

بررسی تأثیر CFRP در ناحیه مستعد تشکیل مفصل پلاستیک در پایه پل های بتن آرمه تحت بارگذاری یکنواخت

میثم حداد^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران

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

خلاصه

گسیختگی های خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک عمدتاً در پایه پل ها با آرماتورهای طولی پیوسته رخ می دهد. گسیختگی مفصل پلاستیک بوسیله ایجاد ترک های افقی ، فروریختن هسته بتن در فشار و شکست آرماتور عرضی و کمانش آرماتور طولی ایجاد می شود. پایه پل ها بیشتر به علت ضعف در تأمین ظرفیت باربری و ظرفیت خمشی و نیز شکل پذیری کافی در زلزله های اخیر منهدم شده اند. در میان راهکارهای مقاوم سازی لرزه ای ، استفاده از FRP (مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف) از جایگاه ویژه برخوردار می باشد. در این تحقیق به بررسی محصورشدگی توسط CFRP در افزایش ظرفیت خمشی و نیز شکل پذیری پایه پل ها پرداخته تا بتوان تخمین مناسبی از میزان مشارکت این مواد در افزایش ظرفیت خمشی و شکل پذیری این نوع ستون ها به دست آورد. برای مدل سازی از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است که قابلیت مدل سازی بتن برای بارگذاری دوره ای و مدل کردن اپوکسی (چسب مورد استفاده بین FRP و ستون) را دارا می باشد و نیز قابلیت مدل سازی برای FRP (با در نظر گرفتن گسیختگی و انهدام ورق های FRP) را دارد. برای صحت سنجی این تحقیق، فرم سیکل های منحنی هیستریزس بدست آمده از برنامه ABAQUS و نتایج حاصل از یک کار آزمایشگاهی با هم مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان می دهد که استفاده از ورق های CFRP تأثیر مناسبی در افزایش ظرفیت باربری ستون و ورق های GFRP تأثیر خوبی در افزایش شکل پذیری ستون دارد. در این تحقیق استفاده همزمان از این دو ماده در بهبود ظرفیت باربری و شکل پذیری پایه پل به تناسب نیاز و محل قرار گیری این مواد مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ظرفیت 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 موردنظر 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 مؤثرتری 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. ستون های بتن مسلح، اعضای اصلی مقاوم در برابر بارهای افقی و قائم در سازه های بتنی به شمار می آید لذا مقاوم کردن ستون ها در برابر نیروهای زلزله می تواند نقش مهمی را در مقاوم سازی کل سازه ایفا کند. در نتیجه استفاده از کامپوزیت های FRP جهت مقاوم سازی ستون های بتنی مسلح در دنیا گسترش یافته است و مطالعه در این زمینه از طرف محققین زیادی صورت می گیرد.

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

اولین بار کاتسوماتا و همکارانش در سال ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ روش استفاده از FRP را جهت مقاوم سازی ستون های 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 مقاوم سازی ستون های 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 می شود تا مقاومت خمشی ستون افزایش یابد ولی در روش ب) بصورت قید استفاده می شود تا شکل پذیری ستون افزایش یابد. در هر دو روش می توان 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 می کند مدل پلاستیسیته خرابی بتن^۱ می باشد که توانایی مدل کردن بتن برای بارگذاری دوره ای و نیز توانایی بررسی بتن مسلح تحت این گونه بارگذاری را داشته و می توان رفتار بتن از کشش به فشار و همچنین از فشار به کشش را (توسط منحنی هیستریزیس) مورد ارزیابی قرار داد .

ویژگی های این مدل:

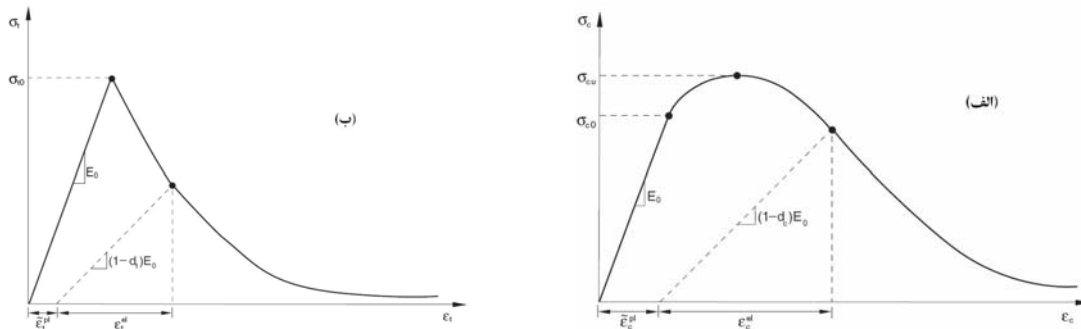
قابلیت مدل سازی بتن و مواد شبه ترک در انواع مختلف سیستم های سازه شامل المان تیر ، المان خرپایی ، المان پوسته و المان سه بعدی. استفاده برای مفهوم آسیب ایزوتروپیک الاستیک در ترکیب با کشش ایزوتروپیک و فشار پلاستیسیته برای ارائه دادن رفتار غیرالاستیک در بتن ، قابلیت استفاده در بتن های غیر مسلح ، توانایی استفاده میلگرد در بتن های مسلح. در این مدل می توان 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 بر پایه 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 می باشد . تکامل سطح گسیختگی (جاری شدن) با دو پارامتر سخت شدگی متغیر ϵ_c^{-pl} و ϵ_t^{-pl} که به ترتیب مکانیزم گسیختگی تحت بارگذاری کششی و فشاری می باشد . که در واقع این دو پارامتر کرنش های پلاستیک معادل به ترتیب در حالت کشش و فشار می باشد.

۱- Concrete damaged plasticity

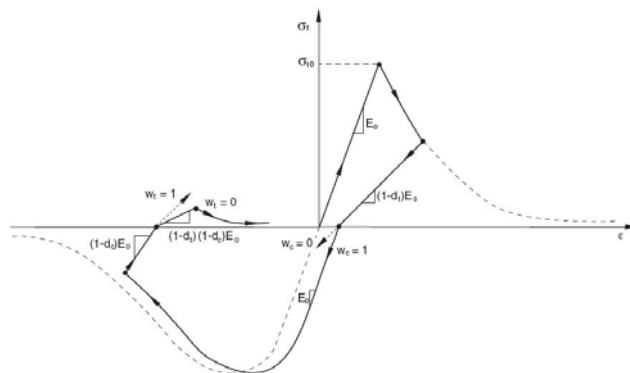
۲- continuum



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 میکروتکرک 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 سویه، 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 $\omega_c = 1$ و $\omega_t = 0$

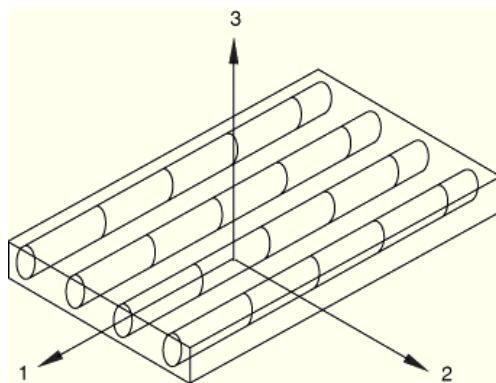
برای معرفی خصوصیات بتن از ۴ نمودار که شامل نمودار بارگذاری تک محوره در فشار و در کشش و نمودارهای رفتار بتن از فشار به کشش و از کشش به فشار استفاده می شود که می توان فرم رفتاری آنها و نیز ورودی های مورد نیاز را از مقالات معتبر استخراج کرد [2].

۳. 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.

الیاف در مواد مسلح شده الیافی، موازی فرض شده که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای این مدل باید خصوصیات مواد در یک سیستم مختصات محلی توسط کاربر تعریف شود. ورقه در صفحه ۲-۱ و جهت محلی ۱ که مرتبط با جهت الیاف می باشد قرار دارد. همچنین باید پاسخ مواد آسیب ندیده تعریف شود تا بتوان برای تعریف مواد الاستیک خطی ارتوئروپیک استفاده شود. هرچند که پاسخ مواد می تواند برحسب ثابت های مهندسی یا بوسیله ماتریس سختی الاستیک تعریف شود.



شکل ۴: ورقه تک جهته

کامپوزیت FRP متشکل از الیاف بسیار مقاوم در یک ماتریس پلیمری می‌باشد. الیاف در کامپوزیت، عضو اصلی باربر هستند و مقاومت و سختی زیادی در کشش دارند. ماتریس پلیمری، الیاف را در محل و آرایش مطلوب نگهداشته و بعنوان یک محیط منتقل کننده بار بین الیاف عمل می‌کند، بعلاوه آنها را از صدمات محیطی در اثر بالا رفتن دما و یا رطوبت حفظ می‌کند.

مدل آسیب ناهمسانگرد در برنامه ABAQUS بر پایه کارهای محققین [Hashin and Rotem \(1973\)](#)، [Matzenmiller et. al \(1995\)](#) و [Hashin \(1980\)](#) و [Camanho and Davila \(2002\)](#) می‌باشد.

چهار مد مختلف گسیختگی به صورت زیر بیان می‌شود :

- گسیختگی الیاف در کشش
- کماتش و لهیدگی در فشار
- ترک ماتریس پلیمری تحت تنش عرضی و برش عرضی
- خردشدگی ماتریس پلیمری تحت فشار عرضی و برش عرضی

در برنامه ABAQUS آغاز آسیب به وسیله معیارهای ابتدایی تعیین می‌شود که توسط [Hashin and Rotem \(1973\)](#) و [Hashin \(1980\)](#) به نرم افزار اضافه شده است که سطوح گسیختگی در فضای تنش مؤثر بیان می‌شود. این ضوابط در جزئیات ارائه شده در قسمت آسیب آغازین الیاف کامپوزیت مسلح شده آورده شده است.

پاسخ مواد برطبق فرمول ۱ محاسبه می‌شود

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (1)$$

که ε کرنش و C_d ماتریس الاستیک، که منتج شده از هر آسیب مورد مرتبط به خود دارد :

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21} \quad (3)$$

که d_f منتج شده از ناحیه متداول آسیب الیاف و d_m منتج شده از ناحیه متداول ماتریس آسیب و d_s منتج شده از ناحیه متداول آسیب برشی و E_1 مدول یانگ در جهت الیاف و E_2 مدول یانگ در جهت عمود بر جهت الیاف و G_{12} ، G_{13} ، G_{23} مدول برشی و v_{12} ، v_{21} ضرایب پواسون می‌باشد. برطبق توضیحات بالا برای معرفی پاسخ آسیب ندیده مواد باید موارد زیر را به نرم افزار ارائه داد :

مدول الاستیسیته در جهت الیاف (E_1)، مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف (E_2)، ضرایب پواسون (v_{12} ، v_{21})، مدولهای برشی (G_{12} ، G_{13} ، G_{23}). در این تحقیق از CFRP به منظور تقویت خمشی استفاده شده است که در جدول ۲ خصوصیات مکانیکی آن 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	55	9.5	5.5	3	3	0.33

آسیب آغازین الیاف کامپوزیت مسلح شده^۱

آسیب ابتدایی برپایه ابتدایی ترین نقطه تنزل سختی مواد می باشد. در برنامه ABAQUS ضوابط آسیب ابتدایی برای الیاف کامپوزیت مسلح شده برپایه تئوری هاشین (Hashin and Rotem, 1973 و Hashin, 1980) استوار می باشد. این ضوابط به وسیله چهار مکانیزم ابتدایی آسیب مختلف نشان داده می شود که شامل: کشش الیاف، فشار الیاف، ماتریس کشش و ماتریس فشار.

X^T = 25 Gpa = مقاومت کشش در جهت الیاف

X^C = 20 Gpa = مقاومت فشاری در جهت الیاف

Y^T = 0.5 Gpa = مقاومت کشش در جهت عمود بر الیاف

Y^C = 1.5 Gpa = مقاومت فشاری در جهت عمود بر الیاف

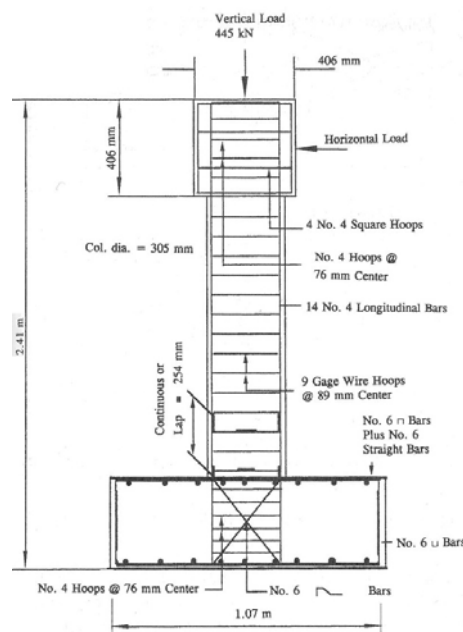
S^L = 0.5 Gpa = مقاومت برشی طولی

S^L = 0.75 Gpa = مقاومت برشی عرضی

$\alpha = 0$ = یک ضریب که سهم مشارکت تنش برشی در ضوابط کشش اولیه الیاف تعیین می کند

۴. مدل مورد مطالعه در برنامه ABAQUS

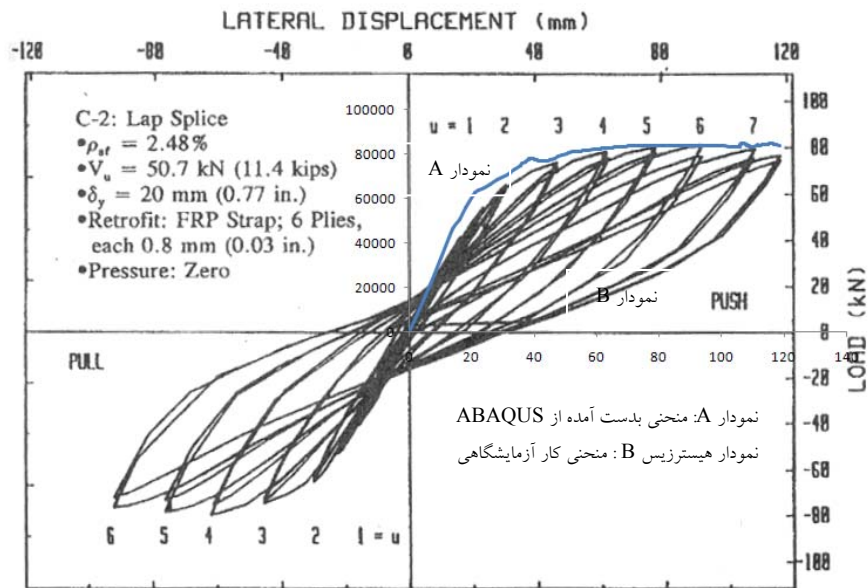
نمونه کوچک مقیاس ستون بتن مسلح دایره‌ای دارای پی، برای تقریب ستون‌های پل‌های بزرگراه‌های موجود (طراحی شده قبل از ۱۹۷۱) در ناحیه ای با خطر لرزه ای بالا طراحی شده بودند. نوارهای کامپوزیت صرفاً در ناحیه مفصل پلاستیک به عنوان مثال در ناحیه ستون بالای وجه فوقانی پایه به طول ۶۳۵ میلی متر بکار رفته بودند. شکل ۵ یک نمونه ستون پیچیده شده بوسیله نوارهای کامپوزیت در ناحیه مفصل پلاستیک پیش از آغاز آزمایش را نشان می‌دهد. مصالح بکار رفته در ساخت نمونه‌های ستون عبارت از بتن با $f'_c = 34.5 \text{ MPa}$ و فولاد Grade 40 بودند. اگرچه مقاومت فشاری مشخصه ستون پل اصلی ۲۱ MPa بود بتن آماده $f'_c = 34.5 \text{ MPa}$ برای لحاظ اضافه مقاومت ناشی از طرح اختلاط محافظ کارانه معمولی و مقاومت بدست آمده با عمر بتن، استفاده شده بود.



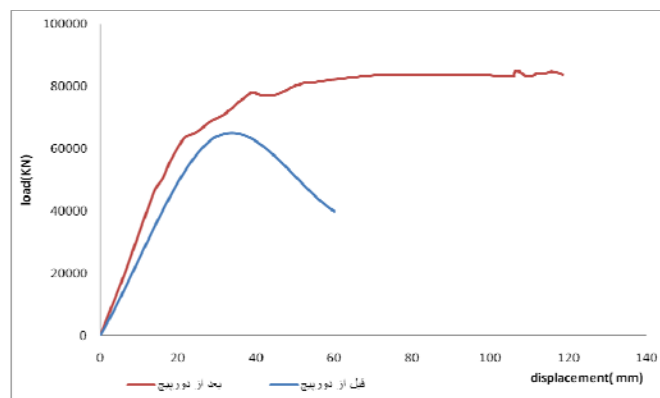
شکل ۵: جزئیات هندسی نمونه های ستون

۱ - Damage initiation for fiber-reinforced composites

قطر ستون ها ۳۰۵ میلی متر بود. این ستون ها بوسیله ۱۴ آرماتور طولی شماره ۴ که نسبت تسلیم طولی ۲/۴۸ درصد را ایجاد می کردند مسلح شده بودند. مقاومت تسلیم اندازه گیری شده برای این میلگرد ها ۳۵۸ MPa بود. محصور شدگی جانبی بوسیله ۹ خاموت به قطر ۳/۵ میلیمتر در فواصل ۸۹ میلیمتر در طول ارتفاع ستون ایجاد شده بود. تنش تسلیم متوسط این خاموت ها ۳۰۱ MPa بود. نوارهای کامپوزیت ساخته شده برای این پروژه دارای ضخامت ۰/۸ میلیمتر بودند. رابطه تنش کرنش نوار کامپوزیت تا شکست ارتجاعی - خطی بود. برای هر دو حالت تقویت فعال و غیر فعال ، ستون ها با ۶ لایه از نوارهای کامپوزیت FRP با ضخامت کلی ۵ میلیمتر در ناحیه مستعد مفصل پلاستیک ستون به عنوان مثال از روی پی تا ۶۳۵ میلیمتری بالای آن ، پیچیده شده بودند. هنگام پیچش نوار حول ستون ، اپوکسی بر سطر آن بکار رفت و لایه های چندگانه نوار برای تشکیل یک دور پیچ کامپوزیت واحد به ضخامت مطلوب به یکدیگر چسبیده بودند. انتخاب اپوکسی برای اطمینان از عمل واحد لایه های چندگانه نوارها بدون لغزش بین لایه ای بود.



شکل ۶- منحنی های بدست آمده از برنامه و کار آزمایشگاهی [8]



شکل ۷- منحنی های بدست آمده قبل و بعد از دورپیچی

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 هیستریزس 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 که در این مدل رفتار بعد از گسیختگی ستون نیز لحاظ شده است.

با مقایسه رفتار منحنی ها قبل و بعد از دورپیچ کردن قسمت مستعد مفصل پلاستیک توسط CFRP به نتایج زیر می رسیم:

۱. پوشش تقویتی CFRP (با ضخامت ۵ میلی متر در قسمت مستعد تشکیل مفصل پلاستیک) باعث بالا بردن ظرفیت خمشی پایه های پل های بتن آرمه به میزان ۳۴٪ شده است .
۲. با توجه به نتایج آزمایش ها می توان دریافت که ورقه های پلیمری مسلح شده کربنی به طور مؤثری در مقاوم سازی ستون های معیوب می توانند به کار روند .
۳. استفاده از الباف پلیمری بطور قابل توجهی مقاومت ، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی ستون ها را بالا می برد و نیز تأثیر بسزایی در جلوگیری از تشکیل مفصل پلاستیک در پای ستون خواهد داشت.
۴. ستون های تقویت شده با FRP تنزل مقاومت کمتری با افزایش چرخه های تغییر مکان تا قبل از شکست دادند . کامپوزیت های FRP برای بهسازی ستون های آسیب دیده بسیار مناسب اند. میزان FRP مورد نیاز و عملکرد آن تحت تأثیر وسعت آسیب می باشد.

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 Assembliesfor 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. 572584.
6. New Zealand National Roads Board, Research Bulletin No. 71, Wellington, New Zealand, 1983.
7. *ABAQUS Analysis User's Manual version 6.6.3*
8. H. Saadatmanesh , M. R. Ehsani and Limin Jin Seismic Strengthening of Circular Bridge Pier Models with Fiber Composites **1996**