بهبود رفتار ستون های بتن آرمه مقاوم سازی شده با ورق های دورپیچ CFRP

محمد کاظم شربتدار[۱]، مهدی عبادی جامخانه[۲]، مسعوداحمدی[۲*]

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان،ایران.

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

m.ahmadi@students.semnan.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از دورپیچ CFRP به صورت گسترده و روز افزونی در پایه پل ها و همچنین ستون ساختمان ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ستون های تقویت شده با این روش شکل پذیری و قابلیت جذب و اتلاف انرژی چشمگیری نسبت به سایر روش ها بخصوص جدارهای فولادی دارند. نقش دورپیچ ها در محصورشدگی جانبی بتن می باشند که می توانند مقاومت فشاری محوری بتن را افزایش دهند و مانع از شکست زود هنگام ستون می شوند. در این مقاله سه مدل ستون دورپیچ کامل، ناحیه میانی، ابتدایی و انتهایی مورد تحلیل بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد که نمونه با دورپیچ کامل نسبت به دو نمونه دیگر دارای سیکل‌های منظم‌تر و بیشتر و سطح زیر منحنی بیشتری می باشد اما بهینه ترین حالت استفاده از دورپیچ میانی می باشد

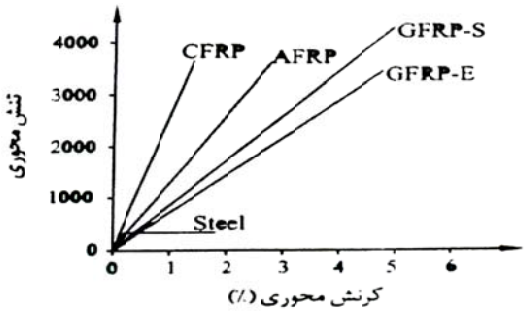
کلمات کلیدی: ستون بتن آرمه، CFRP ، شکل‌پذیری، مقاومت.

۱. مقدمه

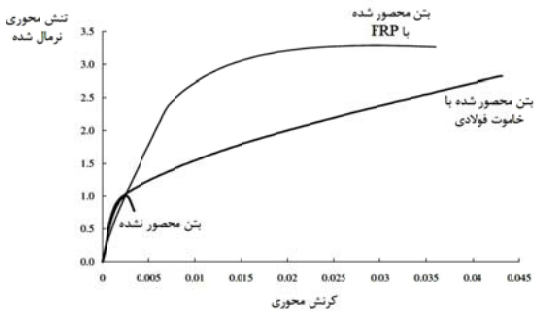
در سال های اخیر استفاده از الیاف های کامپوزیت در صنعت ساخت و ساز، برای مقاوم سازی روبه افزایش بوده و مطالعات گسترده ای در این زمینه انجام شده است [۱-۳]. به طور کلی کامپوزیت ها از دو بخش اصلی که شامل الیاف مقاوم کننده و ماده زمینه تشکیل می شوند. بسیاری از مشخصه های مکانیکی مواد کامپوزیت همچون مقاومت و سختی، به نوع و شیوه قرارگیری الیافشان بستگی دارد. بسته به نوع کاربری ماده مرکب و نیز شیوه ساخت، الیاف مقاوم کننده به صورت رشته های ممتد، منقطع و صفحه های بافته شده به کار گرفته می شود. رشته های ممتد یک سویه، خصوصیات تک محوری را در راستای قراگیری خود ایجاد می کنند. برخلاف الیاف ممتد، شیوه قرارگیری رشته های منقطع، اتفاقی است. این نوع الیاف مقاومت قابل توجهی را در کامپوزیت ها موجب نمی شوند و بیشتر در تولید اجزای غیر باربر مورد استفاده قرار می گیرند. در صفحه های بافته شده نیز، درصد قرارگیری درجه های مختلف با مدل های بافت مناسب تعیین می گردد. جنس الیاف مقاوم کننده متنوع است. عمومی ترین مواد مرکب، الیافی از جنس کربن، آرامید یا شیشه دارند. به دلیل آنکه بسیاری از مواد زمینه مورد استفاده در کامپوزیت ها، پلیمری هستند. به این کامپوزیت ها، پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) گفته می شوند. کامپوزیت های مسلح شده با الیاف کربنی (CFRP)، شیشه ای (GFRP) و آرامیدی (AFRP) بیشترین استفاده را در صنعت ساخت و ساز دارند.

مواد کامپوزیت تحت بار کششی رفتاری کشسان و تقریبا خطی از خود نشان می دهند و این رفتار را تا لحظه گسیختگی حفظ می نمایند. در رفتار کامپوزیت ها نقطه جاری شدن وجود ندارد و شکست این مواد ترد و ناگهانی است. در شکل ۱ نمودار تنش – کرنش کششی الیاف کربنی (CFRP)، شیشه ای (GFRP) و آرامیدی (AFRP) و فولاد نشان داده شده است.

۲. نقش دورپیچهای FRP در محصور شدگی



شکل ۱. نمودار تنش – کرنش کششی الیاف کربنی (**CFRP**)، شیشه ای (**GFRP**) و آرامیدی (**AFRP**) و فولاد [۵]



شکل ۲. منحنی های تنش-کرنش برای بتن محصور شده و نشده [۵]

جدول ۱- مشخصات الیاف پلیمری

مشخصات الیاف پلیمری	
مدول الاستیسیته کششی (MPa)	۲۳۰۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۲۵
ضخامت (mm)	۱/۲
مقاومت کششی (MPa)	۱۰۰۰
کرنش نهایی در کشش (٪)	۱/۸

منحنی تنش - کرنش فشاری بتن پس از نقطه ماکزیمم خود شیب نزولی پیدا می کند که بیانگر کاهش سختی و مقاومت و کاهش پایداری در این محدوده است. با توجه به اهمیت شکل پذیری و جلوگیری از شکست ناگهانی و افزایش اتلاف انرژی، باید این مشکل تا حد ممکن رفع شود [۴].

محصورشدگی جانبی بتن می تواند مقاومت فشاری محوری بتن را افزایش دهد که مبنایی برای مقاوم سازی ستون های بتن آرمه با استفاده از FRP می باشد. چسباندن صفحات FRP به سطح خارجی اعضای سازه های بتن آرمه به یک تکنولوژی متداول در دهه اخیر تبدیل شده است. با رشد سریع این تکنولوژی، بسیاری از موارد مربوط به عملکرد سازه های بتن آرمه تقویت شده با FRP بررسی شده اند. محصور شدگی خارجی بتن با استفاده از FRP به یک روش معمول برای ترمیم ستون ها (به ویژه ستون های دایره ای تبدیل شده است. منحنی های تنش-کرنش برای بتن محصور نشده در مقایسه با بتن محصور شده با خاموت فولادی و FRP در شکل ۲ آورده شده است.

۳. مدلسازی عددی

۱.۳ مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح

در این مطالعه بارگذاری به صورت استاتیکی و سیکلیک است. بنابراین باید از یک مدل رفتاری مناسب برای ستون بتنی و الیاف استفاده شود تا تحت بارهای رفت و برگشتی ، هم در فشار و هم در کشش پاسخ مناسبی بدهند لذا از مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن استفاده میشود . برای مقاوم سازی نیز از الیاف CFRP به عرض های ۷۰ و ۳۵ سانتی متر استفاده شده است. مشخصات الیاف پلیمری استفاده شده، در جدول ۱ آمده است.

۲.۳ بررسی مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن

نرم افزار اجزا محدود مورد استفاده سه نوع مدل متفاوت جهت تحلیل بتن در حالتی که به آن فشار محبوس کننده اعمال می شود ارائه نموده است : بتن ترک خورده ، بتن شکننده و بتن آسیب دیده خمیری. هر کدام از مدلهای رفتاری بالا برای طراحی بتن ساده یا بتن آرمه (مانند دیگر مواد شکننده) در همه نوع سازه ها می توانند درنظر گرفته شوند. در این پژوهش از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک استفاده شده است لذا به توضیحاتی درباره آن پرداخته می شود.

حالت پلاستیک میزان آسیب به بتن یکی از مدلهای ترکیبی است که توسط کاچانوف ارائه شد و سپس توسط رابوتنوف و سایرین تکمیل شد. معادله ترکیبی مواد توسط کمیت اسکالر ایزوتروپیک ، میزان آسیب را نشان می دهد.

$$\sigma = (1-d)D_0^{el} : \left(\varepsilon - \varepsilon^{pl}\right) = D^{el} : \left(\varepsilon - \varepsilon^{pl}\right) \quad (۱)$$

که در این رابطه σ عامل تنش کاچی ، d سنجشگر میزان افت سختی متغیر ، ε تانسور کرنش و D_0^{el} سختی الاستیک اولیه (آسیب ندیده) مواد هستند.

در حالیکه $D^{el} = (1-d)D_0^{el}$ به عنوان تانسور میزان سختی الاستیک افت کرده می باشد. تانسور تنش موثر به شرح زیر تعریف می شود.

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : \left(\varepsilon - \varepsilon^{pl}\right) \quad (۲)$$

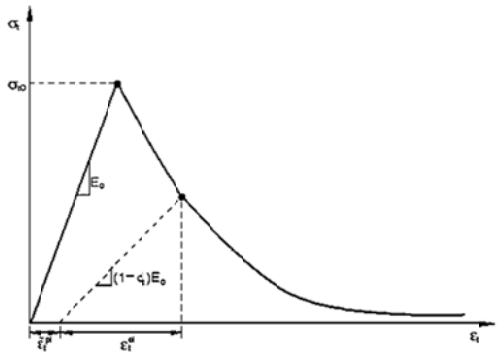
که در این رابطه ε^{pl} کرنش پلاستیک است . بنابراین در نهایت تانسور تنش کاچی وابسته به تانسور تنش موثر $\bar{\sigma}$ و پارامتر اسکالر افت سختی $(1-d)$ به صورت زیر است .

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad (۳)$$

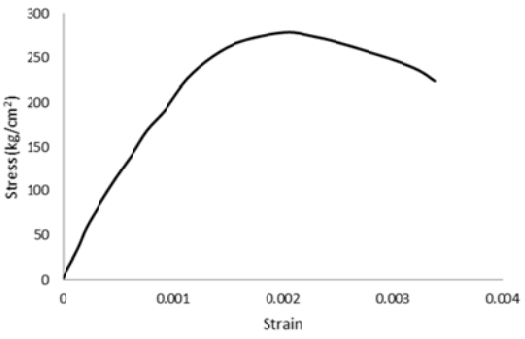
مدل بتن پلاستیک آسیب دیده در این نرم افزار جهت مدل کردن بتن و دیگر مواد شبه شکننده و ترد در تمامی انواع سازه ها (تیر ، خرپا ، پوسته ها و اجسام توپر) تعبیه شده است. این مدل از مفهوم آسیب دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیر خطی مصالح شکننده مانند بتن استفاده می کند. هم چنین این مدل رفتاری قادر به مدلسازی شرایط بارگذاری دلخواه مانند بارگذاری چرخه ای یا همان سیکلی بوده و کاهش سختی الاستیک با در نظرگرفتن کرنش پلاستیک در کشش و فشار توجیه می گردد.

مدل معرفی شده برای بتن در حالت آسیب دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار پلاستیک بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل ، ترک های ناشی از کشش و خردشدگی در قسمت فشاری می باشد. در این مدل فرض می گردد که پاسخ به کشش و فشار تک محوره به وسیله ی معیار خرابی پلاستیک کنترل می شود که در ادامه در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در اثر کشش تک محوره ، منحنی تنش – کرنش تا نقطه ی تنش خرابی σ_{t0} به شکل خطی تغییر می کند که این تنش متقارن با شروع و گسترش ترک های ریز در بتن است. پس از عبور از نقطه مذکور ، خرابی ها به شکل ترکهای قابل مشاهده در می آیند که به صورت منحنی نرم شوندگی در فضای تنش – کرنش نمایش داده می شوند.

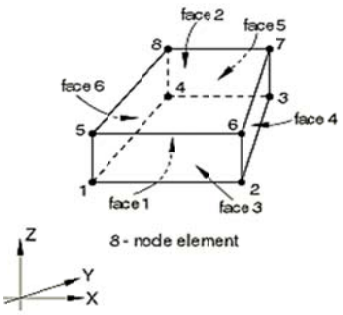
تحت فشار تک محوره ، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدن σ_{c0} به صورت الاستیک خواهد بود و در ناحیه پلاستیک رفتار عموما به وسیله منحنی سخت شوندگی بیان میشود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی فشاری σ_{cu} منحنی ها به صورت منحنی نرم شوندگی در می آیند . این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی ، خصوصیات اصلی بتن و سایر مواد ترد شکن مانند آجر را برآورده می سازد. البته در بارگذاریهای دوره ای ، رفتارهای کاهندگی بسیار پیچیده می شوند که شامل باز و بسته شدن ترکهای مویی که قبلا تشکیل شده اند و نیز اندرکنش آنها با یکدیگر می باشد. بطور تجربی مشاهده شده است که که با عوض شدن جهت بارگذاری به سختی الاستیک مقداری اضافه میشود که این اثر به عنوان تاثیر یک سویه شناخته می شود و یکی از خصوصیات مهم رفتاری مصالح ترد مثل آجر و بتن در حالت بارگذاری رفت و برگشت می باشد.



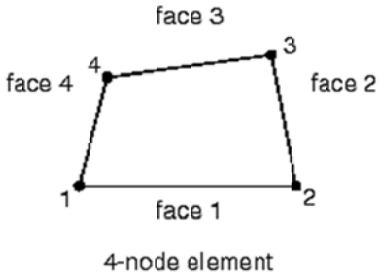
شکل ۳- منحنی تنش – کرنش کششی در مدل بتن آسیب دیده پلاستیک



شکل ۴- منحنی تنش – کرنش فشاری در مدل بتن آسیب دیده پلاستیک



شکل ۵- المان solid مورد استفاده برای ستون بتنی



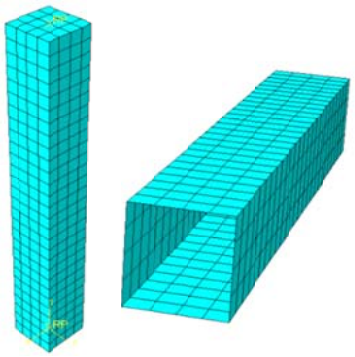
شکل ۶- المان پوسته ای مورد استفاده برای الیاف نواری پلیمری

اثر این رفتار زمانی نمود بیشتری پیدا می کند که بارگذاری از حالت کششی به فشاری تبدیل شود که این امر سبب بسته شدن ترک ها و بازیابی سختی فشاری می گردد.

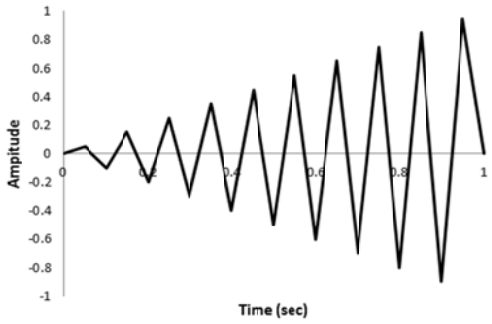
۳.۳ المانهای به کار رفته در مدل عددی

در این مقاله برای مدلسازی ، از ۲ المان مختلف برای ستون بتنی و الیاف پلیمری استفاده شده است. ستون های بتنی با استفاده از المان شش وجهی Solid (شکل ۵، مش بندی شدند . این المان از نوع پیوسته و سه بعدی با هشت گره است که هر کدام از گره های آن دارای ۳ درجه آزادی در امتداد محورهای اصلی هستند و قابلیت پذیرش هر نوع بار جرمی ، دورانی و همچنین بارهای سطحی و خطی را با شدتهای مختلف دارند. جهت توزیع نیروها ، تغییرمکانها و سایر پارامترها در این المان از توابع شکل به دست آمده از روش های انتگرالگیری کاهش یافته استفاده می شود.

برای مش بندی نوارهای CFRP از یکی از انواع المانهای پوسته ای استفاده شد. این المان، یک المان ۴ گره ای و سه بعدی با ضخامت بسیار کم است که در هر گره خود دارای ۶ درجه آزادی کامل است و توانایی در نظرگرفتن کرنشهای غیرخطی را نیز دارد (شکل ۶). جهت توزیع نیروها، تغییرمکانها و سایر پارامترهای مورد نیاز در این المان هم از توابع شکل حاصل از روش های انتگرالگیری کاهش یافته استفاده می شود. لازم به ذکر است که در شبکه بندی مدل المان محدود مدل عددی حاضر در حالات بدون الیاف، با پوشش کامل الیاف، پوشش میانی ستون با الیاف و ابتدا و انتهای آن بترتیب ۹۲۰، ۱۳۳۰، ۱۱۴۴ و ۱۱۴۴ المان حجمی و ۳۰ المان پوسته ای در واحد طول برای CFRP بکار رفته است. در مدل المان محدود می توان تماس میان اعضا را مدل نمود. در شکل ۷ مدل المان محدود نمونه نشان داده شده است.



شکل ۷- مدل عددی مش بندی شده



شکل ۸- پروتکل بارگذاری نمونه‌ها

۴. نحوه اعمال بارگذاری نمونه‌ها در نرم‌افزار

نمونه‌ها تحت بار جانبی استاتیکی افزایش یابنده، از طریق اعمال تغییر مکان جانبی رفت و برگشتی (شکل ۸) به انتهای نمونه و با فشاری محوری افزایشی قرار گرفته‌اند.

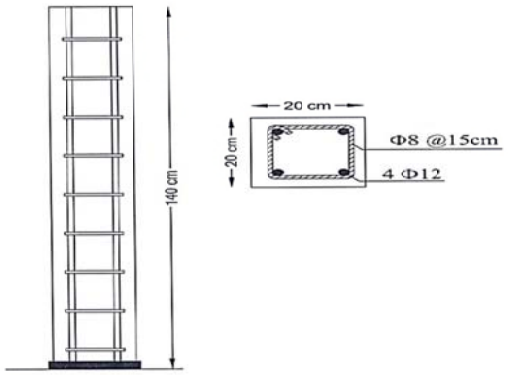
۵. صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی

صحت مدل اجزاء محدود با استفاده از نمونه ستون های آزمایشگاهی، کنترل گردیده است[۶]. مشخصات ابعادی و آرماتور گذاری ستون های بتن آرمه در شکل ۹. نشان داده شده است، این ستون ها تحت بار محوری مورد آزمایش قرار گرفته اند و صحت سنجی برای سه حالت ستون بتن آرمه بدون ورق های CFRP و با ورق های CFRP به صورت الف) ۷۰ سانتی متر میانی، ب) ۳۵ سانتیمتر بالا و پایین انجام شده است.

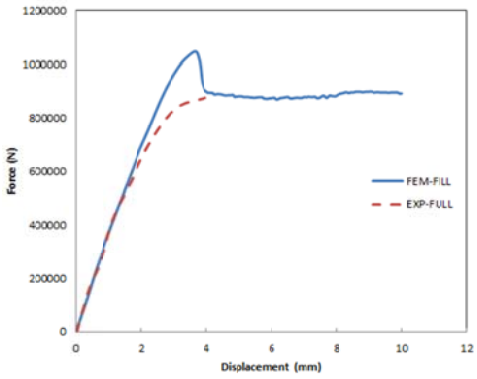
در شکل های(۱۰-۱۲) منحنی های پوش نیرو- تغییرمکان قائم که بر اساس مدل تحلیلی حاصل گشته است، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد. اختلاف جزئی به علت عدم دقت مدل رفتاری بتن و فولاد نسبت به واقعیت می‌باشد. نقاط اکسترمم محلی که در منحنی مشاهده می‌گردند در ارتباط با ترک خوردگی بتن می‌باشد.

۶. مدلهای اجزا محدود

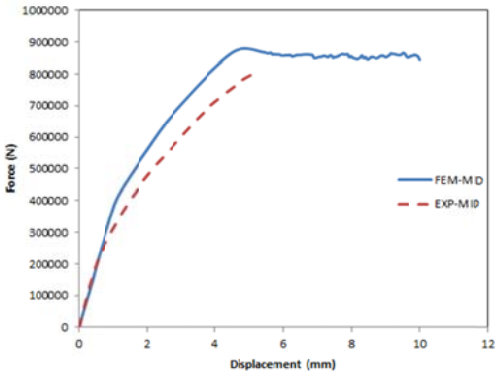
در این مقاله سه مدل ستون دورپیچ کامل، ناحیه میانی، ابتدایی و انتهایی مورد تحلیل بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است تا میزان جذب انرژی آنها مشخص شود. برای اعمال بار ها از یک صفحه ی صلب با ابعاد ۲۰*۲۰ سانتی متر روی ستون استفاده شده است تا بار های قائم و جانبی به آن اعمال شوند. ابتدا بار فشاری قائم به میزان ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع به صورت تدریجی وارد شد و پس از تصدیق نتایج با نتایج آزمایش بارگذاری بعدی بصورتی است که بار فشاری ثابت می ماند و تغییر مکان جانبی ۵ سانتی متر بصورت رفت و برگشتی به سازه وارد می شود برای مقاوم سازی از الیاف با عرض ۳۵ و ۷۰ سانتی متر به شکلهای مختلف همانند مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصله که



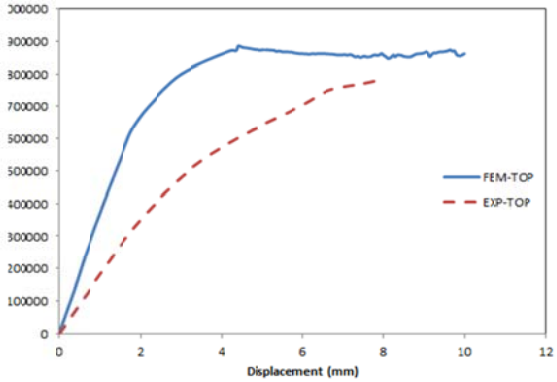
شکل ۹. مشخصات نمونه مورد استفاده برای صحت سنجی نتایج



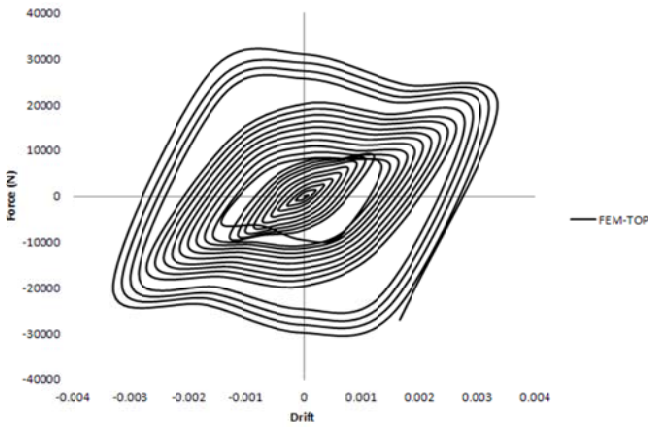
شکل ۱۰- مقایسه منحنی اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی با دورپیچ کامل



شکل ۱۱- مقایسه منحنی اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی با دورپیچ میانی

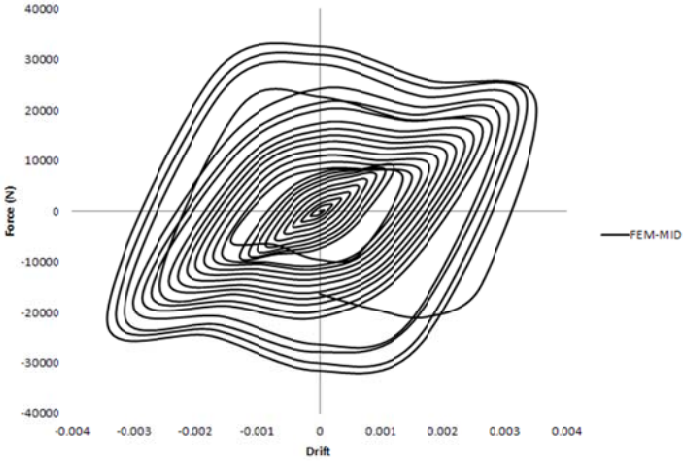


شکل ۱۲- مقایسه منحنی اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی با دورپیچ ابتدایی و انتهایی

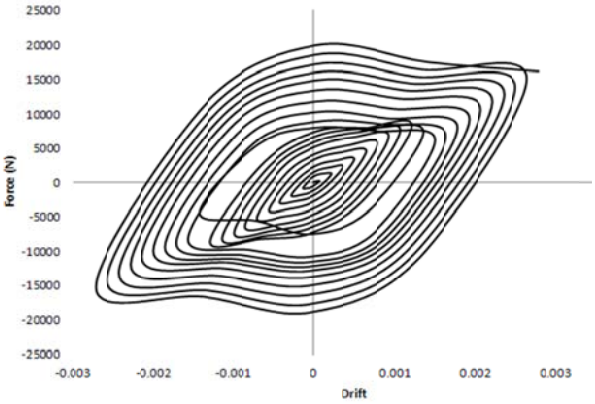


شکل ۱۳- مقایسه منحنی اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی با

دورپیچ کامل



شکل ۱۴- مقایسه منحنی اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی با دورپیچ میانی



شکل ۱۵- مقایسه منحنی اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی با دورپیچ ابتدا و انتهایی

نمودارهای هیسترزیس هستند رسم و با یکدیگر مقایسه شده اند. در شکلهای (۱۳- ۱۵) منحنی های هیسترزیس نمونه های دورپیچ کامل، میانی و ابتدایی و انتهایی به ترتیب رسم شده است.

۷. مقایسه منحنی‌های هیسترزیس در نمونه‌ها

با مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای هیسترزیس نمونه‌ها مشاهده می شود که نمونه با دورپیچ کامل نسبت به دو نمونه دیگر تا درصد دریفت حدود ۰/۲ درصد دارای سیکل‌های منظم‌تر و بیشتر و سطح زیر منحنی بیشتری می باشد که نشانه شکل‌پذیرتر بودن آن است. همچنین مقاومت نهایی آن حدود ۳۰ کیلونیوتن می‌باشد که تقریبا برابر با مقاومت نهایی نسبت به نمونه‌های دورپیچ میانی است. مقاومت نهایی نمونه دورپیچ میانی نیز در حدود ۲۰ کیلونیوتن می باشد. از منحنی های چرخه‌ای هیسترزیس نمونه‌ها مشخص است که سختی نمونه با دورپیچ کامل نسبت به دو نمونه دیگر افزایش بیشتری داشته است.

۸. نتیجه گیری

در این مقاله سه مدل ستون دورپیچ کامل، ناحیه میانی، ابتدایی و انتهایی مورد تحلیل قرار گرفته است تا میزان جذب انرژی آنها مشخص شود. برای اعمال بار ها از یک صفحه ی صلب با ابعاد ۲۰*۲۰ سانتی متر روی ستون استفاده شده است تا بار های قائم و جانبی به آن اعمال شوند. نتایج بدست آمده از منحنی های حاصل از تحلیل نشان داد که استفاده از دورپیچ کامل بیشترین افزایش در مقاومت و سختی را نمونه ها ایجاد می کند اما بهینه ترین حالت استفاده از دورپیچ میانی می باشد، زیرا نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد که این دو نمونه در مقاومت و سختی تفاوت زیادی نداشته اند و از طرفی میزان مصرف دورپیچ در حالت میانی ۳۰ درصد نسبت دورپیچ کامل کمتر است.

۹. مراجع

[1] Rochette, P., Labossière P. (2000). “Axial testing of rectangular column models confined with composites”. Composites for Construction (ASCE), Vol. 4, pp. 129–36.

[2] Xiao, Y., Wu. H. (2000). “Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets”. Materials in Civil Engineering, Vol. 12, pp.139–146.

[3] Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K., Taerwe, L. (2005). “Axial load behavior of largescale columns confined with fiber-reinforced polymer composites”. ACI Structural Journal, Vol. 102, pp. 258–267.

[4] Saafi, M., Toutanji, H., Li, Z. (1999). “Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes”. ACI Materials Journal, Vol. 96, pp. 500-509.

[5] Bank, L.C. (2006). “Composites for Construction - Structural Design with FRP Materials,” John Wiley & Sons, Inc.

[۶] میرزا گل تبار روشن، ع.، حسین نتاج، ع. (۱۳۸۹) ” بررسی رفتار ستون های بتن آرمه تقویت شده با دورپیچ CFRP تحت اثر نیروی فشاری“ ، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران.