

## Experimental study of the effect of engineering cementitious composite containing carbon nano fiber (CNF-ECC) on T-shape beam-column connection

Mohammad Rezaei<sup>1</sup>, Ebrahim Khalilzadeh Vahidi<sup>2\*</sup>

1- PhD Student of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

### ABSTRACT

Concrete beam-column connection play an important role in structural ductility, energy absorption and delaying breakdown. In this study, the effect of engineered cementitious composites containing carbon nanofibers (CNF-ECC) on the behavior of T-shaped concrete beam-column connections under cyclic loading is investigated. The tensile strain hardening behavior of ECCs has made a powerful material with high energy absorption and high cracking potential before failure. Since ECC is a relatively new material, much of the research has focused on understanding the nature of these materials, their different constituents, different mixing ratios, the stress-strain curve relationships, the invention of new composites. Research has also been done on its practical applications in structures. But these studies are not as extensive as research on the behavior of materials themselves, and require a great deal of analytical and laboratory work. In this study, three concrete joints were tested, one of which was replaced as a reference specimen and the other two joints were replaced with ECC and CNF-ECC. The main parameters considered include hysteresis Moment curves - relative drift, energy absorption capacity, and crack distribution. Experimental models were subjected to cyclic loading at the end of the beam with displacement control. The loading continued until the load reduction reached more than 30-40% of the maximum load. The results show that by using these high-performance materials, the ductility and energy absorption of these joints are effectively improved.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 January 2020

**Revise Date:** 22 May 2020

**Accept Date:** 23 June 2020

### Keywords:

Experimental study

Beam-column joint

Normal concrete (NC)

ECC

Carbon nano fiber (CNF)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.217538.2061

\*Corresponding author: Ebrahim Khalilzadeh Vahidi

Email address: khalilzadeh@razi.ac.ir

## مطالعه آزمایشگاهی اثر کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانوالیاف کربن بر اتصال

### بتنی تیر - ستون

محمد رضائی<sup>۱</sup>، ابراهیم خلیل زاده وحیدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### چکیده

اتصالات تیر به ستون بتنی در شکل‌پذیری سازه، جذب انرژی و به تاخیر انداختن خرابی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. در این پژوهش به تاثیر کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی حاوی نانو الیاف کربن (CNF-ECC) بر روی رفتار اتصال تیر به ستون بتنی تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته شده است. رفتار سخت شونده‌گی کرنش تحت کشش از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC) یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و قابلیت ترک خوردگی‌های زیاد قبل از شکست، ساخته است. از آنجایی که ECC یک مصالح نسبتاً جدید است، عمده پژوهش‌های انجام گرفته، بر روی شناخت ماهیت این مصالح، ترکیبات مختلف آن، نسبت‌های مختلف اختلاط مصالح، روابط حاکم بر منحنی تنش-کرنش، ابداع کامپوزیت‌های جدید و سایر موارد مشابه متمرکز بوده است. تحقیقاتی نیز بر روی کاربردهای عملی آن در سازه‌ها انجام گرفته است. اما این مطالعات به اندازه تحقیقات مربوط به شناخت رفتار خود مصالح، گسترده نبوده و نیازمند انجام کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی فراوان است. در این پژوهش ۳ اتصال بتنی مورد آزمایش قرار گرفت که یکی از اتصالات به عنوان نمونه مرجع و در ۲ اتصال دیگر، در طول ناحیه بحرانی اتصال تیر به ستون با ECC و CNF-ECC جایگزین گردید. پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده شامل منحنی‌های هیستریزیس لنگر- تغییر مکان نسبی، ظرفیت جذب انرژی و توزیع ترک‌ها است. نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای در انتهای تیر با کنترل تغییر مکان قرار گرفتند. بارگذاری تا زمانی که کاهش بار به بیش از ۳۰ تا ۴۰ درصد حداکثر بار وارده می‌رسید، ادامه می‌یافت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با استفاده از این مصالح توانمند، شکل‌پذیری و جذب انرژی این اتصالات به صورت موثری بهبود یافت و ترک‌ها ایجاد شده در چشمه اتصال به صورت یک شبکه متراکم از ریز ترک‌ها با عمق و عرض بسیار کم ظاهر گردید.

کلمات کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، بتن مسلح، اتصالات، بتن معمولی، کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی، نانوالیاف کربن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2020.217538.2061	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2020.217538.2061	۱۴۰۱/۰۹/۳۰	۱۴۰۱/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۴/۰۳	۱۳۹۹/۰۳/۰۲	۱۳۹۸/۱۱/۰۷
*نویسنده مسئول:			ابراهیم خلیل زاده وحیدی			
پست الکترونیکی:			khalilzadeh@razi.ac.ir			

## ۱- مقدمه

بتن معمولی به عنوان گسترده‌ترین مصالح سازه‌ای برای انواع مختلف زیرساخت، در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مصالح دارای مقاومت کششی کم و شبه ترد می‌باشد که در معرض گسترش و انتشار ترک‌ها، آسیب پذیر است. از زمان معرفی بتن به عنوان یک مصالح سازه‌ای در دهه ۱۸۰۰، در پاسخ به نیازهای جدید با کاربردهای مختلف و میدانی، پیشرفت‌هایی حاصل شده است. به عنوان مثال مقاومت بتن در اوایل دهه ۱۹۵۰ به طور معمول ۳۰-۴۰ مگاپاسکال بود و از آن زمان به صورت چشمگیری افزایش یافت [۱].

با توجه به خسارات و تلفات ناشی از زلزله در کشورهای زلزله خیز و نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی ساختمان‌های خسارت دیده ناشی از بارهای متناوب زلزله، مشاهده شده که اتصالات، ضعیف‌ترین و آسیب‌پذیرترین قسمت از سازه‌های بتنی، در مقابل بارهای ناشی از زلزله هستند. بنابراین لازم است بررسی‌های بیشتری در مورد اتصال‌های سازه‌های بتنی صورت گیرد. این موضوع در کشورهای زلزله‌خیز از جمله ایران، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر به منظور برطرف نمودن این معایب پژوهش‌های زیادی در خصوص استفاده از بتن با خواص ویژه، همچون کامپوزیت‌های سیمانی توانمند صورت پذیرفته است. زلزله‌هایی که در سال‌های اخیر اتفاق افتاده، نشان می‌دهند که سازه‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون بسیار آسیب پذیر می‌باشند. لذا استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند، به ویژه زمانی که به عنوان یک جایگزین مصالح متداول، طراحی می‌شوند و معمولاً در بخش‌هایی از سازه که احتمال خرابی ناشی از زلزله بیشتر است، مطرح می‌گردد. در چنین مواردی استفاده از این کامپوزیت‌ها، می‌تواند اقتصادی و قابل رقابت با سایر مصالح باشد [۲ و ۳].

نقاطی از سازه که برای کاربرد این کامپوزیت‌های سیمانی توانمند مناسب است، عبارتند از: نقاط مستعد برش ناشی از بارهای متمرکز در اطراف ستون‌ها در دال‌های دوطرفه، اتصال‌های تیر به ستون در قاب‌های لرزه‌ای، اتصال تیر به دیوار برشی، تیرهای کوبله برای مقاومت در برابر بارگذاری لرزه‌ای، انتهای پایین دیوارهای برشی، ناحیه کششی تیرهای بتن مسلح به منظور کاهش عرض ترک‌ها و افزایش شکل پذیری [۴].

کامپوزیت‌های بتنی یا سیمانی مسلح شده با الیاف، به صورت ماده مرکب با دو مولفه اصلی شامل الیاف و ملات تعریف می‌شود. ملات یا ماتریس<sup>۱</sup> شامل سنگدانه‌ها، سیمان، آب و مواد افزودنی است. حفرات هوا نیز که در طول عمل اختلاط در ملات محبوس می‌گردند، جزئی از آن به حساب می‌آیند. الیاف نیز دومین مولفه اصلی تشکیل کامپوزیت است. الیاف و ملات به سبب وجود پیوستگی، منجر به تشکیل یک کامپوزیت قوی می‌گردد. روشی که برای تعریف کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی در رده‌ی مصالح توانمند به کار می‌رود، بر مبنای شکل منحنی تنش- کرنش کششی آن قرار دارد. اگر منحنی تنش- کرنش نشان دهنده رفتار سخت شونده‌گی کرنش بعد از مرحله ترک خوردگی اولیه باشد، در رده‌ی مصالح توانمند قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، برای بتن الیافی (FRC)<sup>۲</sup>، منحنی تنش- کرنش دارای رفتار نرم شونده‌گی کرنش بلافاصله پس از نخستین ترک خوردگی است. لذا می‌توان گفت که کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC)<sup>۳</sup> یک نوع خاص از FRC است که علامت مشخصه‌ی آن‌ها رفتار سخت شونده‌گی کرنش در کشش، پس از اولین ترک خوردگی است. که با ترک‌های چندگانه تا رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد همراه می‌شود [۵].

$ECC$ <sup>۴</sup>، نوعی از کامپوزیت‌های سیمانی با عملکرد بالا، که دارای سخت شونده‌گی کرنش کششی است. این ویژگی ظرفیت بسیار خوبی در کنترل ترک‌ها ایجاد می‌نماید. جایگزینی بتن با  $ECC$  می‌تواند تا حد زیادی، باعث کاهش مشکلات ناشی از ترک خوردگی و دوام در ارتباط با شکنندگی بتن باشد.  $ECC$  یک نوع از  $HPFRCC$  است که دارای رفتاری با تشکیل ریزترک‌ها، ظرفیت کرنش کششی بالا ۳-۷ درصد، مقاومت کششی در حدود ۴-۶ مگاپاسکال است [۶-۸].

<sup>1</sup> Matrix

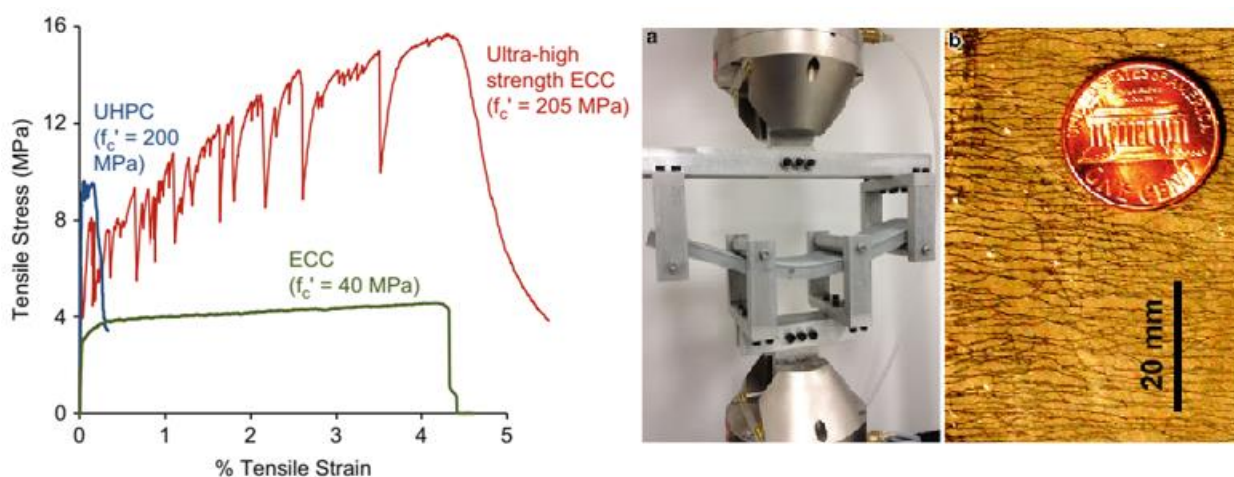
<sup>2</sup> Fiber Reinforced Concrete

<sup>3</sup> High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

<sup>4</sup> Engineering Cementitious Composite

*ECC* متعلق به طبقه گسترده ای از *FRC* است، که شامل الیاف، در ماتریس سیمانی است. با این حال هنگامی که *FRC* تحت بار کششی قرار می‌گیرند بعد از ظهور ترک‌ها دچار رفتار نرم شوندگی کششی می‌شوند. حد الاستیک برای بتن‌های معمولی و الیافی در حدود ۰/۰۱ درصد است [۹].

در *ECC* به دلیل حذف درشت‌دانه، کارایی و همگنی بسیار بالایی ایجاد می‌شود، که این امر به خاطر استفاده از ماسه سیلیسی، مواد مکملی همچون خاکستر بادی و فوق روان کننده‌ها است. برای دستیابی به خواص ذکر شده، می‌بایست از درصد الیاف مناسب و با نسبت  $l/d$  پایین (حداکثر قطر الیاف ۵۰ میکرومتر) و با مقاومت کششی بالا استفاده شود. یان<sup>۵</sup> و همکاران، رفتار خمشی نمونه‌های مختلفی از تیرهای حاوی *ECC* و ترکیبی از بتن معمولی و *ECC*، را آزمایش کردند. در این پژوهش تاثیرات ضریب ارتجاعی<sup>۶</sup>، شکل پذیری کششی، ضخامت، تاثیر موقعیت *ECC* بر روی رفتار خمشی در لحظه نهایی، خیز و حداکثر عرض ترک ارزیابی شدند [۱۰].



شکل ۱- عملکرد بالای *ECC* با تاکید بر شکل پذیری کششی، ظرفیت کرنشی *ECC* ها، ۲۰۰ برابر بتن معمولی در حالی که محدوده مقاومت فشاری از ۲۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال گزارش شده است. (a) عملکرد *ECC* تحت آزمایش خمش ۴ نقطه (b) تشکیل ریز ترک ها در *ECC* تحت آزمایش کشش

مستقیم [۹]

*ECC* نمایانگر خانواده‌ای از مواد، با ویژگی مشترک ظرفیت کرنش کششی فراتر از ۲ درصد است. اساس طراحی *ECC*، با بتن-های با مقاومت بالا (*HSC*)<sup>۷</sup> و یا بتن‌های فوق توانمند (*UHPC*)<sup>۸</sup>، تفاوت قابل توجهی دارند. *UHPC* و *HSC* براساس تراکم اجزای تشکیل دهنده، طراحی شده‌اند. درحالی‌که، اندرکنش بین اجزای ریزساختارها به عنوان میکرومکانیک *ECC* شناخته می‌شود. به عبارت دیگر، الیاف، ماتریس و خصوصیات تماسی الیاف با ماتریس، به منظور ایجاد تعامل با یکدیگر به روش مشخص، هنگام بارگذاری کامپوزیت‌ها، مهندسی می‌شود. تاکید بر این نوع طراحی، دلیل نامگذاری کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده است. همچنین طراحی *ECC*، با هدف غلبه بر کاستی اساسی بتن معمولی، یعنی ظرفیت کششی بسیار پایین انجام می‌شود. به عنوان یک نتیجه، *ECC* دارای منحنی تنش-کرنشی است، که بسیار شبیه به یک ماده فلزی است و دارای یک مقاومت "تسلیم" مشخص به همراه رفتار سخت شوندگی کرنش کششی می‌باشد [۱۱]. الیاف کربن نوعی گرافیک است که شامل الیاف‌هایی به قطر ۵-۱۰ میکرومتر می‌باشد و بیشتر از اتم‌های کربن تشکیل شده است. اتم‌های کربن، در بلورهایی، که تقریباً به طور موازی در محور طولی الیاف‌ها تراز شده به یکدیگر متصل شده‌اند [۱۲].

الیاف کربن با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب، به طور گسترده در ساخت کامپوزیت‌های هوشمند و چند منظوره به کار برده می‌شوند. هرچند استفاده از این نوع الیاف، در محیط‌های تهاجمی و مقاوم در برابر سایش بی اثر می‌باشد. این نوع الیاف‌ها در دمای بالا، پایدار، از لحاظ طبیعی بی خطر، همچون الیاف فولادی مستحکم و در محیط‌های قلیایی از نظر شیمیایی مقاوم‌تر از الیاف‌های

5 Yun

6 modulus of elasticity

7 High Strength Concrete

8 Ultra High Performance Concrete

شیشه‌ای هستند. علاوه بر این، الیاف کربن چگالی کم‌تری در مقایسه با الیاف فولادی دارد و چگالی بیشتری نسبت به انواع الیاف‌ها دارند. نانو الیاف کربن (CNF)<sup>۹</sup> یک نوع الیاف کربنی در حد و اندازه‌های نانو (بسیار ریز) است. قطر نرمال آنها بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر و طول آنها بین ۰/۵ تا ۲۰۰ میکرومتر است. CNF در مقایسه با ساختار بلوری، عملکرد الکتریکی و گرمایی کمی دارد. از دیگر ویژگی‌های آن می‌توان به چگالی کم، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی و رسانایی الکتریکی بالا و همچنین مقاومت بالا در برابر انتقال حرارت، اشاره کرد [۱۳].

اظهاری به منظور توسعه بتن حساس به فشار، از ۲ نوع الیاف ساخته شده از قیر نفت خام و قیر قطران ذغال سنگ با طول ۶ میلی‌متر و به ترتیب با قطرهای ۱۸ و ۱۱ میکرومتر را استفاده نمود [۱۴].

برای تامین شکل‌پذیری کافی اعضا و نیز اتصال‌های بتنی در برابر بارهای وارده، ضوابط ویژه‌ای در آیین‌نامه‌های مختلف ذکر شده، که رعایت آن‌ها در ساخت سازه‌های بتن مسلح ضروری است [۱۵]. در بسیاری از سازه‌های بتن مسلح که در نیم قرن اخیر در دنیا ساخته شده، ضوابط لرزه‌ای و شکل‌پذیری رعایت نشده است. در زلزله‌های اخیر مانند زلزله‌ی ترکیه و تایوان در سال ۱۹۹۹، عدم رعایت خاموت‌گذاری ویژه در نواحی بحرانی تیر و ستون و نیز در چشمه اتصال، موجب بروز شکست‌های برشی در این نواحی شده است. عدم خاموت‌گذاری ویژه در این نواحی، موجب کاهش محصور شدگی بتن می‌شود و در نتیجه شکل‌پذیری سازه کاهش می‌یابد. همچنین بیشتر خسارات مشاهده شده در چشمه اتصال، ناشی از عدم خاموت‌گذاری و یا ناکافی بودن خاموت‌های ستون در چشمه اتصال است. این ضعف خاموت‌گذاری موجب ایجاد مفصل خمیری برشی در چشمه اتصال می‌شود. بنابراین مقاوم‌سازی اتصالات بتنی برای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی هنگام زلزله امری ضروری به نظر می‌رسد [۱۶].

آسیب دیدگی شدید ناشی از زلزله در برخی از ساختمان‌های بتنی به گونه‌ای است که بازسازی دوباره سازه بسیار پرهزینه است. لذا با استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی می‌توان سازه را با هزینه‌ای به مراتب کمتر، در برابر بارهای وارده ایمن کرد. یکی از اولین و رایج‌ترین راه‌حل‌ها برای بهسازی قاب‌های بتنی، افزودن لایه‌ای جدید از بتن به همراه میلگردهای طولی و خاموت‌های بسته است [۱۷]. از دیگر روش‌های تعمیر اتصال‌های بتنی آسیب دیده، تخلیه هسته بتن اتصال و تیر و ستون متصل به آن و جایگزینی آنها با ملات دارای مقاومت بالا (۷۰ مگاپاسکال) و بدون خاصیت جمع‌شوندگی است [۱۸]. همچنین مطالعاتی در خصوص استفاده از HPFRCC در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی صورت گرفته است [۱۹]. در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ و در سال‌های اخیر، از کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP)<sup>۱۰</sup> برای بهسازی لرزه‌ای اتصالات استفاده شده است. پژوهش‌های بسیاری در زمینه مقاوم‌سازی خمشی و نیز مقاوم‌سازی برشی اتصالات بتنی آرمه با ورق‌های FRP انجام شده است که در آن‌ها ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و پارامترهای دیگر در اتصالات مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۲۰]. استفاده از ورق‌های FRP به صورت دورپیچ، به منظور مقاوم‌سازی تیرها و ستون‌ها معمولاً با مشکلات اجرایی همراه است. به دلیل سخت بودن استفاده از ورق‌های FRP به صورت دورپیچ، معمولاً این ورق‌ها در یک یا چند وجه از عضو بتنی به طور موضعی نصب می‌شوند که احتمال جداشدگی زود هنگام ورق‌ها از سطح بتن پیش از رسیدن به ظرفیت باربری نهایی آن‌ها زیاد است. شیارزنی سطح بتن از روش‌های جدید آماده‌سازی سطح است. در روش شیارزنی پیش از نصب ورق‌های تقویتی، شیارهایی بر روی سطح بتن ایجاد می‌شود تا چسبندگی ورق‌های تقویتی با سطح عضو بتنی بیشتر شود [۲۱].

رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش از ECC یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و قابلیت ترک خوردگی زیاد قبل از شکست ایجاد کرده است. از آنجایی که ECC یک مصالح نسبتاً جدید است عمده پژوهش‌های انجام گرفته بر روی شناخت ماهیت این مصالح، نسبت‌های اختلاط مصالح، روابط حاکم بر منحنی تنش-کرنش بوده است. همچنین در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی بر روی کاربرد عملی ECC در قطعات سازه‌ای مانند قاب‌ها، تیر و ستون‌ها انجام شده است اما این مطالعات به اندازه تحقیقات مربوط به شناخت رفتار خود مصالح گسترده نبوده و نیازمند انجام کارهای عددی و آزمایشگاهی فراوان است. افزودن الیاف مختلف به بتن باعث بهبود خواص بتن، نظیر مقاومت‌های کششی، خمشی و ضربه‌ای، قابلیت جذب انرژی و مقاومت در برابر آتش‌سوزی و افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی در مقایسه با بتن‌های معمولی شده است. همچنین در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای پیشرفت و نوآوری در استفاده از الیاف میکرونی

<sup>9</sup> Carbon Nano Fiber

<sup>10</sup> Fiber Reinforced Polymer

برای بهبود رفتار مکانیکی ترکیبات سیمانی و بتن انجام شده است. با توجه به این پژوهش‌ها در مقیاس میکرونی، توجه به نانو الیاف‌های کربنی به کمک دانش و فناوری نانو و مطالعه اثرات آنها بر خواص بتن و استفاده سازه‌ای از آن در پروژه‌های با حساسیت بالا بسیار اهمیت دارد. در تعدادی از کتاب‌ها و مقالاتی که اخیراً منتشر شده است [۲۲-۲۴]، پیشنهادهایی برای استفاده ترکیبی بتن معمولی و ECC داده شده، اما نقش نانو مواد خصوصاً نانو الیاف‌های کربن در این مصالح در نظر گرفته نشده و کارهای عددی و آزمایشگاهی ناکافی بر روی مصالح حاوی الیاف‌های متداول صورت گرفته است. پیشنهاد مقدار استفاده بهینه از مصالح CNF-ECC در ترکیب با بتن معمولی در بخش‌هایی از سازه مانند اتصالات تیر به ستون که تحت تنش‌های بالایی قرار دارند و شکست سازه بر روی آن بخش‌ها متمرکز بوده و احتمال خرابی بیشتر می‌باشد، ضروری به نظر می‌رسد.

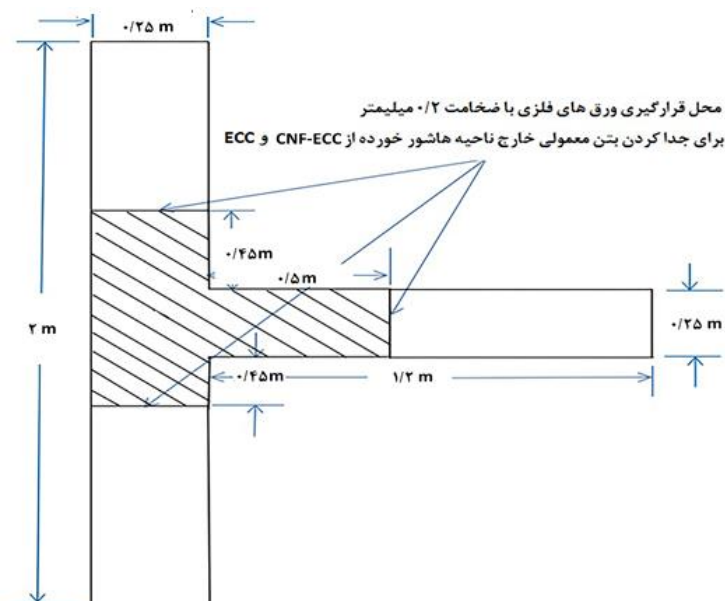
نقش اصلی الیاف پخش شده در بتن، کنترل بازشدگی و انتشار ترک‌ها است. گروه‌های مختلف الیاف مورد استفاده در بتن‌های سازه‌ای، عبارتند از: الیاف فولادی در ابعاد و شکل‌های مختلف، الیاف مصنوعی شامل الیاف پلی اتیلن (PE)<sup>۱۱</sup>، پلی پروپیلن (PP)<sup>۱۲</sup>، پلی وینیل الکل (PVA)<sup>۱۳</sup> و الیاف کربنی [۲۵]. این الیاف‌ها معمولاً در اندازه‌های با مقیاس میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای اینکه بتوانیم ترک‌ها را قبل از تشکیل و رشد در مقیاس میکرو کنترل نماییم و ترک‌های جداگانه بزرگ را توسط مجموعه‌ای مترکم از میکروتِرک‌ها جایگزین نماییم، پیشنهاد استفاده از نانوالیاف‌ها در ECC ارائه گردیده است. هدف کلی از انجام این پژوهش تحلیل و ارزیابی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها شامل پارامترهایی همچون ظرفیت نیرویی، ظرفیت تغییر شکل نسبی، جذب انرژی و الگوی ترک‌خوردگی و مقایسه نتایج استفاده از ECC و CNF-ECC با نمونه مرجع می‌باشد که در نهایت می‌توان نقش نانوالیاف کربن را در بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات بتنی تیر به ستون مورد ارزیابی قرار داد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سه اتصال خارجی  $T$  شکل بتنی برای آزمایش و بررسی در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی آماده گردید. اتصالات مورد نظر به عنوان بخشی از یک قاب پیرامونی، در نظر گرفته شده است. نمونه اول، که به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شده، از بتن معمولی در کل اتصال استفاده شد. در نمونه دوم به دلیل هزینه تمام شده بالاتر تولید ECC، نسبت به بتن معمولی در محل اتصال تیر به ستون در ناحیه ای که احتمال تشکیل مفصل خمیری بود از ECC و خارج این ناحیه از بتن معمولی استفاده گردیده است. در نمونه سوم در ناحیه مفصل خمیری CNF-ECC جایگزین بتن معمولی گردید. که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها ارتفاع ستون ۲۰۰۰ میلی‌متر و طول تیر ۱۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد که دقیقاً در ناحیه میانی ستون به آن متصل گردیده است. ابعاد مقطع تیر و ستون ۲۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر لحاظ گردیده است. برای بررسی بهتر رفتار محل اتصال تحت مودهای گسیختگی ناشی از تحریک لرزه ای از مفهوم "جزء قوی-اتصال ضعیف"<sup>۱۴</sup> استفاده گردید.

11 Poly ethylene  
12 Poly- Propylene  
13 Poly Vinyl Alcohol  
14 Strong component- weak joint



شکل ۱- نحوه جایگزینی مواد *ECC* و *CNF-ECC* به جای بتن معمولی در ناحیه بحرانی اتصال تیر به ستون (ناحیه هاشور خورده)

جزئیات آرماتورگذاری و ابعاد مقاطع برای هر ۳ نمونه یکسان در نظر گرفته شد، که در شکل ۲ نشان داده شده است. هنگام بتن ریزی در نمونه‌های شماره ۲ و ۳ برای جداسازی *ECC* و *CNF-ECC* از بتن معمولی از ورق‌های فولادی بسیار نازک در قالب بندی استفاده گردید. طرح اختلاط بتن معمولی شامل سیمان پرتلند نوع ۲، ماسه معمولی با مدول نرمی (*F.M*) ۳/۱ و ارزش ماسه‌ای (*SE*) ۷۵ درصد و شن با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می باشد. مخلوط *ECC* شامل سیمان پرتلند مشابه سیمان استفاده شده در بتن معمولی، ماسه سیلیسی با حداکثر اندازه ۱/۲ میلیمتر، خاکستر بادی<sup>۱۵</sup> نوع *F*، فوق روان کننده پایه کربوکسیلات و در نهایت الیاف *PP* با مقاومت کششی ۴۰۰ مگاپاسکال و ۲ درصد حجمی می باشد.

سیمان مصرفی در این پژوهش محصول کارخانه سیمان دلیجان واقع در استان مرکزی می‌باشد. در این آزمایش‌ها از فوق روان کننده نوترال با نام تجاری 102N، محصول شرکت بتن شیمی استفاده شده است. این فوق روان کننده مطابق با استاندارد ASTM C949 نوع *F* و ASTM C1017 نوع *I* می‌باشد. همچنین میکروسیلیس مصرفی ساخت کارخانه فروسیلیس ازنا در استان لرستان می‌باشد. در این پژوهش سیلیس درجه ۱، کارخانه سیلیس دماوند تهیه و استفاده شد. دامنه اندازه ماسه سیلیسی از ۲۰۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر بود. این سیلیس با بیش از ۹۶ درصد خلوص از با کیفیت‌ترین آن‌ها به شمار می‌رود. خاکستر بادی نوع *C* به علت دارا بودن بیش از ۱۰ درصد اکسید کلسیم اهمیت خاصیت سیمانی شدن دارد. در این پژوهش از خاکستر بادی نوع *C*، محصول کشور هندوستان استفاده شده است. الیاف مورد استفاده در این پژوهش، الیاف *PP* که مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده است.

<sup>15</sup> Fly Ash

جدول ۱- مشخصات فنی الیاف PP

رنگ	مقاومت کششی (Mpa)	ضریب ارتجاعی (Gpa)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	قطر (μm)	طول (mm)
سفید	۸۰۰	۱۰	۰/۹	۱۸	۱۲

مخلوط *CNF-ECC* با اضافه نمودن نانو الیاف کربن (*CNF*) به مخلوط *ECC* با ۰/۱ درصد وزن سیمان حاصل گردید.

جدول ۲ طرح اختلاط هر سه بتن معمولی، *ECC*، *CNF-ECC* را نشان می‌دهد و در جدول ۲ مشخصات نانو الیاف کربن مصرفی ذکر شده است. در فرآیند اختلاط بتن معمولی، ابتدا مصالح خشک شامل شن، ماسه و سیمان در مخلوط کن به مدت ۳ دقیقه مخلوط، سپس مخلوط آب و فوق روان کننده به آن اضافه گردید. سپس طرح مذکور به مدت ۵ دقیقه برای بدست آوردن کارایی مناسب مخلوط گردید. همچنین در طرح اختلاط *ECC*، ابتدا ماسه های سیلیسی که با سه دانه بندی مختلف در مخلوط کن، به مدت ۳ دقیقه مخلوط و سپس بخشی از آب (حدود ۳۰ درصد) را به مخلوط اضافه و سپس سیمان را اضافه می‌شود. سپس ۳۰ درصد آب را به مخلوط اضافه کرده و ۲ دقیقه عملیات اختلاط ادامه می‌یابد. در ادامه خاکستر بادی به مخلوط اضافه و مابقی آب به همراه فوق روان کننده و الیاف *PP* به مخلوط اضافه می‌شود و به مدت ۵ دقیقه عملیات اختلاط تا رسیدن مخلوط به کارایی مناسب و همگن ادامه می‌یابد.

عملیات اختلاط مصالح در *CNF-ECC* مشابه با *ECC* صورت می‌پذیرد با این تفاوت که الیاف *PP* و نانو الیاف کربن که با فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات اتر مخلوط شده بود اضافه می‌گردد. برای رفع مشکل حل شدگی نانوالیافها در آب در این پژوهش از مخلوط صمغ عربی و فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات اتر استفاده می‌شود. نحوه اختلاط *CNF*، به این صورت است که ابتدا ۱۵ گرم صمغ عربی را در ۰/۵ لیتر آب با حرارت غیرمستقیم حل می‌شود، سپس *CNF* را به این محلول اضافه و سپس با فوق روان کننده کربوکسیلات اتر مورد نیاز مخلوط می‌گردد تا محلول یک دست و همگنی بدست آید. الیافها و نانو الیافها بعد از اینکه ملات با کارایی مناسب ایجاد گردید در مرحله آخر به آرامی و با مقادیر کم به ملات اضافه گردید.

جدول ۲- طرح اختلاط استفاده شده در نمونه ها (Kg/m<sup>3</sup>)

CNF	PP	فوق روان کننده	آب	خاکستر بادی	شن	ماسه سیلیسی	ماسه معمولی	سیمان	طرح اختلاط
-	-	۰/۸۱	۱۷۱	-	۱۰۸۰	-	۷۲۰	۳۶۰	بتن معمولی (NC)
-	۲۰	۲/۲	۴۱۴	۸۲۷	-	۲۷۶	-	۵۵۱	ECC
۰/۵۵۱	۲۰	۲/۲	۴۱۴	۸۲۷	-	۲۷۶	-	۵۵۱	CNF-ECC



جدول ۳- مشخصات اصلی CNF

قطر خارجی (nm)	قطر داخلی (nm)	طول (nm)	تراکم حجمی (g/cm <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (m <sup>2</sup> /g)	خلوص (%)
۲۰۰	۱۵۰	۲۰-۱۰	۰/۱۸	۳۰۰	۹۹/۹



شکل ۳- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها . (الف) ECC (ب) CNF-ECC

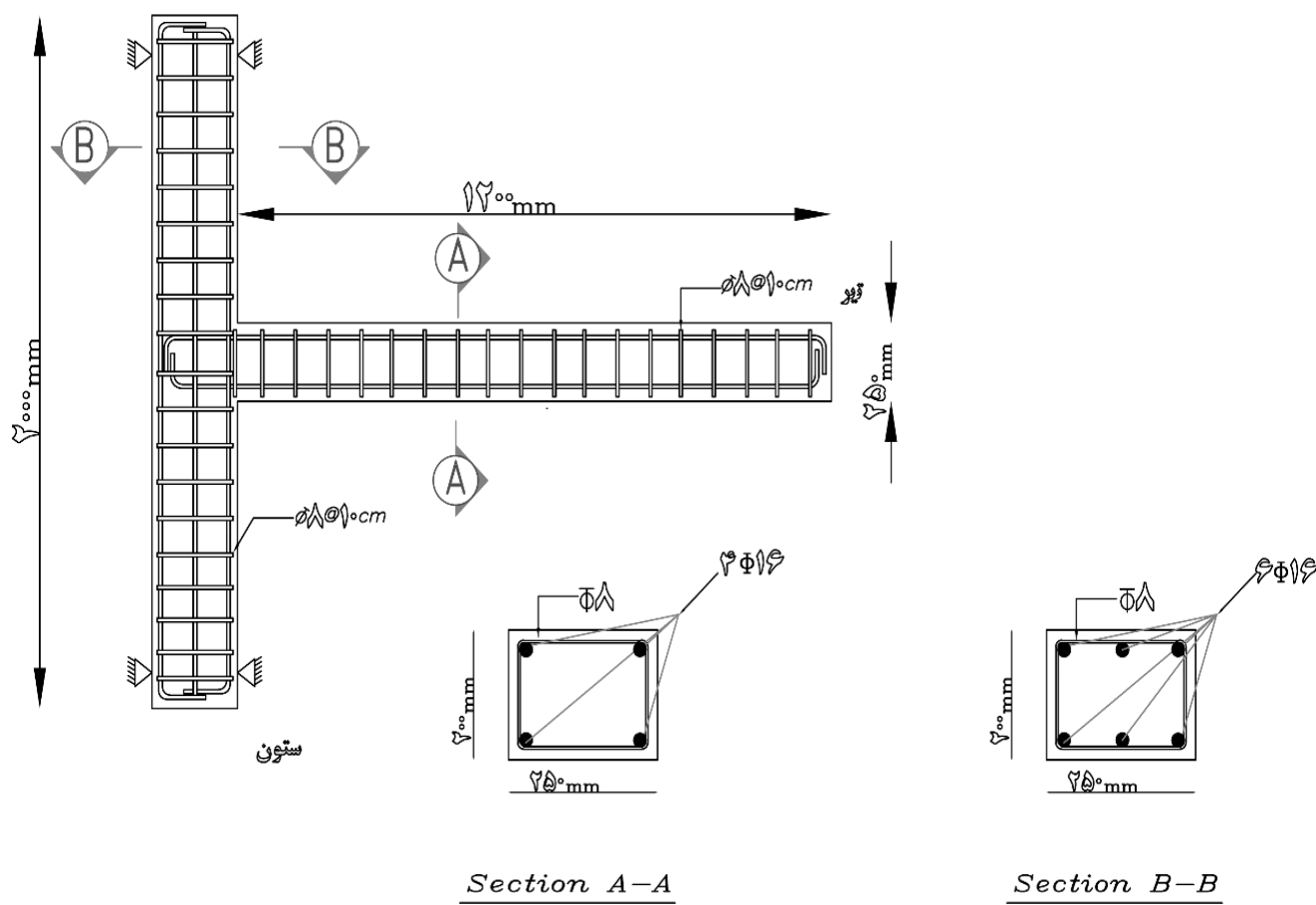
## ۲-۲- انتخاب قاب جهت طراحی اتصال

یک قاب خمشی ۵ طبقه با ۳ دهانه‌ی ۶ متری و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر، به عنوان قاب مرجع برای طراحی اتصالات انتخاب شد. بار مرده و زنده فرض شده برای طراحی قاب دوبعدی به ترتیب  $1800 \text{ kg/m}$  و  $600 \text{ kg/m}$  در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری بتن برابر  $30 \text{ Mpa}$  و ضریب ارتجاعی بتن برابر  $20 \text{ Gpa}$  در نظر گرفته شده است. برای آرماتورهای طولی مقاومت تسلیم  $400 \text{ Mpa}$  در نظر گرفته شده است. برش پایه طراحی با فرض بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)  $0.35g$  محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصل شده، اتصال کناری واقع در طبقه سوم به عنوان اتصال مبنا انتخاب شد.

## ۳-۲- مشخصات نمونه‌ها

سه اتصال مورد مطالعه با ابعاد یکسان در مقیاس ۱:۲ ساخته شد. ارتفاع مقطع ستون  $250 \text{ mm}$  و با عرض  $200 \text{ mm}$  در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۲ دارای ۶ عدد آرماتور به قطر  $16 \text{ mm}$  و از آرماتورهای عرضی به قطر  $8 \text{ mm}$  به فاصله  $10$  سانتی متری در کل ستون استفاده گردید. مقطع تیر نیز به ارتفاع  $200 \text{ mm}$  و عرض  $250 \text{ mm}$  و با ۴ عدد آرماتور طولی به قطر  $16 \text{ mm}$  و آرماتور عرضی به قطر  $8 \text{ mm}$  مسلح گردید. که جزئیات اتصال تیر به ستون در شکل ۲ نشان داده شده است.

<sup>16</sup> Maximum ground acceleration



شکل ۲ - جزئیات اتصال

## ۲-۴- فرآیند انجام آزمایش

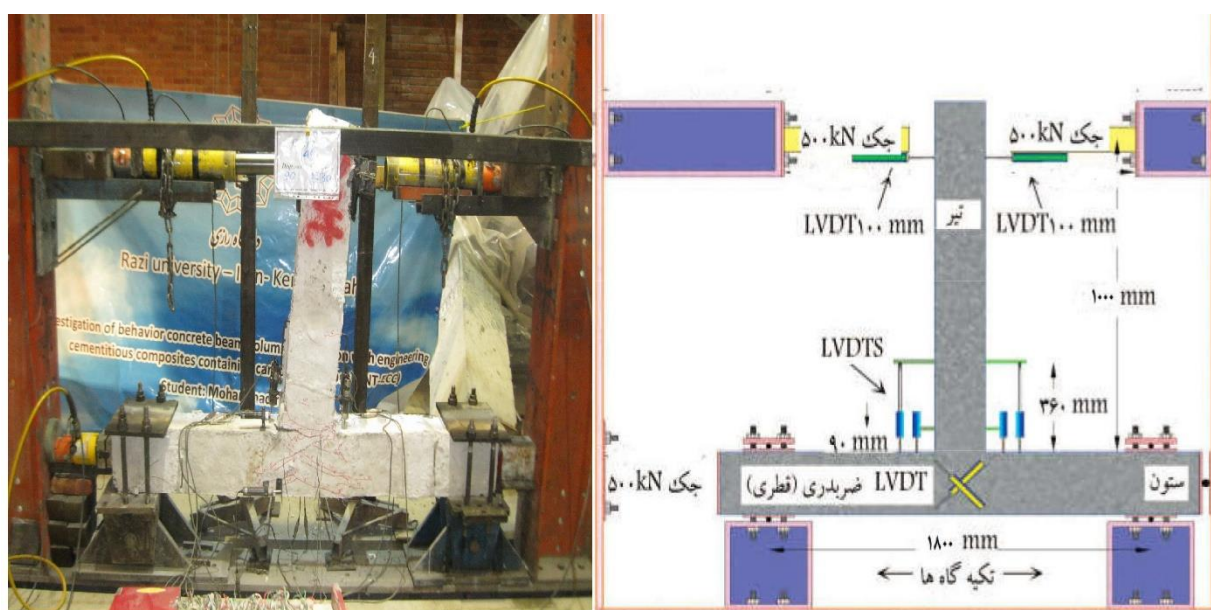
جزئیات سیستم آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی اتصالات تیر به ستون در شکل ۴ نشان داده شده است. در این پژوهش آزمایشگاهی، برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای از پروتکل استاندارد SAC<sup>۱۷</sup> استفاده شده است. برای انجام تحلیل چرخه‌ای (کنترل تغییرمکان) یک روش ساده استفاده از چند تحلیل استاتیکی غیرخطی بصورت زنجیره‌ای است. در این حالت هر یک از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی یکی پس از دیگری انجام شود. در واقع در این حالت، هر یک از تحلیل‌های غیرخطی پس از تحلیل غیرخطی قبلی انجام می‌شود. به منظور جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه و سهولت انجام آزمایش و با الگوبری از مرجع شماره [۲۶] اتصال ۹۰ درجه چرخش یافت به گونه‌ای که بارگذاری در انتهای تیر به صورت افقی انجام گردید.

به منظور تعیین کرنش چشمه اتصال و دوران تیر تغییر مکان‌سنج‌هایی (LVDTs)<sup>۱۸</sup> مطابق شکل ۵ در محل‌های نشان داده شده نصب گردید. همچنین برای اندازه‌گیری تغییر مکان بالای تیر و در محل اعمال بارگذاری از ۲ عدد LVDTs استفاده گردید. برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای در انتهای تیر از ۲ عدد جک با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن استفاده گردید. به منظور اعمال بار محوری به ستون یک

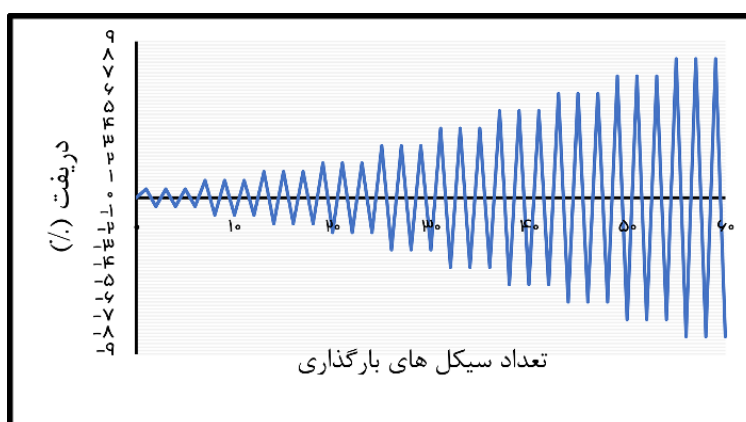
<sup>17</sup> Supplemental Access Control

<sup>18</sup> Linear variable differential transformer

جک با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن در انتهای ستون و در محل تکیه‌گاه غلتکی نصب و انتهای دیگر ستون به تکیه‌گاه مفصلی نصب گردید. در طول انجام آزمایش یک نیروی ثابت ۱۵۰ کیلو نیوتنی (حدود ۵ درصد ظرفیت فشاری اسمی مقطع ستون) به ستون اعمال گردید. پارامتر تغییر مکان نسبی از تقسیم تغییر مکان محل بارگذاری انتهای تیر بر فاصله برستون تا محل بارگذاری در انتهای تیر بدست می‌آید. نیروی افقی به تیر به صورت کنترل تغییر مکانی با ۳ چرخه بارگذاری در هر تغییر مکان اعمال می‌گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. بارگذاری در نمونه‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که کاهش بار وارده به اتصال از ۳۰-۴۰ درصد حداکثر بار قابل تحمل تجاوز نکند. برای اندازه‌گیری کرنش‌های میلگردهای ناحیه مفصل خمیری از استرین گیج استفاده گردید. نحوه چسباندن این کرنش‌سنج‌های دقیق و نحوه آب بندی آن بسیار مهم می‌باشد در صورتی که این مهم اتفاق نیفتد در حین بارگذاری از کار خواهد افتاد و عمل نخواهد کرد. شکل ۶ نحوه چسباندن استرین گیج‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴- جزئیات سیستم بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی



شکل ۵- اعمال چرخه بارگذاری



شکل ۶- نحوه نصب LVDT در محل چشمه اتصال در پشت نمونه و نحوه اتصال استرین گیج ها به آرماتورها.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

#### ۳-۱- مود گسیختگی و نحوه ترک خوردگی

در اتصالی که کاملاً از بتن معمولی استفاده گردید در سیکل ۳ از دریف  $0/5$  درصد اولین ترک مورب در چشمه اتصال و یک ترک در فاصله  $170$  میلیمتری از بر ستون در تیر هنگامی که بار اعمالی  $13$  کیلونیوتن بود، ایجاد شد. در تغییرشکل نسبی  $1$  درصد ترک های قبلی رشد کرده و عرض کل تیر در چشمه اتصال ترک خورد. در سیکل ۶ ترک های قبلی رشد و به پشت نمونه سرایت و در ارتفاع  $340$  میلیمتری از بر ستون در دو طرف تیر شکل گرفت. در سیکل ۹ ترک های جدیدی در ارتفاع  $550$  میلیمتری از بر ستون در تیر ایجاد گردید همچنین در این سیکل شاهد رشد ترک ها و افزایش عرض ترک خصوصاً در چشمه اتصال بودیم. در سیکل ۱۲ ترک های مورب در چشمه اتصال شکل گرفت و عرض ترک در محل اتصال تیر به ستون افزایش یافت. در سیکل ۱۸ ظرفیت باربری کاهش، افزایش عمق ترک ها بودیم. در سیکل ۲۱ شاهد کاهش چشم گیر ظرفیت باربری بودیم.

در نمونه ای که در مفصل خمیری از *ECC* استفاده گردید در تغییرشکل نسبی  $0/25$  درصد، اولین ترک در محل اتصال تیر به ستون ایجاد گردید و سپس در همان تغییرشکل نسبی و در بارگذاری برگشت ترکی در کل عرض تیر و در ارتفاع  $230$  میلیمتری از بر ستون مشاهده گردید. در تغییرشکل نسبی  $0/5$  درصد در جهت بارگذاری مثبت ایجاد ترک هایی در عرض تیر و در ارتفاع های  $200$ ،  $350$ ،  $450$  میلیمتر از بر ستون مشاهده شد. و در جهت بارگذاری منفی در همان تغییرشکل نسبی ترک هایی در ارتفاع  $70$ ،  $150$ ،  $240$ ،  $360$ ،  $500$  میلیمتری از بر ستون ایجاد گردید. در تغییرشکل نسبی  $1$  درصد ترک های قطری در چشمه اتصال شکل گرفت و در تغییرشکل نسبی  $1/5$  درصد شاهد افزایش ترک ها در چشمه اتصال بودیم. نکته بسیار مهمی که در نحوه ترک خوردگی این نمونه نسبت به بتن معمولی مشاهده شد افزایش تعداد ترک های مویین در نمونه *ECC* و مهار عرض ترک ها توسط الیاف ها بود. در تغییرشکل نسبی  $2$  درصد عرض و عمق ترک ها کمی افزایش و ترک های موربی در ناحیه چشمه اتصال مشاهده گردید. در تغییرشکل نسبی  $3$  درصد شاهد کاهش ظرفیت باربری، رشد ترک ها، افزایش تعداد ترک ها به خصوص در محل اتصال تیر به ستون و چشمه اتصال بودیم. در نمونه ای که در مفصل خمیری از *CNF-ECC* استفاده گردید در تغییر شکل نسبی  $0/25$  درصد اولین ترک ها در محل اتصال تیر به ستون و همچنین ترکی در ارتفاع  $300$  میلیمتری از بر ستون در تیر ایجاد گردید در تغییرشکل نسبی  $1$  درصد یک ترک مورب در چشمه اتصال ایجاد گردید. در تغییرشکل نسبی  $2$  درصد شاهد افزایش تعداد ترک های مویین در چشمه اتصال بودیم که این روند تا تغییرشکل نسبی  $7$  درصد ادامه

داشت. در نهایت در تغییر شکل نسبی ۹ درصد عمق ترک در محل اتصال تیر به ستون افزایش یافت که منجر به کاهش ظرفیت باربری گردید.

جدول ۴- مقاومت فشاری نمونه ها

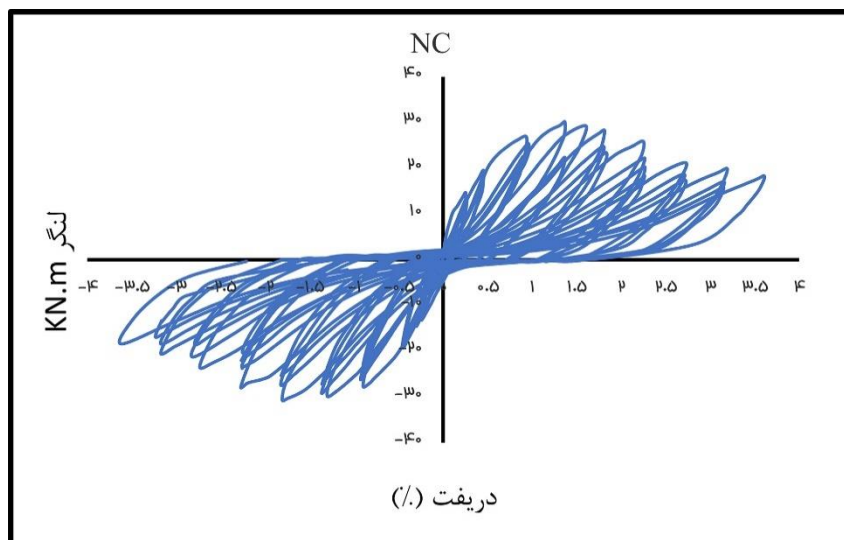
مقاومت فشاری (Mpa)	نام طرح اختلاط
۳۱/۱	بتن معمولی (NC)
۳۰/۵	کامپوزیت های سیمانی مهندسی (ECC)
۳۱/۵	کامپوزیت های سیمانی مهندسی حاوی نانو الیاف کربن (CNF-ECC)

### ۳-۲- رفتار لنگر-تغییر مکان

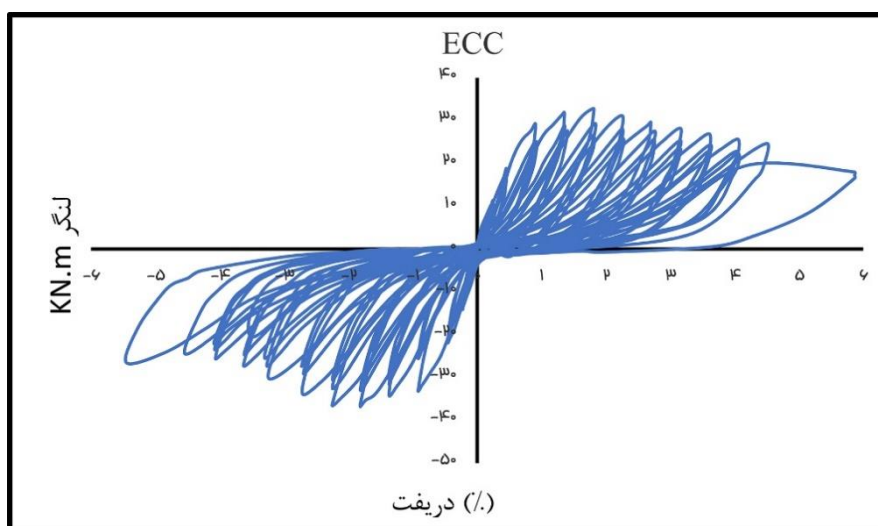
در شکل های ۷-۹ منحنی هیستریزس لنگر- تغییر مکان نسبی برای کلیه اتصال ها نشان داده شده است. برای استخراج این منحنی ها لنگر ایجاد شده در چشمه اتصال در مقابل تغییر شکل نسبی انتهای تیر (محل بارگذاری چرخه ای) که نشان دهنده ی مقادیر این منحنی می باشد، استفاده شده است. میزان بار اعمال شده و تغییر شکل به انتهای تیر دائما توسط بارسنج<sup>۱۹</sup> و LVDTs سنجیده می شود. که تغییر شکل نسبی در هر لحظه از تقسیم تغییر شکل انتهای تیر به طول تیر بدست می آید. همچنین لنگر ایجاد شده در چشمه اتصال برابر ضرب مقادیر بار اعمال شده در انتهای تیر به فاصله محل بارگذاری تا چشمه اتصال می باشد. مطابق این منحنی ها، هر ۳ اتصال تا هنگامی که ۴۰ درصد ظرفیت باربری نمونه ها کاهش می یافت پایداری خود را به نحوی حفظ کردند که حتی پدیده هایی همچون قلوه کن شدن بتن ناحیه اتصال نیز مشاهده نگردید.

شکل ۱۰ پوش منحنی های هیستریزس ۳ اتصالات و مقایسه آن ها با یکدیگر را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، سطح زیر منحنی اتصال حاوی CNF-ECC جایگزین بتن معمولی در مفصل خمیری ۳ برابر اتصالی که در ناحیه مفصل خمیری از ECC استفاده شده و ۶ برابر اتصالی که در تمام نواحی آن از بتن معمولی استفاده شده است. این مقادیر در جدول شماره ۴ ذکر شده است. همچنین در این نمونه میزان کاهش ظرفیت باربری با افزایش تغییر شکل نسبی با شیب بسیار کمی اتفاق می افتد که این امر باعث افزایش تحمل آسیب، انعطاف پذیری و توانایی جذب انرژی می گردد. همچنین در نمونه CNF-ECC در تغییر شکل نسبی ۵ درصد یک سخت شوندگی جزئی کرنش مشاهده گردید.

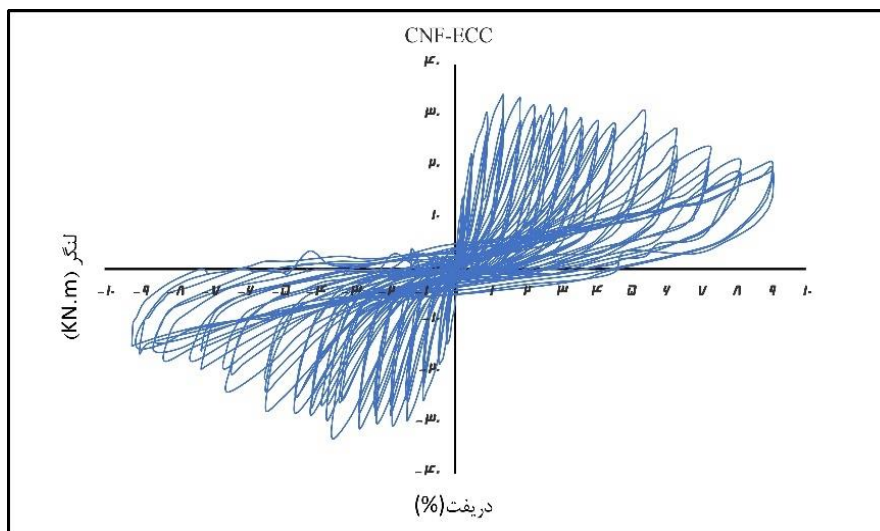
<sup>19</sup> Load cell



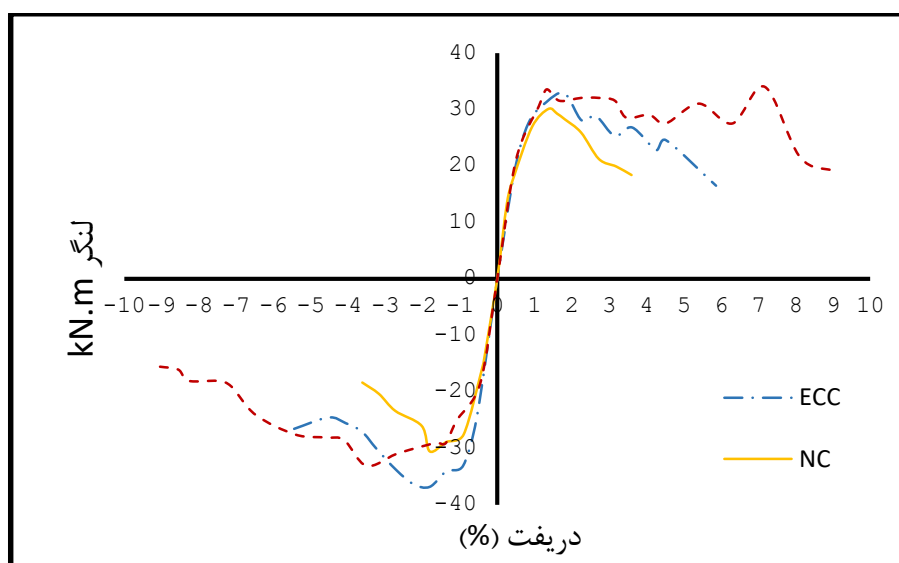
شکل ۷- منحنی لنگر-تغییر مکان نسبی در بتن معمولی (NC)



شکل ۸- منحنی لنگر-تغییر مکان نسبی در ECC



شکل ۹- منحنی لنگر-تغییر مکان نسبی در CNF-ECC

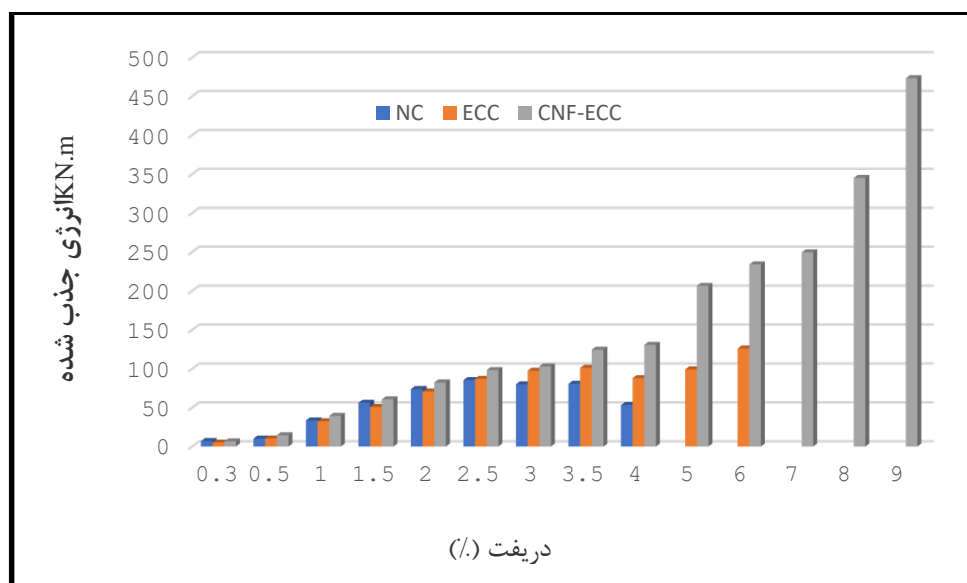


شکل ۱۰- منحنی پوش هیستریزس لنگر-تغییر مکان نسبی

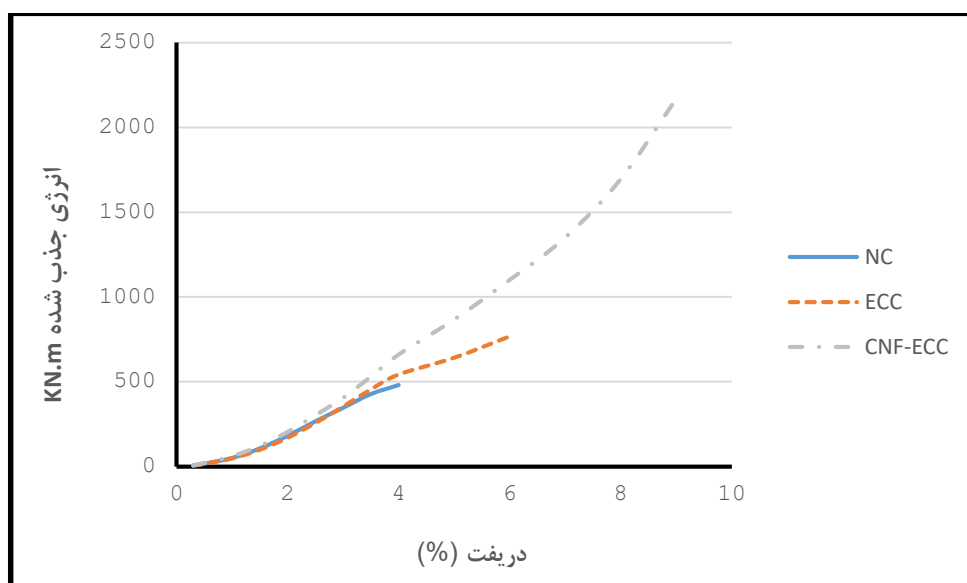
### ۳-۳- ارزیابی شکل پذیری و جذب انرژی

میزان شکل پذیری اتصالات براساس تغییر مکان نهایی به تغییر مکان اولین تسلیم شدگی آرماتورهای طولی تعریف می‌شود. در محاسبه ضریب شکل پذیری اتصالات، تغییر مکان نهایی برابر کمترین مقدار بین بیشینه تغییر مکان اتصال و تغییر مکان نظیر افت بار بیشینه در نظر گرفته می‌شود. تغییر مکانی در اولین تسلیم شدگی آرماتورهای طولی رخ داده است در نمونه NC برابر ۱۰/۲ میلی‌متر و در نمونه ای که در ناحیه مفصل خمیری از ECC و CNF-ECC استفاده شده است به ترتیب برابر ۱۲ و ۱۲/۴ میلی‌متر می‌باشد. تغییر مکان نهایی نمونه NC برابر ۲۰ میلی‌متر و در نمونه های ECC و CNF-ECC به ترتیب برابر ۲۵ و ۷۵ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین ضریب شکل پذیری برای نمونه NC برابر ۱/۹۶، و برای نمونه های ECC و CNF-ECC به ترتیب برابر ۲/۰۸ و ۶/۰۵ می‌باشد. در شکل ۱۱ انرژی

جذب شده در هر تغییر مکان نسبی از بارگذاری در ۳ اتصال نشان داده شده است میزان انرژی جذب شده اتصال در هر تغییر مکان نسبی می‌تواند از مجموع حلقه‌های هیستریزیس محاسبه شود. مطابق این منحنی‌ها تا تغییر مکان نسبی ۲ درصد انرژی جذب شده برای نمونه‌ها تقریباً یکسان است. در تغییر مکان نسبی بالاتر مقدار انرژی جذب شده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نمونه *CNF-ECC* بیشترین مقدار انرژی جذب شده در تغییر مکان‌های نسبی بالاتر از خود نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ منحنی انرژی جذب شده‌ی تجمعی اتصالات تا هر تغییر مکان نسبی از ابتدای بارگذاری نشان داده شده است. میزان کل انرژی جذب شده تا انتهای بارگذاری در نمونه *CNF-ECC* به ترتیب ۵/۱۲ و ۳/۲ برابر نمونه‌های *NC* و *ECC* می‌باشد. در محاسبه انرژی جذب شده از مساحت تمام حلقه‌های هیستریزیس مطابق الگو و تاریخچه بارگذاری اعمالی استفاده گردیده است.



شکل ۱۱- انرژی جذب شده در تغییر مکان‌های نسبی مختلف



شکل ۱۲- انرژی جذب شده نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت تجمعی از ابتدای بارگذاری



جدول ۴- خلاصه نتایج آزمایشات نمونه های اتصالات تیر-ستون

نمونه ها	اولین ترک ایجاد شده		اولین تسلیم میلگردهای اتصال		حداکثر لنگر ایجاد شده در اتصالات (KN.m)	نسبت تغییر شکل نسبی متناسب با حداکثر لنگر قابل تحمل (%)	حداکثر نسبت تغییر شکل نسبی تا کاهش ۴۰ درصد از ظرفیت باربری (%)	انرژی جذب شده در انتهای بارگذاری (KN.m)
	بار (KN)	تغییر شکل نسبی (%)	بار (KN)	تغییر شکل نسبی (%)				
NC	۱۳	۰/۵	۲۴	۱	۳۰/۰۶	۲	۴	۴۸
ECC	۱۰	۰/۵	۲۶	۱/۵	۳۲/۸۲	۳	۶	۷۶/۸
CNF-ECC	۲۱	۰/۵	۳۲	۱/۵	۳۴/۰۸	۷/۵	۹	۲۴۵/۹

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج آزمایشات انجام شده در این پژوهش نشان می دهد که استفاده از مصالح الیافی و نانوالیافی توانمند قابلیت بالایی در بهبود رفتار اتصال تیر به ستون در افزایش شکل پذیری، افزایش ظرفیت باربری، افزایش جذب انرژی دارد. با توجه به آزمایش های انجام شده بر روی سه اتصال تیر به ستون در این پژوهش، نتایج ذیل بدست آمد:

- در مراحل پایانی بارگذاری در نمونه بتن معمولی (NC) ترک ها در ناحیه بحرانی اتصال که احتمال تشکیل مفصل خمیری بیشتر است، به شدت گسترده و به یکدیگر وصل شدند. همچنین ترک هایی با عمق و عرض قابل توجه در محل اتصال تیر به ستون مشاهده گردید و بتن در آستانه خرد شدگی در چشمه اتصال بود که نشانگر شکست برشی شکننده در مفصل خمیری می باشد. در مقابل در نمونه های کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC) و کامپوزیت سیمانی مهندسی حاوی نانوالیاف کربن (CNF-ECC)، ترک های اصلی به صورت یک شبکه متراکم از ریزترک ها با عمق و عرض بسیار کم ظاهر گردیدند که این مورد در CNF-ECC با توجه به استفاده از نانو الیاف کربن و مهار ترک ها در مقیاس میکرو، بیشتر نمایان بود که ناشی از عملکرد شکل پذیری بالای آن می باشد.

- استفاده از مصالح CNF-ECC باعث شده تا مقدار تغییر مکان نمونه های آزمایش شده از زمان شروع آزمایش تا رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری و همچنین گسیختگی، افزایش پیدا کند.

- مقدار نیروی متناظر با جاری شدگی آرماتورهای چشمه اتصال در مفصل خمیری نمونه حاوی CNF-ECC، افزایش پیدا کرده است.

- حداکثر ظرفیت باربری هر ۳ نمونه تقریباً برابر بود. حداکثر ظرفیت خمشی اتصال در نمونه NC در تغییر شکل نسبی ۲ درصد و حداکثر ظرفیت خمشی در نمونه های ECC و CNT-ECC به ترتیب در تغییر شکل نسبی ۳ و ۷/۵ درصد حاصل گردید.

- با توجه به منحنی پوش هیستریزس نمونه ها، بخش نزولی منحنی CNF-ECC نسبت به ۲ نمونه دیگر شیب ملایم تری دارد همچنین حداکثر تغییر شکل نسبی تا کاهش ۴۰ درصد ظرفیت باربری مطابق جدول شماره ۴، نشان دهنده شکل پذیری و تحمل آسیب بالاتری می باشد.

- مطابق نتایج بدست آمده در نمونه حاوی *CNF* در مفصل خمیری، مقدار انرژی جذب شده در انتهای بارگذاری به ترتیب ۳/۲ و ۵/۱۲ برابر نسبت به *ECC* و *NC* بود.

- استفاده از کامپوزیت های سیمانی مهندسی حاوی نانو الیاف کربن در ناحیه های بحرانی از سازه که احتمال تشکیل مفصل خمیری بیشتر است، می تواند در بهبود رفتار لرزه ای موثر باشد.

## سپاسگزاری

از کارشناسان آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی خصوصا آقای مهندس خلیلی که در انجام آزمایش ها نهایت همکاری را داشته اند کمال تشکر را داریم.

## مراجع

- [1] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2014): Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4th edn. McGraw Hill, New York.15-16.
- [2] Choi, W.C., Yun, H.D., Cho, C.G. and Feo, L., (2014). Attempts to apply high performance fiber-reinforced cement composite (HPFRCC) to infrastructures in south Korea. Journal of Composite Structures, 109: 211-223
- [3] Ganesan., N., Indira, P.V. and Abraham, R., (2007). Steel Fiber Reinforced High Performance Concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. ISET journal of earthquake technology. Technical note, 44:445-456
- [4] Fukuyama, H. and Suwada, H. (2003). Experimental response of HPFRCC dampers for structural control, Journal of Advanced Concrete Technology, 1(3), 317-326.
- [5] Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M. Yeonho, P. and Abolmaali, A. (2016). Ductile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frame. Journal of Construction and Building Materials 115: 681-689.
- [6] Yang, E.H. and Li, V.C. (2007). Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. Journal of Construction and Building Materials.
- [7] Sh wan H.said and Hashim Abdul Razak, (2015). The effect of synthetic polyethylene fiber on the strain hardening behavior of engineered cementitious composite (ECC). Journal of Material and design So264-1275(15) 30194(5).
- [8] Sun S, Yu X, Han B. and Ou J. (2013). In situ growth of carbon nanotubes/carbon nanofibers on cement/mineral admixture particles: A review. Journal of Construction and Building Materials;49:835-40.
- [9] Bentur, A. and Mindess, S. (2007) Fibre Reinforced Cementitious Composites, 2nd edn. London: E & FN Spon, 80
- [10] Zhang, R., Matsumoto K., Hirata T., Ishizeki Y. and Niwa J., (2015). Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements, Journal of engineering structure. 86 ,146-156.
- [11] Victor C.Li, (2019), ECC (engineering cementitious composite) Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan Ann Arbor, MI, USA, ISBN 978-3-662-58438-5 (eBook)
- [12] Lee, HG., Kim, SS. and Lee, DG. (2006). Effect of compacted wear debris on the tribological behavior of carbon/epoxy composites Journal of Construction and Building Materials;74(2):136-44.
- [13] Khalilzadeh vahidi, E, and Rezaei, M, (2019), Self- sensing concrete in smart structure, Arak: Jihad University, 303
- [14] Azhari F. (2008). Cement-based sensors for structural health monitoring. Dissertation for the Master Degree of Applied Science. Canada: University of British Columbia.
- [15] American concrete Institute, (2008).ACI committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and commentary (ACI 318R-08), MI: Farmington Hills
- [16] Parvin, A., Altay, S., Yalcin, C. and Kaya, O. (2010). CFRP rehabilitation of concrete frame joints with inadequate shear and anchorage details” ASCE Journal of composites for Construction, 14(1), pp. 72-82

- [17] Tsonos, A.G. (2008) "Effectiveness of CFRP-jackets and RC-jackets in post-earthquake and pre-earthquake retrofitting of beam-column sub assemblages. *Journal of Engineering Structures* , 30(3), pp. 777-793
- [18] Tsonos, A.G. (2001). Seismic rehabilitation of reinforced concrete joints by removal and replacement technique, *journal of European Earthquake Engineering* , 3, pp. 29-43
- [19] Maheri, M.R., Karihaloo, B. and Alaei, F.J. (2004) "Seismic performance parameters of RC beams retrofitted by CARDIFRC" *journal of Engineering Structures* , 26(14), pp. 2069-2079
- [20] Mahini, S.S. and Ronagh, H.R. (2010). Strength and ductility of FRP web-bonded RC beams for the assessment of retrofitted beam-column joints , *journal of Composite Structures*, 92(6), pp. 1325-1332
- [21] Mostofinejad, D. and Mahmoudabadi, E. (2010). Grooving as an alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beam , *Journal of composites for Construction*, 14(6), pp. 804-811
- [22] Tsonos, A.G.,(2001). Seismic rehabilitation of reinforced concrete joints by the removal and replacement technique. *Journal European Earthquake Engineering*, 3, pp. 29-43
- [23] Shwan, H. and Hashim, AR., (2016). Structural behavior of RC engineered cementitious composite (ECC) exterior beam-column joints under reverse cyclic loading, *Construction and building materials*, 107, pp. 226-234.
- [24] Sarsam, K.F., Al-Azzawi, Z.M.K., Shear capacity of high strength fiber reinforced concrete beam-column joints, *journal of engineering technol*, 28(6), pp. 1253-1266.
- [25] Brandt., A.M., *Cement-based composite: Materials, Mechanical Properties and performance* , London: E&FN spon, PP.470
- [26] 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*, vol 2-31, No.1/2, pp41-50, 2015 (in Persian)