(بررسی عددی اثر شکل مقطع بر ظرفیت باربری نهایی ستون بتن مسلح تقویت شده با CFRP)

مسعود محمودآبادی (*، فرشته سخائی پور ۲

۱ – استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران ۲ – دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

چکيده

معمول ترین روش مقاومسازی ستونها، محصور کردن آنها با کامپوزیتهای FRP است؛ که باعث افزایش ظرفیت باربری محوری و جانبی ستون میشود. هدف اصلی در این تحقیق، بررسی مقاومسازی ستونهای بتن مسلح مربعی و مستطیلی با کامپوزیتهای FRP است. برای این منظور، ابتدا یک نمونهی آزمایشگاهی موجود، عیناً در نرمافزار آباکوس مدل سازی شد؛ به این ترتیب با مقایسه و نزدیک بودن نتایج نرمافزاری و آزمایشگاهی، صحت مدل سازی به اثبات رسید. سپس با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند شکل و ابعاد مقطع ستون و تعداد لایههای کامپوزیت، ۱۸ نمونهی تحلیلی تعریف و در نرمافزار آباکوس مدل سازی شدند. نمونههای تحلیلی به دو گروه، نیمی با شکل مقطع مربعی و نیمی دیگر با شکل مقطع مستطیلی تعریف و در نرمافزار آباکوس مدل سازی شدند. نمونههای تحلیلی به دو گروه، نیمی با شکل مقطع مربعی و نیمی دیگر با شکل مقطع مستطیلی تعسیم شدند. در هر گروه سه نمونه ی بدون تقویت، سه نمونهی تقویت شده با یک لایه و منه نمونه تقویت شده با دو لایه PRP در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از تحلیل مدل های اجزای محدود این نمونهها نشان داد که شکل مقطع ستون بر ظرفیت باربری محوری اثری ندارد ولی بر ظرفیت باربری جانبی مؤثر است. همچنین افزودن لایه های تران طول به عرض مقطع در نمونه های مستطیلی و با افزایش ابعاد مقطع در نمونههای مربعی تأثیر تعداد لایه های در با فرید این مرونیت باربری جانبی ستون اثر زیادی دارد و برخلاف ظرفیت باربری محوری حضور لایه دوم PRP بسیار مؤثر است. با افزایش نسبت محوری و جانبی و انرژی جذب شده توسط ستون کاهش می به.

کلمات کلیدی: ستون بتن مسلح، محصور شدگی، آباکوس، CFRP، ظرفیت باربری نهایی ستون.

«نویسنده مسئول: مسعود محمودآبادی پست الکترونیکی: m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

تاريخ دريافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاريخ پذيرش مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰

۱– مقدمه

دورپیچ نمودن ستونهای بتنی با پلیمرهای مسلح FRP، ازجمله روشهای نوین ترمیم و مقاومسازی این اعضا محسوب می شود. در اثر محصور شدگی، مدل رفتاری بتن تحت فشار کاملاً تغییر می کند. هنگامی که ستون بتنی محصور شده، تحت نیروی فشاری محوری قرار می گیرد؛ پوشش محصور کننده به دلیل اتساع جانبی ستون، تحت کشش قرار گرفته و تنشهای محصور کننده به هستهی بتنی اعمال می گردد؛ به این ترتیب باربری هستهی بتنی ادامه می یابد و ستون در تنش فشاری بالاتری منهدم می گردد [۱].

اولین ایدهی استفاده از کامپوزیتهای FRP برای محصور کنندگی توسط فردیس و خلیلی در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. این پژوهشگران با استفاده از فایبرگلاس بتن را دورپیچ نمودند. از آن زمان تاکنون آزمایشات متعدد و قابل ملاحظهای دررابطهبا بررسی رفتار ستونهای بتنی محصور شده با ورقهای FRP توسط دیگر پژوهشگران صورت گرفته است [۲].

مروری بر تحقیقات گذشته حاکی از آن است؛ اگرچه در زمینهی مقاومسازی ستونهای بتن مسلح با ورقهای FRP، مطالعات متنوعی انجام شده است. ولی در زمینهی تقویت ستونها با این نوع ورقها، باتوجهبه شکل مقطع ستون، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. بهعلاوه دررابطهبا مطالعهی پارامتری جنس کربنی این الیاف، کم و کاستی در مطالعات گذشته مشاهده میشود. لذا تحقیق حاضر به بررسی اثر شکل مقطع بر ظرفیت باربری محوری و جانبی ستونهای بتن مسلح تقویت شده با FRP می پردازد. برای این منظور، ۱۸ نمونه ستون بتن مسلح با استفاده از نرمافزار آباکوس مدلسازی شدند. نمونههای تحلیلی به دو گروه، نیمی با شکل مقطع مربعی و نیمی دیگر با شکل مقطع مستطیلی تقسیم شدند. در هر گروه، سه نمونهی بدون تقویت، سه نمونهی تقویت شده با یک لایه و سه نمونه تقویت شده با دو لایه CFRP در نظر گرفته شد. در هر گروه، سه نمونهی بدون تقویت، سه نمونهی تقویت شده با یک لایه و سه نمونه تقویت شده با دو لایه CFRP در نظر گرفته شد. جهت کنترل نتایج حاصل از مدلسازی و تحلیلی در نرمافزار آباکوس، یک نمونهی آزمایشگاهی موجود توسط نرمافزار آباکوس مدلسازی شد و نمودار نیرو-تغییرمکان آنها مقایسه گردید. همچنین از روابط موجود در مدل تحلیلی ارائه شده در همین نرمافزار آباکوس مدلسازی شد و نمودار نیرو-تغییرمکان آنها مقایسه گردید. همچنین از روابط موجود در مدل تحلیلی ارائه شده در همین نرمافزار آباکوس مدلسازی شد و نمودار نیرو-تغییرمکان آنها مقایسه گردید. همچنین از روابط موجود در مدل تحلیلی ارائه شده در همین نرمافزار آباکوس مدلسازی شد و نمودار نیرو-تغییرمکان آنها مقایسه گردید. همچنین از روابط موجود در مدل تحلیلی ارائه شده در همین نرمافزار آباکوس محوری نمونههای تحلیلی، براساس روابط ارائه شده تعیین و با مقادیر حاصل از مدلسازی نرمافزاری مقطع مقد تقویت و تقویت شده) میزان

در مرحلهی بعد، نمونههای تحلیلی تحت حداکثر تغییرمکان جانبی قرار گرفتند و ظرفیت باربری جانبی و انرژی جذب شده توسط آنها مورد مقایسه قرار گرفت.

در ادامه، روابط خطی برای محاسبهی ظرفیت باربری محوری و جانبی نمونههای مربعی و مستطیلی با خصوصیات مشابه ارائه شد.

۲- روش مدلسازی عددی و مقایسه با روش آزمایشگاهی

جهت ارزیابی صحت نرمافزار، از مدل آزمایشگاهی معالج و همکاران [۳] که در سال ۲۰۰۲ مورد آزمایش قرار گرفت، استفاده شده است. برای این منظور مدل آزمایشگاهی، در نرمافزار آباکوس مدلسازی میشود. سپس نتایج حاصل از تحلیل را مورد مقایسه قرار میدهیم. بهمنظور مدلسازی، ابتدا هندسهی هر قسمت از مدل بهصورت جداگانه مطابق جزئیات آزمایشگاهی در نرمافزار مدل میشود. به این روش مدلسازی که عمدتاً برای مدلهای پیچیده و مشتمل بر چند جزء به کار میرود، مدلسازی غیرمستقیم گفته میشود. سپس خواص نظیر هر یک از قسمتهای مدل در نرمافزار تعریف شده و به آن قسمت اختصاص مییابد. پس از این مراحل، اجزای مختلف مطابق مدل آزمایشگاهی بر روی هم سوار میشوند و تماس بین اجزای مختلف تعریف میشود. در ادامه بارگذاری و شرایط تکیهگاهی تعریف شده و مدل هندسی ساخته شده به تعدادی گره و المان تقسیم میشوند و آماده تحلیل میشود. در این تحقیق، جهت مدلسازی ستون بتنی از المان Solid (C3D8R) که یک المان شش وجهی هشت نقطهای با سختی کاهش یافته را معرفی می کند استفاده شده است، رفتار آرماتورها به صورت المان (C3D8R) که یک المان خرپایی با دو گره و سه درجه آزادی در هر گره است مدل شده و المان در نظر گرفته شده جهت مدل سازی (T3D2) که یک المان خرپایی با دو گره و سه درجه آزادی در هر گره است مدل شده و المان در نظر گرفته شده جهت مدل سازی FRP، به صورت المان Shell (S4R) است که یک المان چهار وجهی چهار نقطه ای با سختی کاهش یافته می باشد. اندر کنش بین مدل سازی FRP، به صورت المان Shell (S4R) است که یک المان چهار وجهی چهار نقطه ای با سختی کاهش یافته می باشد. اندر کنش بین بتن و ورق FRP به صورت المان المان S4R) است که یک المان چهار وجهی چهار نقطه ای با سختی کاهش یافته می باشد. اندر کنش بین بتن و ورق FRP به صورت المان المان می و میلگردها نیز به صورت Berbedded در بتن مدفون مدل سازی شده است. اندازه مش ها بر ابر من و میلی متر انتخاب می شود. (افزایش تعداد المانها تأثیر چندانی در نتایج نخواهد داشت). مدل آزمایشگاهی، ستونی با مقطع مستطیل شکل است. ابعاد و هندسه نمونه و مشخصات آرماتورها در شکل ۱ مشخص شده است.



مدل اجزای محدود نمونهی آزمایشگاهی معالج در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مدلسازی اجزای محدود در قیاس با نتایج آزمایشگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ : نمونه یمدل سازی شده ستون آزمایشگاهی معالج در نرمافزار آباکوس.



شکل۳ : نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی معالج و مدل اجزای محدود.

۳- مدلسازی

۱–۳– نمونههای مدلسازی ش<mark>ده</mark>

در این تحقیق، دو گروه نمونه بررسی میشود. ستونهای گروه اول عبارتاند از S400 ، S400 و S500 به ارتفاع ۳۰۰۰ میلیمتر که حرف اول نمونهها از کلمه Square بهمعنی مربع گرفته شده و عدد بعد از آن نشان دهنده ابعاد مقطع ستونها میباشد.

ستونهای گروه دوم عبارتاند از R400، R400 و R500 به ارتفاع ۳۰۰۰ میلیمتر که حرف اول نمونهها از کلمه Rectangular به معنی مستطیل گرفته شده و عدد بعد از آن نشان دهنده طول ستونها می باشد. (عرض ستونها ۳۰۰ میلی متر می باشد).

در تمامی نمونهها درصد آرماتورهای طولی مورد استفاده دو درصد و آرماتورهای عرضی مورد استفاده یک درصد و کاور بتن ۴۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. مشخصات بتن مورد استفاده با در نظر گرفتن مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با *F_c' = 25 MPa و مدول* الاستیسیتهی MP*a و 2500 MPa می*باشد. قطر آرماتورهای عرضی هشت میلیمتر میباشد. طول ناحیه بحرانی در همه نمونهها ۵۰۰ میلیمتر ابتدا و انتهای ستون در نظر گرفته شده است؛ همچنین فاصله بین آرماتورهای عرضی در ناحیه بحرانی ۸/ برابر فاصله بین آنها در ناحیه غیربحرانی است.

تمامی نمونهها در دو گروه ذکر شده را در سه حالت بدون تقویت، تقویت شده با یک لایه ورق FRP و تقویت شده با دو لایه ورق FRP بررسی مینماییم. تمامی نمونههای تقویت شده با FRP بهصورت کامل و در تمام طول ستون محصور شدهاند. تکیهگاه ستونها به شکل گیردار و بارگذاری محوری با اعمال جابجایی رو به پایین انجام شده است. شکل ۴ مقطع ستونهای مدلسازی شده را نشان میدهد.



۲-۳- مشخصات مصالح

باتوجهبه اینکه در مدلسازی ستون اجزای مختلفی نظیر میلگردها، بتن و ورقهای FRP استفاده شده است؛ ازاینرو خواص هر یک بهصورت جداگانه آورده میشود. <mark>بدیهی است این خواص در مدل</mark>سازی هر یک از اجزا نسبت داده شده است.

فولاد:

در جدول ۱ مشخصات فولادهای مورد استفاده معرفی شده است.

ضريب پواسون	مدول کششی (GPa)	تنش نهایی	تنش تسليم	نوع فولاد				
		(MPa)	(MPa)					
۰ /٣	۲۰۰	9	4	آرماتور طولى				
۰ /٣	۲۰۰	۳۷۰	۲۸۰	آرماتور عرضى				

جدول ۱ : مشخصات فولادهای مورد استفاده [۴]

الياف FRP:

مدلسازی FRP با استفاده از رفتار الاستیک Lamina و رفتار آسیب هشین صورت گرفته است. مشخصات الاستیک ورق FRP در جدول ۲ معرفی شده است.

t = 1 mm, $\sigma_{tensile} = 1500 MPa$, E = 181 GPa, $\upsilon = 0.28$

جدول ۲ : مشخصات الاستيک FRP

$E_1(MPa)$	$E_2(MPa)$	v_{12}	$G_{12}(MPa)$	$G_{13}(MPa)$	$G_{23}(MPa)$
181	1.4.	۰/۲۸	۷۱۷۰	۷۱۷۰	٧٠٠٠

نشریه علمی - پژوهشی «مهندسی سازه و ساخت»

نرمافزار آباکوس، رفتار هشین را در قالب مدل Damage for Fiber-Reinforced Composites ارائه میدهد. این رفتار چهار مکانیزم شروع آسیب متفاوت: کشش الیاف، فشار الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه را در نظر می گیرد [۶]. در جدول ۳ پارامترهای مورد استفاده برای این رفتار معرفی شده است.

[۵]	FRP	هشين	آسيب	مشخصات	جدول۳:	
-----	-----	------	------	--------	--------	--

مقاومت كششى	مقاومت	مقاومت كششى	مقاومت	مقاومت	مقاومت
(MPa)	فشارى	عمودی (MPa)	فشارى عمودى	برشى	برشى عمودى
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)
10	10	۴.	749	۶۸	١٢٣

بتن:

مدلسازی بتن با استفاده از رفتار آسیب پلاستسیته بتن انجام شده است. بتن از رده C₂₅ میباشد. خصوصیات تعریف شده برای بتن مطابق جدول ۴ میباشد.

Density = 2400 kg/m³

E = 25000 Mpa , v = 0.2

جدول۴ : پارامترهای پلاستیک بتن [۴]

زاويه اتساع	خروج از مرکزیت	fbo/fco	K _c	پارامتر ويسكوزيته
30.5	0.1	1.16	0.666	0.001
		Sec. 1		

برای نمونههای محصور نشده (بدون تقویت) در فاز فشاری بتن از رابطه تنش-کرنش هاگنستاد و برای نمونههای محصور شده (تقویت شده با ورق FRP) در فاز فشاری بتن از رابطه تنش-کرنش بتن محصور ساچاقلو و رازوی استفاده شده است [۷و ۸و ۹].

SSE

۴- مدل تحلیلی ارائه شده برای پیشبینی ظرفیت باربری محوری ستونهای بتن مسلح پوشیده شده با FRP

مجموع بار محوری روی ستون شامل هسته و کاور بتن، آرماتورهای طولی و پوشش FRP است. معادلات پیشنهاد شده توسط ساچاقلو و رازوی و هاگنستاد برای تعیین سهم هسته بتن محصور شده و کاور بتن محصور نشده استفاده شدند؛ همچنین این مدل میتواند شامل فشار محصور جانبی اعمال شده توسط پوشش FRP نیز شود [۳].

سهم بتن و میلگرهای فولادی

فشار محصور جانبی یکنواخت (f_l) برای خاموتهای مستطیلی به صورت زیر تعیین می شود: $f_l = \frac{\sum A_{st} f_{yt}}{sb_c}$ (۱)

در رابطه فوق b_c پهنای مقطع در فشار محصور فعال است، f_{yt} , f_{yt} بهترتیب تنش تسلیم، مساحت مقطع عرضی و فاصلهی آرماتورهای عرضی از یکدیگر است.

برای خاموتهای مربعی یا مستطیلی، فشار محصور، یکنواخت نیست. ضریب 4₃ برای کاهش دادن فشار محصور بهصورت زیر بیان میشود:

$$k_{3} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{c}}{s}\right)\left(\frac{b_{c}}{s_{l}}\right)\left(\frac{1}{f_{l}}\right)} \le 1$$
(Y)

در رابطه فوق s₁ فاصل<mark>هی بین آرمات</mark>ورهای طولی میباشد.

فشار محصور یکنواخت مؤثر برای یک مقطع مستطیلی به صورت زیر به دست می آید:
$$f_{le} = k_{3}f_{l}$$
 (۳)

چون ستونها فشار محصور متفاوتی در دو جهت عمود دارند، فشار محصور جانبی به صورت زیر به دست می آید که f_{lex} و f_{lex} فشار محصور مؤثر عمود بر b_{cx} و b_{cx} محصور مؤثر عمود بر b_{cx} و b_{cx}

$$f_{le} = \frac{f_{lex}b_{cx} + f_{ley}b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}}$$
(*)

مقاومت فشارى بتن محصور طبق رابطه زير بهدست مى آيد:

$$f_{cc}' = f_{co}' + k_l f_{le} \tag{(a)}$$

در رابطه فوق ضریب محصور شدگی $\left(k_{l}\right)$ از رابطه زیر بهدست می
آید.

$$k_{l} = 6.7 (f_{l})^{-0.17}$$
 (9)

کرنش نظیر مقاومت فشاری و رابطه تنش-کرنش بتن محصور پیشنهاد شده توسط ساچاقلو و رازوی، معادلهی هاگنستاد اصلاح شده برای بتن غیرمحصور است که طبق روابط ۲ تا ۹ بهدست میآید.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + 5K \right) \tag{V}$$

$$K = \frac{k_l f_l}{f_{co}} \tag{A}$$

$$f_{c} = f_{cc}' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{cc}} \right)^{2} \right]^{1/(1+2K)} \le f_{cc}'$$
(9)

ظرفیت باربری محوری، از ترکیب سهم هستهی بتن، کاور بتن و آرماتورهای طولی بهصورت زیر بهدست می آید:

$$N = A + B + C \tag{(1)}$$

سهم هسته بتن محصور توسط آرماتورهای عرضی:

$$A = 0.85 \left(A_{core} - \sum A_{sl} \right) f_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)}$$
(11)

سهم كاور بتن غيرمحصور:

$$B = 0.85 (A_c - A_{core}) f'_{co} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right]$$
(17)

$$m_{so} \bar{I}_{core} (a) D_{core} (a) D$$

در روابط فوق N بار محوری ستون، A_c مساحت مقطع عرضی ستون، A_{core} مساحت هسته بتن محصور شده توسط آرماتورهای عرضی، A_{sl} مساحت آرماتورهای طولی، f_{sl} تنش فشاری در آرماتورهای طولی است.

سهم آرماتوهای طولی

کمانش یا ناپایداری آرماتورهای طولی به ضریب شکل آرماتور $\left(rac{s}{d_h}
ight)$ وابسته است که نسبت طولی از آرماتور بدون نگهدارنده به

 $C = \sum f_{sl} A_{sl}$

قطر آن میباشد. اگر ضریب شکل آرماتور زیاد باشد، آرماتور پایداریاش را بهعلت کمانش اولیه از دست میدهد و تا کرنش سختشدگی ادامه می یابد. در شکل ۵ نمودار تنش-کرنش آرماتورهای فولادی در فشار نشان داده شده است.



شکل۵: نمودار تنش-کرنش آرماتورهای فولادی در فشار [۳].

اگر ضریب شکل آرماتور بزرگتر از هشت باشد، آرماتور در نقطه تسلیم ناپایدار میشود و تنش بهصورت خطی تا تنش و کرنش محدود طبق روابط زیر کم میشود.

$$f_{sl} = f_y - \left(\varepsilon_s - \varepsilon_y\right) \left[-23000 + 11000 \ln\left(\frac{s}{d_b}\right) \right]$$
(14)

for $\varepsilon_y \prec \varepsilon_s \leq \varepsilon_{S/DU}$

$$f_{S/DU} = 28f_y \left(\frac{s}{d_b}\right)^{-1.7} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{S/DU} = \left[40 - 6\ln\left(\frac{s}{d_b}\right) \right] \varepsilon_y \tag{19}$$

برای آرماتورهای با ضریب شکل کوچکتر از هشت، پاسخ تاحدی شبیه آرماتور در کشش با یک سختشدگی کرنش همراه است. اگر ضریب شکل، کوچکتر از چهار و نیم باشد، رفتار برابر آرماتور در کشش میشود.

$$f_{sl} = f_{y} + \left(f_{S/DU} - f_{sh}\right) \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{S/DU} - \varepsilon_{sh}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{S/DU} - \varepsilon_{sh}} \right)^{2} \right]$$
(1V)

for $\varepsilon_s \succ \varepsilon_{sh}$

$$f_{S/DU} = f_{sh} + (f_u - f_{sh}) \left[48e^{-0.9(s/d_b)} \right]$$
(1A)

$$\varepsilon_{S/DU} = \varepsilon_{sh} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}\right) \left[6e^{-0.4(s/d_b)} \right]$$
(19)

که $f_{s/DU}, f_u, f_{sh}, f_y$ بهترتیب تنش تسلیم، تنش معادل سخت شدگی کرنش، تنش نهایی و تنش محدود آرماتورهای طولی و $f_{s/DU}, f_u, f_{sh}, f_y$ کرنش نظیر تنش های مذکور میباشد. $\varepsilon_{s/DU}, \varepsilon_u, \varepsilon_{sh}, \varepsilon_y$

سهم پوشش FRP

برای ستونهای تقویت شده با پوشش FRP طولی و عرضی، محصوریت اضافی توسط پوشش FRP باید تعیین شود و برای بهدستآوردن فشار جانبی مؤثر اعمال شده بر هستهی بتن، به فشار جانبی مؤثر آرماتورهای عرضی اضافه شود. همچنین سهم پوشش FRP برای بار محوری روی ستون باید به حساب آورده شود. کاور بتن توسط پوشش FRP محصور شده و باید در محاسبه بار محوری منظور شود. مشابه مورد خاموتهای مستطیلی فشار محصور اعمال شده بر ستونهای مسلح مستطیلی توسط پوشش FRP یکنواخت نیست. مقدار ماکزیمم در گوشهها و مینیمم در وسط است. برای تعیین فشار محصور جانبی مؤثر، مقطع مستطیلی به یک مقطع دایروی با یک مساحت مقطع عرضی برابر تغییر شکل می دهد. فرض می شود لایههای FRP طولی و عرضی اطراف مقطع دایروی تغییر فرم داده را می پوشاند. فشار محصور جانبی شرکت داده شده توسط هر دو لایههای طولی و عرضی اطراف مقطع دایروی تغییر فرم داده را می پوشاند. فشار می شود:

نشریه علمی – پژوهشی «مهندسی سازه و ساخت»

انجمن مهندسي سازه ايران

$$f_{la} = \frac{\left(E_{a-0} N_{la-0} + E_{a-90} N_{la-90}\right) \varepsilon_a t_a}{R_a} \tag{(7.)}$$

زمانی که آرماتورهای عرضی جاری میشوند، فشار محصور جانبی ماکزیمم توسط آنها ایجاد میشود؛ همچنین زمانی که کرنش کششی در FRP برابر کرنش جاری شدن آرماتورهای عرضی میشود، فشار محصور جانبی ماکزیمم توسط پوشش FRP ایجاد میشود. بنابراین رابطه بالا بهصورت زیر نوشته میشود:

$$f_{la} = \frac{f_{yt}}{E_{st}} \frac{\left(E_{a-0} N_{la-0} + E_{a-90} N_{la-90}\right) t_a}{R_a} \tag{(1)}$$

در شکل ۶ مساحت محصور غیر مؤثر بتن توسط سهمیهایی با شیب [°]45 مشخص میشوند. معادلات مربوط به سهمیها بهصورت زیر است:

$$y_1 = \frac{1}{w_x} x^2 + \frac{1}{4} \left(2b_{cy} - w_x \right)$$
 (YY)

$$y_2 = -\left(\frac{1}{w_x}x^2 + \frac{1}{4}(2b_{cy} - w_x)\right)$$
(17)

در روابط فوق _x , w _x بهصورت زیر بهدست میآیند (r شعاع گوشه ستون است).

$$\begin{cases} w_x = b_{cx} - 2r \\ w_y = b_{cy} - 2r \end{cases}$$
(YF)



شكل 6 : سطح محصور مؤثر بتن [٣].

$$k_e = \frac{A_c - A_{ie}}{A_c} \tag{7\Delta}$$

که در آن A_{ie} مساحت محصور غیرمؤثر بتن است که از رابطه زیر بهدست می آید:

نشریه علمی – پژوهشی «مهندسی سازه و ساخت»

$$A_{ie} = \sum_{i=1}^{2} 2 \int_{0}^{w_{x}/2} (-1)^{i+1} \left(\frac{b_{cy}}{2} - y_{i}\right) dx + 2 \frac{w_{y}^{2}}{6} - 2 \int_{0}^{x_{1}} (y_{2} - y_{1}) dx$$
(79)

در ستونهای مستطیلی وقتی x = x₁ باشد، دو سهمی در طول ضلع بزرگتر در نقطه x = x₁ با یکدیگر برخورد میکنند؛ درنتیجه مساحت این قسمت باید از کل مساحت محصور غیر مؤثر کم شود. فشار محصور مؤثر جانبی توسط ورقههای FRP از رابطه زیر بهدست میآید:

$$f_{lae} = k_e f_{la} \tag{YY}$$

فشار محصور روی هستهی بتن از جمع فشار محصور اعمال شده توسط آرماتورهای عرضی و FRP بهدست میآید و فشار محصور روی کاور بتن تنها فشار محصور اعمال شده توسط FRP است.

سهم پوشش FRP در بار محوری ستون به صورت زیر محاسبه می شود:

$$D = \left(E_{ac-0}N_{la-0} + E_{ac-90}N_{la-90}\right)pt_a\varepsilon_c \tag{YA}$$

در رابطه فوق p محیط ستون و E_{ac-90} و E_{ac-90} مدول فشاری ورق FRP که الیاف آن در جهت $0, 0^\circ$ قرار دارند.

در جدول ۵ مقادیر بهدستآمده از مدل اجزای محدود و مدل تحلیلی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی آورده شده است.

ظرفیت باربری محوری (kN)	مدل
7.57	مدل آزمایشگاهی
1.54	مدل اجزاي محدود
T	مدل تحليلي

جدول۵ : مقایسه ظرفیت باربری محوری مدل آزمایشگاهی با مدل اجزای محدود و تحلیلی

۵– مقایسه رفتار ستونها

1-۵- ظرفیت باربری محوری نمونهها

شکل ۷ تا ۹ نمودار نیرو-تغییرمکان محوری نمونههای بدون تقویت و تقویت شده با یک لایه و دو لایه ورق CFRP را نشان میدهد. در این نمودارها هر منحنی بیانگر یک نمونه میباشد. همچنین در جدول ۶ مقادیر ظرفیت باربری محوری نمونهها آورده شده است.

همانطور که از نمودارها و جدول قابل برداشت است، در تمامی نمونههای مربعی و مستطیلی دورپیچ کردن ستون با یک لایه CFRP تأثیر فراوانی بر ظرفیت باربری محوری ستون خواهد داشت، اما افزودن لایه دوم تأثیر چندانی بر افزایش ظرفیت باربری محوری ستون نخواهد داشت. در نمونههای مربعی تأثیر افزودن یک لایه دورپیچ CFRP در ظرفیت باربری محوری ستون تقریباً معادل افزودن ۱۰۰ میلی متر بر بعد نمونه می باشد. میزان افزایش ظرفیت باربری محوری در نمونههای مستطیلی بررسی شده با افزودن یک لایه دورپیچ ۲۰۰ و با افزودن دو لایه دورپیچ CFRP، تا ۵۹٪ بوده است؛ که این نسبت با افزایش نسبت طول به عرض مقطع نمونه تقریباً ثابت بوده است. در نمونههای مربعی هرچه بعد نمونه بیشتر شود اثر افزودن لایه دورپیچ کننده CFRP بر ظرفیت باربری محوری کمتر می گردد. انجمن مهندسي سازه ايران



ونههای تقویت شده با دو لایه CFRP.	شکل۹ : نم
رفیت باربری محوری نمونههای مدلسازی شد	جدول۶ : مقايسه ظ

مقطع	تعداد لايه دورپيچ CFRP	ظرفیت باربری محوری (kN)	ظرفیت باربری محوری (kN)	درصد افزايش ظرفيت
		روش تحليلى	روش اجزای محدود	باربري محوري
\$300	-	2092/10	7877/87	-
\$300	1	4214/92	۳۹۸۶/۵	۵۱/۴۳
\$300	٢	0186/86	4077/88	Y1/Y9
S400	-	4010/24	401.124	-
S400	١	8772/66	8948/94	F0/8V
S400	٢	۸۲۶۴/۶۹	۷۷۱۴/۸۵	۶ ۱/V۳
\$500	-	V187/T1	Ya11/•Y	-
\$500	١	9917/84	1.879	41/18
\$500	٢	17+81/97	۱ ۱ ۸۵۶/۷	۵۷/۸۶
R400	-	3402/01	3014/21	-
R400	١	۵۳۸۳/۰۶	5424/89	41/18
R400	٢	8529/14	۵۶۹۱/۷۹	۵٩/۲۵
R450	-	ሞአ٩٨/۶۶	4.44/84	-
R450	١	699+/V	595V/+9	۴٧/۲٨
R450	٢	YT۵1/A9	<i>۶</i> ۴۴۸/۹۸	59/46
R500	-	4202/201	4482/10	-
R500	١	8004/97	۶۵۷۰/۲۹	47/22

سال ---، شماره -، ---- ----

، و ساخت»	«مهندسی سازه	– پژوهشی	نشريه علمي
-----------	--------------	----------	------------

سازه ايران	مهندسي	انجمن
------------	--------	-------

R500	٢	V914/80	४•४९/४४	۵۸/۶۳	
	•				

مطابق شکل ۱۰ یک رابطهی خطی بین سطح مقطع ناخالص ستون و ظرفیت باربری محوری مشاهده میشود. بهطوری که می توان ظرفیت باربری محوری نمونههای مربعی و مستطیلی با سطح مقطع دلخواه بدون تقویت و تقویت شده با یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP و با خصوصیات مشابه نمونههای مذکور را بهدست آورد.



۲-۵- ظرفیت باربری جانبی نمونهها

نمونههای مذکور در نرمافزار آباکوس تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی پوشاور قرار گرفته و نمودارهای برش پایه-تغییرمکان آنها استخراج شده است (شکل ۱۱ تا ۱۶). تحلیل استاتیکی پوشاور یک نوع تحلیل افزایشی است که نیرو بهصورت گامبهگام زیاد میشود و باعث هل دادن سازه میشود. این افزایش نیرو تا جایی ادامه مییابد که سازه دچار فرو ریزش شود. طبق استاندارد ۲۸۰۰ یک تغییرمکان هدف برابر ۲/۵ درصد ارتفاع ستون برای بالاترین نقطهی ستون در نظر گرفتیم [۱۰]. نتایج نشان داد که برای یک برش پایه مشخص میزان جابهجایی در نمونههای تقویت شده کمتر از نمونههای بدون تقویت است.





سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان جانبی نمایانگر مجموع انرژی جذب شده می باشد. در جدول ۷ مقادیر ظرفیت باربری جانبی و انرژی جذب شده توسط نمونهها آورده شده است. ا

مقطع	تعداد لايه	راستای اعمال	ظرفيت باربري	درصد افزايش	مجموع انرژی	درصد افزايش
	دورپيچ CFRP	تغييرمكان جانبي	جانبی (kN)	ظرفيت باربري	جذب شده	انرژی جذب شدہ
				جانبى	(kN.mm)	
S300	-	-	21/62	-	1420/81	-
S300	١	-	۵۰/۵۴	۸۴/۲۶	۲۳۱۵/۸۴	87/44
S300	٢	-	V1/79	109/91	2141/28	15./20
S400	-	-	۷۰/۵۶	-	<u> </u>	-
S400	١	-	180/10	۷۷/۳۶	۶۱۱۹/۲	۵۳/۵
S400	٢	-	۱۶٩/۸۵	14.141	V9V1/FT	99/94
S500	-	-	148/18	-	እ ۶۳۶/۶۳	-
S500	١	-	221/04	۵۱/۵۲	۹۳۴۶/۵۱	٨/٢٢
S500	٢	-	789/84	ለዮ/ዮአ	<u> </u>	۱۵/۳۸
R400	-	محور ضعيف	۵۲/۲۳	-	۲۹۳۳/۹۵	-

جدول۷ : مقایسه ظرفیت باربری جانبی و انرژی جذب شده نمونهها

نشریه علمی - پژوهشی «مهندسی سازه و ساخت»

انجمن مهندسي سازه ايران

R400	١	محور ضعيف	٩٣/٩۴	Y٩/٨۴	4041/48	۵۵/۰۳
R400	٢	محور ضعيف	188/28	140/88	۵۷۱۸/۸۶	94/97
R400	-	محور قوی	۳۷/۹۴	-	1987/97	-
R400	١	محور قوی	۵۰/۶۴	۳۳/۴۷	2427/61	24/22
R400	٢	محور قوی	۶١/٠۴	۶۰/۸۹	2762.24	۴۵/۸۹
R450	-	محور ضعيف	٧٠/•۶	-	4.02/99	-
R450	١	محور ضعيف	119/•9	۶٩/٩٧	58.2/54	۳۸/۲
R450	٢	محور ضعيف	143/29	1.4/94	۵۶۱۱/۶۵	۳۸/۴۲
R450	-	محور قوی	47/81	-	5190/8	-
R450	١	محور قوی	55/49	۳۰/۲۴	TFVV/V9	۲ ۱/۹۶
R450	٢	محور قوی	88/80	۵۵/۵	T114/V1	۴١/٨۶
R500	-	محور ضعيف	٨۴/٧٩	-	۵۰۰۹/۵۴	-
R500	١	محور ضعيف	188/88	۵۵/۹۴	۵۶۲۸/۰۱	17/84
R500	٢	محور ضعيف	187/47	۹۱/۵۶	۵۹۰۸/۹۸	۱۷/۹۵
R500	-	محور قوی	41/21		7447/89	-
R500	١	محور ق <mark>و</mark> ی	۶۰/ <i>۸۶</i>	۲۸/۰۵	۲۹۵۰/۹۹	۲۰/۵۶
R500	٢	محور قوی	٧١/۴	۵۰/۲۳	84.1/29	۳۸/۹۶

همانطور که از نمودارها و جدول ۷ قابل برداشت است، در تمامی نمونههای مربعی و مستطیلی که تحت حداکثر تغییرمکان جانبی قرار دارند، افزودن لایههای دورپیچ CFRP در ظرفیت باربری جانبی ستون اثر زیادی دارد و برخلاف ظرفیت باربری محوری حضور لایه دوم دورپیچ CFRP بسیار مؤثر است. همچنین کارایی محصور شدگی در مقاطع مربعی بیشتر از مقاطع مستطیلی است. در نمونههای مستطیلی با افزایش نسبت طول به عرض مقطع و در نمونههای مربعی با افزایش ابعاد مقطع کارایی محصور شدگی و درصد افزایش ظرفیت باربری جانبی ستون کاهش می ابد.

همانطور که از جدول ۷ قابل برداشت است <mark>در نمونههای مستطیلی که تغییرمکان جانبی در راستای محور ضعیف ستون میباشد؛ افزودن تعداد لایههای دورپیچ CFRP در انرژی جذب شده تأثیر چندانی ندارد. در نمونههای مستطیلی هرچه نسبت طول به عرض افزایش یابد و در نمونههای مربعی هرچه بعد نمونه بیشتر شود اثر افزودن تعداد لایههای دورپیچ CFRP بر افزایش انرژی جذب شده کمتر میشود.</mark>

مطابق شکل ۱۷ تا ۱۹ یک رابطهی خطی بین سطح مقطع ناخالص ستون و ظرفیت باربری جانبی نمونههای مربعی و مستطیلی مشاهده میشود. بهطوری که میتوان ظرفیت باربری جانبی نمونههای مستطیلی در راستای محورهای ضعیف و قوی و نمونههای مربعی با سطح مقطع دلخواه بدون تقویت و تقویت شده با یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP و با خصوصیات مشابه نمونههای مذکور را بهدستآورد.





شکل۱۹ : نمودار ظرفیت باربری جانبی- سطح مقطع نمونههای تقویت شده با دو لایه CFRP.

۶- نتیجهگیری

- ۱- مدلهای ساخته شده در این تحقیق بر اساس مدلسازی هجده مقطع ستون بتن مسلح در سه حالت بدون تقویت، تقویت شده با یک لایه و دو لایه ورق CFRP میباشد. شعاع گوشه در این مقاطع صفر در نظر گرفته شده و به همین دلیل میزان محصور شدگی به اندازهی کافی مؤثر نیست و منحنی تنش-کرنش بتن بعد از نقطه ی اوج با شاخه نزولی همراه بوده و رفتار کرنش-نرمی دارد [۱۱]. به این علت در مدلسازی از روابط تنش-کرنش بتن مصور ارائه شده توسط ساچاقلو استفاده شده است. پارامتر مورد است به اندازه مدل این معاد میزان میزان محصور شدگی می از این ماند می می از روابط تنش-کرنش بتن بعد از نقطه مورد این مواط ساخته شده مده این علت در مدل مازی از روابط تنش-کرنش بین محصور ارائه شده توسط ساچاقلو استفاده شده است. پارامتر مورد استخراج پس از آنالیز مدل ها نمودار نیرو-تغییرمکان میباشد.
- ۲- باتوجهبه نتایج و موارد ذکر شده میتوان بیان نمود که با تغییر ابعاد مقطع و تعداد لایههای دورپیچ CFRP، میتوان میزان ظرفیت باربری محوری و جانبی و جذب انرژی را در ستونها دستخوش تغییر قرار داد؛ در نمونههای مستطیلی با افزایش نسبت طول به عرض مقطع و در نمونههای مربعی با افزایش ابعاد مقطع کارایی محصور شدگی و تأثیر افزایش تعداد لایههای دورپیچ بر افزایش نخیر فرفیت باربری محوری و جانبی و جذب انرژی را در ستونها دستخوش تغییر قرار داد؛ در نمونههای مستطیلی با افزایش نماد مقطع کارایی محصور شدگی و تأثیر افزایش تعداد لایههای دورپیچ بر افزایش تعداد لایههای مربعی با افزایش ابعاد مقطع کارایی محصور شدگی و تأثیر افزایش تعداد لایههای دورپیچ بر افزایش ظرفیت باربری محوری و جانبی و انرژی جذب شده توسط ستون کاهش مییابد؛ همچنین شکل مقطع در نمونههای بررسی شده بر ظرفیت باربری محوری اثری ندارد ولی در ظرفیت باربری جانبی مؤثر است؛ بهطوری که میتوان گفت نیروی جانبی قابل تحمل توسط نمونههای مستطیلی در راستای محور ضعیف در مقایسه با نمونههای مربعی با سطح مقطع مشابه میتواند تا میزان ۲۶٪ افزایش یابد؛ همچنین نیروی جانبی قابل تحمل توسط نمونههای مستطیلی در راستای محور ضعیف در مقایسه با نمونههای مربعی با سطح مقطع مشابه میتواند تا میزان ۲۶٪ افزایش یابد؛ همچنین نیروی جانبی قابل تحمل توسط نمونههای مستطیلی در راستای محور ضعیف در مقایسه با نمونههای مربعی با سطح مقطع مشابه میتواند تا میزان ۲۶٪ افزایش یابد؛ همچنین نیروی جانبی قابل تحمل توسط نمونههای مستطیلی در راستای محور مول منونه دای مستطیلی در راستای محور مرابزی در مقایسه با نمونههای مربعی با سطح مقطع مشابه میتواند تا میزان ۲۵٪ کاهش یابد. (برای نمونههای مستطیلی مدر سازی در ۲۰ میلی می تواند تا میزان تا ۲۰٪ مونه های مربعی با سطح مقطع مشابه میتواند تا میزان تا ۲۰٪ کاهش یابد. (برای نمونههای مستطیلی و توی در کار در در این ۲۰ میلی می تواند تا میزان در ۲۰ میلی می تواند در در این ۲۰ میلی مربعی با مول مقطع میتواند در در میلی میتوانه تا میزان تا ۲۰٪ کاهش یابد. (برای نمونههای مستطیلی مستطیلی مدارای عرض مقطع میاست میلی می مینه در داکن میلی میلی میلی میلی میلی میلی می میلی می میلی می میلی می میلی می میلی میلی میتواند تا میزان تا ۲۰ میلی میانه میلی میانه میلی می میلی مانه میلی می میلی می میلی می میلی می میلی می میلی می
- ۳- در نمونههای مربعی تأثیر افزودن یک لایه دورپیچ CFRP در ظرفیت باربری محوری ستون، تقریباً معادل افزودن ۱۰۰ میلیمتر بر بعد نمونه میباشد.
- ۴- در تمامی نمونههای مربعی و مستطیلی که تحت حداکثر تغییرمکان جانبی قرار دارند، افزودن لایههای دورپیچ CFRP در ظرفیت باربری جانبی ستون اثر زیادی دارد و برخلاف ظرفیت باربری محوری حضور لایه دوم دورپیچ CFRP بسیار مؤثر است.
- ۵- در تمامی نمونههای مستطیلی که تغییرمکان جانبی در راستای محور ضعیف ستون میباشد افزودن تعداد لایههای دورپیچ CFRP در انرژی جذب شده تأثیر چندانی ندارد.

۶- با افزایش نسبت طول به عرض نمونههای مستطیلی اختلاف بین ظرفیت باربری جانبی در راستای محورهای ضعیف و قوی افزایش می یابد.

مراجع

[1] Pessiki, S. and Harries, K. A. and Kestner, J. T. and Sause, R. and Ricles, J. M. (2001). Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets. *Journal of Composites for Construction*, 5 (4), 237-245.

[2] Fardis, M. N. and Khalili, H. (1981). Concrete Encased in Fiberglass-Reinforced-Plastic. *Journal of the American Concrete Institute*, 78 (6), 440-446.

[3] Maalej, M. and Tanwongsval, S. and Paramasivam, P. (2002). Modelling of Rectangular RC Columns Strengthened with FRP. *Cement & Concrete Composites*, 25 (2), 263-276.

[4] Soroushnia, S. and Najafi, H. and Mamghani, M. H. and Mehrvand, M. (2016). *The Most Complete Practical Reference of ABAQUS. Advanced Level of Civilization*. Fourth Edition. Tehran: Negarandedanesh.

[5] Tsai, S. W. and Hahn, H. T. (1980). *Introduction to Composite Materials*. Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc.

[6] Hashin, Z. and Rotem, A. (1973). A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials. *Journal of Composite Materials*, 7 (4), 448-464.

[7] Hognestad, E. (1951). A Study of combined bending and Axial load in reinforced concrete members. Urbana-Champaign: University of Illinois.

[8] Saatcioglu, M. and Razvi, S. R. (1992). Strength and ductility of confined concrete. *Journal of structural Engineering*, 118 (6), 1590-1607.

[9] Dundar, C. and Tokgoz, S. and Tanrikulu, A. K. and Baran, T. (2008). Behaviour of reinforced and concrete-encased composite columns subjected to biaxial bending and axial load. *Building and Environment*, 43 (6), 1109-1120.

[10] Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. (2006). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No.2800)*. 3nd.Edition. Tehran: Building & Housing Research Center.

[11] Wu, G. and Wu, Z. S. and Lu, Z. T. (2007). Design-Oriented Stress-Strain Model for Concrete Prisms Confined with FRP Composites. *Construction and Building Materials*, 21 (5), 1107-1121.

[12] National Building Regulation Office. (2013). *Design and implementation of reinforced concrete buildings. Ninth topic.* Tehran: Tosseh Iran Publisher.