

مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی آسیب‌دیده تحت بار محوری با استفاده از تلفیق جایگزینی بتن آسیب‌دیده با بتن فوق‌توانمند و محصورسازی با پلیمرهای مسلح به الیاف کربن

اصغر پرکاوش^۱، حسن افشین^۲، محمد چرختاب بسیم^{۳*}

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

basim@sut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

چکیده

روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی که پوشش بتنی خود را از دست داده‌اند ارائه شده است. در این پژوهش، نمونه‌هایی از ستون‌های مربعی بتنی که پوشش بتنی خود را از دست داده‌اند بررسی شده و برای مقاوم‌سازی این ستون‌های آسیب دیده از تلفیق روش‌ها استفاده و کارایی آنها ارزیابی شده است. این روش‌ها شامل استفاده از لایه بتنی پوششی جدید و دورپیچ کردن ستون‌ها با الیاف کربن است. متغیرهای این پژوهش شامل شکل مقطع، نوع بتن لایه پوششی (بتن فوق‌توانمند، بتن فوق‌توانمند با الیاف فولادی و ملات خودتراکم) و تعداد لایه‌های الیاف کربن (یک و دو لایه) است. تعداد کل نمونه‌ها در این پژوهش ۴۲ عدد است که ۶ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های کنترل، ۶ عدد به عنوان نمونه‌های کنترل آسیب دیده و ۳۰ عدد نمونه‌های آسیب دیده‌ای هستند که با لایه پوششی و الیاف کربن مقاوم‌سازی شده‌اند. کل نمونه‌ها تحت بار محوری یکنواخت قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در مقاوم‌سازی ستون به شکل مربعی بهتر است از لایه پوششی بتن فوق‌توانمند استفاده شود. درحالی‌که در مقاوم‌سازی ستون به شکل دایروی بهتر است از ملات خودتراکم به عنوان لایه پوششی استفاده شود. همچنین مطالعه عددی برای درستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی و همچنین تعمیم نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های با ابعاد کوچک برای ستون‌های با ابعاد بزرگ نیز انجام شده است.

واژگان کلیدی: ستون‌های بتنی، مقاوم‌سازی، بتن فوق‌توانمند، الیاف کربن، بار محوری

۱- مقدمه

بتنی و پلیمرهای مسلح به الیاف را می‌توان به عنوان روش‌های متداول مقاوم‌سازی اعضای بتنی معرفی کرد. در انتخاب روش مقاوم‌سازی باید عواملی از جمله توجیه اقتصادی، سازگاری

اعضای سازه‌های بتن‌آرمه ممکن است به دلایل مختلفی به مقاوم‌سازی نیاز داشته باشند. استفاده از ژاکت فولادی، ژاکت

خروج از مرکزیت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آنها نشان دادند که استفاده از بتن با مقاومت بالا (HSC) به عنوان پوشش اضافی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی مربعی به ظرفیت باربری بیشتری نسبت به پوشش بتنی با مقاومت معمولی منجر می‌شود. بلال و همکارانش [5] رفتار ستون‌های مسلح تقویت‌شده با انواع روش ژاکت فولادی را بررسی کردند. سطح مقطع نمونه‌ها در آزمایش‌های این پژوهشگران $200 \times 200 \text{ mm}^2$ با ارتفاع ۱۲۰۰ میلی‌متر بوده، متغیرهای مورد بررسی نیز شکل سیستم مقاوم‌سازی، اندازه و تعداد صفحات بست بوده است. رفتار و بار خرابی ۷ عدد ستون به صورت آزمایشگاهی بررسی شده که ۲ مورد آن به عنوان نمونه مرجع و ۵ نمونه دیگر با انواع ژاکت فولادی مقاوم‌سازی شدند. نتایج نشان دادند که استفاده از روش‌های ژاکت فولادی برای مقاوم‌سازی ستون‌ها حداقل ۲۰ درصد ظرفیت باربری را افزایش داده است. در پژوهشی توسط کومار و همکارانش [6]، به بررسی آثار بتن خودتراکم (SCC) به عنوان مصالح مقاوم‌سازی برای ژاکت کردن ستون‌های بتنی استوانه‌ای پرداخته شده است. در پژوهش آنان، ۶ نمونه کنترل و ۳۶ نمونه اصلی (که تا ۸۰-۸۵ درصد مقاومت اسمی آسیب دیده‌اند) ترمیم و مقاوم‌سازی شده و تحت بار محوری یکنواخت قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که وقتی مقاومت بتن ژاکت از مقاومت بتن هسته بیشتر باشد، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، مقاومت برشی و شکل‌پذیری هم افزایش پیدا می‌کند و همچنین وقتی مقاومت بتن ژاکت کمتر یا مساوی مقاومت بتن هسته باشد ضریب افزایش مقاومت نسبتاً کاهش می‌یابد.

در این پژوهش، از تلفیق روش‌های مقاوم‌سازی (استفاده از لایه پوششی بتن فوق‌توانمند و دورپیچ کردن با پلیمرهای مسلح به الیاف کربن) برای ترمیم و مقاوم‌سازی ستون‌های آسیب‌دیده استفاده شده است. تلفیق روش‌های فوق‌ضمن پوشش معایب آنها باعث هم‌افزایی مزیت آنها (افزایش ظرفیت باربری، جذب انرژی و شکل‌پذیری) می‌شود. در این پژوهش هدف بر آن است که اثر همزمان پلیمرهای مسلح به الیاف کربن و بتن فوق‌توانمند را در مقاوم‌سازی ستون‌های مربعی بتنی آسیب دیده را بررسی کنیم. از ترکیب مقاومت فشاری بسیار بالای این نوع بتن و مقاومت کششی

روش با سیستم سازه، مسائل معماری و زیبایی سازه، وزن سازه پس از اجرای مقاوم‌سازی و همچنین ظرفیت فونداسیون را در نظر گرفت. استفاده از ژاکت بتنی معایبی از جمله افزایش قابل توجه وزن سازه، افزایش ابعاد ستون و کاهش فضای مفید و زمان زیاد برای اجرای طرح را دارد و همچنین اجرای روش مقاوم‌سازی با ژاکت فولادی نیز دشواری‌های اجرایی فراوانی دارد. استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف در مقاوم‌سازی ستون از لحاظ معماری، وزن سازه پس از اجرا، هزینه مناسب و زمان اجرای کمتر قابل قبول است، ولی در مقابل آتش‌سوزی و تیزی و ناصافی سطوح آسیب‌پذیر هستند.

از جمله پژوهش‌های متعدد در این زمینه، مانوئل و همکارانش [1] نمونه‌های بتنی با قطرهای ۱۵۰ و ۲۵۰ و ارتفاع ۳۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ میلی‌متر با تعداد لایه‌های ثابت الیاف شیشه را تحت بار محوری یکنواخت قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ارتفاع روی محصورشدگی الیاف اثر ناچیزی داشته در حالی که با افزایش قطر از اثر محصورشدگی کاسته می‌شود. السالوم و همکارانش [2] به بررسی اثر شعاع گوشه بر روی مقاومت ستون‌های بتنی مربعی محصور به الیاف کربن به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. بخش آزمایشگاهی این مطالعه، شامل ۲۰ عدد نمونه تحت بار محوری است که بسته به انتخاب شعاع گوشه، سطح مقطع از مربع به دایره تغییر می‌کند. نتایج نشان داده است که با افزایش شعاع گوشه مقاومت و شکل‌پذیری افزایش یافته است. میلر و همکارانش [3] آزمایش‌هایی روی هفده نمونه ستون دایروی به قطر ۲۵۴ و به ارتفاع ۷۶۲mm انجام داده‌اند. یک ستون بدون تقویت، سه ستون با FRP، دو ستون با ژاکت فولادی و نه ستون با ژاکت بتنی تقویت شدند. نتایج تجربی آنها حاکی از آن است که کمترین مقاومت و شکل‌پذیری مربوط به ژاکت بتنی و بالاترین شکل‌پذیری و مقاومت را ژاکت فولادی داشته است. نمونه‌های تقویت‌شده با FRP شکست تردی را بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر نشان دادند. در کار دیگری توسط فونگ و همکارانش [4]، با استفاده از پوشش قطعه‌های بتنی دایروی با مقاومت‌های مختلف نمونه‌های مربعی به دایروی تبدیل شده و با سه لایه الیاف کربن مقاوم‌سازی شدند و رفتار نمونه‌های مقاوم‌سازی شده تحت شرایط مختلف بارگذاری شامل بار محوری و بار با

الیاف فولادی مورد استفاده از نوع قلابدار محصول شرکت DRACO™ ترکیه با نام تجاری FIBERMIX است که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است. الیاف کربن و چسب اپوکسی با نام صنعتی Sikadur330 از شرکت سیکا پارسیان خریداری شده است که مشخصات آن‌ها مطابق جدول‌های (۲ و ۳) است. الیاف کربن با وزن 300 gr/m^2 به صورت تک‌جهته استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف کربن [9]

Density (gr/cm^3)	1.80
Thickness (mm)	0.17
Tensile strength (MPa)	3900
Modulus of elasticity (MPa)	230000
Ultimate strain (%)	1.5

Table 2. Mechanical properties of carbon fibers

جدول ۳. مشخصات مکانیکی چسب اپوکسی [10]

Tensile strength(Mpa)	30
Flexible modulus(Gpa)	3.8
Tensile modulus(Gpa)	4.5

Table 3. Mechanical properties of Epoxy

۲-۲- بتن معمولی

از ماسه معدنی شرکت ماسه‌شویی سرام تبریز (اصلاح شده به وسیله عبور دادن از الک شماره ۴) استفاده شده است. بدین طریق مدول نرمی از $3/26$ به $3/06$ تقلیل یافت که در محدوده توصیه شده قرار دارد. همچنین درصد جذب آب و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک این ماسه به ترتیب $1/52$ و $2/64$ می‌باشد [8]. همچنین از شن نخودی رودخانه‌ای شکسته شرکت سرام تبریز با درصد جذب آب و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک به ترتیب $0/66$ و $2/65$ استفاده شد [8].

۳- طرح مخلوط

در این مطالعه برای سنجش مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد (15×30 سانتی مترمربع) برای بتن معمولی و نمونه‌های مکعبی 10 سانتی متری برای بتن فوق‌توانمند و

بسیار بالای الیاف کربن می‌توان در بالا بردن ظرفیت بار محوری و جذب انرژی ستون‌های مربعی بتنی استفاده کرد.

۲- مشخصات مصالح مصرفی

در ابتدا کل ستون‌ها با بتن معمولی ساخته شده و سپس ستون‌های آسیب دیده با لایه بتنی پوششی (بتن فوق‌توانمند با الیاف فولادی، بتن فوق‌توانمند و ملات خودتراکم) ترمیم شده و توسط یک یا دو لایه الیاف کربن دورپیچ شدند. مشخصات مصالح مورد استفاده در ادامه آورده شده‌اند.

۱-۲- بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC)

بتن پودری واکنش‌پذیر نوعی بتن با مقاومت بالا می‌باشد. مواد تشکیل دهنده RPC عبارت‌اند از ماسه سیلیسی، پودر سیلیس، سیمان، میکرو سیلیس، آب، فوق‌روان‌کننده و در صورت نیاز الیاف فولادی. این نوع بتن علاوه بر مقاومت بالا دارای ویژگی‌های دیگری مانند نفوذپذیری کم، مقاومت سایشی بالا و نیز دوام زیاد می‌باشد [7]. از ماسه سیلیسی منطقه شهر بابک کرمان استفاده شده است. همچنین از پودر سیلیس (SiO_2) منطقه ازندریان همدان با خلوص بالای 99% و وزن مخصوص $2/63 \text{ gr/cm}^3$ استفاده شده است. سیمان تیپ دو کارخانه سیمان صوفیان و میکروسیلیس از نای لرستان مورد استفاده قرار گرفته است. برای اختلاط بتن پودری واکنش‌پذیر از نسل سوم فوق‌روان‌کننده‌ها بر پایه پلی کریوکسیلات‌های اصلاح شده استفاده شده است. آب مورد استفاده در طرح مخلوط‌ها، آب شرب دانشگاه صنعتی سهند تبریز است.

جدول ۱. مشخصات الیاف فولادی [8]

Brand	FIBERMIX
Dimensions (mm)	0.75×30
Tensile strength (MPa)	1100
Flexural strength (MPa)	800
The maximum amount of stretch marks	%2
Standard	TSE 10513. ASTM A 820

Table 1. Properties of steel fibers

ملات خودتراکم استفاده شده است. در طرح مخلوط از حروف جدول (۴) برای نمایش نوع مصالح استفاده شده است:

جدول ۴. نام‌های اختصاری مصالح استفاده شده

CA	Coarse aggregation	W	Water
S	Sand	SF	Micro silica
C	Cement	SP	Superplastizer
SS	Silica sand	F	Steel Fibers
		QS	Silica powder

Table 4. The used abbreviations

۱-۳- طرح مخلوط بتن پودری واکنش‌پذیر

طرح مخلوط بتن پودری واکنش‌پذیر مطابق جدول (۵) تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲-۳- طرح مخلوط ملات خودتراکم (SCM)

در این پژوهش پس از سعی و خطا از طرح مخلوط مطابق جدول (۶) برای تهیه ملات خودتراکم استفاده شده است.

جدول ۵. طرح مخلوط بتن پودری واکنش‌پذیر (kg/m³)

Concrete type Materials	RPC	RPC - F
	C	914
SS	864	864
W	204.5	204.5
SP	42	42
SF	218.4	218.4
QS	76.4	76.4
F	-	50
W/B	0.18	0.18
f' _c	900	950

Table 5. Reactive powder concrete mixture

جدول ۶. طرح مخلوط ملات خودتراکم (kg/m³)

C	SF	W	S	SP	W/C	f' _c
525	131.25	204	1210	9	0.38	570

Table 6. Self-compacting mortar mixture

۳-۳- طرح مخلوط بتن معمولی

در این پژوهش ۴ مورد طرح مخلوط مختلف برای دستیابی به مناسب‌ترین طرح انجام شد. طرح مخلوط مورد استفاده برای بتن معمولی مطابق جدول (۷) است.

جدول ۷. طرح مخلوط بتن معمولی (kg/m³)

C	W	S	CA	W/C	Slump	f' _c
330	207	985	865	0.62	16 cm	310

Table 7. Normal concrete mixture

۴- برنامه آزمایشگاهی

تعداد نمونه‌ها در این پژوهش ۴۲ عدد است که ۶ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های کنترل، ۶ عدد به عنوان نمونه‌های کنترل آسیب‌دیده و ۳۰ عدد نمونه‌های آسیب‌دیده‌ای هستند که با لایه بتنی پوششی جدید و الیاف کربن مقاوم‌سازی شده‌اند. ارتفاع کل ستون‌های بتنی مربعی و دایروی ۳۲ سانتی‌متر بوده است. برای مدل کردن فیزیکی آسیب‌دیدگی ستون‌ها و تخریب بتن پوششی آنها نمونه‌های کنترل آسیب‌دیده با ابعاد ۹×۹ سانتی‌متر مربع ساخته شده‌اند، به عبارتی از هر طرف به اندازه ۱/۵ سانتی‌متر به عنوان بتن پوشش تخریب شده از ابعاد ستون‌های اولیه کاسته شده است. نمونه‌های آسیب دیده مقاوم‌سازی شده مربعی بعد از اضافه کردن ۱/۵ سانتی‌متر بتن RPC به ابعاد ۱۲×۱۲ سانتی‌متر مربع تبدیل شده‌اند. همچنین نمونه‌هایی که برای مقاوم‌سازی، مقطع آنها به شکل دایره تغییر داده شده‌اند دارای قطر ۱۲ سانتی‌متر بوده‌اند. چگونگی نامگذاری ستون‌ها و تعداد آنها مطابق جدول (۸) است. همچنین نمونه‌های کنترل (۱۲×۱۲ سانتی‌متر مربع) و نمونه‌های کنترل آسیب دیده (۹×۹ سانتی‌متر مربع) نیز گوشه بوده در حالی که نمونه‌های مقاوم‌سازی شده مربعی (۱۲×۱۲) با شعاع گوشه ۱/۵ سانتی‌متر هستند. نمونه‌ها پس از ساخت و عمل‌آوری در سن مورد نظر تحت بار محوری یکنواخت قرار گرفته و رفتار بار- تغییر مکان آنها رسم شده است. اثر تعداد لایه‌های الیاف کربن، شکل مقطع و نوع بتن لایه پوششی در افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی ستون‌های آسیب دیده مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۴- بتن ریزی با بتن معمولی

بتن معمولی مطابق با طرح مخلوط گفته شده ساخته شده و در داخل قالب‌ها ریخته شدند. قالب‌ها در سه مرحله پر شده و در هر مرحله ۲۵ ضربه توسط میله فلزی برای متراکم کردن بتن به

است. بیشتر نمونه‌های ترمیم‌شده به صورت دورپیچ محصور شده‌اند که در این نمونه‌ها اثر جمع‌شدگی به دلیل محصورشدگی اهمیت چندانی ندارد. اما در مورد نمونه‌هایی که تنها با بتن لایه‌ی پوششی فوق توانمند ترمیم شدند برای کاهش اثر جمع‌شدگی از الیاف فولادی استفاده است که می‌تواند باعث کاهش جمع‌شدگی شود [13]. از سه نوع بتن پوششی (بتن فوق‌توانمند، بتن فوق‌توانمند الیاف‌دار و ملات خودتراکم) برای ترمیم نمونه‌های آسیب دیده استفاده شده است. نمونه‌های آسیب دیده (۹×۹) که روی آن‌ها خراش ایجاد شده مطابق شکل (۱) در قالب‌های مربعی (۱۲×۱۲ سانتی‌مترمربع) با شعاع گوشه ۱/۵ سانتی‌متر و قالب‌های دایروی به قطر ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفته و دور آن‌ها با انواع بتن لایه پوششی پر شدند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌های ترمیم شده با لایه پوششی (۳۰ عدد) از داخل قالب بیرون آورده شده و به همراه نمونه‌های کنترل و نمونه‌های کنترل آسیب دیده به مدت ۳۶ روز عمل‌آوری شدند. پس از گذشت ۱۵۰ روز از ساخت نمونه‌ها، نمونه‌های ترمیم شده با لایه پوششی بتن فوق‌توانمند و خودتراکم با سطح مقطع مربعی و هم‌چنین دایروی با یک و دو لایه الیاف کربن دورپیچ شدند.

آن‌ها وارد می‌شد. در این مرحله از کار نمونه‌های کنترل (۶ عدد) و نمونه‌های آسیب دیده (۳۶ عدد) در مدت دو روز ساخته شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از داخل قالب‌ها بیرون آورده شده و در داخل مخزن آب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند.

نمونه‌های آسیب دیده‌ای که قرار بود با لایه پوششی بتن جدید و دورپیچ کردن به الیاف کربن مقاوم‌سازی شوند، برای تأمین چسبندگی بین بتن لایه پوششی و بتن هسته مطابق شکل (۱) شیارهایی با عمق ۳ میلی‌متر و در فواصل ۳ سانتی‌متر روی نمونه‌ها به صورت شطرنجی ایجاد شدند.

۲-۴- اجرای بتن لایه پوششی و الیاف کربن

بتن لایه پوششی با عیار سیمان زیاد بوده و بحث جمع‌شدگی می‌تواند مطرح باشد. از بین انواع جمع‌شدگی، در بتن‌های با مقاومت بالا خودجمع‌شدگی حائز اهمیت است [11]. برای جلوگیری از کاهش مقاومت و روانی بتن در این پژوهش از عوامل کاهنده‌ی جمع‌شدگی و یا مواد شیمیایی منبسط‌شونده استفاده نشده و با توجه به اینکه عمل‌آوری خیس بهترین عملکرد را در کاهش جمع‌شدگی دوغاب سخت‌شده دارد [12]، از این روش با زمان عمل‌آوری طولانی استفاده شده

جدول ۸. چگونگی نام‌گذاری ستون‌ها

Column name	Type	No. of specimens
C	Control	6
CD	Damaged control	6
RUF	Retrofitting with ultra-high performance fiber reinforced concrete cover layer - square section	6
RUNW1-S	Retrofitting with ultra-high performance concrete cover layer and wrapping by a layer of carbon fiber-reinforced polymer - square section	4
RUNW2-S	Retrofitting with ultra-high performance concrete cover layer and wrapping by two layer of carbon fiber-reinforced polymer - square section	2
RSCW1-S	Retrofitting with self-compacting mortar cover layer and wrapping by a layer of carbon fiber-reinforced polymer - square section	4
RSCW2-S	Retrofitting with self-compacting mortar cover layer and wrapping by two layer of carbon fiber-reinforced polymer - square section	2
RUNW1-C	Retrofitting with ultra-high performance concrete cover layer and wrapping by a layer of carbon fiber-reinforced polymer - circular section	4
RUNW2-C	Retrofitting with ultra-high performance concrete cover layer and wrapping by two layer of carbon fiber-reinforced polymer - circular section	2
RSCW1-C	Retrofitting with self-compacting mortar cover layer and wrapping by a layer of carbon fiber-reinforced polymer - circular section	4
RSCW2-C	Retrofitting with self-compacting mortar cover layer and wrapping by two layer of carbon fiber-reinforced polymer - circular section	2

Table 8. Abbreviations used for specimens

پوششی بتن فوق‌توانمند الیاف‌دار مقاوم‌سازی شده و رفتار بار تغییرمکان ستون‌ها در شکل (۲) آورده شده است. مطابق جدول (۹) ستون مقاوم‌سازی شده با لایه بتن فوق‌توانمند با الیاف فولادی علاوه بر اینکه باعث بازگشت ظرفیت باربری و جذب انرژی ستون کنترل آسیب دیده شده است، در مقایسه با ستون کنترل از لحاظ مقاومت و جذب انرژی به ترتیب ۳۳ و ۸۵ درصد افزایش یافته است که به دلیل مقاومت بالای بتن لایه پوششی و چسبندگی خوب با بتن هسته است.

شکل ۲. رفتار بار- تغییرمکان ستون‌های CD، C و RUF

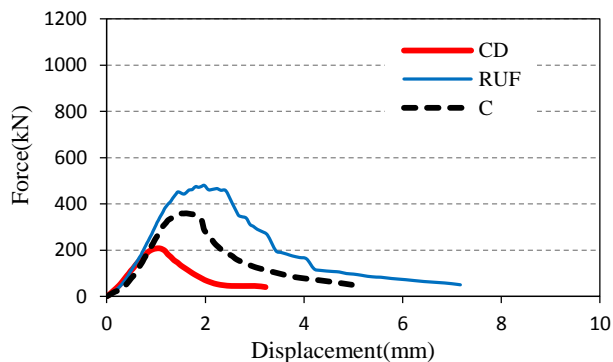


Fig. 2. Load-Displacement Behavior of columns

جدول ۹. مقایسه درصد افزایش جذب انرژی و حداکثر مقاومت ستون‌های

CD، C و RUF

Column type	Max strength	Percent increase	absorbing energy	Percent increase
C	359		777	
CD	208	-42	308	-60
RUF	408	33	1444	85

Table 9. Comparison of the increase in energy absorption and the maximum strength of the columns of CD, C and RUF

۵-۲- اثر تعداد لایه‌های الیاف کربن

مطابق شکل (۳) با افزایش تعداد لایه‌های الیاف کربن در هر دو حالت دایروی و مربعی با انواع بتن پوششی، مقاومت و جذب انرژی به دلیل افزایش اثر محصورشدگی افزایش یافته است.

با اطمینان از خشک و تمیز بودن سطح نمونه‌ها، الیاف کربن با استفاده از چسب اپوکسی با در نظر گرفتن ۱۵ سانتی‌متر هم‌پوشانی دور نمونه‌ها دورپیچ شدند.

۴-۳- آزمایش بارگذاری

برای تعیین ظرفیت باربری ستون‌ها از آزمایش فشار محوری یکنواخت استفاده شده است. دستگاه بارگذاری با ظرفیت ۲۰۰۰ kN و یک کرنش‌سنج با ظرفیت ۲۰ mm و حساسیت ۰/۰۱ mm برای اندازه‌گیری جابه‌جایی محوری ستون استفاده شده است. تمامی آزمایش‌ها با سرعت بارگذاری ۱ kN/sec در محل آزمایشگاه تکنولوژی بتن و سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام شده است.

شکل ۱. اجرای شیارها و بتن لایه پوششی



Fig. 1. Implementation of grooves and cover layer

۵- نتایج آزمایش‌ها و بحث

پس از استخراج داده‌ها برای هر سری از نمونه‌ها، رفتار بار-تغییرمکان آنها رسم شده است که در این بخش روی ظرفیت باربری، چگونگی خرابی و جذب انرژی آن‌ها بحث می‌شود. در ادامه مقاومت، جذب انرژی و تنش به ترتیب بر حسب کیلونیوتن، ژول و مگاپاسکال است.

۵-۱- اثر لایه پوششی بتن فوق‌توانمند الیاف دار

مقاومت و جذب انرژی ستون‌های کنترل که بتن پوشش خود را از دست داده بودند، مطابق شکل (۲) به ترتیب ۴۲ و ۶۰ درصد کاهش یافته است. ستون‌های کنترل آسیب دیده با لایه

شکل ۳. رفتار بار-تغییر مکان ستون‌های مختلف با یک و دو لایه الیاف کربن

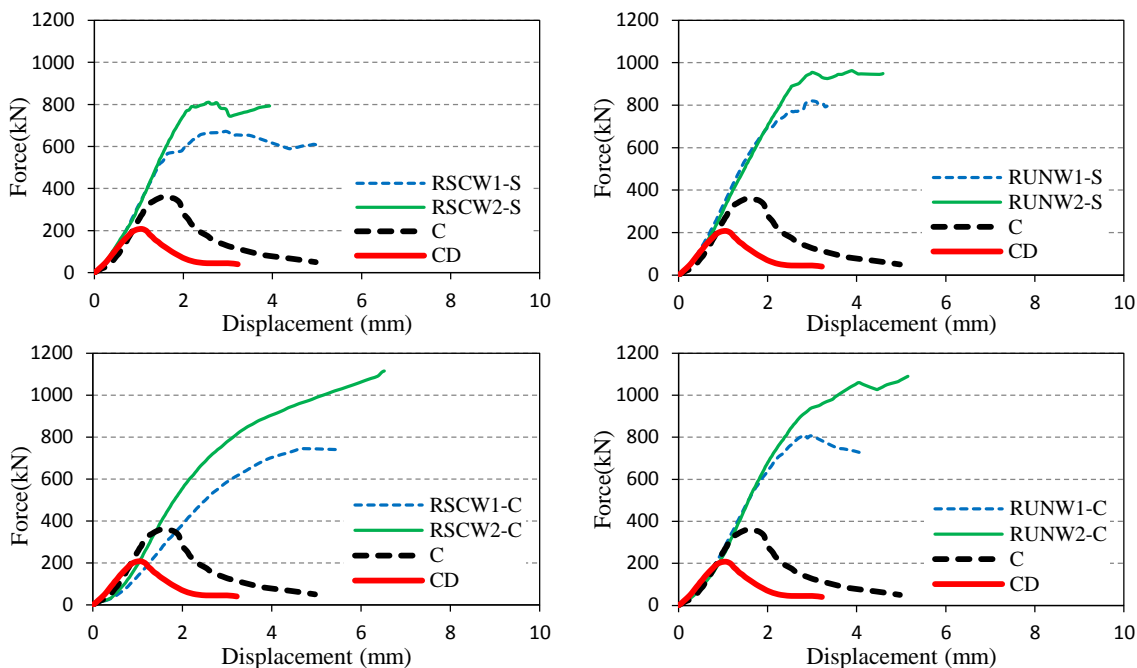


Fig. 3. Load-Displacement behavior of columns with one and two layers of carbon polymer

در حالت دور پیچ کردن ستون با دو لایه الیاف کربن به صورت دایروی، ستون ترمیم شده با لایه پوششی ملات خودتراکم دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به لایه پوششی بتن فوق‌توانمند است و همچنین از لحاظ اقتصادی نیز ملات خودتراکم نسبت به بتن فوق‌توانمند مقرون به صرفه است. از آنجا که جذب انرژی بتن فوق‌توانمند به مراتب از بتن خودتراکم کمتر است، ستون‌های مقاوم‌سازی شده با لایه پوششی ملات خودتراکم (در هر دو حالت دایروی و مربعی با دورپیچ کردن با یک یا دو لایه الیاف کربن) بیشتر جذب انرژی بیشتری نسبت به لایه پوششی بتن فوق‌توانمند دارند. رفتار بار-تغییر مکان این ستون‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴-۵- اثر شکل مقطع

رفتار تنش-کرنش ستون‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق جدول (۱۱) در ستون‌های مقاوم‌سازی شده با یک لایه دورپیچ الیاف کربن و لایه پوششی ملات خودتراکم یا بتن فوق‌توانمند، اختلاف درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به ستون کنترل، در ستون RUNW1-C نسبت به ستون RUNW1-S، ۵۱ درصد می‌باشد و اختلاف درصد افزایش مقاومت ستون

۳-۵- اثر نوع بتن لایه پوششی

در ستون‌های مقاوم‌سازی شده به صورت مربعی، اختلاف درصد افزایش مقاومت نسبت به ستون کنترل، در ستون RUNW1-S نسبت به ستون RSCW1-S، ۴۱ درصد است (جدول ۱۰). همچنین اختلاف درصد افزایش مقاومت ستون RUNW2-S نسبت به ستون RSCW2-S، ۴۳ درصد است. می‌توان نتیجه گرفت برای مقاوم‌سازی ستون‌های با سطح مقطع مربعی با لایه پوششی مربعی شکل، استفاده از بتن فوق‌توانمند مناسب‌تر است. می‌توان گفت که در ستون‌های با سطح مقطع مربعی، فشار جانبی محصورشدگی یکنواخت نیست و تنها قسمتی از بتن به طور موثر تحت فشار جانبی قرار می‌گیرد. در ستون‌های مقاوم‌سازی شده به صورت دایروی، اختلاف درصد افزایش مقاومت نسبت به ستون کنترل، در ستون RUNW1-C نسبت به RSCW1-C، ۱۸ درصد است و اختلاف درصد افزایش مقاومت ستون RSCW2-C نسبت به RUNW2-C، ۷ درصد است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که در مقاوم‌سازی ستون به شکل دایروی، فشار محصور شدگی یکنواخت بوده و کل بتن به طور موثر تحت فشار جانبی قرار می‌گیرد و به همین علت اثر نوع بتن لایه پوششی کاهش پیدا می‌کند. به طوری که

ستون RSCW2-S، ۱۶۳ درصد می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که ستون‌های مقاومسازی شده به شکل دایروی، افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی بیشتری نسبت به ستون‌های مقاومسازی شده به شکل مربعی دارند.

RSCW1-C نسبت به ستون RSCW1-S، ۷۱ درصد می‌باشد. برای ستون‌های با دولایه الیاف کربن مشاهده شد که، اختلاف درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به ستون کنترل، در ستون RUNW2-C نسبت به ستون RUNW2-S، ۱۱۰ درصد می‌باشد و اختلاف درصد افزایش مقاومت ستون RSCW2-C نسبت به

شکل ۴. رفتار بار-تغییر مکان ستون‌ها نوع بتن لایه پوششی متفاوت

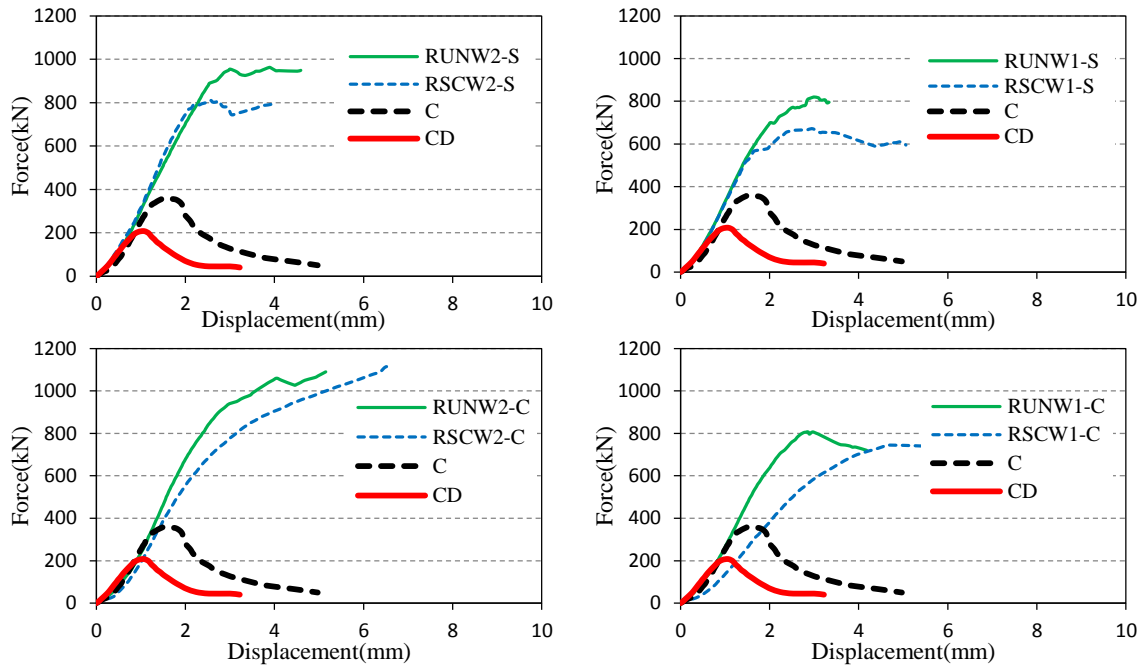


Fig. 4. Load-Displacement behavior of columns with various concrete cover layer

شکل ۵. رفتار تنش - کرنش ستون‌های با شکل مقطع متفاوت

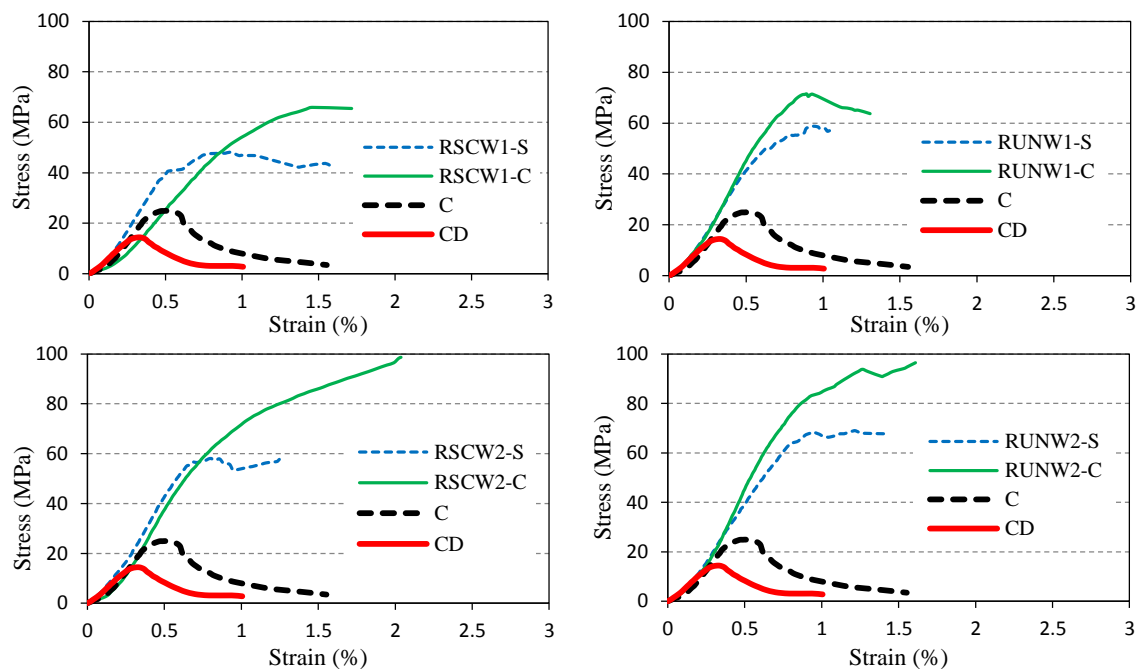


Fig. 5. Stress-Strain behavior of columns with various section shape

ایجاد شده و با اعمال نیروی بیشتر این ترک‌ها به صورت قطری و عمودی در امتداد ستون گسترش پیدا کرده تا اینکه ستون مقاومت خود را از دست داده و گسیخته می‌شود، چگونگی انتشار ترک در شکل (۶ ب) نشان داده شده است.

- با اعمال نیرو بر ستون‌های مقاوم‌سازی شده با لایه پوششی (بتن فوق‌توانمند و ملات خودتراکم) و دورپیچ شده به الیاف کربن، تنش‌ها از بتن هسته به بتن لایه پوششی و سپس به الیاف کربن منتقل می‌شوند، به طوریکه هیچ‌گونه جداشدگی بین الیاف کربن و بتن اتفاق نمی‌افتد و با اعمال نیروی بیشتر، ترک‌ها در بتن افزایش پیدا کرده ولی چون الیاف کربن اثر محصورکنندگی دارد نیرو هم چنان افزایش پیدا می‌کند تا اینکه الیاف کربن به کرنش نهایی خود رسیده و به صورت انفجاری در ستون‌های دایروی از وسط و در ستون‌های مربعی از وسط و گوشه گسیخته می‌شود، نتایج برای ستون با مقطع مربعی و دایروی در شکل (۶ ج) نشان داده شده است.

۶- تحلیل عددی

با توجه به محدودیت‌های موجود در امکانات آزمایشگاهی، برای تعمیم نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، استفاده از مدل‌های کامپیوتری اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش برای مدل‌سازی، از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS/CAE 6.12 استفاده شده است. نوع تحلیل در نظر گرفته شده در این پژوهش به صورت Static-General می‌باشد و نیز از روش کنترل تغییرمکان برای یافتن ظرفیت باربری ستون‌های کنترل و مقاوم‌سازی شده استفاده شده است. برای مدل‌سازی بتن از المان SOLID C3D8R و نوع ایزوتروپیک استفاده شده است. برای تعریف ویژگی‌های رفتار غیرخطی بتن از مدل خسارت پلاستیک بتن (Concrete damage plasticity) استفاده شده که حالت تعمیم‌یافته معیار دراگر-پراگر است و یک سطح شکست مخروطی برای چگونگی خرابی بتن در نظر می‌گیرد. برای تعریف رفتار فشاری بتن از رابطه تنش-کرنش ارائه شده توسط معادلات اصلاح شده پوپویچ (Popovics) استفاده شده است [14]. برای تعیین رفتار کششی بتن نیز از رابطه بلاربی و اچ‌سو استفاده شده است [15].

جدول ۱۰. مقایسه درصد افزایش جذب انرژی و حداکثر مقاومت نمونه‌ها

Column type	Max strength	Percent increase	absorbing energy	Percent increase
C	359		777	
CD	208	-42	308	-60
RUNW1-S	820	128	1696	118
RSCW1-S	671	87	2560	230
RUNW2-S	962	168	2988	285
RSCW2-S	810	125	2232	187
RUNW1-C	807.5	125	2213	185
RSCW1-C	745	107	2546	227
RUNW2-C	1090	203	3584	361
RSCW2-C	1115	210	4512	480

Table 10. Comparison of the percentage of energy absorption and maximum strength of the specimens

جدول ۱۱. مقایسه درصد افزایش جذب انرژی و حداکثر تنش در نمونه‌ها

Column type	Max Stress	Percent increase	Absorbing energy	Percent increase
C	24.93		777	
CD	14.44	-43	308	-60
RUNW1-S	58.78	136	1696	118
RUNW1-C	71.46	187	2213	185
RSCW1-S	48.10	93	2560	230
RSCW1-C	65.92	164	2546	227
RUNW2-S	68.96	177	2988	285
RUNW2-C	96.46	287	3584	361
RSCW2-S	58.06	133	2232	187
RSCW2-C	98.67	296	4512	480

Table 11. Comparison of the percentage of energy absorption and maximum stress of the specimens

۵-۵- مدهای خرابی

بررسی چگونگی خرابی تمامی ستون‌ها که تحت بار محوری یکنواخت قرار گرفته بودند نشانگر آن است که:

- با اعمال نیرو بر روی ستون‌های کنترل و کنترل آسیب دیده، ترک‌هایی از گوشه آن‌ها شروع شده و با بیشتر شدن نیرو ترک‌ها به صورت قطری در امتداد ستون گسترش پیدا کرده تا اینکه ستون مقاومت خود را از دست داده و گسیخته می‌شود، نحوه انتشار ترک در شکل (۶ الف) نشان داده شده است.

- با اعمال نیرو بر ستون‌های مقاوم‌سازی شده با لایه پوششی بتن فوق‌توانمند الیاف‌دار ترک‌هایی از گوشه و وسط ستون

شکل ۶. مدهای خرابی نمونه‌ها

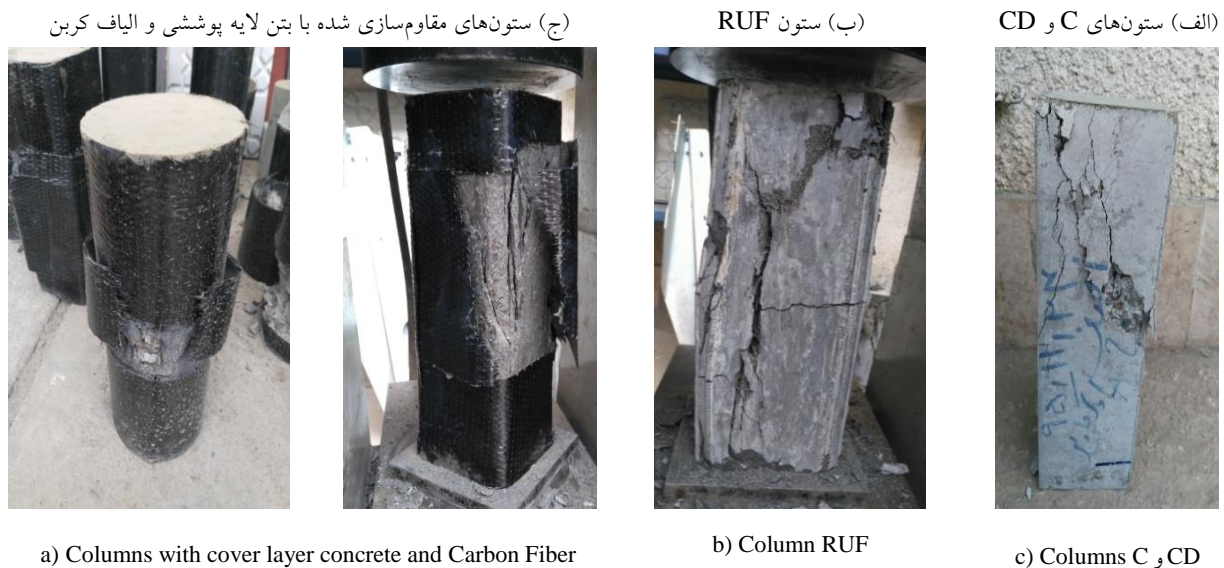


Fig. 6. Failure mode of specimens

شکل ۸. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی رفتار بار- تغییر مکان

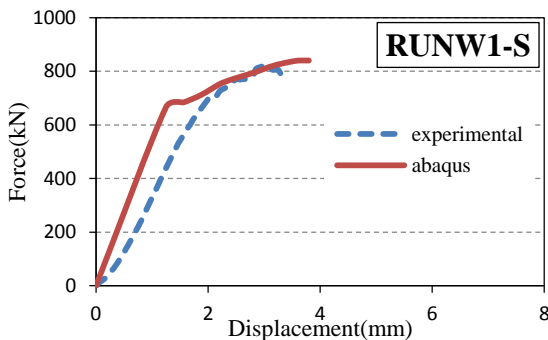


Fig. 8. Comparison of analytical and experimental Load-Displacement behavior of columns

جدول ۱۲. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

Column type	Experimental Max Strength	Analytical Max Strength	Percent Error
C	359	347.53	3.3
CD	208	227.76	9.5
RUF	480	457.75	4.86
RUNW1-S	820	840.25	2.46

Table 12. Comparison of numerical and experimental results

۷- مدل‌سازی ستون در ابعاد بزرگ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ابعاد کوچک

پس از درستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی با نتایج نرم‌افزاری، یک ستون مربعی با ارتفاع ۳۲۰ cm و سطح مقطع (۱۰۰×۱۰۰ cm²) به عنوان ستون کنترل در نظر گرفته شده است. فرض شده این ستون در اثر خوردگی آرماتور، بتن لایه پوششی خود را از دست

برای مدل‌سازی الیاف کربن از المان Shell S4R و خواص ارتجاعی از نوع lamina استفاده شده است. از آنجایی که در آزمایشگاه هیچ‌گونه جداسدگی بین الیاف کربن و بتن اتفاق نیفتاده بود، اندرکنش بین الیاف کربن و بتن از نوع Tie در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه مدل‌سازی ستون RUNW1-S در شکل (۷) آورده شده است. برای درستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی با نرم‌افزاری ستون‌های نوع C، CD، RUF و RUNW1-S در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و نمونه‌ای از نتایج آن برای ستون‌های مختلف در شکل (۸) ارائه شده است. درستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی مطابق جدول (۱۲) است.

شکل ۷. مدل‌سازی ستون نوع RUNW1-S

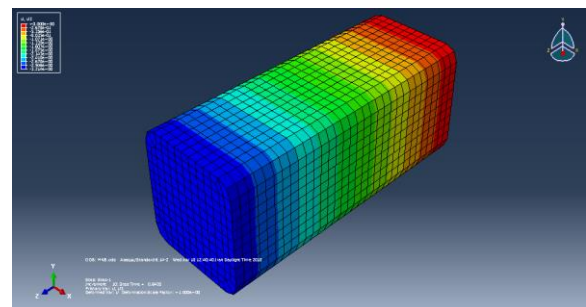


Fig. 7. RUNW1-S column modeling

جدول ۱۴. نتایج نمونه آزمایشگاهی با ابعاد کوچک

Column type	Max Stress	Percent increase
C	24.93	
CD	14.44	-43
RUF	34.40	38
RUNW1-S	58.78	136
RUNW2-S	68.96	177

Table 14. Experimental specimen with small dimensions

۸- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی اثر هم‌زمان الیاف کربن و بتن فوق‌توانمند در مقاوم‌سازی ستون‌های مربعی بتنی آسیب دیده انجام یافته است که نتایج زیر حاصل شده‌اند:

۱- ستون‌های مقاوم‌سازی شده از لحاظ مقاومت و جذب انرژی افزایش چشمگیری داشته است. کمترین تاثیر مربوط استفاده از لایه پوششی بتن فوق‌توانمند الیاف‌دار است که از لحاظ مقاومت و جذب انرژی نسبت به ستون کنترل به ترتیب ۳۳ و ۸۵ درصد افزایش یافته است. بیشترین تاثیر مربوط به استفاده از لایه پوششی ملات خودتراکم و دورپیچ کردن با دو لایه الیاف کربن می‌باشد که از لحاظ مقاومت و جذب انرژی به ترتیب ۲۱۰ و ۴۸۰ درصد افزایش یافته است.

۲- نتایج نشان می‌دهد که چون اثر محصورشدگی در مقاطع دایروی یکنواخت بوده و کل بتن به طور موثر تحت فشار جانبی قرار می‌گیرد، از اثر نوع بتن لایه پوششی کاسته می‌شود. بنابراین مقرون‌به‌صرفه خواهد بود که برای ستون‌های به شکل دایروی از ملات خودتراکم استفاده گردد.

۳- ستون‌های مقاوم‌سازی شده با بتن لایه‌پوششی و دورپیچ کردن به الیاف کربن با شکل مقطع دایروی نسبت به ستون‌های مقاوم‌سازی شده مشابه با شکل مقطع مربعی ظرفیت باربری و جذب انرژی بیشتری دارند.

۴- از مقایسه نتایج آزمایشگاهی در ابعاد کوچک با نتایج عددی در ابعاد بزرگ، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش ابعاد ستون از اثر محصورشدگی الیاف کربن کاسته می‌شود. به عنوان نمونه، ستون مقاوم‌سازی شده با لایه پوششی بتن فوق‌توانمند و دورپیچ کردن با یک لایه الیاف کربن در ابعاد بزرگ مدل‌سازی نسبت به ستون کنترل، از لحاظ ظرفیت باربری ۴۰ درصد افزایش یافته است، در حالی که در لایه پوششی بتن فوق‌توانمند و دورپیچ کردن با یک لایه الیاف کربن در ابعاد کوچک

داده و با سطح مقطع $80 \times 80 \text{ cm}^2$ به عنوان ستون کنترل آسیب دیده و به صورت عددی مدل‌سازی شده است. سپس با لایه پوششی بتن فوق‌توانمند به ضخامت ۱۰ cm و دورپیچ کردن به الیاف کربن با شعاع گوشه ۱۰ cm مقاوم‌سازی شده است. مقایسه رفتارتنش-کرنش ستون آسیب دیده و مقاوم‌سازی شده در ابعاد بزرگ مطابق شکل (۹) است. نتایج حاصل از تحلیل عددی در ابعاد بزرگ در جدول (۱۳) آورده شده است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که بیشترین افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی مربوط به ستون مقاوم‌سازی شده با لایه پوششی بتن فوق‌توانمند و دورپیچ کردن با دو لایه الیاف کربن است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های در ابعاد کوچک به طور خلاصه در جدول (۱۴) آورده شده است.

با توجه به جدول (۱۴) ستون‌های مقاوم‌سازی شده RUNW1-S, RUF و RUNW2-S از لحاظ ظرفیت باربری نسبت به ستون کنترل (C) به ترتیب ۳۸، ۱۳۶ و ۱۷۷ درصد افزایش یافته است. در حالی که مطابق جدول (۱۳) ستون‌های مقاوم‌سازی شده L-RUN, L-RUNW1-S و L-RUNW2-S از لحاظ ظرفیت باربری نسبت به ستون کنترل (L-C) به ترتیب ۱۶، ۴۰ و ۵۷ درصد افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ابعاد ستون، اثر محصورشدگی توسط الیاف کربن کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۹. رفتار تنش - کرنش ستون با ابعاد بزرگ

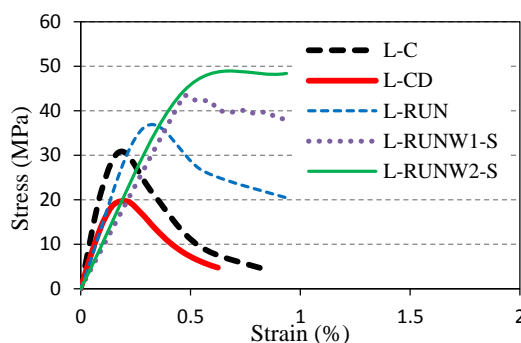


Fig. 9. Stress-strain behavior of large dimensions

جدول ۱۳. نتایج تحلیل عددی برای ستون با ابعاد بزرگ

Column type	Max Stress	Percent increase
L-C	30.89	
L-CD	19.57	-36
L-RUN	35.90	16
L-RUNW1-S	43.25	40
L-RUNW2-S	48.37	57

Table 13. Numerical results of large-dimension column

- 6- Dubey R. & Kumar P. 2016 Experimental study of the effectiveness of retrofitting RC cylindrical columns using self-compacting concrete jackets. *CONSTR BUILD MATER* 124, 104-117.
- 7- Tufani A. 2014 Investigating shear behavior of reactive powder concrete, MSc Thesis, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran (In Persian).
- 8- Molayee M. 2014 Investigating methods for enhancing strength of composite specimens against bullet, MSc Thesis, University of Tabriz, Iran (In Persian).
- 9- SikaWrap-330C, Carbon Fiber Fabric For Structural Strengthening.
- 10- Sikadur 330, Construction Manual-Sikadur 330 2-part Epoxy Impregnation Resin.
- 11- Al-Manaseer A. A., et al. 2005 Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete. *Concrete international*, 21.
- 12- HAN S., et al. 2018 The Modeling Research on the Early-Age Shrinkage of UHPFRC in Different Curing Conditions. *ADV CIV ENG*.
- 13- CHEN P., et al. 2018 Analysis and Modelling of Shrinkage and Creep of Reactive Powder Concrete. *Applied Sciences*, 8(5), 732.
- 14- Ghalenooyee & Shayanfar. 2003 Behavioral investigation of uniaxial compressive stress – strain equations of concrete, *6th national congress on Civil Engineering*, (In Persian).
- 15- Belarbi A., Zhang L. & Hsu T. 1996 Constitutive Laws of Reinforced Concrete Membrane Elements. In *Eleventh World Conference of Earthquake Engineering*.

آزمایشگاهی نسبت به ستون کنترل، از لحاظ ظرفیت باربری ۱۳۶ درصد افزایش یافته است.

۵- روش بکارگرفته شده در این پژوهش برای ایجاد چسبندگی بیشتر بین بتن هسته و بتن لایه پوششی با استفاده از شیارهای شطرنجی عملکرد مناسبی داشته است.

References

۹- مراجع

- 1- Silva M. A. & Rodrigues C. C. 2006 Size and relative stiffness effects on compressive failure of concrete columns wrapped with glass FRP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 334-342.
- 2- Al-Salloum Y. A. 2007 Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 640-650.
- 3- Sezen H. & Miller E. 2007 Retrofit of circular reinforced concrete columns using FRP, steel and concrete jackets. In *New Horizons and Better Practices*, ASCE.
- 4- Pham T., Doan L. & Hadi M. 2013 Strengthening square reinforced concrete columns by shape modification and CFRP. In *Structures Congress: Bridging Your Passion with Your Profession*, 2602-2613.
- 5- Belal M. F., Mohamed H. M. & Morad S. A. 2015 Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket. *HBRC Journal*, 11(2), 201-212.

Retrofitting of axially loaded damaged concrete square columns by combination of UHPC cover concrete and CFRP wrapping

Asghar Porkavosh¹, Hasan Afshin², Mohammad Charkhtab Basim^{3*}

1. MSc student, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* basim@sut.ac.ir

Abstract

The members of concrete structures may need to be retrofitted for various reasons, including poor quality of materials, design errors, structural changes, non-compliance with the requirements of design codes and also losing cover concrete due to rebar corrosion. Steel jackets, concrete jackets and fiber reinforced polymers can be mentioned as commonly used retrofit methods for concrete members. There are also several methods for retrofitting concrete columns that have lost their concrete cover. Using concrete jacket has some disadvantages, such as a significant increase in the weight of structure, increasing the element dimensions and the required time for the implementation of the rehabilitation. On the other hand, steel jackets have various difficulties in implementation stage. In this study, specimens of square concrete columns that have lost their cover concrete due to rebar corrosion have been investigated and have been retrofitted by combining a number of methods. These methods include the use of a new concrete layer and the wrapping of columns with carbon fiber. Combining these methods will result in the enhanced performance of the rehabilitation technique since these methods will cover the deficiencies of each other. It is expected that these combined methods will result in increased load capacity, energy absorption and ease of forming. Therefore, in this study, the combined effect of carbon fibers and high performance concrete layer is investigated. The combination of high compressive strength of this type of concrete and high tensile strength of carbon fibers can be used to increase the axial load capacity and energy absorption of square concrete columns. The variables of this study include the type of cover concrete (UHPC, UHPFRC and SCM) and the number of layers of carbon fiber (one or two layers). The total number of specimens in this study was 42, of which 6 were control specimens, 6 were damaged control specimens and 30 were damaged specimens, which were retrofitted with cover layer and carbon fiber. All of the specimens are placed under uniform axial load. The results of the experimental study show that in the retrofitting of the square column, it is better to use the UHPC coating layer. While it is better to use a self-compacting mortar as a coating layer in retrofitting the circular column. Retrofitted columns have significant increase in strength and energy absorption capacity compared to the control columns. The least effect was seen for the columns retrofitted with the coating layer of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), which showed an increase by 33% and 85% in terms of strength and energy absorption with respect to the control columns. The greatest effect was seen in the columns retrofitted with self-compacting mortar coating layer with two layers of carbon fiber, which increased the strength and energy absorption by 210 and 480%, respectively. Also, the results show that because the confinement effect in the circular sections is uniform and the entire concrete is effectively confined, the effect of the type of concrete on the coating layer is reduced. A numerical study on a real-dimension column was carried out to verify the results of the laboratory tests and also in order to allow the experimental results from small-sized samples be extended to large-scale columns. The results showed that by increasing the column dimensions, the carbon fiber confinement effect is significantly reduced.

Keywords: Concrete Columns, Retrofitting, UHPC, CFRP, Axial Loading