

مطالعه آزمایشگاهی اثر محصورشدگی فعال الیاف آرامید بر عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح تحت اثر هم‌زمان بارهای محوری و جانبی

شهلا جدیان

گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

محمد قاضی *

گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مهدی اسفندی سرافراز

گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

یکی از راهکارهای مناسب تقویت سازه‌های بتنی افزایش محصورشدگی بتن است. بتن محصورشده با الیاف پلیمر آرامید (AFRP) دارای رفتار مناسبی از نظر افزایش ظرفیت باربری سازه و شکل‌پذیری است. استفاده از عامل محصورشدگی فعال در اعضای بتنی باعث بهبود عملکرد آن‌ها تحت نیروی فشاری می‌شود. در این تحقیق نتایج بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح دارای محصورشدگی فعال با استفاده از نوارهایی با جنس الیاف AFRP تحت اثر مشترک بار فشاری محوری و بار جانبی رفت و برگشتی ارائه می‌گردد. علاوه بر این ستون‌ها، از یک ستون بدون محصورشدگی (SCR) به‌عنوان نمونه شاهد استفاده شده است. نتایج این پژوهش گویای آن است که ستون‌های دارای محصورشدگی فعال در مقایسه با ستون شاهد به‌دلیل جلوگیری از اتساع بتن و فشار به‌وجود آمده توسط نوارهای مجزای الیافی، از نظر مقاومت فشاری تا ۲۱ درصد و انرژی الاستیک تجمعی تا ۱۲۵ درصد بهبود می‌یابند، لذا می‌توان از این روش در تقویت ستون‌های بتن مسلح استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: محصورشدگی فعال، الیاف پلیمر آرامید، عملکرد لرزه‌ای، شکل‌پذیری.

* نویسنده مسئول: ghazi.m@wtiau.ac.ir

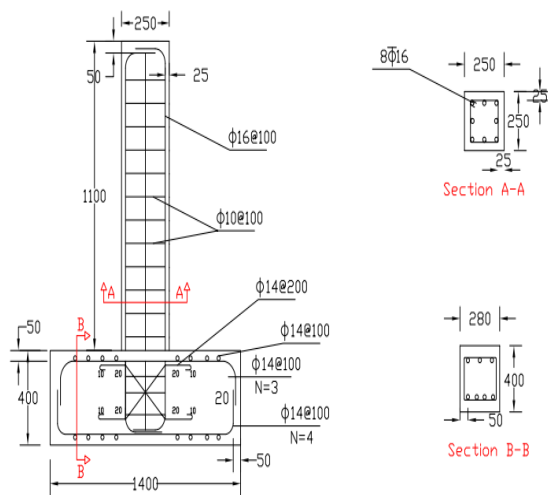
۱- مقدمه

سیستم سازه‌ای ترکیبی با استفاده از الیاف FRP به‌عنوان محصورکننده با بتن منبسط شونده به‌منظور پتانسیل تأخیر در ترک خوردگی بتن و از بین بردن خوردگی فولاد را پیشنهاد کردند. در این پژوهش خواص مکانیکی نمونه‌ها به‌صورت سیستماتیک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مقایسه با نمونه‌های تیر بتنی معمولی، نمونه‌های بتنی با بتن منبسط شونده مقاومت در برابر ترک خوردگی، ظرفیت تحمل بار نهایی و عرض ترک کمتر را نشان می‌دهند [۱۳، ۱۴]. Cao و همکاران رفتار فشاری محوری بتن منبسط شونده، محصورشده با الیاف CFRP را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که بتن منبسط شونده‌ای که با CFRP محصورشده، بارنهایی بالاتری را نسبت به نمونه‌های بتنی معمولی تحمل می‌کند [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ Cao و همکاران مطالعه‌ای را به‌منظور بررسی رفتار فشاری محوری استوانه‌های بتنی محصورشده توسط الیاف GFRP با دو نوع بتن معمولی و منبسط شونده انجام دادند. آن‌ها هجده ستون بتنی محصورشده با GFRP، شامل نه بتن منبسط شونده و نه بتن معمولی به‌عنوان مرجع را در نظر گرفتند و سپس با بارگذاری محوری اثر محصورشدگی فعال و غیرفعال نمونه‌ها را با تعداد لایه‌های مختلف الیاف GFRP بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در مقایسه با مخلوط بتن معمولی، نمونه محصورشده با بتن منبسط شونده به دلیل انبساط بتن و محصورکنندگی GFRP محدوده محیطی فعال خاصی را در نمونه‌ها تولید می‌کند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که به دلیل اثر محصورشدگی FRP و انبساط هسته بتن، مقاومت فشاری و کرنش محوری نهایی نمونه‌های بتن منبسط شونده در مقایسه با نمونه‌های معمولی بهبود یافته است [۱۶]. در سال ۲۰۲۰ Suhail و همکاران روش‌های مختلف محصورشدگی فعال بتن شامل استفاده از الیاف CFRP، BFRP به همراه بتن منبسط شونده و سیم ساخته‌شده از آلیاژ SMA و گرما را باهم مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با وجود مشکلات مربوط به آلیاژ SMA، استفاده از این روش شکل‌پذیری و مقاومت بالاتری را در نمونه‌ها نشان می‌دهد [۱۷].

مطالعه حاضر باهدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر محصورشدگی فعال بر عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتنی توسط AFRP انجام شده است. بدین منظور دو عدد ستون بتنی محصورشده و یک عدد ستون بتنی معمولی به‌عنوان نمونه شاهد مورد استفاده گرفته‌اند. در

مواد پلیمری تقویت‌شده با الیاف (FRP) دارای مزایای بزرگی از جمله استحکام عالی، نسبت به وزن و مقاومت شیمیایی بالا در برابر حملات محیطی بوده و برای محصور کردن بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳]. مطالعات نشان می‌دهد که FRP به‌عنوان ماده‌ای برای روکش خارجی به‌منظور تقویت و مقاوم‌سازی سازه، به دلیل هزینه کم و شکل‌پذیری بالا، مورد قبول است [۴-۶]. استفاده از عامل محصورشدگی فعال در اعضای بتنی باعث بهبود عملکرد آن‌ها تحت نیروی فشاری می‌شود. افزایش محصورشدگی باعث بالا رفتن مقاومت فشاری بتن در هسته و پوسته خواهد شد و در نتیجه ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد، محصورشدگی می‌تواند مانع جلوگیری از کمانش جانبی میلگردهای طولی ستون شود. با ایجاد محصورشدگی ستون‌های بتنی کرنش‌های محوری بزرگ‌تری را تجربه می‌کنند و بسته به درجه محصورشدگی شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [۷]. Xie و همکاران مطالعه‌ای آزمایشگاهی روی ستون‌های لوله‌ای شکل بتن مسلح محصورشده با الیاف FRP تحت بارگذاری محوری انجام داده‌اند. این مطالعه نشان داد که الیاف ضخیم‌تر GFRP ظرفیت نهایی باربری و همچنین شکل‌پذیری را بهبود می‌بخشند [۸]. این تحقیقات اثرات محصورشدگی غیرفعال ناشی از GFRP بر روی سازه‌ها را تأیید کرده‌اند. همچنین مطالعات اخیر نشان داده که استفاده از محصورشدگی در نمونه‌های بتنی ضعیف‌تر مثل نمونه‌های بتنی با سنگ‌دانه بازیافتی و ماسه دریا اثرات بیشتر و مؤثرتری دارد [۹]. جدا از بحث اثر محصورشدگی غیرفعال بتن معمولی، Fam و Rizkalla با افزودن عامل انبساط در مخلوط بتن، فشار فعال روی الیاف FRP را مورد بحث قرار دادند [۱۰]. Vincent و Ozbakkaloglu نشان داده‌اند که هنگامی که یک ستون بتنی با مقاومت بالا با FRP تحت تنش بارمحوری قرار می‌گیرد، ظرفیت بار آن به‌طور ناگهانی در منحنی تنش-کرنش کاهش می‌یابد [۱۱]. برای غلبه بر مشکل کاهش ناگهانی مقاومت فشاری، آن‌ها رفتار فشاری الیاف پیش‌تنیده AFRP که بتن منبسط شونده با مقاومت بالا را محصور می‌کند، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت نهایی نمونه‌های پیش‌تنیده در مقایسه با نمونه‌های بدون پیش‌تنیدگی به میزان قابل‌توجهی بهبود می‌یابد و مقاومت نمونه پیش‌تنیده به‌طور ناگهانی کاهش نمی‌یابد [۱۲]. Cao و Ma یک

نظر گرفته شد که هیچ گونه لهیدگی در کلاهک در هنگام بارگذاری مشاهده نگردد. جهت ساخت این نمونه‌ها از قالب‌هایی استفاده شد که امکان بتن‌ریزی هم‌زمان تمام قسمت‌ها وجود داشته باشد. لذا نمونه‌ها به صورت یکپارچه بتن‌ریزی شده‌اند. فشار ناشی از محصورشدگی در مقاطع راست گوشه‌ی مستطیل و مربع به‌طور ناهموار توزیع شده و معمولاً تنش‌های بزرگ‌تری در گوشه‌ها پیدا می‌شوند که به پارگی ورقه‌های FRP می‌انجامد. گرد کردن گوشه‌های ستون با استفاده از ساب زدن و بتونه یک روش متداول برای کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از پارگی FRP می‌باشد. در نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش با قرار دادن قطعاتی در چهار گوشه ستون و ایجاد پیخ از تمرکز تنش در گوشه‌ها جلوگیری گردید.



شکل ۱- ابعاد و مشخصات نمونه‌ها (mm)

کلیه ستون‌ها دارای ۸ میلگرد طولی به قطر ۱۶ mm می‌باشند. تنگ‌ها با قطر ۱۰ میلی‌متر و به فواصل ۱۰۰ میلی‌متر از هم نصب شده و تا قسمت پایین مقطع در داخل فونداسیون نیز ادامه یافته‌اند، طراحی به گونه‌ای انجام شده که نمونه‌ها دچار خمش شده و دربرش آسیب نبینند.

۳- مشخصات مکانیکی نمونه‌ها

۳-۱- بتن

برای ساخت بتن موردنیاز نمونه‌ها از دو طرح اختلاط بر اساس آیین‌نامه ACI 211 استفاده گردید [۲۰]: یک طرح اختلاط برای ساخت فونداسیون و یک طرح اختلاط برای ساخت ستون. همچنین برای مشخص نمودن مقاومت فشاری و کششی بتن

هر نمونه محصورشده مقدار نیروی محصورشدگی متفاوتی به‌منظور بررسی اثر آن بر رفتار نمونه اعمال شده و جهت بررسی رفتار لرزه‌ای ستون‌ها از ترکیب نیروی محوری ثابت و نیروی جانبی متغیر استفاده شده است.

۲- مشخصات نمونه‌ها

۲-۱- تعداد نمونه‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها از ۳ عدد ستون بتنی با مقطع مربعی که با میلگردهای فولادی مسلح شده‌اند استفاده شده است. در این پژوهش یک ستون به‌عنوان نمونه ساده و دو ستون دارای محصورشدگی فعال هستند که دو مقدار متفاوت از محصورشدگی برای آن‌ها اعمال گردیده است. نیروی محصورشدگی از رابطه (۱) محاسبه شده است [۱۸].

$$f_{lfrp} = \frac{2N_b E_{frp} \epsilon_{frp} t_{frp} (b+h)}{bh} \quad (1)$$

که در آن f_{lfrp} میزان نیروی محصورشدگی، E_{frp} مدول الاستیسیته FRP، ϵ_{frp} کرنش FRP، N_b تعداد لایه‌ها، t_{frp} ضخامت یک لایه FRP می‌باشد.

در این پژوهش میزان نیروی محصورکننده به‌عنوان مهم‌ترین پارامتری که با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون به آن پرداخته نشده است به‌عنوان پارامتر محصورشدگی فعال در نظر گرفته شده است.

۲-۲- ابعاد نمونه‌ها

در ستون‌های با مقطع مربع اثر محصورشدگی بیشتر از ستون‌های با مقطع مستطیل است. در ستون‌های با ابعاد بزرگ‌تر کرنش محوری افزایش می‌یابد اما تنش‌های محوری خیلی افزایش نمی‌یابند [۱۹]. در این پژوهش آزمایشگاهی، تمام ستون‌های بتن مسلح با مقطع مربع به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ mm و به ارتفاع ۱۱۰۰ mm ساخته شدند. ستون‌های بتنی روی یک فونداسیون منفرد بتن مسلح فولادی با ابعاد ۲۸۰×۴۰۰×۱۴۰۰ mm قرار گرفتند (شکل ۱). برای اعمال بار قائم و افقی روی نمونه‌های ستون بتنی مسلح از یک کلاهک فولادی با ضخامت ۱۲ mm، با ابعاد داخلی ۲۵۱×۲۵۱×۲۰۰ mm برای سطوح جانبی (محل اعمال بارهای جانبی) و ضخامت ۲۵ mm در سطح فوقانی (محل اعمال بار قائم) استفاده گردید. ضخامت ورق‌های استفاده شده در کلاهک به صورتی در

با میزان کرنش ایجاد شده در نوارهای AFRP حاصل می شود، لذا میزان محصورشدگی بتن نیز با درصد کرنش ایجاد شده در نوارهای AFRP بیان می گردد.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی نوار آرامید

خصوصیت	استاندارد	نتیجه آزمایش
وزن مخصوص	90±5	93
عرض واحد (mm)	1000±10	1000
ضخامت (mm)	0.14±0.02	0.14
نوع بافت	پلین	پلین
چگالی	100±2:الیاف	100:الیاف
(Number/100mm)	FRP نوار: 100±2	FRP نوار: 100
مقاومت کششی (kN)	≥1500:الیاف	1687:الیاف
	FRP نوار: ≥1500	FRP نوار: 1568

اعمال میزان محصورشدگی مدنظر با استفاده از قطعات فولادی که در شکل ۲ مشاهده می شود انجام پذیرفت [۲۱]. این قطعات در کمربندهای تهیه شده از نوار AFRP با عرض ۷۵ میلی متر و فاصله ۵۰ میلی متر از یکدیگر قرار گرفته و محصورشدگی با سفت نمودن مهره ها تا کرنش مدنظر ادامه داده شده است. میزان محصورشدگی بر اساس ۱۰ و ۳۰ درصد کرنش نهایی نوار AFRP صورت پذیرفت. کرنش نهایی مدنظر در نوار AFRP برابر با ۲۵۰۰ میکرو استرین^۱ در نظر گرفته شد و میزان محصورشدگی برای کرنش ۱۰ درصد و ۳۰ درصد به ترتیب ۲۵۰ و ۷۵۰ میکرو استرین بر روی نوارها اعمال گردید (شکل ۳).

جدول ۳- مشخصات ستون ها

نام	درصد نیروی محصورشدگی	جنس آرماتور	ارتفاع (mm)	نوع آرماتور طولی
SCR	٪۰	فولاد	1100	۱۶ φ۸
S10	٪۱۰	فولاد	1100	۱۶ φ۸
S30	٪۳۰	فولاد	1100	۱۶ φ۸

جهت اعمال این میزان از کرنش از پایش به وسیله کرنش سنج و دیتالاگر Tokyo Sokki TDS-303 با دقت ±۱۰ استفاده شد. میزان این محصورشدگی برای هر ۴ نوار نصب شده به همین صورت انجام گردید. برای توزیع محصورشدگی بهتر در تمام

معمولی ساخته شده برای نمونه های بتن مسلح، در هنگام بتن ریزی از هر طرح اختلاط، ۶ نمونه استوانه ای ۱۵۰×۳۰۰×۳۰۰ mm تهیه گردید و آزمایش اسلامپ انجام شد. عمل آوری نمونه ها به مدت ۲۸ روز به طول انجامید. پس از عمل آوری، ۳ نمونه برای تعیین مقاومت فشاری توسط دستگاه تعیین مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج مقاومت های فشاری در جدول شماره ۱ ارائه شده اند.

جدول ۱- مشخصات مربوط به بتن

محل بتن	اسلامپ (mm)	مقاومت فشاری متوسط (Mpa)
فونداسیون	۶۵	۳۲/۲
ستون	۹۵	۲۹/۹

۳-۲- میلگرد فولادی

میلگردهای فولادی طولی فونداسیون از نوع آجدار A3 و قطر ۱۰ میلی متر، شامل ۳ میلگرد در بالای مقطع و ۴ میلگرد در پایین مقطع می باشند. میلگرد مصرفی برای ساخت خاموت های فونداسیون و ستون، به ترتیب از نوع A2 و A3 با قطر ۱۴ و ۱۰ میلی متر می باشد و به فاصله ۱۰۰ میلی متری از یکدیگر قرار داده شدند. قابل ذکر است که خم قلاب انتهایی خاموت ها با زاویه ۱۳۵ درجه اجرا گردیده است. برای تقویت برشی فونداسیون و جلوگیری از ایجاد ترک های برشی در آن از میلگردهای ادکا به قطر ۱۴ میلی متر در فواصل ۲۰۰ میلی متری استفاده شده است.

۳-۳- AFRP جهت محصور کردن ستون

دور پیچ FRP جهت محصورکنندگی فعال از جنس الیاف AFRP می باشد که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۲ داده شده است. جهت ایجاد بهتر محصورشدگی از چهار نوار AFRP تا ارتفاع ۴۵۰ میلی متری از پایه ستون ها با فواصل مساوی از یکدیگر استفاده شد.

۴- نحوه اعمال محصورشدگی فعال توسط آرامید

جهت ایجاد محصورشدگی فعال در ستون های بتنی و با در نظر گرفتن این موضوع که بیشترین تمرکز تنش در محل گوشه ستون در نوار AFRP به وجود می آید، کرنش سنج ها در گوشه نوار AFRP نصب گردید. با توجه به اینکه میزان محصورشدگی بتن

¹ Micro strain

تغییر مکان مدنظر برای اعمال بارگذاری در زمان آزمایش، تغییر مکان‌های ثبت‌شده توسط LVDT شماره ۳ می‌باشد. محل LVDT ها بدین صورت مشخص گردید که یک LVDT (شماره ۳) برای ثبت میزان نسبت تغییر مکان جانبی مدنظر در بالاترین کد ارتفاعی از روی تراز فونداسیون قرار داده شد و یک LVDT (شماره ۲) در مرز ناحیه بحرانی (۴۵۰ میلی‌متر از روی تراز فونداسیون) قرار داده شد و یک LVDT (شماره ۱) در پایین‌ترین تراز قابل نصب قرار داده شد. تراز قرارگیری LVDT ها در ستون‌های کوتاه و بلند در جدول ۴ و شکل ۴ مشاهده می‌شود.

جدول ۴- محل جابجایی سنج‌ها در ترازهای مختلف ستون

تراز قرارگیری تغییر مکان‌سنج‌ها از روی فونداسیون	
+100 mm	LVDT 1
+450 mm	LVDT 2
+1100 mm	LVDT 3

۵- انجام آزمایش

ابتدا نمونه‌های ساخته‌شده برای انجام آزمایش در یک قاب عکس‌العمل ثابت قرار گرفتند، قاب عکس‌العمل به‌عنوان تکیه‌گاه انجام آزمایش بکار می‌رود. این قاب که مقاومت لازم را برای ایجاد تکیه‌گاهی بدون تغییر شکل برای بار مورد استفاده در آزمایشگاه دارا می‌باشد با تکیه‌گاه‌های جانبی در طرفین به‌خوبی مهار شده و با پیچ‌های مناسب به کف قوی نصب گردیده است. برای جلوگیری از لغزش فونداسیون نمونه‌ها در هنگام بارگذاری جانبی (رفت و برگشتی) در راستای افق، قطعاتی فولادی در قسمت راست و چپ فونداسیون با پیچ و مهره به کف قوی متصل شدند. برای اعمال بار قائم و افقی روی نمونه‌های ستون بتنی مسلح از یک کلاهک فولادی استفاده گردید. ضخامت ورق‌های استفاده‌شده در کلاهک به صورتی در نظر گرفته شد که هیچ‌گونه لهیدگی در کلاهک در هنگام بارگذاری مشاهده نشود. علت استفاده از این کلاهک اعمال بار گسترده در ناحیه موردنظر در زمان بارگذاری می‌باشد که در واقع جایگزین تیر بتنی فوقانی ستون است. نمونه‌ها تحت بار محوری و تحت بارگذاری رفت و برگشتی مورد آزمایش واقع شده و رفتار نمونه‌ها از ایجاد ترک در بتن ستون‌ها تا تخریب آن‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. بارهای اعمالی با بارسنج اندازه‌گیری شده و مقدار بار محوری اعمالی برابر با حداکثر ظرفیت

سطح ناحیه بحرانی (۴۵۰ میلی‌متر از روی فونداسیون) محل قرارگیری قطعات فولادی در هر دو وجه ستون پیش‌بینی گردید. نیروی فشار محصورشدگی فعال بدست آمده از رابطه ۱ برای نمونه S10 برابر با ۳۶۳۷ کیلو نیوتن بر متر مربع و برای نمونه S30 برابر با ۴۳۶۸ کیلو نیوتن بر متر مربع به‌دست آمد.



شکل ۲- نحوه اتصال نوارها به ادوات پیش‌تندگی



شکل ۳- نصب کرنش‌سنج بر نوار آرامید

میزان تغییر مکان ایجادشده بر اساس نسبت تغییر مکان جانبی موردنظر در پروتکل بارگذاری، در سه تراز مدنظر توسط سه تغییر مکان‌سنج (LVDT) ثبت گردید (شکل ۴).



شکل ۴- محل قرارگیری بارسنج‌ها و LVDT ها در زمان آزمایش

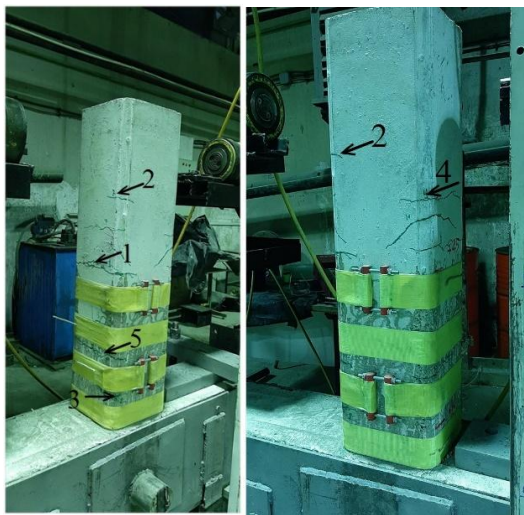
بارمحوری ستون‌ها بدون در نظر گرفتن نیروی محصورشدگی و مساوی با ۳۰۰ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد.

پوشش بتن میلگرد خرد شد. در ادامه، بارگذاری منجر به خرد شدن هسته در سیکل اول جابجایی ۳۰ میلی متری شد. در نمونه SCR آزمایش شده حداکثر مقاومت جانبی ۷۰ کیلو نیوتن در جابجایی ۳۰ میلی متر به دست آمد.



شکل ۶- ترتیب ترک‌های ایجادشده روی نمونه SCR

در نمونه S10، با ۱۰ درصد میزان کشش AFRP جهت محصورشدگی، شکست خمشی در حین آزمایش مشاهده گردید (شکل ۷).



شکل ۷- ترتیب ترک‌های ایجادشده روی نمونه S10

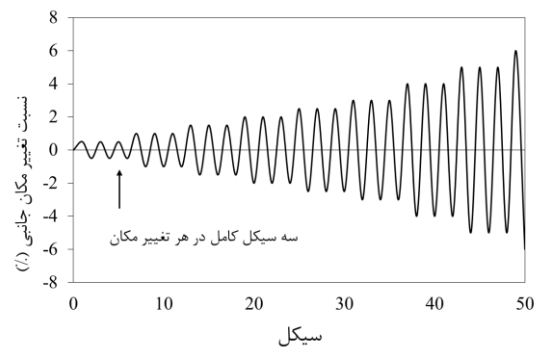
اولین ترک‌های مورب در ۵۰۰ میلی متری فونداسیون نمونه و در سیکل دوم بارگذاری و تغییر مکان ۵ میلی متر مشاهده شد (ترک شماره ۱) و ترک‌های شماره ۳، ۴ و ۵ با افزایش جابجایی‌های رفت و برگشتی در سیکل دوم و سوم تغییر مکان ۱۰ میلی متری، پخش شدند. سپس همه شکاف‌ها در تغییر مکان ۱۵ میلی متری عمیق تر

۱-۵- نحوه اعمال و میزان نیروهای افقی و قائم

بارگذاری ترکیبی، به صورت قائم و افقی بر نمونه‌ها وارد شدند. بار قائم به صورت ثابت و به میزان ۳۰۰ کیلو نیوتن با استفاده از جک هیدرولیکی ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی مکانیکی بر نمونه‌ها اعمال گردید. بارهای جانبی با استفاده از جک‌های هیدرولیکی برقی ۱۰۰۰ کیلو نیوتن که در دو قسمت راست و چپ نمونه قرار گرفته بودند، به صورت تغییر مکان کنترل اعمال شدند.

۲-۵- پروتکل بارگذاری

بار افقی به صورت رفت و برگشتی شبه‌دینامیکی طبق پروتکل پیشنهادی ACI 374 [۲۲] توسط دو جک هیدرولیکی به قسمت بالای ستون تا زمان شکست نمونه اعمال گردید. نحوه بارگذاری افقی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- پروتکل بارگذاری

۶- نتایج و بحث

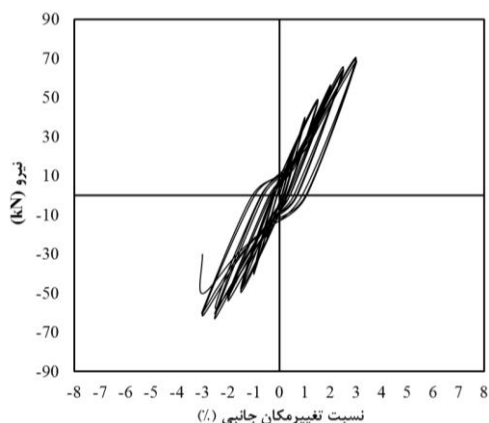
۱-۶- مود خرابی

نمونه SCR به عنوان نمونه مرجع با مقدار مناسب خاموت در نظر گرفته شد. همان طور که انتظار می‌رفت، ترک‌های مشاهده شده در حین آزمایش عمدتاً خمشی بودند. این ترک‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. اولین ترک‌های مورب در ناحیه میانی نمونه و در سیکل اول تغییر مکان ۵ میلی متر مشاهده گردید (ترک شماره ۱) و با افزایش جابجایی‌های چرخه‌ای، ترک‌ها در سیکل اول و دوم تغییر مکان ۱۰ میلی متری به بالای آن پخش شدند. سپس همه شکاف‌ها عمیق تر شدند و در سیکل سوم تغییر مکان ۱۰ میلی متری

مقایسه شکست نمونه با نمونه SCR مشاهده گردید که نمونه‌ها مقاومت و تغییر مکان بیشتری را تحمل می‌کنند و همچنین جذب انرژی بیشتری دارند. میزان افزایش جذب انرژی را می‌توان در نمودارهای انرژی مشاهده نمود.

در هیچ‌کدام از نمونه‌های محصورشده، افزایش بارگذاری سبب پارگی نوارهای AFRP نشد و در نتیجه نمونه‌ها دچار جمع‌شدگی نمودار هیستریزس و کاهش قابل توجه در مقاومت نشدند.

در شکل ۹ تا ۱۱ نمودار هیستریزس نمونه‌ها و به ترتیب محصورشدگی صفر، ده و سی درصد نشان داده شده‌اند. مقدار جمع‌شدگی نمودار هیستریزس^۱ نمونه‌ها محاسبه شد. مقدار کمتر به این معنی است که نسبت فاصله X (شکل ۹) به حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه کوچک می‌باشد. این نسبت در نمونه‌های SCR، S10 و S30 به ترتیب برابر با ۰.۳۱، ۰.۳۴ و ۰.۳۹ است. مشاهده می‌شود که هر چه میزان X بیشتر باشد، ستون انرژی بیشتری تلف می‌کند به‌طور مشابه، هر چه میزان X کمتر باشد، ستون مورد آزمایش انرژی کمتری جذب می‌کند و رفتار ستون شکننده‌تر است. نمونه SCR نسبت به ستون‌های S10 و S30 دارای مقدار جمع‌شدگی نمودار هیستریزس کمتری است که نشان‌دهنده جذب بالای انرژی نمونه با محصورشدگی فعال می‌باشد.

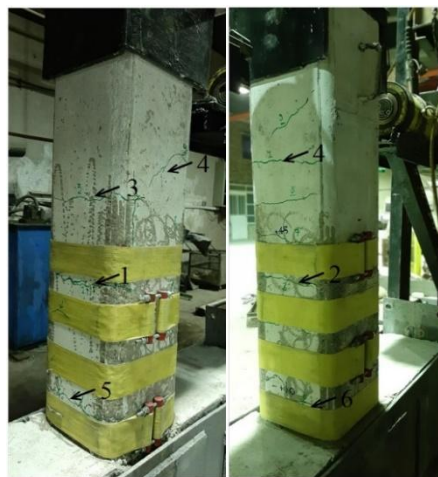


شکل ۹- منحنی هیستریزس نمونه‌ی بدون محصورشدگی

در شکل ۱۲ حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ها باهم مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد کشش در الیاف AFRP، حداکثر مقاومت و تغییر مکان نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به‌علاوه نمونه‌های با محصورشدگی بیشتر سرعت افت مقاومت کمتری بعد از رسیدن به حداکثر نیروی قابل تحمل خود دارند.

شدند؛ و در سیکل دوم تغییر مکان ۲۰ میلی‌متری پوشش بتن میلگرد در پای ستون خرد گردید. در ادامه، بارگذاری منجر به خرد شدن بتن و شکست برشی گردید. در نمونه آزمایش‌شده حداکثر مقاومت جانبی ۸۰ کیلو نیوتن در جابجایی ۴۰ میلی‌متر به دست آمد. با مقایسه با نمونه SCR مشاهده گردید که نمونه‌های با محصورشدگی فعال ۱۰ درصد، مقاومت و تغییر مکان بیشتری را تحمل می‌کنند و همچنین این نمونه‌ها جذب انرژی بیشتری دارند. افزایش جذب انرژی به دلیل افزایش ترک‌های ریز و باز توزیع تنش‌ها در طول نمونه است. افزایش جذب انرژی در این نمونه‌ها در نمودارهای انرژی مشهود می‌باشد.

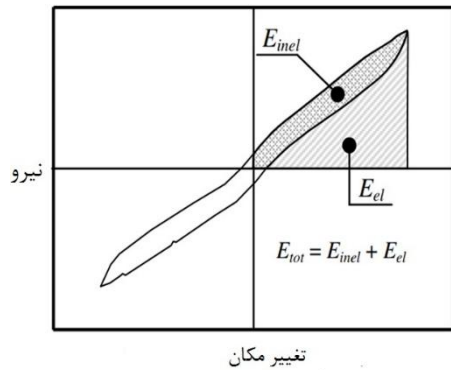
شکل ۸ نمونه S30 با میزان کشش ۳۰ درصد ظرفیت AFRP جهت محصورشدگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این نمونه، اولین ترک‌های مورب در فاصله ۵۵۰ میلی‌متری از فونداسیون و در سیکل سوم تغییر مکان ۵ میلی‌متری مشاهده شد (ترک شماره ۱ و ۲). با افزایش جابجایی‌های چرخه‌ای، ترک‌ها در سیکل اول، دوم و سوم بارگذاری و در تغییر مکان ۱۰ میلی‌متری آن پخش شدند (ترک شماره ۳ و ۴ و ۵). سپس ترک‌های جدیدی در تغییر مکان ۱۵ میلی‌متری ایجاد گردیدند و در سیکل سوم تغییر مکان ۲۰ میلی‌متری ترک‌ها عمیق شدند.



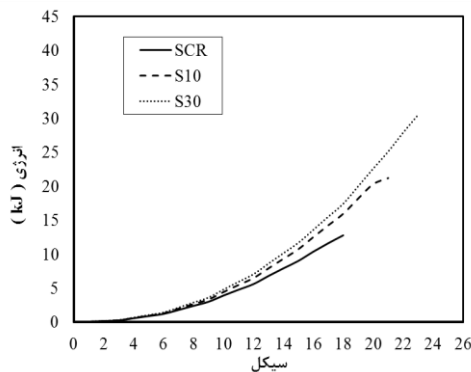
شکل ۸- ترتیب ترک‌های ایجادشده روی نمونه S30

پوشش بتن میلگرد در سیکل اول تغییر مکان ۲۵ میلی‌متری در نزدیکی فونداسیون خرد گردید و در ادامه، بارگذاری منجر به خرد شدن و شکست بتن شد. در نمونه آزمایش‌شده حداکثر مقاومت جانبی ۸۵ کیلو نیوتن در جابجایی ۵۰ میلی‌متر به دست آمد. با

^۱ Pinching

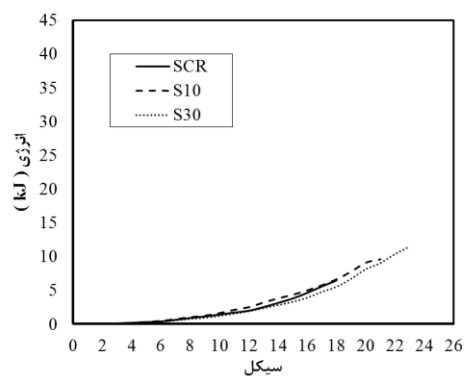


شکل ۱۳- انرژی محاسبه شده در هر سیکل بارگذاری [۲۳]



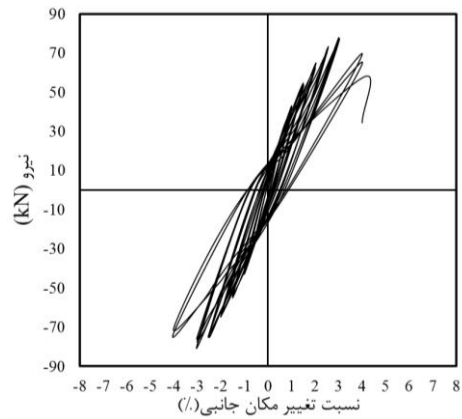
شکل ۱۴- مقایسه انرژی الاستیک تجمعی محاسبه شده

با توجه به شکل ۱۵ انرژی جذب شده تجمعی درون هر سیکل بارگذاری برای این نمونه‌ها با افزایش محصورشدگی افزایش محسوسی نداشت هرچند مقدار انرژی الاستیک جذب شده به دلیل افزایش مقاومت و کرنش تحمل شده در ستون‌ها و در نتیجه افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری به شدت افزایش پیدا کرد (شکل ۱۶).

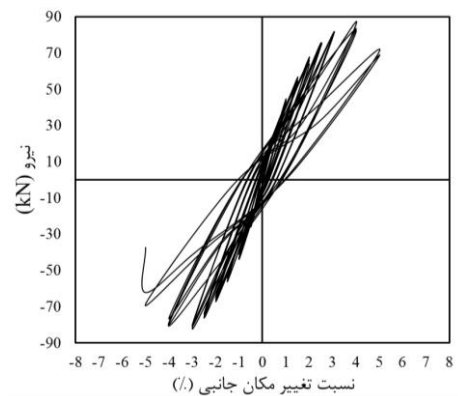


شکل ۱۵- مقایسه انرژی جذب شده تجمعی در داخل هر سیکل

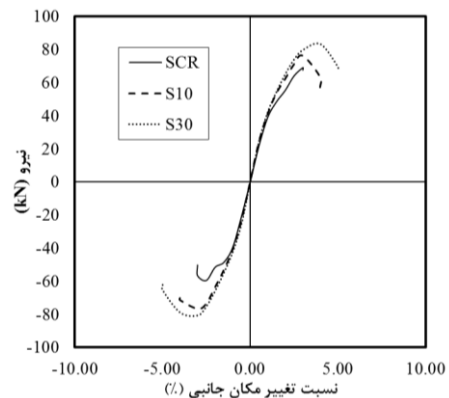
این افزایش برای نمونه‌ی با ۱۰ درصد کشش الیاف برابر با ۷۵ درصد و برای نمونه‌ی با ۳۰ درصد کشش الیاف حدود ۱۲۵ درصد نسبت به نمونه کنترل است. همچنین افزایش انرژی کل تجمعی محاسبه شده در نمونه (شکل ۱۶) برای نمونه‌ی با ۱۰ درصد کشش



شکل ۱۰- منحنی هیستریزس نمونه‌ی با محصورشدگی ۱۰٪



شکل ۱۱- منحنی هیستریزس نمونه‌ی با محصورشدگی ۳۰٪

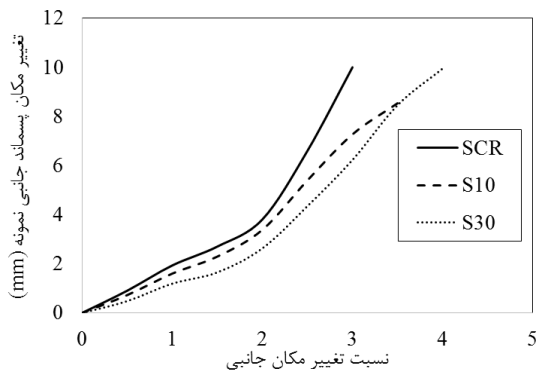


شکل ۱۲- نمودار تغییرات نیرو به نسبت تغییر مکان جانبی تحمل شده توسط نمونه‌ها با محصورشدگی مختلف

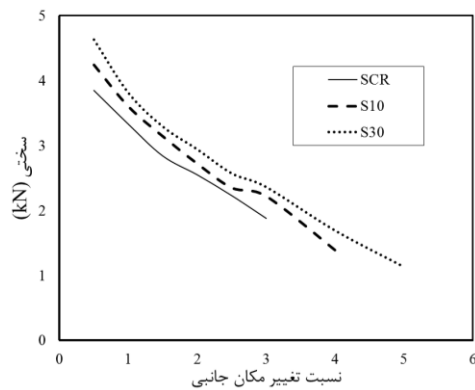
نحوه محاسبه انرژی جذب شده در هر ستون در مقابل نسبت تغییر مکان جانبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است [۲۳]. انرژی کل برابر است با مساحت محصور در حلقه‌های پسماند (E_{inel}) به علاوه انرژی الاستیک نمونه (E_{el}). مجموع انرژی جذب شده در هر ستون و مقایسه با نمونه مرجع در شکل ۱۴ ارائه شده است. در نمونه‌های آزمایش شده میزان انرژی الاستیک تجمعی با افزایش مقدار محصورشدگی به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۱۴).

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\varepsilon_2 - 0.00005)} \quad (2)$$

در این رابطه، مقدار S_2 نیرو (kN) در چهل درصد نیروی حداکثر، S_1 نیروی متناظر با کرنش طولی ε_2 فولاد و کرنش در سطح نیروی S_2 است. همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده، تغییرات سختی نمونه‌ها تقریباً یکسان است هر چند سختی اولیه ستون با ۳۰ درصد کشش الیاف بیشتر از سختی اولیه ستون SCR می‌باشد.



شکل ۱۷- تغییر مکان پسماند جانبی



شکل ۱۸- تغییرات سختی در نمونه‌ها

خلاصه موارد و نتایج به دست آمده در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- خلاصه درصد اثر محصورشدگی فعال روی نمونه‌ها نسبت به نمونه SCR

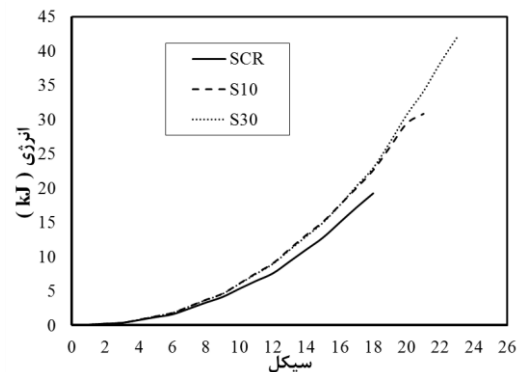
نمونه	مقاومت (%)	تغییر شکل (%)	X به حداکثر مقاومت (%)	انرژی الاستیک جمعی (%)	انرژی کل جمعی (%)	تغییر مکان پسماند (%)	سختی اولیه (%)
S10	+۱۴	+۵۰	+۱۰	+۷۵	+۵۰	-۲۵	+۱۰
S30	+۲۱	+۶۷	+۲۶	+۱۲۵	+۸۱	-۳۰	+۲۰

است. در این تحقیق دو ستون بتنی محصورشده فعال توسط نوارهای AFRP و یک ستون بدون محصورشدگی (SCR) به عنوان نمونه مرجع مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها با

۷- نتیجه گیری

هدف این مطالعه بررسی رفتار فشاری محوری و بار رفت و برگشتی ستون‌های بتنی محصورشده فعال توسط الیاف AFRP

الیاف برابر با ۵۰ درصد و برای نمونه‌ی با ۳۰ درصد کشش الیاف تا ۸۱ درصد نسبت نمونه‌ی کنترل به دست آمد.



شکل ۱۶- مقایسه انرژی کل جمعی محاسبه شده

تغییر شکل پسماند در نمونه‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است برای تغییر شکل نسبی ۳ درصد (که حداکثر نسبت تغییر مکان جانبی قابل تحمل برای نمونه کنترل می‌باشد) مقدار تغییر شکل پسماند در نمونه با کشش الیاف ۱۰ درصد تا حدود ۲۵ درصد و با کشش الیاف ۳۰ درصد تا حدود ۳۵ درصد کاهش دارد. با توجه به مطالب فوق، با افزایش مقاومت بتن به علت افزایش محصورشدگی فعال در نمونه‌ها، مقدار تغییر شکل ماندگار برای تغییر شکل‌های مساوی کاهش پیدا می‌کند.

۶-۲- سختی

به منظور بررسی اثرات روش تقویتی پیشنهادی، کاهش سختی ستون‌ها ناشی از آسیب بارگذاری چرخه‌ای، محاسبه شده است. بدین منظور مقادیر مدول الاستیسته بر اساس شیب منحنی‌های تنش-کرنش از رابطه ۲ بر اساس ASTM C469 به دست آمده [۲۴] و نتایج آن در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.

در هیچ کدام از نمونه‌های محصورشده، افزایش بارگذاری سبب پارگی نوارهای AFRP نشد در ضمن نمونه‌ها دچار جمع‌شدگی نمودار هیستریزس و کاهش قابل توجه مقاومت نشدند. این موضوع همچنین از تشکیل ترک‌های برشی و ترد شکنی نمونه جلوگیری نمود.

۸- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از استاد فاضل و اندیشمند مرحوم دکتر اصغر وطنی اسکویی عضو هیئت علمی دانشکده عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، که انجام این تحقیق بدون راهنمایی‌های ایشان مقدور نبود، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

۹- مراجع

- [1] A. Mirmiran, M. Shahawy, Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, Journal of Structural Engineering, 123 (1997) 583-590.
- [2] Y. Xiao, H. Wu, Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets, Journal of Materials in Civil Engineering, 12 (2000) 139-146.
- [3] P.P. Sankholkar, C.P. Pantelides, T.A. Hales, Confinement Model for Concrete Columns Reinforced with GFRP Spirals, Journal of Composites for Construction, 22 (2018) 04018007.
- [4] A. Kaya, M. Dawood, B. Gencturk, Repair of corroded and buckled short steel columns using concrete-filled GFRP jackets, Construction and Building Materials, 94 (2015) 20-27.
- [5] A. Kashi, A.A. Ramezani pour, F. Moodi, Durability evaluation of retrofitted corroded reinforced concrete columns with FRP sheets in marine environmental conditions, Construction and Building Materials, 151 (2017) 520-533.
- [6] A. Saljoughian, D. Mostofinejad, Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression, Construction and Building Materials, 235 (2020) 117786.
- [7] Mohammad R. Ehsani, Hamid Saadatmanesh, C.T. Nelson, Transfer and Flexural Bond Performance of Aramid and Carbon FRP Tendons, PCI Journal, 42 (1997).
- [8] W. Xie, Y. Chen, S. Han, W. Zhou, K. He, Research on I steel reinforced concrete-filled GFRP tubular short columns, Thin-Walled Structures, 120 (2017) 282-296.

بارگذاری محوری و بارگذاری جانبی رفت و برگشتی آزمایش شده‌اند. در مقایسه با ستون بتنی معمولی، ستون با محصورشدگی فعال به دلیل جلوگیری از اتساع بتن و فشار به وجود آمده توسط الیاف، محدوده فعال خاصی را در محیط ستون بتنی ایجاد می‌کند. در نهایت نتایج زیر از تحقیق آزمایشگاهی حاضر گرفته شد:

- نمونه S10 در مقایسه با نمونه SCR ۱۴ درصد مقاومت و ۵۰ درصد تغییر مکان بیشتری را تحمل نمود.

- نمونه S30 در مقایسه با نمونه SCR ۲۱ درصد مقاومت و ۶۷ درصد تغییر مکان بیشتری را تحمل نمود.

- نسبت فاصله X (شکل ۹) به حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه‌های S10، S30 به ترتیب ۱۰ و ۲۶ درصد نسبت به SCR افزایش داشته است. هر چه میزان X بیشتر باشد، ستون انرژی بیشتری جذب می‌کند.

- میزان انرژی الاستیک تجمعی با افزایش مقدار محصورشدگی به شدت افزایش می‌یابد. این انرژی به دلیل افزایش مقاومت و کرنش تحمل شده در ستون‌ها و در نتیجه افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش پیدا کرد. این افزایش برای نمونه با ۱۰ درصد کشش الیاف برابر با ۷۵ درصد و برای نمونه با ۳۰ درصد کشش الیاف تا ۱۲۵ درصد نسبت به نمونه کنترل بوده است. همچنین افزایش انرژی کل تجمعی محاسبه شده در نمونه با ۱۰ درصد کشش الیاف برابر با ۵۰ درصد و برای نمونه با ۳۰ درصد کشش الیاف تا ۸۱ درصد نسبت به نمونه کنترل به دست آمد. انرژی جذب شده تجمعی در داخل هر سیکل نیز برای نمونه تغییر محسوسی نداشت.

- تغییر شکل پسماند در نمونه‌ها برای تغییر شکل نسبی ۳ درصد، در کشش الیاف ۱۰ درصد حدود ۲۵ درصد و در کشش الیاف ۳۰ درصد حدود ۳۵ درصد کاهش داشت.

- تغییرات سختی نمونه‌ها تقریباً یکسان بود هر چند سختی اولیه ستون با ۳۰ درصد کشش الیاف ۲۰ درصد و در نمونه با ۱۰ درصد کشش ۱۰ درصد بیشتر از سختی اولیه ستون SCR بوده است.

در نهایت می‌توان گفت که نمونه‌های با درصد محصورشدگی بالاتر، مقاومت و تغییر مکان بیشتری را تحمل کردند و همچنین به دلیل افزایش تعداد ترک‌های ریز در طول نمونه، جذب انرژی بیشتری به دست آمد. میزان افزایش جذب انرژی را می‌توان در نمودارهای انرژی نیز مشاهده نمود.

- hoops, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 550 (2001) 135-141.
- [22] Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads (ACI 374.2R-13), ACI Committee 374, 2013, pp. 1-39.
- [23] A.K. Chopra, Dynamics of structures Theory and Applications to Earthquake Engineering. , 3rd Edition ed., Prentice Hall, 2007.
- [24] ASTM International, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression., ASTM C469 / C469M-14e1., West Conshohocken, PA, , 2014.
- [9] P. Li, T. Yang, Q. Zeng, F. Xing, Y. Zhou, Axial stress-strain behavior of carbon FRP-confined seawater sea-sand recycled aggregate concrete square columns with different corner radii, Composite Structures, 262 (2021) 113589.
- [10] A. Fam, S.H. Rizkalla, Behavior of axially loaded concrete-filled circular fiber-reinforced polymer tubes, ACI Structural Journal, 98 (2001) 280-289.
- [11] T. Vincent, T. Ozbakkaloglu, Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high- and ultra high-strength concrete, Composites Part B: Engineering, 50 (2013) 413-428.
- [12] T. Vincent, T. Ozbakkaloglu, Compressive Behavior of Prestressed High-Strength Concrete-Filled Aramid FRP Tube Columns: Experimental Observations, Journal of Composites for Construction, 19 (2015) 04015003.
- [13] Q. Cao, Z. Ma, Behavior of Externally Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Shrinkage-Compensating Concrete Beams, ACI Structural Journal, 108 (2011).
- [14] Q. Cao, Z. Ma, Structural behavior of FRP enclosed shrinkage-compensating concrete (SHCC) beams made with different expansive agents, Construction and Building Materials, 75 (2015) 450-457.
- [15] Q. Cao, T. Jinju, Z. Ma, Z. Wu, Axial Compressive Behavior of CFRP-Confined Expansive Concrete Columns, ACI Structural Journal, 114 (2017) 475-485.
- [16] Q. Cao, H. Li, Z. Lin, Study on the active confinement of GFRP-confined expansive concrete under axial compression, Construction and Building Materials, 227 (2019) 116683.
- [17] R. Suhail, G. Amato, D.P. McCrum, Active and passive confinement of shape modified low strength concrete columns using SMA and FRP systems, Composite Structures, 251 (2020) 112649.
- [۱۸] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی (نشریه شماره ۵۲۴)، ۱۳۸۹.
- [19] T. Fanaradelli, T. Rousakis, A. Karabinis, Reinforced concrete columns of square and rectangular section, confined with FRP-Prediction of stress and strain at failure, Composites Part B: Engineering, 174 (2019) 107046.
- [20] A.C.I.C. 211, Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete 2009.
- [21] T. Yamakawa, K. Nasrollahzadeh, H. Satoh, Seismic or emergency retrofit of RC short columns by use of prestressed aramid fiber belts as external

Experimental study on the effect of active confinement of AFRP fibers on the seismic performance of reinforcement concrete columns under axial and lateral loads

Shahla Jeddian

Department of Civil Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mohammad Ghazi *

Department of Civil Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mehdi Esfandi Sarafraz

Department of Civil Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Fiber Reinforced Polymers (FRP) are often used for structural repairs to improve the strength and ductility of the structures. Previous studies have shown that utilizing active confinement in concrete structures can improve the seismic behavior of concrete columns under pressure. In this study, the behavior of concrete columns actively confined by AFRP fibers was investigated under the combined effects of axial compressive and cyclic lateral loads. Two concrete columns were actively confined by AFRP strips. In addition, a non-confined column (SCR) was utilized as a control specimen. Then all specimens were tested under axial and lateral cyclic loading. Experimental results showed that the ultimate compressive strength and axial strain of specimens with active confinement are improved compared to the SCR specimen. Also, due to the increased number of small cracks in the specimen, a higher extent of energy was absorbed under the applied loading. The loading protocol caused no rupture in the AFRP strips, and no shear crack and brittle failure in the specimens were observed.

Keywords: Active confinement, Polyamide polymer fibers, Seismic performance, Ductility.

* Corresponding Author: ghazi.m@wtiau.ac.ir