

مطالعات نظری و آزمایشگاهی افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن‌های پر مقاومت

محمد قاسم وتر*

استاد یار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهدی سعیدیان

کارشناسی ارشد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

حمیدرضا محمدی

کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد

چکیده

با پیشرفت‌های انجام شده در زمینه بتن، امروزه ساخت بتن پر مقاومت چندان سخت نیست و تنها هزینه‌ی ساخت بسته به نوع و میزان مواد افزودنی افزایش می‌یابد. با این وجود در کارهای اجرایی، ساخت بتن با مقاومت فشاری بیش از ۶۰ تا ۷۰ مگاپاسکال به شکل کارا ساخت و هزینه بر است. افزایش مقاومت بتن شکل پذیری آن را کم کرده و سبب رفتار ترد شکن در بتن می‌شود. برای اینکه بتوان همراه با افزایش مقاومت بتن شکل پذیری آن را نیز افزایش داد، محصور سازی بتن با پوشش‌های فیبر کربن و فیبر شیشه پیشنهاد شده است. در این پژوهش رفتار بتن با مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال ساخته شده با سنگ دانه‌های غیر استاندارد موجود در اغلب کارگاه‌های ساختمانی محصور شده با پوشش‌های فیبر کربن مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. رفتار این نوع بتن با استفاده از روش‌های تحلیلی ارائه شده توسط محققین این زمینه نظیر آنارد و سیان مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل رفتاری حاصل از محاسبات تحلیلی بتن پر مقاومت و بتن پر مقاومت محصور شده با مطالعات آزمایشگاهی تطابق مناسبی داشته است. نتایج به دست آمده نشانگر تأثیر زیاد پوشش فیبر کربن در میزان شکل پذیری و مقاومت فشاری بتن بوده است. با این روش، ساخت بتنی پر مقاومت، اقتصادی و کاملاً اجرایی با مقاومت فشاری بالای ۱۰۰ مگاپاسکال و شکل پذیری بسیار عالی محقق شده است.

واژه‌های کلیدی: : محصور سازی بتن، پلیمر مسلح شده، بتن پر مقاومت.

* نویسنده مسئول: vetr@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

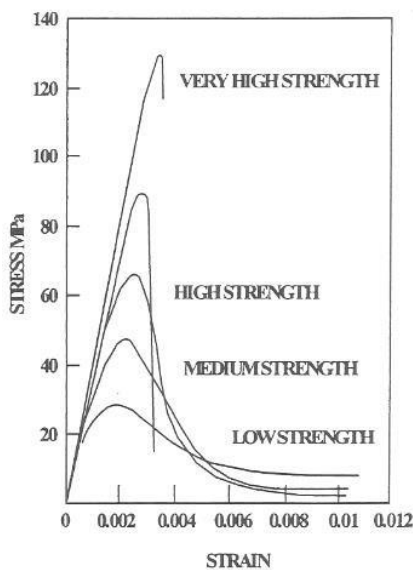
- کاهش ابعاد المان‌های سازه و همچنین افزایش مقاومت بتن منجر به شکست بدون پیش آگهی بتن و محدودیت میلگرد گذاری می شود، با استفاده از پوشش‌های فیبر کربنی شکست بدون پیش آگهی بتن به مقاومت‌های به مراتب بالاتری منتقل شده و محدودیت میلگرد گذاری نیز حل می شود.

۱-۲- شکل پذیری

از مهم ترین ویژگی های سازه در مقابله با زلزله، رفتار شکل پذیر آن است. به عبارت دیگر هر سازه مقاوم در برابر زلزله باید هم در سطح المان ها و همچنین در سطح کل سازه شکل پذیر باشد. شکل پذیری هر عضو به معنای توان تحمل تغییر شکل های غیر ارتجاعی نسبتاً بزرگ بدون تغییر چشمگیر در مقاومت عضو می باشد که با این رفتار، مقدار انرژی زیادی را به دلیل رفتار هیستریزس تلف خواهد شد. در آیین نامه اروپایی EC81995 [۳]، شکل پذیری اعضا بر اساس شکل پذیری انحنایی آنها در حالتی که افت مقاومت در منحنی $M-\phi$ کمتر از ۱۵ درصد باشد، تعریف شده است.

۱-۳- رفتار بتن تحت بار های یکنواخت (Monotonic)

در شکل ۱ رفتار تنش- کرنش بتن با مقاومت های مختلف تحت بار محوری نمایش داده شده است. چنانچه از شکل قابل برداشت است، هر چه بر مقاومت بتن اضافه شود از شکل پذیری آن کاسته می شود، هر چند ممکن است انرژی مستهلک شده تغییر زیادی نکند.



شکل ۱- روابط تنش- کرنش بتن با مقاومت های مختلف تحت فشار تک محوری [۴]

ساخت بتن های پرمقاومت امروزه در آزمایشگاه مرز ۸۰۰ مگاپاسکال را درنوردیده است [۱]. از سوی دیگر با افزایش مقاومت فشاری بتن، شکل پذیری بتن کاهش می یابد [۲]. به طور معمول اغلب مقاله های ارائه شده در زمینه بتن مربوط به سنگ دانه های با دانه بندی استاندارد هستند. اما در عمل در اغلب کارگاه های ایران (به ویژه در مناطق خشک) به دلیل کمبود رودخانه های بزرگ و مولد شن و ماسه طبیعی مناسب، سنگ دانه های شکسته تولید و به کار برده می شود. اما چون هزینه شکستن سنگ مادر و تولید سنگ دانه ها با دانه بندی استاندارد زیاد است، اغلب شاهد ماسه هایی با ضریب نرمی بالاتر از ۳٫۲ تا ۴ هستیم. با توجه به اینکه افزایش ضریب نرمی دشواری های زیادی را در تهیه بتن با کارایی مناسب ایجاد می نماید، برای رسیدن به بتن های پمپ پذیر به خصوص در مواردی که شبکه میلگردها فاصله کمی دارند گاه لازم است عیار سیمان را همراه با افزودن مواد روان کننده و یا ژل میکروسیلیس افزایش داد. بالا بردن عیار سیمان سبب می شود سهم سنگ دانه ها در تعیین رفتار تنش- کرنش بتن کمتر شده و سهم خمیره (نسبت به حالت های ساخت با سنگ دانه استاندارد) بیشتر شود. با افزایش خمیره میزان درهم قفل شدگی سنگ دانه ها کاهش می یابد و مقاومت بتن تاثیر بیشتری از خمیره می گیرد. این موارد در بسیاری از بتن ریزی ها دیده می شود. لذا در این پژوهش از سنگدانه های معمول مورد استفاده در کارگاه های ساختمانی ایران استفاده شده است تا نتایج حاصل هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک شود.

۱-۱- هدف

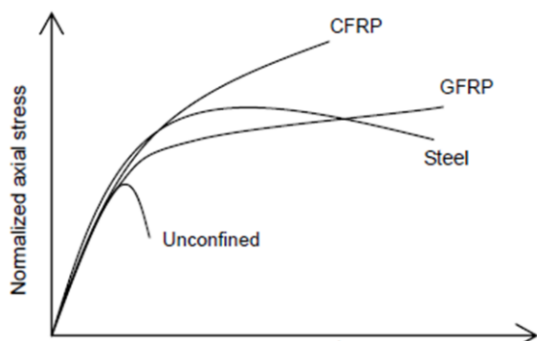
با بالارفتن مقاومت فشاری بتن، شکل پذیری آن کاهش می یابد. در این پژوهش سعی شده است با ترکیباتی که در کارگاه های ساختمانی ایران، قابل اجرا باشد به بتنی پر مقاومت دست یافته شود. در ادامه اثر محصور شدگی نمونه های ساخته شده با الیاف کربن با تعداد دور مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. انتظار می رود این محصور شدگی به بهبود رفتار نمونه ها منجر شود. استفاده از بتن پر مقاومت شکل پذیر مزایایی دارد که در ادامه به چند مورد آن اشاره شده است.

- کاهش ابعاد المان‌های بتنی ساخته شده با بتن پرمقاومت
- شکل پذیری و میزان جذب انرژی بیشتر قبل از انهدام اعضای سازه

۱- افزایش مقاومت بتن: اگر بتن به نحو مناسبی محصور شده باشد، بر اثر نیروهای لرزه ای بتن محصور شده بخوبی مقاومت خواهد کرد. معمولاً اگر کرنش سطح خارجی المان های سازه به حدود $0/004$ برسد بتن پوشش خرد و پراکنده خواهد شد. در نتیجه اثر محصور شدگی در اعضای سازه ای به ویژه در ستون ها، باعث افزایش مقاومت آنها خواهد شد.

۲- محصور شدن بتن کمک می کند تا قسمت دوم منحنی تنش-کرنش از شیب کمتری برخوردار شود و در نتیجه کرنش مرحله نهایی و سطح زیر منحنی که مبین استهلاک انرژی است در حد قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

در شکل ۳، تفاوت بتن محصور شده با فولاد و بتن محصور شده با دو نوع پلیمر الیاف دار دیده میشود. هر چند فولاد سبب افزایش تنش بیشینه میشود اما پس از عبور از مقدار بیشینه، مقدار تنش با شیب منفی کاهش می یابد. اما پلیمر الیاف دار به سبب رفتار کاملاً الاستیک با افزایش کرنش محوری ستون، تنش بیشتری را به خود میگیرد و سبب رفتار بهتر ستون میشود.



شکل ۳- نمودار تنش کرنش بتن محصور نشده و محصور شده [۷]

۱-۵- پلیمر مسلح شده با الیاف (FRP^۱)

الیاف FRP مصالحی پارچه ای شکل هستند که فیبرهای آن در یک یا چند جهت قرار دارند. معمولاً آرایش یک جهتی الیاف پلیمری FRP دارای مقاومت و مدول بالاتری (در جهت الیاف) نسبت به سایر آرایش ها می باشد. البته عملکرد این آرایش ارتوتروپیک است. این در حالیست که در آرایش چند جهتی با اینکه رفتار شبه ایزوتروپ است اما مقاومت و مدول در هر جهت کمتر از حالت آرایش یکطرفه الیاف FRP می باشد. چنانچه الیاف

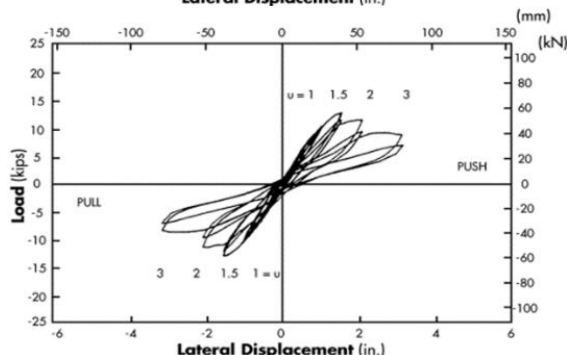
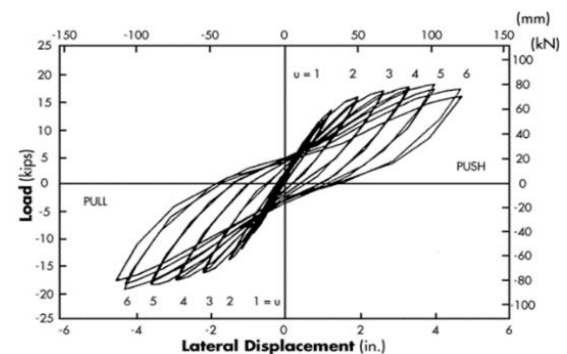
۱-۴- بتن محصور شده

در بر گرفتن هسته مرکزی یک عضو سازه بتن مسلح به وسیله یک عامل درونی مثل آرماتورهای عرضی در داخل بتن یا عامل بیرونی نظیر الیاف کربن، دور پیچ خارجی و ورق پوسته های فولادی، موجب محصور شدگی بتن می شود. در اکثر مواقع کرنش فشاری نهایی بتن محصور نشده برای رسیدن به سطح مطلوب شکل پذیری، کافی نمی باشد و نیاز به محصور شدن دارد.

محصور نمودن بتن باعث می شود که شیب قسمت دوم منحنی تنش کرنش بتن (قسمت نزولی) کم شده و در نتیجه کرنش مرحله نهایی افزایش یابد. به این ترتیب جذب انرژی افزایش یافته و شکل پذیری نیز بیشتر خواهد شد.

۱-۴-۱- مزایای محصور شدن بتن

هر اندازه فشار جانبی بر بتنی که زیر بار محوری قرار دارد افزایش یابد، توان باربری و جذب انرژی بتن افزایش می یابد. محصور کردن بتن بر رفتار لرزه ای سازه های بتن مسلح اثر قابل توجهی می گذارد [۵]. برای نمونه، تفاوت ستون بتنی محصور شده با الیاف کربن و محصور نشده در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمودار نیرو - جابجایی ستون بتنی بدون پوشش فیبر کربن

- نمودار نیرو - جابجایی ستون بتنی با پوشش فیبر کربن [۶]

^۱ Fiber Reinforced Polymer

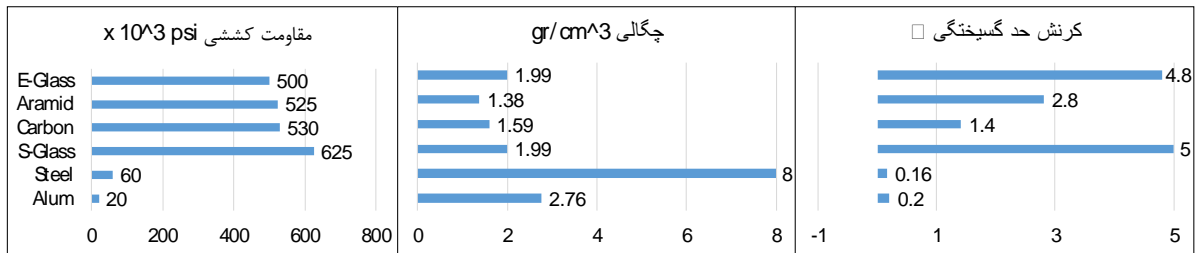
- ضخامت کم
 - ظرفیت جذب ارتعاشات
 - حمل و نقل آسان و سرعت اجرای بالا به دلیل وزن کم
 - اقتصادی بودن
- معایب FRP:

- حساس به خزش و سایش در هنگام نصب
- ایجاد پدیده ترد شکنی
- پایین بودن ضریب ارتجاعی [۹]

انواع الیاف FRP مورد استفاده در مصالح کامپوزیتی FRP شامل: الیاف پلیمری کربن، الیاف پلیمری شیشه، الیاف پلیمری آرامید و الیاف پلیمری بازالت هستند که محصولات کامپوزیتی آن‌ها به ترتیب با نام‌های الیاف کربن CFRP، الیاف شیشه GFRP، الیاف آرامید AFRP و الیاف بازالت BFRP شناخته می‌شوند. برخی ویژگی‌های این مواد در مقایسه با فولاد و آلومینیوم در شکل ۴ آورده شده است.

همانگونه که اشاره شد قسمت عمده ظرفیت باربری مصالح FRP بر عهده الیاف FRP می‌باشد. به همین دلیل آن‌ها می‌بایست مقاومت گسیختگی و مدول الاستیسیته بالا، قابلیت تغییر طول کافی و نیز مقاومت کافی در برابر شرایط محیطی داشته باشند. مزایا FRP:

- وزن کم و عدم اعمال بار ثقلی اضافه
- مقاومت مشخصه و مدول الاستیسیته بالا
- مقاومت در برابر شرایط محیطی مخرب
- عدم هدایت جریان الکتریکی و حرارتی
- مقاومت کششی بالا



شکل ۴- برخی ویژگی‌های مکانیکی گونه‌های FRP [۵]

برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای از قالب‌های فولادی استاندارد استفاده شده است. کلیه نمونه‌ها پس از ساخته شدن به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و با رطوبت تقریباً ۷۰ درصد نگهداری شده‌اند و سپس نمونه‌ها از قالب خارج گردیده و به حوضچه نگهداری منتقل شده‌اند. در حوضچه نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب با دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه نگهداری شده‌اند. پس از پایان ۲۸ روز چهار نمونه‌ی شاهد مورد بارگذاری قرار گرفته است.

۲-۲- کپینگ و اجرای بتونه

به دلیل عدم امکان استفاده از گوگرد برای کپینگ بتن پر مقاومت، بر روی یک نمونه استوانه‌ای کوچک از رزین دو جزئی با نام چسب میکا، آزمایش بارگذاری انجام شد. برای این نمونه استوانه‌ای به طول ۲ و قطر

۲- روش کار پژوهش

۲-۱- ساخت و عمل آوری بتن

طرح اختلاط و ویژگی‌های بتنی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است به شرح جدول ۱ بر گرفته از مرجع [۱۰] می‌باشد. در این طرح اختلاط ماکزیمم اندازه دانه‌های شن ۲۰ میلی‌متر بوده است. جنس سنگدانه‌ها سنگ آهک بوده است. این سنگدانه‌ها علاوه بر اینکه در اغلب جاهای ایران یافت می‌شوند از استحکام خوبی نیز برخوردارند. سیمان مورد استفاده در این طرح اختلاط، سیمان تپ دو می‌باشد. ژل میکروسیلیس مورد استفاده از نوع AP2RB ساخت شرکت فن آوران بتن ایرانیان بوده است. که ژل سیلیکافیوم (ژل میکروسیلیس) برای ایجاد الیاف در بتن الیافی و همچنین ایجاد الیاف پلی پروپیلن در بتن استفاده می‌گردد.

فیبر کربن مورد استفاده در این طرح ساخت شرکت زولتک^۱ و از نوع panex35uD200 بوده است. مشخصات این نوع از فیبرهای رشته‌ای کربن مطابق با آنچه کارخانه‌ی سازنده ارائه نموده است در جدول ۲ آورده شده است [۱۲]. ضخامت پوشش فیبر کربن استفاده شده در پژوهش ۰/۴۳ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات کارخانه‌ای پوشش FRP [۱۲]

ه ویژگی	SI	گیراندازووش
کنشی مقاومت	۱۴۴۹ Mpa	DIN EN ISO 527
کنشی مدول	۱۲۶ G pa	DIN EN ISO 527
فشاری مقاومت	۸۰۹ Mpa	ASTM D694
فشاری مدول	۱۰۷ G pa	ASTM D695

۲-۴- روش اندازه گیری و انجام آزمایش

پارامترهایی که نیاز است در آزمایش‌های این پژوهش استخراج شود، شامل کرنش قائم، کرنش جانبی و نیروی فشاری می‌باشد. همچنین، تعداد لایه FRP دور نمونه‌ها از پارامترهای متغیر آزمایش است که از بدون پوشش تا دولایه پوشش تغییر کرده است. از آنجا که برای تست نمونه‌های آماده شده از دستگاه تست مقاومت فشاری بتن استفاده می‌شود، کرنش قائم و نیروی فشاری به سادگی قابل اندازه‌گیری است. پارامتر مهم دیگری که در این بررسی برای ما حائز اهمیت است و دستگاه تست مقاومت فشاری آن را به صورت خروجی در اختیار ما نمی‌گذارد، کرنش جانبی نمونه است. برای اندازه‌گیری تغییر قطر نمونه از سیستمی قیچی شکل مشابه شکل ۵ که مجهز به میکرومترهایی با دقت یکصدم میلی‌متر است، استفاده شده است. به دلیل قیچی شکل بودن سیستم اندازه‌گیری تغییرات قطر نمونه محل نصب دستگاه اندازه‌گیر از اهمیت خاصی برخوردار است. دو انتهای نمونه‌های استوانه‌ای یعنی محل تماس بتن با فک‌های بالا و پایین جک بتن شکن به دلیل فشار زیاد وارده به بتن از میزان اصطکاک بالایی برخوردار هستند. این میزان از نیروی اصطکاک سبب ایجاد نوعی محصور کنندگی در هنگام بارگذاری محوری بر روی دو انتهای نمونه‌ی استوانه‌ای می‌شود [۱۳]. بنابراین تنها بخش میانی نمونه‌ی استوانه‌ای شرایط آزمایش تک محوری را دارا می‌باشد و بخش‌های بالایی و پایینی نمونه‌ی استوانه‌ای در عمل آزمایش

۵ سانتیمتر مقاومت ۱۵۰ مگاپاسکال ثبت شد. ضخامت لایه کپینگ حداکثر به ۲ تا ۳ میلی‌متر به طور موضعی می‌رسد. پس از انجام کلیه آزمایش‌ها، در هیچ مورد حتی پس از تست نمونه با سه لایه پوشش فیبر کربن لایه نازک کپینگ صدمه ندیده است. برای جلوگیری از تشکیل حباب منبسط شده در زیر پوشش FRP، می‌بایست سطح بتن، بتونه شود و با سمباده زدن کاملاً صاف و صیقلی گردد.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن پژوهش [۱۰]

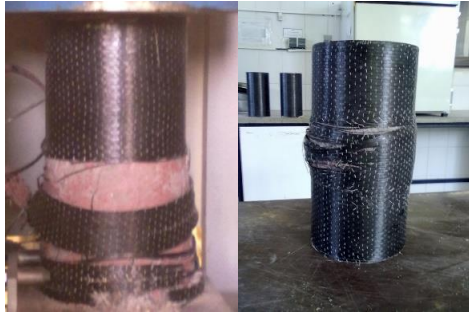
مقدار (Kg/m3)	مصالح
۴۱۰	سیمان
۴۱	ژل میکروسیلیس
۱۱۲۵	شن
۶۷۵	ماسه
۱۲۳	آب

مقدار	ویژگی
۰.۳	نسبت آب به سیمان
۲۴۳۲ (Kg/m3)	وزن مخصوص
۵۵-۶۰ (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه
۱۰ (mm)	اسلامپ

۲-۳- اجرای پوشش فیبر کربن و عمل آوری

نمونه‌های مورد نظر برای اجرای پوشش FRP ابتدا به مدت یک هفته خارج از آب نگهداری شده‌اند و سپس سطح نمونه به رزین آغشته شده است در همین حال پوشش FRP به طور کامل به رزین آغشته شده است به گونه‌ای که رزین به خوبی لابلای رشته‌های فیبر کربن قرار گرفته است. پس از این مرحله و زمانی که حالت روانی رزین کمی کاهش پیدا کرده است پوشش FRP با استفاده از برس و غلتک بر روی نمونه‌ها اجرا شده است. میزان همپوشانی پوشش FRP در زمان اجرا بر روی نمونه‌ها ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. این مقدار بر مبنای مطالعات شیخ و یائو ۲۰۰۲ [۱۱] انتخاب شده است. پس از اجرای پوشش کربنی، به مدت یک هفته نمونه‌ها در دمای اتاق برای خشک شدن قرار داده می‌شوند. در این مدت نمونه‌های شاهد در پوشش پلاستیکی به منظور ایجاد شرایط مشابه با نمونه‌های پوشش داده شده نگهداری شدند.

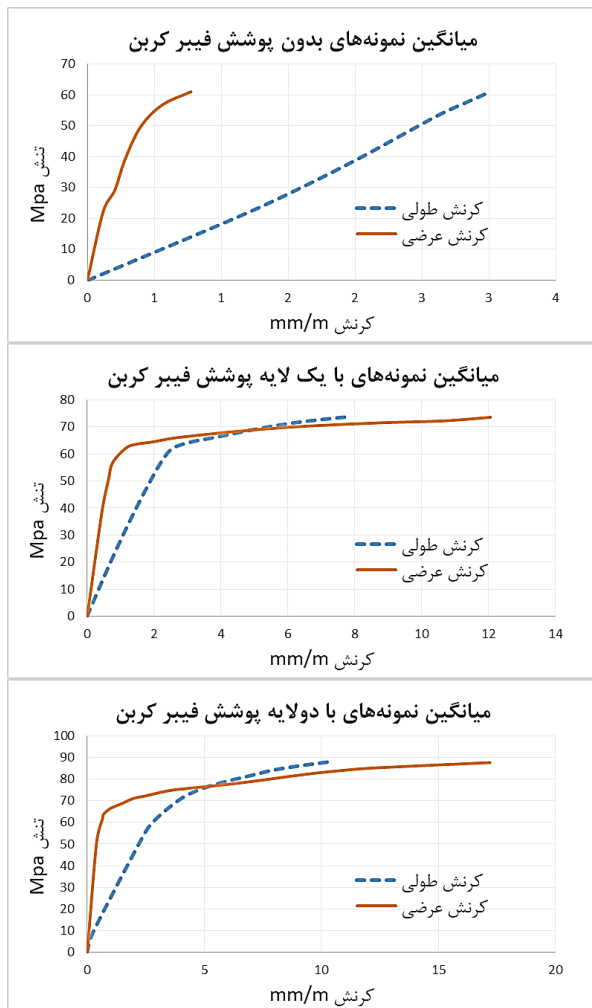
¹ Zoltek



شکل ۷- نمونه های بتن با پوشش کربن شکست شده در دستگاه فشار محوری

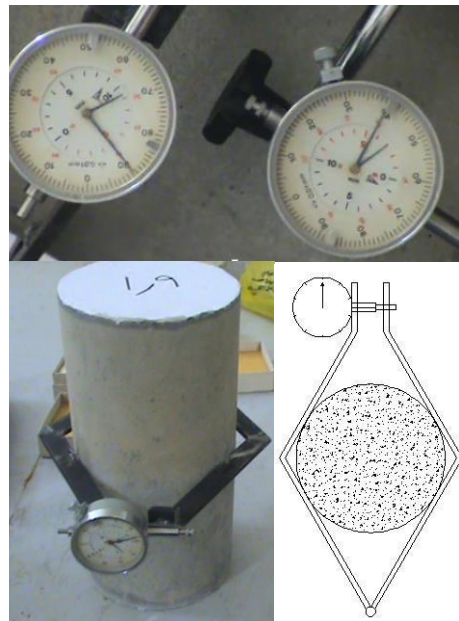
۳- نتایج بدست آمده

هر مرحله آزمایش بر روی ۴ نمونه انجام و اطلاعات آن ثبت گردید. میانگین رفتار تنش-کرنش حاصل از انجام آزمایش برای حالت محصور شده با یک و دو لایه از الیاف کربن و محصور نشده در شکل ۸ آورده شده است. مقادیر بیشینه کرنش طولی، کرنش جانبی و مقاومت فشاری این سه حالت نیز در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۸- میانگین نمونه های بتن بدون پوشش، با یک لایه پوشش و دو لایه پوشش فیبر کربن (تعداد نمونه هر حالت ۴ عدد)

سه محوری را پشت سر می گذارند. بنابراین برای فهم درست رفتار بتن لازم است اندازه گیرهای قطری در وسط ارتفاع استوانه نصب گردند. به منظور ثبت مستمر داده های میکرومترها، فیلمبرداری پیوسته و همزمان از میکرومترها و صفحه ی دیجیتال جک بارگذاری انجام گردیده است. داده های موجود در فیلم های گرفته شده به صورت جداول عددی پیاده گردیده و مورد بررسی قرار گرفته است. آهنگ بارگذاری جک بتن، ۴۵۰ کیلوگرم بر ثانیه در هنگام آزمایش تنظیم گردیده است. این تست برای سه حالت محصور نشده و محصور شده با یک و دو لایه پوشش کربن انجام شد.

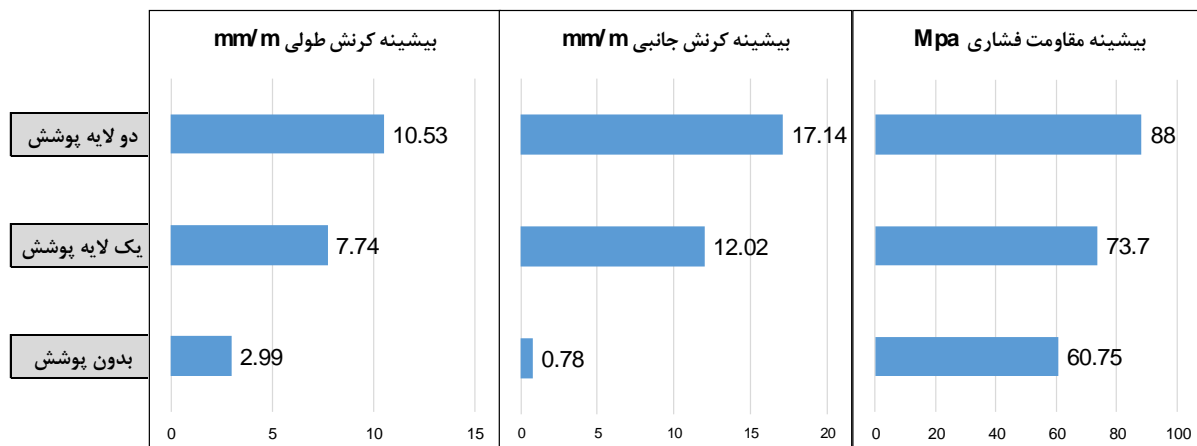


شکل ۵- نصب میکرومتر برای سنجش تغییر قطر نمونه - میکرومتر با دقت یکصدم میلیمتر

در شکل ۷، تعدادی از نمونه های محصور شده با پوشش کربن پس از گسیختگی در دستگاه فشار محوری نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمونه شاهد خرد شده در دستگاه فشار محوی بتن



شکل ۹- میانگین بیشینه کرنش طولی و جانبی و مقاومت فشاری سه حالت بررسی شده

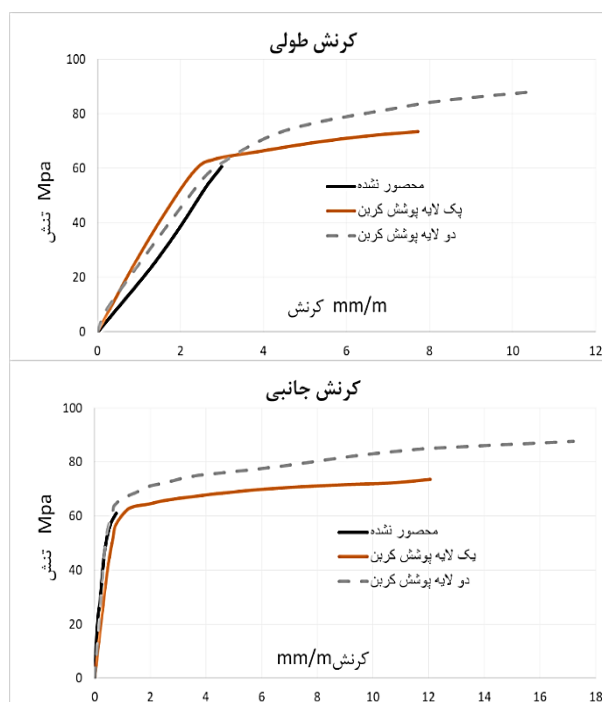
جدول ۳- نسبت پارامترهای مورد بررسی در حالت محصور شده

تعداد لایه پوشش	نسبت کرنش طولی	نسبت کرنش جانبی	نسبت مقاومت فشاری
یک لایه پوشش	۲/۶	۱۵/۴	۱/۲
دو لایه پوشش	۳/۵	۲۲/۱۰	۱/۴

به حالت محصور نشده

۴- بحث و تحلیل نتایج

رفتار سه حالت مورد بررسی، در شکل ۱۰ با هم مقایسه شده است. مشاهده می شود که رفتار شکل پذیر آنها تا حد زیادی بهبود یافته است.



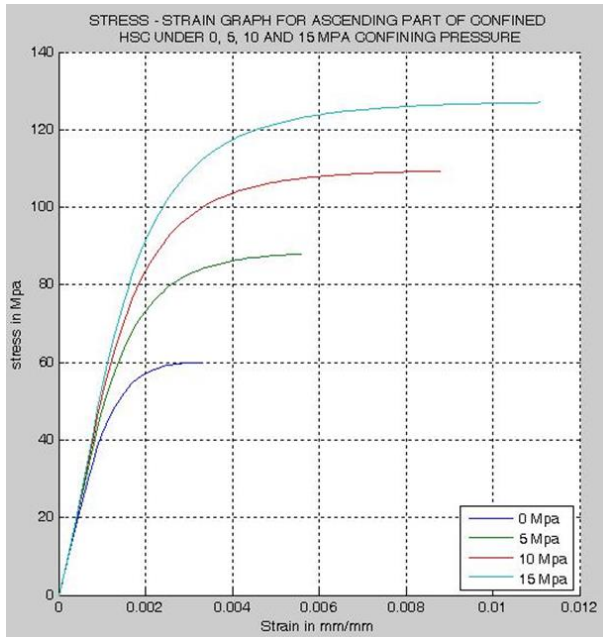
شکل ۱۰- کرنش طولی و جانبی حاصل از سه حالت آزمایش انجام شده

۴-۱- مدل تحلیلی

بیشتر محققانی که با بتن محصور شده کار کرده اند، رفتار بتن محصور شده با این گونه پوشش ها را در قالب یک مدل دو خطی دیده و مدل سازی کرده اند. البته در پاره ای از تحقیقات رفتارهای غیر دوخطی نیز گزارش شده است. در این تحقیق همه ی نمونه هایی که مورد آزمایش قرار گرفتند رفتاری دو خطی از خود نشان دادند. رفتار فراشکستی نمونه ها (رفتار تنش کرنش نمونه ها پس از عبور از بیشینه ی تنش قابل تحمل نمونه و پس از شکست نمونه) به دلیل شکست انفجاری و ناگهانی نمونه ها قابل بررسی نبوده است.

رفتارهایی که در آن کنش فراشکستی دیده می شود مربوط به نمونه های بتن با درجه ی محصور شدگی پایین می باشد. بتن هایی که به میزان محصور شدگی بالایی دارند، رفتار دو خطی از خود نشان می دهند. چنانچه میزان محصور شدگی متوسط باشد، رفتار نمونه هم حد واسط حالت دو خطی و حالت فرا شکستی خالص خواهد بود. همانگونه که از شکل ۸ دیده می شود، رفتار همه ی نمونه های کار

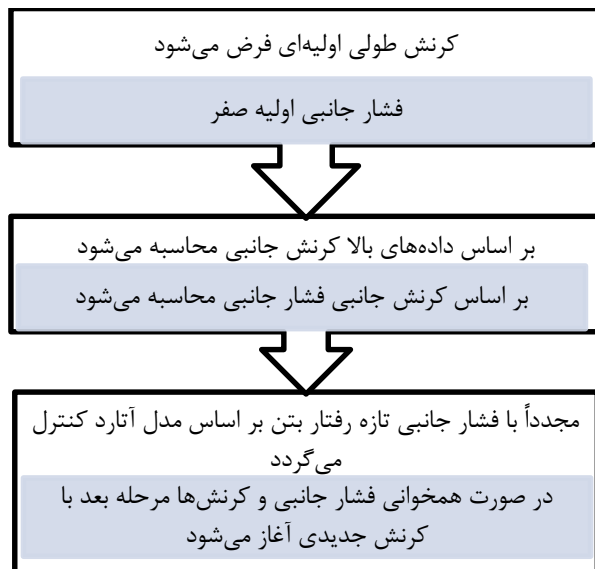
در جدول ۳ نسبت بهبود هر یک از پارامترهای مورد بررسی نسبت به حالت محصور نشده آورده شده است. در حالت دو لایه پوشش کرنش مقاومت فشاری تا ۱/۴، کرنش جانبی تا ۲۲ و کرنش طولی تا ۳/۵ برابر حالت محصور نشده شده است.



شکل ۱۱- مدل تحلیلی بتن پر مقاومت تحت فشار محصور کنندگی ثابت

۴-۴- مدل تحلیلی بتن پر مقاومت تحت فشار محصور کنندگی متغیر حاصل از پوشش فیبر کربن

برای بررسی تحلیلی اثر پوشش فیبر کربن بر رفتار بتن پر مقاومت، از فلوجارت ارائه شده توسط Cuiyan Cui 2009 استفاده شده است. مراحل انجام کار طبق روند ارائه شده توسط این محقق در شکل ۱۲ آورده شده است. [۲]



شکل ۱۲- روند تحلیلی بتن پر مقاومت تحت فشار محصور کنندگی متغیر حاصل از پوشش فیبر کربن پیشنهادی Cuiyan Cui [۲]

شده نزدیک به رفتار دو خطی می‌باشد. به منظور رسیدن به مدلی تحلیلی که بتواند رفتار بتن پر مقاومت را پس از محصور شدن با پوشش فیبر کربن پیش بینی کند، در آغاز بایستی رفتار بتن محصور شده را زیر فشار محصور کنندگی ثابت مورد بررسی قرار داد.

۴-۲- ارزیابی مدل تحلیلی جهت کارهای اجرایی

در این بخش و به منظور ارزیابی راه حلی برای برآورد رفتار بتن در کارهای اجرایی و با توجه به اینکه در عمل گسیختگی پوشش پلیمر مسلح شده انهدام نمونه بتنی را نشان می‌دهد، با تغییراتی به منظور ساده سازی مدل ارزیابی شده توسط سیان سویی و نیز استفاده از مدل آتارد و همکاران، مدلی اجرایی برای بررسی رفتار تنش کرنش بتن مقاومت ارزیابی شده است.

برای بررسی دقیق تر و توسعه خروجی های آزمایشگاهی، از یک مدل تحلیلی مبتنی بر کد نویسی و فلوجارت استفاده شده است. این روش قابلیت مانور فراوان دارد اما به فرمول ساده‌ای ختم نشده و نیازمند کد نویسی است. امروزه بیشتر محققین از این روش استفاده می‌کنند. تحلیل در دو مرحله انجام شده است:

۱. رفتار بتن پر مقاومت زیر فشار ثابت محصور کننده
۲. رفتار بتن پر مقاومت زیر فشار محصور کننده متغیر حاصل از پوشش فیبر کربن

۴-۳- مدل تحلیلی بتن پر مقاومت تحت فشار محصور کنندگی ثابت

مدل تحلیلی آتارد و همکاران [۱۴] برای رفتار بتن زیر فشار ثابت بنا به گفته اغلب محققین مدل مناسبی است که در این تحقیق از این مدل استفاده شده است.

معادله اصلی تنش کرنش آتارد و همکاران [۱۴]

$$Y = \frac{A_s X + B_s X^2}{1 + C_s X + D_s X^2} \quad Y = \frac{f_c}{f'_{cc}} \quad X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \quad (0 \leq Y \leq 1)$$

$$A_s = \frac{E_{ti} \epsilon'_{cc}}{f'_{cc}}, \quad B_s = \frac{(A_s - 1)^2}{\alpha \left(1 - \frac{f_{pl}}{f'_{cc}}\right)} + \frac{(A_s - 1)^2}{\alpha^2 \frac{f_{pl}}{f'_{cc}} \left(1 - \frac{f_{pl}}{f'_{cc}}\right)} - 1$$

$$C_s = (A_s - 2), \quad D_s = (B_s + 1)$$

$E_{ti} = 1.085 E_c$ ، مدول الاستیسیته بتن در تنش صفر است

$$0.45 * f'_{co} = f_{pl}, \quad \alpha = E_{ti} / E_c$$

$$f'_{co} = 60 \text{ Mpa} \quad \text{مقاومت بتن محصور نشده}$$

$$E_c = 8300 * f'_{co}^{0.35} \quad [15]$$

۵- نتیجه گیری

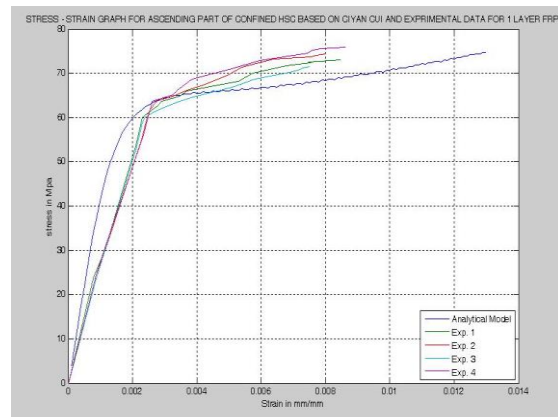
همان گونه که پیش تر نیز ذکر شد بتن مورد مطالعه در این تحقیق با توجه به محدودیت های کارگاهی ساخته شده است. چنین بتن هایی تفاوت های زیادی با بتن های آزمایشگاهی با دانه بندی استاندارد دارند. برای نمونه، برشی شدن اسلامپ در زمان استفاده از سنگدانه های شکسته (بوئزه ماسه شکسته) استفاده از فیلر یا افزایش شیره بتن با مواد افزودنی یا سیمان را اجتناب ناپذیر می کند. چنین تغییراتی در طرح اختلاط بر روی رفتار بتن تاثیر چشمگیری می گذارد. یکی از اهداف مطالعه حاضر اعتبار سنجی معادلات کنونی موجود در مقالات معتبر برای استفاده در کارهای اجرایی بوده است. پوشش های فیبر کربن بر روی بتن های معمولی که در کارگاه های ساختمانی موجود در ایران ساخته می شوند به خوبی عمل نموده و الگوریتم های مورد بررسی در این مطالعه به نحو مطلوبی مقدار مقاومت نهایی اینگونه بتن ها را نشان می دهند.

ساخت بتن پر مقاومت تا مرز ۶۰ و حتی ۷۰ مگاپاسکال بدون مطالعات خاص و تمهیدات ویژه در هر کارگاهی با استفاده از افزودنی های تولید داخل میسر است. برای بتن های با مقاومت بالاتر علاوه بر نیاز به دانه بندی های ویژه و مناسب نیاز به بررسی برهم کنش مواد افزودنی با دیگر اجزای بتن به منظور رسیدن به بتن با کارایی مناسب می باشد که این موضوع به دلیل محدودیت های موجود در سنگدانه های موجود در هر منطقه ممکن است هزینه های بالایی را متوجه پروژه نماید. از این رو ساخت بتن ۶۰ مگاپاسکال و استفاده از پوشش فیبر کربن می تواند راه کار بسیار مناسبی برای کاهش ابعاد المان های بزرگ بتنی باشد. با این راهکار علاوه بر رسیدن به مقاومت های نزدیک به ۱۰۰ مگاپاسکال شکل پذیری بالایی نیز در رفتار بتن حاصل خواهد شد.

در پیچیدن پوشش های فیبر کربن به منظور محصور سازی بتن بایستی دقت ویژه ای به رفتار عضو در هنگام بارگذاری معطوف گردد. پوشش های فیبر کربن از آنجا که تنها در کشش قادرند توانایی های زیاد خود را بروز دهند، چنانچه در بخش هایی از سازه به کار روند که پوشش فیبر کربنی در هنگام بارگذاری نتواند وارد فاز کشیدگی شود، در عمل ممکن است تنها اتلاف هزینه را به دنبال داشته باشند.

مطابق با نتایج آزمایشگاهی و داده های تحلیلی مدل تحلیلی سیان سویی در برآورد مقاومت نهایی بتن با پوشش فیبر کربن خوب

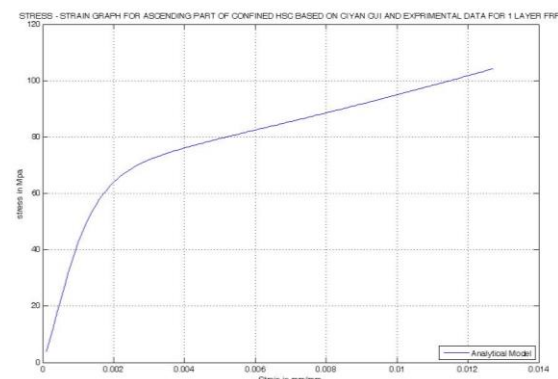
نتایج به صورت گرافیکی در شکل ۱۳ و ۱۴ آورده شده است که حاکی از انطباق خوب نتایج آزمایشگاهی حاصل از بررسی ۴ نمونه با نتیجه حاصل از مدل تحلیلی می باشد.



شکل ۱۳- مدل تحلیلی برای نمونه ها با یک لایه پوشش فیبر کربن



شکل ۱۴- مدل تحلیلی برای نمونه های با دو لایه پوشش فیبر کربن با توجه به هم خوانی رفتار آزمایشگاهی و مدل تحلیلی، می توان به صحت مدل تحلیلی برای این آزمایش پی برد و رفتار نمونه محصور شده با ۳ لایه پوشش کربن را مطابق شکل ۱۵ پیش بینی کرد. در این نمودار مشاهده می شود که با استفاده از سه لایه پوشش، مقاومت فشاری بالای ۱۰۰ مگاپاسکال حاصل شده است.



شکل ۱۵- مدل تحلیلی برای نمونه های با سه لایه پوشش فیبر کربن

- [13]. Lu, X. (2005). Uniaxial and triaxial behavior of high strength concrete with and without steel fibers (Doctoral dissertation, New Jersey Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering).
- [14]. Attard, M. M., & Setunge, S. (1996). Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *Materials Journal*, 93(5), 432-442.
- [15]. Mostofinejad, D. (2000). An overview on FRP reinforced concrete as a corrosion resistant element in offshore structures. *Proc. of 4th Int. Con.*

عمل می‌کند و قادر است مقادیر واقعی را با دقت مناسبی پیش بینی کند اما در برآورد کرنش‌ها این مدل تحلیلی با واقعیت، کمی متفاوت است. این امر می‌تواند به دلیل استفاده از از ژل میکروسیلیس الیاف دار برای رسیدن به بتن ۶۰ مگاپاسکال باشد که کرنش‌های بیشتری در بتن نسبت به حالت بدون الیاف حادث شده است

۶- مراجع

- [1]. ACI Committee 363. (2010). Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10). ACI.
- [2]. Cui, C. (2009). Behaviour of normal and high strength concrete confined with fibre reinforced polymers (FRP)(Doctoral dissertation).
- [3]. Code, P. (1995). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization.
- [4]. El-barbary, A., Beshara, F., & Mahmoud, A. (2015). STATE OF ART - High strength Steel Fiber Reinforced Concrete Deep Beams.
- [5]. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Observed stress-strain behavior of confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1827-1849.
- [6]. Kachlakev, D. I. Strengthening Structures Using FRP Composite Materials. California Polytechnic State University, USA.
- [7]. Spoelstra, M. R., & Monti, G. (1999). FRP-confined concrete model. *Journal of composites for construction*, 3(3), 143-150.
- [8]. Busel, J., & White, D. (2003). CFRP and GFRP composite application for infrastructure rehabilitation and repairs. Conference Saratoga. Spring, NY.
- [9]. Smith, S. T., & Teng, J. G. (2002). FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models. *Engineering structures*, 24(4), 397-417.
- [۱۰]. موسی مظلوم. (۱۳۸۵). اثر میکروسیلیس بر روی زمان گیرش بتن پر مقاومت مجله فناوری و آموزش. جلد اول، شماره ۲.
- [11]. Sheikh, S. A., & Yau, G. (2002). Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers. *Structural Journal*, 99(1), 72-80.
- [12]. <http://zoltek.com>

Theoretical and experimental studies on enhancement of strength and ductility of high strength concrete

Mohammad Ghasem Vetr *

Assistant Professor, International Institute of earthquake engineering and seismology

Mahdi Saeidian

Msc, International Institute of earthquake engineering and seismology

Hamid Reza Mohammadi

Msc, Islamic Azad University, Yazd

Abstract

Nowadays, manufacturing of high strength concrete is not an arduous work due to progress of concrete technology. In executive projects, the construction of the concrete with a compressive strength of 60 to 70 MPa is efficient but expensive. Increasing the strength of concrete reduces its ductility and causes brittle behavior in concrete. Confinement of concrete with glass and carbon fiber can decrease the brittle behavior. In this study, the behavior of the concrete with a compressive strength of 60 MPa made with non-standard aggregates in most construction workshops enclosed with carbon fiber coatings was tested. The behavior of this type of concrete was studied using the analytical methods presented by the researchers in this field such as Atard and Ciyan. There is an appropriate adaptation between theoretical and experimental results. The obtained results indicated the high effect of carbon fiber coating on the rate of ductility and compressive strength of concrete. A high-strength, economic, and fully executive concrete with a compressive strength of over 100 MPa and perfect ductility was constructed by this method.

Keywords: Concrete confinement, Fiber Reinforced Polymer, High strength concrete.

* Corresponding Author: vetr@iiees.ac.ir

