

# بررسی آزمایشگاهی رفتار اتصال‌های تیر به ستون بتنی با کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانولوله‌ی کربن

محمد رضائی (دانشجوی دکتری)  
ابراهیم خلیل‌زاده وحیدی\* (استادیار)  
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

در نوشتار حاضر، به بررسی تأثیر کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانولوله‌های کربن (CNT-ECC) در رفتار اتصال‌های خارجی تیر به ستون تحت بارگذاری چرخه‌یی پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، سه اتصال بتنی آزمایش شدند که یکی از آن‌ها به عنوان نمونه‌ی مرجع و در ۲ اتصال دیگر، ناحیه‌ی مفصل خمیری تیر به ستون با ECC و CNT-ECC جایگزین شده است. پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده، شامل: منحنی‌های هیستریزیس لنگر - تغییر مکان نسبی، ظرفیت جذب انرژی و توزیع ترک‌ها بوده است. نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌یی در انتهای تیر با کنترل تغییر مکان قرار گرفتند. بارگذاری تا زمانی که کاهش بار به بیش از ۳۰ الی ۴۰ درصد بیشینه‌ی بار وارد می‌رسید، ادامه یافت. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با استفاده از مصالح توانمند ذکر شده، شکل‌پذیری و جذب انرژی اتصال‌های خارجی تیر به ستون به صورت مؤثری بهبود می‌یابد.

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی آزمایشگاهی، بتن مسلح، اتصال‌های بتنی، نانولوله‌ی کربن (CNT)، کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC).

mohammad.rezaei1367@yahoo.com  
e\_vahidi2000@yahoo.com

## ۱. مقدمه

بتن معمولی به عنوان مصالح رایج ساختمانی برای انواع مختلف زیرساخت در سراسر جهان استفاده می‌شود که مقاومت کششی کم و شبه‌تَرَد دارد و در معرض انتشار و گسترش ترک‌ها، آسیب‌پذیر است. در سال‌های اخیر، به منظور برطرف کردن معایب ذکر شده، پژوهش‌های وسیعی در خصوص استفاده از مواد در مقیاس نانو و میکرو صورت پذیرفته است.

کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC)<sup>۱</sup> نوعی از کامپوزیت‌های سیمانی با عملکرد بالاست که سخت‌شوندگی کرنش درکشش دارد. این ویژگی ظرفیت بسیار خوبی در کنترل ترک‌ها ایجاد می‌کند. جایگزینی بتن با ECC می‌تواند تا حد زیادی باعث کاهش مشکلات ناشی از ترک‌خوردگی و دوام در ارتباط با شکنندگی بتن باشد. ECC نوعی کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC)<sup>۲</sup> است که رفتاری با تشکیل ریزترک‌ها، ظرفیت کرنش کششی در حدود ۳ تا ۷ درصد، مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال دارد.<sup>[۸-۵]</sup>

ECC به دلیل حذف درشت‌دانه‌ها، کارایی و همگنی بالایی دارد که این امر به دلیل استفاده از ماسه‌ی سیلیسی، مواد مکملی همچون خاکستر بادی و فوق روان‌کننده‌هاست، برای دستیابی به خواص ذکر شده‌ی اخیر باید از درصد الیاف مناسب با قطر بیشینه‌ی ۵۰ میکرومتر، با نسبت  $l/d$  پایین و با مقاومت کششی بالا استفاده شود.<sup>[۱۰،۹]</sup> وانگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، از مواد ECC برای شبیه‌سازی

وقوع زلزله‌های اخیر در مکان‌های مختلف باعث اهمیت طراحی سازه‌های با شکل‌پذیری بالا شده است. پژوهش‌ها و طراحی‌های اخیر به موضوع مقاومت لرزه‌یی سازه‌ها، خصوصاً اتصال تیر به ستون توجه ویژه‌یی کرده‌اند، چرا که عملکرد ساختمان‌ها به عملکرد اتصال‌های تیر به ستون بستگی دارد.<sup>[۱]</sup> یک طراحی مناسب سازه نیاز دارد که سازه، مقاومت و شکل‌پذیری جهت جلوگیری از شکست ناگهانی داشته باشد.<sup>[۲]</sup>

در بارگذاری لرزه‌یی، اتصال تیر - ستون به عنوان حساس‌ترین ناحیه‌ی تحت تنش‌های برشی با جهت‌های مختلف در ناحیه‌ی اتصال به‌شمار می‌رود.<sup>[۳]</sup> رویکردهای مختلفی برای انواع اتصال تیر به ستون در سازه‌های بتن‌آرمه فرموله شده است. کمیته‌ی ACI-ASCE ۳۵۲ توصیه می‌کند به جهت جلوگیری از توسعه‌ی شکست ناشی از کشش قطری در ناحیه‌ی اتصال، از آرماتورهای عرضی دورپیچ استفاده شود. مقادیر زیاد آرماتورهای عرضی و تراکم آن‌ها باعث می‌شود که عملیات بتن‌ریزی و تراکم آن به درستی انجام نگیرد که این امر باعث می‌شود اتصال‌های بتنی نتوانند تغییرشکل مناسبی در هنگام زلزله از خود نشان دهند.<sup>[۴]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۷/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۳/۳۱، پذیرش ۱۳۹۹/۴/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2020.54507.2647

## Archive of SID

اتم تشکیل شده دارد که به آلترتروپ کربن تعلق دارد. معمولاً CNT، به دو دسته‌ی نانولوله تک دیواره‌ی کربن (SWCNTs)<sup>۱۱</sup> یا نانولوله‌ی چند دیواره‌ی کربن (MWCNTs)<sup>۱۲</sup> تقسیم می‌شوند.<sup>[۲۵-۲۲]</sup> از آنجایی که کشف CNT به سال ۱۹۹۱ مربوط می‌شود، بیشتر پژوهش‌ها در تعیین شاخص عملکرد در زمینه‌های خواص مکانیکی، الکتریکی و گرمایی متمرکز بوده است.<sup>[۲۶-۲۱]</sup>

پراکنده کردن یکنواخت CNT در ملات از مشکلات اساسی است و می‌تواند نقش مهمی در بهبود خواص ملات‌های حاوی نانولوله‌های کربنی ایفا کند. یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در مسائل آماده‌سازی مواد سیمانی مسلح به CNT، توزیع همگن آن است. با توجه به مساحت سطحی بزرگ و نسبت طول به قطر زیاد CNT و همچنین نیروهای جاذبه‌ی وان در وال، CNT را مستعد درهم آمیختگی و توی شدن و عدم پخش‌شدگی می‌کند.<sup>[۲۲]</sup> توی شدن و عدم پخش‌شدگی، آثار مثبت CNT را در عملکرد مکانیکی مواد کاهش می‌دهد.<sup>[۲۳]</sup>

به طور کلی فناوری‌های طراحی شده برای پراکنده کردن CNT به روش‌های فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. روش‌های فیزیکی، شامل: انرژی آلتراسونیک، توپ آسیاب،<sup>۱۳</sup> و تکان‌های مکانیکی<sup>۱۴</sup> است. آلتراسونیک انرژی لازم را برای غلبه بر نیروهای اندرکنشی وان در وال فراهم می‌کند. روش توپ آسیاب از طریق شکستن توده‌ی CNT که توسط نیروی وان در وال ایجاد شده بود به پخش‌شدگی کمک می‌کند. این روش‌ها می‌تواند در توزیع درصد بالای CNT در مخلوط سیمانی استفاده شود.<sup>[۲۴-۲۷]</sup> همچنین می‌توان برای توزیع بهتر CNT نسبت طول به قطر آن را کاهش داد که این کار به نقش مؤثر و عالی CNT در ماتریس مواد آسیب می‌زند.<sup>[۲۸]</sup>

معمولاً، روش‌های شیمیایی به وسیله‌ی اضافه کردن پیوند کووالانسی و غیرکووالانسی، آب‌پذیری سطحی CNT را بهبود می‌بخشد. روش‌های شیمیایی معمولاً با ایجاد یک پیوند کووالانسی برای تغییر سطح CNT با افزودن گروه‌های فعال شده‌ی قطبی، مانند: هیدروکسیل (OH)، کربوکسیل (-COOH) و کربونیل (=O)، کارکرد و توزیع CNT را بهبود می‌بخشند و گروه‌های فعال شده‌ی قطبی نیز می‌توانند پیوند بین CNT و مواد تشکیل‌شده‌ی ناشی از هیدراسیون سیمان را افزایش دهند.<sup>[۲۹]</sup> در مطالعات آزمایشگاهی، روش‌های رایج پخش و توزیع CNT، شامل روش استفاده از آلتراسونیک و یا عامل سطحی است، که برای به‌دست آوردن پراکندگی مطلوب، گاهی اوقات به صورت ترکیبی از دو روش اخیر استفاده می‌کنند.<sup>[۳۰]</sup>

کیوانی و همکاران (۲۰۰۷) نیز در بررسی نقش نانولوله‌ی کربن در خواص کامپوزیت‌های سیمانی، دریافتند که سیستم‌های سیمان و بتن، پتانسیل خوبی برای افزودن نانولوله‌های کربنی دارند. انتظار می‌رود که استفاده از نانولوله‌های کربن در مقایسه با الیاف میکرو، فواید مشخص بیشتری داشته باشد. نانولوله‌های کربنی نسبت به سایر الیاف مقاومت بیشتری دارند، که می‌تواند کلاً رفتار مکانیکی را بهبود بخشد. نانولوله‌های کربنی نسبت طول به قطر بالایی دارند؛ بنابراین، انرژی بیشتری را برای انتشار ترک در اطراف خود در مقایسه با سایر الیاف نیاز خواهند داشت. همچنین قطر کمتر آن‌ها به معنی امکان توزیع هر چه بیشتر و با فاصله‌ی کمتر در خمیر سیمان است. در نتیجه انتظار می‌رود عمل متقابل آن‌ها با خمیر سیمان متفاوت‌تر از دیگر انواع الیاف باشد. نانولوله‌های کربنی قابلیت افزایش مقاومت، مانع از انتشار ترک به صورت مؤثر در کامپوزیت‌های سیمانی و عملکرد یکپارچه دارند. مسلح کردن بتن با نانولوله‌ها، در صورتی که سبب جلوگیری از تشکیل ترک‌های بزرگ‌تر شود، می‌تواند به تولید بتن‌های چقرمه‌تری منجر شود. هنگام بارگذاری بتن، ریزترک‌های اولیه و کوتاه در آن توزیع می‌شوند. با یکی شدن ریزترک‌های مذکور، ترک‌های بزرگ قابل رؤیت تشکیل می‌شوند. الیاف به‌کار رفته در کامپوزیت‌های سیمانی می‌توانند

رفتار خمشی تیرهای حاوی ECC و ترکیبی از بتن معمولی و ECC، نمونه‌های مختلفی را آزمایش و آثار مدول کشسانی، شکل‌پذیری کششی، ضخامت، موقعیت ECC در رفتار خمشی در لحظه‌ی نهایی، خیز و بیشینه‌ی عرض ترک را ارزیابی کردند و دریافتند که با توجه به اینکه در طرح اختلاط ECC از سیمان بیشتری نسبت به بتن‌های معمولی استفاده می‌شود، جایگزینی بخش زیادی از سیمان با خاکستر بادی می‌تواند باعث کاهش عرض ترک و افزایش شکل‌پذیری، افزایش قابل توجه دوام شود؛ هر چند که مقاومت فشاری و مقاومت بیشینه‌ی کششی در این حالت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه هزینه‌ی تمام شده‌ی کامپوزیت مذکور نسبت به بتن معمولی بالاتر است، ایشان استفاده‌ی ترکیبی از مصالح ذکر شده را پیشنهاد کردند.<sup>[۱۱]</sup>

الیاف‌هایی که در مقیاس میلی‌متر و ماکرومتر در بتن استفاده می‌شوند، شامل: الیاف فولادی، آزبست، الیاف شیشه و همچنین الیاف‌های طبیعی و مصنوعی هستند که هر کدام از آن‌ها، باعث ایجاد ویژگی‌های منحصر به فردی در بتن از نظر: مقاومت، انعطاف‌پذیری، کنترل ترک و ... می‌شوند. اما مسلح ساختن بتن در مقیاس میلی‌متر و میکرومتر فقط می‌تواند از رشد میکروتکرک‌های داخلی در بتن جلوگیری کند و قادر به محدود کردن تولید ترک‌ها در مقیاس میکرو و نانو نیست.<sup>[۱۲]</sup>

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC) در دانشگاه میشیگان توسعه یافته‌اند، که در آن‌ها شکل‌پذیری کششی به واسطه‌ی گسترش ترک‌های ریز چندگانه افزایش می‌یابد. مصالح ECC در ساخت قطعات با رفتار کشسان و خمیری کاربرد دارند. با توجه به اینکه مصالح ECC، تحت بارهای سرویس وارد عمل می‌شوند، در حالت بهره‌برداری نیز مؤثر هستند. در مطالعات لی (۱۹۹۳) و فیشر و همکاران (۲۰۰۳)، مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل‌پذیری ۳ تا ۵ درصد برای ECC به‌دست آمده است.<sup>[۱۳، ۱۴]</sup>

نام ECC که توسط گسترش‌دهندگان اولیه‌ی مصالح کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی انتخاب شده است، بر پایه‌ی میکرومکانیکی طرح آن تأکید دارد. در سال ۲۰۰۶، کمیته‌ی فنی RILEM تصمیم گرفت تا بر خاصیت سخت‌شوندگی کرنش مصالح ECC تأکید شود و لذا نام کامپوزیت‌های سیمانی با سخت‌شوندگی کرنش یا SHCC<sup>۵</sup> برای آن انتخاب شد. این در حالی است که انجمن مهندسان عمران ژاپن<sup>۶</sup> بر روی خاصیت ترک‌های ریز چندگانه و دوام مصالح ECC تأکید دارد و از نام کامپوزیت‌های مسلح سیمانی الیافی با ترک‌های ریز چندگانه (MFCFRCC)<sup>۷</sup> استفاده می‌کند.<sup>[۱۵، ۱۶]</sup>

بیشتر مطالعات انجام‌گرفته بر روی ECC با الیاف PVA<sup>۸</sup> بوده است و لذا به‌صورت PVA-ECC ارجاع می‌شود. اما کاربرد سایر الیاف نیز موفقیت‌آمیز بوده است. برخی پژوهشگران نی کاربرد الیاف پلی‌اتیلن PE را با موفقیت آزمایش کرده‌اند.<sup>[۱۷-۲۰]</sup> سید<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر الیاف پلی‌اتیلن (PE) ترکیبی را در رفتار سخت‌شوندگی کرنشی کامپوزیت‌های سیمانی مسلح (ECC) بررسی و تأثیر درصد‌های مختلف آن‌ها را در سختی، مقاومت‌های خمشی و فشاری براساس توسعه‌ی تعریف ASTM C۱۰۱۸ ارائه کرده‌اند.<sup>[۲۱]</sup>

فناوری پیشرفته در زمینه‌ی نانومواد، بر روی موادی همچون نانولوله‌ی کربن (CNT)<sup>۱۰</sup> نانوسیلیکا، نانوتیتانیوم، نانواکسید آلومینیوم و ... نیز مسلح ساختن ماتریس سیمانی متمرکز است. معرفی مواد در مقیاس نانو مانع از شکل‌گیری و تشکیل میکروتکرک‌ها می‌شود. نتایج این دسته از پژوهش‌ها مبنی بر استفاده از CNT جهت مسلح ساختن ماتریس سیمانی موجب علاقه‌ی پژوهشگران در استفاده از مصالح نانومواد چندمنظوره و منحصر به فرد شده است. به عنوان یک ماده‌ی مسلح‌کننده، CNT یک ماده‌ی لوله‌ی شکل از ورق کربن رول شده است که یک

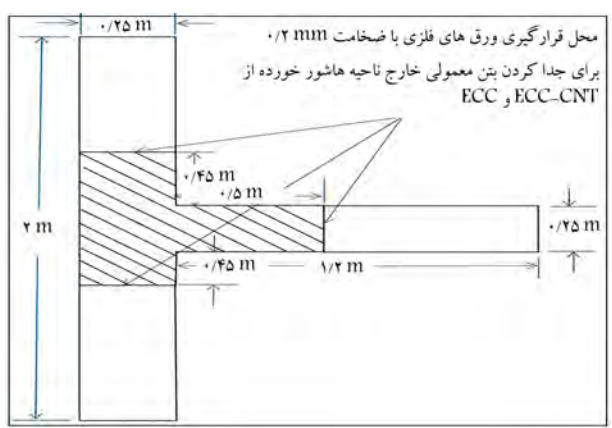
بسیار اهمیت دارد. در تعدادی از کتاب‌ها و نوشتارهایی که اخیراً منتشر شده است، پیشنهادهایی برای استفاده ترکیبی بتن معمولی و ECC شده است، اما نقش نامواد خصوصاً نانوالیاف‌ها در مصالح ذکر شده در نظر گرفته نشده و مطالعات عددی و آزمایشگاهی ناکافی بر روی مصالح حاوی الیاف‌های متداول صورت گرفته است. پیشنهاد مقدار استفاده بهینه از مصالح CNT-ECC<sup>۱۵</sup> در ترکیب با بتن معمولی در بخش‌هایی از سازه، مانند اتصال‌های تیر به ستون که تحت تنش‌های بالایی قرار دارند و شکست سازه بر روی آن بخش‌ها متمرکز و احتمال تشکیل مفصل خمیری بیشتر است، ضروری به نظر می‌رسد.

هدف کلی از انجام مطالعه پژوهشی حاضر، تحلیل و ارزیابی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها، شامل: پارامترهایی همچون ظرفیت نیرویی، ظرفیت تغییرشکل نسبی، جذب انرژی و الگوی ترک‌خوردگی و مقایسه‌ی نتایج استفاده از ECC و CNT-ECC با نمونه‌ی مرجع است. همان‌طور که مشخص است، نقش اصلی الیاف پخش شده در بتن کنترل بازشدگی و انتشار ترک‌هاست. با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص به‌کارگیری ECC در اجزاء سازه‌یی، نویسندگان نوشتار حاضر تلاش کرده‌اند تا بتوانند نقش نانولوله‌ی کربن را در بهبود رفتار لرزه‌یی اتصال‌های بتنی تیر به ستون ارزیابی کنند.

## ۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

### ۲.۱. مشخصات نمونه‌ها و مصالح مصرفی

سه اتصال خارجی T شکل بتنی برای آزمایش و بررسی در آزمایشگاه سازه‌ی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی آماده شدند. اتصال‌های موردنظر به‌عنوان بخشی از یک قاب پیرامونی در نظر گرفته شده‌اند. در نمونه‌ی اول که به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شده است، از بتن معمولی در کل اتصال استفاده شده است. در نمونه‌ی دوم، به دلیل هزینه‌ی تمام‌شده‌ی بالاتر تولید ECC نسبت به بتن معمولی، در محل اتصال تیر به ستون در ناحیه‌یی که احتمال تشکیل مفصل خمیری است، از ECC و خارج ناحیه‌ی اشاره شده از بتن معمولی استفاده شده است. در نمونه‌ی سوم، در ناحیه‌ی مفصل خمیری، CNT-ECC جایگزین بتن معمولی شد، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در نمونه‌های اخیر، ارتفاع ستون ۲۰۰ میلی‌متر و طول تیر ۱۱۰۰ میلی‌متر بوده است که دقیقاً در ناحیه‌ی میانی، ستون به آن متصل شده است. ابعاد مقطع تیر و ستون ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر لحاظ شده است. برای بررسی بهتر رفتار



شکل ۱. نحوه‌ی جایگزینی مواد ECC و CNT-ECC به جای بتن معمولی در مفصل خمیری (ناحیه‌ی هاشور خورده).

با پل زدن و بستن ترک‌ها در حین بارگذاری و باربرداری، رشد ترک را کنترل کنند. بنابراین استفاده از نانولوله‌ی کربنی می‌تواند منجر به کنترل ترک‌ها در مقیاس نانو شود. برخی نتایج نشان می‌دهند که نانولوله‌های کربنی، با داشتن پراکندگی مؤثر، با کنترل ترک‌های خمیر سیمان در مقیاس نانو می‌توانند باعث بهبود برخی مشخصات بتن و همچنین افزایش ظرفیت کرنشی در سنین اولیه شوند.<sup>[۴۱]</sup>

کونستاگدوتس و همکاران (۲۰۰۸) نیز در بررسی تغییرات نانو ساختار، مقاومت خمشی و مدول یانگ و جمع‌شدگی خمیر سیمان مسلح شده با نانوالیاف مانند نانولوله‌های کربنی و نانوالیاف کربنی که به خوبی در ماتریس سیمانی پراکنده شدند، پرداخته و دریافته‌اند که نانوالیاف نه فقط مقاومت خمشی ماتریس سیمانی را با کنترل ترک‌های ماتریس در مقیاس نانو بهبود می‌بخشد؛ بلکه ظرفیت کرنشی در سنین اولیه‌ی کامپوزیت سیمانی را نیز بهبود می‌بخشد و در نتیجه، نانوکامپوزیت با عملکرد بالا حاصل می‌شود.<sup>[۴۲]</sup> همچنین ایشان (۲۰۱۰) در نوشتار دیگری با اشاره به مشخصه‌های مکانیکی نانولوله‌های کربنی، استفاده از آن‌ها را در کامپوزیت‌های سیمانی با عملکرد بالا پیشنهاد کرده‌اند. در این راستا، به مسئله‌ی مهم نحوه‌ی پخش نانولوله‌ها در مصالح سیمانی پرداخته و نانولوله‌های با طول‌های مختلف به مقدار ۰/۸٪ وزن سیمان را با استفاده از انرژی اولتراسونیک و فعال‌کننده‌ی سطحی، به صورت مؤثر در آب پخش کرده‌اند. به گفته‌ی نویسندگان مذکور، استفاده از شرایط اولتراسونیک برای پخش مناسب کامل ضروری است و مقدار بهینه‌یی برای نسبت وزنی فعال‌کننده‌ی سطحی استفاده شده به نانولوله وجود دارد. نتایج، بیانگر بهبود مشخصه‌های نانو و میکرو مکانیکی خمیر سیمان توسط نانولوله‌های کربنی است.<sup>[۴۳]</sup> برای بررسی اثر انواع بتن در رفتار لرزه‌یی اتصال‌های بتنی، پژوهش‌های زیادی انجام شده است.

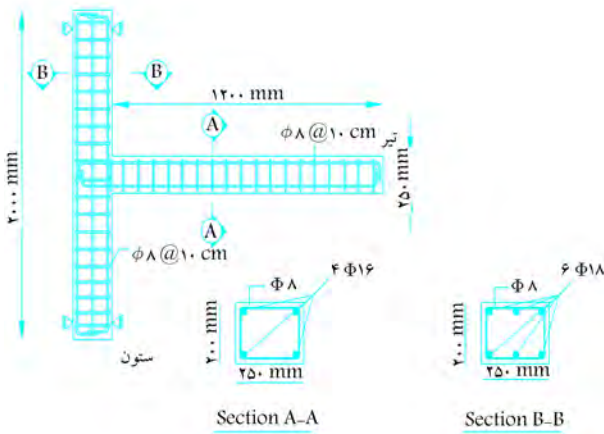
ابوحسین و همکاران (۲۰۱۹)، نیز به بررسی و ارزیابی رفتار ترک‌خوردگی اتصال‌های بتنی حاوی ECC با استفاده از تجزیه و تحلیل انتشار امواج صوتی پرداختند و با آزمایش روش‌های مختلف ارزیابی ترک‌ها با استفاده از امواج صوتی، نقش مفید استفاده از HPRCC و ECC را در بهبود خواص اتصال‌های بتنی تأیید کردند.<sup>[۴۴]</sup> حسینی و همکاران (۲۰۱۸)، هم رفتار لرزه‌یی اتصال‌های سه‌بعدی تیر- ستون حاوی ECC تحت خمشی و پیچش دوطرفه را ارزیابی کردند و اتصال‌های سه‌بعدی با ۶ درجه آزادی و شرایط مرزی واقع‌بینانه آزمایش شدند. همچنین تأثیر حذف آرماتورهای برشی در چشمه‌ی اتصال نیز بررسی شده است.<sup>[۴۵]</sup> رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش از ECC یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و قابلیت ترک‌خوردگی زیاد قبل از شکست ایجاد کرده است. از آنجایی که ECC یک مصالح نسبتاً جدید است، عمده‌ی پژوهش‌های انجام گرفته بر روی شناخت ماهیت آن، نسبت‌های اختلاط مصالح، روابط حاکم بر منحنی تنش - کرنش بوده است. همچنین در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی بر روی کاربرد عملی ECC در قطعات سازه‌یی، مانند قاب‌ها، تیرها و ستون‌ها انجام شده است؛ اما مطالعات انجام شده به اندازه‌ی پژوهش‌های مربوط به شناخت رفتار خود مصالح گسترده نبودند و نیازمند انجام مطالعات عددی و آزمایشگاهی فراوان است. افزودن الیاف مختلف به بتن باعث بهبود خواص بتن، نظیر: مقاومت‌های کششی، خمشی و ضربه‌یی، قابلیت جذب انرژی، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی در مقایسه با بتن‌های معمولی شده است. همچنین در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌یی برای پیشرفت و نوآوری در استفاده از الیاف میکرونی برای بهبود رفتار مکانیکی ترکیب‌های سیمانی و بتن انجام شده است. با توجه به پژوهش‌های مذکور در مقیاس میکرونی، توجه به نانولوله‌های کربنی به کمک دانش و فناوری نانو و مطالعه‌ی آثار آن‌ها در خواص بتن و استفاده‌ی سازه‌یی از آن در پروژه‌های با حساسیت بالا،

جدول ۱. طرح اختلاط استفاده شده در نمونه‌ها ( $Kg/m^3$ ).

طرح اختلاط	سیمان	ماسه		شن	خاکستر بادی	آب	فوق روان کننده	الیاف (pp) درصد حجمی	نانولوله کربن
		معمولی	سیلیسی						
بتن معمولی (NC)	۳۶۰	۷۲۰	-	۱۰۸۰	-	۱۷۱	۰/۸۱	-	-
ECC	۵۵۱	-	۲۷۶	-	۸۲۷	۴۱۴	۲/۲	۲۰	-
CNT-ECC	۵۵۱	-	۲۷۶	-	۸۲۷	۴۱۴	۲/۲	۲۰	۰/۵۵۱

جدول ۲. مشخصات اصلی (MWCNT) حاوی عامل OH.

۴۰	قطر خارجی (nm)
۱۲-۵	قطر داخلی (nm)
۳۰-۱۰	طول ( $\mu m$ )
$30 <$	مساحت سطح مخصوص SSA ( $m^2/g$ )
۹۹/۹	درصد خلوص (%)
CVD	روش ساخت



شکل ۲. جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها.

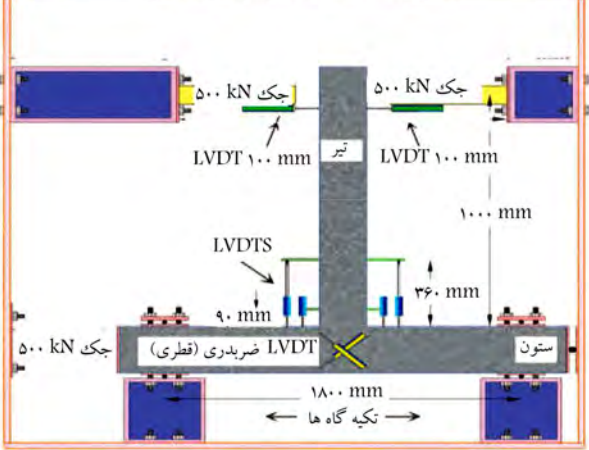
آب، در پژوهش حاضر از مخلوط صمغ عربی به همراه کربوکسیلات اتر استفاده شده است. نحوه‌ی اختلاط CNT به این صورت بود که ابتدا ۱۵ گرم صمغ عربی را در ۰/۵ لیتر آب با حرارت غیرمستقیم حل شد، سپس CNT به آن اضافه و بعد با فوق روان‌کننده‌ی کربوکسیلات اتر موردنیاز مخلوط شد، تا محلول یکدست و همگنی به دست آمد. الیاف‌ها و نانوالیاف‌ها بعد از اینکه ملات با کارایی مناسب ایجاد شد، در مرحله‌ی آخر به آرامی و با مقادیر کم به ملات سیمانی و طی یک فرایند مکانیکی اضافه شدند، که مراحل اختلاط نانولوله‌ها در شکل ۳ مشاهده می‌شود. برای ارزیابی پخش‌شدگی نانولوله‌ها در آب و مخلوط سیمانی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی دارای قدرت تفکیک بالا در ولتاژهای پایین استفاده شد. جهت آماده‌سازی طرح اختلاط، در پژوهش حاضر برای مخلوط کردن بهتر CNT در آب به همراه صمغ عربی، قبل از اضافه کردن فوق روان‌کننده، برای مدت زمان طولانی حدود ۳۰ دقیقه، محلول مذکور هم زده شد. در صورت استفاده از دستگاه آلتراسونیک، عملیات اختلاط بهتر و در مدت زمان کمتری انجام می‌شود. در شکل ۴، تصاویر SEM از نحوه‌ی پخش‌شدگی CNT در مخلوط ترکیبی از آب، صمغ عربی، و فوق روان‌کننده (شکل ۴ الف) و بعد از اضافه کردن به ماتریس طرح (شکل ۴ ب) مشاهده می‌شود.

محل اتصال تحت مودهای گسیختگی ناشی از تحریک لرزه‌یی از مفهوم «جزء قوی - اتصال ضعیف»<sup>۱۶</sup> استفاده شده است. جزئیات آرماتورگذاری و ابعاد مقاطع برای هر ۳ نمونه یکسان در نظر گرفته شده است، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. هنگام بتن‌ریزی در نمونه‌های ۲ و ۳، برای جداسازی ECC و ECC-CNT از بتن معمولی از ورق‌های فولادی بسیار نازک در قالب‌بندی استفاده شده است. نحوه‌ی اتصال بتن معمولی با ECC در اتصال T شکل کاملاً یکپارچه است و هیچ‌گونه درز اجرایی به وجود نخواهد آمد که این امر به این دلیل است که اولاً بتن معمولی و ECC به صورت هم‌زمان در درون قالب ریخته می‌شود، به‌گونه‌یی که حتی در بتن معمولی و ECC، گیرش اولیه حاصل نشده است. ثانیاً ورق‌های فولادی به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر در قالب به گونه‌یی تعبیه شده بودند که بلافاصله بعد از اینکه دو نوع مصالح بتنی در قالب ریخته شد و قبل از اینکه حتی گیرش اولیه‌ی ناچیزی در مقطع به وجود بیاید، به صورت کشویی از قالب خارج شوند. طرح اختلاط بتن معمولی شامل سیمان پرتلند نوع II، ماسه‌ی معمولی با مدول نرمی (F.M) ۳/۱ و نسبت تمیزی (SE) ۷۵٪ و شن با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر بوده است. مخلوط ECC شامل سیمان پرتلند مشابه سیمان استفاده شده در بتن معمولی، ماسه‌ی سیلیسی با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۱/۲ میلی‌متر، خاکستر بادی نوع ۱۷، فوق روان‌کننده‌ی پایه‌ی کربوکسیلات، و در نهایت مقاومت کششی الیاف پلی‌پروپیلن (PP) برابر با ۴۰۰ مگاپاسکال و با درصد حجمی ۲٪ بوده است.

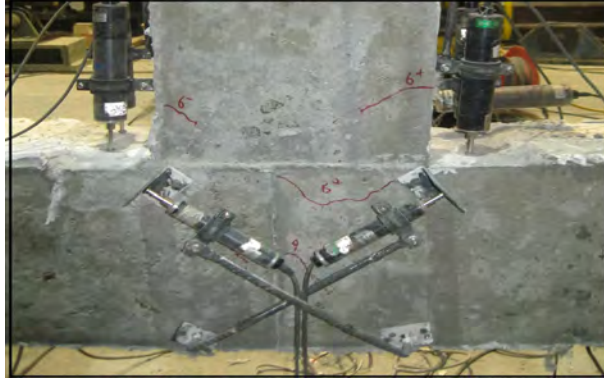
مخلوط CNT-ECC با اضافه کردن نانولوله‌ی کربن (CNT) به مخلوط ECC با ۰/۱٪ وزن سیمان حاصل شده است. در جدول ۱، طرح اختلاط هر سه بتن معمولی، ECC و CNT-ECC و در جدول ۲، مشخصات نانولوله‌های کربن مصرفی ارائه شده است. فرایند اختلاط بتن معمولی، به این صورت بود که ابتدا مصالح خشک، شامل: شن، ماسه و سیمان در میکسر به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند، سپس مخلوط آب و فوق روان‌کننده به آن اضافه شد. همچنین در طرح اختلاط ECC، ابتدا ماسه‌های سیلیسی که با سه دانه‌بندی مختلف تهیه شده بودند، در همزن به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. سپس به ترتیب ابتدا بخشی از آب، بعد سیمان و سپس بخشی دیگر از آب به مخلوط اضافه شدند و ۲ دقیقه، عملیات اختلاط ادامه یافت. سپس خاکستر بادی به مخلوط اضافه و مابقی آب به همراه فوق روان‌کننده و الیاف PP به مخلوط اضافه شد و به مدت ۵ دقیقه، عملیات اختلاط تا رسیدن مخلوط به کارایی مناسب و همگن ادامه یافت. مشخصات ابعادی و جزئیات آرماتورگذاری هر سه نمونه یکسان می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

## ۲.۲. روش پخش نانولوله‌ی کربن در ECC

عملیات اختلاط مصالح در CNT-ECC مشابه با ECC صورت می‌پذیرد، به جز در مرحله‌ی آخر که الیاف PP و نانولوله‌ی کربن که با فوق روان‌کننده‌ی کربوکسیلات اتر مخلوط شده بود، اضافه می‌شوند. برای رفع مشکل حل‌شدگی نانوالیاف‌ها در



شکل ۵. جزئیات سیستم بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی.



شکل ۶. نحوه‌ی نصب LVDT در محل چشمه‌ی اتصال در پشت نمونه.

کرنش‌سنج‌های مذکور، دقیق و نحوه‌ی آب‌بندی آن بسیار مهم است، در صورتی که این مهم اتفاق نیفتد، در حین بارگذاری از کار خواهد افتاد و عمل نخواهد کرد.

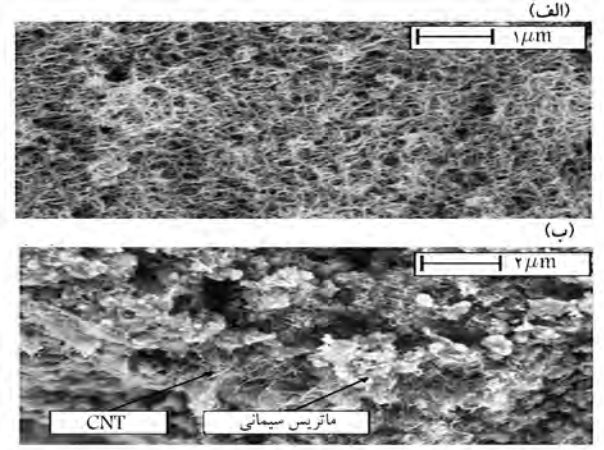
### ۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث

#### ۱.۳. مود گسیختگی و نحوه‌ی ترک خوردگی

در اتصالی که کاملاً از بتن معمولی استفاده شده است، در سیکل ۳ از دریافت ۰/۵٪، اولین ترک مورب در چشمه‌ی اتصال و یک ترک در فاصله‌ی ۱۷۰ میلی‌متری از بر ستون در تیر، هنگامی که بار اعمالی ۱۳ کیلو نیوتن بود، ایجاد شد. در دریافت ۱٪، ترک‌های قبلی رشد کرد و عرض کل تیر در چشمه‌ی اتصال ترک خورد. در



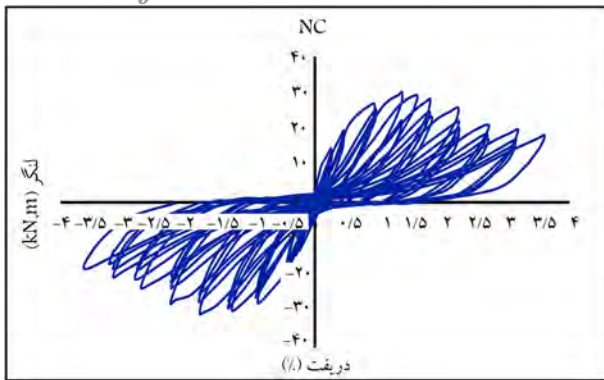
شکل ۳. فرایند مخلوط کردن و آماده‌سازی نانولوله‌های کربن.



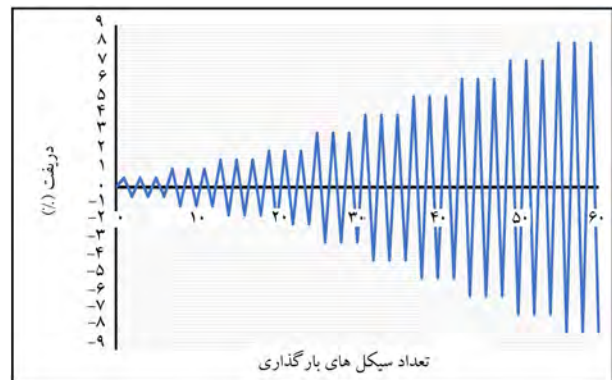
شکل ۴. نحوه‌ی پخش شدگی CNT.

### ۲.۳. فرایند انجام آزمایش

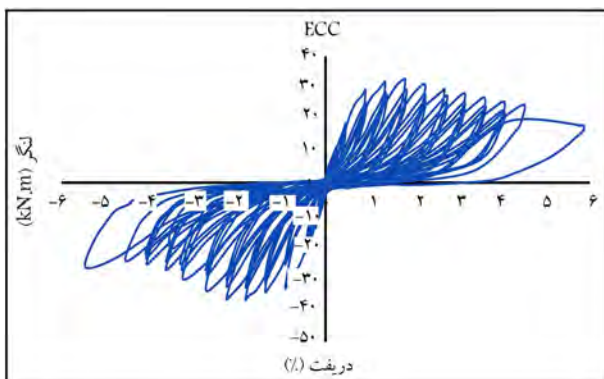
جزئیات سیستم آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی اتصال تیر به ستون در شکل ۵ مشاهده می‌شود. به منظور جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه و سهولت انجام آزمایش و با الگوگیری از نوشتار شربندار و همکاران (۲۰۱۵)، [۲۶] اتصال ۹۰ درجه چرخش یافت، به گونه‌ی که بارگذاری در انتهای تیر به صورت افقی انجام شد. به منظور تعیین کرنش چشمه‌ی اتصال و دوران تیر تغییر مکان‌سنج‌هایی (LVDTs) مطابق شکل ۶ در محل‌های نشان داده‌شده نصب شد. همچنین برای اندازه‌گیری تغییر مکان بالای تیر و در محل اعمال بارگذاری از ۲ عدد LVDTs و برای اعمال بارگذاری چرخه‌ی نیز در انتهای تیر از ۲ عدد جک با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. به منظور اعمال بار محوری به ستون، یک جک با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن در انتهای ستون و در محل تکیه‌گاه غلتکی و انتهای دیگر ستون به تکیه‌گاه مفصلی نصب شد. در طول انجام آزمایش، یک نیروی ثابت ۱۵۰ کیلو نیوتنی (حدود ۵٪ ظرفیت فشاری اسمی مقطع ستون) به ستون اعمال شد. پارامتر تغییر مکان نسبی از تقسیم تغییر مکان محل بارگذاری انتهای تیر بر فاصله‌ی بر ستون تا محل بارگذاری در انتهای تیر به دست می‌آید. نیروی افقی به تیر به صورت کنترل تغییر مکانی با ۳ چرخه‌ی بارگذاری در هر تغییر مکان اعمال می‌شد که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. بارگذاری در نمونه‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که کاهش بار وارده به اتصال از ۳۰ الی ۴۰ درصد بیشینه‌ی بار قابل تحمل تجاوز نکند. برای اندازه‌گیری کرنش‌های میلگردهای ناحیه‌ی مفصل خمیری از کرنش‌سنج ۱۸ استفاده شد. نحوه‌ی حساساندن



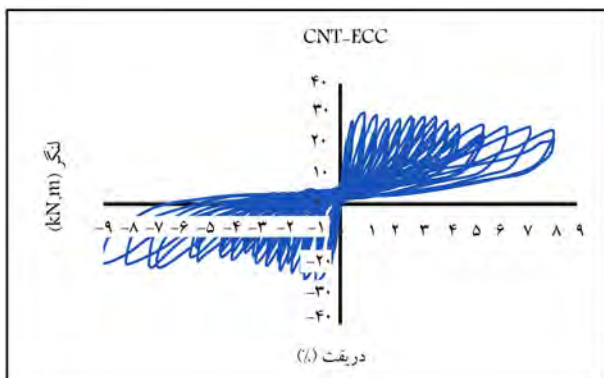
شکل ۸. منحنی لنگر - تغییرمکان نسبی در بتن معمولی (NC).



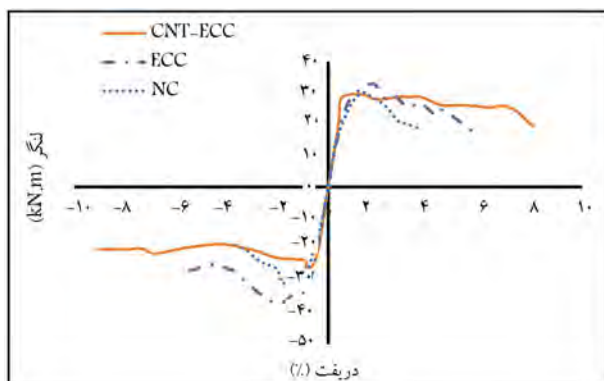
شکل ۷. تاریخچه‌ی بارگذاری اعمالی.



شکل ۹. منحنی لنگر - تغییرمکان نسبی در ECC.



شکل ۱۰. منحنی لنگر - تغییرمکان نسبی در CNT-ECC.



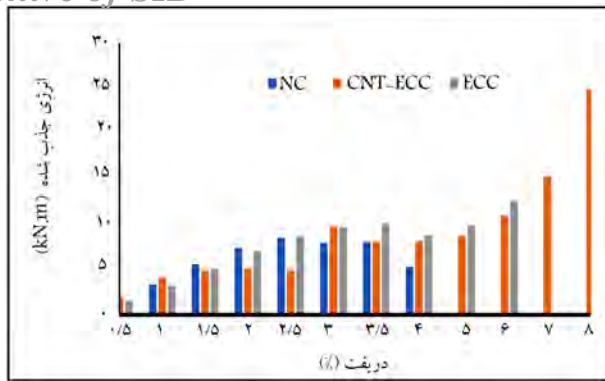
شکل ۱۱. منحنی پوش هیستریزس لنگر - تغییرمکان نسبی.

سیکل ۶، ترک‌های قبلی رشد و به پشت نمونه سرایت و در ارتفاع ۳۴۰ میلی‌متری از بر ستون در دو طرف تیر شکل گرفت. در سیکل ۹، ترک‌های جدیدی در ارتفاع ۵۵۰ میلی‌متری از بر ستون در تیر ایجاد شدند. همچنین در سیکل ۹، رشد ترک‌ها و افزایش عرض ترک خصوصاً در چشمه‌ی اتصال مشاهده می‌شود. در سیکل ۱۲، ترک‌های مورب در چشمه‌ی اتصال شکل گرفت و عرض ترک در محل اتصال تیر به ستون افزایش یافت. در سیکل ۱۸، ظرفیت باربری کاهش، و عمق ترک‌ها افزایش یافت. در سیکل ۲۱، کاهش چشم‌گیر ظرفیت باربری مشاهده می‌شود.

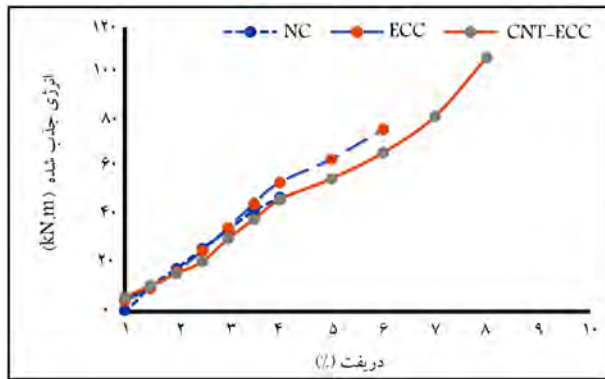
در نمونه‌یی که در ناحیه‌ی مفصل خمیری از ECC استفاده شده است، در دریفت ۲۵٪، اولین ترک در محل اتصال تیر به ستون ایجاد شد و سپس در همان دریفت و در بارگذاری برگشت، ترکی در کل عرض تیر و در ارتفاع ۲۳۰ میلی‌متری از بر ستون مشاهده شد. در دریفت ۵٪ در جهت بارگذاری مثبت، ترک‌هایی در عرض تیر و در ارتفاع‌های ۲۰۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ میلی‌متر از بر ستون ایجاد شد و در جهت بارگذاری منفی در همان دریفت، ترک‌هایی در ارتفاع‌های ۷۰، ۱۵۰، ۲۴۰، ۳۶۰ و ۵۰۰ میلی‌متری از بر ستون مشاهده شد. در دریفت ۱٪، ترک‌های قطری در چشمه‌ی اتصال شکل گرفت و در دریفت ۱٫۵٪، افزایش ترک‌ها در چشمه‌ی مشاهده شد. نکته‌ی بسیار مهمی که در نحوه‌ی ترک‌خوردگی نمونه‌ی مذکور نسبت به بتن معمولی مشاهده شد، این است که افزایش تعداد ترک‌های مویین در نمونه‌ی ECC و مهار عرض ترک‌ها توسط الیاف‌ها بود. در دریفت ۲٪، عرض و عمق ترک‌ها کمی افزایش و ترک‌های موربی در ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال مشاهده شد. در دریفت ۳٪ نیز کاهش ظرفیت باربری، رشد ترک‌ها، افزایش تعداد ترک‌ها به خصوص در محل اتصال تیر به ستون و چشمه‌ی اتصال مشاهده شد. در نمونه‌یی که در مفصل خمیری از CNT-ECC استفاده شده است، در دریفت ۲۵٪، اولین ترک‌ها در محل اتصال تیر به ستون و همچنین ترکی در ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متری از بر ستون در تیر ایجاد شد. همچنین در دریفت ۵٪، یک ترک مورب در چشمه‌ی اتصال ایجاد شد. در دریفت ۱٪ نیز افزایش تعداد ترک‌های مویین در چشمه‌ی اتصال مشاهده شد که این روند تا دریفت ۵٪ ادامه داشت. در نهایت، در دریفت ۷٪ عمق ترک در محل اتصال تیر به ستون افزایش یافت که منجر به کاهش ظرفیت باربری شده است.

### ۲.۳. رفتار لنگر - تغییرمکان

در شکل‌های ۸ الی ۱۰، منحنی هیستریزس لنگر - تغییرمکان نسبی برای کلیه‌ی اتصال‌ها مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها، هر ۴ اتصال تا هنگامی که ۴۰٪ ظرفیت باربری نمونه‌ها کاهش یافته است، پایداری خود را به نحوی حفظ کرده‌اند که حتی پدیده‌هایی همچون قلوک‌ن شدن بتن ناحیه‌ی اتصال نیز مشاهده نشده است.



شکل ۱۲. انرژی جذب شده در تغییر مکان‌های نسبی مختلف.



شکل ۱۳. انرژی جذب شده اتصال‌ها به صورت تجمعی از ابتدای بارگذاری.

بارگذاری در نمونه‌ی CNT-ECC به ترتیب ۲/۲۳ و ۱/۳۹ برابر نمونه‌های NC و ECC بوده است. در محاسبه‌ی انرژی جذب شده از مساحت تمام حلقه‌های هیستریزاس مطابق الگو و تاریخچه‌ی بارگذاری اعمالی استفاده شده است. در جدول ۴، خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های ۳ نمونه‌ی اتصال تیر به ستون مشاهده می‌شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

براساس داده‌ها و مشاهده‌های آزمایش‌های ۳ اتصال بتن‌آرمه، شامل یک اتصال مرجع که بتن معمولی در تمام نواحی اتصال به کار برده شده و دو اتصال دیگر که به ترتیب در ناحیه‌ی مفصل خمیری از ECC و CNT-ECC استفاده شده‌اند، این نتایج به دست آمده است:

- در مراحل پایانی بارگذاری در نمونه‌ی بتن معمولی (NC)، ترک‌ها در ناحیه‌ی مفصل خمیری به شدت گسترده و به یکدیگر وصل شدند. همچنین ترک‌هایی با عمق و عرض قابل توجه در محل اتصال تیر به ستون مشاهده شد و بتن در آستانه‌ی خردشدگی در چشمه‌ی اتصال بود که نشانگر شکست برشی شکننده در مفصل خمیری است. در مقابل، در نمونه‌های ECC و CNT-ECC، ترک‌های اصلی به صورت یک شبکه‌ی متراکم از ریزترک‌ها با عمق و عرض بسیار کم ظاهر شدند، که این مورد در نمونه‌ی CNT-ECC با توجه به استفاده از نانولوله‌های کربن و مهار ترک‌ها در مقیاس میکرو بیشتر نمایان بود، که ناشی از شکل‌پذیری بالای اتصال CNT-ECC است.

جدول ۳. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد.

مقاومت فشاری (MPa)	نام طرح اختلاط
۳۱/۱	بتن معمولی (NC)
۳۰/۵	کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC)
۲۹	کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانولوله کربن (CNT-ECC)

شکل ۱۱، پوش منحنی‌های هیستریزاس ۳ اتصال و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر مشاهده می‌شود. سطح زیر منحنی اتصال حاوی CNT-ECC جایگزین بتن معمولی در مفصل خمیری به مراتب بیشتر از ۲ نمونه‌ی اتصال دیگر است. همچنین در نمونه‌ی مذکور، میزان کاهش ظرفیت باربری با افزایش دررفت با شیب بسیار کمی اتفاق می‌افتد که این امر باعث افزایش تحمل آسیب، انعطاف‌پذیری و توانایی جذب انرژی می‌شود.

همان‌طور که از مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزاس نمونه‌ی مرجع با ECC و CNT-ECC مشاهده می‌شود، علی‌رغم اینکه مقاومت فشاری هر ۳ نمونه نزدیک به هم است (جدول ۳) ولیکن اختلاف معناداری در نتایج حاصل از رفتار چرخشی اتصال‌های T شکل مشاهده می‌شود که این امر ناشی از اختلاف در منحنی تنش - کرنش کششی بتن معمولی و کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی است. برخلاف بتن‌های متداول، منحنی تنش کرنش کامپوزیت‌های مذکور، سخت‌شوندگی کرنشی دارد. در طرح اختلاط ECC، از نوشتار وانگ و همکاران (۲۰۱۵)<sup>[۲۷]</sup> استفاده شده است.

#### ۳.۳. ارزیابی شکل‌پذیری و جذب انرژی

میزان شکل‌پذیری اتصال‌ها براساس تغییرمکان نهایی به تغییرمکان اولین تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی تعریف می‌شود. در محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری اتصال‌ها، تغییرمکان نهایی برابر کمترین مقدار بین بیشینه‌ی تغییرمکان اتصال و تغییرمکان نظیر افت بار بیشینه در نظر گرفته می‌شود. تغییرمکانی که در اولین تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی رخ داده است، در نمونه‌ی NC برابر ۱۰/۲ میلی‌متر، متناظر با دررفت ۱٪ و در نمونه‌های ECC و CNT-ECC به ترتیب برابر ۱۲ و ۱۲/۸ میلی‌متر، که متناظر با دررفت ۱/۱۵٪ هستند. تغییرمکان نهایی در نمونه‌ی NC برابر ۲۰ میلی‌متر، متناظر با دررفت ۲٪ و در نمونه‌های ECC و CNT-ECC به ترتیب برابر ۲۵ میلی‌متر (متناظر با دررفت ۲٪) و ۷۰ میلی‌متر (متناظر با دررفت ۷٪) بوده است. بنابراین ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌ی NC برابر ۱/۹۶ و برای نمونه‌های ECC و CNT-ECC به ترتیب برابر ۲/۰۸ و ۵/۴۶ بوده است. در شکل ۱۲، انرژی جذب شده در هر تغییرمکان نسبی از بارگذاری در ۳ اتصال مشاهده می‌شود، و میزان انرژی جذب شده‌ی اتصال در هر تغییرمکان نسبی می‌تواند از مجموع حلقه‌های هیستریزاس محاسبه شود. مطابق منحنی‌های مذکور، تا تغییرمکان نسبی ۲٪، انرژی جذب شده برای نمونه‌ها تقریباً یکسان است. در تغییرمکان‌های نسبی بالاتر، مقدار انرژی جذب شده به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. نمونه‌ی CNT-ECC بیشترین مقدار انرژی جذب شده در تغییرمکان‌های نسبی بالاتر از خود نشان می‌دهد. در شکل ۱۳، منحنی انرژی جذب شده‌ی تجمعی اتصال‌ها تا هر تغییرمکان نسبی از ابتدای بارگذاری نشان داده شده است. میزان کل انرژی جذب شده تا انتهای

انرژی جذب شده در انتهای بارگذاری (kn.m)	بیشینه‌ی نسبت دررفت تا کاهش ۴۰ درصد از ظرفیت باربری (%)	نسبت دررفت متناسب با بیشینه‌ی لنگر قابل تحمل	بیشینه‌ی لنگر ایجاد شده در در اتصالات (kn.m)	اولین ترک ایجاد شده		نمونه‌ها
				میلگردهای اتصال دررفت (%)	بار دررفت (kn)	
۴۸	۴	۲	۳۰٫۰۶	۱	۲۴	NC
۷۶٫۸	۶	۳	۳۲٫۸۲	۱٫۵	۲۶	ECC
۱۰۷٫۱	۸	۳٫۵	۳۰٫۱۶	۱٫۵	۲۹	CNT-ECC

کاهش ۴۰٪ ظرفیت باربری، نشان‌دهنده‌ی شکل‌پذیری و تحمل آسیب بالاتری است.

۴. مطابق نتایج به دست آمده در نمونه‌ی حاوی CNT در ناحیه‌ی مفصل خمیری، مقدار انرژی جذب شده در انتهای بارگذاری به ترتیب ۲۸ و ۵۵ درصد نسبت به ECC و NC بیشتر بوده است.

۵. با توجه به نتایج اخیر می‌توان اظهار داشت که استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانولوله‌ی کربن در ناحیه‌هایی از سازه که احتمال تشکیل مفصل خمیری می‌رود، می‌تواند در بهبود رفتار لرزه‌یی مؤثر باشد.

۲. بیشینه‌ی ظرفیت باربری هر ۳ نمونه تقریباً برابر بود که می‌تواند ناشی از طرح اختلاط در نظر گرفته شده و مقاومت مشخصه‌ی فشاری یکسان باشد. بیشینه‌ی ظرفیت خمشی اتصال در نمونه‌ی NC در دررفت ۲٪ و بیشینه‌ی ظرفیت خمشی در نمونه‌های ECC و CNT-ECC به ترتیب در دررفت ۳ و ۳٫۵ درصد حاصل شده است.

۳. با توجه به منحنی پوش هیستریزس نمونه‌ها، بخش نزولی منحنی CNT-ECC نسبت به ۲ نمونه‌ی دیگر شیب ملایم‌تری دارد همچنین بیشینه‌ی دررفت ۸٪ تا

### پانویس‌ها

- Carbon Nano Tube-Engineering Cementitious Composite (CNT-ECC)
- Engineered Cementitious Composite (ECC)
- High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)
- Wang
- Strain Hardening Cementitious Composite (SHCC)
- Japanese Society of Civil Engineering
- Multiple Fine Cracking Fiber Reinforced Cementitious Composites (MFCFRCC)
- Ply Vinyl Alcohol (PVA)
- Said
- Carbon Nano Tubes (CNT)
- Single Walled Carbon Nano Tubes (SWCNTs)
- Multi Walled Carbon Nano Tubes (MWCNTs)
- ball milling
- mechanical stirring
- Carbon Nano Tube-Engineering Cementitious Composite (CNT-ECC)
- strong component-weak joint
- fly ash
- strain gauge

joints subjected to cyclic loading”, J. Earthquake Technol, **44**(3-4), pp. 445-456 (Technical Note) (2007).

- Bindhu, K.R. and Jaya, K.P. “Strength and behavior of exterior beam column joints with diagonal cross bracing bars”, *Asian J. Civ. Eng. (Build. Hous.)*, **11**(3), pp. 397-410 (2010).
- Ghani, K.D.A. and Hamid, N.H.A. “Comparing the seismic performance of beam-column joints with and without SFRC when subjected to cyclic loading”, *Adv. Mater. Res.*, **626**, pp. 85-89 (2013).
- Bonacci, J.F., Alcocer, S.M., Cagley, J.R. and et al. “Recommendations for design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete structures”, American Concrete Institute (ACI 352R-02) (2002).
- Said, S.H., Razak, H.A. and Othman, I. “Strength and deformation characteristics of engineered cementitious composite slabs with different polymer fibres”, *J Reinf. Plast. Compos.*, **34**(23), pp. 1950-1962 (2015).
- Li, V.C., *Engineered Cementitious Composites (ECC) - Material, Structural, and Durability Performance*, in: Concrete Construction Engineering Handbook, CRC Press (2008).
- Lepech, M.D. and Li, V.C. “Large-scale processing of engineered cementitious composites”, *ACI Mater. J.*, **105**(4), pp. 358-366 (2008).
- Li, V.C., *Advances in ECC Research, Material Science to Application - A Tribute to Surendra P Shah*, ACI Bookstore, pp. 373-400 (2002).

### منابع (References)

- Ganesan, N., Indira, P.V. and Abraham, R. “Steel fiber reinforced high performance concrete beam-column



9. Li, V.C. and Kanda, T. "Engineered cementitious composites for structural applications, innovations forum", *ASCE J. Mater. Civ. Eng.*, **10**(2), pp. 66-69 (1998).
10. Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. "Design of engineered cementitious composites (ECC) for processing and workability requirements", in: A.M. Brandt, V.C. Li, I. H. Marshall (Eds.), *Proceedings of International Symposium on Brittle Matrix Composites*, **7**, Zturek Rsi, Woodhead, Warsaw, Poland (2003).
11. Wang, S. and Li, V.C. "Engineered cementitious composites with high-volume fly ash", *ACI Mater. J.*, **104**(3), pp. 233-241 (2007).
12. Sun, S., Yu, X., Han, B. and et al. "In situ growth of carbon nanotubes/carbon nanofibers on cement/mineral admixture particles: A review", *Construction and Building Materials*, **49**, pp. 835-840 (2013).
13. Li, V.C. "From micromechanics to structural engineering- the design of cementitious composites for civil engineering applications", *JSCE J. of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, **10**(2), pp. 37-48 (1993).
14. Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. "Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements", 7th International Symposium on Brittle Matrix Composites, pp. 29-36 (2003).
15. Vandewalle, L., Nemegeer, D., Balazs, L. et al. "RILEM TC 162-TDF: test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Sigma-epsilon-design method - Final Recommendation", *Materials and Structures*, **36**(262), pp. 560-567 (2003).
16. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 113 p. (2008).
17. Li, V.C. "From micromechanics to structural engineering - the design of cementitious composites for civil engineering applications", *JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering*, **10**(2), pp. 37-48 (1993).
18. Li, V.C. and Wang, S. "Failure mode and structural ductility of GFRP reinforced engineered cementitious composite beams", *ACI Materials Journal*, **99**(1), pp. 11-21 (2002).
19. Takashima, H., Miyagai, K., Hashida, T. and et al. "A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding", *Engineering Fracture Mechanics*, **70**(7-8), pp. 853-870 (2003).
20. Yang, E.H. and Li, V.C. "Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model", *Journal of Construction and Building Materials*, **24**(2), pp. 130-139 (2007).
21. Said, S.H.H. and Razak, A.H. "The effect of synthetic polyethylene fiber on the strain hardening behavior of engineered cementitious composite (ECC)", *Material & Design*, **86**, pp. 447-457 (2015).
22. Sun, S., Yu, X., Han, B. and et al. "In situ growth of carbon nanotubes/carbon nanofibers on cement/mineral admixture particles: A Review", *Construction and Building Materials*, **49**, pp. 835-840 (2013).
23. Iijima S. "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, **354**, pp. 56-58 (1991).
24. Bethune, D.S., Klang, C.H., De Vries, M.S. and et al. "Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls", *Nature*, **363**, pp. 605-607 (1993).
25. Iijima, S. and Ichihashi, T. "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", *Nature*, **363**, pp. 603-605 (1993).
26. Treacy, M.J., Ebbesen, T. and Gibson, J. "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", *Nature*, **381**, pp. 678-680 (1996).
27. Yakobson, B.I., Brabec, C. and Bernholc, J. "Nanomechanics of carbon tubes: Instabilities beyond linear response", *Physical Review Letters*, **76**(14), pp. 2511-2514 (1996).
28. Cornwell, C. and Wille, L. "Elastic properties of single-walled carbon nanotubes in compression", *Solid State Communications*, **101**(8), pp. 555-558 (1997).
29. Berber S, Kwon Y-K, Tomanek D "Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes", *Physical Review Letters*, **84**(20), pp. 4613-4616 (2000).
30. Prylutsky, Y.I., Durov, S., Ogloblya, O. and et al. Scharff, P. "Molecular dynamics simulation of mechanical, vibrational and electronic properties of carbon nanotubes", *Computational Materials Science*, **17**(2), pp. 352-355 (2000).
31. Yu, M.-F., Lourie, O., Dyer, M.J. and et al. "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load", *Science*, **287**(5453), pp. 637-640 (2000).
32. Lourie, O., Cox, D. and Wagner, H. "Buckling and collapse of embedded carbon nanotubes", *Physical Review Letters*, **81**(8), pp. 1638-1641 (1998).
33. Nadiv, R., Shtein, M., Peled A. and et al. "WS 2 nanotube-Reinforced cement: Dispersion matters", *Construction and Building Materials*, **98**, pp. 112-118 (2015).
34. Saez de Ibarra, Y., Gaitero, J., Erkizia, E. and et al. I. "Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions", *Physica Status Solidi (a)*, **203**(6), pp. 1076-1081 (2006).
35. Singh, A.P., Gupta, B.K., Mishra, M. and et al. "Multi-walled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties", *Carbon*, **56**, pp. 86-96 (2013).
36. Grossiord, N., Regev, O., Loos, J. and et al. "Time-dependent study of the exfoliation process of carbon nanotubes in aqueous dispersions by using UV-visible spectroscopy", *Analytical Chemistry*, **77**(16), pp. 5135-5139 (2005).
37. Ubertaini, F., Materazzi, A.L., D'Alessandro, A. and et al. "Natural frequencies identification of a reinforced concrete beam using carbon nanotube cement-based sensors", *Engineering Structures*, **60**, pp. 265-275 (2014).
38. Kim, H., Nam, I. and Lee, H. "Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume", *Composite Structures*, **107**, pp. 60-69 (2014).

39. Szeifer, I. and Yerushalmi-Rozen, R. "Polymers and carbon nanotubes- dimensionality, interactions and nanotechnology", *Polymer*, **46**(19), pp. 7803-7818 (2005).
40. Materazzi, A.L., Ubertini, F. and D'Alessandro, A. "Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain", *Cement and Concrete Composites*, **37**, pp. 2-11 (2013).
41. Keyvani, A. "Huge opportunities for industry of nanofibrous concrete technology", *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **3**(1), pp. 3-11 (2007).
42. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S. and Shah, S.P. "Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials", *Cement and Concrete Research*, **40**(7), pp. 1052-1059 (2010).
43. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S. and Shah, S.P. "Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites", *Cement and Concrete Composites*, **32**(2), pp. 110-115 (Feb, 2010).
44. Abouhussien, A., Hassan, A., Ismail, M. and et al. "Evaluating the cracking behavior of ECC beam-column connections under cyclic loading by acoustic emission analysis", *Construction and Building Materials*, **215**, pp. 958-968 (2019).
45. Hosseini, F., Gencturk, B., Aryan, H. and et al. "Seismic behavior of 3-D ECC beam-column connections subjected to bidirectional bending and torsion", *Engineering Structures*, **172**, pp. 751-763 (2018).
46. Sharbatdar, M., Satarifard, A. and Dalvand, A. "Experimental study of the effect of surface grooves on the ductility of low strength reinforced concrete joints with FRP composite sheets", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **2-31**(1/2), pp. 41-50 (In persian) (2015)
47. Hailong Wang, A., Xiaoyan Sun, A., Guangyu Peng, A. and et al. "Experimental study on bond behaviour between BFRP bar and engineered cementitious composite", *Construction and Building Materials*, **95**, pp. 448-456 (2015).