



## مروری بر عملکرد ستون‌های مرکب محاط در بتن CFST

سمیرا زمانی<sup>۱</sup>، حامد رضا حاج قاسم<sup>۲</sup>، امیر ایازی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران (سازه)، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران (آب و سازه های هیدرولیکی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

۳- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد واحد شهر قدس، ایران

Samirazamani@nit.ac.ir

### چکیده

در این مقاله به مروری بر مطالعات انجام شده در مورد عملکرد ستون‌های مرکب CFST را انجام دادیم. در ابتدا دلایل کاربرد و مزیت این ستون‌ها را بیان میکنیم. ستون‌های مرکب بتن و فولاد CFST به دلیل داشتن مزایای قابل توجه از جمله افزایش تنش‌های خمشی و کششی (به علت قرارگیری جداره فولادی پیرامون بتن)، افزایش سختی دورانی اتصال تیر به ستون، تاخیر در کمانش موضعی فولاد، محصورشدگی بتن، ساخت سریعتر سازه در صنعت ساختمان و پل سازی اخیراً مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. این ستون‌ها با وجود داشتن محاسن ذکر شده در بالا در بحث آتش سوزی عملکرد مناسب ندارند. لذا در بعضی از پروژه‌ها از (CFST<sup>۱</sup>) محاط در بتن استفاده می‌شود. بتن به کار رفته در اطراف ستون CFST می‌بایست مسلح بوده و به حد مناسبی لوله CFST را دربرگیرد و آن را محصور سازد. بتن‌های حاوی الیاف و پوزولان دارای خاکستر بادی<sup>۲</sup> می‌باشند که کامپوزیت سیمان مهندسی (ECC<sup>۳</sup>) نامیده می‌شوند و دارای خصوصیتی از جمله: بالا بردن آستانه تحمل و قدرت باربری سازه، ایجاد ترک‌های مویی بر سطح که قدرت جذب انرژی را توسط بتن افزایش می‌دهد و از شکست ناگهانی جلوگیری می‌کند، جلوگیری از ترد شکنی بتن و افزایش شکل پذیری، کاهش میزان سنگدانه مصرفی به دلیل اضافه نمودن الیاف که موجب صرفه اقتصادی می‌گردد. این مخلوط‌های خاکستر بادی با وجود مقاومت مکانیکی پایین‌تر در مقایسه با مخلوط‌های حاوی سرباره، به‌طور قابل توجهی عملکرد بالاتری در بروز رفتار کرنشی از خود نشان می‌دهد، استفاده از ECC در پایین دیوار برشی باعث کاهش تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ستون‌های مرکب بتن و فولاد، کامپوزیت سیمان مهندسی، رفتار شکل پذیر

<sup>۱</sup> Concrete filled steel tube

<sup>۲</sup> Fly ash

<sup>۳</sup> Engineered cementitious composite



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

## ۱- مقدمه

ستون از جمله مهم‌ترین اعضای سازه‌ای است. ستون به یک عضو سازه‌ای اطلاق می‌شود که بار محوری فشاری را با لنگر خمشی و یا بدون لنگر خمشی منتقل می‌کند. ستون‌ها به طور معمول بارهای قائم را از بام یا کف سازه گرفته و آن را به پی منتقل می‌نمایند [۱].

استفاده از مقاطع مرکب ستون‌های CFT به دلیل مزایای فراوان، در دهه‌های اخیر در جهان رواج بسیاری یافته است. محاط شدن ستون CFT در بتن ECC، به دلیل حفظ پایداری کلی مقطع، شکل‌پذیری بالا و ایجاد ترک‌های کم عمق، موجب عملکرد بهتر مقطع گردیده است.

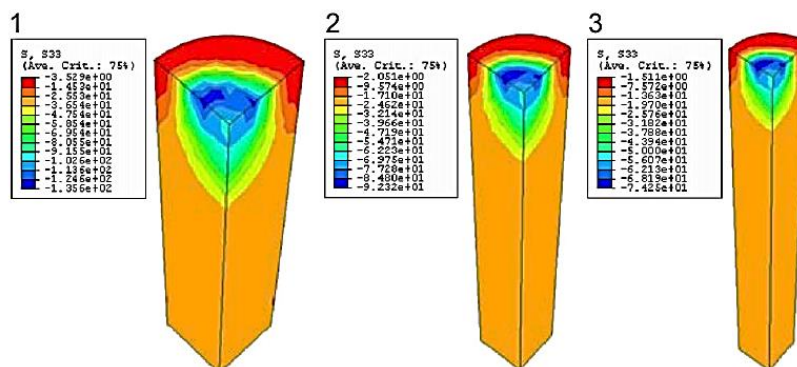
یک ستون بتنی غیر مسلح، ظرفیت فشاری متوسطی خواهد داشت که شامل ظرفیت فشاری بتن مقطع است. از طرفی این ستون‌ها ظرفیت خمشی ناچیزی خواهد داشت، زیرا به محض ایجاد کشش در یک مقطع، بتن ترک می‌خورد. به همین دلیل ستون‌های بتنی را به فولاد مسلح می‌کنند. با اضافه نمودن فولاد قسمتی از مقطع با تحمل کشش احتمالی ایجاد شده در اثر خمش، امکان مقاومت در مقابل فشار و لنگر خمشی توام را برای ستون فراهم می‌کنند. به دلیل هزینه‌بر بودن، بزرگ بودن مقطع ستون، مقاطعی که از ترکیب بین مصالح فولاد و بتن تشکیل شده که مقاطع مرکب نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد. مقاطع کامپوزیت یا CFST شامل لوله فولادی پر شده با بتن است. برتری مقاطع کامپوزیت یا CFST، خصوصیات عالی فشاری، خمشی و کششی مقطع، شکل‌پذیری بالا، عملکرد لرزه‌ای بهتر، افزایش سرعت اجرا، کاهش هزینه می‌باشد. در صورتی که این مقاطع در بتن آرمه مدفون گردد، مقطع محاط در بتن نامگذاری می‌شود. در این نوع مقاطع از کمانش لوله فولادی، خوردگی در محیط‌های خورنده و گسیختگی زود هنگام در اثر آتش سوزی تا حدودی جلوگیری به عمل می‌آید.

برای بهبود عملکرد ستون می‌توان تیوب فولادی را در کامپوزیت سیمان مهندسی (ECC) محاط نمود. کامپوزیت سیمان مهندسی یک نمونه از سیمان الیافی، حاوی الیاف پلی وینیل الکل (PVA<sup>۱</sup>) می‌باشد. استفاده از کامپوزیت سیمان مهندسی جهت محاط نمودن ستون‌های CFST موجب افزایش مقاومت برشی، افزایش جذب انرژی، مقاومت در برابر فروریزش، شکل‌پذیری بالا و کاهش عمق ترک می‌گردد [۲].

## ۲- تاریخچه

یانگ و همکاران (۲۰۲۱) ستون‌های CFST تحت نیروهای محوری هم مرکز را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که ستون‌های CFST دارای ظرفیت لهدگی بالا، شکل‌پذیری زیاد و مقاومت در برابر کمانش موضعی می‌باشد. طی مطالعه مذکور به بررسی رفتار ستون‌های CFST با مقاطع دایره‌ای و مربعی پرداخته شده است. نمونه‌های ستون CFST به صورت آزمایشگاهی و مدلسازی FEA مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌ها را تحت بار فشاری در بالای ستون بارگذاری نموده و پارامترهایی چون نوع مقطع، نسبت ارتفاع به قطر بررسی شده است. با بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی CFST تحت بار فشاری، که نتایج آن بیانگر رفتار شکل‌پذیر این نمونه‌ها بود. همچنین مدل‌های FEA تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. این نرم افزار قادر به پیش‌بینی مدهای گسیختگی بوده همچنین نمودار بار تغییر مکان را به صورت خروجی ارائه می‌دهد. مدهای گسیختگی برای L/D های ۴،۵ الی ۶ مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های ساخته شده برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون‌های CFST برای L/D کمتر از ۶ پیشنهاد شده که بیشتر این میزان محافظه کارانه بوده است [۹].

<sup>1</sup> Polly vinyl alcohol



شکل شماره (۱): تنش محوری - (۱) L/D=3, (2) L/D=4.5, (3) L/D=6 [۹]

ماو و همکاران نمونه های مربعی CFST محاط شده در بتن را تحت بارگذاری محوری و چرخه ای قرار دادند. نتایج بررسی ها حاکی از آن بود که نمونه های محاط شده در بتن در مقایسه با مدل های رایج CFST دارای شکل پذیری بالاتر و عملکرد لرزه ای بهتری بوده است [۱۰].

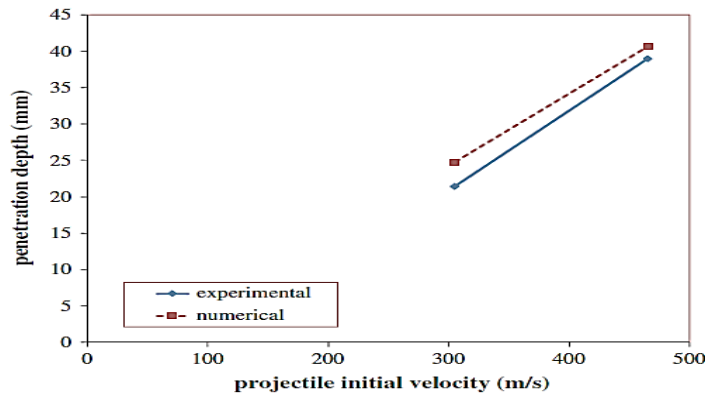
لام و همکاران ستون های مرکب کوتاه را تحت بارگذاری محوری فشاری بررسی نمودند. متغیرهای مورد مطالعه نوع فولاد و بتن بوده است. برای ساخت نمونه ها درون ستون ها را با روغن کاری و بدون روغن کاری بتن ریزی کرده، نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن بوده که نمونه های بتن کم مقاومت با روغن کاری تأثیری بر میزان مقاومت نهایی نداشته، حال آنکه در بتن با مقاومت بالا روغن کاری باعث افزایش مقاومت نهایی مشاهده شد [۱۱].

هو و همکاران از طریق مدلسازی اجزا محدود دریافتند که میزان محصور شدگی در مدل های دایره ای بیشتر از نمونه های مربعی است. این میزان در نمونه های دایره ای زمانیکه میزان  $D/t$  کوچک باشد، بیشتر می گردد [۱۲].

لی و همکاران یک مدل هیبرید-الیاف کامپوزیت الیافی سیمان (ECC) تحت بارگذاری ضربه مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیرات خوردگی و درصد تأثیر کرنش در مدل بررسی گردید. با استفاده از نرم افزار LS-DYN مدل سازی عددی را تحت فشار ضربه ای و مراحل ضربه بر هیبرید-الیاف ECC مدل سازی شده است. با مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، مشخص گردید که نتایج مدل عددی با نتایج حاصل از آزمایشگاه متفاوت است.

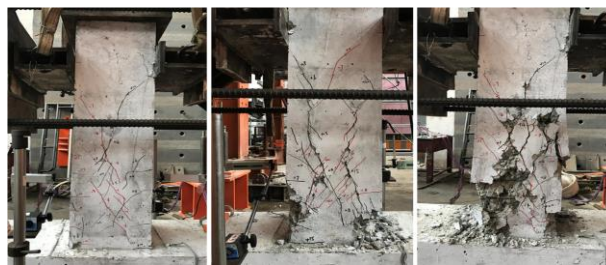
مدل هیبرید-الیاف ECC بارگذاری ضربه بررسی گردید. در مساله ECC شاهد سخت شوندگی کرنشی کششی بوده، یکی از رفتارهای منحصر به فرد ECC است. با بررسی های انجام شده توسط نرم افزار LS-DYNA دریافتند که کرنش بیشینه اصلی معیارهای کرنشی بیشینه را می توان در ضوابط خوردگی، هنگام مدل کردن رفتار ضرب در مدل ECC به کار برد. نتیجه به دست آمده در زمینه قطر حفرة و عمق ستون ناشی از ضربه وارد مشاوره با مطالعات آزمایشگاهی بوده به این صورت که هرچه سرعت اولیه این ضربه بیشتر باشد به طبع عمق نفوذ نیز بیشتر می گردد. همچنین قطر بهینه ی ۳ میلیمتر با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.

حال آنکه طبق بررسی آزمایشگاهی بر رفتار ضربه و هیبرید-الیاف ECC و تأثیرش نتایجی خلاف بررسی عددی را دارا بود، بدینصورت که نتایج مدل عددی حاکی از پتانسیل بالای سازه های حاوی ECC در برابر بار ضربه بوده حال آنکه گزارش ها خلاف آن را بیان دارد [۱۵].

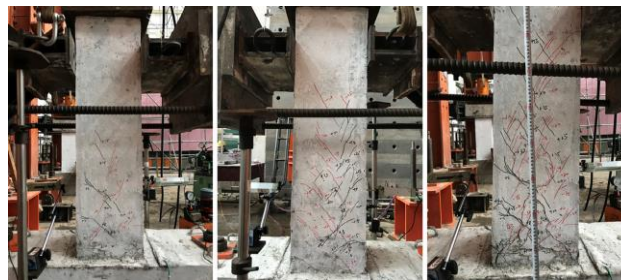


شکل شماره (۲): مقایسه عمق نفوذ مطالعه آزمایشگاهی و عددی [۱۵]

کای و همکاران به مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه بتن مسلح متصل به تیر با رفتار هیستریزیس ستون‌های CFST اشاره با بتن ECC پی بردند که نمونه‌های حاوی ECC به دلیل ترک خوردگی‌های سطحی و کم عمق شکل کلی را حفظ نموده و گسیخته نشده‌اند همچنین با بررسی نمودارهای هیستریزیس بار تغییر مکان دریافتند انرژی مستهلک شده نمونه‌های ECC حدود دو برابر بیشتر است. مطالعات آزمایشگاهی به بررسی ستون CFST محاسبه شده با بتن معمولی و بتن ECC بررسی کردند. ستون‌های مورد مطالعه را تحت بارگذاری‌های جانبی و چرخه قرار داد و رفتار نمونه‌ها را بررسی نمودند. نمونه‌های بتن ECC در هنگام گسیختگی رفتاری متفاوت از ستون‌های محاط با بتن معمولی را نشان دادند. در نمونه‌های CFST محاسبه شده با بتن معمولی در زمان گسیختگی، ترک خوردگی و ریزش بتن نمونه‌ها مشاهده شد. در حالی که نمونه‌های محاط با بتن ECC پایداری کلیه ستون حفظ گردیده شد. همچنین نتایج حاصل بیانگر شکل پذیری بالاتر نمونه‌های ECC و سختی کمتر در مقایسه با ستون‌های محاط با بتن معمولی بوده و دلیل این پدیده را کاهش میزان سنگدانه‌ها در نمونه‌های ECC بیان نموده‌اند. در ادامه با بررسی نمونه‌های ECC دریافتند انرژی مستهلک شده حدود دو برابر میزان انرژی مستهلک شده نمونه‌های محاط با بتن معمولی می‌باشد [۱۶].



شکل شماره (۳): مود گسیختگی نمونه‌های CFST محاط شده در بتن معمولی [۱۶]



شکل شماره (۴): مود گسیختگی نمونه‌های CFST محاط شده در ECC [۱۶]

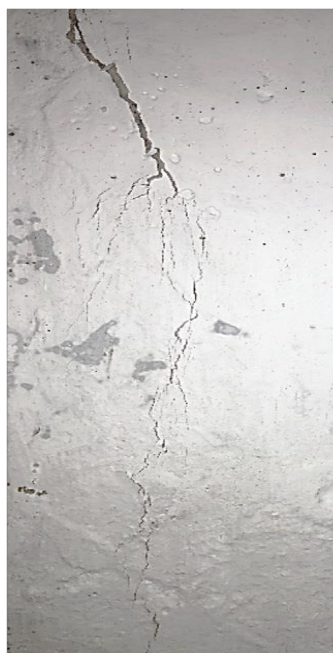
پن و همکاران با بررسی ۸ نمونه ساخته شده آزمایشگاهی تحت فشار محوری ستون های CFST مقاومت و شکل پذیری پایین تری نسبت به نمونه های حاوی ECC دارند.

نمونه های CFST با بتن های ECC و معمولی را تحت نیروی محوری فشاری قرار دادند. نمونه های CFST محاط با بتن ECC نتایج از قبیل افزایش شکل پذیری نمونه ها می باشد. مصالح ECC بر پایه تئوری شکست میکرو ترک و ترک خوردگی مویین همانند فلزات از خود نشان داده بدین صورت که نمونه های ECC همچون فلزات که پس از ترک خوردگی رفتار سخت شوندگی کرنشی از خود نشان می دهند. ستون های ECC نیز سخت شوندگی دارند.

بنابر آنالیز کرنشی در نمونه های محاط شده با بتن معمولی، وقتی بتن خارجی نمونه ترک می خورد بتون داخل تیوب فولادی هنوز در مرحله الاستیک پلاستیک می باشد، این در حالی است که در نمونه های ECC بتن داخل تیوب فولادی تسلیم می شود آنگاه بتن ECC ترک می خورد، این رفتار یکی از اثرات بسیار خوب عملکردی بتن ECC می باشد [۱۷].



شکل شماره (۵): نحوه تغییر شکل آرماتوهای طولی و تیوب فولادی ستون CFT [۱۷]

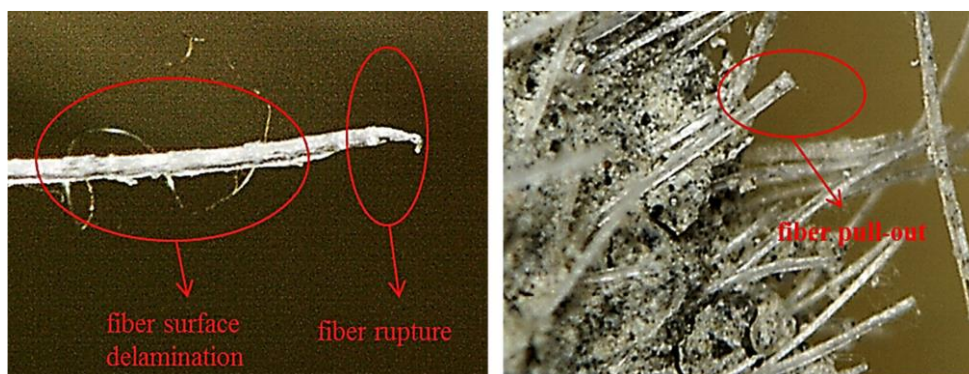


شکل شماره (۶): نحوه ترک خوردگی ستون CFT محاط در ECC [۱۷]

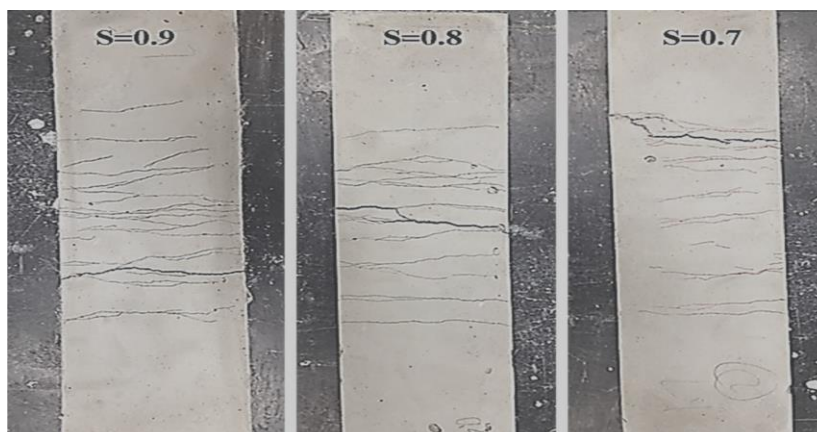


فیشر و همکاران نمونه‌های ساخته شده شامل دو نوع FRCC ساخته شده با الیاف پلی وینیل الکل (PVA) و الیاف پلی پروپیلین (PP). طی مطالعه انجام گرفته به رفتار سیمان الیافی کامپوزیت مسلح تحت کشش و بارگذاری خمشی بررسی شده است. ارزیابی پاسخ‌های خمشی به صورت آنالیز معکوس انجام گرفته است. در این مطالعه به ترک خوردگی و توسعه ترک‌ها با استفاده از اسناد موجود در سیستم‌های DIC (digital image arrelation) برای تحقیق و صحت سنجی استفاده گردیده است [۱۸].

مطالعات آزمایشگاهی بر کامپوزیت سیمانی بر پایه فیبر مسلح (FRCC) با کرنش سخت شوندگی پس از ترک خوردگی تحت نیروی محوری کششی را بررسی می‌نماید. کرنش سخت شوندگی کامپوزیت سیمانی (SHCC) برای کامپوزیت سیمان مهندسی (ECC) نیز شناخته شده است. SHCC به طور معمول مقاومت کششی نهایی بین ۴-۶ مگا پاسکال است. اولین ترک در حدود ۳-۵ مگاپاسکال ظرفیت کرنش کششی ۲-۵٪، مقاومت فشاری ۲۰-۹۰ مگاپاسکال و مدول یانگ ۱۶-۳۴ گیگا پاسکال می‌باشد. رفتار میکرو ترک SHCC با تاثیر میکرو مکانیکی برهم‌کنش بین الیاف، ملات و سطح مشترک بستگی دارد. کامپوزیت سیمان مهندسی ECC دارای شکل پذیری بالا و عملکرد مناسب و دوام بسیار بوده است. طی این مطالعه بررسی گردیده که آیا استفاده از مصالح ECC در پل عرشه فولادی با دهانه بزرگ امکان پذیر هست. همچنین عملکرد سازه با آنالیز اجزا محدود بررسی گردیده است. بتن ECC توانسته بر خاصیت شکنندگی بتن معمولی غلبه کرده و همچنین کرنش کششی بالاتر، ظرفیت تغییر شکل بیشتری در حالت کششی دارد. ظرفیت بالای کششی ECC باعث کاهش ترک خوردگی می‌گردد که موجب حفاظت پل در برابر نفوذ کلراید می‌شود. با انجام آنالیز اجزای محدود و نتایج حاکی از آن بود که استفاده از ECC با ضخامت ۴۰ الی ۷۰ میلی متر برای پل‌های فولادی امکان پذیر بوده است. در آنالیز اجزا محدود با مفروضات ۸۰ هزار وسیله نقلیه با سرعت متوسط 60km/h بوده و همچنین صدپاسخ برای بر روی عرشه بررسی گردید. استفاده از ECC باعث افزایش قابل توجه به عمر سرویس دهی می‌گردد. همچنین می‌توان ضخامت کمتری برای اجرای فولاد در مقایسه با پل‌های عرشه فولادی معمول در نظر گرفت. در بتن ECC تعداد ترک‌ها کاهش می‌یابد. زمانی که سطح تنش ناشی از خستگی کم می‌شود عمر خستگی در بتن ECC نسبت به بتن معمولی افزایش قابل توجهی نشان داده است [۱۹].

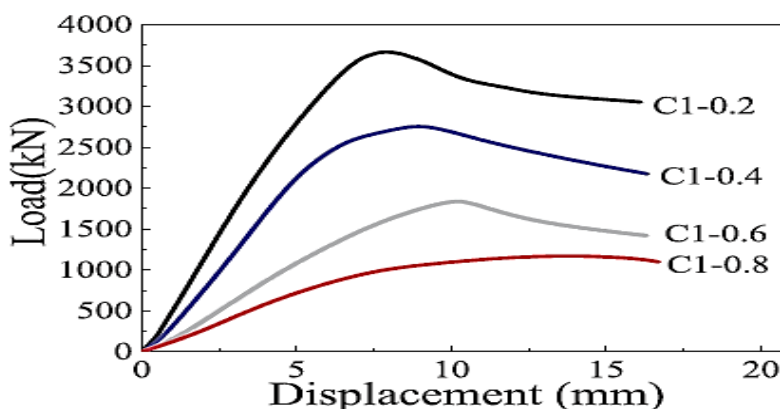


شکل شماره (۷): الیاف بتن ECC پس شکست [۱۹]



شکل شماره (۸): الگوی ترک خوردگی ECC تحت بار خستگی [۱۹]

کانگ و همکاران ستون‌های CFST محاط در ECC تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت را بررسی کردند. ستون‌های فولادی پر شده با بتن، CFST به دلیل مقاومت بالا و قابلیت تغییر شکل پذیری و مقرون به صرفه بودن در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه بررسی‌هایی در زمینه بارگذاری نمونه تحت بار استاتیکی انجام گرفته است. نمونه‌های CFST در محیط‌های فرسایشی به راحتی خورده می‌شود از جمله در محیط‌های دریایی و محیط‌هایی که نمکدار هستند. بنابراین خوردگی روی مقاومت نهایی و شکل‌پذیری ستون‌ها اثر می‌گذارد همچنین مقاومت تیوب فولادی در برابر آتش یکی از نگرانی‌هاست. زمانی که فولاد تماس با آتش قرار می‌گیرد مقاومت خود را در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد از دست می‌دهد. بنابراین برای افزایش دوام و مقاومت نمونه‌ها در برابر آتش اطراف ستون‌های CFST با بتن ECC پوشانده شد. تمام نمونه‌های CFST محاط در ECC تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت پایداری کلی خود را حفظ نموده و در اطراف مقطع ترک خوردگی مشاهده گردید. با بررسی تاثیر آرماتور طولی و خاموت دریافتند که افزایش درصد آرماتور طولی باعث افزایش سختی و بالا رفتن ظرفیت باربری نهایی می‌گردد، در حالیکه افزایش میزان خاموت‌ها محصورشدگی ستون‌ها را افزایش می‌دهد. با بالا رفتن میزان خروج از مرکزیت ظرفیت نهایی ستون‌ها کاهش پیدا می‌کند [۲۰].



شکل شماره (۹): نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت [۲۰]

مطالعه بر روی اتصال دال به ستون تحت بارگذاری ثقلی و بارگذاری چرخه‌ای جانبی می‌باشد. طی این مطالعه دریافتند که بتن ECC به دلیل وجود الیاف پلی وینیل الکل PVA میزان ظرفیت کرنش کششی ۳ الی ۵ درصد بوده است در صورتی که این



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

مقدار در بتن معمولی ۰/۰۱ درصد می‌باشد. با انجام تست‌های بر روی نمونه‌ها دریافتند که معیار خرابی نمونه‌ها به این موارد بستگی دارد: مقاومت، سختی، ظرفیت جانبی و میزان استهلاک انرژی در زمانی که نمونه تحت بار ثقلی و بار چرخه‌ای قرار می‌گیرد. همچنین دریافتند که سختی اولیه و مقاومت در برابر خرابی در نمونه‌ای که شامل PVA هستند نه تنها باعث بهبود سختی نمی‌شود بلکه باعث تنزل نیز می‌گردد [۲۱].

در مدل‌های عددی نیاز است صحت مدلسازی انجام گرفته در نرم افزارهای شبیه سازی، با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گیرد، بدینصورت مدلسازی مورد تایید قرار خواهد گرفت.

## ۳- بحث و بررسی

معرفی سیستم بتن و فولاد

استفاده همزمان از فولاد و بتن باعث عملکرد بهتر این نوع مقاطع می‌شود. نوعی از مقاطع فولاد و بتن، بتن مسلح است. بتن مسلح مقطعی کامپوزیت از بتن و آرماتور که در ساخت و ساز استفاده می‌شود.

در دهه اخیر استفاده از کامپوزیت فولاد بتن در صنایع ساخت و ساز، قاب‌های ساختمانی، دکل‌های انتقال الکتریسیته مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر ستون‌های کامپوزیت در اجرای سازه‌های بلند مورد توجه قرار گرفته اند.

معرفی ستون‌های کامپوزیت:

بتن مصالحی با سختی بالا، ارزان‌قیمت (نسبت به سایر مصالح) و مقاومت قابل توجه در برابر آتش‌سوزی است و همچنین، فولاد مصالحی با شکل‌پذیری و مقاومت بالا و وزن کم است. علاوه بر این، سازه‌های بلند با ستون‌های فولادی به طور معمول دارای تغییر شکل‌های جانبی به نسبت بزرگ بوده و در مقابل آتش‌سوزی مقاومت پایینی دارند. استفاده از بتن تنها در ستون‌های ساختمانی بلند، در طبقات پایین فضای بیشتری را اشغال نموده و دارای وزن بیشتری است و به علت ترد و شکننده بودن بتن، سازه حاصل دارای شکل‌پذیری کمتری بوده و در بارهای لرزه‌ای افت مقاومت در سازه به وجود خواهد آمد. به همین دلیل طراحان و محققان به دنبال یافتن راه‌حلی مناسب برای استفاده توأم از بتن و فولاد به فکر استفاده از مقاطع مرکب فولادی بتنی افتادند.

امروزه دستگاه‌های مرکب به‌صورت موفقیت‌آمیزی در ستون‌ها، تیرها و دال‌های با دهانه‌های متوسط و بزرگ در ساختمان‌ها و همچنین در پایه و تیرهای پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از ستون‌های مرکب به علت همکاری توأم و مناسب بتن و فولاد در بسیاری از دستگاه‌های سازه‌ای در سرتاسر جهان در حال افزایش است. ستون‌های مرکب نه تنها مزایای بسیاری در ساخت دارند، بلکه باعث بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی اعضای سازه‌ای در مقایسه با اعضای بتن مسلح و فولادی تنها می‌شوند. ستون‌های مرکب اگر جزئی از سیستم سازه‌ای مختلط باشند، مزایای دیگری نیز می‌توان از آن‌ها انتظار داشت. به‌عنوان نمونه، اگر اتصال مناسبی بین ستون و سیستم سقف (تیر و دال) برقرار باشد، این اتصال مقاومت بالاتر و رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد که در نتیجه باعث افزایش طاقت و ایجاد قید اضافی خواهد شد. یکی از پیچیدگی‌های اجرایی در این ستون‌ها هماهنگی بین عوامل اجرایی بتن و فولاد و نحوه اتصال تیر به ستون است اما مزایای بالای این نوع ستون‌ها (سرعت ساخت، عدم نیاز به قالب، کاهش بارهای روی فونداسیون، افزایش فضای مفید و کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری) باعث طراحی و اجرای روز افزون آن‌ها می‌باشد. ستون‌های مرکب فولادی - بتنی از سال ۱۹۵۰ به تدریج رواج یافتند و با توجه به مزایای زیاد این ستون‌ها، استفاده از آن‌ها در ساختمان‌های بلند به صورت روز افزون شدت یافت. ستون‌های فولادی مدفون در بتن، اولین بار در ساختمان‌های پترسبورگ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۹ برای افزایش مقاومت ستون در برابر آتش سوزی مورد استفاده قرار گرفتند.

<sup>۱</sup> Petersburg





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

نقی پور و همکاران به بررسی تاثیر سطح محصورشدگی بتن بر ظرفیت باربری ستون‌های فولادی مدفون در بتن مسلح تحت بار خارج از مرکزیت پرداختند. در این مطالعه به بررسی ۶ نمونه آزمایشگاهی با هسته H شکل و صلیبی تحت بارگذاری با خروج از محوریت به میزان ۰/۴، ۰/۵۵ و ۰/۷ انجام شده است. همچنین یک مدل در نرم افزار آباکوس<sup>۱</sup> جهت مطالعات عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این مطالعه بیانگر این مطالب بوده، برای ستون‌های کوتاه افزایش مقاومت بتن، نیاز به افزایش درصد فولاد را کاهش می‌دهد. ظرفیت محوری ستون‌های لاغر با افزایش میزان نسبت لاغری کاهش پیدا می‌کند. با افزایش مقاومت فولاد از 350MPa به 913MPa، مقاومت ستون به میزان ۴۰ درصد رشد پیدا می‌کند اما به دلیل پدیده تردشکنی در فولاد ستون خراب می‌شود. با افزایش فاصله بین خاموت‌ها شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بسیار کاهش پیدا می‌کند [۱۴].

از مزایای ستون مختلط فولادی - بتن نسبت به ستون های فولادی یا بتنی میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

ظرفیت تحمل بار محوری و لنگرهای خمشی عالی  
توانایی جذب انرژی بالا و خاصیت شکل پذیری زیاد  
افزایش بار بحرانی کمانشی  
استفاده از مقطع فولادی به عنوان قالب برای هسته بتنی  
حفاظت سطح بتن از اسید های شیمیایی

کاهش ابعاد مقطع نسبت به سازه های بتن مسلح با ظرفیت باربری یکسان و در نتیجه وزن کمتر مزایای ستون CFT باعث کاربرد روز افزون آن شده است، به گونه ای که کاربرد این نوع ستون ها CFT مزایای ستون در ساختمان های بلند مرتبه، پایه پل-ها، کارگاه های صنعتی بزرگ، سکوهای ساحلی، ستون های سازه های بتنی با دهانه های بزرگ، شمع های فنداسیون، ستون های نگهدارنده، مخازن و مقاوم سازی سازه های فولادی بسیار متداول است. در مقابل این مزایا ستون های مختلف فولاد - بتن معایبی نیز دارند از جمله به دلیل قرار گیری فولاد در سطح خارجی ستون موضوع حفاظت در مقابل آتش سوزی مطرح می شود و با تمهیدات خاصی را برای آن پیش بینی کرد. همچنین اجرای اتصالات در این ستون ها مشکل بوده و رفتار اتصالات به طور دقیق مشخص نیست و پژوهش های کمی در مورد آن انجام گرفته و یا در حال انجام است.

ستون های کامپوزیت شامل ترکیب های مختلفی از دو مصالح بتن و فولاد هست که با نام های ستون مختلط، ترکیبی، مرکب، CFT، SRC، RCS، TWC نیز رایج می باشند. استفاده از ستون های کامپوزیت به اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی برمی گردد که با ساخت پل ها و ساختمان ها با اعضاء ترکیبی شروع شد که امروزه شکل های مختلفی از این اعضاء دیده می شود گسترش روز افزون آن به خاطر بهبود رفتار ستون ها در اثر ترکیب خوب بتن و فولاد است که عملکرد بهتر و صرفه اقتصادی بیشتر را در پی دارد.

اگرچه تیرهای مرکب در سازه های سازه ها به صورت گسترده ای بیش از ۵۰ سال است که مورد استفاده قرار می گیرد و این روند در سرتاسر دنیا رو به افزایش است، اما همچنان از لحاظ طراحی به این تیرها مانند تیرهای دیگر نگرینسته می شود و از سهم همکاری توأم بتن و فولاد چشم پوشی می شود.

تعدادی محدودی از آیین نامه های طراحی با درجه اطمینان بالایی مقرراتی را برای طراحی و اجرای تیرهای مرکب بیان نموده اند که در این بین می توان به آیین نامه های ۲۰۰۴-EC، ۵۴۰۰-BS، AISE اشاره نمود. مقطع فولادی در پایین تیر مرکب قرار می گیرد و در دهانه های ساده به عنوان عضو کششی عمل می کند. این مقطع روی شاه تیر عمل می کند. در تیر مرکب دال بتنی که شامل بتن و میلگردهای تقویتی هست بر روی مقطع فولاد قرار می گیرد و توسط اتصال دهنده های برشی به مقطع فولادی

<sup>1</sup> Abaqus

متصل می‌شود. این اتصال دهنده‌ها نیروی برشی افقی را بین بتن و فولاد انتقال می‌دهند. ساخت ستون‌های مرکب بدین ترتیب است که در مقاطع فولادی باز بتن دور مقطع فولادی ریخته می‌شود. برای افزایش مقاومت ستون‌های مرکب از میلگرد طولی خاموت نیز همانند ستون‌های بتن مسلح استفاده می‌شود. با توجه به کنترل‌های متعدد آیین نامه اروپا در طراحی مقاطع مرکب این نتیجه حاصل می‌شود که آیین نامه اروپا محافظه کارانه تر با طراحی اینگونه سازه‌ها برخورد می‌کند که از یک دید ممکن است سبب افزایش طول عمر مفید سازه باشد.

انواع ستون‌های کامپوزیت در سه تیپ کلی زیر خلاصه می‌شوند:

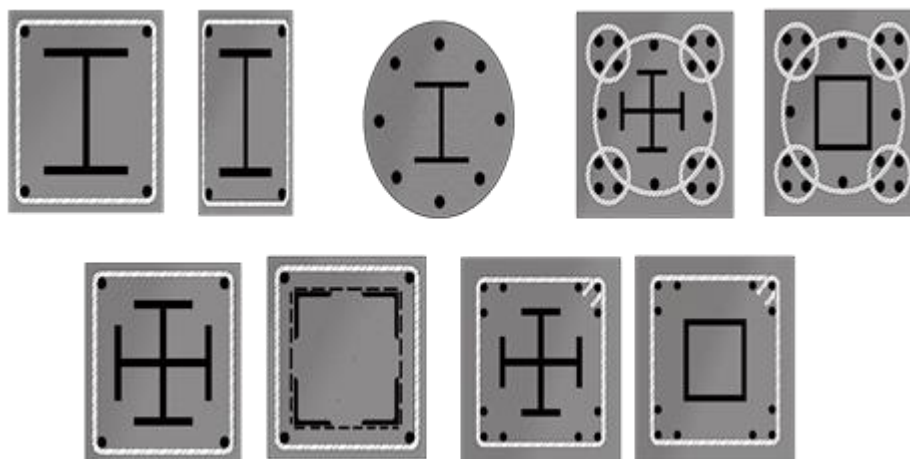
تیپ ۱- مقاطع فولادی مدفون در بتن

تیپ ۲- مقاطع فولادی جدار نازک پر شده از بتن

تیپ ۳- مقاطع فولادی نیمه مدفون در بتن

الف) تیپ ۱- مقاطع فولادی مدفون در بتن

اولین بار این ستون‌ها برای جلوگیری از تخریب ساختمان در برابر آتش سوزی ابداع شد و این نوع از مقاطع با نامه‌ای SRC یا RCS<sup>۱</sup> رایج شده‌اند.



شکل شماره (۱۰): مقاطع کامپوزیت

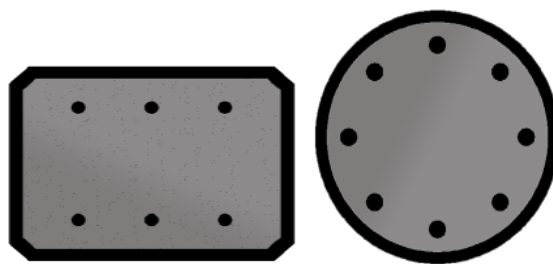
ب) تیپ ۲- مقاطع فولادی جدار نازک پر شده از بتن

این نوع از ستون‌های کامپوزیت بیشتر برای جلوگیری از کمانش موضعی ستون‌های جدار نازک فولادی در نظر گرفته شده است و با نام‌های CFT<sup>۲</sup> و TWC<sup>۳</sup> مشهور می‌باشند. بتن استفاده شده در این ستون‌ها می‌توانند بوسیله میلگرد مسلح شوند یا اینکه بسته به نوع مصرف بصورت ساده و غیر مسلح استفاده شود ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع از ستون‌های کامپوزیت عدم نیاز به میلگرد گذاری، صرفه جویی در قالب بندی، سرعت بالای ساخت، اثر محدود کنندگی فولاد بر بتن، محافظت سطح بتن از ضربه و سایش می‌باشد.

<sup>۱</sup> Reinforced Concrete & Steel

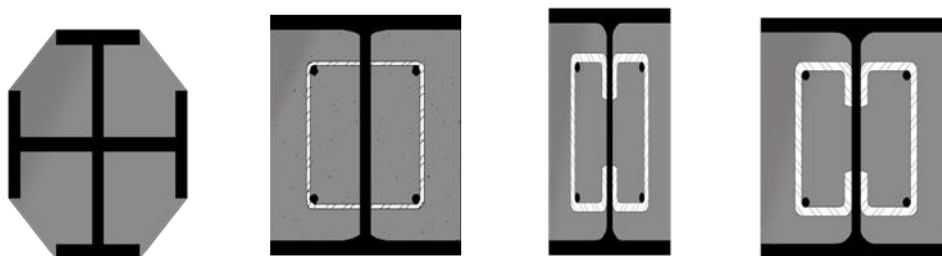
<sup>۲</sup> Concrete - Filled Steel Tubes

<sup>۳</sup> Thin Walled Composite Columns



شکل شماره (۱۱): مقاطع کامپوزیتی جدار نازک

ج) تیپ ۳- مقاطع فولادی نیمه مدفون در بتن  
این نوع از ستون‌های کامپوزیت از ترکیب انواع مختلفی از اشکال فولاد با بتن شکل می‌گیرند و جذب انرژی بالا، شکل پذیری بالا، افزایش در مقاومت و سختی ستون از ویژگی‌های این نوع از ستون‌های کامپوزیت می‌باشد.



شکل شماره (۱۲): مقاطع کامپوزیت نیمه مدفون

مقاطع پر شده با بتن برتری‌های بسیاری نسبت به مقاطع معمول دارند، خصوصیات مقاومتی بیشتر (مقاومت فشاری، خمشی و کششی)، زیبایی نمای سازه و سرعت بالا در روند ساخت و ساز می‌باشد.  
CFST شامل یک لوله فولادی پر شده با بتن است. در طول ساخت و ساز مقاطع فولادی به یکدیگر جوش داده شده و سپس بتن به داخل لوله‌ها پمپاژ می‌گردد، در نتیجه باعث تسریع روند ساخت و ساز می‌شود. بتن باعث کاهش کماتش موضعی در تیوب فولادی می‌شود. با مقایسه تیوب پر شده و پر نشده با بتن در مقاطع کامپوزیت، مشاهدات حاکی از افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری، جذب انرژی بیشتر در حین زلزله و همچنین بالا رفتن مقاومت در برابر آتش سوزی است.  
یک مقایسه ساده برای یک ستون بر اثر کماتش با طول  $L_e$  به اندازه ۵ متر، میزان جرم فولاد در مقطع  $60\text{kg/m}$  و مقاومت بتن هسته  $40\text{MPa}$  می‌باشد.

به صورت واضح روند کند در کاهش ظرفیت خمشی در اعضای CFST را نشان می‌دهد. این روند با توزیع تنش مطلوب در مقاطع CFST تحت خمش همراه است.

ژائو و گرزیبیتا (۱۹۹۹)<sup>۱</sup> در آزمایش‌های به بررسی عملکرد مقاطع RHS در تغییر شکل‌های زیاد تحت خمش سیکلی بررسی کرده‌اند [۳]. مود گسیختگی معمول در شکل نشان داده شده است. برای تیرهای RHS پرنشده، ترک اولیه در گوشه‌ها بوده و سپس در مقطع طی سیکل‌های بعدی، گسترش می‌یابد در حالیکه برای تیرهای RHS پر شده با بتن تغییر شکل مقطع به صورت چین خوردگی و بدون ترک خوردگی می‌باشد.

مدت زمان مقاومت در برابر آتش سوزی ستون‌های RHS یا CHS به طور معمول کمتر از ۳۰ دقیقه می‌باشد.

<sup>1</sup> Zhao and Grzebieda-1999



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمانی که ستون های CFST محاط در بتن شوند، عملکرد بهتری پیدا می کنند از جمله مزایای مورد مطالعه ستون های CFST محاط شده، می توان به مقاومت بالاتر این نمونه ها اشاره کرد. همچنین نمونه های محاط با بتن از تیوب فولادی در برابر خوردگی در محیط های اقیانوسی و نمک دار محافظت نموده و در زمان آتش سوزی با توجه به اینکه تیوب فولادی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت خود را از دست داده و کمانش نموده، بنابراین می توان با پوشاندن سطح فولاد با بتن این نقص را تا حدودی بهبود بخشید.

سیمان مهندسی یک نمونه از کامپوزیت سیمان الیافی بوده که خواص کششی و شکل پذیری بالاتری را دارا می باشد. ECC به وسیله کنترل عرض میکرو ترک های ایجاد شده باعث ایجاد رفتار کرنش کششی سخت شونده می شود. ظرفیت کرنش کششی در حدود ۳ الی ۵ درصد می باشد، این میزان در بتن با الیاف مسلح (FRC) ۳۰۰ الی ۵۰۰ برابر حالت معمول است. در بتن ECC از الیاف پلی اتیلن و پلی وینیل الکل (PVA) که حجم میزان الیاف بیش از ۲ درصد مصالح نمی باشد استفاده می گردد.

مصالح ECC دارای شکل پذیری بالایی می باشد زمانی که تحت تنش برشی بزرگ بار ضربه قرار می گیرد، مقاومت بالایی در برابر شکست ناشی از تنش جدید اعمال شده را دارا می باشد. ECC دارای شکل پذیری کششی بالای منحصر به فرد و همچنین خواص مشابه با سیمان پرتلند معمولی می باشد. از جمله خواص مشابه با سیمان پرتلند: مقاومت فشاری و خواص دمایی است. خصوصیات ذکر شده در ECC باعث بالا رفتن عملکرد سازه هایی مانند: پل ها و لوله های انتقال می شود.

شکل پذیری، کشش بالا و سختی مصالح ECC موجب بالا رفتن مقاومت ECC مسلح (R/ECC) می گردد که مانع از شکست ترد و از دست رفتن پایداری سازه می شود در پدیده هایی که رخ داد آنها به بتن های مسلح تحت بارگذاری مشابه رواج دارد. استفاده از (R/ECC) در اعضای سازه از جمله تیرها ستون ها و دیوارها و اتصالات بهتر از R/C معمولی بوده، زیرا ظرفیت باربری، قابلیت تغییر شکل و قابلیت جذب انرژی بیشتری، تحت بارگذاری مونوتونیک و چرخه ای را دارد. مصالح این نوع بتن به گونه ای است که دارای دوام در برابر خوردگی، مقاومت در برابر سایش و یخ زدگی و ذوب شدن، مقاومت در برابر گرما و محیط های مرطوب بوده و همچنین در برابر نفوذ کلراید نیز دارای مقاوم بوده است.

برای ارزیابی سایش و خوردگی ECC و مقاومت در برابر خوردگی برای جاده ها تست سطح اصطکاک انجام گرفت. نمونه به شکل (شماره ۱۳) تایر لاستیکی که به وسیله ناقل در 65 kph (40 mph) متصل بوده است. میزان نیروی اصطکاک اولیه بین تایر و سطحی ECC اندازه گیری شده است. نمونه ECC پس از آن که ۴ میلیون بار تایر بر روی محل آزمایش عبور داده شد دچار خوردگی گردید. پس از اتفاق افتادن خوردگی میزان نیروی اصطکاک دوباره اندازه گیری شده و میزان زوال ارزیابی گردید. مقدار نهایی نیروی اصطکاک، شاخص نسبت خوردگی نامیده می شود. میزان (Aggregate Wear Index) AWI برای نمونه ECC در حدود 1.6-2.3 kN بوده که بیشتر از حداقل AWI میسینگان برای سطح جاده ها است، حداقل AWI برابر مقدار 1.2 kN می باشد. نتایج نشان دهنده آن است که ECC دارای مقاومت خوردگی و سایش خوبی در برابر ترافیک سنگین می باشد.

تست انجماد و ذوب شدگی و روی ECC و نمونه بتن نرمال بر اساس ASTM C666A انجام گرفت ۱,۲ KN علاوه بر آن نمونه های ECC تحت ذوب شدن یخ زدگی قرار داده شده تا اثر ظرفیت کرنش کششی ECC بر پدیده مشاهده گردد. شکل (شماره ۱۲) نمونه های منشوری ۱۴ هفته تحت آزمایش قرار گرفتند را نشان می دهد. پس از پنج هفته (۱۱۰ چرخه) نمونه های بتن معمولی دچار زوال شدند. در صورتی که نمونه های ECC ۳۰۰ چرخه دوام آوردند. فاکتور دوام برای ECC حدود ۱۰۰ محاسبه شد که ۱۰ برابر از بتن معمولی بزرگتر است. تست کشش محوری بر روی نمونه های ECC تحت انجماد و ذوب پس از ۲۰۰ سیکل نشان دهنده آن است که ظرفیت کرنشی پس از افت ۳ درصد می باشد. تست غوطه وری در آب داغ، نمونه های ECC در آب داغ و محیط مرطوب نگه داری شده است. پس از قرار گرفتن در آب داغ ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۶ هفته تغییرات کمی در خواص الیاف مشاهده گردید. ظرفیت کرنشی در مدت ۱۳-۲۶ هفته از ظرفیت ۴,۵ درصد به ۲,۸

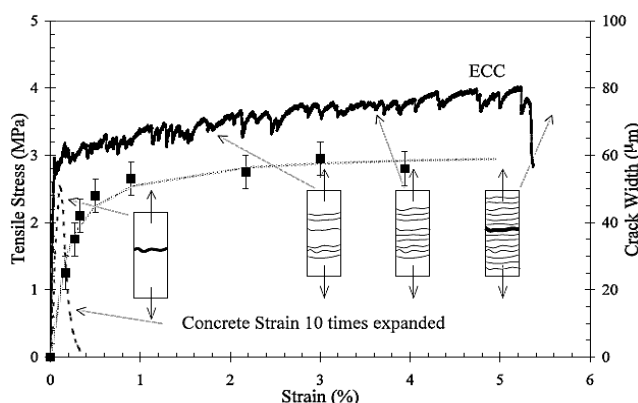
درصد پس از ۲۶ هفته که در معرض آب داغ قرار گرفت. ظرفیت کرنشی باقی مانده ECC تحت شرایط شدید محیطی قرار داده شد (معادل بیش از ۷۰ سال شرایط نرمال) هنوز هم بیشتر از ۲۵۰ برابر بتن معمولی می باشد.

رفتار سخت شوندگی کرنش کششی در ECC با برهمکنش بین الیاف، ملات و سطح تماس الیاف و ملات با استفاده از تئوری میکرومکانیکی تحقق می یابد. با افزودن الیاف به ملات ترد، رفتار سخت شوندگی کرنشی در صورت ترک خوردگی ایجاد می شود.

کامپوزیت های سیمانی با الیاف ناپیوسته توسط Li و Lenug مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطمینان از ترک خوردگی در حالت پایدار چقرمگی نوک ترک  $J_{tip}$  باید کمتر از مکمل انرژی  $J_b$  محاسبه شده است منحنی  $\sigma$  در برابر  $\delta$  که در شکل (شماره ۲۳) نشان داده شده، معادلات حاکم به این صورت می باشند:

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m}$$

که  $\sigma_0$  بیشترین تنش متناظر با فاکتور چقرمگی ملات و  $E_m$  مدول یانگ است. که  $\sigma_0$  تنش متناظر با  $\delta_0$  است،  $K_m$  ملات گسیختگی چقرمگی و  $E_m$  مدول یانگ ملات است. شکل (شماره ۱۲) نمودار  $\delta$ - $\sigma$  را نمایش می دهد [۱۵].

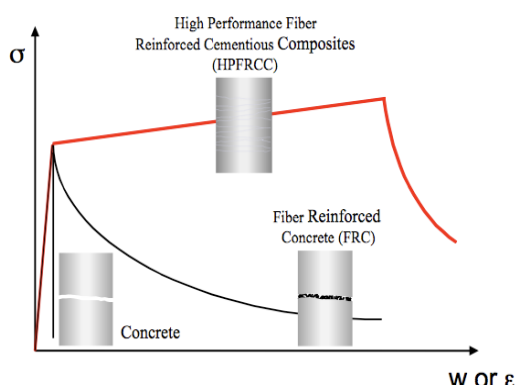


شکل شماره (۱۲): منحنی تنش - کرنش ECC [۱۵]

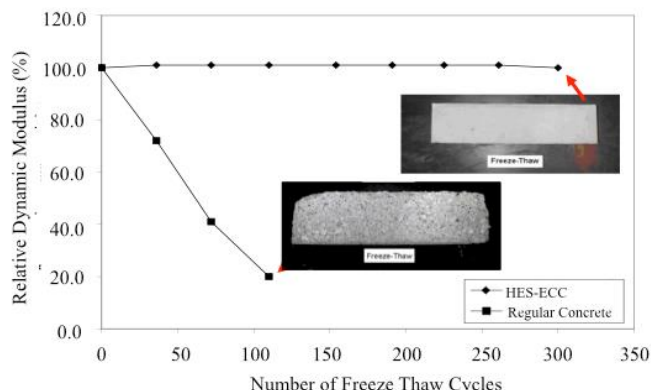


شکل شماره (۱۳): دستگاه تست اصطکاک [۱۵]

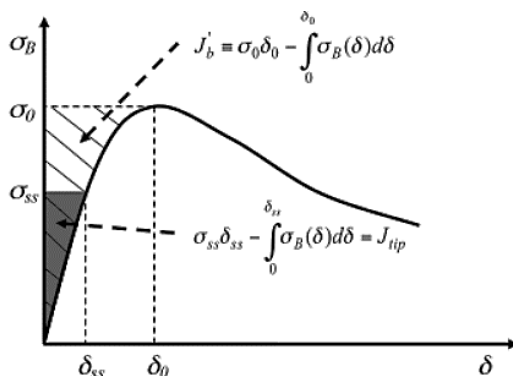




شکل شماره (۱۵): رابطه تنش کششی محوری - تغییر شکل برای بتن، FRC و HPFRCC [۱۵]



شکل شماره (۱۴): رابطه مدول دینامیکی Vs [۱۵]



شکل شماره (۱۶): قسمت هاشورزده میزان  $J_b$ ، قسمت خاکستری میزان  $J_{tip}$  [۱۵]

## تعریف مراحل تحلیل

### تعریف اندرکنش

برای تعریف اندرکنش بین بتن و فولاد باید قیدهای مورد نظر تعریف شوند. قید بتن و میلگرد از نوع Embedded region یعنی ناحیه مدفون شده استفاده نموده، به عبارتی میلگرد در بتن دفن شده است. خاصیت اندرکنش Contact می‌تواند رفتار تماسی (اصطکاک و لغزش الاستیک) و رفتار نرمال (سخت، نرم و یا تماس با استهلاک و جاداشدگی) را تعیین نماید. به علاوه خاصیت اندرکنش می‌تواند شامل داده‌های میرائی، هدایت حرارتی، تشعشع حرارتی و تولید حرارت به علت اصطکاک باشد. یک خاصیت اندرکنش Contact می‌تواند به صورت تماس عمومی (General contact)، تماس سطح به سطح (Surface-to-Surface) یا خودتماسی (Self-contact) باشد. اندرکنش بین تیوب فولادی و بتن نیز Contact با ضریب اصطکاک ۰,۳ تعریف گردیده است [۲۶]. بدین معنی که فولاد و بتن اجازه لغزش بر روی یکدیگر را داشته اما سطوح در تماس بر یکدیگر نفوذ ندارند.

مش‌بندی:

برای مش‌بندی المان‌های Solid از المان توپر شش وجهی و هشت گرهی، C3D8R استفاده گردیده است. نامگذاری مذکور بیانگر نوع المان توپر پیوسته از نوع سه بعدی می‌باشد. تعداد گره‌های المان ۸ عدد بوده که به روش انتگرالی کاهش یافته می‌-



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

باشد. همچنین برای مش‌بندی المان‌های Wire که شامل میلگرد در این مدل‌سازی می‌شود، از نوع T3D2 می‌باشد. این نوع نامگذاری بیانگر آنست که المان خطی با دوگره و از نوع سه‌بعدی است. نکته قابل توجه پس از مش‌بندی قسمت‌های مختلف مدل این است که، در قسمت Assign Element Type در کادر محاوره-ای، Family المان میلگرد را روی Truss تنظیم گردد. در صورتی که این مرحله اجرا نشود مدل وارد آنالیز نمی‌گردد.

تعریف خروجی‌های مورد نظر

قبل از مرحله‌ی پردازش باید نقاط خروجی‌های مدنظر مشخص شود. به عنوان نمونه خروجی‌ها شامل عکس‌العمل‌های تکیه-گاهی و تغییر مکان انتهای آزاد سر ستون است. در این مرحله با توجه به Set های مشخص شده در مراحل پیش، خروجی‌ها اختصاص داده می‌شوند.

تنظیم مشخصات مدل‌های بررسی شده با استفاده از آنالیز فاکتوریل

برای طراحی آزمایش‌ها از نرم افزار Design Expert می‌توان استفاده کرد. آنالیز فاکتوریل به طور معمول برای حالتی که چند متغیر وجود دارد استفاده می‌گردد. آنالیز فاکتوریل شامل: فاکتوریل کامل و فاکتوریل جزئی می‌شود. آنالیز فاکتوریل کامل به تعداد  $2^k$  (k تعداد پارامترهای مورد بررسی) آزمایش طراحی می‌کند، بسته به تعداد متغیرهای مورد بررسی آنالیز فاکتوریل کامل را می‌توان توصیه یا رد نمود. تعداد آنالیز هزینه و زمان بسیاری را طلب می‌نماید و ضرورتی بر استفاده از این روش نمی‌باشد. روش فاکتوریل جزئی به میزان  $2^{k-2}$  خروجی دارد و با توجه به تعداد بالای پارامترها این روش توصیه می‌گردد.

## نتیجه گیری

ستون‌های CFST به دلیل مزایای قابل توجهی از جمله مقاومت خمشی کششی و فشاری بالاتر، افزایش سختی دورانی اتصال تیر به ستون، تاخیر در کمانش فولاد در دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. این ستون‌ها با وجود مزیت‌های فراوان، در بحث آتش‌سوزی عملکرد مناسبی ندارند. هنگام آتش‌سوزی به دلیل مقاومت پایین فولاد در دماهای بالا، مقطع دچار کمانش شده و مقاومت خود را از دست می‌دهد. لذا استفاده از مقاطع CFST محاط در بتن توصیه می‌شود. در سالیان اخیر یک نمونه جدید کامپوزیت سیمان مهندسی ECC، محاط شده در ستون CFST مورد استقبال قرار گرفته است. کای و همکاران طی مطالعات آزمایشگاهی، نمونه‌های CFST محاط در ECC را تحت بارگذاری چرخه‌ای تا مرحله خرابی ستون‌ها بررسی نمودند. به کمک مدل‌های FEA آنالیز شده نمودار بار-تغییر مکان و همچنین ظرفیت نهایی ستون‌ها محاسبه می‌گردد.

به نظر می‌رسد اجرای ستون‌های CFST محاط در ECC می‌تواند گزینه مناسبی برای صنعت ساختمان سازی و پل سازی باشد. البته بایستی ملاحظات اقتصادی را نیز اعمال نمود.



1. Li, V.C., Advances in ECC research. ACI Special Publications, 2002. 206: p. 373-400
  2. Zhao, X.-L., R. Grzebieta, and M. Elchalakani, Tests of concrete-filled double skin CHS composite stub columns. Steel and Composite Structures, 2002. 2(2): p. 129-146
  3. Xiao-Ling Zhao, Lin-Hai Han and Hui Lu, Concrete-filled Tubular Members and Connections, Routledge
  4. Standard Australia, 1996, Structural steel – Hot, rolled plates, floor plates and slabs, Australia/New Zealand Standard AS/NZS3678 (Sydney: Standard Australia)
  5. BSI, 2005, Steel, concrete and composite bridge, BS5400, Part 5: Code of practice for design of composite bridge (London: British Standards Institution).
  6. DBJ13-51, 2003, Technical specification for concrete-filled steel tube tubular structures (Fuzhou: The Construction Department of Fujian Province).
  7. Park, S., EN 1994-Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. 1994
  8. Yang, Y.F. and L. Han, Concrete filled steel tube (CFST) columns subjected to concentrically partial compression. Thin-Walled Structures, 2012. 50(1): p. 147-156
  9. Mao, X. and Y. Xiao, Seismic behavior of confined square CFT columns. Engineering structures, 2006. 28(10): p. 1378-1386
  10. Lam, D. and C.A. Williams, Experimental study on concrete filled square hollow sections. Steel and Composite Structures, 2004. 4(2): p. 95-112
  11. Hu, H.-T., et al., Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. Journal of Structural Engineering, 2003. 129(10): p. 1322-1329
  12. Li, M., Multi-Scale Design for Durable Repair of Concrete Structures, 2009.
  13. Cai, J., et al., Experimental study on the hysteretic behavior of ECC-encased CFST columns. Engineering Structures, 2018. 173: p. 107-121
  14. Cai, J., J. Pan, and X. Li, Behavior of ECC-encased CFST columns under axial compression. Engineering Structures, 2018. 171: p. 1-9
  15. Paegle, I. and G. Fischer. Evaluation of test methods used to characterize fiber reinforced cementitious composites. in The International Scientific Conference
  16. Zhang, Z., J. Hu, and H. Ma, Feasibility study of ECC with self-healing capacity applied on the long-span steel bridge deck overlay. International Journal of Pavement Engineering, 2019. 20(8): p. 884-893
  17. Cai, J., et al., Behavior of ECC-encased CFST columns under eccentric loading. Journal of Building Engineering, 2020. 30: p. 101188.
  18. Tambusay, A., et al., Finite Element Analysis on the Behavior of Slab-Column Connections using PVA-ECC Material. Jurnal Teknologi, 2017. 79(5).
  19. Song, T.-Y., L.-H. Han, and H.-X. Yu, Concrete filled steel tube stub columns under combined temperature and loading. Journal of Constructional Steel Research, 2010. 66(3): p. 369-384.
  20. Sümer, Y. and M. Aktaş, Defining parameters for concrete damage plasticity model. Challenge Journal of Structural Mechanics, 2015. 1(3): p. 149-155.
  21. Abaqus 6.14 Documentation, Abaqus/CAE Users Guide
  22. Moon, J., et al., Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes. Engineering structures, 2012. 42: p. 349-361.
  23. Zhang, Q. and M.S. Alam, Evaluating the seismic behavior of segmental unbonded posttensioned concrete bridge piers using factorial analysis. Journal of Bridge Engineering, 2016. 21(4): p. 04015073.
  24. AISC (2005), Commentary on the Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc.
۲۵. مستوفی نژاد، داوود، سازه‌های بتن آرمه، نشر ارکان، تهران، جلد اول، ویرایش دوم، سال انتشار ۱۳۹۰.
۲۶. سروش‌نیا، سهیل، بهشتیان، نیما، کامل‌ترین مرجع کاربردی ABAQUS، سطح مقدماتی، ۱۳۹۷.
۲۷. محسن احمدی، مرتضی نقی‌پور، بررسی مدل عددی و آزمایشگاهی میزان تاثیر سطح محصور شدگی بتن بر ظرفیت باربری ستون‌های فولادی مدفون در بتن مسلح تحت بار خارج از مرکز، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۹۹.