



بهبود اثر محصور‌کنندگی FRP بر ستون‌های بتن مسلح غیردایروی توسط اصلاح سطح مقطع ستون

محمد حاج صادقی^۱، امیر شاه‌محمدی^۲، علیرضا جهانشاهی^۳

۱، ۲، ۳ - مهندس مشاور شرکت سازه پویا

:

hajsadeghi_civil@yahoo.com

خلاصه

در طی سالهای اخیر، موضوع تقویت و بهسازی سازه‌ها به طور وسیعی در جوامع علمی و مهندسی مطرح گردیده است. در این رابطه، با توجه به خواسته‌ها از یک سو و نوع سازه، امکانات و شرایط از سوی دیگر، روشهای متنوعی توسط مهندسين به منظور تقویت سازه پیشنهاد می‌شود. در حال حاضر یکی از پرکاربردترین روش‌های مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح استفاده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف (FRP) می‌باشد. دورپیچ کردن ستون‌های بتن مسلح غیردایروی با FRP، سبب ایجاد محصورشدگی غیریکنواخت مقطع شده که تأثیر آن در مقایسه با محصورشدگی یکنواخت به مراتب کمتر است. جهت باز توزیع فشار جانبی ناشی از دورپیچ FRP و رسیدن به محصورشدگی یکنواخت و مؤثرتر، اصلاح سطح مقطع می‌تواند به عنوان راه کاری مناسب در رابطه با ستون‌های چهارگوش مطرح شود. در این روش با اجرای پوششی خارجی از جنس بتن و تغییر شکل سطح مقطع به شکل دلخواه، مقاطع چهارگوش به مقاطع دایروی و بیضوی تبدیل می‌شوند. مقاله حاضر به بررسی تأثیر این اصلاح، با استفاده از تحلیل عددی به شیوه المان محدود غیرخطی سه بعدی اختصاص داشته که مدل‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار ANSYS صورت گرفته است. در این مقاله به بررسی این اصلاح بر روی ۶ نمونه ستون بتن مسلح با مقاطع چهارگوشه پرداخته شده که صحت این مدل‌ها توسط نتایج آزمایشگاهی به اثبات رسیده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که اصلاح سطح مقطع، تأثیر به‌سزایی در ظرفیت باربری ستون دارد.

کلمات کلیدی: محصور‌کنندگی FRP، اصلاح سطح مقطع، ستون‌های بتنی غیردایروی، المان محدود.

۱. مقدمه

تحقیقات و بررسی‌ها در مورد وضعیت اجرای ساختمان‌های بتن مسلح در کشور نشان می‌دهد که بسیاری از ساختمان‌های بتنی موجود در مقابل زلزله شدیداً آسیب‌پذیرند. ستون‌ها نیز به‌عنوان عضوی مهم در این سازه‌ها از این حقیقت مستثنی نیستند. در نخستین روش‌های بهسازی ستون‌ها، پوشش‌های فولادی و یا بتن مسلح به منظور محصور نمودن ستون استفاده می‌گردید. با وجود آن‌که این روش‌ها علاوه بر افزایش مقاومت فشاری و برشی ستون، سبب بهبود شکل‌پذیری آن می‌شود، وجود معایب متعددی، سبب محدودیت در کاربرد آن‌ها می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به وزن بالا و قابلیت خوردگی، هزینه‌های زیاد در مراحل نصب و نگهداری برای پوشش‌های فولادی و افزایش زیاد بار مرده و محدودیت‌های معماری برای پوشش‌های بتن مسلح اشاره کرد.

با پیدایش پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف یا همان کامپوزیت‌های FRP و گسترش استفاده از آن در مقام‌سازی و ترمیم اعضاء از جمله ستون‌ها، جهش قابل ملاحظه‌ای در روش‌های بهسازی سازه‌ها به وجود آمد. این جهش مرهون ویژگی‌ها و مزایای این ماده مانند مقاومت کششی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و مواد شیمیایی، مقاومت در برابر سایش و خستگی و وزن پایین آن می‌شد. از دیگر مزایای کاربرد FRP می‌توان به راحتی در نصب و اجراء، زمان کوتاه اجراء و تأثیر ناچیز آن بر هندسه عضو اشاره کرد.

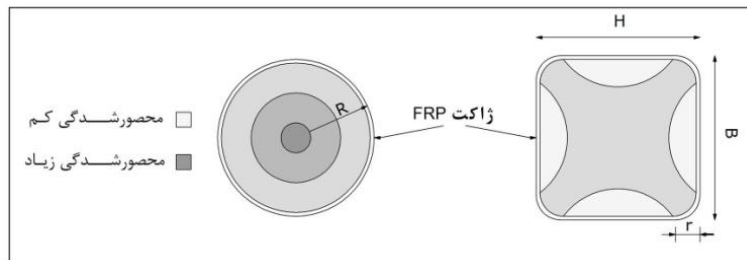
مقاوم‌سازی اعضای فشاری، با دورپیچ کردن پیرامون ستون با صفحات FRP به نحوی که جهت فیبرهای آن در جهت حلقه‌های دورپیچ باشد صورت می‌گیرد. این امر علاوه بر افزایش مشخصات باربری، در محافظت ستون‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی نیز مؤثر است.

با توجه به اثر پواسون، کرنش طولی بتن تحت فشار سبب ایجاد کرنش جانبی در مقطع عضو بتنی شده و با ایجاد ترک‌های داخلی پیش‌رونده کرنش جانبی عضو به سرعت افزایش می‌یابد. دورپیچ نمودن ستون سبب ایجاد نیروی کششی در اعضای محصورکننده و در نتیجه اعمال فشار جانبی به هسته بتنی می‌شود. محصورشدگی ستون، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقدار و نحوه توزیع فشار جانبی اعمال شده به هسته بتنی، با توجه به سطح مقطع ستون متفاوت است. مطابق این شکل، در مقطع دایروی تنش محصورکننده جانبی به طور یکنواخت در مقطع ستون توزیع می‌شود؛ در حالی که در مقاطع چهارگوشه، توزیع این فشار غیریکنواخت است. در این مقاطع گوشه‌ها از دو جهت تحت فشار محصورکننده قرار گرفته و از این رو مقدار تنش در این نواحی بیش از نواحی دیگر است.

یکی از عواملی که در محصورشدگی مقاطع چهارگوشه مؤثر است، مقدار شعاع گردشدگی گوشه‌ها می‌باشد؛ به طوری که با افزایش شعاع گردشدگی، بر کارایی و شدت محصورشدگی افزوده می‌شود. اما باید به این نکته توجه کرد که طول پوشش بتن (Cover) عاملی محدودکننده در افزایش شعاع گردشدگی است. تأثیر شعاع گردشدگی تا حدی است که در صورت عدم گردشدگی گوشه‌ها، تأثیر دورپیچ FRP در بهبود باربری ستون به صفر می‌رسد [۱].

با توجه به کارایی کم محصورشدگی در ستون‌های با مقاطع چهارگوش نسبت به ستون‌های دایروی و بیضوی از یک سو، و محدودیت در افزایش شعاع گردشدگی از سوی دیگر، اصلاح سطح مقطع ستون می‌تواند به عنوان راه کاری مناسب جهت افزایش کارایی دورپیچ FRP در نظر گرفته شود. برای این منظور ابتدا به اجرای پوششی بتنی پیرامون ستون چهارگوش اقدام شده و پس از اصلاح سطح مقطع، به اشکال دایروی و یا بیضوی اقدام به دورپیچ کردن پیرامون ستون می‌شود. اصلاح سطح مقطع به یکی از اشکال دایروی و یا بیضوی، با توجه به ملاحظات معماری و میزان افزایش باربری موردنیاز انجام می‌شود. در این تحقیق تمامی مشخصات بتن هسته و پوشش خارجی یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ - توزیع فشار محصورکننده در مقاطع دایروی و چهارگوشه

به منظور عملکرد هماهنگ هسته و پوشش خارجی بتنی، مضرس کردن سطوح اتصال و استفاده از چسب بتن در محل تماس توصیه می‌شود. تأثیر اصلاح سطح مقطع بر روی نمونه‌های بتن غیرمسلح با استفاده از بتن منبسط‌شونده توسط کریس پنتلیدس و همکارانش [۲] بررسی شده است که نتایج حاصل از آن، افزایش قابل توجه در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این مقاله به بررسی میزان تأثیر اصلاح سطح مقطع با استفاده از بتن معمولی بر محصورشدگی ستون‌های بتن مسلح با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده است که برای این منظور از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. صحت درستی مدل‌های ارائه شده با مقایسه آن با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی به اثبات رسیده است [۲].

۲. مدل‌سازی

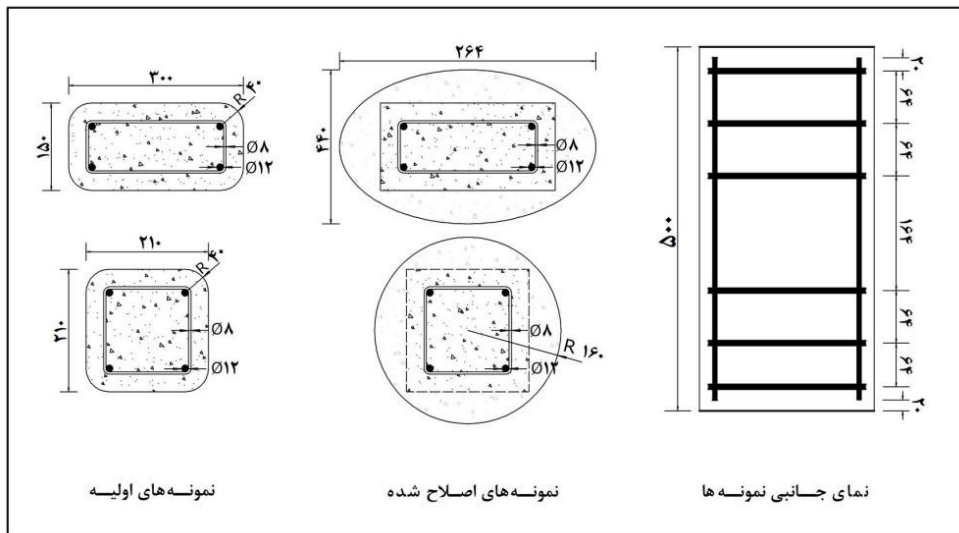
با پیدایش کامپیوتر و پیشرفت بسیار سریع نرم‌افزارهای کامپیوتری مطالعات به روش اجزای محدود سریعاً گسترش یافتند و روزه‌روز کامل‌تر م جامع‌تر شدند. در میان نرم‌افزارهای عمومی اجزاء محدود، نرم‌افزار ANSYS از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده که دارای قابلیت‌های بالایی می‌باشد. این نرم‌افزار که توسط جمعی دانشگاهی در شرکت Swanson به عنوان یکی از پیشگامان نرم‌افزارهای اجزاء محدود طراحی شد، اولین بار در سال ۱۹۷۱ در اختیار عموم قرار گرفت و با قدمتی حدود ۳۳ سال تکامل قابل توجهی یافته است. روش حل عددی که اجزاء محدود زیر مجموعه آن می‌باشد، جزء یکی از پرکارترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. در روش اجزاء محدود غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و یا به کمک کمینه نمودن انرژی پتانسیل سیستم حل می‌شوند [۳].

ذکر نکات زیر در رابطه با مدل‌سازی و انجام تحلیل غیرخطی ضروری به نظر می‌رسد.

۱. در مدل‌سازی فرض شده که بین هسته و پوشش خارجی بتنی چسبندگی کامل بوده و از لغزش بین این سطوح صرف‌نظر شده است.
۲. به دلیل افزایش دقت، شبکه‌بندی اجزاء محدود در میانه ستون که محل استخراج نتایج است، تا حد امکان ریز شده است.
۳. بارگذاری نمونه‌ها از نوع کنترل تغییر مکان است.
۴. به منظور جلوگیری از واگرایی تحلیل، افزایش تعداد زیربازه‌ها، گام‌های بارگذاری و تکرارهای مورد نیاز جهت ارضای تعادل در هر زیر بار و همچنین فعال نمودن روش Line Search توصیه می‌شود.
۵. در صورت واگرایی حل در مراحل انتهایی بارگذاری، معیار همگرایی نیرو از مقدار پیش فرض $0.05/0.05$ به $0.025/0.025$ در صورت لزوم معیار همگرایی تغییر مکان از مقدار $0.05/0.05$ به $0.025/0.025$ افزایش داده می‌شوند. البته می‌بایست تا حد امکان سعی شود که با افزایش تعداد زیربازه‌ها و گام‌های بارگذاری از واگرایی حل جلوگیری شود.

۱.۲ نمونه‌ها

در این تحقیق ۶ نمونه اولیه و ۶ نمونه اصلاح‌شده بررسی شده است که مشخصات آن‌ها در شکل زیر آمده است. سیستم واحد مورد استفاده در این تحقیق نیوتن-میلیمتر است. در اسامی نمونه‌ها n، تعداد لایه‌های دورپیچ FRP است که تعداد لایه‌های نمونه‌ها ۱، ۲ و ۳ می‌باشد و ضخامت هر لایه 0.165 است.



شکل ۲ - مشخصات نمونه‌ها

جدول ۱ - مشخصات نمونه‌های اولیه

نمونه‌ها	سطح مقطع	ابعاد	آرماتور طولی	آرماتور عرضی	شعاع گردشگی
S-n	مربع	۲۱۰*۲۱۰*۵۰۰	۴-۱۲ mm	۸ mm @ ۱۶۴ mm	۴۰
R-n	مستطیل	۱۵۰*۳۰۰*۵۰۰	۴-۱۲ mm	۸ mm @ ۱۶۴ mm	۴۰

جدول ۲ - مشخصات نمونه‌های اصلاح‌شده

نمونه‌ها	سطح مقطع	قطر بزرگ	قطر کوچک	ارتفاع	آرماتور طولی	آرماتور عرضی
C-n	دایره	۳۲۰	۳۲۰	۵۰۰	۴-۱۲ mm	۸ mm @ ۱۶۴ mm
E-n	بیضی	۴۴۰	۲۶۴	۵۰۰	۴-۱۲ mm	۸ mm @ ۱۶۴ mm



در نرم‌افزارهای المان محدود، مدل هندسی به لحاظ تحلیلی ارزشی ندارد (منظور از مدل هندسی، مدل حاوی نقطه، خط، سطح و حجم است) بلکه در این نرم‌افزارها اساس حل از روش تقسیم مدل به المان‌ها انجام می‌شود. با توجه به ویژگی‌ها و رفتار قابل انتظار، از المان‌های زیر در مدل‌سازی استفاده شده است.

- برای مدل کردن بتن SOLID۶۵، المان سازه‌ای. این المان دارای خاصیت ترک خوردگی و خردشدگی است.
- برای مدل کردن آرماتورها LINK۸، المان میله‌ای.
- جهت مدل کردن صفحات صلب در محل تکیه‌گاه SOLID۴۵، المان سازه‌ای.
- جهت مدل کردن صفحات کامپوزیت SHELL۴۱، المان لایه‌ای-سازه‌ای. این المان دارای گزینه‌ای جهت فعال کردن خاصیت عدم تحمل فشار است (Wrinkling) [۴].

۳.۲ خواص مواد

یکی از مراحل مهم در مدل‌سازی ستون‌های بتن مسلح با نرم‌افزار ANSYS، تعیین خصوصیات مواد مختلف به کار رفته نظیر بتن، فولاد و FRP است. این خصوصیات می‌تواند شامل خواص مکانیکی و رفتار ماده مورد نظر باشد. به علت وجود پارامترهای متعددی مؤثر در تعریف رفتار هر یک از مواد مورد استفاده، در این بخش اختصاصات رفتاری هر یک به اختصار توضیح داده می‌شود.

۱.۳.۲ بتن

مشخصات بتن برای تمامی نمونه‌ها، طبق جدول زیر می‌باشد:

جدول ۳ - مشخصات بتن

ضریب پواسون	مقاومت فشاری (Mpa)
۰/۳	۲۶/۴

در نرم‌افزار ANSYS دو راه کار متداول جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن وجود دارد:

- ۱- وارد کردن منحنی تنش-کرنش بتن (Multilinear isotropic hardening)
- ۲- استفاده از معیار تسلیم دراگر-پراگر (Drucker-Prager)

نادرستی مدل‌سازی محصورشدگی بتن به روش وارد کردن منحنی تنش-کرنش بتن محصور، زمانی که محصورشدگی حاصل از کامپوزیت FRP مدل شود به اثبات رسیده است [۴]. سه پارامتر به عنوان مقادیر ورودی معیار تسلیم دراگر-پراگر وجود دارد [۵]:

- ۱- مقدار چسبندگی ماده که بزرگتر از صفر بوده و دارای واحد نیرو بر سطح است. (C)
- ۲- زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه. (θ)
- ۳- زاویه اتساع که از صفر تا زاویه اصطکاک داخلی متغیر است که در این تحقیق مقدار صفر برای آن در نظر گرفته شده است. (ϕ)

جدول ۴ - پارامترهای معیار دراگر-پراگر

نمونه‌ها	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی
مربعی-مستطیلی	۹/۰۵	۱۵°
دایروی-بیضوی	۷	۳۰°



همچنین برای تعیین نحوه شکست بتن از معیار ویلیام-وارنک استفاده شده است. این معیار شکست، قادر به پیش‌بینی شکست بتن با معیارهای خردشدگی و ترک خوردگی در المان بتن آرمه می‌باشد [۴].

۲.۳.۲ آرماتورها

برای مدل‌سازی رفتار آرماتورها از رفتار دوخطی ایزوتروپیک (Bilinear isotropic) استفاده شده است.

جدول ۵ - مشخصات آرماتورها

نوع میلگرد	قطر	تنش تسلیم (Mpa)	کرنش تسلیم
Φ۸	۸	۴۷۶	۰/۰۰۲۴
Φ۱۲	۱۲	۳۳۹	۰/۰۰۱۷

۳.۳.۲ کامپوزیت FRP

رفتار مواد مرکب در مدل مورد مطالعه به صورت خطی و ارتوتروپیک تا لحظه خرابی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر مدول الاستیسیته و مدول برشی در سه جهت متعامد در مدل رفتاری ارتوتروپیک خطی (Linear orthotropic) در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۶ - مشخصات مکانیکی FRP بر حسب مگاپاسکال

Ex	Ey	Ez	Gxy	Gyz	Gxz	ε _{fu}
۲۳۰	۱۲	۱۲	۷	۶	۶	۰/۰۱۵

۴.۳.۲ صفحات بارگذاری

برای مدل‌سازی رفتار صفحات بارگذاری از رفتار خطی (Linear isotropic) استفاده شده است. برای کاهش تغییر شکل‌های این صفحات و تأمین صلبیت لازم، همچنین سازگاری بهتر آن با بتن، مشخصات زیر برای آن در نظر گرفته شده است.

جدول ۷ - مشخصات مکانیکی صفحات بارگذاری

ضخامت	مدول الاستیسیته (Mpa)	ضریب پواسون
۶۰	۲/۰۰۰/۰۰۰	۰/۳

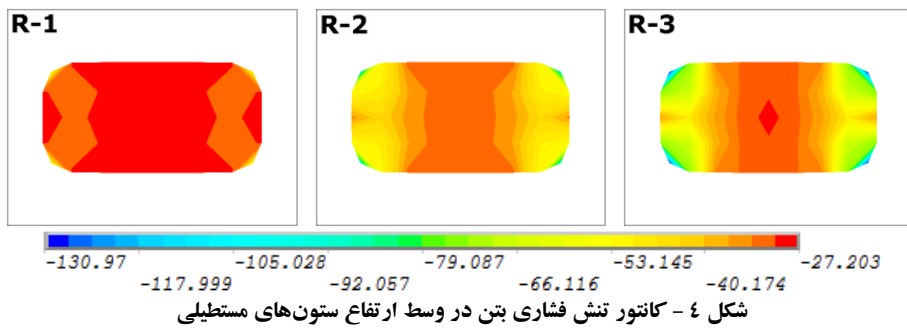
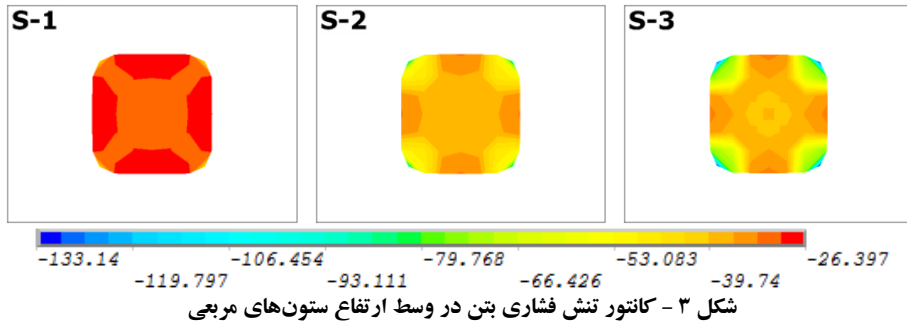
۳. مد خرابی نمونه‌ها

خرابی تمامی مدل‌ها بر اثر گسیختگی صفحات FRP در وسط ارتفاع ستون یا در نزدیکی آن اتفاق می‌افتد. در نمونه‌های چهارگوش به علت فقدان سختی مناسب صفحات FRP در طول اضلاع، در وسط اضلاع اتساع قابل ملاحظه‌ای در بتن رخ می‌دهد. به همین علت ماکزیمم کرنش FRP در این نواحی رخ می‌دهد؛ در حالی که در نمونه‌های اصلاح‌شده دایروی با توجه به تقارن، توزیع کرنش در وسط ارتفاع یکنواخت است. کرنش ماکزیمم در نمونه‌های بیضوی در نواحی با انحنای کمتر رخ می‌دهد و هر چه قدر نسبت دو قطر بیضوی به یک نزدیک شود از تفاوت کرنش‌های پیرامون کاسه می‌شود.

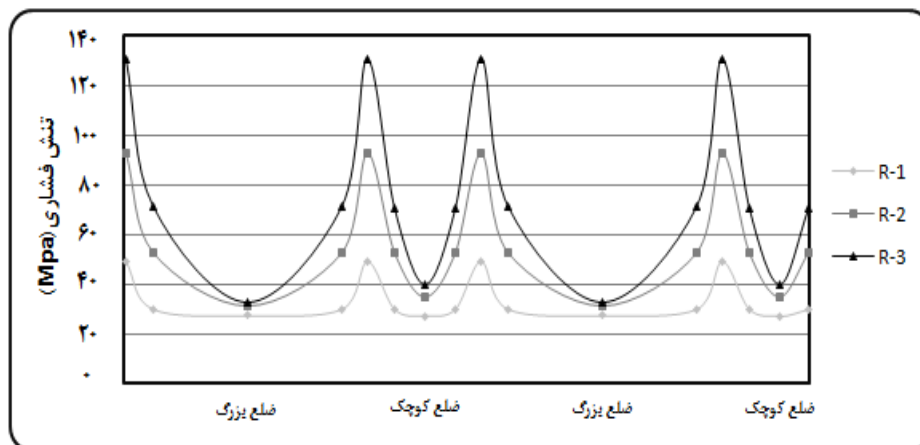
در نواحی تیز گوشه نمونه‌های چهارگوش و بیضوی تمرکز تنش زیادی وجود دارد که مقدار آن رابطه مستقیم با میزان زاویه این نواحی دارد. در این نواحی بیشترین نیروی تماسی مشاهده می‌شود که حاصل از تنش‌های کششی موجود در فیبرهای دورپیچ FRP است. با نتایج حاصل از یافته‌های آزمایشگاهی و اجزای محدود، می‌توان گفت گسیختگی FRP در گوشه‌ها، به علت نیروی تماسی زیاد و تمرکز تنش کششی در صفحات FRP رخ می‌دهد.

۴. نتایج تحلیل اجزای محدود

در اشکال ۳ و ۴ کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع نمونه‌های اولیه، برای ۶ نمونه اولیه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود محصورشدگی این مقاطع غیریکنواخت بوده که با افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ بر میزان این ناهمگونی افزوده می‌شود.

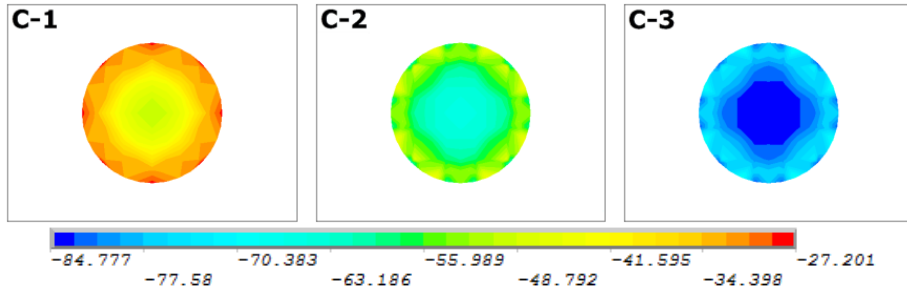


تنش‌های فشاری پیرامون نمونه‌های مستطیلی در شکل ۵ شکل ۵ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی آن‌ها، تنش در گوشه‌ها بالا و در طول اضلاع کم می‌باشد که نشان‌دهنده تفاوت در میزان محصورشدگی این نواحی و تمرکز تنش در گوشه‌ها است. هر چه تعداد لایه‌های دورپیچ افزایش یابد، بر میزان تمرکز تنش در گوشه‌ها افزوده می‌شود؛ در حالی که به دلیل فقدان سختی خمشی صفحات FRP، تنش‌های محصورکنندگی در کناره‌ها افزایش چندانی نداشته و به تبع، تنش‌های فشاری بتن در این نواحی بر خلاف گوشه‌ها تغییر چندانی ندارد.

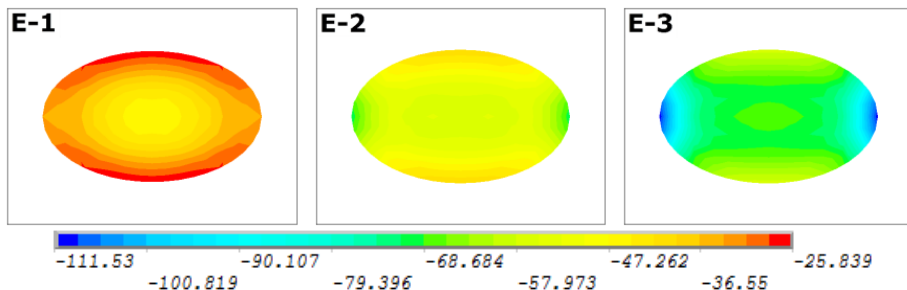


شکل ۵ - توزیع تنش فشاری پیرامون وسط ارتفاع ستون‌های مستطیلی

کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون، برای ۶ نمونه اصلاح شده در اشکال ۶ و ۷ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که پس از این اصلاح، محصورشدگی بتن به مراتب یکنواخت تر از نمونه های اولیه شده و تفاوت بین حداقل و حداکثر تنش فشاری به مراتب کاهش یافته است. تنش های فشاری حداقل و حداکثر و همچنین نسبت آن ها برای تمامی نمونه ها در جداول ۸ و ۹ آورده شده است.



شکل ۶ - کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون های دایروی



شکل ۷ - کانتور تنش فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون های بیضوی

جدول ۸ - تنش های فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون های اولیه

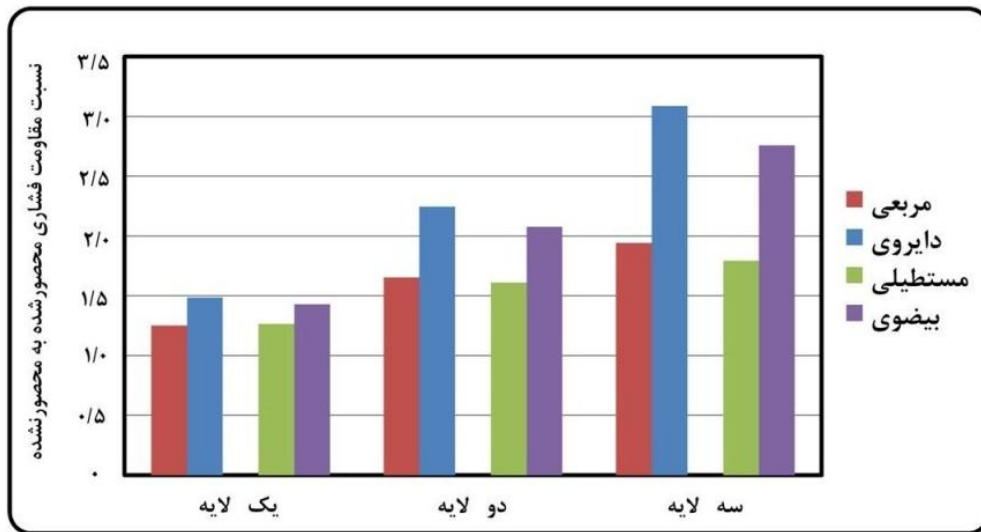
نمونه ها	تنش حداکثر	تنش حداقل	نسبت تنش ها	نمونه ها	تنش حداکثر	تنش حداقل	نسبت تنش ها
S-۱	۴۳/۸	۲۶/۳۹۷	۱/۶۶	R-۱	۴۹/۱۸۴	۲۷/۲۰۳	۱/۸۱
S-۲	۹۰/۳۷۴	۳۲/۷	۲/۷۶	R-۲	۹۲/۶۶۳	۳۰/۹۷۴	۲/۹۹
S-۳	۱۳۳/۱۴	۳۵/۳۰۹	۳/۷۷	R-۳	۱۳۰/۹۷	۲۹/۳	۴/۴۷

جدول ۹ - تنش های فشاری بتن در وسط ارتفاع ستون های اصلاح شده

نمونه ها	تنش حداکثر	تنش حداقل	نسبت تنش ها	نمونه ها	تنش حداکثر	تنش حداقل	نسبت تنش ها
C-۱	۴۹/۳۸۸	۲۷/۲۰۱	۱/۸۲	E-۱	۴۶/۶۲	۲۵/۸۳۴	۱/۸
C-۲	۶۵/۱۱۳	۴۳/۵۲۷	۱/۵	E-۲	۷۱/۹۱۸	۳۹/۵۸۳	۱/۸۱
C-۳	۸۴/۷۷۷	۶۸/۱۴۴	۱/۲۴	E-۳	۱۱۱/۵۳	۵۳/۹۰۷	۲/۰۷

نتایج این جداول نشان می دهد که در نمونه های مریعی و مستطیلی (نمونه های اولیه) با افزایش تعداد لایه های دورپیچ، غیریکنواختی محصورشدگی افزایش یافته است؛ در حالی که در ستون های دایروی که یکنواخت ترین محصورشدگی را دارند این افزایش، سبب یکنواخت تر شدن محصورشدگی شده است. در ستون های بیضوی که توزیع تنش فشاری آن، مابین دو گروه ستون بالاست، این افزایش در تعداد لایه ها، سبب افزایش ناچیزی در نسبت تنش های فشاری می شود.

در نمودار زیر، نسبت افزایش مقاومت فشاری نمونه های اولیه و اصلاح شده آورده شده است که افزایش چشمگیر در ظرفیت باربری نمونه های اصلاح شده ملاحظه می شود. همچنین هر چه تعداد لایه های دورپیچ افزایش پیدا می کند، میزان تأثیر اصلاح مقطع، افزایش می یابد. با توجه به تفاوت قیمت کامپوزیت FRP و بتن، منطقی به نظر می رسد که در صورت امکان، قبل از اقدام به دورپیچ کردن، مقطع ستون به شکل مناسب اصلاح شود تا کارایی دورپیچ افزایش یافته و حتی از تعداد لایه های دورپیچ کاسته شود. سطح مقطع ستون های اصلاح شده در حدود ۲ برابر نمونه های اولیه است.



شکل ۸- میزان تأثیر دورپیچ در ۱۲ نمونه

۳. نتیجه گیری

- در ستون‌های مستطیلی دورپیچ FRP سبب محصورشدگی ای غیریکنواختی شده که این محصورشدگی در اطراف گوشه‌ها به مراتب بیشتر از نقاط دیگر بوده و در وسط اضلاع بسیار ناچیز است.
- در ستون‌های مستطیلی با افزایش تعداد لایه‌ها، بر غیریکنواختی توزیع تنش‌های فشاری پیرامون ستون، افزوده می‌شود.
- در تمامی ستون‌ها مقاومت و کرنش نهایی ستون به طور مستقیم با افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ افزایش می‌یابد.
- با اصلاح سطح مقطع، افزایش چشمگیری در ظرفیت باربری ستون مشاهده می‌شود که در نتیجه افزایش کارایی دورپیچ FRP است.
- اصلاح سطح مقطع، کاهش هزینه قابل ملاحظه‌ای در رابطه با مقاوم‌سازی ستون با دورپیچ FRP به همراه خواهد داشت.

۴. مراجع

۱. Esfahani, M. R. and Kianoush, M. R. (۲۰۰۴). "Axial compressive strength of reinforced concrete columns Wrapped with FRP." *1st conference on Application of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures*, May ۴, Tehran, Iran.
۲. Ilki, A., Peker, O., Karamuk, and E. Demir, C. Kumbasar, N. ۲۰۰۶, Axial Behavior Of RC Columns Retrofitted With FRP Composites, *Journal Of Materials in Civil Engineering*, pp ۱۶۹-۱۸۸.
۳. رضائی، زهرا، ۱۳۸۷، " بررسی نحوه مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتنی مسلح توسط FRP." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۴. ANSYS Help-Version ۱۲
۵. سعادت‌مند، حسن، ۱۳۸۲، " بررسی تأثیر کامپوزیت FRP بر محصورشدگی بتن با هدف مقاوم‌سازی تیر-ستون‌های بتن آرمه." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
۶. Mirmiran, A., K. Zagres, and W., and W. Yuan. "Nonlinear Finite Element Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites," *Finite Elements in Analysis and Design*, ۳۵ ۱, ۲۰۰۰, pp ۷۹-۹۶.