

بررسی تقویت خمشی پایه پلهای بتنی مسلح با FRP به روش اجزای محدود

سید بهرام بهشتی اول^۱، محمد پارسائی^۲

۱- تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از تقاطع میرداماد، دانشکده عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۲- تهران، بلوار اشرفی اصفهانی، خیابان پارک، دانشگاه علم و فرهنگ

mparsa1361@yahoo.com

خلاصه

ورقه های FRP در دهه اخیر بطور گسترده ای جهت تعمیر و مقاوم سازی ستونهای بتنی مسلح استفاده شده اند. زمانی که یک ستون متصل به زمین تحت بار زلزله قرار می گیرد، آسیب های شدیدی در مناطقی که دارای لنگرهای بزرگی هستند مشاهده می شود. این منطقه مفصل پلاستیک نامیده می شود و در طی زمین لرزه، انحناهای غیر الاستیک بزرگی در آن بوجود می آید. در این تحقیق اثر عرض مقطع به ضخامت پوسته، ارتفاع دورپیچ از پای ستون به ارتفاع کل ستون و جنس دورپیچ بر شکل پذیری، مقاومت و پارامترهای خمشی در ستون بتن مسلح دایره ای تحت اثر همزمان بار محوری و جانبی بررسی می شود. برنامه اجزای محدود ABAQUS جهت این کار استفاده شد. نتایج نشان می دهد که استفاده از این ورقها موجب افزایش شکل پذیری و همچنین بهبود پارامترهای مقاومت خمشی می گردد.

کلمات کلیدی: ورقه FRP، ستون بتن مسلح، شکل پذیری، مفصل پلاستیک، چرخش پلاستیک

۱. مقدمه

امروزه بسیاری از پلهای بتن آرمه، که در حال بهره برداری هستند، عمری بیش از ۷۵ سال داشته و به خاطر حوادث طبیعی از قبیل زلزله و باد و یا اثر خستگی مصالح و یا عوامل خوردنده آسیب دیده اند. از آنجا که این سازه ها اهمیت زیادی داشته و تعداد آنها نیز فراوان است، جایگزین کردن آنها با سازه جدید از نظر اقتصادی و اجرایی عملی نیست، در حالی که تعمیر و تقویت سازه های فوق امری ضروری و مقرون به صرفه می باشد. در حال حاضر از روشهای متنوعی برای تعمیر و تقویت سازه های بتن آرمه استفاده می شود. از آن جمله می توان تقویت با پوششهای فلزی و بتنی را نام برد، که در مقایسه، پوشش فولاد نسبت به بتن از نظر وزن مزیت دارد. اما فولاد نیز دارای نقصانهای متعددی نظیر هزینه سنگین و سختی در اجرا و همچنین آسیب پذیری در محیطهای خوردنده می باشد. در مقایسه با پوشش فولادی، ماده جدید FRP علاوه بر اینکه در محیطهای خوردنده مقاوم است و سختی کششی آن برابر با فولاد و حتی بیشتر از آن می باشد، دارای وزن کمی بوده و به سهولت قابل اجرا است. به همین دلیل تقویت اعضای بتن آرمه با پوشش FRP موضوعی پر اهمیت می باشد. در این مقاله هدف بررسی اثر تغییر پارامترهای تقویت موضعی ستون و یافتن طول نسبی مناسب بهینه دورپیچ از پای ستون، جهت تقویت خمشی است. در این نوشتار پس از تشریح نحوه مدل سازی تمامی نمونه ها با نرم افزار ABAQUS 6.8.1 با روش استاتیکی غیرخطی با کنترل تغییر مکان تحلیل می شوند تا عملکرد نمونه ها بررسی قرار گیرد. بطور کلی هدف این پژوهش بررسی رفتار ستون های ناکارآمد و تأثیر تقویت ناحیه مفصل خمیری با الیاف شیشه و کربن بر عملکرد این ستون هاست. مقایسه نتایج نمونه هایی که در آزمایشگاه تحت بارگذاری قرار گرفته اند، با نمونه تحلیل شده با نرم افزار نشان می دهد که نتایج بدست آمده از مدل اجزاء محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارای نتایج قابل قبولی است.

^۱ عضو هیأت علمی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه علم و فرهنگ

۲. اثر محصورشدگی در مقاطع دایروی به وسیله آرماتور عرضی و FRP

محصورشدهگی توسط آرماتور عرضی و اثر آن بر مقاومت و شکل پذیری از مفاهیم کلاسیک در بحث طراحی ستون های بتنی است. در ادبیات فنی می توان به مدل های مختلف این محصورشدگی در مقاطع دایروی دست یافت [۱-۲]. واضح است که آرماتور عرضی همراه با افزایش کرنش بتن باعث افزایش شکل پذیری می شود. این افزایش کرنش نهایی در حالت محصور شدگی با الیاف کامپوزیت بسیار بیشتر است. در ستونهای دایره ای، بتن معمولاً بصورت یکنواخت پوشش داده می شود و حداکثر فشار پوشش توسط FRP ایجاد می شود که به مقدار، مقاومت و جنس آن، همچنین قطر بتن پوشش داده شده بستگی دارد. همچنان که FRP مقاومت کششی مقطع را در امتداد حلقه افزایش می دهد، شکست نیز زمانی فرا می رسد که مقاومت کششی حلقه به حد نهایی خود برسد [۳].

۳. مدل سازی در نرم افزار اجزاء محدود

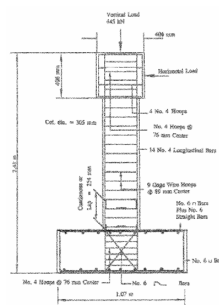
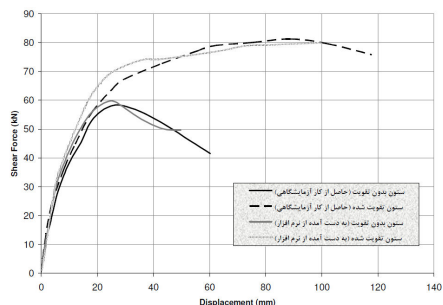
مدل سازی بتن: نرم افزار سه مدل برای رفتار بتن در نظر گرفته است؛ مدل پخش ترک در بتن، مدل ترک برای بتن و مدل بتن پلاستیک آسیب دیده. به علت وابستگی شدید مدل پخش ترک به رفتار ترک، همگرایی آنالیزها در مدل های سه بعدی به سختی انجام شده و در مرحله اجزاء برنامه با مشکل مواجه خواهد شد. مدل جدید ترک در بتن بیشتر معطوف به رفتار شکننده بتن بوده که این رفتار در بتن های با مقاومت بالا و ترد کاربرد داشته و نیز این مدل رفتار مناسبی در حالت بتن مسلح از خود نشان نمی دهد. تنها مدلی که تا حدود بسیاری مسأله مدل کردن بتن را در این برنامه حل می کند مدل بتن پلاستیک آسیب دیده می باشد که توانایی بررسی بتن مسلح تحت بارگذاری های مختلف (دوره ای و یکنواخت) را دارد و نیز با توجه به معرفی نمودارهای بتن در کشش و فشار، به طور کامل تری رفتار بتن را در نظر گرفته و نیز مشکلات اجرای برنامه که در مدل های دیگر وجود دارد در این مدل به چشم نمی خورد. با توجه به مدل سازی سه بعدی، به منظور اختصاص المانی که رفتار بتن را در این حالت تأمین کند، می توان از المان های سه بعدی هشت گره ای C3D8R استفاده نمود. پسوند R برای کاهش نقاط انتگرال گیری استفاده شده تا مدت زمان اجرای برنامه کاهش یابد [۴].

مدل سازی FRP: برای مدل کردن FRP از المان S4R که از خانواده المانهای SHELL می باشد، استفاده شده است. المان پوسته چهار گره ای چند منظوره قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرال گیری برای به حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان آنالیز را دارا می باشد. از آنجایی که اثر برش عرضی در این المان لحاظ شده است، می توان برای مدل های با ساختار باریک و ضخیم از آن استفاده نمود. به طور کلی نقاط المان پوسته را می توان در شش درجه آزادی که شامل $(u_x, u_y, u_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z)$ می باشد مقید کرد که با این قابلیت می توان شرایط تکیه گاهی به نمونه ها اعمال نمود [۴].

مدل سازی آرماتور: برای معرفی آرماتورهای طولی و عرضی از المان های خرپایی سه بعدی با تغییر شکل های خطی استفاده می شود. آرماتورها به صورت یک جا با المان های بتن تعریف شده و المان های خرپایی در بتن جاسازی می شوند. رفتار المان SOLID بتن بسته به میزان آرماتوری که در آن قرار می گیرد، تغییر کرده و المان معادلی بین رفتار بتن و آرماتور ایجاد می شود [۴].

ارزیابی صحت مدل تحلیلی: بسط یک مدل اجزاء محدود قابل اطمینان برای یک تحلیل کاربردی امری ضروری به نظر می رسد. لذا بازمینی اعتبار مدل یکی از مهمترین و ضروری ترین قدم ها در یک مطالعه عددی است. در ابتدا به منظور انتخاب مش بندی مناسب لازم است حالات مختلف را مورد بررسی قرار داده و برحسب نیاز از مش بندی بهینه استفاده شود. استفاده از مش بندی ریز منجر به طولانی شدن مدت زمان اجرای برنامه می شود. در واقع برخی مش بندی های ریز به خصوص برای بتن تأثیری بر رفتار نمونه بتن نمی گذارد، در نتیجه انتخاب مناسب ترین مش بندی در مدت زمان اجرای برنامه تأثیر بسیار تعیین کننده ای می گذارد. برای انتخاب زمان بهینه، مدل سعادت منش (۱۹۹۶) با دو نوع مش بندی ۲۰ و ۳۲ المانی بررسی شد [۵]. مدت زمان آنالیز مش ۳۲ المانی ۲۹۹۸۶ ثانیه و مش ۲۰ المانی ۲۲۲۴۳ ثانیه و میزان درصد اختلاف با نتایج آزمایشگاهی نیز به ترتیب ۱/۳۸ و ۲/۰۶ درصد است. به منظور اطمینان از دقت نتایج و نیز جلوگیری از تأثیر گذاری مقدار مش بندی در نتایج، از مش بندی ۳۲ المانی استفاده می شود. این نوع مش بندی به منظور مدل سازی FRP روی سطح، مناسب تر بوده و تا حدودی به سطح دایره ای نزدیک تر می باشد. جهت صحت سنجی، نتایج آزمایشگاهی که توسط سعادت منش و احسانی در سال ۱۹۹۶ انجام گرفته و شامل پنج نمونه ستون بتنی مسلح پل با مقیاس کوچکتر، تقریباً مطابق با مشخصات ستون های رایجی که قبل از سال ۱۹۷۱ و در مناطق با خطر لرزه ای بالا به عنوان ستون های پل بزرگراهی ساخته شده اند، مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. نمونه دارای ارتفاع ۲۴۱۰ میلیمتر و قطر ۳۰۵ میلیمتر می باشد. نوارهای کامپوزیت صرفاً در ناحیه مفصل پلاستیک به عنوان مثال در بالای وجه فوقانی پایه به طول ۶۳۵ میلیمتر به کار رفته اند. جهت کالیبره کردن نتایج، منحنی های نیرو- تغییر مکان برای دو نمونه مذکور

استخراج گردیده و سپس با نتایج ارائه شده توسط سعادتمنش و احسانی مقایسه گردیده است. شکل ۱ نمونه ای را قبل از انجام آزمایش نشان می دهد. با توجه به منحنی های بدست آمده، که در اشکال ۲ نمایش داده شده است، نتایج استخراج شده به روش اجزاء محدود تطابق قابل قبولی با کارهای آزمایشگاهی ارائه شده دارد.



شکل ۱: جزئیات هندسی و بارگذاری نمونه های ستون سعادتمنش و شکل ۲: مقایسه نمودارهای بار - تغییر مکان مدل سعادتمنش و احسانی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری

۴. نمونه های آنالیز شده

در این بخش، نتایج مطالعه عددی بر روی ستون های تقویت شده با FRP تحت اثر بار قائم ثابت و بار جانبی با استفاده از یک مدل سه بعدی ارائه می گردد. بار قائم که وزن مرده سازه روی ستون را شبیه سازی می نماید، در ابتدای تحلیل بر آن وارد می شود و در طول اعمال بار جانبی ثابت باقی می ماند. بار جانبی نیز به شکل اعمال تغییر مکان های جانبی در بالای ستون به صورت کنترل شده به صورت افزایش یافته یکنواخت وارد می گردد. بارهای وارده در حدی هستند که تغییر شکل ها و تنش ها در محدوده غیر الاستیک سازه قرار می گیرند. مشخصات مدل ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱-۴: مشخصات ستون های مدل شده در نرم افزار

Test	N/N_0	Cover (mm)	L/D	D/t	f'_c (MPa)	Dl (mm)	f_{yL} (Mpa)	f_{suL} (MPa)
C-FRG-i	0.1	25	5	400	34.5	19.1	303	482
C-FRC-i	0.1	25	5	400	34.5	19.1	303	482

$$L/D = \text{نسبت ارتفاع به بعد ستون} \quad D/t = \text{نسبت بعد ستون به ضخامت دورپیچ}$$

$$f'_c = \text{مقاومت فشاری بتن} \quad Dl = \text{قطر آرماتورهای طولی}$$

$$f_{yL} = \text{تنش تسلیم آرماتورهای طولی} \quad f_{suL} = \text{تنش نهایی آرماتورهای طولی}$$

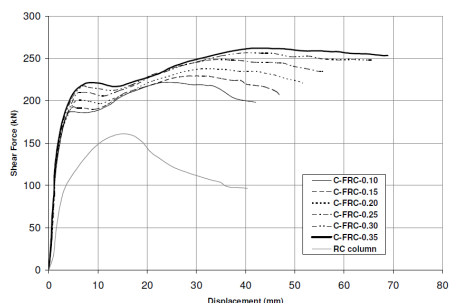
$$N/N_0 = \text{میزان باربری محوری} \quad N_0 = \text{ظرفیت باربر محوری برابر است با: } N_0 = 0.85f'_cA_g + f_yA_s \quad [7-6]$$

در نامگذاری، اولین حرف مخفف شکل مقطع عرضی، FRG نشان تقویت با الیاف کربنی و FRC نشان دهنده تقویت با الیاف شیشه ای است. N نسبت طول دورپیچ شده از پای ستون به ارتفاع ستون (L_f / L_c) است.

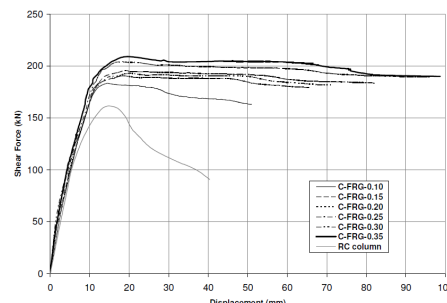
۵. تأثیر دورپیچ FRP در میزان برش پایه و شکل پذیری ستون بتن مسلح

همانطور که مشخص است اصلی ترین هدف از مقاوم سازی پایه های بتنی، افزایش شکل پذیری است تا انرژی لرزه ای قبل از مشاهده یکی از مدهای شکست، مستهلک شود. به منظور بررسی تأثیر CFRP و GFRP در بهبود شکل پذیری، شش نمونه با شرایط بدون FRP، یک لایه دور پیچ CFRP و یک لایه دور پیچ GFRP با ضخامت های مساوی (۱ میلیمتر) برای مقطع دایره در نظر گرفته شدند و در هر نمونه نسبت طول دورپیچ شده از پای ستون به ارتفاع ستون برابر با ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵، ۰/۳۰، ۰/۳۵ می باشد. در نمونه های تقویت شده توسط GFRP کرنش ماکزیم تسلیم الیاف ۰/۰۰۵ و در نمونه های تقویت شده توسط CFRP کرنش ماکزیم تسلیم الیاف ۰/۰۰۲ می باشد که نمونه ها تحت این کرنش ها گسیخته می شوند. همچنین مدول الاستیسیته الیاف کربنی در راستای دورپیچ، ۱۷۳ گیگاپاسکال است و این میزان در الیاف شیشه برابر ۵۳/۴ گیگاپاسکال می باشد.

لازم به یادآوری است که اعمال بارهای جانبی به صورت افزایش یافته یکنواخت می باشد که این شکل از بارگذاری اکثراً در آنالیز سازه ها تحت اثر هل دادن تا حادث شدن مکانیزم شکست مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج آنالیز نمونه ها بصورت منحنی پوش آور در اشکال ۳ و ۴ آورده شده است.



شکل ۴: منحنی برش پایه- تغییر مکان انتهایی ستون به ازای ارتفاع نسبی مختلف دورپیچ CFRP در ستون دایره

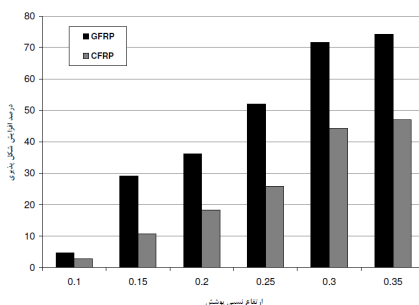


شکل ۳: منحنی برش پایه- تغییر مکان انتهایی ستون به ازای ارتفاع نسبی مختلف دورپیچ GFRP در ستون دایره

مشخص است که با افزایش ارتفاع نسبی FRP میزان تغییر مکان و برش پایه حداکثر افزایش می یابد. بطور کلی مشاهده می شود که استفاده از کامپوزیت FRP از یک طرف سبب می شود رفتار از حالت کاهنده خارج شود که به علت سختی بالای رفتار ارتجاعی پوسته بوده و از طرف دیگر سبب افزایش قابل توجه جذب انرژی به علت محصوریت اکتیو می شود. فاکتور شکل پذیری بر اساس تغییر مکان که میزان شکل پذیری سازه یا عضو را بیان می کند از رابطه ۱ بدست می آید [۸]:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

در رابطه فوق Δ_u و Δ_y ، به ترتیب بیانگر جابجایی جاری شدن و نهایی می باشند. شکل ۵ میزان افزایش درصد شکل پذیری نسبت به ستون بدون تقویت، بر اساس تغییر در ارتفاع نسبی و جنس دورپیچ را نشان می دهد.



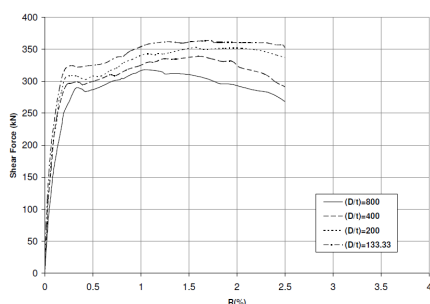
شکل ۵: نمودار درصد افزایش شکل پذیری برحسب ارتفاع نسبی دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP در ستون دایره

نمودارهای فوق نشان می دهد که استفاده از CFRP در افزایش برش پایه نقش مؤثری داشته اما به علت محدود بودن کرنش تسلیم این گونه الیاف ($\epsilon = 0.002$)، در افزایش شکل پذیری تأثیر کمتری نسبت به الیاف GFRP دیده می شود. همچنین نمودارها نشان می دهد که استفاده از GFRP در افزایش برش پایه نقش کمی داشته اما به علت کرنش تسلیم نسبتاً مناسب این گونه الیاف ($\epsilon = 0.005$)، اثر بیشتری در بالا بردن میزان شکل پذیری پایه های بتنی نسبت به مشابه کربنی دارند. بنابراین افزایش شکل پذیری در ستون هایی که از GFRP به عنوان دورپیچ در آنها استفاده شده، بیشتر از ستون هایی است که در آنها CFRP به کار رفته است.

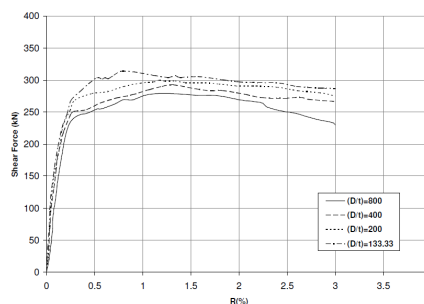
۵-۱. تأثیر نسبت عرض به ضخامت (D/t)

رفتار ستون های تقویت شده با FRP تحت اثر بارهای شدید، متأثر از میزان محصوریت بتن که توسط دورپیچ ایجاد شده است، می باشد. جهت بررسی این پارامتر، اثر تغییر تأثیر نسبت عرض مقطع به ضخامت دورپیچ در میزان مقاومت ستون معیار مناسبی می باشد. در اینجا ۸ نمونه با شرایط جدول ۱ (تعداد چهار عدد تقویت شده با GFRP و چهار عدد تقویت شده با CFRP) تحت اثر بار قائم (0.1N0) و تغییر مکان افزایش یافته جانبی قرارداد شده

اند. ارتفاع ستون 5D است که D قطر ستون بوده و پارامترهای مورد بررسی عبارت از جنس دورپیچ و نسبت شکل؛ (D/t) است. نسبت اخیر توسط ثابت نگه داشتن قطر ستون و تغییر ضخامت دورپیچ تأمین می گردد. پارامتر (D/t) برابر با ۸۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰ و ۱۳۳ است. جابجایی نسبی در الیاف کربنی ۲/۵٪ و در الیاف شیشه ای ۳٪ در نظر گرفته شده است. شکل ۶ رابطه نیرو- تغییر مکان جانبی را در ستون های تقویت شده با GFRP با توجه به تغییر در ضخامت پوسته و شکل ۷ همان منحنی را برای ستون تقویت شده با CFRP نشان می دهند. از مقایسه منحنی های دو شکل، با توجه به نمو سریعتر نزول در انتهای نمودار ستون تقویت شده با CFRP، مشخص است که برای (D/t) بالاتر، مقاطع تقویت شده با GFRP نسبت به ستون های تقویت شده با CFRP می توانند تغییر شکل های بالایی را به شکل پایدار تحمل نمایند، که این امر به علت وابستگی شدید این ورق ها به کرنش تسلیم CFRP می باشد و در عوض افزایش ضخامت ورق های GFRP باعث افزایش شکل پذیری ستون با نرخ رشد مناسبی خواهد شد.

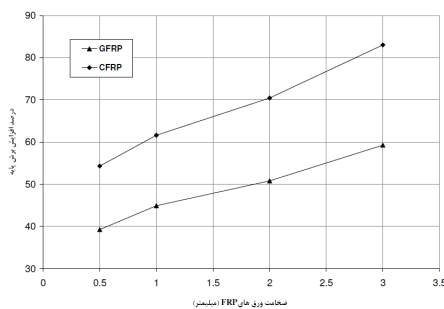


شکل ۷: مقایسه ستونهای دایره ای تقویت شده با CFRP با (D/t) های مختلف



شکل ۸: مقایسه ستونهای دایره ای تقویت شده با GFRP با (D/t) های مختلف

با توجه به شکل ۸ مشهود است که مقاومت جانبی ستون با کاهش نسبت (D/t) افزایش می یابد. لازم به توضیح می باشد که در کل، ورق های CFRP رفتار مؤثرتری نسبت به ورق های GFRP در بحث افزایش برش پایه از خود نشان می دهند که شیب بیشتر نمودار CFRP در این شکل نیز گویای تأثیر بیشتر این نوع کامپوزیت در افزایش مقاومت ستون است.



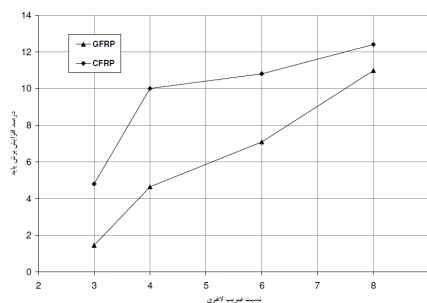
شکل ۹: منحنی درصد افزایش برش پایه بر حسب ضخامت ورق های FRP برای ورق های CFRP و GFRP

۲-۵. تأثیر نسبت لاغری (L/D)

در این بخش حساسیت رفتار ستون تقویت شده با کامپوزیت نسبت به تغییر میزان لاغری مورد مطالعه قرار می گیرد. ۸ ستون مانند بخش قبل تحت اثر بار قائم (0.1N0) مدل می شوند. پارامترهای مورد بررسی، شکل مقطع و نسبت ضریب لاغری (L/D) است. نسبت اخیر توسط ثابت نگه داشتن قطر مقطع عرضی و تغییر ارتفاع ستون تأمین می گردد. این نسبت برابر با ۴، ۶، ۸ است. پس از آنالیز و رسم نمودارهای برش پایه- تغییر مکان، نمودار افزایش درصد برش پایه بر حسب ارتفاع ستون در شکل ۹ آورده شده که این نمودار از مقایسه ستون در دو حالت تقویت شده و بدون تقویت بدست آمده است.

این نمودار نشان می دهد که به طور کلی ورق های CFRP در تقویت ستون هایی که دارای تغییر مکان جانبی کمی هستند ($L/D < 4$) خوب عمل کرده و باعث افزایش مناسب برش پایه و شکل پذیری می شود، اما این ورق ها در ستون های با تغییر مکان های جانبی زیاد به علت کم بودن کرنش نهایی تسلیم این الیاف، رفتار مناسبی نسبت به افزایش شکل پذیری از خود نشان نخواهند داد. در مورد عملکرد دورپیچ های GFRP نیز

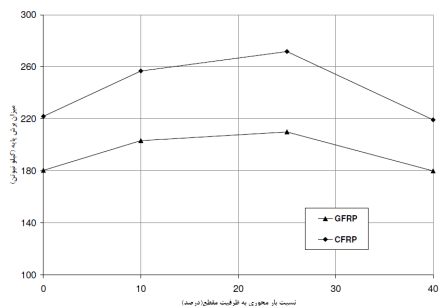
این نکته که در ($L/D < 4$) میزان تأثیر در افزایش برش پایه بیشتر است، مشاهده می گردد، لیکن به اندازه کامپوزیت کربنی برجسته نمی باشد. در ستون های بلندتر، سرعت رشد افزایش برش پایه کاهش می یابد، اما این کاهش اثر زیاد نمی باشد. بنابراین اگر هدف از استفاده دورپیچ، افزایش میزان برش پایه باشد، در ستون هایی با ارتفاع متفاوت، کاربرد CFRP منطقی تر است، زیرا در کل ورق های CFRP تأثیر بهتری نسبت به ورق های GFRP در بحث افزایش برش پایه از خود نشان می دهند.



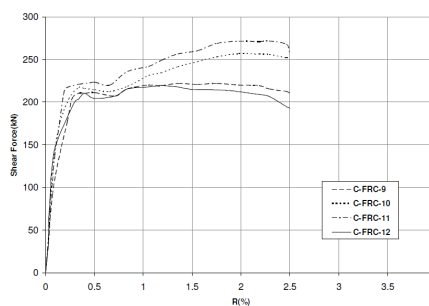
شکل ۹: منحنی درصد افزایش برش پایه بر حسب ضرایب لاغری مختلف برای ورق های CFRP و GFRP

۳-۵. تأثیر میزان بار محوری (N/N_0)

در این قسمت، اثر میزان نیروی محوری وارد بر مقاومت جانبی ستون های تقویت شده با FRP مورد بررسی قرار می گیرد. بارهای محوری معادل ۰/۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴، برابر مقاومت محوری اسمی بر ستونی با لاغری متوسط ۵ و با دورپیچ به ضخامت ۱ میلیمتر وارد می گردد. بنابراین هشت ستون مانند بخش قبل قرار داده می شود. نمودار برش- تغییر مکان و نمودار افزایش درصد برش پایه بر حسب بار محوری وارد بر ستون در شکل ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. نقش اثر افزایش بار محوری پیش از یک مقدار بهینه (که در اینجا حدود ۲۵٪ ظرفیت محوری مقطع است) در شاخه پس مقاومت مشاهده می شود. این امر باعث کاهش شیب قسمت نزولی منحنی نیرو- تغییر مکان شده و به مقدار زیادی باعث افزایش شکل پذیری و جذب انرژی می گردد. برعکس در مرحله پس از مقدار بهینه، ازدیاد بار محوری باعث افزایش شیب قسمت مذکور می شود که این امر منجر به کاهش جذب انرژی می شود.



شکل ۱۱: منحنی درصد افزایش برش پایه بر حسب بار محوری مختلف برای ورق های CFRP و GFRP

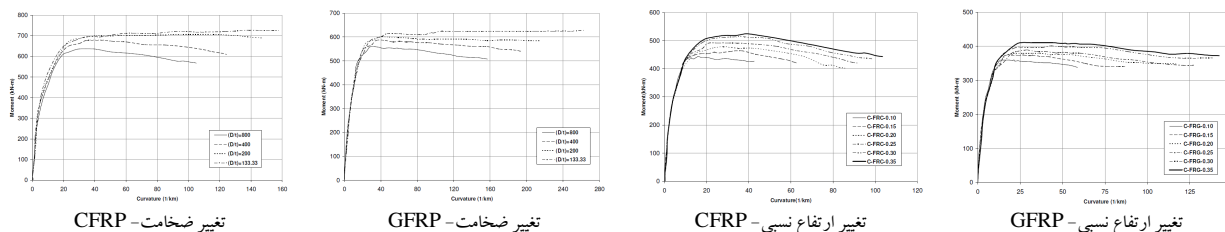


شکل ۱۰: مقایسه ستون های دایره ای تقویت شده با CFRP با (N/N_0) های مختلف

۶. بررسی تأثیر دورپیچ FRP بر ظرفیت چرخشی ستون

در این بخش میزان تأثیر ارتفاع نسبی، ضخامت و جنس پوشش بر میزان انحنای طول مفصل پلاستیک و میزان زاویه چرخش پلاستیک ستون مورد بررسی قرار می گیرد. مانند بخش های قبل ارتفاع نسبی پوشش از ۰/۱ تا ۰/۳۵ و نسبت (D/t) بین ۱۳۳ تا ۸۰۰ متغیر است. شکل ۱۲ نمودارهای لنگر- انحنای ستون های تقویت شده با FRP بر حسب تغییر در ارتفاع نسبی پوشش و همچنین نسبت ضخامت عرض به پوسته نشان می دهد. همانطور که می دانیم امکان تشکیل مفاصل پلاستیک در انتهای ستون ها وجود دارد، لذا می باید پایه های پلهای بتنی اجرا شده در مناطق با زلزله خیزی بالا، شکل پذیری خمشی مناسبی برای امکان تشکیل مفاصل پلاستیک دارا باشند، تا ستون بتواند بدون خرابی، تغییر شکل های غیرالاستیک

زیادی را تحمل نماید. از جمله عوامل تأثیرگذار در طول مفصل پلاستیک، میزان محصوریت قیود جانبی است. وجود پوشش دورگیر کننده FRP نقش بسیار مشخصی در تأمین این محصوریت دارد [۹].



شکل ۱۲: منحنی مقایسه ای لنگر- انحنای تغییر ارتفاع نسبی و ضخامت دورپیچ FRP در ستون دایره

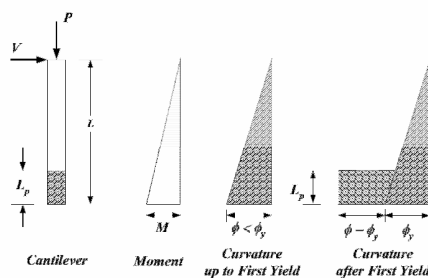
شکل پذیری بر اساس دو فاکتور؛ شکل پذیری جابجایی و شکل پذیری منحنی نشان داده می شود که دومی در سال ۱۹۹۶ توسط پریستلی و همکارانش مورد استفاده قرار گرفت و به صورت رابطه ۲ بیان می گردد [۸].

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2)$$

ϕ_u و ϕ_y به ترتیب به ضریب منحنی در لحظه جاری شدن اولیه (تسلیم میلگردها) و حد نهایی هستند. در مرحله پس از تسلیم ($\phi_y < \phi \leq \phi_u$) ضریب منحنی پلاستیک (ϕ_p) از رابطه ۳ بدست می آید.

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y \quad (3)$$

آنگونه که در شکل ۱۳ دیده می شود فرض می شود که ضریب منحنی پلاستیک در ناحیه مفصل پلاستیک عدد ثابتی است.



شکل ۱۳: تغییر شکل پلاستیک ستون های بتنی مسلح تحت بارهای لرزه ای و محوری

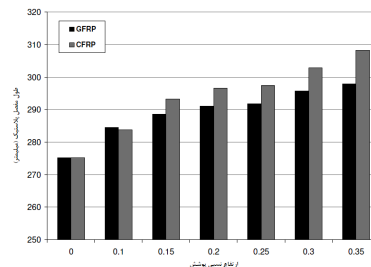
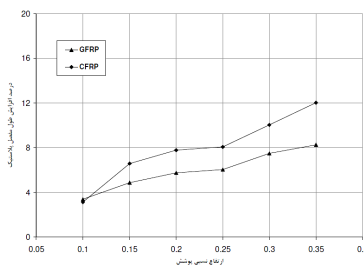
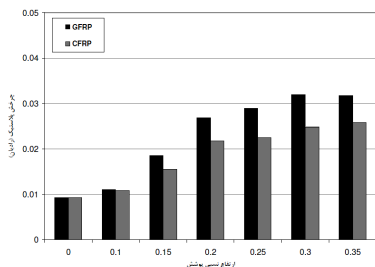
همانطور که در شکل فوق آورده شده است، طول مفصل پلاستیک از تفاوت طول متناظر با انحنای در لحظه جاری شدن اولیه با انحنای در لحظه گسیختگی نهایی بدست می آید. انحنای در تسلیم اولیه متناظر با مقدار لنگر تسلیم اولیه است. لنگر تسلیم اولیه نیز مطابق با اولین تسلیم دورترین آرماتور واقع در کشش است. در نرم افزار با بررسی خروجی تنش آرماتورهای طولی، می توان زمان و مکان وقوع تنش تسلیم میلگردها را بدست آورد. همچنین پریستلی رابطه ۴ زیر را برای یافتن چرخش پلاستیک (θ_p) پیشنهاد داد [۸-۱۰].

$$\theta_i = \int_{l_1}^{l_2} \phi dl \rightarrow \theta_p = \int_0^{l_p} \phi dl = (\phi_u - \phi_y) \times L_p \rightarrow \theta_p = \phi_p L_p \quad (4)$$

با استفاده از این رابطه، میزان دوران ستون قابل محاسبه می باشد. مقادیر ضریب انحنای نهایی، چرخش پلاستیک و طول مفصل پلاستیک بدست آمد. در نمودارهای زیر مقایسه ای بین تأثیر پارامترهای مختلف بر طول مفصل پلاستیک و میزان چرخش پلاستیک پای ستون انجام گرفته است. اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان می دهند که افزایش ارتفاع دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP موجب بالا رفتن طول مفصل پلاستیک می شود. این رشد در ستونهای دورپیچ شده با CFRP، بین ۳/۱۲۵ تا ۱۲/۰۲۸ درصد و در ستون های دورپیچ شده با GFRP، بین ۳/۳۷۹ تا ۸/۲۴۹ درصد است. با توجه به شکل ۱۶ که نشان دهنده میزان چرخش پلاستیک در ستون های مقاوم شده می باشد، می توان به این مطلب پی برد که هر چند افزایش ارتفاع دورپیچ موجب رشد میزان چرخش پلاستیک می شود، لیکن سرعت افزایش در پوشش های بالاتر بسیار کندتر است، به گونه ای که در

پوشش نسبی ۰/۳ و ۰/۳۵ در الیاف کربنی تقریباً میزان چرخش برابری دیده می شود و در الیاف شیشه ای میزان چرخش در پوشش نسبی ۰/۳۵ مقایسه با پوشش نسبی ۰/۳ نیز کمتر است.

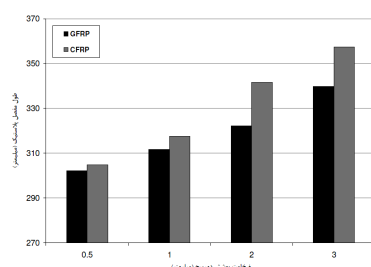
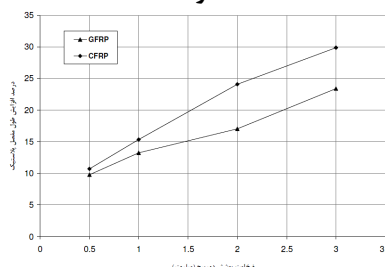
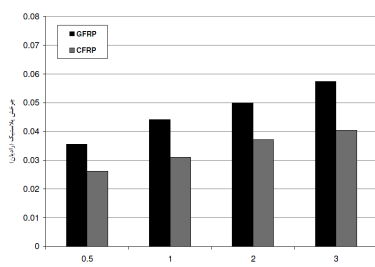
شکل های ۱۷ تا ۱۹ تأثیر ضخامت دورپیچ بر طول مفصل پلاستیک و چرخش پلاستیک را نمایش می دهند. در هر دو نوع الیاف، در ضخامتهای پایین تر، تأثیر تقریباً برابری در افزایش طول مفصل پلاستیک وجود دارد. اما با افزایش ضخامت از یک میلیمتر به بالا، تأثیر بیشتری در ستونهای تقویت شده با کامپوزیت کربنی نسبت به کامپوزیت شیشه ای مشاهده می گردد. همچنین افزایش ضخامت دورپیچ در هر دو نوع کربنی و شیشه ای اثر تقریباً یکسانی در افزایش چرخش پلاستیک دارند.



شکل ۱۴: نمودار میزان طول مفصل پلاستیک بر حسب ارتفاع دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP

شکل ۱۵: نمودار درصد افزایش طول مفصل پلاستیک بر حسب ارتفاع دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP

شکل ۱۶: نمودار میزان چرخش پلاستیک بر حسب ارتفاع دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP



شکل ۱۷: نمودار میزان طول مفصل پلاستیک بر حسب ضخامت دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP

شکل ۱۸: نمودار درصد افزایش طول مفصل پلاستیک بر حسب ضخامت دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP

شکل ۱۹: نمودار میزان چرخش پلاستیک بر حسب ضخامت دورپیچ در الیاف CFRP و GFRP

با توجه به موارد مذکور می توان به این جمع بندی رسید که با اینکه افزایش ارتفاع نسبی پوشش به بیش از ۰/۳۵ ارتفاع ستون، در بالا بردن طول مفصل پلاستیک، هر چند اندک، ولی مؤثر به نظر می رسد؛ لیکن این افزایش تأثیر چندانی در میزان ظرفیت چرخش پلاستیک ندارد. بنابراین ارتفاع پوشش در هر دو نوع کربنی و شیشه ای، حدود (0.3-0.35 L) مناسب و بهینه است. جهت مقایسه این مطلب یک نمونه اجرائی که توسط Sible و همکارانش در سال ۱۹۹۷ ارائه شد، آورده شده است [۸]. آنها طول ناحیه پوشش مناسب از پای ستون بتنی مسلح برای جکت FRP را به صورت رابطه ۵ تعریف کردند.

$$L_c = L_{c1} + L_{c2} \quad 5$$

که L_{c1} طول ناحیه پوششی برای مفصل پلاستیک و L_{c2} ناحیه پوشش ثانویه در مجاورت مفصل پلاستیک می باشد. این ناحیه جهت دوری از تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در بالای ناحیه مفصل پلاستیک L_{c1} توصیه شده است. میزان این دو طول در ذیل آورده شده است.

$$L_{c1} \geq \begin{cases} L_p \\ 0.5d \\ L/B \end{cases}, \quad L_{c2} \geq \begin{cases} L_p \\ 0.5d \\ L/B \end{cases} \quad 6$$

L_p طول مفصل پلاستیک، d قطر ستون، L طول ستون و B عرض ستون در مقاطع مستطیلی است. طبق نظر Park، طول مفصل پلاستیک در ستون بتن مسلح بدون تقویت از رابطه ۷ بدست می آید.

$$L_p = 0.08L + 0.022f_y d_b \quad 7$$

L طولی از ستون بر حسب میلیمتر که بین لنگر صفر و لنگر ماکزیم قرار گرفته است، f_y تنش تسلیم آرماتورهای طولی بر حسب مگا پاسکال، d_b قطر آرماتورهای طولی بر حسب میلیمتر می-باشد. جهت تعیین طولی که اثر محصور کنندگی کامپوزیت بر آن دیده می شود، Binici رابطه زیر را پیشنهاد داده است.

$$L_p = 0.077L + 8.16d_b \quad 8$$

از رابطه (۴-۱۱) و (۴-۹) و مطابق رابطه (۴-۸) طول پوشش ستون به وسیله FRP بدست می آید که برابر است با:

$$L_c = L_{c1} + L_{c2} = 309.856 + 309.856 = 619.712 \text{ mm}$$

با توجه به ارتفاع ستون که ۲ متر می باشد، این مقدار برابر است با (0.309L)، که مشاهده می شود با مقدار پیشنهادی این تحقیق جهت تقویت خمشی پایه های بتنی؛ (0.3-0.35 L) همخوانی نزدیکی دارد.

۷. نتیجه گیری

استفاده از CFRP در ستون با مقطع دایره در افزایش برش پایه نقش مؤثری داشته اما به علت محدود بودن کرنش تسلیم این گونه الیاف، در افزایش شکل پذیری تأثیر کمتری نسبت به الیاف GFRP دیده شد. همچنین استفاده از GFRP در افزایش برش پایه نقش کمی داشته اما به علت کرنش تسلیم نسبتاً مناسب این گونه الیاف، اثر بیشتری در بالا بردن میزان شکل پذیری پایه های بتنی نسبت به مشابه کربنی دارند.

در تحلیل حساسیت نتایج زیر حاصل شد:

اثر تغییر عرض مقطع به ضخامت پوسته: مقاومت جانبی ستون با کاهش نسبت (D/t) افزایش می یابد. برای هر دو نوع دورپیچ با افزایش (D/t)، به علت کاهش محصوریت بتن توسط دورپیچ و لذا رفتار تردتر آن، کاهش مقاومت بیشتری پس از ماکزیم مقاومت جانبی اتفاق می افتد. با توجه به نمو سریع تر نزول در انتهای نمودار ستون تقویت شده با CFRP، مشخص است که برای (D/t) بالاتر، مقاطع تقویت شده با GFRP نسبت به ستون های تقویت شده با CFRP می توانند تغییر شکل های بالایی را به شکل پایدار تحمل نمایند. در عوض افزایش ضخامت ورق های GFRP باعث افزایش شکل پذیری ستون با نرخ رشد مناسبی خواهد شد.

اثر تغییر نسبت لاغری: بطور کلی ورق های CFRP در تقویت ستون هایی که دارای تغییر مکان جانبی کمی هستند ($L/D < 4$) خوب عمل کرده و باعث افزایش مناسب برش پایه و شکل پذیری می شود. بنابراین اگر هدف از استفاده دورپیچ، افزایش میزان برش پایه باشد، در ستون هایی با ارتفاع متفاوت، کاربرد CFRP منطقی تر است. زیرا در کل ورق های CFRP تأثیر بهتری نسبت به ورق های GFRP در بحث افزایش برش پایه از خود نشان می دهند.

اثر تغییر میزان بار محوری: با افزایش نیروی محوری افت ناگهانی مقاومت در ماکزیم مقاومت جانبی به میزان بیشتری به وقوع می پیوندد. از طرف دیگر با افزایش نیروی محوری، کشش و فشار بیشتری در پوسته رخ می دهد و لذا کاهش مقاومت ستون بتنی به همراه پوسته سبب کاهش ناگهانی مضاعف مقاومت مقطع می گردد.

افزایش ارتفاع هر دو نوع کربنی و شیشه ای دورپیچ FRP در ستون با مقطع دایره موجب رشد میزان لنگر و انحنای نهایی ستون خواهد شد. افزودن ارتفاع پوشش در هر دو نوع الیاف باعث رشد انحنای خواهند شد. افزایش ارتفاع دورپیچ در هر دو نوع الیاف سبب بالا رفتن طول مفصل پلاستیک می شود. این رشد در ستون های دورپیچ شده با CFRP بیشتر از ستون های دورپیچ شده با GFRP است. در پوشش نسبی ۰/۳ و ۰/۳۵ در الیاف کربنی تقریباً میزان چرخش برابری دیده می شود و در الیاف شیشه ای میزان چرخش در پوشش نسبی ۰/۳۵ در مقایسه با پوشش نسبی ۰/۳ نیز کمتر است. این مطلب با روابطی که توسط Sible و همکارانش ارائه شده بود، مقایسه گردید و نتایج تأیید شد. بنابراین ارتفاع پوشش در هر دو نوع الیاف، حدود (0.3-0.35 L) مناسب و بهینه است.



۸. مراجع

- [1] Hoshikuma, J. et al., (1997), Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers, J. Struct.Eng. ASCE, 123(5), 624,.
- [2] Hui Wu, Constitutive Model of Concrete Confined by Advanced Fiber Composite Materials and Applications in Seismic Retrofitting, University of Southern California, August 2007.
- [3] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T, Lam, L. (2002), FRP strengthend RC structures, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [4] ABAQUS Analysis User's Manual version 6.8.1
- [5] H.Saadatmanesh, M.R.Ehsani, Limin Jin., Seismic Strengthening of Circular Bridge Pier Models with Fiber Composites, ACI Structural Journal, Volume 93, Issue 6 , PP. 639-647 , Novemeber 1 , 1996.
- [6] Okan Ozcan, Baris Binici, Guney Ozcebe., Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers, Journal of Structural Engineering. 2007.10.013.
- [7] Cheng, C. T., Yeh, Y. K., Mo, Y. L., Flexural repair of hollow rectangular bridge columns failed due to earthquake-type loading, Journal of Materials and Structures, Vol. 37, December 2004, pp 717-723.
- [8] Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [9] Baris Binici, Khalid M. Mosalam., Analysis of reinforced concrete columns retrofitted with fiber reinforced polymer lamina, Journal of Composites: Part B 38 (2007) 265–276.
- [10] Chung-Sheng Lee, Modeling of FRP-Jacketed RC Columns Subject to Combined Axial and Lateral Loads, PhD Dissertation, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, 2006.