

بررسی عملکرد پایه پل‌های بهسازی شده با کامپوزیت‌های FRP

هاشم شریعتمدار*، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

امیر رضا برزگرپور، کارشناس ارشد سازه

ابراهیم زمانی بیدختی، دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

E-mail: shariatmadar@um.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۶/۲۵ - پذیرش: ۹۲/۱۱/۰۷

چکیده

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار پایه پل‌های تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP، دو نمونه پایه پل با مقاطع مستطیلی و دایره‌ای شکل با شرایط مختلف بارگذاری و تنوع در نحوه‌ی دورپیچ کردن کامپوزیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و به روش اجزای محدود تحلیل شده است. برای مدل‌سازی بتن از المان سه بعدی هشت گره‌ای با قابلیت در نظر گرفتن ترک خوردگی در کشش و خرد شدن در فشار و برای مدل کردن آرماتورهای طولی از المان دو گره‌ای فشاری-کششی تک محوره استفاده شده است. آرماتورهای عرضی به صورت درصد حجمی در المان بتنی منظور شده است و برای مدل کردن مصالح کامپوزیت از المان سه بعدی هشت گره‌ای که دارای خاصیت لایه‌ای می‌باشد استفاده شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که با دورپیچ کردن تمام پایه پل، میزان شکل‌پذیری و مقاومت در هر دو نوع پایه پل افزایش یافته، ولی افزایش شکل‌پذیری در پایه پل مستطیلی و مقاومت در پایه پل دایره‌ای نسبت به نوع دیگر بیشتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: روش اجزای محدود، تقویت پایه پل، مصالح کامپوزیت، مقاوم سازی، FRP.

۱. مقدمه

سعادت منش و همکاران (۱۹۹۴) دریافتند که مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های بتنی پل‌ها می‌تواند با پیچیدن دورپیچ‌های FRP به دور ستون به‌طور عمده‌ای افزایش پیدا کند. همچنین، تأثیر محدود ساختن پارامترهای گوناگون از قبیل مقاومت فشاری بتن، ضخامت و حجم دورپیچ‌ها و نوع دورپیچ‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. تحقیقات زیادی روی رفتار ستون‌های مستطیلی شکل تحت بارهای خارج از محور انجام گرفته است (هادی و ویدیارسا، ۲۰۱۲؛ پروین و ونگ، ۲۰۰۱؛ سونگ و همکاران، ۲۰۱۳).

در این مقاله، از بین روش‌هایی که برای بهسازی رفتار پایه پل‌ها موجود می‌باشند، روش استفاده از مصالح

در سال‌های اخیر، روش‌های کارآمد و اقتصادی جهت تقویت ستون‌ها به‌طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌هایی همچون استفاده از ورق‌ها جهت محصور نمودن و جلوگیری از قلوه‌کن شدن بتن پوششی از قدیمی‌ترین این روش‌هاست (چای و همکاران، ۱۹۹۱؛ غباره و همکاران، ۱۹۹۷؛ الکوسر و جیرسا، ۱۹۹۳؛ ماتیوس و رولینگز، ۱۹۹۹).

کاتسوماتا و همکاران (۱۹۸۸) ده ستون مستطیلی بتنی با ابعاد 200×200 mm را در مقیاس یک چهارم مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. ستون‌ها قبل از آزمایش با دورپیچ‌های CFRP تقویت شده بودند.

۵. R1: مدل نرم‌افزاری پایه پل مستطیلی تحت بار ترکیبی (بار قائم ۱۰ تن و بار جانبی) بدون FRP
۶. RFRP,1: مدل نرم‌افزاری پایه پل مستطیلی تحت بار ترکیبی (بار قائم ثابت ۱۰ تن و بار جانبی) با دو لایه FRP
۷. RFRP,2: مدل نرم‌افزاری پایه پل مستطیلی تحت بار ترکیبی (بار قائم ثابت ۱۰ تن و بار جانبی) با دو لایه FRP و دو لایه FRP در یک سوم
۸. Co: مدل نرم‌افزاری پایه پل دایره‌ای تحت بار صرفاً قائم بدون FRP
۹. C1: مدل نرم‌افزاری پایه پل دایره‌ای تحت بار ترکیبی (بار قائم ۵ تن و بار جانبی) بدون FRP
۱۰. CFRP,1: مدل نرم‌افزاری پایه پل دایره‌ای تحت بار ترکیبی (بار قائم ثابت ۵ تن و بار جانبی) با دو لایه FRP

۲. معرفی نمونه‌های تست شده

نمونه اول: این نمونه یک پایه پل بتنی مستطیل شکل است که در سال ۲۰۰۲ توسط معالج و همکاران (۲۰۰۳) آزمایش شده است. مشخصات مکانیکی بتن و FRP به کار رفته در نمونه آزمایشگاهی اول در جدول ۱ بیان گردیده است.

ابعاد و هندسه‌ی نمونه و مشخصات آرماتورها در شکل ۱ مشخص شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی بتن و FRP به کار رفته در نمونه آزمایشگاهی

مواد	مشخصات		
بتن	$f'_{co} = 32/4 \text{ MPa}$,	$\epsilon_{co} = 0/002$	
آرماتور طولی (T13) $\Phi=13 \text{ mm}$	$f_y = 461 \text{ MPa}$, $f_u = 561 \text{ MPa}$,	$E_s = 171 \text{ GPa}$,	$f_{sh} = 458 \text{ MPa}$, $\epsilon_u = 0/0900$
آرماتور طولی (T10) $\Phi=10 \text{ mm}$	$f_y = 541 \text{ MPa}$, $f_u = 626 \text{ MPa}$,	$E_s = 186 \text{ GPa}$,	$f_{sh} = 541 \text{ MPa}$, $\epsilon_u = 0/0934$
آرماتور عرضی (R6) $\Phi=6 \text{ mm}$	$f_y = 365 \text{ MPa}$,	$E_s = 211 \text{ GPa}$	
مشخصات کششی ورقه‌های FRP	$f_{au} = 600 \text{ MPa}$, $E_{a-90} = 6785 \text{ MPa}$,	$\epsilon_{au} = 0/0224$, $t_a = 1/08 \text{ mm}$	$E_{a-90} = 26130 \text{ MPa}$,
مشخصات فشاری ورقه‌های FRP	$E_{ac-90} = 26789 \text{ MPa}$, $E_{ac-90} = 8391 \text{ MPa}$		
فولاد پیش تنیده	$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$,	$E_p = 195 \text{ GPa}$	

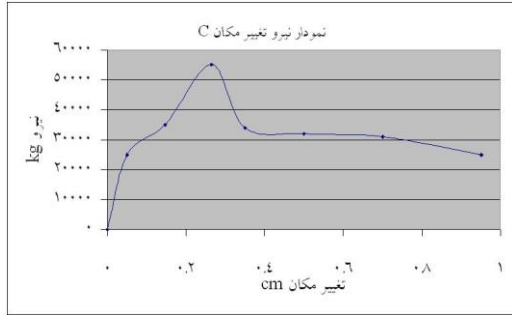
کامپوزیت (FRP) مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به تست‌های انجام شده در این زمینه، جزئیات این تست‌ها همراه با نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها ارائه می‌شود. سپس به ارائه مدل عددی اجزای محدود مناسب برای دو نوع پایه پل دایره‌ای و مستطیلی در حالت مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی پرداخته خواهد شد. هندسه‌ی این پل از روی پلی که در سال ۱۹۶۳ قبل از زلزله سن فرناندو (۱۹۷۱) ساخته شده بود انتخاب شده است. قاب‌ها به فاصله ۲۱/۸۶۹ متر از همدیگر قرار گرفته‌اند و قاب شامل سه ستون و یک تیر سر ستون می‌باشد (پانتلیدس و گرگلی، ۲۰۰۲).

با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل اجزای محدود و نتایج آزمایش‌ها، مطابقت مدل‌سازی با آزمایش‌های انجام شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نهایتاً به بررسی وضعیت‌های مختلف پرداخته می‌شود.

به منظور سهولت در ارائه گزارش‌ها، تست‌ها و مدل‌های بررسی شده به صورت زیر نام‌گذاری شده‌اند:

۱. R: تست آزمایشگاهی بررسی مدل مستطیلی با دو لایه FRP
۲. C: تست آزمایشگاهی بررسی مدل دایره‌ای بدون FRP
۳. Ro: مدل نرم‌افزاری پایه پل مستطیلی تحت بار صرفاً قائم و بدون FRP
۴. Ro,FRP: مدل نرم‌افزاری پایه پل مستطیلی تحت بار صرفاً قائم با دو لایه FRP مشابه تست آزمایشگاهی

نمودار نیرو- تغییر مکان پایه پل به صورت شکل ۳ به دست آمده است. در نمودار شکل ۳، نمونه تست شده تا ظرفیت نهایی خود تحت بارگذاری محوری خارج از مرکز قرار گرفته است.

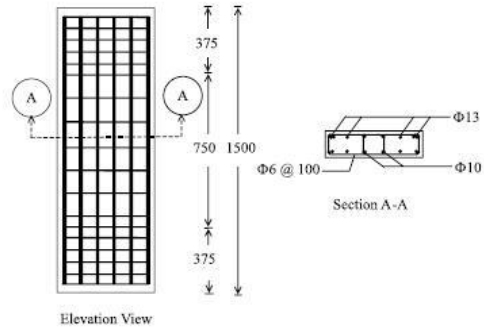


شکل ۳. منحنی نیرو تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی C

۳. مدل سازی نمونه ها

برای مدل سازی بتن مسلح از المان Solid65 استفاده شده است. این المان دارای ۸ گره بوده که دارای خواص ترک خوردگی در مقابل کشش، خرد شدگی در مقابل فشار و تغییر شکل های پلاستیک و خزش می باشد. از طرفی، از المان Link8 که یک المان دو گرهی با ۳ درجه آزادی است جهت مدل سازی فولادها بهره جویی شده است. جهت مدل سازی ترک، مدل ترک پخش شده به کار گرفته شد. همچنین، مدل مندر و همکاران (۱۹۸۸) جهت مدل سازی بتن محصور شده توسط فولاد به کار رفته است. این مدل، بنای بسیاری از مدل های ارائه شده برای منحنی تنش کرنش تنش محصور شده توسط کامپوزیت ها می باشد. مدل مندر اولین مدلی بود که برای مقاطع مستطیلی و دایره ای قابلیت استفاده داشت. در ادامه، به نتایج تحلیل اجزای محدود ستون های مدل سازی شده پرداخته شده است.

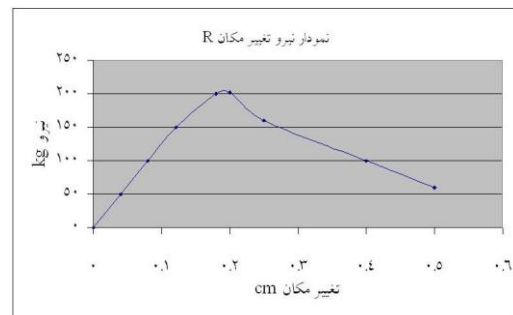
نمونه اول: در ابتدا یک پایه پل بتنی مستطیل شکل با ابعاد مشخص شده به اندازه آزمایش در محیط نرم افزار ANSYS (شرکت انسیس) مدل سازی شده است. شکل ۴ چگونگی مش بندی نمونه $R_{0,FRP}$ را نشان می دهد.



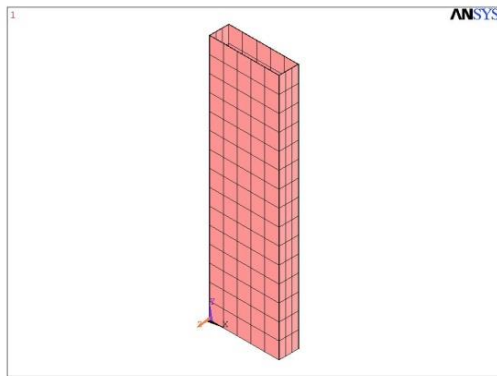
شکل ۱. مشخصات نمونه آزمایشگاهی - R_0

پایه پل در آزمایش اول به وسیله دو لایه FRP که مشخصات آنها در جدول ۱ ذکر شده و هر لایه ۱/۰۸ میلی متر ضخامت دارد پوشانده شده و سپس تحت نیروی قائم ناشی از جک هیدرولیکی شکسته شده است. نتایج نیرو- تغییر مکان در شکل ۲ آورده شده است. در این آزمایش، نمونه تا مقاومت نهایی تحت بارگذاری قرار گرفته است.

نمونه دوم: این نمونه یک پایه پل بتنی دایره ای شکل با خاموت های دورپیچ است که در سال ۲۰۰۵ توسط هادی (۲۰۰۷) آزمایش شده است. این نمونه ۹۲۵ میلی متر ارتفاع داشته و مقطع آن دایره ای به شعاع ۲۰۵ میلی متر است. از ۶ آرماتور ۱۲ میلی متری و خاموت های دورپیچ ۶ میلی متری برای مسلح نمودن این نمونه بهره جویی شده است. مقاومت کششی آرماتور طولی ۵۰۰ مگاپاسکال و خاموت ۲۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در اولین آزمایش، نمونه ساده و بدون FRP تحت بار قائم با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی متر تحت بارگذاری قرار گرفته است.



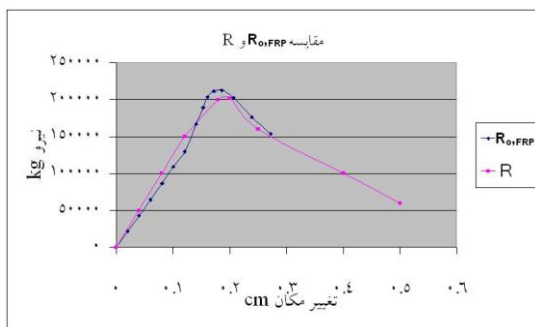
شکل ۲. منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی R



شکل ۶. نمای سه بعدی دو لایه FRP مربوط به مدل

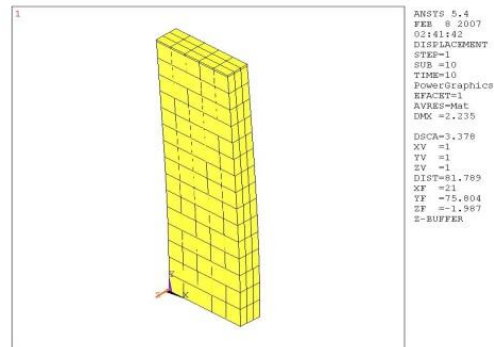
$R_{0,FRP}$

نمودار نیرو - تغییر مکان مدل $R_{0,FRP}$ در شکل ۷ ارائه شده است. این نمودار از لحاظ رفتاری مشابه حالت قبل بوده، با این تفاوت که الیاف کربنی استفاده شده در بهسازی ظرفیت میزان نیرو و جابجایی وارده را افزایش داده است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تطبیق قابل قبولی بین دو نمودار وجود دارد.



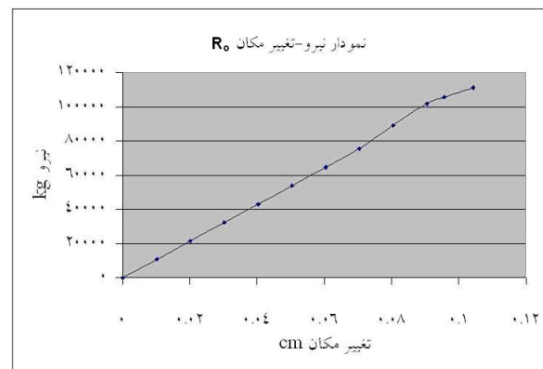
شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی R و تحلیل مدل $R_{0,FRP}$

به منظور بسط و اطمینان بیشتر از نتایج، تست دوم نیز مدل گردیده است. نمونه دوم: در اینجا نیز اول یک پایه پل دایره‌ای با ابعاد مشخص و منطبق با ابعاد تست شده مدل‌سازی شده و با وارد کردن جابجایی قائم به بالای پایه پل و انجام تغییرات لازم، تحلیل انجام گرفته است. شکل ۸ نحوه‌ی مش‌بندی را در مقطع ستون دایروی نشان می‌دهد.



شکل ۴. مدل و مش‌بندی $R_{0,FRP}$

نتایج تحلیل به صورت نمودار نیرو- تغییر مکان شکل ۵ ارائه گردیده است. این نمودار رفتار نیرو- تغییر مکان پایه پل تحت بار محوری را نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص است، در ابتدا نمونه عملکرد خطی در محدوده الاستیک داشته و سپس در محدوده غیر خطی تا ظرفیت نهایی خود افزایش نیرو می‌یابد. در نهایت، این نمونه به واسطه اثر مضاعف ترک‌های عرضی گسیخته می‌گردد.



شکل ۵. نمودار نیرو تغییر مکان مدل R_0

حال، بعد از تحلیل پایه پل ساده به منظور واسنجی، پایه پل را همانند آزمایش انجام شده به کمک دو لایه FRP مقاوم سازی نموده و تحت جابجایی قائم تحلیل انجام می‌شود. شکل ۶ نمای سه بعدی دو لایه FRP مربوط به مدل $R_{0,FRP}$ را نشان می‌دهد.

به عنوان تحلیل اول، پایه پل بدون FRP بررسی می‌شود. نمودار نیرو-تغییر مکان در شکل ۱۰ آورده شده است. از آنجایی که در شکل ۱۰ پایه پل علاوه بر نیروی محوری تحت نیروی جانبی نیز قرار گرفته، مقاومت نهایی کمتری را تجربه می‌کند. مطابق رابطه (۱) شکل‌پذیری تابعی از تغییر مکان نهایی و تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم عضو می‌باشد:

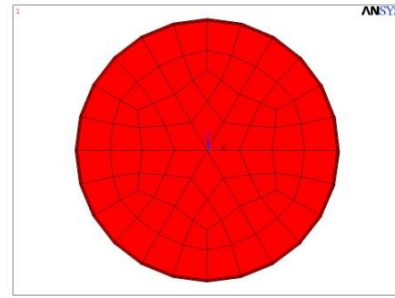
$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

که δ_u تغییر مکان نهایی و δ_y تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم عضو هستند. با احتساب δ_u در نقطه ماکزیمم (قبل از اثر ترک‌خوردگی‌های بزرگ و محدوده کاهش مقاومت) ضریب شکل‌پذیری $\mu = \frac{2/5}{1} = 2/5$ و مقاومت نهایی سیستم هم ۲۱۷۹۸ کیلوگرم می‌باشد. حال، در تحلیل دوم، همین پایه پل به کمک دو لایه FRP که هر لایه ۰/۱۰۸ میلی‌متر ضخامت دارد، مقاوم سازی می‌شود.

در حالت دوم، ضریب شکل‌پذیری $\mu = 3/12$ و مقاومت نهایی نیز ۲۵۶۳۴ کیلوگرم مشاهده می‌شود. میزان افزایش شکل‌پذیری ۲۴/۸٪ بوده و مقاومت نیز به میزان ۱۷/۵۹٪ افزایش یافته است.

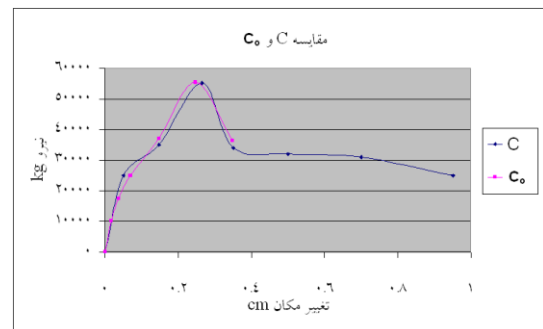
نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های $R_{FRP,1}$ ، $R_{FRP,2}$ و R_1 در شکل ۱۰ رسم شده است. پایه پل به کمک ورق‌های کربنی دورپیچ شده، که در نتیجه، میزان نیرو و تغییر مکان به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. مهمترین علت در این مورد جلوگیری از گسترش ترک‌ها و به تأخیر انداختن آنهاست.

به عنوان سومین تحلیل پایه پل، مطابق شکل ۱۱، نمونه $R_{FRP,2}$ در ابتدا و انتها علاوه بر دولایه FRP قبلی با دولایه به طول ۳۰ سانتی‌متر پوشانده شده است. در این تحلیل، $\mu = 3/326$ و بار نهایی برابر ۲۷۱۴۵ کیلوگرم به‌دست آمده است.



شکل ۸. پلان مش‌بندی مقطع پایه پل دایره‌ای

نتایج حاصل از تحلیل به صورت شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، به دلیل یکسان بودن سختی در دو جهت؛ این نمودار نسبت به نمودار مشابه در حالت پایه پل مستطیلی رفتار نرم‌تر و مناسب‌تری دارد. همانگونه که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین دو نمودار وجود دارد که این انطباق مناسب از دقت عمل لازمه در مدل‌سازی حکایت می‌کند.

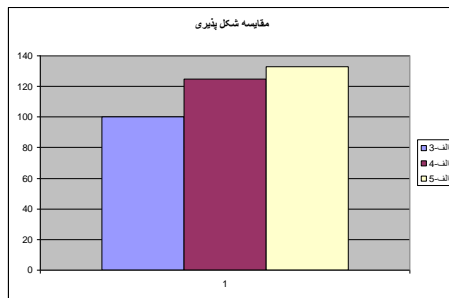
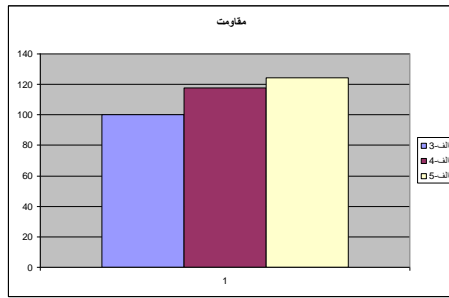


شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایشگاهی C و تحلیل مدل C0

پس از انجام عمل واسنجی و اطمینان از صحت نتایج حاصل از نرم‌افزار، به بررسی تأثیر کامپوزیت‌های FRP پرداخته شده است.

۴. تأثیر کامپوزیت‌های FRP

در ابتدا پایه پل مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ظرفیت این پایه پل و به منظور اینکه کارایی آن به عنوان عضوی که تحت نیروی محوری و لنگر خمشی است بررسی شود، پایه پل را تحت بار قائم ۱۰ تن قرار داده و با اعمال جابجایی افقی، پایه پل تحلیل می‌گردد.

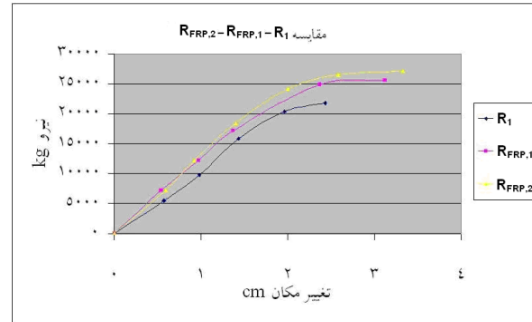


شکل ۱۲. مقایسه شکل پذیری

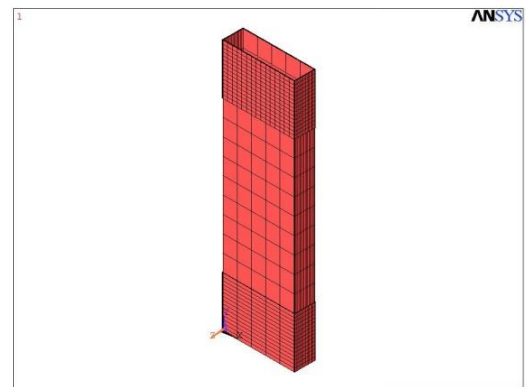
پایه‌ی پل دایروی در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. این پایه ابتدا بدون FRP با بار قائم ۵ تن و جابجایی افقی تحلیل شده است، که نتایج در شکل ۱۴ آمده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، نیروی جانبی قابل توجه وارد شده موجب شده که میزان مقاومت نمونه نسبت به حالتی که صرفاً بار محوری با خروج از محور جزیبی بود به میزان قابل توجهی کاهش یابد. نتایج تحلیل $\mu = \frac{1/6}{0/4} = 4$ و بار نهایی را برابر ۹۰۱۰ کیلوگرم نشان می‌دهد.

در تحلیل دوم، مطابق شکل ۱۳، پایه پل به کمک دو لایه FRP به ضخامت ۱/۰۸ میلی‌متر مقاوم سازی شده است.



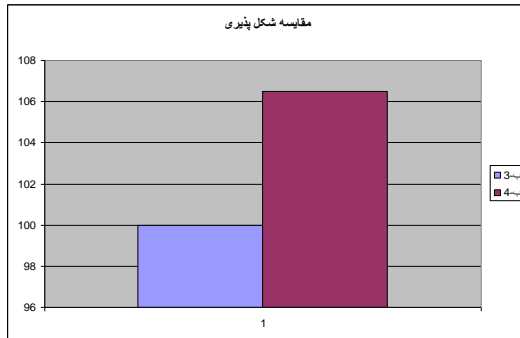
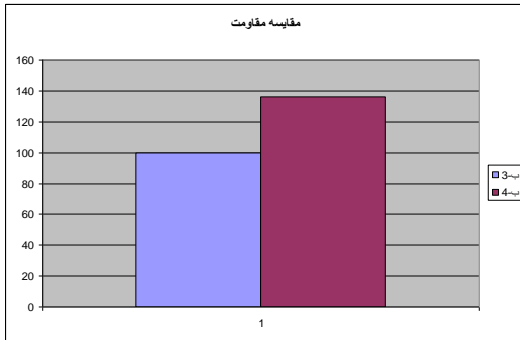
شکل ۱۰. مقایسه نتایج تحلیل عددی مدل‌های R_1 , $R_{FRP,1}$ و $R_{FRP,2}$



شکل ۱۱. نمای سه بعدی لایه‌های FRP مربوط به مدل $R_{FRP,2}$

همانگونه که در شکل ۱۰ مشخص است، استفاده از دو لایه در بالا و پایین علاوه بر دورپیچ کردن در نمونه $R_{FRP,2}$ توانسته است به صورت موضعی مفصل پلاستیک ایجاد شده در پایین پایه پل را مهار کرده و موجب افزایش نیرو و تغییر مکان نمونه شود.

شکل ۱۲ مقایسه بین شکل‌پذیری بین نمونه‌های با و بدون تقویت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت سوم ۶٪ شکل‌پذیری نسبت به حالت دوم و ۳۳٪ نسبت به حالت اول افزایش یافته و مقاومت ۵/۸٪ نسبت به حالت دوم و ۲۴/۵٪ نسبت به حالت اول افزایش یافته است.



شکل ۱۵. مقایسه شکل پذیری

۵. نتیجه گیری

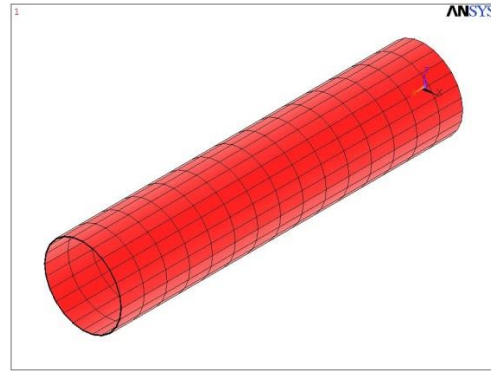
در این تحقیق، شیوه‌ای برای مدل‌سازی بتن محصور شده توسط آرماتور و FRP با دسترسی به نتایج آزمایشگاهی محدود بیان شده و نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱. قرارگیری بتن تحت تنش‌های فشاری چندمحوره باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن می‌گردد که این افزایش به دلیل جلوگیری از گسترش ترک‌های عرضی در بتن می‌باشد. محصور نمودن بتن توسط کامپوزیت‌ها (FRP) نیز باعث ایجاد تنش‌های چندمحوره می‌گردد. این مسئله نیز نقش به‌سزایی در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری پایه‌ی پل دارد.

۲. شیوه ارائه شده در مدل‌سازی اجزای محدود پایه پل بتنی محور در کامپوزیت مناسب و قابل کاربرد است.

۳. با محصور نمودن تمام پایه پل در پوشش کامپوزیتی بیشترین استفاده از ظرفیت محصورکنندگی FRP در بار محوری خالص محقق می‌گردد.

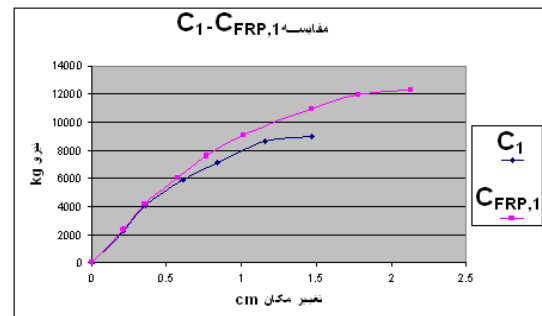
۴. در حالت ترکیب بار محوری و خمشی، محصور نمودن نواحی مفاصل پلاستیک تا جایی که انهدام پایه پل کششی باشد، بر افزایش مقاومت مؤثر است. در انهدام



شکل ۱۳. نمای سه بعدی و مش‌بندی دو لایه FRP در

مدل‌سازی $C_{FRP,1}$

نتایج در شکل ۱۴ به صورت نمودار نیرو- تغییر مکان مشاهده می‌گردد. در اینجا نیز تأثیر دورپیچ کردن پایه پل در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه، بالاخص در حیطه پلاستیک، به وضوح قابل مشاهده است. به عنوان علت اصلی، می‌توان گفت که ترک‌های عمقی عریض در ناحیه پلاستیک به صورت جدی وارد می‌شوند و الیاف مصرفی به خوبی این موضوع را به تأخیر انداخته‌اند. نتایج تحلیل نشان از افزایش شکل‌پذیری به میزان $\mu = \frac{2/13}{0/5} = 4/26$ می‌باشد و همچنین بار نهایی در این تحلیل برابر 12302 کیلوگرم به دست آمده است.



شکل ۱۴. مقایسه نتایج تحلیل عددی مدل‌های C_1 و $C_{FRP,1}$

همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، شکل‌پذیری $6/5\%$ و مقاومت نیز 36% افزایش یافته است. در اینجا نیز محصور کردن مفصل ایجاد شده در ابتدای پایه پل به خوبی توانسته به صورت موضعی از شکست زود هنگام جلوگیری کند.

۷. در پایه پل دایره‌ای، دورپیچ کردن تمام پایه پل با دو لایه FRP شکل‌پذیری را ۶/۵٪ و مقاومت را ۳۶٪ افزایش می‌دهد.

۸. دورپیچ کردن تمام پایه پل، میزان شکل‌پذیری پایه پل مستطیلی را بیش از دایره‌ای افزایش می‌دهد. درحالی‌که همین موضوع باعث افزایش بیشتر مقاومت پایه پل دایره‌ای نسبت به پایه‌ی پل مستطیلی می‌گردد.

فشاری پایه پل، محصور نمودن نواحی مفصل پلاستیک تأثیر چندانی بر افزایش مقاومت پایه پل ندارد.

۵. در پایه پل مستطیلی، دورپیچ کردن تمام پایه پل با دو لایه FRP شکل‌پذیری را ۲۴/۸٪ و مقاومت را ۱۷/۵۹٪ افزایش داده است.

۶. در پایه پل مستطیلی، دورپیچ کردن تمام پایه پل با دو لایه FRP و یک سوم بالا و پایین، شکل‌پذیری را ۳۳٪ و مقاومت را ۲۴/۵٪ افزایش داده است.

۶. مراجع

- Alcocer, S. M. and Jirsa, J. O. 1993. "Strength of reinforced concrete frame connections rehabilitated by jacketing". *ACI Struct. J.* 90(3): 251-261.
- ANSYS user's manual for revision 5.0, Vol. 4. Swanson Analysis Systems Inc.
- Chai, Y. H., Priestley, M. J. N. and Seible, F. 1991. "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance". *ACI Struct. J.* 88(5): 572-584.
- Ghobarah, A., Aziz, T. S. and Biddah, A. 1997. "Rehabilitation of reinforced concrete frame connections using corrugated steel jacketing". *ACI Struct. J.* 94(3): 282-294.
- Hadi, M. N. 2007. "Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading". *Compos. Struct.* 77(1): 92-96.
- Hadi, M. and Widiarsa, I. 2012. "Axial and flexural performance of square RC columns wrapped with CFRP under eccentric loading". *J. Compos. Constr.* 16(6): p. 640-649.
- Katsumata, H., Kobatake, Y. and Takeda, T. 1988. "A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns". *Proc. 9th Conference on Earthquake Engineering.*
- Maalej, M., Tanwongswal, S. and Paramasivam, P. 2003. "Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP". *Cement and Concrete Comp.* 25(2): 263-276.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. and Park, R. 1988. "Theoretical stress-strain model for confined concrete". *J. Struct. Eng.* 114(8): 1804-1826.
- Mathews, F. L. and Rawlings, R. D. 1999. "Composite Materials: Engineering and Science". Elsevier.
- Pantelides, C.P. and Gergely, J. 2002. "Carbon-fiber-reinforced polymer seismic retrofit of RC bridge bent: Design and in situ validation". *J. Compos. Constr.* 6(1): 52-60.
- Parvin, A. and Wang, W. 2001. "Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading". *J. Compos. Constr.* 5(3): 146-152.
- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. and Li, M. W. 1994. "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps". *ACI Struct. J.* 91(4): 434-447.
- Song, X., Gu, X., Li, Y. and Zhang, W. 2013. "Mechanical behavior of FRP-strengthened concrete columns subjected to concentric and eccentric compression loading". *J. Compos. Constr.* 17(3): 336-346.