

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از قاب‌های خمشی مرکب متشکل از ستون‌های بتنی و تیرهای فولادی (RCS) مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این سیستم با ترکیب بهینه عناصر سازه‌ای فولادی و بتنی از محاسن هر دو سیستم بهره می‌برد. در این نوع سازه‌ها شناخت رفتار ناحیه اتصال تیر به ستون و مکانیزم شکست در اتصالات اهمیت عمده‌ای دارد. جایگزین نمودن بتن ستون در این اتصالات با بتنی توانمند و انعطاف‌پذیر همچون بتن مهندسی شده (ECC) قادر است عملکرد لرزه‌ای این نوع از سازه‌ها را بهبود دهد. در این تحقیق دو نمونه از این اتصالات با تیر میان‌گذر، در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی و با نمونه آزمایشگاهی موجود صحت‌سنجی شد. رفتار غیرخطی هشت مدل از اتصالات تیر فولادی، ستون بتنی با استفاده از بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که عملکرد این اتصالات با محصورشدگی بتن ناحیه اتصال رابطه مستقیم دارد. در ادامه جهت تسهیل جزئیات اتصال و ارتقاء رفتار آن، بتن ECC در دو حالت متفاوت، در گره اتصال و کل ستون جایگزین بتن معمولی در اتصالات گردید. در پایان پس از مقایسه نتایج عملکرد این نوع از اتصالات، یک مدل پیشنهادی اولیه با بتن ECC ارائه شد که علاوه بر افزایش ظرفیت این اتصالات، رفتار بسیار پایدارتر و مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: قاب‌های خمشی مرکب RCS، تیر میان‌گذر، بتن مهندسی شده ECC، عملکرد لرزه‌ای.

ارتقاء عملکرد لرزه‌ای ناحیه اتصال تیر به ستون در ساختمان‌های تیر فولادی - ستون بتنی با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده

آرین جوادی زنوزی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

فریبرز ناطقی‌الهی (نویسنده مسئول)

استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، nateghi@iiees.ac.ir

ایوب دهقانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۱- مقدمه

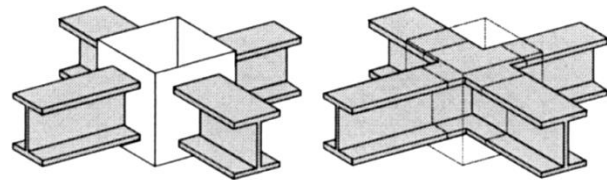
می‌گردد. در اتصالات تیر-ستون این سیستم سازه‌ای به دلیل استفاده مؤثر از مصالح، امکان ایجاد مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به قاب‌های خمشی بتنی و فولادی متداول وجود دارد [۱]. به‌طور کلی اتصالات در سیستم RCS، به دو شکل تیر یکپارچه و ستون یکپارچه طراحی و اجرا می‌شوند (شکل ۱). از آنجا که اتصال با تیر یکپارچه رفتار شکل‌پذیرتری دارد، استفاده از آن گسترش بیشتری یافته است. اتصال با ستون یکپارچه از نظر ساخت در محل ساده‌تر از اتصال با تیر یکپارچه می‌باشد؛ ولی به دلیل استفاده از ورق‌های فولادی پوششی و یا ورق‌های فولادی سخت‌کننده جهت متصل کردن تیر به ستون، نیازمند دقت و توجه بیشتری می‌باشد، تا بتوان از عملکرد لرزه‌ای مطلوب آن اطمینان حاصل کرد. اتصال با تیر یکپارچه به علت سراسری بودن تیرهای

در چند دهه اخیر تمایل محققان و طراحان به سیستم‌های مختلط بتن و فولاد به دلیل بهینه و اقتصادی بودن این سیستم‌ها افزایش یافته است. یکی از انواع این سیستم‌ها، سیستم قاب خمشی مختلط شامل تیر فولادی و ستون بتن مسلح (RCS) می‌باشد. در این سیستم سازه‌ای از مقاومت فشاری بالای بتن در ستون‌ها و از مقاومت کششی مطلوب فولاد در تیرها بهره گرفته شده، به عبارت دیگر در این قاب‌ها از مزایای هر دو مصالح بتن و فولاد حداکثر استفاده شده است. استفاده از بتن در ستون‌ها باعث افزایش میرایی و سختی سازه و کاهش هزینه مصالح می‌شود، همچنین وجود تیر فولادی سبب افزایش جذب انرژی این نوع از قاب‌ها شده و قابلیت افزایش دهانه‌ها را فراهم می‌کند. استفاده بهینه از مصالح باعث کاهش وزن ساختمان و کاهش هزینه‌های ساخت نیز

۲. گسیختگی اتکایی، در اثر اتکای صفحات اتکای جانبی تیر فولادی، به ستون بتنی، تنش‌های بالایی در بتن ناحیه اتصال ایجاد می‌شود که منجر به خرد شدن بتن در نواحی مجاور بال تیر و چرخش صلب تیر در داخل ناحیه اتصال می‌شود و در نتیجه شکاف‌هایی بین تیر فولادی و ستون بتنی شکل می‌گیرد.

تحقیقات در این زمینه در دانشگاه تگزاس توسط شیخ و همکاران [۳] ادامه یافت و هشت نمونه مختلف از اتصالات RCS مورد آزمایش قرار گرفت. در فاز تحلیلی این تحقیق معادلاتی جهت تخمین مقاومت این اتصالات ارائه شد که مدتی بعد با مقداری اصلاح در راهنمای طراحی اتصالات مختلط تیر فولادی و ستون بتنی ASCE ۱۹۹۴ [۴] مورد استفاده قرار گرفت. این معادلات، مکانیزم‌های موجود در اتصالات فولادی و اتصالات بتن مسلح را جهت تعیین مقاومت اتصالات RCS، با هم ترکیب نموده است. راهنمای طراحی ASCE به منظور تعیین مقاومت اتصالات داخلی و خارجی RCS و برای استفاده در ساختمان‌های قرار گرفته در نواحی با زلزله‌خیزی کم تا متوسط تهیه شد. در سال ۱۹۹۳ کانو [۵] در دانشگاه کرنل ۱۹ نمونه از اتصالات داخلی RCS با جزئیاتی متنوع را تحت بارگذاری متناوب قرار داد و متغیرهایی همچون مودهای گسیختگی اتصال، استفاده از بتن با مقاومت بالا، نسبت‌های ابعادی مختلف اتصال و اثر بار محوری ستون بر پاسخ اتصال، مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات جمع‌آوری شده از آزمایش‌ها نشان داد که جزئیات استفاده شده در اتصال اثر مستقیمی بر مقاومت و شکل‌پذیری دارد؛ اما بر سختی کل نمونه‌ها تأثیری ندارد. همچنین مشخص شد که نیروی محوری ستون، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از این تحقیق، مناسب بودن این سیستم را برای ساختمان‌های واقع در نواحی با لرزه‌خیزی متوسط و زیاد تأیید نمود. ایزاکی و همکاران [۶]، طی آزمایش‌هایی، پنج نمونه از اتصالات داخلی RCS در مقیاس تقریبی ۱/۲ را تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار دادند که جزئیات این اتصالات شامل اتصال باریک شونده بال‌ها و اتصال کامل

فولادی، تیر به صورت ممتد از میان ستون عبور نموده و جوشکاری تیر به ستون به حداقل می‌رسد و بدین وسیله از ایجاد نقطه ضعف در سازه جلوگیری به عمل می‌آید و احتمال گسیختگی اتصال از بین می‌رود.

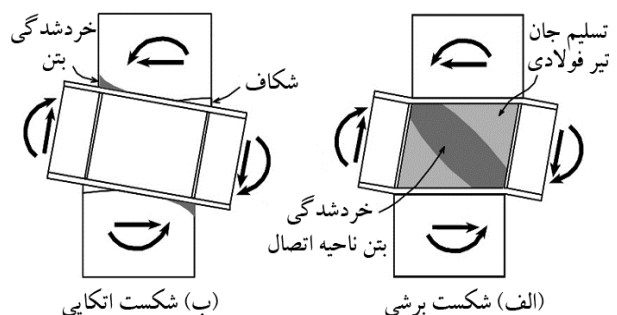


الف) اتصال با تیر یکپارچه (ب) اتصال با ستون یکپارچه

شکل (۱): اتصالات RCS.

همان‌گونه که ذکر شد مهم‌ترین بخش قاب‌های RCS اتصال تیر فولادی به ستون بتنی می‌باشد که تحقیقات بسیاری در این زمینه از دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی آغاز شده و تاکنون ادامه دارد. در سال ۱۹۸۷ شیخ و همکاران [۲] در دانشگاه تگزاس، طی یک برنامه تحقیقاتی ۹ نمونه از اتصالات RCS از نوع تیر میان‌گذر را در مقیاس تقریبی ۲/۳ ساخته و تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار دادند و به دو نوع مکانیزم کلی شکست در این اتصالات دست یافتند (شکل ۲).

۱. گسیختگی برشی چشمه اتصال، این نوع شکست مشابه گسیختگی در اتصالات بتنی و فولادی می‌باشد؛ با این تفاوت که در اتصالات RCS هم تیر فولادی و هم ستون بتن مسلح از خود مقاومت برشی نشان می‌دهند. این مود گسیختگی با جاری شدن تیر فولادی و گسترش ترک‌های قطری و یا خرد شدن بتن اتصال به وجود می‌آید.



شکل (۲): مودهای شکست اتصال [۲].

دیرلین [۱۱] گردید و بیان‌گر این موضوع بود که سیستم RCS به دلیل استفاده مؤثر از مصالح، نسبت به سیستم‌های فولادی و بتنی خالص، اقتصادی‌تر است. همچنین مقاومت و شکل‌پذیری اتصالات در سیستم‌های RCS، نسبت به قاب‌هی خمشی بتنی و فولادی متداول، بیشتر است. این آزمایش فرصت‌های بیشتری را برای آزمایش روش‌های پیش‌ساخته و ارزیابی عملکرد مدل‌های مشابه ایجاد نمود. علیزاده و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ طی یک مطالعه تجربی و عددی به بررسی رفتار دو مدل از اتصالات RCS با جزئیات مختلف در ناحیه اتصال پرداختند؛ که نتایج بیانگر این موضوع بود که عملکرد اتصالات با محور نمودن بتن در ناحیه اتصال، رابطه مستقیم دارد. همچنین در سال ۲۰۱۶ یک نوع اتصال توسط میرقادری و همکاران [۱۳] پیشنهاد شد که از صفحات پوشاننده فولادی دور ستون برای اتصال تیر فولادی به ستون بتنی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که اتصال پیشنهادی عملکرد لرزه‌ای مناسبی دارد و می‌تواند در این سیستم سازه‌ای به کار برده شود.

در سال ۲۰۲۰ محمدی و اصفهانی [۱۴]، پنج اتصال خارجی RCS با ستون بتنی دایره‌ای شکل در مقیاس واقعی را ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. در این تحقیق پارامترهای متغیری مانند فاصله تنگ‌های ستون در اطراف ناحیه اتصال و داخل اتصال، محورشدگی اطراف ناحیه اتصال با ورق‌های CFRP مورد بررسی قرار گرفت. هدف از طراحی، ساخت و آزمایش این اتصال‌ها، پیشنهاد اتصال با جزئیات ساده و رفتار مطلوب بود. نتایج نشان داد که اتصال پیشنهاد شده ضمن سادگی در جزئیات اجرایی، قادر است لنگر را از تیر فولادی به ستون بتنی به‌خوبی منتقل کند. همچنین تقویت ناحیه اتصال با ورق‌های CFRP شکل‌پذیری و جذب انرژی در اتصال RCS را افزایش می‌دهد.

اساسی‌ترین دلیل شکست در اتصالات RCS از نوع تیر میان‌گذر خرد شدن بتن ستون در نواحی بالا و پایین تیر فولادی به علت چرخش تیر فولادی در ناحیه اتصال می‌باشد، لذا برای جلوگیری از این نوع شکست تاکنون اتصالات تیر به ستون

بال‌ها بود. پایداری پاسخ‌های بار-جاب‌جایی این اتصالات، قابلیت استفاده از سیستم قاب‌های RCS در مناطقی با خطر لرزه‌خیزی بالا را به اثبات رساند. همچنین نتایج این آزمایش بیانگر این موضوع بود که بریدن بال‌های تیر در ناحیه اتصال به دلیل کاهش در سطح تکیه‌گاهی بال‌ها، منجر به کاهش مقاومت اتصال می‌شود. در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی یک برنامه گسترده تحلیلی و آزمایشگاهی توسط پارامانتوسینوس و وایت [۷] در دانشگاه میشیگان انجام شد. در این برنامه تحقیقاتی ۹ نمونه از اتصالات RCS خارجی در مقیاس ۳/۴ تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفت. جهت بررسی رفتار این اتصالات از جزئیات مختلفی همچون، بتن کامپوزیت مهندسی (ECC) و بتن با الیاف فولادی در اتصالات استفاده شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که محور نمودن بتن ناحیه اتصال به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کارایی اتصالات RCS را افزایش می‌دهد؛ همچنین این موضوع را نیز به اثبات رساند که ECC با کارایی بالای خود در کشش می‌تواند جایگزین مناسبی برای بتن در این اتصالات باشد و سبب سهولت در اجرای این اتصالات شود. این محققان، در فاز تحلیلی این تحقیق معادلاتی را جهت تخمین مقاومت برشی اتصالات RCS داخلی و خارجی پیشنهاد دادند [۸]. نیشی‌یاما و همکاران [۹]، مقاله‌ای تحت عنوان «راهنمای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های مختلط بتن مسلح و فولادی» را منتشر نمودند. این راهنما به‌عنوان یک دستورالعمل برای طراحی ساختمان‌های RCS منظم با ارتفاع کمتر از ۶۰ متر، از نوع اتصال با ستون عبوری و همچنین اتصال با تیر عبوری ارائه شد. اتصالات معرفی شده در این راهنما با معیار ستون قوی و تیر ضعیف طراحی شد و مشابه راهنمای طراحی ASCE به دو معیار گسیختگی برشی و گسیختگی فشاری در اتصالات RCS اشاره نمود. چن و همکاران [۱۰] از مرکز ملی تحقیقات در مهندسی زلزله (NCREE) در تایوان با مشارکت کردوا و دیرلین [۱۱] از دانشگاه استنفورد، آزمایش‌هایی را بر روی قاب خمشی مختلط RCS با مقیاس واقعی به روش شبه‌دینامیکی انجام دادند. نتایج حاصل از این آزمایش در سال ۲۰۰۵ منجر به ارائه گزارشی توسط کردوا و

(PVA)^۶ و... معمولاً با درصد حجمی کمتر از دو درصد تشکیل شده‌اند. ملات این نوع از بتن‌ها شامل: سیمان، سنگ‌دانه‌های ریز و مواد افزودنی است. به خاطر پیوستگی بین ملات و الیاف، ترکیب این دو با یکدیگر منجر به شکل‌گیری یک کامپوزیت قوی می‌شود. این مصالح به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، هیچ تفاوتی با بتن‌های الیافی معمولی به‌جز رفتار کششی و شکل‌پذیری بالا و قابلیت ترک‌خوردگی چندگانه ندارند [۱۷]. کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC) که توسط لی [۱۸] در دانشگاه میشیگان توسعه یافته است، نوع منحصر به فردی از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند می‌باشد که به صورت مهندسی و بر اساس علم میکرومکانیک مواد طراحی شده است؛ تا در بارگذاری‌های کششی و برشی، شکل‌پذیری بالایی از خود نشان دهد. مطالعات لی [۱۸] در سال ۱۹۹۳ و فیشر و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۳، مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل‌پذیری کششی ۳ تا ۵ درصد را نتیجه داده است. ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح ECC در جدول (۱) ارائه شده است.

چنین شکل‌پذیری بالایی با بهینه‌سازی ریز ساختار کامپوزیت با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی که اندرکنش میان الیاف، ماتریس و مرز میان این دو را مدل‌سازی می‌کند، حاصل شده است. مدل‌های میکرومکانیک ضوابطی را برای متناسب کردن این سه فاز در اختیار طراح قرار می‌دهد تا با کمک آن و فقط با استفاده از مقدار حجمی متوسطی از الیاف (۲ درصد حجمی)، کامپوزیت ساخته شده عملکرد مطلوبی داشته باشد؛ بنابراین ECC را می‌توان یک کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی توانمند بهینه‌سازی شده به حساب آورد. شکل (۳) نمونه‌ای از رفتار بتن‌های ECC در قیاس با بتن الیافی معمولی را تحت اثر تنش کششی مستقیم نشان می‌دهد.

زیادی برای این سیستم (RCS) طرح و توسعه یافته است؛ اما بزرگ‌ترین مشکل، صعوبت اجرای این اتصالات و پیچیدگی آن است. همچنین در اتصالاتی که تاکنون اجرا شده، حجم زیاد آرماتور و فولاد، از نظر اجرایی مشکلات مدیری را به همراه داشته است. از این رو به نظر می‌رسد، جایگزین نمودن بتن این اتصالات با ماده دیگری که خواص لرزه‌ای مناسب‌تری نسبت به بتن معمولی داشته باشد، بتواند سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای و همچنین ساده‌تر شدن اجرای این نوع اتصالات شود. لی و کیان [۱۵] در دانشگاه میشیگان، تحقیقات زیادی جهت بررسی کارایی ECC در مناطقی که فولاد در تعامل با بتن می‌باشد، انجام دادند و این موضوع را اثبات کردند که ECC برخلاف بتن معمولی عملکرد مناسبی در کشش داشته و با ایجاد ترک‌های ریز و متعدد به جای ترک‌های عمیق و متمرکز، سبب بهبود حالت شکست بتن می‌شود و در نتیجه موجب افزایش ظرفیت باربری سازه می‌گردد. لذا ECC که نوعی بتن الیافی انعطاف‌پذیر است، می‌تواند جایگزین مناسبی برای بتن معمولی در اتصالات RCS باشد.

بتن‌های الیافی (FRC)^۲ نوع خاصی از مواد مرکب به شمار می‌آیند که در آن علاوه بر فازهای بتن معمولی، الیاف جدا از هم با توزیع تصادفی به عنوان فاز دیگری به آن اضافه شده است. ورود این نوع بتن به عرصه صنعتی به دهه ۱۹۶۰ میلادی باز می‌گردد. با گذشت زمان تغییرات زیادی در نوع، کاربرد و رفتار بتن‌های الیافی صورت گرفته است. این ترکیب کامپوزیتی، یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده شکل‌پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پرنحنا را فراهم می‌آورد [۱۶]. بتن‌های الیافی توانمند (HPFRC)^۴ نسل پیشرفته بتن‌های الیافی به شمار می‌آیند؛ که از دو بخش اصلی، ملات و الیاف مصنوعی نظیر پلی‌اتیلن (PE)^۵، پلی‌وینیل‌الکل

جدول (۱): ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح ECC [۲۰].

چگالی (گرم بر سی‌سی)	مقاومت خمشی (مگا پاسکال)	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	کرنش کششی نهایی (درصد)	مقاومت کششی نهایی (مگا پاسکال)	مقاومت در برابر اولین ترک (مگا پاسکال)	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)
۰/۹۵-۲/۳	۱۰-۳۰	۱۸-۳۴	۱-۸	۴-۱۲	۳-۷	۲۰-۹۵

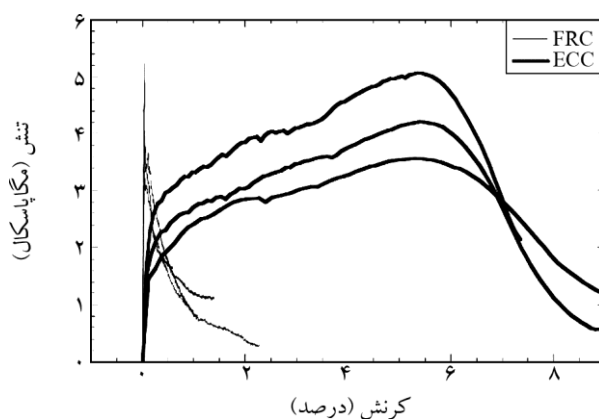
ECC صورت گرفت که نتایج نشان داد، تأثیر خاکستر بادی و سنگ‌دانه‌ها قابل ملاحظه می‌باشد و همچنین کرنش کششی در بهترین طرح اختلاط، حدود ۶ درصد تخمین زده شد؛ لذا یافتن طرح اختلاط مناسب که منجر به دستیابی به بهترین مشخصات مکانیکی در مصالح ECC شود، امری ضروری در طراحی این نوع مصالح و استفاده از آن در المان‌های سازه‌ای می‌باشد.

اکثر تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران، بر روی مصالح ECC با الیاف PVA متمرکز بوده؛ با این حال، نتایج تحقیق بر روی مصالح ECC با سایر الیاف، همچون پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) نیز موفقیت‌آمیز بوده است. سنگ‌دانه‌های ریز و همچنین ۲ درصد حجمی الیاف‌های پلی‌وینیل‌الکل با طول ۸ تا ۱۲ میلی‌متر سبب شده تا این کامپوزیت خصوصیات ویژه‌ای مانند خود تراکم بودن و یا قابلیت بتن‌پاشی را داشته باشد [۲۸]. افزایش بیش از حد حجم الیاف اگرچه به علت خاصیت پل زدن الیاف بر روی ترک، سبب بهبود مشخصات ترک می‌گردد؛ ولی کارایی ECC را کاهش می‌دهد، زیرا حجم هوای داخل مخلوط افزایش یافته و این موضوع سبب کاهش مقاومت، دوام و عمر بهره‌برداری بتن حاوی الیاف می‌گردد [۲۹]. پلی‌وینیل‌الکل (PVA) یک پلیمر سنتزی محلول در آب و سازگار با طبیعت می‌باشد. پایداری شیمیایی و خواص فیزیکی بسیار خوب رزین‌های PVA سبب کاربرد آن در مصارف صنعتی شده است. PVA قدرت کشسانی بالایی دارد و به‌عنوان الیاف کششی به کار می‌رود. این الیاف در نسبت بالای سیمان، جانشین فولاد و شبکه‌های فولادی می‌شود و یا نیاز به آرماتوربندی را کاهش می‌دهد. طبیعت آب‌دوستی PVA یک چالش برای طراحی کامپوزیت‌ها به حساب می‌آید؛ لذا انتخاب ابعاد دقیق الیاف در طراحی ECC ها بسیار اهمیت دارد. جدول (۲) خصوصیات الیاف PVA را نشان می‌دهد [۳۰].

جدول (۲): خصوصیات الیاف PVA [۳۰].

چگالی (گرم بر سی‌سی)	کرنش (درصد)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۱/۳	۶-۱۰	۲۵-۴۰	۸۸۰-۱۶۰۰

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، این بتن‌ها برخلاف بتن‌های الیافی معمولی پس از ترک خوردن مقاومت خود را از دست نمی‌دهند و قادر به تحمل تغییر شکل‌ها و کرنش کششی و ارائه رفتار سخت‌شدگی کرنشی می‌باشند. دهقانی و ناطقی‌الهی [۲۱] در سال ۲۰۱۴ به بررسی ویژگی‌های کامپوزیت‌های سیمانی توانمند با الیاف پلی‌وینیل‌الکل پرداختند و نتایج تحقیق بیانگر این بود که رفتار خمشی ECC نسبت به بتن الیافی معمولی بسیار متفاوت بوده و می‌تواند تنش خمشی بالاتر از ۸ مگاپاسکال به همراه ظرفیت تغییر شکلی منحصر به فرد را بدون تسلیح عضو با فولاد تحمل کند. در کامپوزیت‌های ECC از کاربرد درشت‌دانه‌ها اجتناب شده است که حاصل آن مخلوطی با مقدار مواد سیمانی بالا در مقایسه با بتن معمولی است میزان بالای مواد سیمانی در ECC موجب توزیع هرچه بهتر الیاف در این کامپوزیت می‌گردد و همچنین برای بروز رفتار کرنش سخت‌شونده و افزایش چقرمگی ماتریس در ناحیه پسا ترک ضروری می‌باشد [۲۲-۲۴]. در چند دهه گذشته از مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی به‌عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان، به دلیل داشتن مزایا و آثار مثبت بر بتن و فرآورده‌های سیمانی استفاده می‌شود [۲۵]. به‌تازگی استفاده از این مواد در کامپوزیت‌های ECC نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در همین راستا تحقیقاتی توسط ناطقی و همکاران [۲۶] با در نظر گرفتن تأثیر نوع مصالح سنگ‌دانه داخل کشور و خاکستر بادی بر روی رفتار کششی



شکل (۳): رفتار بتن‌های توانمند الیافی شکل پذیر تحت کشش مستقیم [۲۷].

۲- اهداف تحقیق

مربع شکل به ابعاد 400×400 میلی‌متر مربع می‌باشند که به وسیله $18\phi 16$ به صورت طولی مسلح شده‌اند و از آرماتورهای 10ϕ به عنوان خاموت ستون‌ها استفاده شده است. تیر فولادی به کار رفته در هر دو نمونه IPE 300 بوده که به صورت یکپارچه از ناحیه اتصال عبور نموده است و بتن استفاده شده در ستون به طور متوسط دارای مقاومت فشاری $50/8$ مگاپاسکال می‌باشد. نحوه قرارگیری آرماتورهای طولی، به ابعاد تیر عبوری از ناحیه اتصال بستگی دارد و تنها فضای موجود برای عبور این آرماتورها، ناحیه بین بال تیر و پوشش بتنی می‌باشد. به دلیل استفاده از مقطع IPE 300 و ضعیف بودن جان تیر فولادی، مقاومت برشی اتصال کمتر از مقاومت اتکایی بوده، در نتیجه جهت افزایش مقاومت برشی چشمه اتصال از ورق‌های فولادی^۸ به ابعاد $460 \times 260 \times 8$ میلی‌متر مکعب جهت تقویت جان تیر استفاده شده است. این ورق‌ها به صورت کامل به جان تیر در ناحیه اتصال جوش داده شده‌اند. به منظور محصور کردن و فعال نمودن بتن در ناحیه اتصال در هر دو نمونه از ورق‌های اتکای جانبی (FBP)^۹ استفاده شده است که در دو طرف ناحیه اتصال بین بال‌های تیر قرار گرفته و به بال و جان تیر فولادی جوش داده شده‌اند. ضخامت این ورق‌ها ۱۵ میلی‌متر بوده و پهنای این ورق‌ها در نمونه ۱ به اندازه عرض بال تیر و در نمونه ۲ از هر طرف به مقدار ۱۰۰ میلی‌متر عریض‌تر از عرض بال تیر می‌باشد. جزئیات دیگری که در هر دو نمونه به کار رفته، تسمه‌های فولادی دور ستون (SBP)^{۱۰} می‌باشد که در بالا و پایین تیر به بال تیر فولادی جوش داده شده‌اند. ارتفاع این ورق‌ها ۸۰ میلی‌متر و ضخامت آنها ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. به منظور عبور خاموت‌ها از ناحیه اتصال دو سوراخ به قطر ۱۲ میلی‌متر در جان تیر ایجاد شده است. تعداد و فاصله این سوراخ‌ها به اندازه‌ای می‌باشد که الزامات راهنمای ASCE 1994 را برآورده ساخته و باعث کاهش مقاومت اتصال نگردد. جزئیات دو نمونه آزمایشگاهی در شکل (۴) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که نمونه ۱ بر اساس راهنمای طراحی اتصالات مختلط شامل تیر فولادی و ستون بتنی (ASCE 1994) و نیز اصلاحات این راهنما که توسط کردوا و دیرلین [۱۱] در

در این پژوهش با مدل‌سازی انواع مختلفی از اتصالات RCS، از نوع تیر میان‌گذر و جایگزین نمودن ECC به جای بتن معمولی ستون به بررسی و تأثیر بتن ECC بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات RCS پرداخته و در نهایت سعی می‌شود نوعی از اتصالات RCS که با بتن ECC بهترین عملکرد لرزه‌ای را داشته و از نظر اجرایی نیز ساده‌تر از نوع مرسوم این اتصالات باشد، معرفی گردد. در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [۳۱] جهت ساخت و تحلیل مدل‌ها استفاده شده است و مدل‌های عددی ساخته شده، با نتایج آزمایش‌های صورت گرفته توسط علیزاده و همکاران [۱۲، ۳۲] صحت‌سنجی شده‌اند.

۳- صحت‌سنجی مدل‌ها

آزمایش‌هایی که در این تحقیق جهت صحت‌سنجی با نرم‌افزار المان محدود انتخاب شد، شامل دو نمونه اتصال RCS داخلی در مقیاس $3/4$ می‌باشد که در بخش سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، توسط علیزاده و همکاران [۱۲، ۳۲] ساخته و مورد آزمایش چرخه‌ای معکوس‌شونده (شبه استاتیکی) قرار گرفتند. اتصالات مورد آزمایش متشکل از ستون بتنی و تیر فولادی می‌باشند که تیر فولادی به صورت یکپارچه از ناحیه اتصال عبور نموده است.

۳-۱- ابعاد و جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

ابعاد و مقاطعی که علیزاده و همکاران [۱۲، ۳۲] برای نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب نموده‌اند، از طراحی یک سازه چهار طبقه با فرض قرارگیری در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بسیار زیاد به دست آمده است. در این نمونه‌ها فرض شده که قاب‌های پیرامونی سازه، خمشی بوده و در مقابل بارهای جانبی مقاومت می‌کنند و قاب‌های داخلی فقط توانایی تحمل بار ثقلی را دارند. طول تیر و ستون در نمونه‌ها به ترتیب ۳۹۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. هر دو نمونه آزمایشگاهی، دارای ستونی بتنی با مقطع

سخت‌شدگی کششی و اثر پیوستگی محلی است، تعریف شود. در این تحقیق برای مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار ABAQUS از مدل رفتاری خسارت پلاستیک بتن^{۱۱} استفاده شده است. مقدار پارامترهای مورد استفاده در مدل خسارت پلاستیک بتن در این تحقیق به اختصار در جدول (۳) موجود می‌باشد.

جدول (۳): پارامترهای مورد استفاده در مدل خسارت پلاستیک بتن در این تحقیق [۳۳].

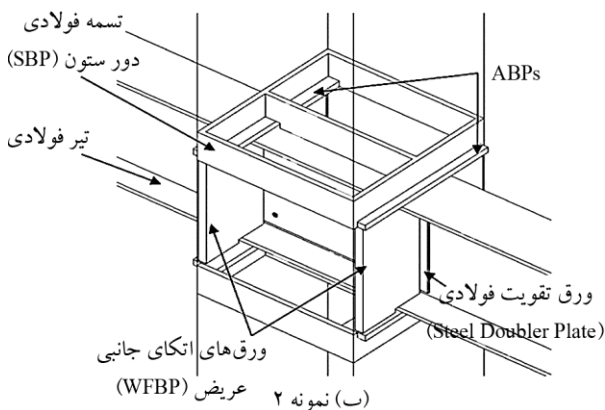
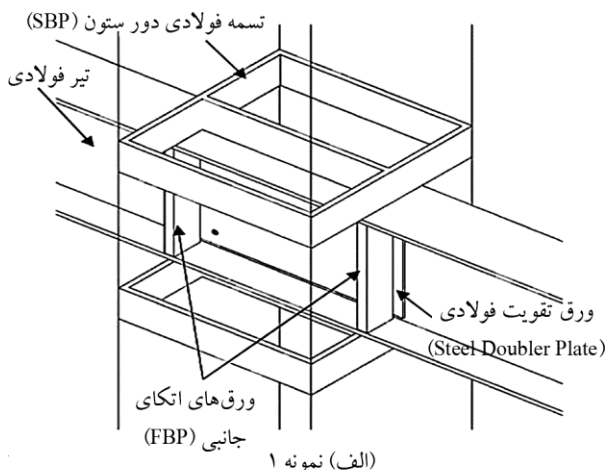
Dilation Angle	Eccentricity	f_{b0} / f_{c0}	K	Viscosity Parameter
۳۶	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۰۰۱

برای مدل‌سازی تیر و سایر اجزای فولادی از معیار تسلیم ون‌میسز بهره گرفته شده که در جدول (۴) مشخصات مکانیکی این مصالح درج شده است. برای شبیه‌سازی فولادهای مسلح کننده ستون بتنی در مدل FEM از المان‌های خرپایی خطی دو گرهی معمولی به صورت درون‌گذار در داخل مدل استفاده شده که در این حالت درجات آزادی این المان‌ها به درجات آزادی بتن بسته شده و بدین وسیله میلگردها به بتن اطراف متصل می‌شوند. همچنین از المان‌های هشت گرهی 3D Stress معمولی جهت مدل‌سازی اجزای فولادی و ستون بتنی استفاده شده است که انتگرال‌گیری عددی این المان‌ها به روش گوس انجام می‌پذیرد. شکل (۵) المان‌بندی کلی مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد. برای انتخاب بهترین اندازه المان‌ها، تحلیل در چند حالت با اندازه المان‌های متفاوت انجام شد و در حالت استفاده از المان‌های مکعبی با اندازه ۱۵ میلی‌متر برای ستون بتنی و ۲۴ میلی‌متر برای تیر و اجزای فولادی، تطابق مناسبی بین نتایج

جدول (۴): مشخصات اجزای فولادی استفاده شده در نرم‌افزار.

Fu (مگاپاسکال)	Fy (مگاپاسکال)		
۴۹۳/۴	۳۵۶/۶	بال تیر	تیر فولادی
۴۹۶/۳	۴۶۸/۸	جان تیر	
۶۱۵	۴۰۸	φ10 bar	آرماتورهای عرضی ستون بتنی
۶۶۹	۵۲۳	φ18 bar	آرماتورهای طولی ستون بتنی

سال ۲۰۰۵ منتشر شده بود، طراحی شده است. در طراحی این اتصالات به دلیل استفاده از معیار ستون قوی، تیر ضعیف، بیشتر فعالیت‌های غیرخطی و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر فولادی رخ داده و آسیب کمتری به ناحیه اتصال وارد شده است [۱۲، ۳۲].

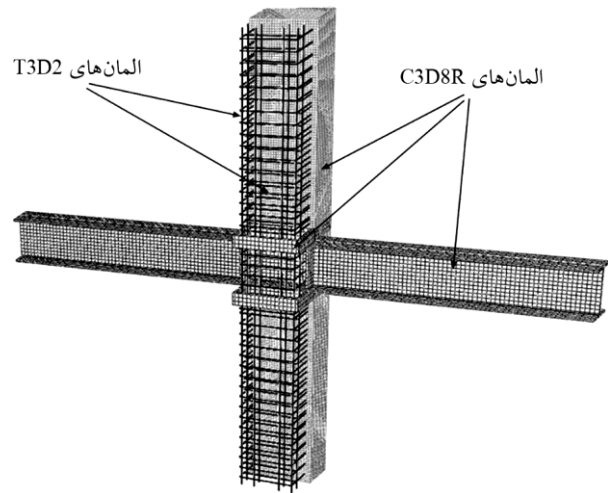


شکل (۴): نمونه‌های آزمایشگاهی [۱۲].

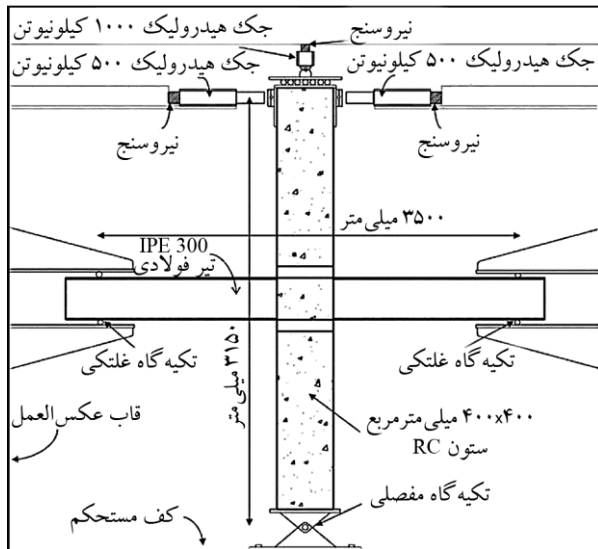
۳-۲- مشخصات مصالح

مقاومت فشاری بتن استفاده شده در ستون بتنی هر دو نمونه، ۵۰/۸ مگاپاسکال می‌باشد و از آنجا که بتن مسلح یکی از پیچیده‌ترین مصالح برای مدل‌سازی در نرم‌افزارهای اجزای محدود می‌باشد؛ تعریف درست رفتار الاستیک و پلاستیک مصالح در قسمت‌های فشاری و کششی می‌تواند اثرات زیادی بر جواب‌ها و خروجی‌ها داشته باشد. رفتار کاملاً فشاری باید شامل هر دو رفتار الاستیک و پلاستیک کامل بتن در نرم‌شدگی کرنشی آن باشد و همین‌طور در مورد کشش نیز باید خواص بتن در دو بعد الاستیک و پلاستیک که شامل نرم‌شدگی کششی،

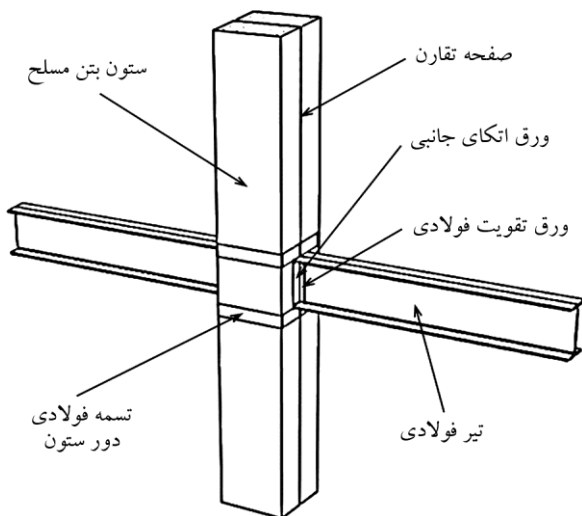
باید به این نکته اشاره نمود که در مرحله اول جک هیدرولیکی نیرویی به میزان ۳۰۰ کیلونیوتن را به صورت محوری به بالای ستون اعمال نموده و در مرحله بعدی جک‌های افقی، نیروهای جانبی را وارد می‌کنند [۳۲]. لازم به ذکر است با توجه به اینکه اتصالات مورد بررسی دارای تقارن می‌باشند، جهت کاهش حجم محاسبات تنها نیمی از اتصال مدل‌سازی شده است که به منظور ایجاد صفحه تقارن در مدل، جابه‌جایی در راستای عمود بر صفحه و دوران حول محورهای داخل صفحه تقارن مقید شده است. شکل (۷)، جزئیاتی کلی از مدل FEM ساخته شده و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن را نشان می‌دهد.



شکل (۵): المان بندی کلی مدل اجزای محدود.



شکل (۶): نحوه اعمال بارگذاری و شرایط مرزی [۳۲].



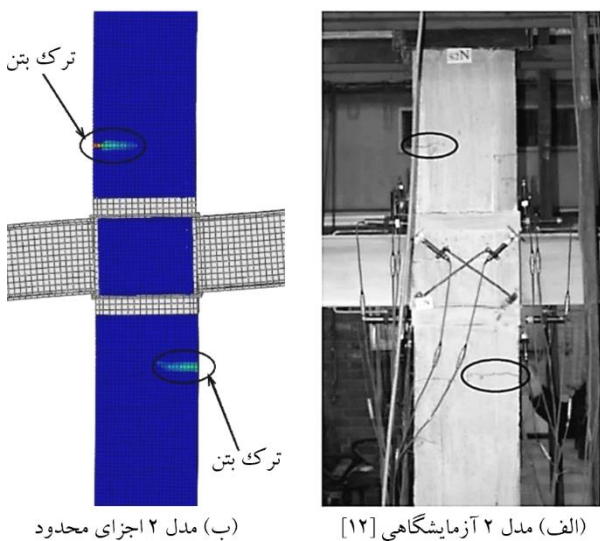
شکل (۷): مدل FEM ساخته شده و اجزای کلی مدل.

حاصل از تحلیل و آزمایش ایجاد گردید؛ به همین جهت در مدل‌های ساخته شده از ابعاد مشابه برای المان‌بندی استفاده شد. در این نرم‌افزار برای حل عددی مسائل می‌توان از دو روش طول قوس (ریکس) و روش نیوتن-رافسون استفاده کرد، که در این تحقیق از روش طول قوس بهره گرفته شده است. در مدل‌سازی رفتار تماسی بین تیر و سایر اجزای فولادی با بتن، از تماس سطح به سطح با ضریب استفاده شده و مشخصات تماس به شکلی معرفی شده است که توانایی انتقال نیروهای افقی و عمودی بین سطوح را دارد. تماس عمودی از نوع سخت تعریف شده که این نوع تماس اجازه فرو رفتن سطوح در یکدیگر را نمی‌دهد. تماس افقی به صورت پنالتی با ضریب اصطکاک 0.3 و سطوح بتنی به عنوان سطح اصلی در نظر گرفته شده است.

۳-۳- شرایط مرزی و هندسه مدل‌سازی

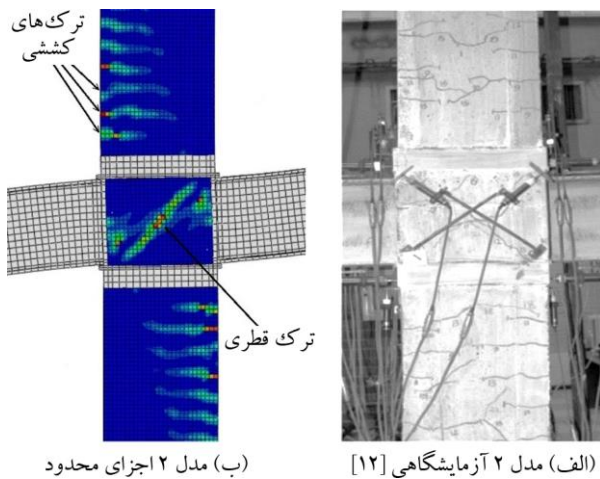
نحوه اعمال بارگذاری و شرایط مرزی، مطابق با شکل (۶) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دو انتهای تیر از تکیه‌گاه‌های غلتکی و در انتهای ستون از تکیه‌گاه مفصلی استفاده شده و نمونه‌ها در طی آزمایش تحت بار محوری ثابت که توسط جک هیدرولیکی ۱۰۰۰ کیلونیوتنی تأمین می‌شود، قرار گرفته‌اند؛ و بارهای جانبی توسط دو جک هیدرولیکی ۵۰۰ کیلونیوتنی تأمین شده که به بالای ستون اعمال می‌گردند.

آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود، می‌توان به صحت مدل و تحلیل انجام شده پی برد (شکل ۹). همچنین با توجه به اینکه نمونه‌های آزمایشگاهی در تغییر مکان نسبی بین ۳ و ۴ درصد بیشترین پاسخ نیرو را داشتند، با بررسی الگوی ترک خوردگی نمونه دوم آزمایشگاهی در تغییر مکان ۴ درصد (شکل ۱۰-الف) مشاهده می‌شود که علاوه بر ترک‌های کششی ایجاد شده در ستون بتنی، ترک‌های قطری شکلی نیز در ناحیه اتصال تشکیل شده که با مقایسه الگوی ترک خوردگی مدل اجزای محدود این مدل (شکل ۱۰-ب) باز هم می‌توان پی به صحت مدل تحلیل شده برد. لازم به ذکر است به علت رفت و برگشتی نبودن بارگذاری، ترک‌ها در یک طرف ستون بتنی مشاهده می‌گردد.



(الف) مدل ۲ آزمایشگاهی [۱۲] (ب) مدل ۲ اجزای محدود

شکل (۹): مقایسه الگوی ترک خوردگی در تغییر مکان نسبی ۰/۷۵ درصد.



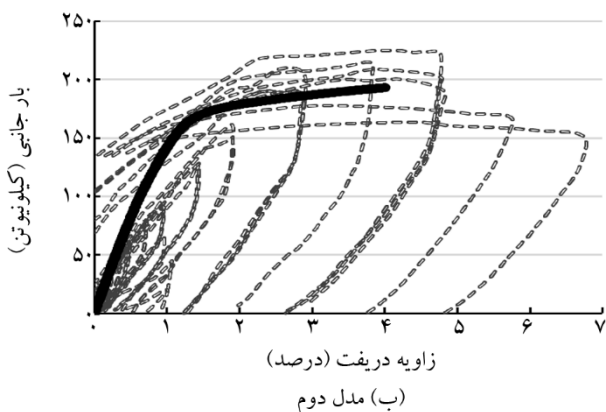
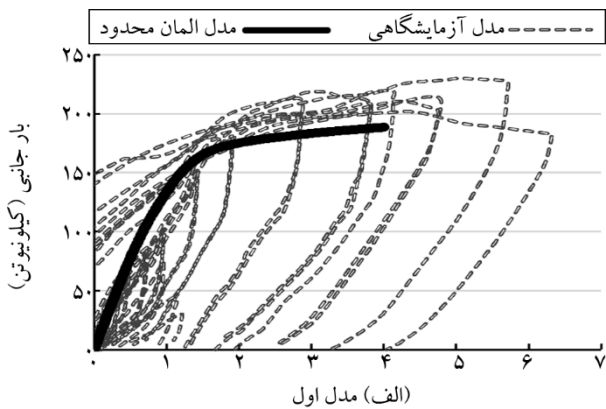
(الف) مدل ۲ آزمایشگاهی [۱۲] (ب) مدل ۲ اجزای محدود

شکل (۱۰): مقایسه الگوی ترک خوردگی در تغییر مکان نسبی ۴ درصد.

۴-۳- مقایسه نتایج مدل های المان محدود با نتایج آزمایشگاهی

با توجه به آیین‌نامه AISC [۳۳]، اتصالات در قاب‌های خمشی ویژه باید به گونه‌ای طراحی شوند که بدون کاهش قابل توجه در مقاومت، میزان دوران نظیر تغییر مکان جانبی نسبی طبقه در سازه حداقل به ۰/۰۴ رادیان برسد و مفصل‌های پلاستیک در خارج از محدوده اتصال تیر به ستون تشکیل شوند. لذا تمامی نتایج در این زاویه دریافت مورد بحث و بررسی قرار گرفت. تحلیل مدل‌ها به روش بارافزون انجام شد و نمودارهای نیرو- تغییر مکان جانبی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، نتایج تطابق قابل قبولی دارند.

با مقایسه الگوی ترک خوردگی در تغییر مکان نسبی ۰/۷۵ درصد یعنی شروع ترک خوردگی در ستون بتنی مدل دوم



شکل (۸): مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش و مدل‌های عددی.

۴- مدل سازی اتصالات با بتن معمولی

با بهره گیری از مدل های آزمایشگاهی صحت سنجی شده، انواع دیگری از این اتصالات، با جزئیاتی ساده تر مدل سازی شد و عملکرد هر یک مورد بررسی قرار گرفت که جزئیات هر یک در جدول (۵) درج شده است. جهت کاهش خطاهای مدل سازی و همچنین امکان مقایسه ساده تر نتایج، در تمامی اتصالات از ابعاد و مشخصات مشابه با نمونه های آزمایشگاهی استفاده شد.

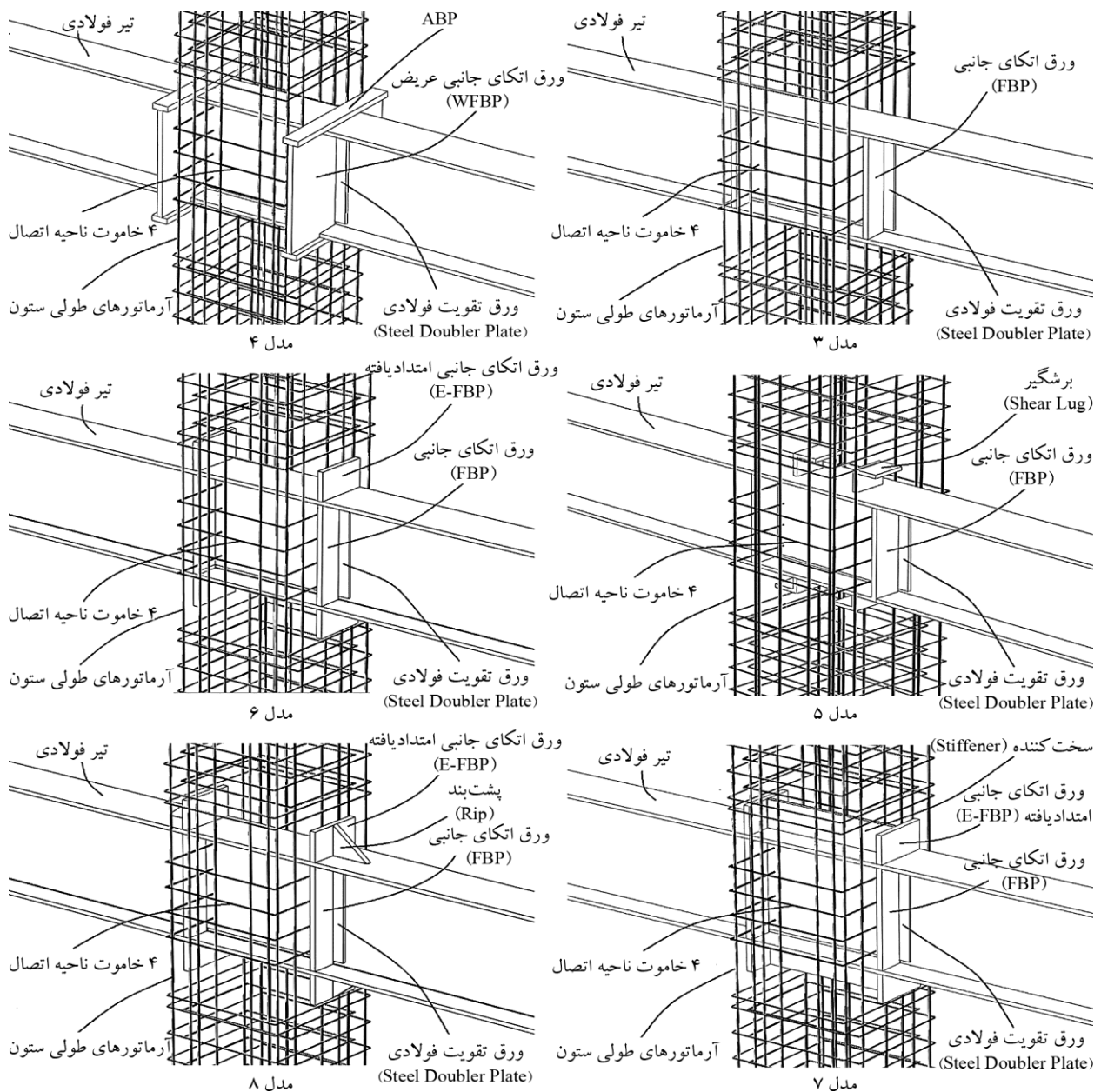
نمونه اول و دوم همان مدل های آزمایشگاهی می باشند که صحت سنجی شدند. مدل سوم، برگرفته از نمونه اول آزمایشگاهی می باشد، با این تفاوت که تسمه های فولادی دور ستون (SBP) در این مدل حذف گردید. در واقع این اتصال تنها شامل جزئیاتی می باشد که در تمام اتصالات مشترک است. با مقایسه رفتار لرزه ای این مدل و مدل اول می توان به تأثیر و کارایی SBP در عملکرد اتصالات پی برد. مدل چهارم، برگرفته از نمونه دوم آزمایشگاهی می باشد، با این تفاوت که SBP در این مدل نیز حذف شد. سایر جزئیات مدل، مشابه نمونه دوم آزمایشگاهی می باشد. با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل این مدل و مدل دوم می توان به کارایی WFBP، ABP و همچنین SBP حذف شده در عملکرد اتصال پی برد. با توجه به اینکه مدل سوم بدون جزئیات خاص در ناحیه اتصال، ساده ترین مدل محسوب می شد و عملکرد لرزه ای مناسبی نیز نداشت، لذا به منظور ارتقاء رفتار این اتصال، در مدل پنجم چهار برشگیر از نوع نبشی در

ناحیه اتصال به بال تیر جوش داده شد تا با درگیر نمودن بتن ناحیه اتصال با تیر فولادی، عملکرد اتصال را بهبود دهد. برشگیرهای طراحی شده از نوع نبشی شماره ۷ با طولی برابر ۸۰ میلی متر می باشند. مدل ششم نیز مانند مدل قبلی برگرفته از نمونه سوم می باشد با این تفاوت که در این مدل صفحاتی فولادی در راستای FBPs به بال تیر جوش داده شد. این صفحات با هدف افزایش محصورشدگی بیشتر بتن در ناحیه اتصال به عنوان کلیدهای برشی چشمه اتصال، جهت انتقال برش از تیر به ستون طراحی گردید که به اختصار E-FBP نامیده می شود. این صفحات، ضخامتی برابر FBPs و ارتفاعی برابر ۸۰ میلی متر دارند.

در مدل هفتم، به منظور بهبود عملکرد مدل ششم، صفحاتی فولادی به ضخامت ۸ میلی متر و ارتفاع ۸۰ میلی متر و طولی برابر عرض ستون یعنی ۴۰۰ میلی متر در راستای جان تیر به بال تیر فولادی و همچنین به صفحات محصورکننده، E-FBP ها جوش داده شد. مدل هشتم نیز مانند مدل قبل برگرفته از مدل ششم می باشد، با این تفاوت که برای مهار نمودن صفحات محصورکننده فولادی، E-FBP ها از سخت کننده، یا لچکی به عنوان پشت بند استفاده گردید. لچکی طراحی شده در این مدل قاعده ای برابر ۱۰۰ میلی متر، ارتفاعی برابر ۸۰ میلی متر و ضخامتی برابر ۱۵ میلی متر دارد که به بال تیر و E-FBP ها، جوش داده شده است. شکل (۱۱) جزئیات این اتصالات را نشان می دهد.

جدول (۵): مشخصات اتصالات مدل سازی شده.

مشخصات	نمونه ها
Steel Beam, Steel Band Plate (SBP), Four L-shaped ties, Face Bearing Plates (FBP), Steel Doubler Plate, Column bars	۱
Steel Beam, Steel Band Plate (SBP), Four L-shaped ties, Wide Face Bearing Plates (WFBP), Steel Doubler Plate, Additional Bearing Plate (ABP), Column bars	۲
Steel Beam, Four L-shaped ties, Face Bearing Plates (FBP), Steel Doubler Plate, Column bars	۳
Steel Beam, Four L-shaped ties, Wide Face Bearing Plates (WFBP), Steel Doubler Plate, Additional Bearing Plate (ABP), Column bars	۴
Steel Beam, Four L-shaped ties, Face Bearing Plates (FBP), Steel Doubler Plate, Shear lug, Column bars	۵
Steel Beam, Four L-shaped ties, Extended Face Bearing Plates (EFBP), Steel Doubler Plate, Column bars	۶
Steel Beam, Four L-shaped ties, Extended Face Bearing Plates (EFBP + Stiffener), Steel Doubler Plate, Column bars	۷
Steel Beam, Four L-shaped ties, Extended Face Bearing Plates (EFBP + Rip), Steel Doubler Plate, Column bars	۸



شکل (۱۱): اشکال اتصالات RCS مدل سازی شده.

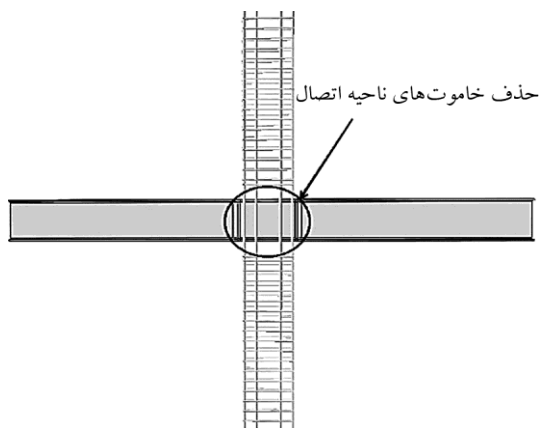
۴-۱- مقایسه نمودارهای نیرو - تغییر مکان اتصالات

مدل سازی شده با بتن معمولی

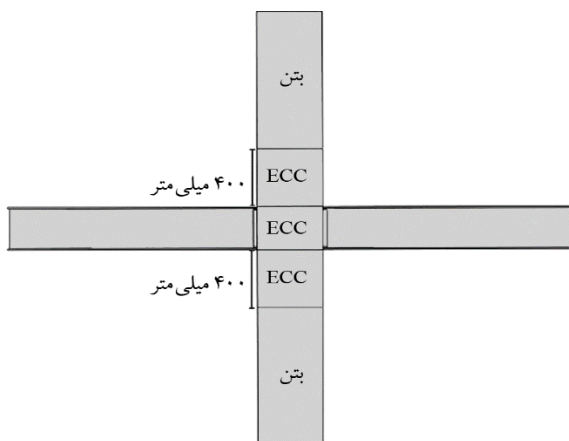
با مقایسه نمودار نیرو- تغییر مکان اتصالات مدل سازی شده (شکل ۱۲)، می توان به این نتیجه رسید که مدل های اول و دوم که در جزئیات اتصالشان از SBP استفاده شده بود، با محصور نمودن بیشتر بتن در این ناحیه به عنوان کلیدهای برشی چشمه اتصال جهت انتقال برش از تیر به ستون عمل کرده در نتیجه بهترین عملکرد را دارند. باید خاطر نشان شد که مدل دوم علاوه بر SBP از WFBP و ABP نیز بهره می برد. همچنین مدل

چهارم بدون SBP و به سبب وجود WFBP و ABP موجب محصور شدن بیشتر بتن در ناحیه اتصال شده و با گسترش پهنای پانل بتن داخلی، مقاومت برشی اتصال را افزایش داده است، لذا توانسته عملکردی در حد نمونه اول داشته باشد. صفحات فولادی که در مدل ششم در راستای FBPs به بال تیر جوش داده شد (E-FBP)، به تنهایی کارایی ندارد ولی با مهار نمودن این صفحات در مدل های هفتم و هشتم عملکرد اتصال ارتقاء می یابد. همچنین برشگیرهای طراحی شده در مدل پنجم عملاً کارایی نداشته و عملکرد ضعیفی، مشابه مدل سوم دارد.

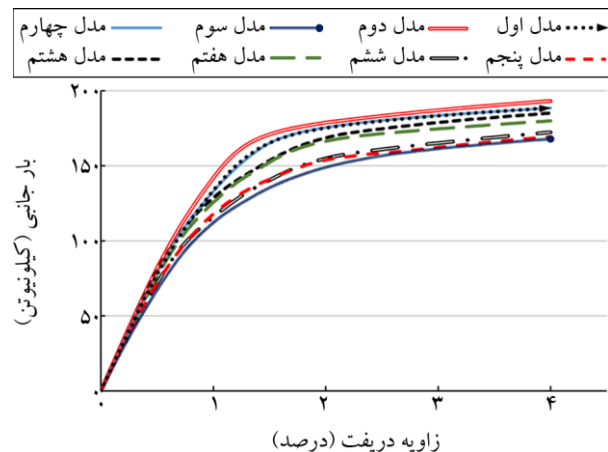
برای بتن معمولی می‌باشد. همچنین کارایی این ماده در مناطقی که بتن در تعامل با فولاد است، توسط محققان به اثبات رسیده؛ در راستای این هدف، در دو بخش به بررسی عملکرد ECC در اتصالات RCS پرداخته شد. در بخش اول ECC جایگزین بتن معمولی در کل ستون گردید و در بخش دوم جهت ساده‌تر شدن اجرای این اتصالات، در تمامی مدل‌ها چهار خاموتی که در ناحیه اتصال از جان تیر فولادی عبور می‌نمود، حذف گردید (شکل ۱۴). همچنین به جای استفاده از ECC در کل ستون، فقط در بخشی از ستون، از ECC استفاده شد (ناحیه اتصال + ارتفاعی برابر با عرض ستون در بالا و پایین ناحیه اتصال) (شکل ۱۵) تا علاوه بر بهبود عملکرد لرزه‌ای، از نظر اجرایی، ساده‌تر و از لحاظ هزینه، اقتصادی‌تر گردد. لازم به ذکر است که تمامی اتصالات با همان جزئیات و شرایطی که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، بارگذاری و مورد تحلیل قرار گرفت.



شکل (۱۴): حذف خاموت‌های ناحیه اتصال.

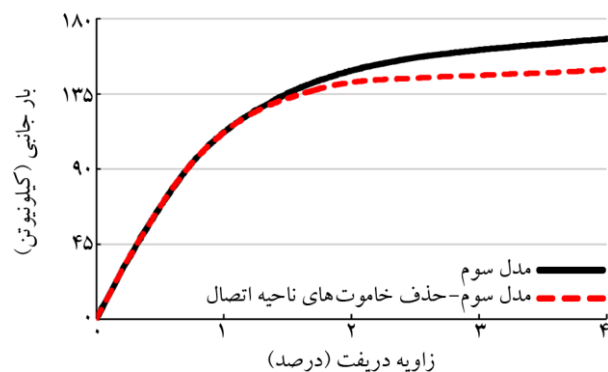


شکل (۱۵): ECC در بخشی از ستون.



شکل (۱۲): مقایسه کلی نمودارهای نیرو- تغییر مکان اتصالات مدل‌سازی شده-کل ستون بتن معمولی.

آرما توره‌های عرضی موجود در ناحیه اتصال که از جان تیر عبور داده شده‌اند، با محبوس نمودن بتن ناحیه اتصال نقش مهمی در تحمل نیروهای برشی و شکل‌پذیری اتصال دارند. به‌عنوان مثال: حذف چهار خاموت ناحیه اتصال در مدل سوم سبب کاهش ۱۲ درصدی مقاومت در تغییر مکان نسبی ۴ درصد را موجب گردید (شکل ۱۳). با مقایسه صورت گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد این اتصالات با محصور شدن بتن در ناحیه اتصال رابطه مستقیمی دارد.



شکل (۱۳): بررسی عملکرد خاموت‌های ناحیه اتصال در مدل سوم (بتن معمولی).

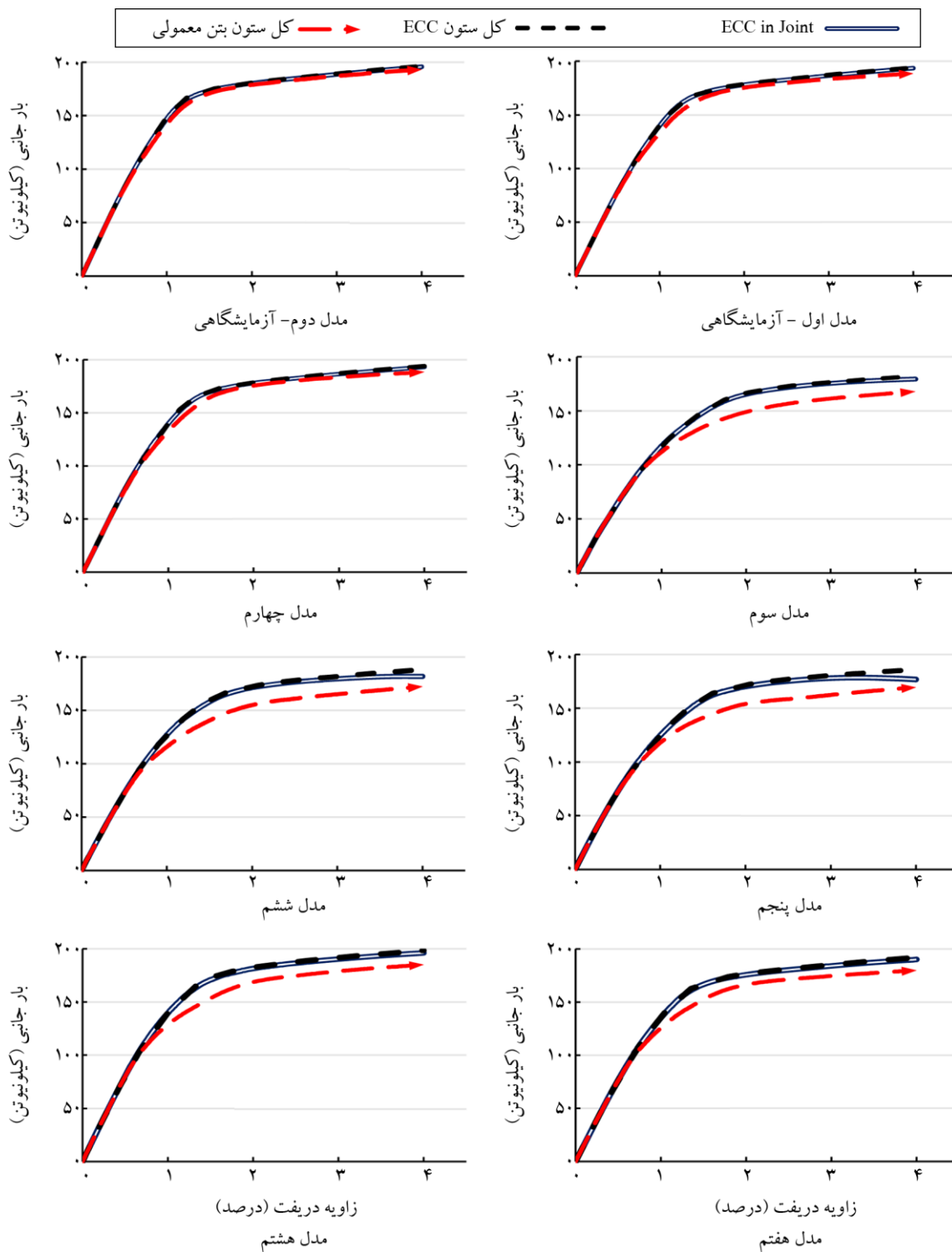
۵- مدل‌سازی اتصالات با بتن ECC

در قسمت‌های قبل، بتنی توانمند با انعطاف‌پذیری بالا به نام کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی یا ECC معرفی شد. با توجه به خواص کششی بالای این ماده و بهبود بخشیدن به شکست ترد بتن از طریق ایجاد میکروترک‌های متعدد، جایگزین مناسبی

۵-۱- عملکرد ECC بر رفتار نمودارهای نیرو - تغییر مکان اتصالات مدل سازی شده

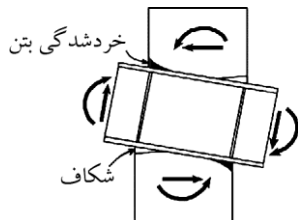
اتصال و استفاده از ECC در قسمت محدودی از ستون، تأثیری بر عملکرد این اتصالات نداشته، زیرا SBP، ABP و... اتصال را به حداکثر ظرفیت خود رسانده و عملاً ECC در این مدل‌ها کارایی ندارد. ولی ECC تأثیر خود را بر عملکرد اتصالات سوم، پنجم و

با بررسی نمودارهای نیرو- تغییر مکان مدل‌های اول، دوم و چهارم (شکل ۱۶)، مشاهده می‌شود که حذف چهار خاموت ناحیه



شکل (۱۶): عملکرد ECC بر رفتار نمودارهای نیرو- تغییر مکان اتصالات مدل سازی شده.

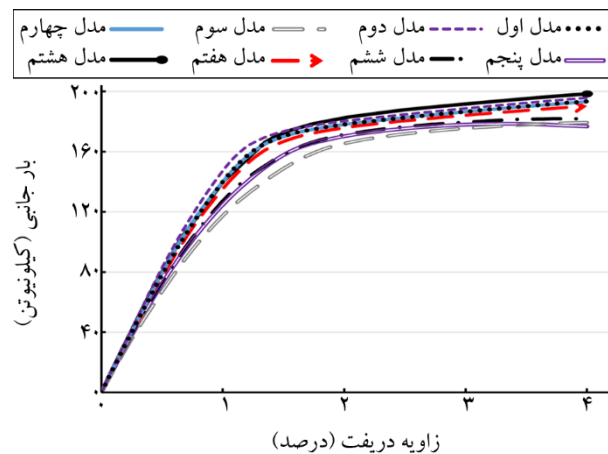
مکانیزم این نوع شکست به صورت شماتیک نشان داده شده است. لذا این مکانیزم خرابی، در تمامی مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۹).



شکل (۱۸): مکانیزم شکست اتکایی [۲].

همان‌طور که از مکانیزم شکست اتکایی مدل‌های اول، دوم و چهارم مشخص است، این اتصالات به سبب وجود SBP، ABPs و WFBP با بتن معمولی عملکرد مناسبی در مهار این نوع از شکست به نمایش گذاشته‌اند، لذا ECC تأثیر چندانی بر ساختار شکست اتکایی این اتصالات ندارد، اگرچه نواحی خردشدگی بتن محدودتر شده است. مدل‌های سوم، پنجم و هشتم با بتن معمولی عملکرد ضعیفی دارند زیرا بخش وسیعی از بتن مجاور بال تیر خرد شده و شکاف‌های عمیقی بین تیر فولادی و ستون بتنی ایجاد گردیده، ولی با جایگزین نمودن ECC به جای بتن معمولی در گره اتصال، نواحی خردشدگی بتن به‌طور قابل ملاحظه‌ای محدودتر شده است. در مدل‌های هفتم و هشتم نیز ECC با محدود نمودن نواحی خردشدگی بتن در محل اتکای تیر فولادی به ستون بتنی، سبب بهبود رفتار شکست اتکایی این اتصالات شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد ECC بر مکانیزم شکست اتکایی مدل‌های هفتم و هشتم، مقایسه‌ای بین این دو مدل صورت گرفت، بدین طریق که مطابق شکل (۲۰) یک المان از نواحی خرد شده بتن از ستون این دو مدل به نحوی انتخاب شد که موقعیت مکانی تقریباً یکسانی داشته باشند، سپس نمودار شکست بتن بر حسب تغییر مکان نسبی برای حالتی که کل ستون بتن معمولی باشد و حالتی که از ECC در بخشی از ستون استفاده شود ترسیم شد (شکل ۲۱). با مقایسه صورت گرفته کاملاً مشهود است که ECC نقش به‌سزایی در محدود نمودن نواحی خردشدگی بتن داشته و از این حیث سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات RCS گردیده است.

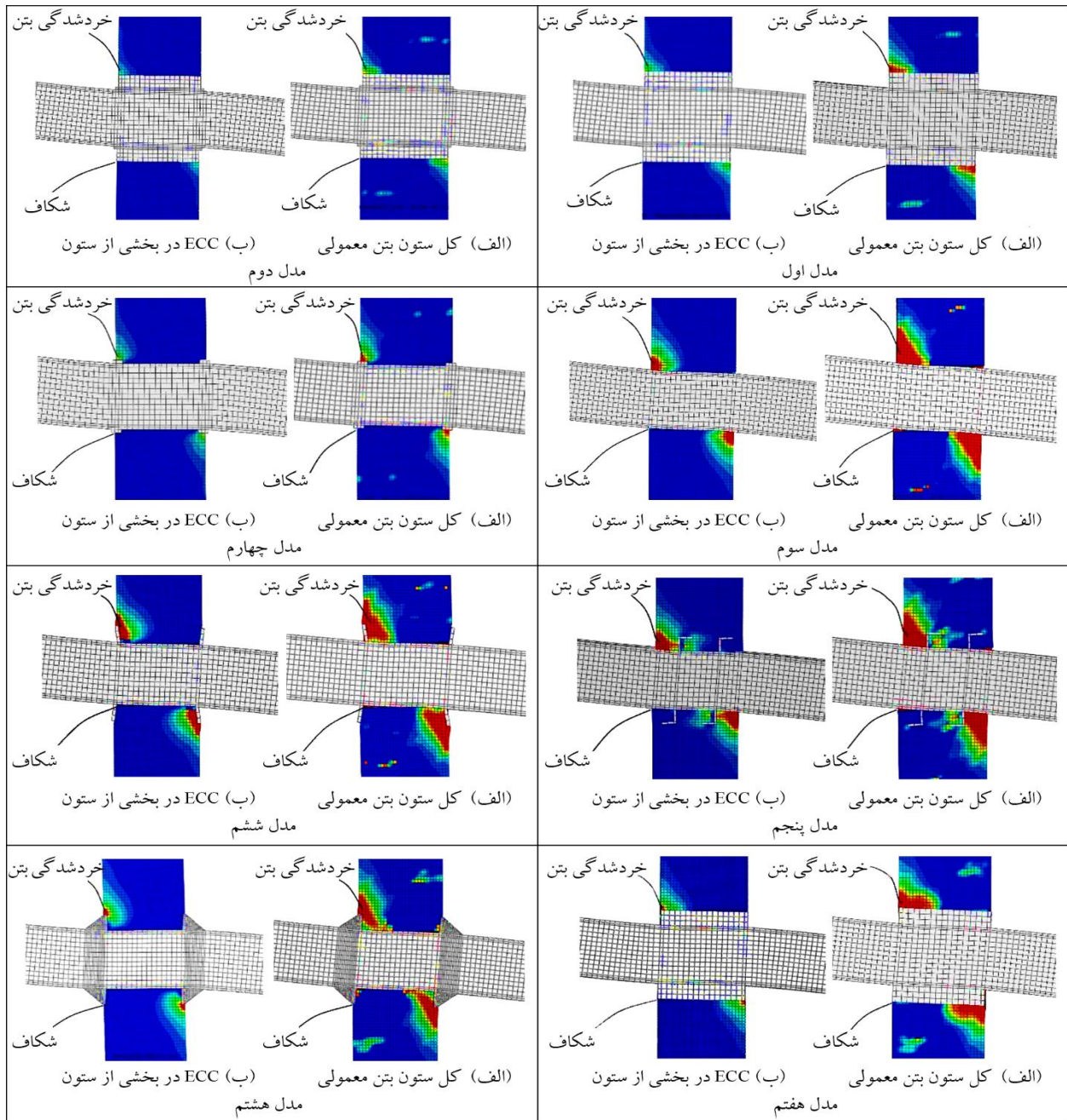
ششم گذاشته و توانسته علاوه بر شکل‌پذیری، باربری اتصالات را نیز افزایش دهد. در نمودارهای نیرو-تغییر مکان این مدل‌ها کمی افت در زاویه دررفت بین ۳ الی ۴ درصد مشاهده می‌شود که ناشی از حذف چهار خاموت ناحیه اتصال می‌باشد که در ادامه به نقش این خاموت‌ها در عملکرد اتصالات پرداخته می‌شود. ECC در مدل‌های هفتم و هشتم تأثیر نسبتاً مثبت و مشابهی بر عملکرد این اتصالات داشته و همچنین افت قابل ملاحظه‌ای به علت حذف خاموت‌های ناحیه اتصال در نمودار نیرو-تغییر مکان این مدل‌ها مشاهده نمی‌شود. با یک مقایسه کلی بین نمودارهای نیرو-تغییر مکان کلیه اتصالات مدل‌سازی شده با بتن ECC (شکل ۱۷) می‌توان گفت که نمونه هشتم در میان تمامی مدل‌های ECC دار، عملکردی مناسب و در حد مدل‌های SBP دار را از خود به نمایش گذاشته است.



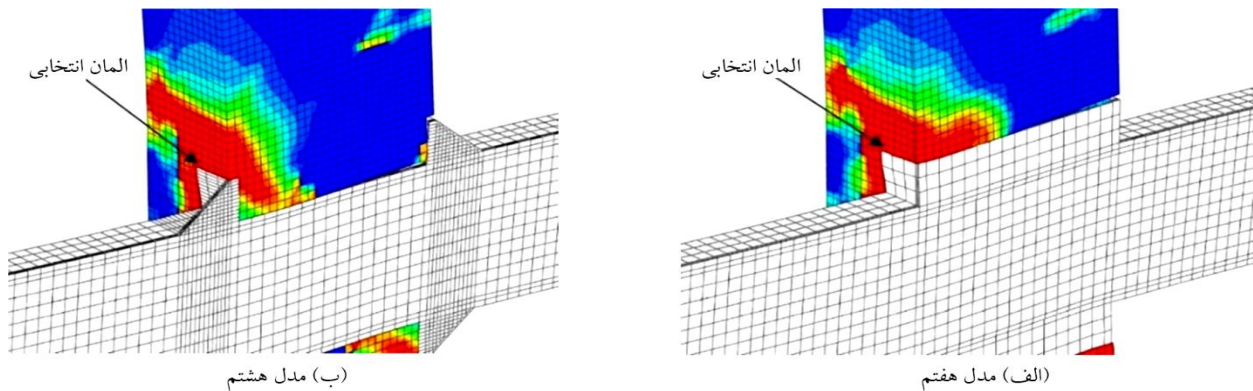
شکل (۱۷): مقایسه کلی نمودارهای نیرو-تغییر مکان اتصالات مدل‌سازی شده-ECC در ناحیه اتصال.

۵-۲- عملکرد ECC بر رفتار شکست اتکایی اتصالات مدل‌سازی شده

همان‌طور که در ابتدای مقاله نیز اشاره شد، یکی از مودهای خرابی در این نوع اتصالات، شکست اتکایی می‌باشد. این نوع شکست هنگامی رخ می‌دهد که بتن ستون در ناحیه اتکای تیر فولادی به ستون بتنی به دلیل تنش‌های بسیار بالای به وجود آمده، خرد شده و از بین می‌رود و سبب چرخش صلب تیر درون اتصال می‌گردد. به‌طور کلی این نوع شکست به دلیل وابستگی به بتن، ماهیتی ترد دارد که در شکل (۱۸)

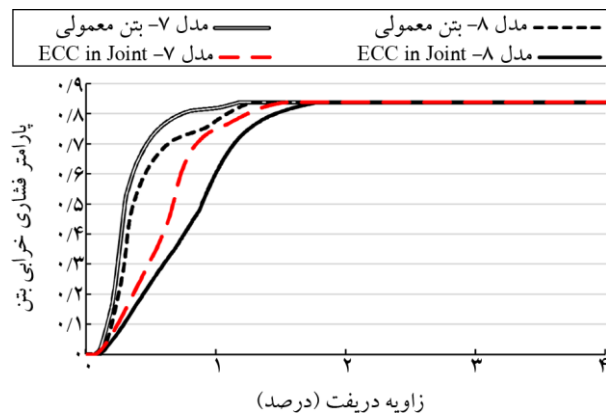


شکل (۱۹): عملکرد ECC بر رفتار شکست اتکایی اتصالات مدل‌سازی شده.



شکل (۲۰): المان انتخابی جهت رسم نمودار شکست بتن.

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، ECC در مدل‌های اول و دوم تأثیر چندانی بر عملکرد تیر فولادی نداشت. ولی در سایر نمونه‌ها سبب افزایش قابل توجه ناحیه غیرخطی بال تیر گردید و از این نظر سبب بهبود عملکرد اتصال شد. در این میان مدل هشتم که در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود با غیرخطی نمودن ۳۶ سانتی‌متر از بال تیر فولادی در مقایسه با سایر مدل‌ها بهترین عملکرد را از خود به نمایش گذاشته است و توانسته به نحوی مناسب، تنش‌های وارد شده به چشمه اتصال را به خارج از این ناحیه هدایت کند.



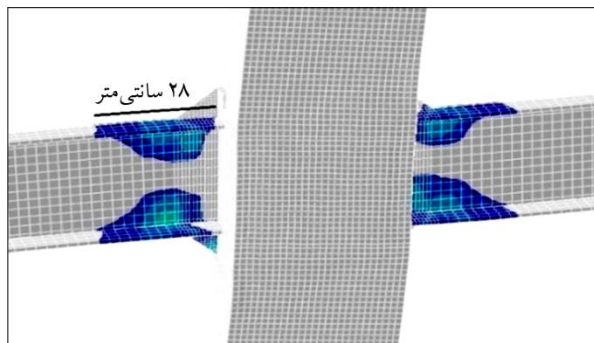
شکل (۲۱): مقایسه عملکرد ECC بر رفتار شکست اتکایی مدل‌های هفتم و هشتم.

۵-۳- عملکرد ECC بر رفتار تیر فولادی در اتصالات مدل‌سازی شده

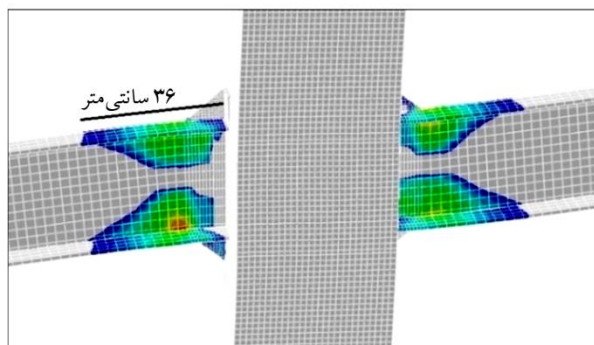
به منظور بررسی عملکرد ECC بر رفتار غیرخطی تیر فولادی، در تمامی مدل‌ها نقاطی از تیر که تنش‌های بزرگ‌تر از $F_y = 368$ مگاپاسکال دارند، مشخص شد؛ سپس میزان غیرخطی شدن بال تیر از بر ستون اندازه‌گیری و با مدل‌هایی که ستون آنها از جنس بتن معمولی بود، مقایسه شد. جدول (۶) میزان غیرخطی شدن بال تیر فولادی از بر ستون در تغییر مکان نسبی ۴ درصد را در سه حالت کل ستون بتن معمولی، کل ستون ECC و در حالتی که از ECC در بخشی از ستون استفاده شد و خاموت‌های ناحیه اتصال نیز حذف گردید را نشان می‌دهد.

جدول (۶): میزان غیرخطی شدن بال تیر فولادی از بر ستون در تغییر مکان نسبی ۴ درصد.

میزان غیرخطی شدن بال تیر از بر ستون - (کل ستون بتن معمولی) (سانتی‌متر)	میزان غیرخطی شدن بال تیر از بر ستون - ECC در بخشی از ستون) (سانتی‌متر)	میزان غیرخطی شدن بال تیر از بر ستون - (کل ستون ECC) (سانتی‌متر)	میزان غیرخطی شدن بال تیر از بر ستون - (کل ستون بتن معمولی) (سانتی‌متر)
۳۱	۳۳	۳۵	مدل ۱
۳۴	۳۵	۳۵	مدل ۲
۱۷	۲۶	۲۹	مدل ۳
۳۰	۳۴	۳۵	مدل ۴
۱۷	۲۳	۳۰	مدل ۵
۲۰	۲۷	۳۰	مدل ۶
۲۵	۳۲	۳۲	مدل ۷
۲۸	۳۶	۳۷	مدل ۸



(الف) کل ستون بتن معمولی



(ب) ECC در بخشی از ستون

شکل (۲۲): رفتار تیر فولادی مدل هشتم.

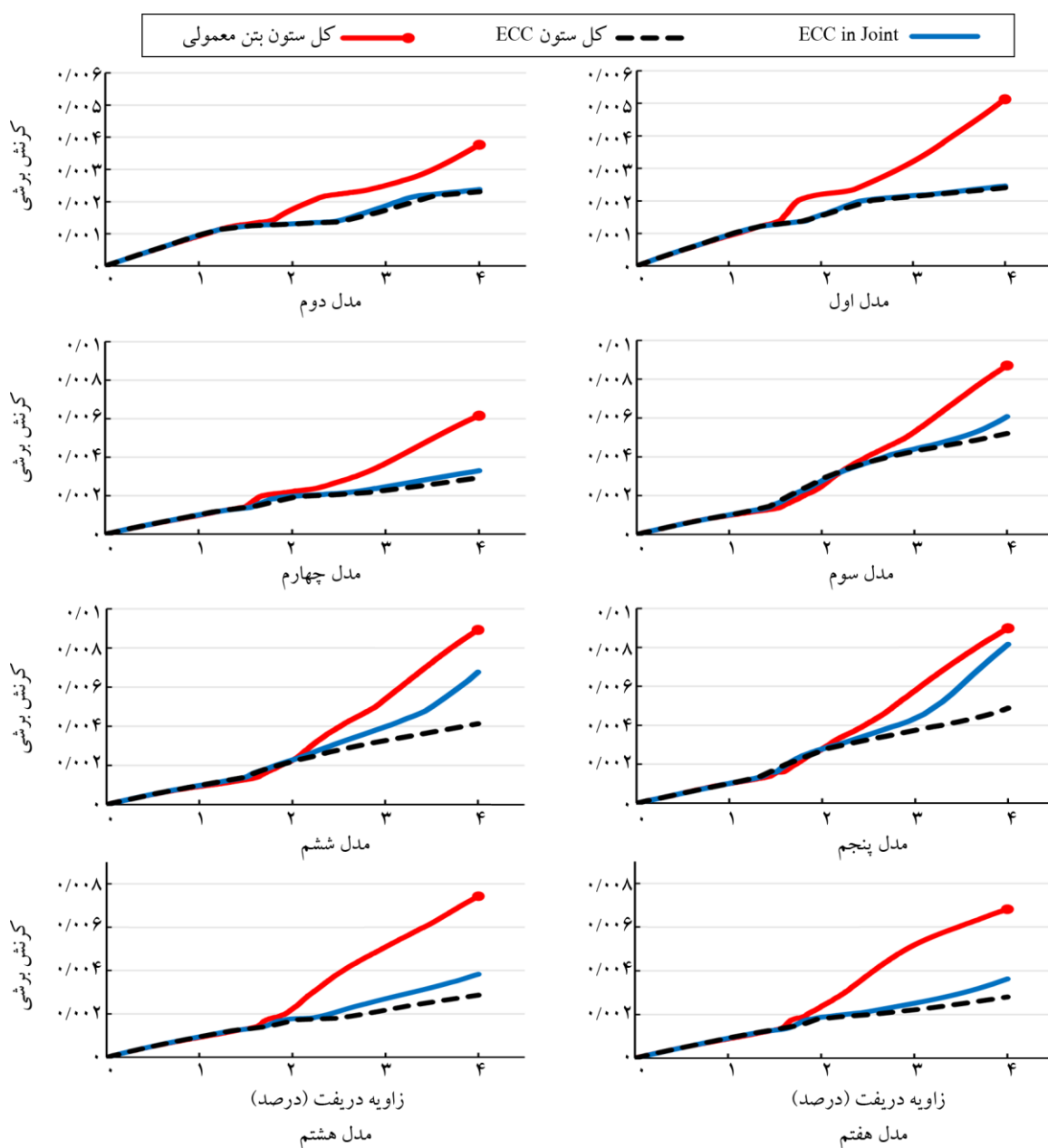
۵-۴- عملکرد ECC بر کرنش ایجاد شده در اتصالات مدل‌سازی شده

۴-۱- وضعیت کرنش برشی در مرکز جان تیر فولادی

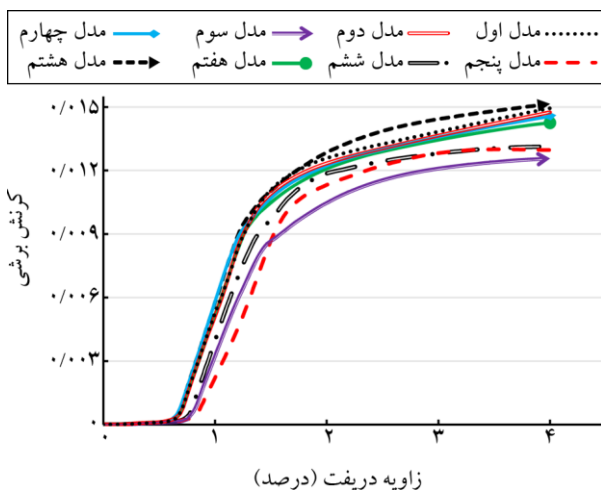
جهت بررسی وضعیت کرنش در داخل ناحیه اتصال، با انتخاب یک المان در مرکز جان تیر فولادی و ترسیم نمودار ماکزیمم کرنش برشی بر حسب تغییر مکان نسبی، در سه حالت کل ستون بتن معمولی، کل ستون ECC و حالتی که از ECC در چشمه اتصال

کرده و از تمرکز تنش در ناحیه اتصال جلوگیری نموده‌اند، در نتیجه کرنش کمتری در جان تیر ایجاد شده است. مدل‌های سوم، پنجم و ششم عملکرد تقریباً یکسان و ضعیفی دارند، همان‌طور که نمودارهای نیرو- جابه‌جایی این سه مدل نیز مشابه یکدیگر بود. با جایگزین نمودن ECC به جای بتن معمولی در اتصالات کرنش برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در داخل ناحیه اتصال کاهش یافت. با حذف خاموت‌های ناحیه اتصال و استفاده از ECC فقط در بخش محدودی از ستون، تغییری در عملکرد

استفاده شود و خاموت‌های ناحیه اتصال نیز حذف گردد، مطابق نمودارهای زیر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (شکل ۲۳). با توجه به نمودارهای شکل (۲۳) مشاهده می‌شود که تمامی اتصالات با بتن معمولی تا تغییر مکان نسبی ۱/۵ درصد وضعیت یکسانی دارند؛ ولی بعد از این تغییر مکان، به ترتیب در مدل‌های دوم، اول و چهارم کمترین کرنش برشی در جان تیر ایجاد گردیده که نشان از عملکرد مناسب این اتصالات دارد. ABP، WFBP و SBP در این مدل‌ها به‌عنوان کلید برشی عمل



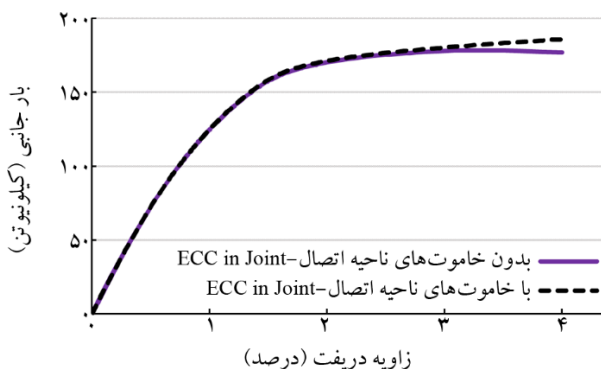
شکل (۲۳): عملکرد ECC بر کرنش برشی ایجاد شده در مرکز جان تیر فولادی.



شکل (۲۵): کرنش برشی در مرز بین بتن و ECC.

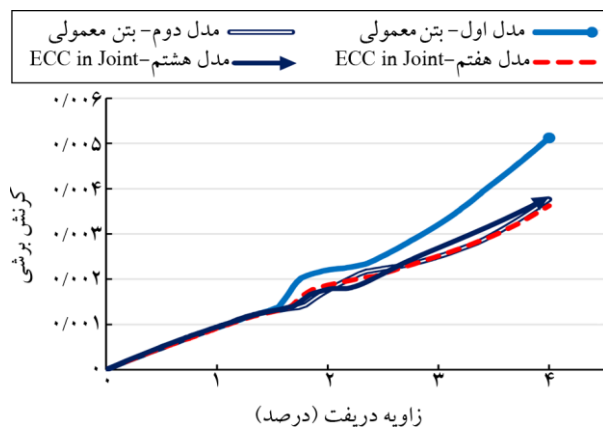
استفاده از ECC در بخش محدودی از ستون، افتی بین تغییر مکان نسبی ۳ الی ۴ درصد در نمودارهای نیرو-جابجایی این مدل‌ها رخ داد. لذا جهت بررسی این موضوع و یافتن علت آن، به‌عنوان نمونه، مدل پنجم با این شرایط که از ECC فقط در گره اتصال استفاده شود و خاموت‌های ناحیه اتصال حذف نگردد، تحلیل و نتایج با شرایطی که خاموت‌های ناحیه اتصال حذف شده بود مقایسه شد که نتایج به شرح زیر می‌باشد.

چنان که در نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی مدل پنجم شکل (۲۶) مشاهده می‌شود با اضافه نمودن چهار خاموت ناحیه اتصال افت ایجاد شده برطرف گردید. همچنین حدود ۲۹ سانتی‌متر از بال تیر فولادی وارد ناحیه غیرخطی شد، درحالی‌که با شرایط مشابه ولی بدون این خاموت‌ها حدود ۲۳ سانتی‌متر از بال تیر وارد ناحیه غیرخطی شده بود (شکل ۲۷)، حتی خاموت‌های ناحیه



شکل (۲۶): عملکرد خاموت‌های ناحیه اتصال بر پاسخ نیرو-تغییر مکان مدل پنجم.

برشی مدل‌های اول، دوم و چهارم حاصل نشد، ولی در مدل‌های سوم، پنجم و ششم کرنش برشی ایجاد شده در جان تیر فولادی در داخل ناحیه اتصال افزایش یافت که ناشی از حذف خاموت‌ها در چشمه اتصال می‌باشد. در این میان رفتار مدل‌های هفتم و هشتم با بتن ECC قابل توجه است، زیرا با وجود حذف خاموت‌های ناحیه اتصال کرنش برشی در این اتصالات از ۰/۰۰۴ فراتر نرفته و عملکردی در حد مدل‌های اول و دوم با بتن معمولی به جای گذاشته‌اند. در شکل (۲۴) به مقایسه عملکرد برشی این دو اتصال پرداخته شده است.



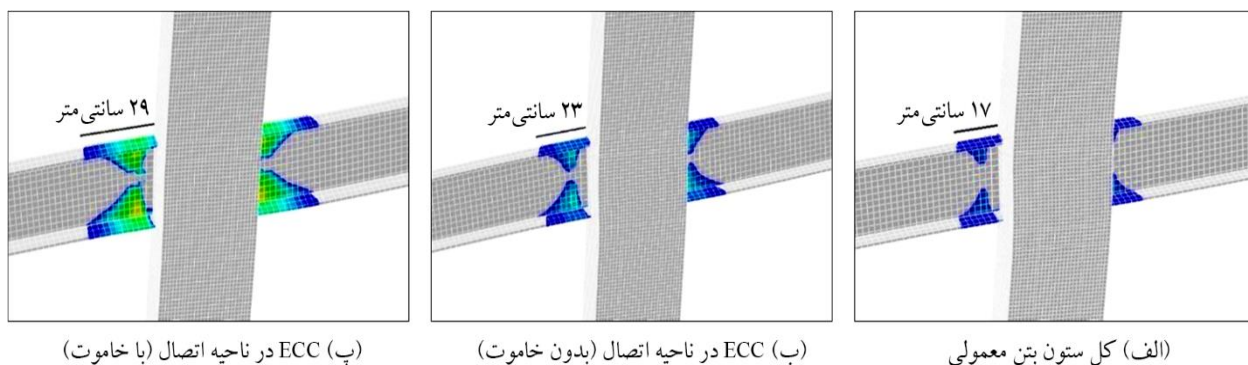
شکل (۲۴): بررسی وضعیت کرنش برشی در مدل‌های هفتم و هشتم.

۵-۴-۲- وضعیت کرنش برشی در مرز بین بتن و ECC

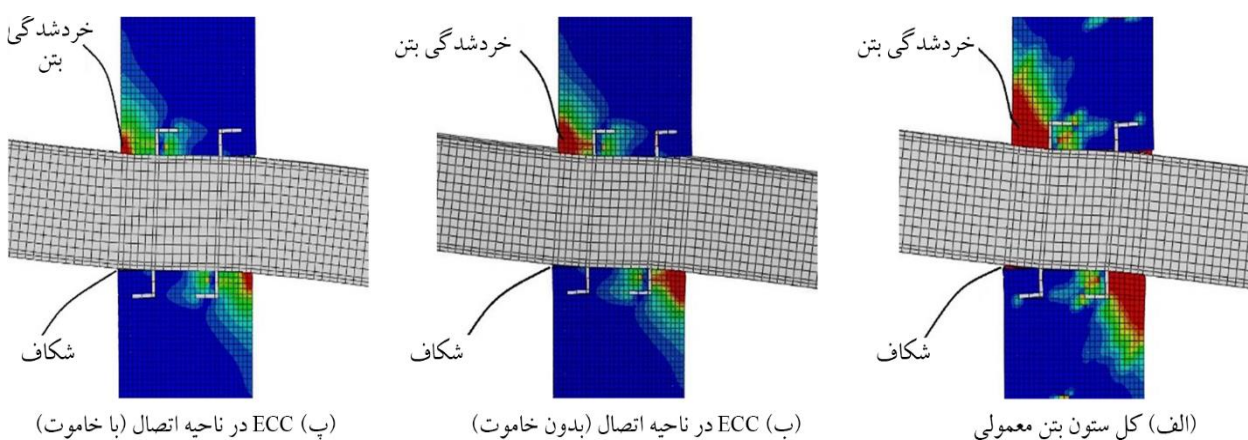
به‌منظور بررسی وضعیت کرنش در خارج از ناحیه اتصال، نمودار ماکزیمم کرنش برشی بر حسب تغییر مکان در مرز بین بتن و ECC، برای تمامی مدل‌ها ترسیم گردید. در شکل (۲۵) مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش برشی در مدل هشتم رخ داده و مدل‌های اول و دوم هم وضعیت تقریباً مشابهی دارند. عملکرد اتصالات در این نمودار تا حدودی با نتایج حاصل از نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی مطابقت دارد و بیانگر رفتار کلی اتصالات می‌باشد.

۵-۵- تأثیر خاموت‌های ناحیه اتصال بر عملکرد اتصالات مدل‌سازی شده

ECC در اکثر مدل‌ها سبب ارتقاء عملکرد اتصالات گردید؛ ولی همان‌طور که در نمودارهای نیرو-تغییر مکان مدل‌های سوم، پنجم و ششم مشاهده شد، با حذف خاموت‌های ناحیه اتصال و



شکل (۲۷): عملکرد خاموت‌های ناحیه اتصال بر رفتار تیر فولادی مدل پنجم.

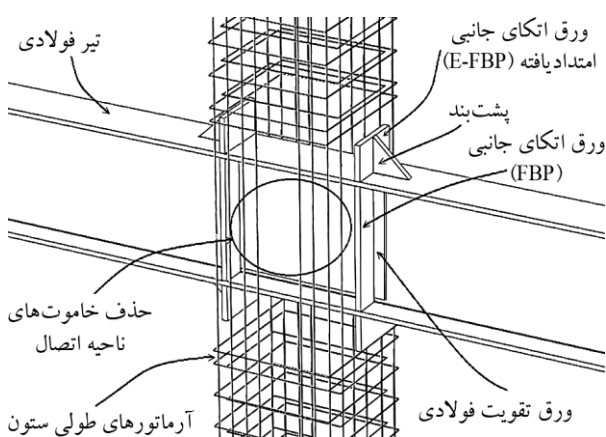


شکل (۲۸): عملکرد خاموت‌های ناحیه اتصال بر مکانیزم شکست اتکایی مدل پنجم.

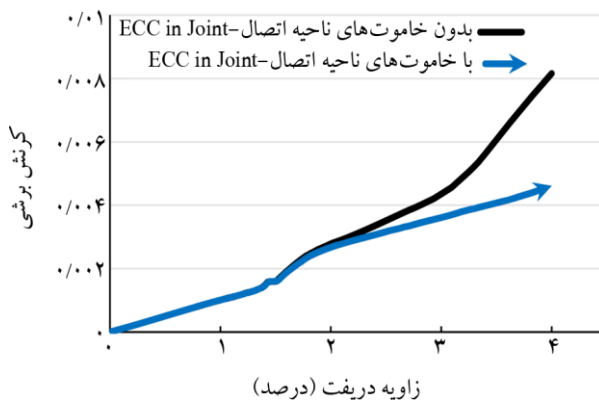
۶- معرفی اتصال RCS پیشنهادی با بتن ECC

از تحلیل مدل‌ها و مقایسه‌های صورت گرفته، مشاهده شد که ECC در اکثر مدل‌ها سبب بهبود عملکرد اتصالات RCS می‌گردد؛ ولی در این میان مدل هشتم (شکل ۳۰)، در قیاس با سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد. مدل هشتم به‌واسطه ECC و

ناحیه اتصال بر مکانیزم شکست اتکایی این مدل تأثیر گذار بوده و نواحی خردشدگی بتن را محدودتر نموده است (شکل ۲۸). همچنین با اضافه نمودن خاموت‌های ناحیه اتصال کرنش برشی ایجاد شده در جان تیر فولادی در داخل ناحیه اتصال نیز کاهش یافته است (شکل ۲۹).



شکل (۳۰): جزئیات مدل هشتم یا (مدل پیشنهادی).



شکل (۲۹): عملکرد خاموت‌های ناحیه اتصال بر کرنش برشی ایجاد شده در جان تیر مدل پنجم.

اتصالات گردید. به‌عنوان مثال، مدل سوم که در میان نمونه‌ها ساده‌ترین مدل از نظر جزئیات اتصال محسوب می‌شد و با بتن معمولی عملکرد ضعیفی داشت به‌واسطه استفاده از ECC در ناحیه اتصال و همچنین بدون خاموت‌های این قسمت، مقاومت اتصال ۲۲ درصد افزایش یافت.

۲. ECC نقش به‌سزایی در محدود نمودن نواحی خردشدگی بتن، ناشی از اتکای تیر فولادی به ستون بتنی داشته و از این حیث سبب بهبود مکانیزم شکست اتکایی در اتصالات RCS گردید.

۳. ECC با عملکرد مناسب در اتصالات سبب شد تا محدوده بیشتری از تیر فولادی وارد ناحیه غیرخطی گردد. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، ECC در مدل‌های اول و دوم تأثیر چندانی بر عملکرد تیر نداشت، ولی در سایر نمونه‌ها به‌طور متوسط سبب افزایش ۳۰ درصدی محدوده غیرخطی بال تیر فولادی گردید.

۴. ECC سبب کاهش کرنش برشی ایجاد شده در جان تیر فولادی، در داخل ناحیه اتصال شد. به‌عنوان مثال این مقدار کاهش در مدل هشتم در تغییر مکان نسبی ۴ درصد حدود ۴۸ درصد محاسبه شد.

۵. حذف خاموت‌های ناحیه اتصال در مدل‌های ECC دار، تأثیر چندانی بر عملکرد اتصالات نداشت، فقط در نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی مدل‌های سوم و پنجم کمی افت در تغییر مکان نسبی ۳ الی ۴ درصد رخ داد که این افت در مدل سوم نسبت به حالت ECC داری که خاموت‌های ناحیه اتصال حذف نگردیده بود، حدود ۱/۷ درصد محاسبه شد. درحالی‌که با حذف این خاموت‌ها در نمونه بتنی همین مدل، افتی ۱۲ درصدی مشاهده شد. همچنین با حذف خاموت‌های چشمه اتصال محدوده غیرخطی بال تیر فولادی در مدل‌های سوم، پنجم و ششم کمی کاهش یافت؛ ولی در سایر مدل‌ها، حذف این خاموت‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد تیر فولادی نداشت. قابل ذکر است که با حذف خاموت‌های چشمه اتصال، در مدل‌های پنجم و ششم کرنش برشی ایجاد شده در جان تیر فولادی در داخل ناحیه اتصال نیز کاهش یافت.

بدون خاموت‌های ناحیه اتصال و جزئیاتی ساده‌تر توانسته عملکردی در حد نوع متداول این اتصالات (مدل اول) که از SBP به‌عنوان محصورکننده ناحیه اتصال بهره می‌برد به نمایش بگذارد. لذا مدل هشتم می‌تواند یک مدل پیشنهادی اولیه با بتن ECC باشد که علاوه بر افزایش ظرفیت این اتصالات، رفتار بسیار پایدارتر و مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، هشت مدل مختلف از اتصالات تیر فولادی، ستون بتنی (RCS) از نوع تیر میان‌گذر در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. با ارزیابی عملکرد مدل‌ها با بتن معمولی در قالب پاسخ نیرو-تغییر مکان، نتایج زیر قابل ذکر است:

- عملکرد اتصالات با محصورشدگی بتن ناحیه اتصال رابطه مستقیم دارد. آرماتورهای عرضی موجود در این محدوده که از جان تیر عبور داده شده‌اند، با محبوس نمودن بتن در چشمه اتصال نقش مهمی در تحمل نیروهای برشی و شکل‌پذیری اتصال دارند. اتصالاتی که شامل جزئیاتی مانند ABP، WFBP و SBP بودند، بهترین عملکرد را از خود به نمایش گذاشتند. حتی حذف خاموت‌ها در ناحیه اتصال تأثیر چندانی بر عملکرد این اتصالات نداشت؛ ولی حذف این چهار خاموت در نمونه‌ای مانند مدل سوم که فاقد جزئیات خاص در ناحیه اتصال بود، کاهش ۱۲ درصدی مقاومت در تغییر مکان نسبی ۴ درصد را موجب گردید.

با بررسی عملکرد اتصالات، هنگامی که ECC جایگزین بتن معمولی ستون گردید و همچنین در حالتی که ECC تنها در بخشی از ستون (ناحیه اتصال + ارتفاعی برابر عرض ستون در بالا و پایین ناحیه اتصال) جایگزین بتن معمولی شد و خاموت‌های این ناحیه نیز حذف شد، نتایج زیر قابل ذکر است:

۱. ECC در مدل‌هایی که با بتن معمولی بهترین عملکرد را داشتند تأثیری چندانی نداشت، یعنی مدل‌های اول، دوم و چهارم که در ناحیه اتصالشان از جزئیاتی همچون ABP، WFBP و SBP بهره می‌بردند. ولی ECC در سایر مدل‌ها سبب بهبود رفتار لرزه‌ای

5. Kanno, R. (1993) *Strength, Deformation, and Seismic Resistance of Joints between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns*. Ph.D. Thesis, Cornell University Ithaca, N.Y.
6. Izaki, Y., Yamanouchi, H., Nishiyama, I., and Fukuchi, Y. (1988) Seismic behavior of grider-to-column connection developed for an advanced mixed structure system. *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-kyoto, Japan.
7. Parra-Montesinos, G. and Wight, J.K. (2000) Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **126**(10), 1113-21.
8. Parra-Montesinos, G. and Wight, J.K. (2001) Modeling shear behavior of hybrid RCS beam-column connections. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **127**(1), 3-11.
9. Nishiyama, I., Kuramoto, H., and Noguchi, H. (2004) Guidelines: seismic design of composite reinforced concrete and steel buildings. *Journal of Structural Engineering*, **130**(2), 336-342.
10. Chen, C.H., Lai, W.C, Cordova, P., Deierlein, G.G., and Tsai, K.C. (2004) Pseudo-dynamic test of full-scale RCS frame: Part I – Design, Construction, and Testing. *Accepted in NCREC Workshop Proceedings*.
11. Cordova, P. and Deierlein, G.G. (2005) *Validation of the Seismic Performance of Composite RCS Framed: Full-Scale Testing, Analytical Modeling and Seismic Design*. Stanford University, Depart. of civil and environmental engineering, Report No.155.
12. Alizadeh, S., Attari, N.K.A., and Kazemi, M.T. (2013) The seismic performance of new detailing for RCS connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **91**, 76-88.
13. Mirghaderi, S.R., Eghbali, N.B., and Ahmadi, M.M. (2016) Momentconnection between continuous steel beams and reinforced concrete column under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, **118**, 105-119.
14. Mohamadi, Y. and Esfahani, M.R. (2020) Experimental investigation on the behavior of reinforced concrete columns to steel beams connections (RCS). *Amirkabir Journal of Civil and*

با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از ECC به جای بتن معمولی در گره اتصال، سبب افزایش ظرفیت اتصال و همچنین شکل پذیرتر شدن اتصالات RCS می گردد. همچنین استفاده از ECC در اتصالات RCS این امکان را می دهد که با جزئیات ساده تر و بدون نیاز به سوراخ کردن جان تیر و عبور خاموت های ناحیه اتصال بتوان به عملکرد لرزه ای مناسب و قابل قبولی رسید. با بررسی رفتار اتصالات مدل سازی شده با بتن ECC، می توان مدل هشتم را یک مدل پیشنهادی اولیه با بتن ECC دانست، زیرا علاوه بر ساده تر شدن جزئیات اتصال، عملکردی در حد مدل اول یا به عبارتی نوع مرسوم این اتصالات که از تسمه های فولادی دور ستون (SBP) بهره می برد را از خود نشان می دهد. به عبارتی با جایگزین نمودن ECC به جای بتن معمولی در اتصالات RCS، می توان محصورکننده های ناحیه اتصال که دارای جزئیاتی پیچیده و دشوار در اجرا می باشند را حذف نمود و سبب سهولت در اجرای این نوع از اتصالات گردید.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله قدردانی خود را از پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله بابت در اختیار گذاشتن اطلاعات برای این کار تحقیقاتی ابراز می دارند.

مراجع

1. Griffis, L.G. (1986) Some design considerations for composite-frame structures. *AISC Engineering Journal*, **23**(2), 59-64.
2. Sheikh, T.M., Deierlein, G.G., Yura, J.A., and Jirsa, J.O. (1989) Beam-column moment connections for composite frames: Part 1. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **115**(11), 2858-2876.
3. Sheikh, T.M., Deierlein, G.G., Yura, J.A., and Jirsa, J.O. (1989) Beam-column moment connections for composite frames: Part 2. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **115**(11), 2877-2896.
4. ASCE (1994) Task Committee on Design Criteria for composite structures in Steel and Concrete. Guidelines for design of joints between steel beam and reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **120**(8), 2330-2357.

25. Lothenbach, B., Scrivener, K., and Hooton, R.D. (2011) Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*, **41**, 1244-1256.
26. Nateghi-A., F., Ahmadi, M.H., and Dehghani, A. (2018) Experimental Study on Improved Engineered Cementitious Composite Using Local Material. *Materials Sciences and Applications*, **9**, 315-329.
27. Li, V.C., Wang, S., and Chynthia, W. (2001) Tensile Strain Hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Material Journal*, **98**(6), 483-492.
28. Li, V.C., Fischer, G., and Lepech, M.D. (2009) Shotcreting with ECC, *Proceedings of CD. Spritzbeton-Tagung*, Ed. W. Kusterle, Austria.
29. Martinie, L., Rossi, P., and Roussel, N. (2010) Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research*, **40**(2), 226-234.
30. Horikoshi T, Ogawa A, Saito T, et al. (2006) Properties of Polyvinylalcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites. In: Fischer G and Li VC (eds) International RILEM workshop on HPRCC in structural applications. Paris, France: RILEM Publications SARL, 145-153.
31. Dassault Systemes Simulia Corp. (2014) *ABAQUS User's Manual*, Version 6.14. Providence, USA.
32. Alizadeh, S., Attari, N.K.A., and Kazemi, M.T. (2015) Experimental investigation of RCS connections performance using self-consolidated concrete. *Journal of Constructional Steel Research*, **114**, 204-216.
33. AISC (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-10)*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Engineering, **52**(3), 45-57 (in Persian).
15. Li, V.C. and Qian, Sh. (2005) Suppression of fracture failure at steel/concrete interaction zones by material ductility in ECC. *Proceeding of CONMAT-5*, Vancouver, B.C.
16. American Concrete Institute (ACI) (1998) *State of The Art Report on the Fiber Reinforced Concrete, Manual of Concrete Practice, (ACI-544. 2R-89 / ACI-544.1R-96)*, Michigan, USA.
17. Li, V.C., Wang, S., and Wu, C. (2001) Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, **98**(6), 483-492.
18. Li, V.C. (1993) From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, **10**(2), 37-48.
19. Fischer, G., Wang, S., and Li, V.C. (2003) Design of engineered cementitious composites (ECC) for processing and workability requirements. In: *Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites*, 29-36.
20. Li, V.C. (2007) *Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance*. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.
21. Dehghani, A. and Nateghi-Alahi, F. (2014) Experimental and analytical estimation of mechanical properties of engineered cementitious composites (ECC) with polyvinyl alcohol fiber. *Sharif University Journal of Technical and Engineering*, **30-2**(1.1), 45-57 (in Persian).
22. Torigoe, S., Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T., and Hamada, T. (2003) Study on Evaluation Method for PVA Fiber Distribution in Engineered Cementitious Composite. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**, 265-268.
23. Battelle (2002) *Toward a Sustainable Cement Industry*. World Business Council on Sustainable Development (WBCSD), 92 p.
24. Li, M. and Li, V.C. (2013) Rheology, fiber dispersion, and robust properties of Engineered Cementitious Composites. *Materials and Structures*, **46**, 405-420.

واژه‌نامه

- ۱- سیستم قاب خمشی مختلط
Composite Frame Consist of Reinforced Concrete Column and Steel Beam (RCS)
شامل تیر فولادی و ستون بتن مسلح
- ۲- کامپوزیت سیمانی مهندسی
Engineered Cementations Composites (ECC)
شده یا بتن مهندسی شده
- ۳- بتن‌های لیافی
Fiber Reinforced Concrete (FRC)

- ۴- بتن‌های الیافی توانمند High Performance Fibre Reinforced Concretes (HPFRC)
- ۵- پلی اتیلن Poly Ethylene (PE)
- ۶- پلی وینیل الکل Poly Vinyl Alcohol (PVA)
- ۷- پلی پروپیلن Poly Propylene (PP)
- ۸- ورق تقویت فولادی Steel Doubler Plate
- ۹- ورق اتکای جانبی Face Bearing Plate (FBP)
- ۱۰- تسمه فولادی دور ستون Steel Band Plate (SBP)
- ۱۱- خسارت پلاستیک بتن Concrete Damage Plasticity

Improving Seismic Performance of Steel Beam-Concrete Column Joint Using Engineered Cementitious Composites (ECC)

Aryan Javadi Zonouzi¹, Fariborz Nateghi-Elahi^{2*}, and Ayoub Dehghani³

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Architecture and Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
2. Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: nateghi@iiees.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Within the past few decades, researchers and designers have become more interested in utilizing the hybrid structures consisting of the reinforced concrete and steel members. This combined system benefits its own advantages from both steel and concrete characteristics. One of these systems is the RCS; Reinforced Concrete Column Steel beam. A moment frame consists of Reinforced Concrete columns (RC) and Steel beams (S).

In this research, two samples of this type of connection whose experimental models were established by Alizadeh et al. (2000) were used. Both specimens were tested under quasi-static reversed cyclic loading and simulated using a nonlinear three-dimensional finite element method analyzed by the ABAQUS software. After verifying the FEM models, some special joint details were simulated for investigating the effect and the performance of the steel band plates, FBPs, EBPs, WFBPs, ABPs, steel doubler plates and the stirrups in joint. Lateral load story drift response, the cracking pattern of the joints, shear strains at the joints, non-linearization of steel beam were studied in the considered models. The results indicated that the performance of the models depended directly on the joint detailings, the effectiveness of the shear keys, and the amount of the confinement provided for the panel zone region.

Engineered cementitious composites (ECC) are a class of high-performance fiber reinforced cement composite with strain hardening and multiple cracking properties. Therefore, replacing the connection column with strong and flexible concrete, such as engineered concrete, increases the seismic behavior of this type of connections. Therefore, composite concrete was replaced by the column concrete in the modeled joints for further investigations.

The comparative results indicated that the application of the ECC in columns, beam-column joints, in parts or as a whole, in composite systems can greatly improve their seismic behavior. In addition, the use of ECC, allowed the reduction and even the elimination of the steel transverse reinforcements in the connection. This indeed simplifies the joint detailing, especially when the beams are framing into the same column from different directions.

Finally, a model of RCS connection with ECC is presented, which in addition to simpler detailing scheme in the joint area, has also a favorable seismic behavior.

Keywords: RCS Connection, Through Beam, Finite Element Method, ECC, Seismic Behavior.