

ارزیابی تقویت خمشی پایه پل های بتن آرمه توسط GFRP تحت بارگذاری دوره ای

مصطفی برقی^۱، میثم حداد^۲

۱- استادیار، تهران خیابان ولی عصر تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

۲- دانشجوی ارشد سازه، تهران خیابان ولی عصر تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

پست الکترونیکی مؤلف رابط: (meysam_hadad@sina.kntu.ac.ir)

خلاصه

توسعه مستمر علم در عرصه مهندسی سازه و زلزله موجب شده است تا برای نوسازی و بهسازی در سال های اخیر از روش های نوین و مصالحی جدید استفاده شود که در پیشینه طولانی ساخت و ساز سابقه نداشته است در میان این نوآوری ها FRP (مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف) از جایگاه ویژه برخوردار می باشد تا آنجا که به نظر برخی از متخصصان FRP را باید مصالح ساختمانی هزاره سوم نامید. استفاده از کامپوزیت FRP، به عنوان یک گزینه عملی نسبت به روش ها و فنون مقاوم سازی مرسوم و متداول در سازه های بتنی به طور روزافزون در حال توسعه می باشد. امروزه نگهداری از سازه ها به دلیل هزینه ساخت و تعمیر بسیار حائز اهمیت می باشد. با مطالعه رفتار سازه های بتنی مشخص می شود عوامل متعددی مانند: اشتباهات طراحی و محاسبه، عدم اجرای مناسب، تغییر کاربری سازه ها از دوام آنها می کاهد ضمناً تغییر آیین نامه های ساختمانی (باعث تغییر در بارگذاری و ضرایب اطمینان می شود) نیز سبب ارزیابی و بازنگری مجدد طرح و سازه می گردد تا در صورت لزوم بهسازی و تقویت شود. خرابی های مشاهده شده در ساختمان ها و پل ها طی زلزله های اخیر نیاز مبرم به مقاوم سازی لرزه ای سازه های موجود را نشان می دهد. در این تحقیق با استفاده از نرم افزارهای موجود رفتار FRP تحت بارگذاری دوره ای جانبی و تأثیر آن در تقویت ظرفیت خمشی و شکل پذیری ستون مورد بررسی قرار می گیرد. با مقایسه فرم سیکل های منحنی هیستریزس در دو حالت مدل سازی با ABAQUS و نتایج حاصل از اطلاعات ۱۰۲ ستون دایره ای که توسط مرکز پژوهش مهندسی زلزله (PEER) گردآوری شده است، به دقت مورد نیاز برای صحت نتایج می رسیم.

کلمات کلیدی: تقویت خمشی، پل های بتن آرمه، بارگذاری دوره ای، FRP، ABAQUS

۱. مقدمه

بخش عظیمی از سازه های بتنی مسلح طبق استانداردهای امروزی غیر مقاوم می باشند. تغییرات کاربردی، افزایش در موارد بارگذاری یا فرسودگی تدریجی حاصل از محیط مخرب از جمله عوامل اصلی سهم در این مسئله بشمار می روند. جهت محافظت از این سازه ها می توان از بازسازی برای نگهداری قدرت و افزایش عمر آنها یاد کرد. در دهه اخیر برای استحکام اجزای ساختاری سازه های بتنی مسلح از ورق های کامپوزیت استفاده شده است. به عقیده بسیاری از محققین ورق های کامپوزیت وسیله ای کارآمد، مطمئن، و مقرون به صرفه برای مقاوم سازی محسوب می شود. سیستم های الیاف مسلح شده پلیمری برای تقویت سازه های بتنی پدیدار شده و به عنوان یک جانشین برای روش های سنتی از قبیل چسباندن صفحات فولادی، افزایش سطح مقطع با بتن ریزی مجدد و پیش تنیدگی خارجی می باشد. استفاده از FRP در زمینه مقاوم سازی، هر چند که ورق های FRP قیمت نسبتاً بالایی دارد، اما با توجه به هزینه اجرای کم و نیز سایر مزایای FRP، در کل به صرفه ترین و مؤثرترین راه مقاوم سازی سازه های بتنی امروزه به شمار می رود. کامپوزیت FRP محصولی است برای تقویت سازه ها که با چسباندن لایه ای از منسوج الیاف کربن، شیشه یا آرامید به وسیله رزین اپوکسی به روی سطح عضوی از سازه انجام می گیرد. این لایه بصورت عضو تقویتی مضاعف عمل می کند. این فرآیند بر پایه قراردادن (منسوج الیاف توأم با ملات چسبنده رزین) با مقاومت کششی بسیار بالا که براساس محاسبات فنی به قسمت تحت کشش عضو مورد نظر سازه چسبانده می شود استوار است. با این کار، عملکرد و کارایی عضو و در نتیجه مقاومت سازه افزایش می یابد.

اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شده است، زلزله ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن نیز از جمله عوامل موثرتری برای بررسی کاربرد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف FRP جهت تقویت و مقاوم سازی سازه های بتنی و بنایی در مناطق زلزله خیز گردید. خرابی های مشاهده شده در ساختمان ها و پل ها طی زلزله های اخیر نیاز مبرم به مقاوم سازی لرزه ای سازه های موجود را نشان می دهد.

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران

ستون‌های بتن مسلح، اعضای اصلی مقاوم در برابر بارهای افقی و قائم در سازه‌های بتنی به شمار می‌آید لذا مقاوم کردن ستون‌ها در برابر نیروهای زلزله می‌تواند نقش مهمی را در مقاوم‌سازی کل سازه ایفا کند. در نتیجه استفاده از کامپوزیت‌های FRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی مسلح در دنیا گسترش یافته است و مطالعه در این زمینه از طرف محققین زیادی صورت می‌گیرد.

اولین بار کاتسوماتا و همکارانش در سال ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ روش استفاده از FRP را جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی مسلح ارائه دادند و در این مطالعه آزمایشاتی بر روی ۵ ستون دایره ای شکل و ۱۰ ستون مستطیلی تحت بارهای دینامیکی انجام شد. بعداً، ماتسودا و همکارانش در سال ۱۹۹۰ دو روش برای مقاوم‌سازی ستون‌های پل بتنی با استفاده از FRP ارائه دادند:

الف) مقاوم سازی جهت افزایش مقاومت

ب) مقاوم سازی برای افزایش شکل پذیری



شکل ۱: مقاوم سازی لرزه ای با هدف افزایش مقاومت و شکل پذیری [6]

در روش (الف) از پوشش FRP به صورت طولی استفاده می‌شود تا مقاومت خمشی ستون افزایش یابد ولی در روش (ب) بصورت قید استفاده می‌شود تا شکل پذیری ستون افزایش یابد. در هر دو روش می‌توان قابلیت جذب انرژی را در عضو مقاوم شده بالا برد.

۲. رفتار مکانیکی بتن [6]

تنها مدلی که تا حدود بسیاری مسئله مدل کردن بتن را در برنامه ABAQUS حل می‌کند مدل پلاستیسیته خرابی بتن می‌باشد که توانایی مدل کردن بتن برای بارگذاری دوره ای و نیز توانایی بررسی بتن مسلح تحت این گونه بارگذاری را داشته و می‌توان رفتار بتن از کشش به فشار و همچنین از فشار به کشش را (توسط منحنی هیستریزیس) مورد ارزیابی قرار داد.

ویژگی های این مدل:

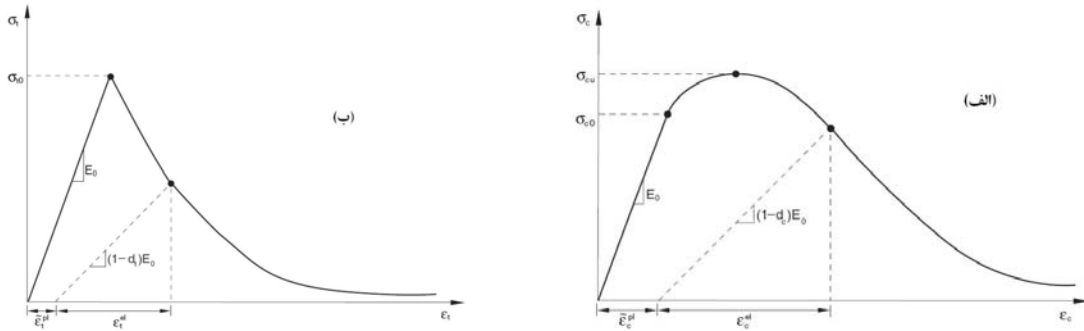
قابلیت مدل سازی بتن و مواد شبه ترک در انواع مختلف سیستم های سازه شامل المان تیر، المان خرابایی، المان پوسته و المان سه بعدی. استفاده برای مفهوم آسیب ایزوتروپیک الاستیک در ترکیب با کشش ایزوتروپیک و فشار پلاستیسیته برای ارائه دادن رفتار غیرالاستیک در بتن، قابلیت استفاده در بتن های غیر مسلح، توانایی استفاده میلگرد در بتن های مسلح. در این مدل می‌توان برای بارگذاری های بتن به صورت های مونوتنیک، چرخشی و بارگذاری دینامیکی تحت فشارهای محدود شده پائین استفاده کرد.

۲-۱) رفتار بارگذاری مونوتنیک تک محوره

این مدل از نوع مستمر^۲ و برپایه پلاستیسیته مدل خرابی برای بتن بنا شده است. فرض شده است که دو نوع مکانیزم گسیختگی اصلی که شامل ترک خوردگی کششی و شکستگی فشاری مواد بتنی می‌باشد. تکامل سطح گسیختگی (جاری شدن) با دو پارامتر سخت شدگی متغیر ϵ_t^{-pl} و ϵ_c^{-pl} که به ترتیب مکانیزم گسیختگی تحت بارگذاری کششی و فشاری می‌باشد. که در واقع این دو پارامتر کرنش های پلاستیک معادل به ترتیب در حالت کشش و فشار می‌باشد.

1- Concrete damaged plasticity

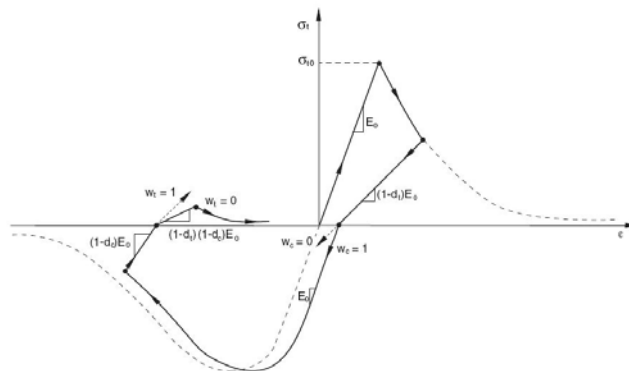
۲- continuum



شکل ۲- پاسخ بتن برای بارگذاری تک محوری در فشار (الف) و کشش (ب)

۲-۲) رفتار بارگذاری دوره ای تک محوره

تحت شرایط بارگذاری دوره ای تک محوره، مکانیزم های افت مقاومت تماماً پیچیده می باشد، که شامل بازشدگی و بسته شدگی میکروترک های یکسان پیشین می باشد، که به خوبی اثرات متقابل آن لحاظ شود. آزمایش تنها راهی است که بتوان رفتار باز آفرینی سختی الاستیک با تغییرات بارگذاری به وجود آمده در طول بارگذاری سیکلی تک محوره را مورد بررسی قرار داد. اثر بازیابی سختی، مشابه اثر تک سوپه، یک جنبه مهمی از رفتار بتن تحت بارگذاری دوره ای می باشد. اثر تغییر بارگذاری از کشش به فشار، معمولاً باعث بسته شدن ترک های کششی، که منجر به بازیابی سختی فشاری می شود.



شکل ۳- بارگذاری دوره ای تک محوره (کشش-فشار-کشش)

با فرض کردن مقادیر پیش فرض برای فاکتور های بازیابی سختی $w_c = 1$ و $w_t = 0$

برای معرفی خصوصیات بتن از ۴ نمودار که شامل نمودار بارگذاری تک محوره در فشار و در کشش و نمودارهای رفتار بتن از فشار به کشش و از کشش به فشار استفاده می شود که می توان فرم رفتاری آنها و نیز ورودی های مورد نیاز را از مقالات معتبر استخراج کرد [2].

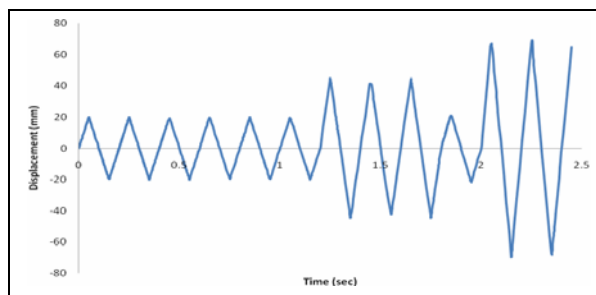
۳. اعتبار سنجی نمونه بتنی مدل شده با برنامه ABAQUS

برای اینکه بتوان صحت و سقم نتایج بدست آمده از برنامه ABAQUS را بررسی نمود، این نتایج را با نتایج حاصل از ستون های قابل استناد که توسط مرکز پژوهش مهندسی زلزله (PEER) [1] گردآوری شده است مقایسه نموده تا بتوان به نتایج استخراج شده از برنامه ABAQUS استناد کرد. در این تحقیق از یک نمونه ستون مربعی موجود در PEER که نتایج آن در دسترس بوده و قابل استناد می باشد استفاده شده تا بتوان دقیقاً رفتار این نوع ستون ها را در هنگام آسیب دیدن بررسی نمود.

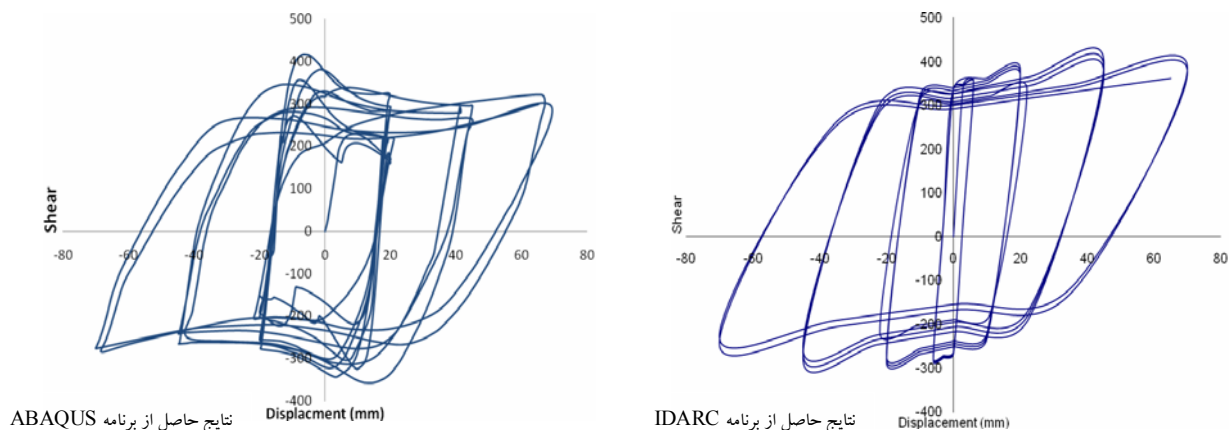
جدول ۱- مشخصات ستون مربعی موجود در گزارشات PEER

Specimen Name	B×H (mm×mm)	Length(mm)	Cover(mm)	f _c	#Longitudinal Bars	Diameter Long Bars(mm)	F _y Long Bars
Saatcioglu and Ozcebe 1989, U4	350×350	1000	22.5	32	8	25	438

Specimen Name	Hoop Spacing, sv	Diameter, Spiral (mm)	f _y , Spiral	P	Failure Type
Saatcioglu and Ozcebe 1989, U4	50	10	470	600	Flexure



شکل ۴- بارگذاری دوره ای اعمال شده به ستون مورد مطالعه



شکل ۵- برش پایه بدست آمده از برنامه IDARC و برنامه ABAQUS

۴. مدل سازی FRP در ABAQUS

برنامه المان محدود ABAQUS قادر است که برای آنالیزهای مدل هایی با ساختار مرکب استفاده شود. در واقع توسط این برنامه می توان مدل هایی با ترکیب مواد مختلف ایجاد نمود و نیز بتوان با استفاده از توانایی های این برنامه رفتاری مناسب در قسمت مرزی بین دو ماده برقرار کرد. در این تحقیق برای مدل کردن FRP از المان S4R, SHELL استفاده شده است این نوع المان توسط Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. (1997) استفاده شده و نتایج مناسبی از آن گرفته شده است.

المان پوسته چهار گرهی چندمنظوره 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 استفاده نمود. در این تحقیق از دو نوع FRP به منظور مقایسه و نیز انتخاب بهترین گزینه برای تقویت خمشی استفاده شده است که در جدول ۱ خصوصیات مکانیکی آن دو برای معرفی به نرم افزار آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی GFRP

	E_1 (Gpa)	E_2 (Gpa)	G_{12} (Gpa)	G_{13} (Gpa)	G_{23} (Gpa)	ν_{12}
GFRP	29.99238	8.27376	8.27376	8.27376	8.27376	0.26

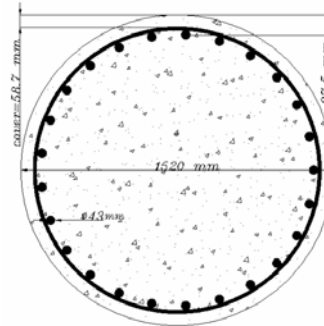
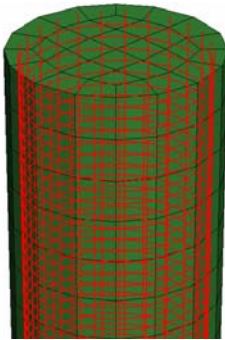
۵. مدل مورد مطالعه در برنامه ABAQUS

مدل ایجاد شده با استفاده از ابعاد واقعی پایه یک پل ایجاد شده است. در واقع این نوع مدل سازی کمک می کند که بتوان نمونه های واقعی را توسط نرم افزار مورد مطالعه قرار داد. مدل مورد مطالعه تحت بارگذاری همزمان ثقلی و جانبی قرار گرفته که بارگذاری جانبی آن به صورت دوره ای می باشد. در این تحقیق ستون دایره ای معرفی شده در جدول ۳ توسط ورقه GFRP به ضخامت ۱ میلی متر در طول کل ستون دورپیچ شده است. در این مدل اتصال بین ورق FRP و ستون بتنی به صورت گره ای ایجاد شده یعنی بدنه ورق با ستون بتنی به صورت کاملاً پیوسته عمل خواهد کرد.

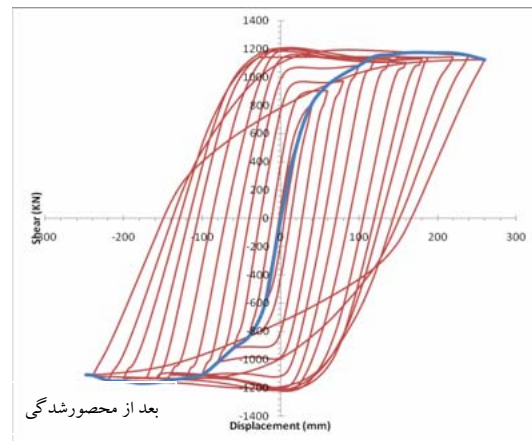
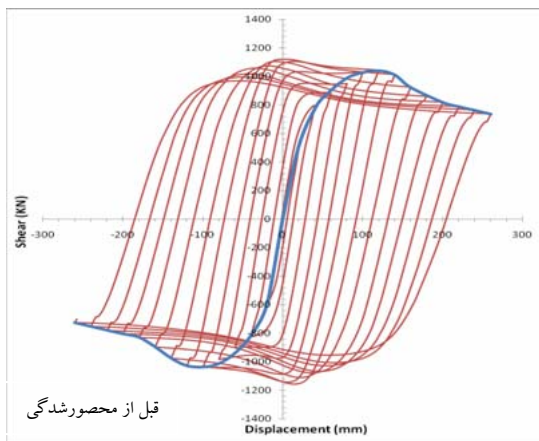
جدول ۳- مشخصات ستون دایره ای موجود در گزارشات PEER

Specimen Name	Diameter(mm)	Length(mm)	Cover(mm)	f_c	#Longitudinal Bars	Diameter Long Bars(mm)	f_y Long Bars
Full Scale Flexure	1520	9140	58.7	35.8	25	43	475

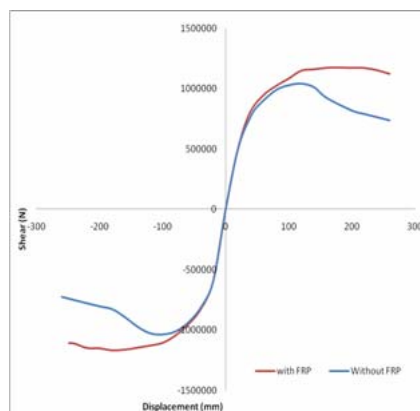
Specimen Name	Hoop Spacing, sv	Diameter, Spiral (mm)	f_y , Spiral	P	Failure Type
Full Scale Flexure	89	15.9	493	4450	Flexure



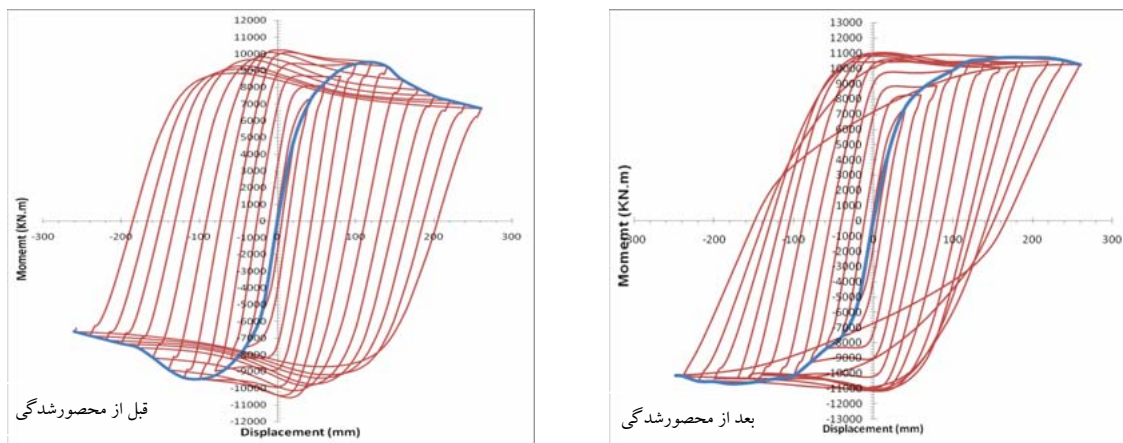
شکل ۶- شمای کلی از مدل ایجاد شده در برنامه ABAQUS



شکل ۷- منحنی های هیستریزیس برش پایه در دو حالت بدون محصور شدگی و با محصورشدگی توسط FRP



شکل ۸- پوش منحنی هیستریزیس برش پایه در دو حالت بدون محصور شدگی و با محصورشدگی توسط FRP



شکل ۹- منحنی های هیستریزیس گشتاور ماکزیمم در دو حالت بدون محصور شدگی و با محصورشدگی توسط FRP

۶. نتیجه گیری

با توجه به مدل ایجاد شده در برنامه ABAQUS که رفتار بتن در آن به طور کامل تحت بارگذاری دوره ای لحاظ شده و می توان از آن برای آنالیزهای هیستریزیس ستون بتن آرمه استفاده نمود. مدل رفتاری FRP مورد استفاده در این تحقیق نیز به عنوان مدلی آزمایش شده در بسیاری از تحقیقات موجود در این زمینه در سطح محافل علمی می باشد که در این تحقیق از آن استفاده شده است. با مقایسه رفتار منحنی های هیستریزیس قبل و بعد از دورپیچ کردن کامل توسط GFRP به نتایج زیر می رسیم:

۱. پوشش تقویتی GFRP (با ضخامت ۱ میلی متر) باعث بالا بردن ظرفیت خمشی پایه های پل های بتن آرمه به میزان ۸٪ شده است.
۲. اصلی ترین خاصیت پوشش تقویتی GFRP، افزایش کرنش گسیختگی به میزان ۵۰٪ که منجر به شکل پذیری و اتلاف انرژی بیشتر می شود و نیز عملکرد لرزه ای ستون را بهبود می بخشد.
۳. در مواردی که نیاز به افزایش شکل پذیری می باشد و این نوع FRP برای شکل پذیر کردن ستون و نیز تأخیر در انهدام ستون بسیار مؤثر بوده و می توان بسته به میزان مورد نیاز از آن استفاده کرد.
۴. پوشش مضاعف پای ستون منجر به افزایش چشمگیر شکل پذیری شده و در افزایش ظرفیت خمشی ستون نقش بسیار کمی دارد.

۷. مراجع

1. Reserches at the University of Washinton, "Column Data Base", National, Science Foundation Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 1999 .
2. Mander , Priestley and Park . 1988 . Theoretical stress – strain model for confined concrete. ASCE J, 114; 1827-1849.
3. Peer. Berkeley. Edu./ ~ elwood/ research/ dissertation/ chapter 2 . pdf, 2002 .
4. Shen, Y., Xu, M., Chandrashekhara, K., and Nanni, A., "Finite Element Analysis of FRP Tube Assemblies for Bridge Decks", Advanced Composite Materials, October 2001
5. Chai, Y. H.; Priestly, M. J. N.; and Seible, F., Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance, ACI Structural Journal, V. -88, No. 5, Sept.-Oct. 1991, pp. 572-584.
6. New Zealand National Roads Board, Research Bulletin No. 71, Wellington, New Zealand, 1983.
7. ABAQUS Analysis User's Manual version 6.6.3