس، در محدوده‌ی مشخصی قرار دارد، وجود حاشیه‌ی اطمینان مناسب میان انرژی متمم و طاقت نوک ترک (رابطه‌ی ۳) به منظور بروز ترک‌خوردگی‌های متعدد در کامپوزیت الزامی است. چنین حاشیه‌ی اطمینانی را می‌توان با کاهش  $J_{tip}$  که وابسته به طاقت ماتریس است (رابطه‌ی ۲) و یا با افزایش  $J'_b$  ایجاد کرد. اما ترجیح آن است که  $J'_b$  افزایش داده شود، چرا که کاهش طاقت ماتریس سبب کاهش مقاومت اولین ترک‌خوردگی خواهد شد که مطلوب طراح نیست. برای مثال اگر یک مقدار منطقی در حدود ۰.۲ تا ۰.۳۳  $\text{MPa}\sqrt{m}$  برای طاقت شکست ماتریس فرض شود، برای ایجاد حاشیه‌ی اطمینان مذکور به جسیندگی شیمیایی  $G_d$  کمتر از ۲  $\text{J}/\text{m}^2$  و تنش اصطکاکی مرزی ۱ تا ۱.۷ مگاپاسکال نیاز است. این تذکر لازم است که این دو را می‌توان با ایجاد پوشش روغنی خاصی روی سطح الیاف به وجود آورد.<sup>[۲۹]</sup> برای الیاف PVA، این پوشش را کارخانه‌ی سازنده‌ی الیاف بر روی آن ایجاد کرده است.

مطابق شکل ۲ که مقایسه‌ی کیفی رفتار تنش - کرنش ماتریس تقویت‌نشده، FRC و HPRC را نشان می‌دهد، می‌توان گفت با رسیدن ماتریس تقویت‌نشده یا FRC به مقاومت ترک‌خوردگی کامپوزیت  $\sigma_{fc}$ ، رفتار نرم‌شوندگی کرنشی ایجاد می‌شود. اما HPRC‌ها (برای نمونه ECC) پس از اولین ترک‌خوردگی تا رسیدن به تنش بیشینه‌ی  $\sigma_{pc}$ ، از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهند. چنین توانمندی در این کامپوزیت‌ها سبب شده است تا از این مواد در ساخت و یا تقویت سازه‌هایی که تحت بارگذاری‌های شدید و یا لرزه‌ی قرار دارند، استفاده شود.<sup>[۲۹]</sup>

عدم دست‌یابی به عملکرد سازه‌ی مطلوب به‌شمار می‌رود، مدل میکرومکانیکی حاکم بر رفتار ECC بر اساس دست‌یابی به رفتار سخت‌شوندگی کرنشی متمرکز شده است تا دو نقص یادشده را برطرف سازد.

اساسی‌ترین معیار و شرط اول برای آنکه کامپوزیت از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان دهد، رخ دادن حالت ترک‌خوردگی پایدار تحت نیروی وارده است.<sup>[۲۳]</sup> در این حالت به جای آنکه پس از اولین ترک‌خوردگی، عرض ترک تحت بارگذاری شروع به افزایش کند، به دلیل متناسب‌بودن اصطکاک در مرز الیاف و ماتریس با تنش گسیختگی الیاف، این ترک به اصطلاح محبوس می‌شود و با عرض ثابت پیشروی می‌کند. در چنین حالتی، رابطه‌ی میان تنش ترک پایدار و طاقت نوک ترک،  $J_{tip}$  مطابق شکل ۱، به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

که طاقت نوک ترک به‌صورت تقریبی با رابطه‌ی ۲ قابل محاسبه است:

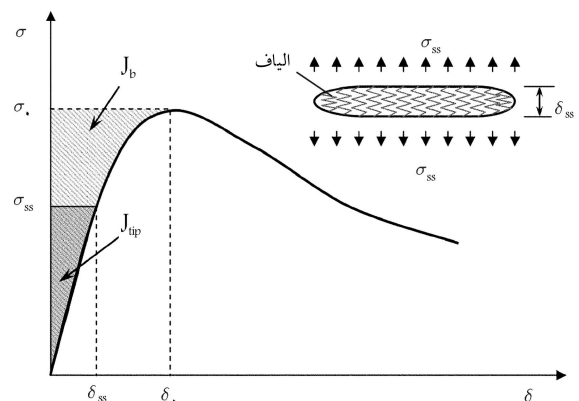
$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (2)$$

که در آن،  $K_m$  طاقت شکست و  $E_c$  مدول کشسانی کامپوزیت است. پس از کامل شدن ترک اول در نقطه‌ی دیگری از کامپوزیت ترک جدیدی شکل می‌گیرد و این فرایند تا پیوستن ترک‌ها به یکدیگر و تمرکز یافتن ترک<sup>۱</sup> در یک ناحیه‌ی خاص و گسیختگی کامپوزیت ادامه می‌یابد.

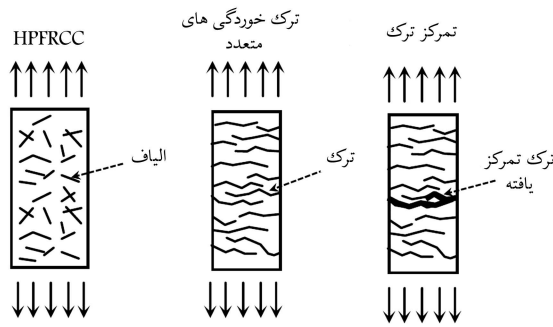
رخداد چنین فرایندی مستلزم آن است که طاقت نوک ترک،  $J_{tip}$ ، از انرژی متمم  $J'_b$ ، که در نمودار تنش پل‌بندی - بازشدگی ترک مطابق شکل ۱ تعریف می‌شود، کمتر شود.<sup>[۲۴]</sup> به عبارت دیگر، باید رابطه‌ی ۳ برقرار باشد:

$$J_{tip} \leq \sigma_c \delta_c - \int_0^{\delta_c} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (3)$$

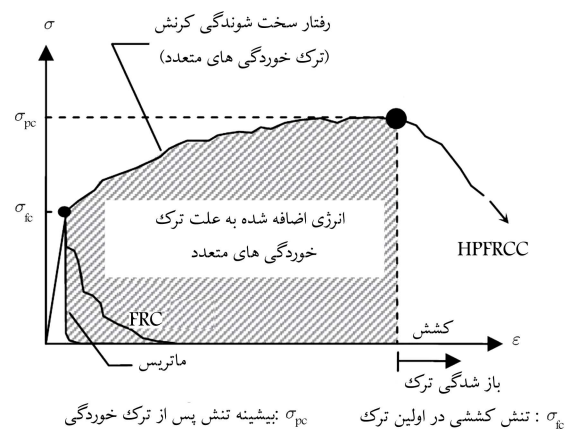
که در آن،  $\sigma_c$  بیشینه‌ی تنش پل‌بندی الیاف و متناظر با بازشدگی  $\delta_c$  ترک است. رابطه‌ی ۳ با فرض تعادل تغییرات انرژی در هنگام توسعه‌ی یک ترک مسطح در کامپوزیت به‌دست آمده است.



شکل ۱. نمودار  $\sigma(\delta)$  کامپوزیت با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی (ناحیه‌ی هاشورخورده انرژی مکمل  $J'_b$  و ناحیه‌ی سایه‌خورده، طاقت نوک ترک  $J_{tip}$  را نشان می‌دهد).



ب) ترک خوردگی های متعدد و تمرکز ترک در HRPFRCC



الف) مقایسه رفتار تنش - کرنش HRPFRCC و FRC

شکل ۲. رفتار شماتیک کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی توانمند (HRPFRCC) در کشش مستقیم.

در عمل مواد جامد شامل: سیمان، خاکستر بادی، ماسه، پودر سنگ، و فوق روان‌کننده به وسیله مخلوط کن برشی به مدت ۲ دقیقه مخلوط می‌شوند و پس از افزودن آب، ۵ دقیقه دیگر عملیات مخلوط‌سازی ادامه می‌یابد. در این زمان مخلوطی روان با لزجت مناسب برای توزیع مناسب الیاف به دست خواهد آمد. سپس الیاف اضافه می‌شوند و به مدت ۴ دقیقه دیگر عملیات مخلوط‌سازی ادامه می‌یابد. بنابراین، فرایند تهیه ECC تازه حداکثر ۱۰ دقیقه به طول خواهد انجامید. لازم به ذکر است که در این پژوهش، نمونه‌های آزمایشگاهی پس از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شدند و با استفاده از پوشش پارچه نمناک در اتاق عمل‌آوری با دمای در حدود ۲۲ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۸۰٪ تا سن ۷ روزه عمل‌آوری شدند. سپس با حذف پوشش پارچه نمناک، نمونه‌ها تا سن ۲۸ روزه در همان اتاق نگهداری شدند. تمامی آزمایش‌ها در سن ۲۸ روزه نمونه‌ها انجام شده است.

## ۵. چیدمان آزمایش‌ها

### ۱.۵. آزمایش کشش مستقیم

با توجه به عدم وجود استاندارد برای انجام آزمایش کشش مستقیم کامپوزیت‌های مسلح سیمانی، روش‌های متعددی با پیکربندی‌های متفاوتی از نمونه‌های کشش مستقیم، توسط پژوهشگران به کار گرفته شده است. در این پژوهش از نمونه‌های دمبلی‌شکل با طول و ضخامت به ترتیب ۵۰۰ و ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. چنین پیکربندی سبب می‌شود که در محدوده میانی نمونه که کرنش کششی اندازه‌گیری می‌شود، تنش کششی یکنواختی ایجاد شود و از گسیختگی‌های زودرس در محل فک‌های هیدرولیکی دستگاه، که به دلیل تمرکز تنش کششی و فشاری رخ می‌دهد، جلوگیری شود. شکل ۳، چیدمان آزمایش کشش مستقیم را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در دستگاه سایش و با استفاده از صفحه‌ی فلزی سنگ‌سابی ساییده شدند تا ضخامت نمونه‌ها به ۲۵ میلی‌متر برسد. به منظور محدود کردن تلورانس ضخامت در طول نمونه به ۰/۵ میلی‌متر، عملیات ساب‌زنی با دقت فراوانی صورت گرفته است. چرا که عدم یکنواختی ضخامت در طول و عرض نمونه به ترتیب سبب بروز خمش و پیچش حول محورهای افقی و عمودی نمونه می‌شود و نمونه دچار شکست‌های زودرس نامطلوب خواهد شد و عملاً امکان انجام آزمایش کشش مستقیم را از میان خواهد برد. همچنین جایگذاری نمونه در دستگاه با استفاده از

## ۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

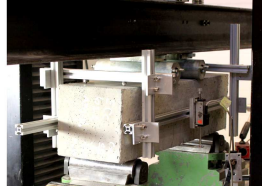
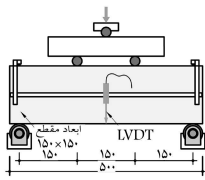
سه مجموعه از تست‌های مصالح بر روی ECC شامل: تست کشش مستقیم، تست فشار، و خمش با هدف برآورد خصوصیات رفتاری سازه‌ی این مواد در آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه DTU دانمارک انجام شده است. برای ساخت ECC از الیاف PVA با نام تجاری REC۱۵ و با پوشش سطحی لازم و خصوصیات ذکر شده در جدول ۱ استفاده شده است. همچنین نسبت‌های اختلاط ECC در جدول ۲ آورده شده است. ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده دارای بیشینه‌ی اندازه‌ی ذرات ۰/۱۸ میلی‌متر و میانگین اندازه‌ی ذرات آن ۰/۱۱ میلی‌متر برآورد شده است. پودر سنگ با درصد وزنی برابر با ماسه‌ی سیلیسی به عنوان یک پرکننده‌ی حفره‌های ریزماتریس استفاده شده است. لازم به توضیح است که نسبت‌های اختلاط مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است، که رفتار سخت‌شوندگی کرنشی قابل قبولی از نسبت‌های ارائه شده در جدول ۲ به دست آمده است. از آنجا که توزیع مناسب الیاف‌ها در سرتاسر مخلوط نیازمند روانی کافی ECC تازه است، از فوق روان‌کننده بر پایه‌ی کربوکسیلات استفاده شده است تا ضمن ایجاد روانی و کارپذیری مناسب، نسبت آب به مواد سیمانی در حدود ۰/۲۵ نگه داشته شود. بدیهی است افزایش نسبت آب به مواد سیمانی می‌تواند تأثیر منفی در خصوصیات رفتاری ECC داشته باشد.

جدول ۱. خصوصیات الیاف PVA.

چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	کرنش (%)	ضریب کشسانی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	طول (mm)	قطر (μm)
۱٫۳	۶	۴۲٫۸	۱۶۰۰	۸	۳۹

جدول ۲. درصد وزنی ترکیبات ماتریس ECC.

فوق روان‌کننده	آب	پودر کوارتز	ماسه‌ی سیلیسی ریزدانه	خاکستر بادی	سیمان
۰/۰۱	۰/۷۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۲	۱



شکل ۵. چیدمان آزمایش خمش چهار نقطه‌یی و محل قرارگیری LVDT برای ثبت تغییرشکل خالص (ابعاد به میلی‌متر).

است. به منظور محاسبه‌ی کرنش فشاری، جابجایی دو نقطه به فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر بر روی نمونه‌ی استوانه‌یی با استفاده از جابجایی سنسج حساس که با دو فنر به نمونه متصل شده‌اند، اندازه‌گیری شده است. همچنین از دو LVDT دیگر برای کنترل تغییرمکان فک متحرک پایین دستگاه استفاده شده است. بارگذاری فشاری تا شکست نهایی نمونه با سرعت ۰/۵mm/min انجام شده است.

### ۳.۵. آزمایش خمش چهار نقطه‌یی

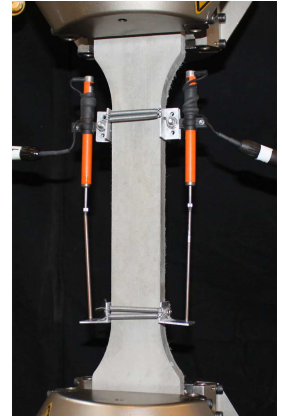
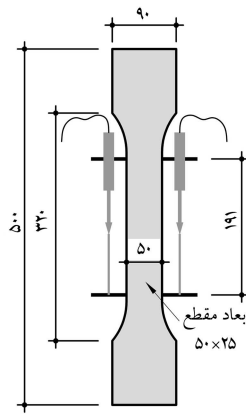
آزمایش خمش چهار نقطه‌یی به صورت کنترل تغییرمکان با سرعت ۰/۲۵mm/min بر روی نمونه‌های تیر با ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ صورت پذیرفته است. تکیه‌گاه نمونه‌ها غلطکی بوده و بارگذاری بر روی دو خط عرضی روی وجه فوقانی تیر و به فاصله‌ی یک سوم دهانه از تکیه‌گاه‌ها انجام شده است. استوانه‌هایی که به عنوان تکیه‌گاه استفاده می‌شوند، باید قابلیت چرخش حول محور خود را داشته باشند؛ تا از بروز اصطکاک در سطح نشیمن نمونه و لذا ایجاد نیروی مخالفت‌کننده در برابر انحنای تیر جلوگیری شود. چیدمان آزمایش مطابق شکل ۵ بود و برای ثبت تغییرمکان خالص وسط تیر از دو LVDT متصل به یک قاب آلومینیومی استفاده شده است. این قاب به گونه‌یی بر روی تیر قرار داده شده است که فقط در دو نقطه‌ی بالایی تکیه‌گاه‌ها به وجه بالایی تیر تکیه داده شده است و در هیچ نقطه‌ی دیگری به نمونه متصل نیست. با چنین چیدمانی می‌توان از ثبت هرگونه تغییرمکان ناشی از لقی در محل تکیه‌گاه‌ها و یا قطعانی که برای بارگذاری استفاده شده است، جلوگیری کرد و فقط تغییرمکان وسط تیر نسبت به دو انتهای آن که بر روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفته است، را قرائت کرد.

## ۶. توصیف نتایج آزمایش‌ها

### ۱.۶. آزمایش کشش مستقیم

نمودار تنش-کرنش کششی کامپوزیت ECC و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی آن در شکل ۶ و رخداد ترک خوردگی‌های متعدد در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین نتایج آزمایش بر اساس مقاومت اولین ترک خوردگی، مقاومت نهایی و کرنش نهایی در جدول ۳ خلاصه شده است.

تمامی نمونه‌های کششی ECC دارای فقط ۰/۲ حجمی الیاف پلی‌وینیل الکل، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی با ظرفیت کرنشی ۳ تا ۳/۸ درصد را تا قبل از تمرکز ترک و گسیختگی از خود نشان داده‌اند، که این مقدار ۳۰۰ تا ۳۸۰ برابر ظرفیت کرنشی بتن سنتی و با بتن‌های الیافی معمولی است. میانگین مقاومت کششی اولین ترک خوردگی نمونه‌ها در حدود ۳/۲ مگاپاسکال است و پس از اولین ترک، باربری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در لحظه‌ی تمرکز ترک در برخی از نمونه‌ها به بیش از ۴ مگاپاسکال می‌رسد. اگرچه این مقاومت مقدار بالایی برای مقاومت کششی یک ماده با کاربرد سازه‌یی محسوب نمی‌شود، اما وجود کرنش زیاد و رفتار سخت‌شوندگی قبل



شکل ۳. چیدمان و ابعاد نمونه‌ی دمبلی کشش مستقیم (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۴. چیدمان آزمایش فشار تک محوری برای برآورد رفتار تنش-کرنش فشاری ECC.

تراز لیزری انجام پذیرفته است، تا از هرگونه خروج از مرکزیتی جلوگیری شود و نمونه کاملاً در یک خط عمودی تحت نیروی کششی قرار گیرد.

برای اندازه‌گیری تغییرمکان دو نقطه به فاصله‌ی ۱۹۱ میلی‌متر، از دو LVDT بسیار حساس به تغییرمکان استفاده شده است که با یک قاب آلومینیومی به ۴ نقطه از نمونه تکیه داده شده است. با استفاده از پاسخ لحظه‌یی دو LVDT مذکور، بارگذاری کششی با سرعت ثابت ۱mm/min به نمونه اعمال شده است.

### ۲.۵. آزمایش فشار تک محوری

مقاومت فشاری ECC با استفاده از دو نمونه‌ی مختلف استوانه‌یی و مکعبی ۴۰ میلی‌متری و رفتار فشاری آن فقط با استفاده از نمونه‌های استوانه‌یی با قطر ۱۲۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۴۰ میلی‌متر برآورد شده است. پس از ریختن ECC تازه در قالب‌های استوانه‌یی شکل از جنس PVC، وجه بالایی قالب با صفحه‌ی فلزی دایره‌یی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر کاملاً مسطح و با گیره‌ی محکم می‌شود تا سطح بارگذاری فوقانی کاملاً صاف باشد. عمل آوری نمونه‌های فشاری مانند نمونه‌های کشش مستقیم انجام شده است. همچنین به منظور اطمینان بیشتر از نتایج آزمایش، قبل از انجام تست مسطح‌بودن سطوح بارگذاری فوقانی و تحتانی با استفاده از تراز کنترل شده است تا در صورت نیاز عملیات تسطیح بر روی آن انجام پذیرد. در شکل ۴، چیدمان آزمایش برای برآورد رفتار فشاری ECC نشان داده شده

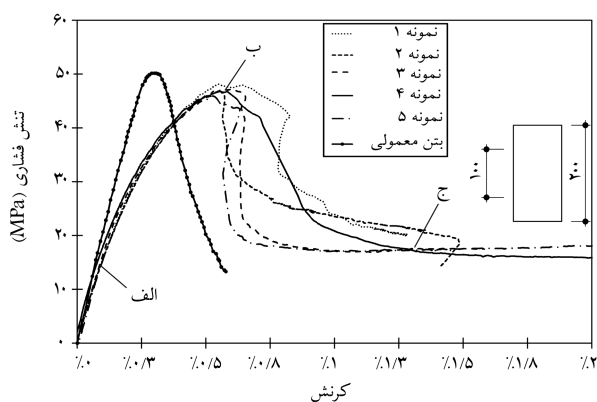
### ۲.۶. آزمایش فشار تک محوری

رفتار تنش - کرنش فشاری ECC بر اساس ضریب کشسانی، مقاومت فشاری، و کرنش در لحظه‌ی مقاومت نهایی برآورد شده و خلاصه‌ی نتایج در جدول ۴ فهرست شده است. همچنین نمودار تنش - کرنش ECC حاصل از آزمایش نمونه‌های استوانه‌یی در شکل ۸ نشان داده شده و برای ساده‌ترکردن مقایسه با رفتار بتن معمولی، نمودار تنش - کرنش بتن معمولی نیز به صورت شماتیک ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که ضریب کشسانی ECC به طور قابل توجهی از ضریب کشسانی بتن معمولی کمتر است. علت این پدیده را می‌توان به کوچک بودن اندازه‌ی ذرات سنگدانه‌ی استفاده‌شده نسبت داد. کوچک بودن ذرات ماسه یکی از پارامترهای مهم کامپوزیت است که در ارضاء رابطه‌ی ۱ و بروز رفتار سخت‌شوندگی کرنشی در کشش، نقش اساسی دارد و این ریزی سنگدانه‌ها سبب ضریب کشسانی فشاری نسبتاً پایین تر از بتن معمولی می‌شود.

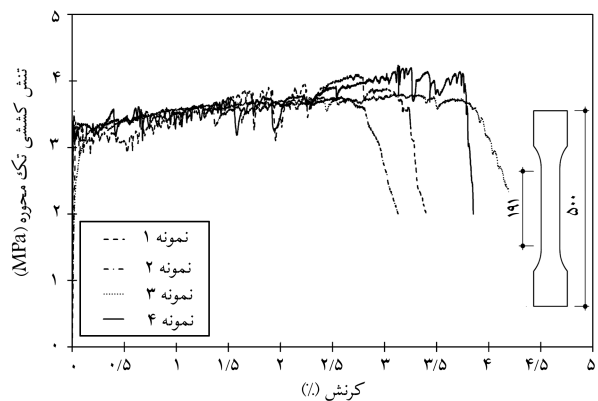
رفتار فشاری ECC تا تنش‌ی در حدود ۳۰ مگاپاسکال تقریباً خطی است و پس از آن با کاهش ضریب کشسانی و آغاز رفتار غیرخطی، باربری آن تا تنش بیشینه‌یی در حدود ۴۷ مگاپاسکال متناظر با کرنش فشاری ۵۵٪ ادامه می‌یابد. پس از این کرنش با کاهش ۵۰ درصدی باربری نمونه، به دلیل ترک‌های متعدد و بازشدن برخی از آنها، گسیختگی نمونه در حالتی شکل‌پذیر رخ می‌دهد. بنابراین علاوه بر ظرفیت کرنشی منحصر به فرد ECC در کشش، متفاوت بودن خصوصیات تنش - کرنش فشاری آن با بتن معمولی سبب خواهد شد تا عملکرد اعضای خمشی مسلح ساخته‌شده با ECC نسبت به اعضای بتن مسلح معمولی تفاوت چشمگیری داشته باشند. بدیهی است این تفاوت در ناحیه‌ی تغییرشکل‌های غیرخطی بیشتر خواهد بود. الگوی ترک‌خوردگی و شکست یکی از نمونه‌ها در کرنش‌های متناظر با شکل ۸، در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در کرنشی فشاری بیشتر از ۱/۸٪ و تنش‌ی در حدود ۴۵٪، تنش بیشینه‌ی انسجام ماده حفظ شده است و امکان جداکردن بخش‌های ترک‌خورده از نمونه وجود نداشته است. چنین عملکردی می‌تواند در حفظ پایداری سازه و

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج آزمایش فشاری تک محوری ECC.

نمونه	تعداد نمونه‌ها	سرعت بارگذاری (mm/min)	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
مکعبی	۱۰	۰٫۶	۵۰٫۶	-
استوانه‌یی	۵	۰٫۵	۴۷٫۰	۰٫۵۵



شکل ۸. رفتار تنش - کرنش فشاری کامپوزیت ECC در مقایسه با بتن معمولی.



شکل ۶. نمودار تنش - کرنش کششی تک محوری ECC.

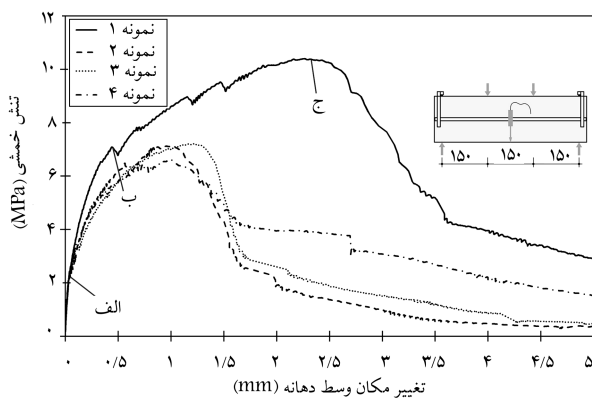


شکل ۷. ترک‌خوردگی متعدد نمونه‌های کششی و تمرکز ترک.

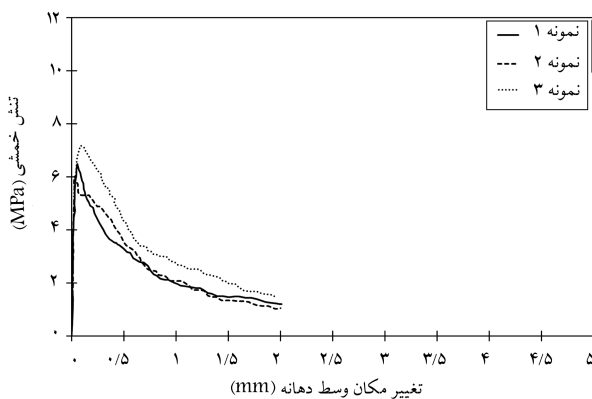
جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج آزمایش کشش مستقیم تک محوری ECC.

نمونه	مقاومت اولین ترک (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)	مقاومت نهایی به مقاومت اولین ترک
۱	۳٫۳	۴٫۱	۳٫۳	۱٫۲۴
۲	۳٫۴	۳٫۸	۲٫۸	۱٫۱۲
۳	۲٫۸	۳٫۵	۳٫۳	۱٫۲۵
۴	۳٫۳	۴٫۲	۳٫۸	۱٫۲۷

از شکست نهایی سبب منحصر به فرد شدن این کامپوزیت در کاربردهای سازه‌یی می‌شود. در فاصله‌ی میان اولین ترک تا شکست نمونه، به همراه رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، ترک‌های متعددی با عرض کمتر از ۵۰ میکرون در قسمت مستطیلی نمونه در فواصل نزدیک به یکدیگر ظاهر شده است (شکل ۷). این ترک‌ها در واقع به دلیل افزایش تنش کششی در ماده به وجود آمده و سبب پیدایش کرنش غیرکشسان نمونه‌ها شده‌اند. ترک تمرکز یافته، با رسیدن تنش بیشینه، سبب شکست ترد کامپوزیت می‌شود. با توجه به عرض کم ترک‌ها می‌توان گفت که اعضای سازه‌یی ساخته‌شده با این کامپوزیت دارای دوام خوبی خواهند بود، چرا که از نفوذ آب و مواد خورنده به درون عضو جلوگیری خواهد شد. این تذکر لازم است که در بتن سستی و یا بتن‌های الیافی معمولی با افزایش تنش، عرض یک ترک ایجاد شده افزایش می‌یابد و نمونه از خود رفتار نرم‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهد.



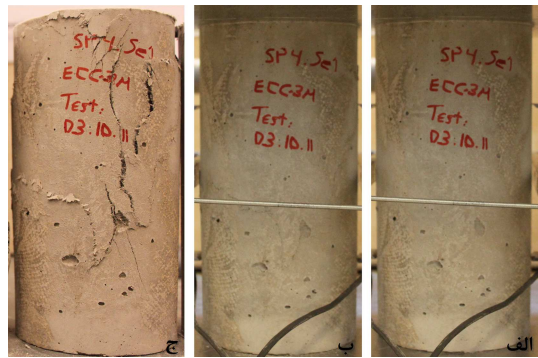
شکل ۱۰. نمودار تنش خمشی - تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر ECC با الیاف PVA.



شکل ۱۱. نمودار تنش خمشی - تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر FRC با الیاف فولادی. [۳۱]

میانگینی در حدود ۷ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و در این لحظه اولین ترک قابل رؤیت ملاحظه می‌شود که متناظر با نقطه‌ی ب است. پس از آن ابتدا نیرو به مقدار کمی افت می‌کند و دوباره افزایش می‌یابد. این کاهش و افزایش نیرو، نشان‌دهنده‌ی ایجاد ترک و سپس محبوس شدن آن و آغاز ترک خوردگی در نقطه‌ی دیگری از نمونه است. همچنین بیان‌گر عملکرد پل بندی الیاف‌ها در مرز ترک است که سعی شده است در شکل ۱۲ به تصویر کشیده شود. با ادامه‌ی بارگذاری، رفتار سخت‌شوندگی به همراه ایجاد و توسعه‌ی ترک‌های جدید در وجه کششی تیر ادامه می‌یابد تا آنکه نمونه به مقاومت خمشی خود در نقطه‌ی ج برسد. با پیوستن برخی از ترک‌ها به یکدیگر و تمرکز ترک در یک نقطه از وجه کششی، سرانجام رفتار نرم‌شوندگی آغاز می‌شود و با افزایش تغییر مکان، عرض ترک متمرکز شده افزایش می‌یابد تا آنکه تیر به گسیختگی برسد. در بتن‌های الیافی معمولی مانند آنچه که در نمودار تنش خمشی - تغییر مکان در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، پس از ایجاد اولین ترک میکروسکوپی، رفتار نرم‌شوندگی آغاز می‌شود و با افزایش تغییر مکان، عرض این ترک به طور پیوسته تا لحظه‌ی شکست تیر افزایش می‌یابد.

نتایج به دست‌آمده به وضوح نشان می‌دهند که ECC ظرفیت تغییر شکلی بسیار بالاتری نسبت به FRC دارد. همچنین در یک تنش خمشی برابر تغییر مکان وسط دهانه برای ECC بارها بزرگ‌تر از مقدار متناظر آن برای تیر FRC است. برای نمونه، میانگین نسبت تغییر مکان وسط تیر به طول دهانه در نقطه‌ی بیشینه‌ی تنش خمشی برای ECC در حدود ۰/۳۲٪ است که ۱۵ برابر مقدار متناظر آن برای FRC است. بنابراین می‌توان گفت تیر ساخته‌شده از ECC با نشان دادن رفتار



شکل ۹. الگوی ترک خوردگی نمونه‌ی استوانه‌یی در کرنش‌های فشاری مختلف.

جدول ۵. نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌یی.

ماده	نمونه	مقاومت نهایی خمشی (MPa)	میانگین مقاومت خمشی (MPa)	تغییر مکان وسط دهانه (%)	رفتار سخت‌شوندگی کرنشی
ECC	۱	۷,۱۲	۷,۸۴	۰/۲۱	دارد
	۲	۱۰,۴		۰/۵۰	دارد
	۳	۷,۲۱		۰/۲۶	دارد
	۴	۶,۶۳		۰/۲۴	دارد
FRC [۳۱]	۱	۶,۴۸	۶,۷۴	۰/۱۸	ندارد
	۲	۷,۲۲		۰/۰۰۹	ندارد
	۳	۶,۵۲		۰/۰۳۹	ندارد

جلوگیری از فروریزش آن پس از بارگذاری‌های شدید مانند بارهای لرزه‌یی قابل توجه باشد.

### ۳.۶. آزمایش خمش چهار نقطه‌یی

برای نشان دادن تفاوت عملکرد خمشی ECC و بتن الیافی معمولی، پارامترهای عملکرد خمشی این ماده با یک بتن الیافی معمولی که در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ آزمایش شده است، مقایسه می‌شود. [۳۰] این بتن الیافی دارای ۱٪ حجمی الیاف فولادی است و خمیر سیمانی آن به صورت تجاری و آماده موجود است.

جدول ۵، مقاومت خمشی نهایی  $\sigma_u$  و تغییر مکان وسط دهانه‌ی متناظر با آن را برای ECC و بتن الیافی معمولی نشان می‌دهد. نمودار تنش خمشی - تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌های ECC و FRC به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. تغییر شکل وسط دهانه در این نمودارها، میانگین مقادیر ثبت شده توسط دو LVDT قرار داده‌شده در دو طرف نمونه‌ی آزمایش است.

تیر ساخته‌شده با الیاف فولادی، فقط یک ترک را در نیمه‌ی یک سوم میانی خود تجربه می‌کند و پس از آن رفتار نرم‌شوندگی آغاز می‌شود. [۳۱] این لحظه متناظر با بیشینه‌ی تنش خمشی در نمودار تنش خمشی - تغییر مکان است که در تغییر مکان به طول دهانه‌ی بسیار کمی در حدود ۰/۲۲٪ رخ می‌دهد. اما فرایند شکست ECC به همراه ترک خوردگی‌های متعدد است که در ادامه با معرفی نقاط متناظر بر روی نمودار نمونه‌ی شماره ۲ شرح داده خواهد شد. در ابتدا ترک‌های بسیار ریزی در نیمه‌ی میانی نمونه رخ می‌دهد، که سبب کاهش شیب نمودار تنش - تغییر مکان می‌شود. این لحظه، متناظر با نقطه‌ی الف در شکل ۱۰ است که نشان‌دهنده‌ی آغاز رفتار غیرخطی نمونه با کاهش ضریب کشسانی است. سپس باربری نمونه‌ها تا تنش

ج) نمودار تنش-کرنش ECC به دست آمده از آزمایش فشاری نمونه‌های استوانه‌ای می‌تواند بیانگر رفتار  $\sigma - \varepsilon$  یک المان از این ماده در تنش‌های فشاری باشد.

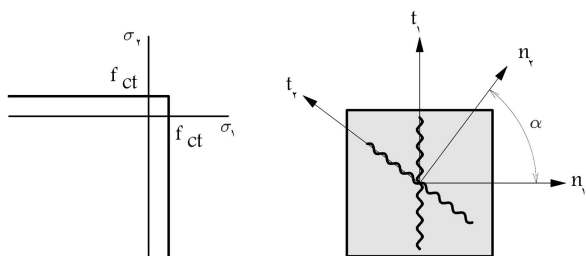
د) الیاف‌ها در زمان ساخت ECC به صورت یکنواخت در ماتریس پراکنده شده‌اند و لذا عضو‌سازایی دچار ضعف موضعی قابل توجه به دلیل عدم یکنواختی در توزیع الیاف‌ها نیست.

### ۱.۷. مدل رفتاری مصالح ECC

رفتار ساختاری مصالح ترد و یا شبه ترد مانند ECC با ترک‌خوردگی‌های متعدد در کشش، خردشدگی در فشار<sup>۱</sup> و اثرات درازمدت مانند افت، خزش که در اینجا مد نظر نیست، توصیف می‌شود. ترک‌خوردگی در محیط‌های پیوسته را می‌توان به سه روش مدل ترک پخش شده با کرنش تجزیه شده، مدل ترک بر اساس کرنش کل، و مدل‌های ترک بر اساس خمیرسانی مدل‌سازی کرد که در اینجا به دلیل سادگی و نیز مطابقت فرضیات این روش با طبیعت رفتاری ECC از مدل ترک پخش شده با کرنش تجزیه شده استفاده شده است. در مدل ترک‌خوردگی پخش شده یا همان مدل ترک ثابت چند جهت<sup>۱۲</sup> مطابق شکل ۱۳ الف که بر مبنای تجزیه کرنش کل به کرنش کشسان و کرنش ترک‌خوردگی فرمول‌بندی می‌شوند، باید آغاز ترک‌خوردگی، رفتار کششی پس از ترک‌خوردگی و رفتار برشی بر مبنای برش باقیمانده تعریف شوند. همچنین برای توصیف رفتار فشاری در حالت تنش‌های چند محوره، که امکان بیشتر شدن تنش فشاری از مقاومت فشاری تک‌محوره وجود دارد، این مدل ترک‌خوردگی می‌تواند با مدل خمیرسانی که توصیف‌کننده‌ی خردشدگی مصالح باشد، ترکیب شود. به طور خاص مدل دراگر-پراگر برای مدل‌سازی رفتار فشاری مصالح شبه ترد قابلیت ترکیب با این مدل ترک‌خوردگی را دارد.

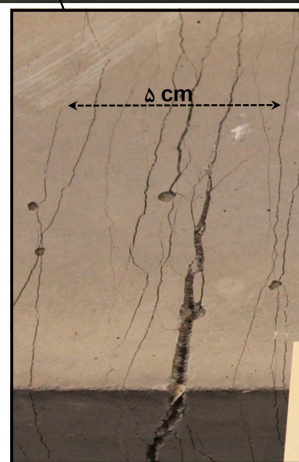
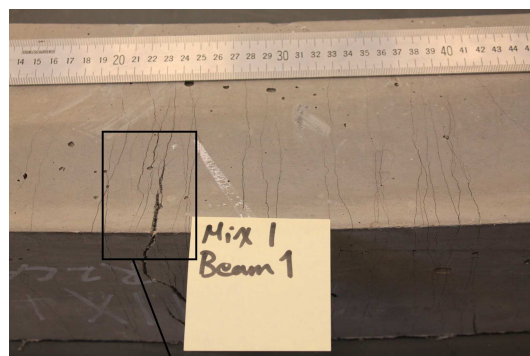
آغاز ترک‌خوردگی به طور کلی با معیار قطع کششی و زاویه‌ی میان دو ترک‌خوردگی متوالی<sup>۱۱</sup> تعریف می‌شود که برای شروع موفق یک ترک باید دو معیار به صورت هم‌زمان ارضاء شوند. اول آنکه تنش‌های کششی اصلی از بیشینه‌ی تنش بیشتر شود، و دوم آنکه زاویه‌ی میان ترک‌های موجود و تنش‌های کششی اصلی از مقدار زاویه‌ی آستانه تجاوز کند. با توجه به مبنای مدل ترک پخش شده، که در آن آغاز ترک‌خوردگی فقط با معیار قطع کششی تعریف می‌شود، معرفی معیار دوم در اینجا لازم نیست. بنابراین آغاز ترک‌خوردگی با معیار قطع کششی از نوع ثابت و مطابق شکل ۱۳ ب تعریف شده است.

رفتار کششی ECC، که مطابق نتایج آزمایش‌های کشش مستقیم دارای خاصیت سخت‌شوندگی کرنشی است، با پارامتر تنش اولین ترک‌خوردگی ( $f_{ct}$ ) و تعریف رفتار سخت‌شوندگی کرنشی پس از ترک‌خوردگی مدل‌سازی می‌شود. برای این منظور



الف) تعریف محورهای عمود بر ترک و در جهت ترک؛ ب) معیار قطع کششی.

شکل ۱۳. مدل ترک پخش شده یا ترک ثابت چند جهت.



شکل ۱۲. ترک‌خوردگی‌های متعدد در وجه کششی تیر ECC و تمرکز ترک.

سخت‌شوندگی کششی ناشی از ترک‌خوردگی‌های متعدد تا قبل از افت نیرو، ظرفیت جذب انرژی و مقاومت کرنشی کششی بسیار بالایی را فراهم می‌کند. در مقابل FRC با رفتار نرم‌شوندگی کششی حاصل از ایجاد فقط یک ترک، ظرفیت جذب انرژی و مقاومت کرنشی کششی بسیار اندکی دارد.

### ۷. مدل‌سازی ECC بر مبنای حالت خمیری

در این بخش روشی نسبتاً ساده برای مدل‌سازی عددی رفتار سازایی ECC با استفاده از تحلیل‌های اجزاء محدود پیشنهاد شده است که برای انجام آن بسته‌ی نرم‌افزاری TNO-DIANA با توجه به داشتن مجموعه‌ی کاملی از المان‌ها، مدل‌های مصالح خصوصاً مدل‌های ویژه‌ی برای مصالح بتنی و کامپوزیت‌ها، و همچنین امکان ترکیب چند مدل خمیرسانی انتخاب شده است. در روش پیشنهادی این فرضیات منظور شده است:

الف) رفتار کششی نمونه‌های دمبلی آزمایش کشش مستقیم تا حد قابل قبولی قادر به بیان رفتار کششی ECC هستند.

ب) رفتار کششی ECC و ترک‌خوردگی‌های متعدد آن در کشش، حتی اگر در بخش درونی یک عضو حجیم با ابعاد بزرگ رخ دهد، قابل مشابه‌سازی با آزمایش کشش مستقیم است. به عبارت دیگر، اگر نمونه‌ی دمبلی از درون حجم عضو تراشیده شود و تحت کشش مستقیم قرار گیرد، عملکردی مشابه نمونه‌های دمبلی ریخته‌شده در قالب را خواهد داشت. این تذکر لازم است که به دلیل جهت‌گیری تصادفی الیاف‌ها ممکن است این فرض در همه‌ی موارد درست نباشد.



در نظر گرفته شوند، که عموماً ثابت فرض می‌شوند. اندازه‌گیری زاویه‌ی اصطکاک داخلی و زاویه‌ی اتساع مصالح بسیار دشوار است و نیازمند آزمایش‌های پیچیده‌ی هستند، که در اینجا انجام چنین آزمایش‌هایی مورد نظر نبوده است. اما به طور کلی بر اساس توصیه‌های انجام‌شده برای استفاده از مدل دراگر-پراگر در المان‌های تنش صفحه‌یی با مصالح بتنی با مقاومت فشاری متوسط، می‌توان از زاویه‌ی  $10^\circ$  درجه برای تعریف  $\phi$  استفاده کرد. در غیر این صورت، مقاومت چندمحوره‌ی مصالح بیش از مقدار واقعی برآورد خواهد شد. همچنین در المان‌های تنش صفحه‌یی، که در اینجا به کار رفته است، پارامتر  $\psi$  یک داده‌ی ضروری محسوب نمی‌شود و در این حالت برای سادگی بیشتر می‌توان  $\psi = \phi$  فرض کرد. این تذکر لازم است که متناسب‌سازی معیار دراگر-پراگر برای تنش‌های صفحه‌یی با ضریب افزایش تنش  $a$  صورت می‌پذیرد و در این حالت زاویه‌ی اصطکاک داخلی به صورت رابطه‌ی ۶ نوشته می‌شود:

$$\sin \phi = \frac{3\alpha_f}{2 + \alpha_f} = \frac{3a - 31}{5a - 3} \quad (6)$$

ضریب چسبندگی معادل  $C$  نیز از مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی  $f_c$  و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$C = f_c \frac{1 - \alpha_f}{\beta} = f_c \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \quad (7)$$

در این روابط،  $\alpha_f$  و  $\beta$  کمیت‌های اسکالر مدل هستند که پس از ساده‌سازی، به عبارت سمت راست روابط ۶ و ۷ تبدیل می‌شوند. این تذکر لازم است که برای مصالح بتنی با مقاومت معمول، نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره و دومحوره در حدود  $1/16$  است که در این حالت رابطه‌های ۶ و ۷ زاویه‌ی اصطکاک را برابر با  $10^\circ$  و چسبندگی برابر با  $C \approx 0.42 f_c$  به دست می‌دهند. [۳۱] پارامترهای ورودی برای تعریف رفتار ECC در بارگذاری‌های مختلف در جدول‌های ۶ و ۷ خلاصه شده است.

## ۲.۷. روش مدل‌سازی

مدل‌سازی به صورت دو بعدی و با فرض ضخامت در بعد سوم و همچنین با استفاده از المان‌های تنش صفحه‌یی TFMEM که یک المان ایزو پارامتریک مثلثی سه گره‌یی منظم است و بر مبنای درون‌یابی خطی و انتگرال‌گیری سطحی فرمول‌بندی شده انجام شده است. با توجه به آنکه این المان از نوع المان‌های تنش صفحه‌یی است، ضخامت قطعه‌ی مدل‌شده به عنوان یک داده‌ی اولیه معرفی شده است.

نمونه‌های دمبلی کششی بر مبنای آزمایش‌های کشش مستقیم ECC که در بخش ۱.۵.۱.۵ شرح داده شد، مدل‌سازی شده‌اند. شکل ۱۵، روش مدل‌سازی و المان‌بندی را در برابر چیدمان آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نیروی کششی در دو

جدول ۶. تنش و کرنش متناظر در نمودار چند خطی کششی ECC با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی.

آزمایش کشش	پارامتر مبدأ	اولین ترک خوردگی	بیشینه تنش کششی	نقطه‌ی نهایی
نمونه‌های دمبلی کشش در بخش ۱.۵	تنش (MPa)	$3721$	$3782$	$2$
	کرنش (%)	$0.17$	$2.8$	$3.5$
نمونه‌های دمبلی گرفته شده از تیر خمشی	تنش (MPa)	$3721$	$375$	$0$
	کرنش (%)	$0.17$	$1.6$	$3$

با اصلاح مدل نرم‌شوندگی کششی چندخطی، که در DIANA توسط کاربر قابل تعریف است، رفتار سخت‌شوندگی پس از ترک معرفی شده است (شکل ۱۴).

از نمودار الف برای مدل‌سازی نمونه‌های دمبلی، و از نمودار ب در مدل‌سازی تیرهای خمشی استفاده شده است. این تفاوت به دلیل آن است که نمونه‌های دمبلی ساخته‌شده از ECC به‌کار رفته در ساخت تیرها، ظرفیت کرنشی کمتری نسبت به نمونه‌های دمبلی مطروحه در بخش ۱.۶.۱ از خود نشان داده‌اند، اگرچه تنش اولین ترک‌خوردگی و تنش نهایی شکست آنها تفاوت چندانی نداشته است.

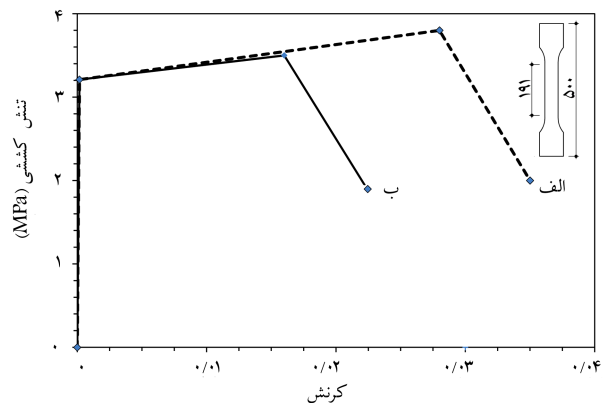
در اثر ترک‌خوردگی سختی برشی مصالح عموماً کاهش می‌یابد و تنش‌های برشی از طریق قفل شدن دانه‌ها در دو سطح ترک انتقال می‌یابد، که با مفهوم برش باقیمانده  $1/2$  به دو روش برش باقیمانده‌ی کامل و برش باقیمانده‌ی ثابت مدل می‌شود. در برش باقیمانده‌ی کامل مدول برشی کشسان  $G$  کاهش نمی‌شود و  $\beta = 1$  خواهد بود. یا به عبارت دیگر، سختی برشی سکانت ترک‌خوردگی  $D_{sec ant}^{II} = \infty$  خواهد بود. در حالت برش باقیمانده، ثابت سختی برشی کاهش می‌یابد و  $\beta \leq 1$  خواهد بود و سختی برشی ترک از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$D_{sec ant}^{II} = \frac{\beta}{1 - \beta} G \quad (8)$$

در اینجا از روش برش باقیمانده‌ی ثابت با مقدار توصیه‌شده‌ی  $0.2$  استفاده شده است.

با فرض توزیع یکنواخت الیاف در سرتاسر حجم ماده و همچنین جهت‌گیری تصادفی الیاف‌ها می‌توان ECC را یک ماده‌ی ایزوتروپیک فرض کرد. به عبارت دیگر، خصوصیات کشسانی را در جهات مختلف برای ECC یکسان فرض کرد. از طرفی با توجه به نمودار تنش-کرنش این ماده در کشش و فشار می‌توان با یک فرض ساده‌کننده، رفتار آن را تا قبل از ترک‌خوردگی به صورت کشسان خطی مدل‌سازی کرد. ضریب کشسانی  $E$  و ضریب پواسان  $\nu$  دو پارامتر رفتار فیزیکی مصالح هستند که در مدل‌سازی بخش کشسان خطی به کار می‌روند. ضریب کشسانی از نمودارهای تنش-کرنش در کشش و فشار قابل محاسبه است. از طرفی با توجه به آنکه این ماده نوعی از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی است، که از خانواده‌ی بتن‌های الیافی محسوب می‌شوند، می‌توان ضریب پواسان را نیز مانند بتن‌های الیافی در حدود  $0.2$  فرض کرد.

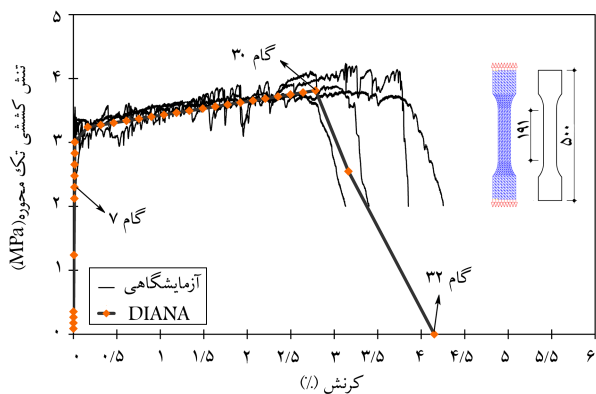
برای مدل‌سازی رفتار فشاری ECC از مدل دراگر-پراگر استفاده شده است. شرایط تسلیم در مدل دراگر-پراگر تقریبی از سطح تسلیم موهر-کولمب است که بر اساس سه پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی  $\phi$ ، زاویه‌ی اتساع  $\psi$ ، و ضریب چسبندگی معادل  $C$  تعریف می‌شود. این پارامترها می‌توانند در زمان بارگذاری ثابت و یا متغیر



شکل ۱۴. رفتار تعریف‌شده‌ی چندخطی با سخت‌شوندگی کرنشی پس از ترک‌خوردگی.

جدول ۷. پارامترهای رفتاری در مدل‌سازی مصالح ECC در فشار و کشش تک محوره و رفتار برشی.

رفتار برشی	رفتار کششی		رفتار فشاری			رفتار خطی		پارامتر
	رفتار سخت شوندگی کرنشی	$f_{ct}$	$f'_c$	$\sin \psi$	$\sin \phi$	$C$	$v$	
$\beta$	-	MPa	MPa	-	-	MPa	-	GPa
-	-	۳٫۲۱	۴۷	۰٫۱۷۳۶	۰٫۱۷۳۶	۱۹٫۷۲	۰٫۲	۱۸
مقدار	بر اساس جدول ۶							



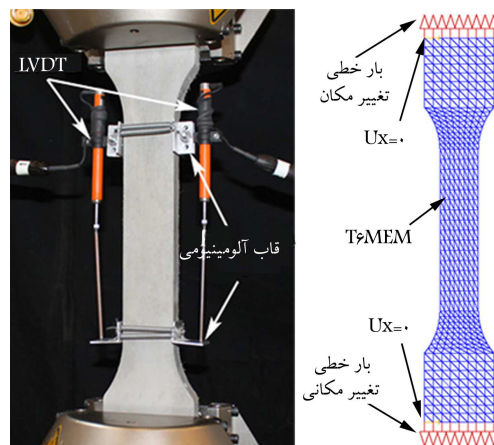
شکل ۱۷. مقایسه‌ی رفتار کششی ECC در مدل اجزاء محدود و آزمایش.

فولادیی هستند که در مقابل چرخش آزادند و بنابراین امکان حرکت‌های محدودی در راستای افق تیر در هر دو تکیه‌گاه وجود دارد، اما برای پایدارسازی مدل به ناچار جابجایی یکی از تکیه‌گاه‌ها در این راستا بسته شده است. مطابق آنچه در طی آزمایش‌ها ملاحظه شده است، در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها احتمال بروز ترک بسیار پایین است. بنابراین المان‌بندی با الگوریتم Delaunay به نحوی صورت گرفته است که در ۱/۳ میانی نمونه‌ی ابعاد المان‌ها ریزتر باشد و با نزدیک شدن به تکیه‌گاه‌ها ابعاد المان‌ها افزایش یابد. این نوع المان‌بندی مستلزم مدل‌سازی تیر به صورت دو بخش با یک خط مشترکی است که در وسط دهانه تیر قرار می‌گیرد. سپس با دور شدن از این خط تعداد فواصل تقسیم‌بندی‌های خطوط بالا و پایین مدل برای تولید المان‌ها افزایش می‌یابد. مدل‌سازی با چنین شرایطی از یک سو سبب کاهش زمان تحلیل و از سوی دیگر سبب نزدیک‌تر شدن نتایج تحلیل به نتایج آزمایش‌ها می‌شود. در ادامه، نتایج تحلیلی اجزاء محدود و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی بر مبنای نمودار تنش-کرنش، نمودار نیروی تغییرمکان، توزیع تنش و کرنش و نیز الگوی ترک‌خوردگی بحث شده است.

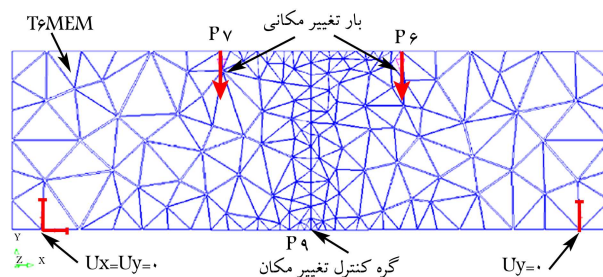
### ۳.۷. نمودارهای تنش-کرنش و نیرو-تغییرمکان

نمودار تنش-کرنش یکی از المان‌های واقع در ناحیه‌ی تنش ثابت، نمونه‌ی دمبلی در آزمایش کشش مستقیم، ناحیه‌ی بی‌ضخامت ثابت ۵۰ میلی‌متر، در مقایسه با نمودار تنش-کرنش آزمایشگاهی در شکل ۱۷ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با استفاده از مدل ترک‌پخش شده با کرنش تجزیه‌شده و رفتار چندخطی سخت‌شوندگی در کشش، رفتار ECC در بارگذاری کششی به خوبی مدل‌سازی شده است. نمودار تنش-کرنش هر المان دیگری در این ناحیه نیز همین وضعیت را دارد.

در مورد تیر خمشی نیز مطابق مدل‌سازی نشان داده‌شده در شکل ۱۶ بدهی است که از جمع عکس‌العمل‌های قائم تکیه‌گاه‌ها می‌توان نیروی فرضی وارد بر وسط تیر را به دست آورد و نمودار نیروی وارد در برابر تغییرمکان وسط تیر، نقطه‌ی P۹،



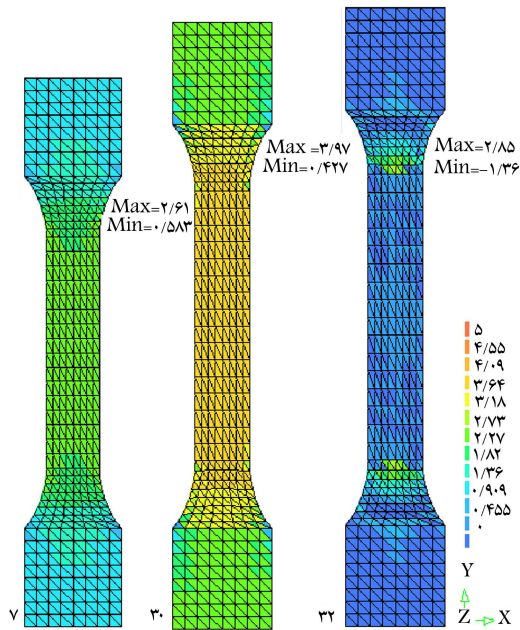
شکل ۱۵. چیدمان آزمایشگاهی نمونه‌ی کشش مستقیم و مدل اجزاء محدود متناظر.



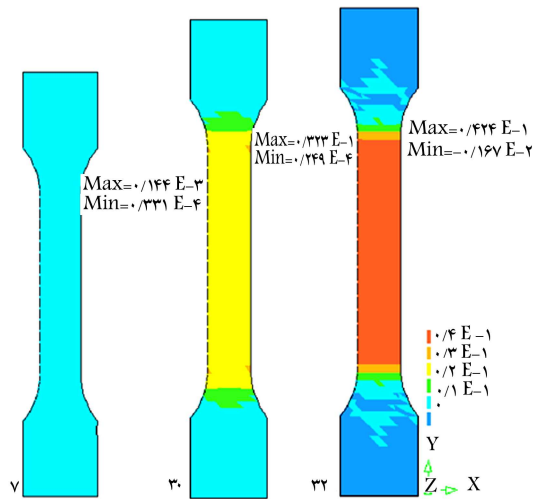
شکل ۱۶. مدل اجزاء محدود تیر ECC در آزمایش خمشی چهار نقطه‌یی.

خط پایانی نمونه به صورت افزایش تغییرمکان در گام‌های متوالی تعریف شده و برای اطمینان از تغییر شکل یکنواخت، بارگذاری بر روی تمامی گره‌های موجود بر روی هر کدام از این خطوط انجام شده است. تغییرمکان  $U_x$ ، یک نقطه در بالا و پایین مدل بسته شده است تا امکان جابجایی مدل در راستای  $x$  وجود نداشته باشد. همچنین انحنای متصل‌کننده‌ی دو قسمت با عرض متفاوت در نمونه، دقیقاً مطابق با شرایط واقعی مدل‌سازی شده است.

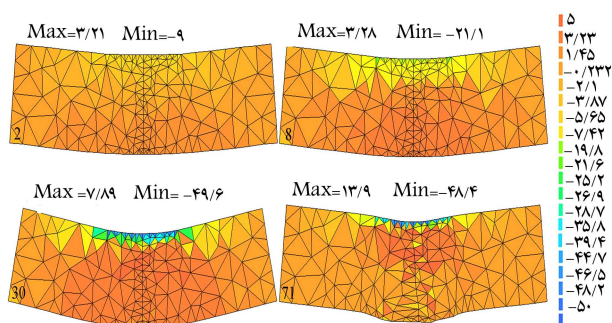
تیر ECC نیز بر اساس چیدمان آزمایشگاهی توصیف شده در بخش ۳.۵ مطابق شکل ۱۶ مدل‌سازی شده است. فاصله‌ی دو نقطه‌ی بارگذاری روی تیر و نیز فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها به ترتیب ۱۵۰ و ۴۵۰ میلی‌متر تعریف شده است. در نمونه‌های آزمایشگاهی نیرو به صورت کنترل تغییرمکان به وسط دهانه‌ی تیر فولادی صلبی که فقط بر دو نقطه از تیر ECC قرار داشت، اعمال شده است. بنابراین برای تطابق مدل‌سازی و آزمایش، نیروی فشاری در دو نقطه‌ی بارگذاری به صورت افزایش تغییرمکان در گام‌های متوالی در نظر گرفته شده است و با تعریف یک الگوی بارگذاری تغییرمکانی واحد و قراردادن تغییرمکان‌های اعمال شده به دو نقطه‌ی P۶ و P۷ در این الگو، از یکسان بودن جابجایی این دو نقطه در گام‌های مختلف تحلیل اطمینان حاصل شده است. اگرچه تکیه‌گاه‌ها در شرایط آزمایشگاهی استوانه‌های



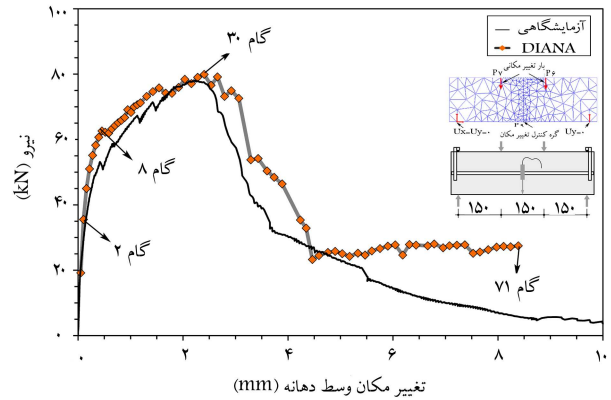
شکل ۱۹. توزیع تنش در نمونه‌ی دمبلی در گام‌های مشخص شده.



شکل ۲۰. توزیع کرنش در نمونه‌ی دمبلی در گام‌های مشخص شده.



شکل ۲۱. توزیع تنش‌های اصلی P1 در گام‌های مختلف تحلیل.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو-تغییر مکان تحلیلی و آزمایشگاهی در تیر ECC.

را ترسیم کرد. این نیرو در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از نیروسنجی که میان متحرک دستگاه و تیر صلب فولادی قرار داده شده بود، برآورد شده است.

شکل ۱۸ مقایسه‌ی نمودار نیرو-تغییر مکان تحلیلی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان گفت که تعریف رفتار کششی چندخطی و رفتار فشاری دراگر-پراگر بر اساس پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های تک محوره توانسته است رفتار خمشی تیر را به خوبی مدل‌سازی کند. لازم به یادآوری است که رفتار خمشی تیر ECC برابند رفتار کششی منحصر به فرد ECC در ناحیه‌ی زیرین تار خشی مقطع و رفتار فشاری آن در بالای تار خشی است. بنابراین به نظر می‌رسد در اعضای سازه‌های دیگر نیز استفاده از این دو مدل رفتاری می‌تواند در ارزیابی رفتار کلی عضو سازه‌ی ساخته شده از ECC سودمند باشد.

#### ۴.۷. توزیع تنش و کرنش در ECC

برای نمونه‌ی دمبلی، توزیع تنش و کرنش کششی در راستای  $y$  در ناحیه‌ی خطی اولیه، ناحیه‌ی سخت‌شوندگی کرنشی به همراه ترک‌خوردگی‌های متعدد در نقطه‌ی بیشینه‌ی تنش کششی و ناحیه‌ی نرم‌شوندگی کششی همراه با تمرکز ترک به ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. مطابق این نتایج تحلیلی و همان‌طور که انتظار می‌رفت، ساخت دمبلی نمونه‌ها سبب توزیع یکنواخت تنش بیشینه در بخش میانی نمونه، که محل نصب جابجایی‌سنج حساس و مبنای رسم نمودار تنش-کرنش آزمایشگاهی است، شده است و از بروز شکست‌های موضعی در محل فک‌های دستگاه، که ناحیه‌ی تمرکز تنش فشاری است، جلوگیری کرده است. توزیع تنش و کرنش در گام سی و دوم تحلیل، که در بخش پایانی نمودار تنش-کرنش قرار دارد، نشان‌دهنده‌ی کاهش شدید تنش و نیز افزایش کرنش یا به عبارت دیگر، تمرکز ترک و افزایش عرض ترک‌هاست. این پدیده در تست‌های آزمایشگاهی با متمرکز شدن ترک و افزایش شدید عرض ترک تمرکز یافته بروز می‌کند.

شکل ۲۱ توزیع تنش‌های اصلی P1 به همراه تغییر شکل تیر ECC را در برخی از گام‌های بارگذاری، که در نمودار نیرو-تغییر مکان مشخص شده‌اند، را نشان می‌دهد. برای فراهم کردن امکان مقایسه، توزیع تنش در گام‌ها بر اساس یک کانتور ثابت نشان داده شده است؛ که در آن تنش‌های فشاری با علامت منفی مشخص شده است. این توزیع تنش در مقایسه با یک تیر بتنی غیر مسلح و یا حتی تیر بتنی با الیاف فولادی با همین ابعاد نشان می‌دهد که در تیر ECC توزیع تنش گسترش بسیار بیشتری دارد و در المان‌های دور از خط وسط نیز تنش کششی ناشی از

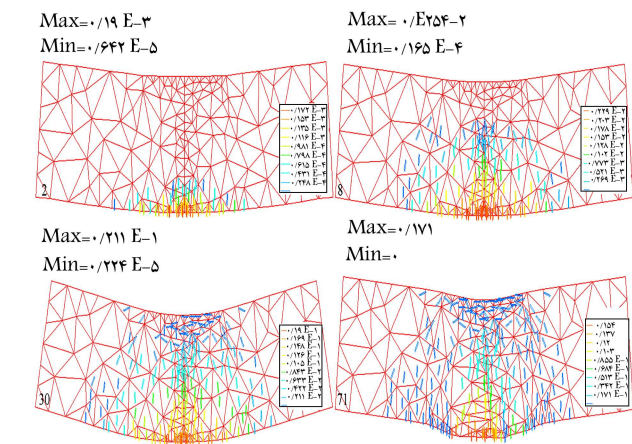
مسلح رفتار می‌کند. شکل ۱۲ که الگوی ترک‌خوردگی تیر در انتهای آزمایش خمشی چهار نقطه‌یی را نشان می‌دهد، قابل مقایسه با گام ۷۱ از تحلیل اجزاء محدود است.

## ۸. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، مکانیک شکست و خصوصیات کششی، فشاری، و خمشی یک کامپوزیت سیمانی مسلح با الیاف پلی وینیل الکل با نام ECC تحت بارگذاری‌های استاتیکی و چیدمان دقیق آزمایشگاهی بررسی شده است و در برخی از موارد با رفتار بتن معمولی و یا بتن الیافی معمولی مقایسه شده است. همچنین روشی برای مدل‌سازی تحلیلی این ماده بر مبنای مدل ترک پخش شده با کرنش تجزیه شده و رفتار چندخطی سخت‌شوندگی در کشش و خمیرسانی دراگر - پراگر پیشنهاد شده است. نمونه‌های کشش مستقیم ECC فقط دارای ۲٪ حجمی الیاف، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی با ظرفیت کرنشی ۳ تا ۳/۸ درصد را تا قبل از تمرکز ترک و گسیختگی از خود نشان داده‌اند، که ۳۰۰ تا ۳۸۰ برابر ظرفیت کرنشی بتن معمولی و یا بتن‌های الیافی معمولی است. میانگین مقاومت کششی اولین ترک‌خوردگی در حدود ۴ MPa بوده است و در لحظه تمرکز ترک به بیش از ۴ MPa افزایش یافته است. ضریب کشسانی فشاری ECC به دلیل استفاده از سنگدانه‌های بسیار ریز نسبت به بتن معمولی کمتر بوده است، اما مقاومت فشاری آن با بتن‌های پرمقاومت برابری می‌کند؛ به گونه‌ای که تنش بیشینه‌یی در حدود ۴۷ مگاپاسکال متناظر با کرنش فشاری ۰/۵۵٪ را تجربه کرده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که رفتار خمشی ECC نسبت به بتن معمولی و یا بتن الیافی معمولی بسیار متفاوت است و می‌تواند تنش خمشی بالاتر از ۸ مگاپاسکال به همراه ظرفیت تغییرشکل منحصربه‌فرد را بدون تسلیم عضو با فولاد تحمل کند. بدیهی است که رفتار ECC مسلح به میلگردهای فولادی نیازمند تحقیق است، اما به نظر می‌رسد این ماده می‌تواند در نقاطی از سازه که بتن‌های معمولی عملکرد مناسبی ندارند، مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که با استفاده از مدل ترک پخش شده با کرنش تجزیه شده و رفتار چندخطی سخت‌شوندگی در کشش، رفتار ECC در بارگذاری کششی به خوبی مدل‌سازی می‌شود. همچنین تحلیل‌های اجزاء محدود صورت‌گرفته بر تیر ECC در بارگذاری چهارنقطه‌یی اثبات می‌کند که رفتار سازه‌یی ECC را می‌توان با ترکیب مدل خمیرسانی دراگر - پراگر با مدل ترک پخش شده و استفاده از داده‌های آزمایش‌های تک محوره و با فرض ضریب برش باقیمانده برابر با بتن معمولی با تقریب قابل قبولی مدل‌سازی کرد.



شکل ۲۲. الگوی ترک‌خوردگی در تیر خمشی ECC در بارگذاری چهار نقطه‌یی.

بارگذاری رخ می‌دهد. علت این پدیده، رفتار سخت‌شوندگی کششی ECC است. به عبارت دیگر، با رسیدن یک المان به تنش اولین ترک‌خوردگی سخت‌شوندگی در آن المان بر اساس رفتار کششی چندخطی تعریف شده آغاز می‌شود و با تحمل تنش‌های کششی بیشتر از تنش اولین ترک‌خوردگی، به المان مجاور خود نیز اجازه‌ی شرکت در باربری را می‌دهد. این پدیده در نمودار نیرو-تغییرمکان به شکل ناحیه‌ی سخت‌شوندگی و به دنبال آن ناحیه‌ی نرم‌شوندگی طولانی دیده می‌شود. این تفاوت در بخش‌های قبلی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شد.

همچنین ملاحظه می‌شود که تنش‌های فشاری در ناحیه‌ی محدودی از وجه بالایی تیر و در حد فاصل دو نقطه‌ی بارگذاری رخ می‌دهد که در این آزمایش، به صورت له‌شدگی مختصری در این ناحیه ملاحظه شده است. در صورتی که تیرهای بتنی غیرمسلح در آزمایش خمشی چهارنقطه‌یی فقط با ترک‌خوردگی کششی و بدون تجربه‌ی خردشدگی فشاری می‌شکنند. به عبارت دیگر، امکان باز توزیع تنش‌ها در تیر بتنی غیرمسلح وجود ندارد و با رخداد اولین ترک‌کششی و رسیدن ترک به وجه بالایی تیر در تغییرمکان‌های بالاتر، تیر کاملاً ترد گسیخته می‌شود. اما در تیر ساخته شده از ECC به دلیل پل بندی ترک‌ها توسط الیاف‌های PVA و همچنین عملکرد خمیر سیمانی مهندسی شده، امکان باز توزیع تنش و در نتیجه رخداد ترک‌های جدید وجود دارد و تیر در تغییرمکان‌های بسیار بالاتر و کاملاً شکل‌پذیر به شکست می‌رسد. این پدیده همچنین در الگوی ترک‌خوردگی تیر ECC، که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تغییرمکان، ترک‌های جدیدی شکل گرفته و در برخی از نقاط عرض ترک‌های قدیمی نیز افزایش یافته است و تیر ECC مانند تیر بتن

10. smeared crack
11. threshold angle
12. shear retention

## پانویس‌ها

1. high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC)
2. fiber reinforced concrete (FRC)
3. engineered cementitious composites (ECC)
4. poly vinyl alcohol (PVA)
5. shotcrete
6. four-point bending test
7. fly ash
8. crack localization
9. compressive crushing

## منابع (References)

1. Sirijaroonchai, K., El-Tawil, S. and Parra-Montesinos, G. "Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading", *Cement & Concrete Composites*, **32**(1), pp. 62-72 (2010).

2. Li, V.C. "On engineered cementitious composites (ECC) – a review of the material and its applications", *J. Advanced Concrete Technology*, **1**(3), pp. 215-230 (2003).
3. Yang, E.H., Sahmaran, M., Yang, Y. and Li, V.C. "Rheological control in production of engineered cementitious composites", *ACI Materials Journal*, **106**(4), pp. 357-366 (2009).
4. Li, V.C., Fischer, G. and Lepech, M.D. "Shotcreting with ECC", *Proceedings of CD. Spritzbeton-Tagung*, Ed. W. Kusterle, Austria (2009).
5. Yang, E.H. and Li, V.C. "Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model", *J. Construction and Building Materials*, **24**(2), pp. 130-139 (2010).
6. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Nakano, K. and Sato, Y. "Structural performance of beam elements with PVA-ECC", *Proc. HPRCC 3*, Ed. Reinhardt & Naaman, C&H, pp. 531-542 (1999).
7. Paegle, I. and Fischer, G. "Shear behavior of reinforced engineered cementitious composites (ECC) beams", *Advances in Cement-Based Materials*, Stellenbosch, South Africa (17-19 Nov 2009).
8. Fischer, G., Fukuyama, H. and Li, V.C. "Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions", *in Proc., DFRCC Int'l Workshop*, Takayama, Japan, pp. 269-278 (2002).
9. Li, V.C. "Engineered cementitious composites (ECC) – material", Structural, and Durability Performance. University of Michigan, Ann Arbor, Report: MI 48109 (2008).
10. Fischer, G. and Li, V.C. "Intrinsic response control of moment resisting frames utilizing advanced composite materials & structural elements", *ACI Structures J.*, **100**(2), pp. 166-176 (2003).
11. Canbolat, B.A., Parra-Montesinos, G.J. and Wight, J.K. "Experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams", *ACI Structural J.*, **102**(1), pp. 159-166 (2005).
12. Li, V.C., Chung, H.W., Maalej, M. and Mishra, D.K. "Tensile behavior of cement-based composites with random discontinuous steel fiber", *Journal of the American Ceramic Society*, **79**(1), pp. 74-78 (1996).
13. Li, V.C., Wang, S. and Wu, C. "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)", *ACI, Material J.*, **98**(6), pp. 483-492 (2001).
14. Maalej, M. and Li, V.C. "Flexural tensile strength ratio In engineerd cementitious composites", *Journal of Material in Civil Engineering, ASCE*, **6**(4), pp. 513-528 (1994).
15. Kesner, E.K., Billington, S.L. and Douglas, S.K. "Cyclic response of highly ductile fiber-reinforced cement-based composites", *ACI Material Journal*, **100**(5), pp. 381-390 (2003).
16. Kim, Y.Y., Fischer, G. Lim, Y.M. and Li, V.C. "Mechanical performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcreting process for repair applications", *ACI Material J.*, **101**(1), pp. 41-49 (2004).
17. Wang, S. and Li, V.C. "Engineered cementitious composites with high-volume fly ash", *ACI Material J.*, **104**(3), pp. 233-241 (2007).
18. Maalej, M., Quek, T.S. and Zhang, J. "Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact", *Journal of Material in Civil Engineering, ASCE*, **17**(2), pp. 143-152 (2005).
19. Ahmed, S.F.U. and Maalej, M. "Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites", *Construction and Building Materials*, **23**(2), pp. 96-106 (2009).
20. Sahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, M.A.K., Ranade, R. and Li, V.C. "Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites", *ACI Material Journal*, **106**(3), pp. 308-316 (2009).
21. Li, V.C., Wang, Y. and Backer, S. "Effect of inclining angle, bundling, and surface treatment on synthetic fiber pullout from a cement matrix", *Journal of Composites*, **21**(2), pp. 132-140 (1990).
22. Lin, Z. and Li, V.C. "Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, **45**(5), pp. 763-787 (1997).
23. Yang, E.H. and Li, V.C. "Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites", *Journal of Advanced Concrete Technology*, **6**(1), pp. 181-193 (2008).
24. Li, V.C. "From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications", *Journal of Structural Mechanics Earthquake Engineering, JSCE*, **10**(2), pp. 37-48 (1993).
25. Lin, Z., Kanda, T. and Li, V.C. "On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites", *Journal of Concrete Science and Engineering, RILEM*, **1**, pp. 173-184 (1999).
26. Wu, H.C. and Li, V.C. "Stochastic process of multiple cracking in discontinuous random fiber-reinforced brittle matrix composites", *International Journal of Damage Mechanics*, **4**(1), pp. 83-102 (1995).
27. Wang, Y., Backer, S. and Li, V.C. "A statistical tensile model of fiber reinforced cementitious composites", *Journal of Composites*, **20**(3), pp. 265-274 (1990).
28. Li, V.C. and Wu, H.C. "Conditions for pseudo strain hardening in fiber reinforced brittle matrix composites", *Journal of Applied Mechanics Review*, **45**(8), pp. 390-398 (1992).
29. Kim, D.J., Naaman, A.E. and El-Tawil, S. "Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites", *Cement and Concrete Composites*, **30**(10), pp. 917-928 (2008).
30. Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T. and Kanda, T. "Multiple cracking and fiber bridging characteristics of engineered cementitious composites under fatigue flexure", *Journsl of Materials in Civil Engineering*, **16**(5), pp. 433-443 (2004).
31. Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H. "Behavior of concrete under biaxial stresses". *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, **99**(40), pp. 853-866 (1973).