

## بررسی ظرفیت شکل پذیری ستون‌های بتنی تقویت شده با الیاف CFRP

فخرالدین دانش<sup>۱\*</sup> و مهناز شاهرودی<sup>۲</sup>

دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۸۷/۱۰/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۳/۶، تاریخ تصویب ۸۹/۹/۷)

### چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی ظرفیت شکل‌پذیری ستون‌های بتنی تقویت شده با الیاف CFRP است. بدین منظور پس از ارائه تعاریف کلیدی و مروری بر تحقیقات انجام شده، الیاف و مدل‌های رفتاری بتن، FRP و میلگردها در نرم افزار مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن نحوه مدل‌سازی شرح داده شده و ضمن بررسی و مقایسه با کارهای آزمایشگاهی، مدل مورد نظر صحت سنجی شده است. پس از کالیبره کردن نتایج نرم افزار با نتایج ارائه شده توسط Ozcan و همکارانش، تأثیر طول و ضخامت دور پیچ بر شکل پذیری جابجایی و ظرفیت چرخشی ستون مورد نظر بررسی شده است. بدین ترتیب که ستون‌هایی با شرایط بدون CFRP، یک و دو لایه دور پیچ CFRP با طول‌های مختلف توسط نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل شده و برای هر ستون میزان کرنش به وجود آمده در نقاط مختلف CFRP استخراج گردیده و منحنی برش پایه - تغییر مکان انتهای ستون‌ها و شکل‌پذیری جابجایی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میزان انحناء در نقاط مختلف در طول ستون و لنگر ایجاد شده در پای ستون به دست آمده و سپس مقایسه ای بین نتایج به دست آمده با روابط تحلیلی ارائه گردیده است. در ادامه طول مفصل پلاستیک و دوران ایجاد شده در پای ستون‌ها محاسبه شده و نیز تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر ظرفیت چرخشی ستون‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ بر عملکرد لرزه ای ستون‌ها، بر اساس روش ATC40 در برآورد نقطه عملکرد، طیف ظرفیت ستون‌ها و نیز طیف طلب زلزله با کمک دستورالعمل مذکور محاسبه شده و با تبدیل منحنی طلب زلزله و ظرفیت به مختصات طیف ADRS، از تلاقی این دو منحنی، نقطه عملکرد ستون‌ها به دست آمده است. سپس جهت تعیین معیارهای کمی پذیرش برای روشهای غیر خطی - ستون بتن مسلح دور پیچ شده با CFRP بازای طول و ضخامت مختلف دور پیچ، بر اساس نتایج مدل‌سازی، میزان انرژی زایل شده در هر ستون محاسبه گردیده و از آنجا مقادیر حداکثر زاویه دوران پلاستیک ستون‌ها به دست آمده است. در نهایت به منظور تعمیم نتایج حاصل در موارد مشابه جهت به دست آوردن معیارهای کمی پذیرش بازای سطوح عملکردی مختلف، رابطه ای کاربردی پیشنهاد گردیده است.

**واژه های کلیدی:** CFRP، اجزاء محدود، شکل پذیری جابجایی، ظرفیت چرخشی، نقطه عملکرد، سطوح عملکردی

### مقدمه

یک سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف با شدت‌های متفاوت می تواند تغییر شکل‌های متفاوتی داشته باشد. دی‌اگرامی که نشان دهنده تمامی تغییر شکل‌های حداکثر براساس برش متناظر باشد به منحنی بار افزون معروف است. این منحنی با اعمال بار افزایشده جانبی مشابه با توزیع نیروهای اینرسی زلزله و رسم برش پایه بر اساس جابجایی نقطه مبنا که می تواند مرکز ثقل پشت بام باشد، تهیه می شود.

بر این اساس در این پژوهش سعی شد ابتدا یک مدل سه بُعدی از ستون مورد نظر توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS تهیه گردیده و سپس با اعمال بار محوری و تغییر مکان جانبی، به بررسی تأثیر پارامترهای مورد نظر بر رفتار ستون پرداخته شود.

سیستم‌های غیر خطی نسبت به خطی از نقطه نظر تحمل نیروهای زلزله دارای مزیت‌هایی از جمله محدودیت نیروها، محدودیت شتابها، کنترل پخش آسیب و ... می‌باشند. هدف از اعمال روش تحلیل لرزه ای غیر ارتجاعی پیش بینی واقعی رفتار سازه در برابر حرکات زلزله‌های آتی می‌باشد. همچنین گسترش روش عملکردی در بهسازی ساختمان‌های موجود و طراحی ساختمان‌های جدید سبب شده تا طراح جهت تشخیص سطح عملکردی از میزان آسیب به اجزاء سازه ای و غیرسازه ای اطلاع داشته باشد. آسیب عموماً ناشی از تجاوز تغییر شکلها از مقادیر ظرفیت بوده و لذا کاربرد یک روش جابجایی با استفاده از فرآیند تحلیل غیرارتجاعی می‌تواند برآورد دقیق‌تری از آن باشد.

حالت به دست آمده و در نهایت به منظور تعمیم نتایج حاصل در موارد مشابه جهت به دست آوردن معیارهای کمی پذیرش بازای سطوح عملکردی مختلف، رابطه‌ای کاربردی پیشنهاد گردیده است.

### مروری بر تحقیقات انجام شده

تکنولوژی FRP از روشهایی است که به سادگی و سهولت برای تقویت سازه های اجرا شده و بهره برداری شده می توان آنرا برای بهبود باربری و رفتار مناسب سازه مورد نظر به کار برد.

به طور کلی در روش مقاوم سازی اجزای بتنی با FRP از آنجایی که این پلیمرها از دو بخش الیاف و رزین تشکیل شده اند. الیاف عضو بارپذیرسازه هستند و رزین آنها را در محل و آرایش مطلوب نگه داشته و به عنوان محیط منتقل کننده بار بین الیاف عمل می کند به علاوه آنها را از صدمات محیطی در اثر افزایش دما یا رطوبت حفظ می کند. همچنین مقاوم بودن این مصالح در برابر خوردگی موجب دوام و پایا بودن عملکرد آنها می شود. صفحات FRP تا ۱۰ برابر مقاومت صفحات فولادی را دارند، درحالی که وزن آنها فقط ۲۰ درصد وزن فولاد است [۲] و [۳].

علاوه بر آنچه که در مورد خواص غیر خورنده بودن و نیز نسبت وزن به مقاومت بسیار کم ورق های FRP گفته شد، کاملاً الاستیک بودن از دیگر خواص مهم آنها است. فولاد تا زمانی رفتار کشسان از خود نشان می دهد که به تنش تسلیم برسد و بعد از آن رفتاری کاملاً پلاستیک دارد ولیکن FRP ماده ای کاملاً الاستیک بوده که تنش تسلیم برای آن بی معنی است، FRP تا زمان گسیختگی رفتار کشسان از خود نشان می دهد.

همچنین در شرایط یکسان نیاز به محصورشدگی، نمونه ای که با FRP تقویت می شود نسبت به نمونه ای که با فولاد تقویت می شود قابلیت تحمل نیروی بیشتری داشته و به عبارتی مقاومتر است و نیز اثر محصور کنندگی FRP بیش از فولاد است [۴].

محصوریت برای اعضای فشاری با هدف افزایش ظرفیت باربری در مناطق زلزله خیز و افزایش شکل پذیری به کار برده می شود. در واقع با انجام عمل دورگیری بتن مقاومت فشاری بتن و شکل پذیری آن افزایش می یابد. از نتایج استفاده از محصوریت بتن با FRP می توان به جلوگیری از خرد شدن بتن پوششی میلگردهای طولی و جلوگیری از

از آنجا که در یک ستون تحت تغییر مکان جانبی، مفصل پلاستیک در پای ستون تشکیل می گردد، بر آن سدیم تا در این ناحیه به بررسی دقیق تر تأثیر طول و ضخامت دورپیچ CFRP بر رفتار لرزه ای ستون از جمله شکل پذیری جابجایی، ظرفیت چرخشی و سطوح عملکردی بپردازیم. بدین منظور پس از ارائه تعاریف کلیدی و مروری بر تحقیقات انجام شده، المانها و مدل های رفتاری بتن، FRP و میلگردها در نرم افزار مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن نحوه مدل سازی شرح داده شده و ضمن بررسی و مقایسه با کارهای آزمایشگاهی، مدل مورد نظر صحت سنجی شده است. پس از کالیبره کردن نتایج نرم افزار با نتایج ارائه شده توسط Ozcan و همکارانش [۱]، تأثیر طول و ضخامت دور پیچ بر شکل پذیری جابجایی و ظرفیت چرخشی ستون مورد نظر بررسی شده است.

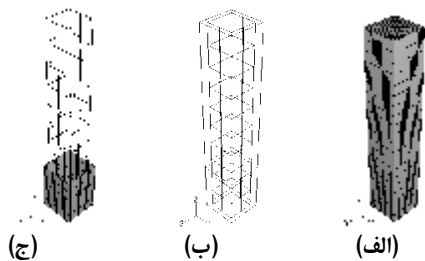
بدین ترتیب که ستون هایی با شرایط بدون FRP، یک و دو لایه دور پیچ FRP با طولهای مختلف توسط نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل شده و برای هر ستون میزان کرنش به وجود آمده در نقاط مختلف CFRP و منحنی برش پایه - تغییر مکان انتهای ستون ها استخراج گردیده و به بررسی تأثیر طول و ضخامت دورپیچ CFRP بر شکل پذیری جابجایی ستون بتن مسلح پرداخته شد. سپس با توجه به تأثیر پارامترها، میزان لنگر و دوران پای ستون و از آنجا ظرفیت چرخشی ستون بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه طول مفصل پلاستیک و دوران ایجاد شده در پای ستون ها محاسبه شده و نیز تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر ظرفیت چرخشی ستون ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

همچنین به منظور بررسی تأثیر طول و ضخامت دورپیچ بر عملکرد لرزه ای ستون ها، بر اساس روش ATC40 در برآورد نقطه عملکرد، طیف ظرفیت ستون ها و نیز طیف طلب زلزله با کمک دستورالعمل مذکور محاسبه شده است. با تبدیل منحنی طلب زلزله و ظرفیت به مختصات طیف ADRS، از تلاقی این دو منحنی، نقطه عملکرد ستون ها به دست آمده است. سپس جهت تعیین معیارهای کمی پذیرش برای روشهای غیر خطی - ستون بتن مسلح دورپیچ شده با CFRP بازای طول و ضخامت مختلف دورپیچ، بر اساس نتایج مدل سازی، مقادیر حداکثر زاویه دوران پلاستیک ستون مورد تحقیق در هر

در این مرحله، بتن با المان‌های حجمی هشت گرهی (C3D8) و دورپیچ آن با المان‌های غشایی چهار گرهی (M3D4) مدل شده اند و از معادل سازی یکپارچه کردن مقطع استفاده نشده است [۱].

به منظور کالیبره کردن نتایج، از مقاله ارائه شده توسط Ozcan و گروهش استفاده شد. نمونه‌ها به ابعاد  $200 \times 250 \times 350$  میلی‌متر در نظر گرفته شده و برای آرماتورهای طولی در تمامی نمونه‌ها  $8\phi 18$  و خاموت‌های اطراف آن  $10\phi 200$  در تمام ارتفاع ستون، به کار گرفته شده است. همچنین الیاف CFRP مورد استفاده در نمونه‌ها دارای ضخامت  $0.165$  میلی‌متر (یک لایه) و  $0.33$  میلی‌متر (دو لایه) و مدول الاستیسیته  $230 \text{ GPa}$  و کرنش پاره شدگی  $0.01$  می‌باشند [۶].

در این تحقیق برای بررسی رفتار ستون تحت بار محوری و cyclic توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، آرماتورهای طولی، خاموتها، الیاف CFRP و محدوده دورپیچ آن دقیقاً مطابق نمونه مدل سازی شده است. نحوه مش بندی و ابعاد مش‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که به همگرایی جواب‌ها کمک کند [۱].



شکل ۱: الف) نحوه مش بندی وب) نحوه چیدمان آرماتورهای طولی و خاموت‌ها و ج) محل قرارگیری الیاف CFRP در مدل اجزای محدود.

جهت کالیبره کردن نتایج، منحنی‌های نیرو- تغییر مکان برای دو نمونه مذکور استخراج گردیده و سپس با نتایج ارائه شده توسط Ozcan و گروهش مقایسه گردیده است. از آنجا که ستون مورد نظر در تحقیق مذکور نیمه گیردار بود و در این تحقیق بصورت کاملاً گیردار مدل شد، مدل این تحقیق مقاومت بالاتری را نسبت به مدل Ozcan نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های به دست آمده، که در شکل (۲) نمایش داده شده است، نتایج استخراج شده به روش اجزاء محدود تطابق قابل قبولی با کارهای آزمایشگاهی ارائه شده دارد.

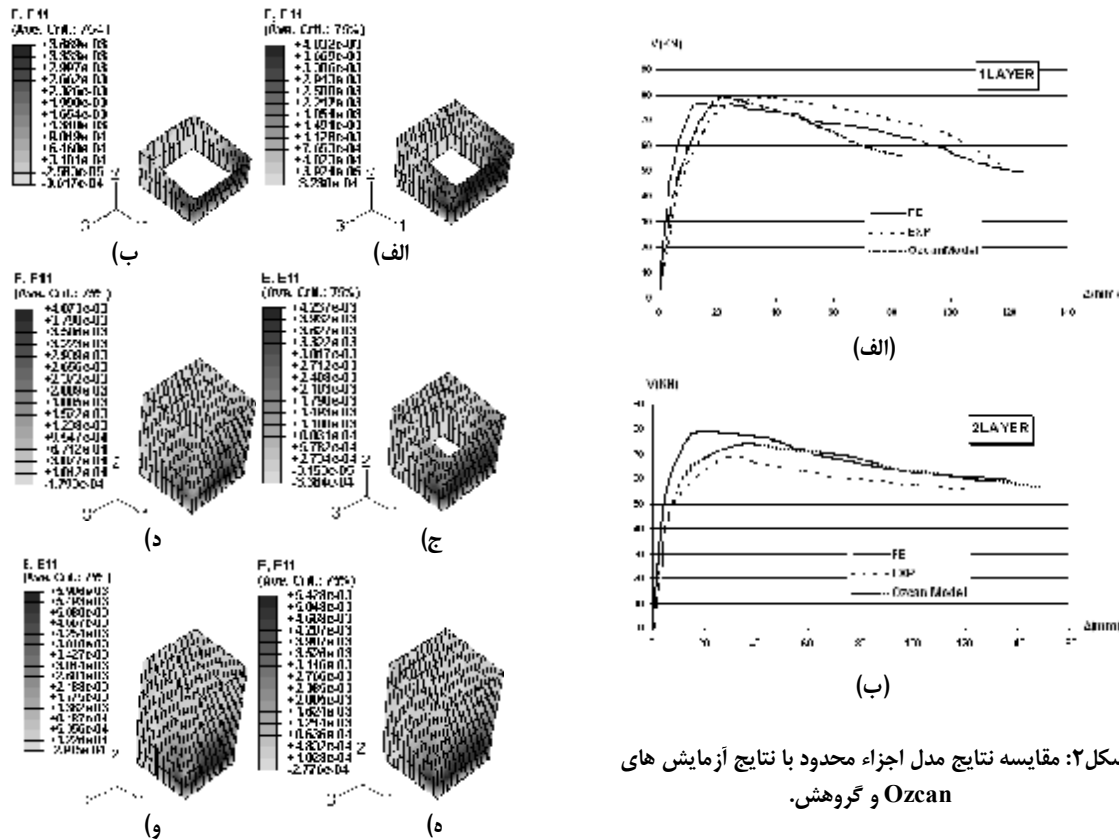
کمانش و لغزش آنها و نیز افزایش مقاومت فشاری بتن و افزایش ظرفیت تغییر شکل اشاره نمود.

محصور کردن بتن، سختی خمشی را نیز افزایش می‌دهد و بنابراین عضو در معرض نیروهای بزرگتری قرار می‌گیرد. این یک ایده مهم می‌باشد و احتیاج به دقت و توجه بیشتری دارد. تقویت با FRP باعث یک کاهش قابل توجه در سختی خمشی در مقایسه با کاربرد پوشاندن با فولاد و افزایش سطح مقطع با بتن ریزی مجدد، می‌شود. محصوریت با FRP همچنین سبب بهبود و اصلاح شکل پذیری از طریق افزایش ظرفیت خواهد شد. به عنوان یک نتیجه، عضو سازه‌ای تقویت شده با FRP تحت بارهای اضافی قرار نخواهد گرفت و نیز از شکست ناگهانی قاب جلوگیری می‌شود. مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی Shamim & Yimin, 2006 و پاسخ‌های ممان-انحنای آنها بر تأثیر میزان بار محوری اعمال شده به ستون‌های محصور شده نشان می‌دهد که افزایش بار محوری باعث کاهش رفتار شکل‌پذیر ستون شده و ستونی که بار محوری زیادی را تحمل می‌نماید کاهش حدود ۶۰ درصد در نسبت شکل پذیری داشته و ۷۵ درصد از انرژی آن زایل می‌شود و نیز دوره گسیختگی ستون از ۱۵ سیکل بارگذاری به ۸ سیکل کاهش می‌یابد. حتی افزایش بار محوری می‌تواند اثر مثبت ناشی از افزایش تعداد لایه‌های CFRP را کاهش دهد [۵].

دورپیچ‌های FRP، علاوه بر محافظت ستون‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی، بهبود شاخصه‌های باربری آنها را نیز به دنبال دارند. هنگامی که ستون دورپیچ شده تحت اثر بار فشاری قرار می‌گیرد، دورپیچ پیرامونی از انبساط محیطی مقطع ناشی از گسترش ترک‌های فشاری در آن جلوگیری نموده و نوعی تنش فشاری محصورکننده غیر فعال بدان وارد می‌آورد. به این ترتیب باربری هسته بتنی ادامه می‌یابد و ستون در تنش فشاری بالاتری منهدم می‌گردد.

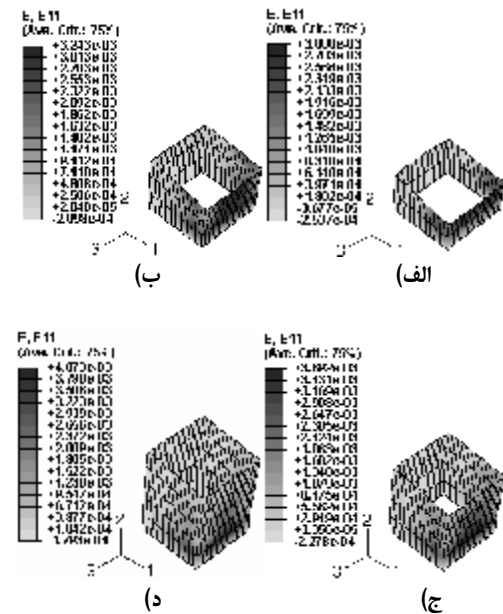
## بررسی قابلیت نرم افزار ABAQUS در مدل‌سازی رفتار ستون

جهت بررسی دقیق رفتار CFRP، مدل کاملی از ستون بتن مسلح با آرماتورهای طولی و خاموت‌های عرضی و دورپیچ الیاف CFRP در محدوده پایین ستون توسط نرم افزار ABAQUS، ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲: مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایش های Ozcan و گروهش.

شکل ۳: کانتور میزان کرنش به وجود آمده در یک لایه دورپیچ CFRP (بازای طول های الف) ۲۰، ب) ۳۰، ج) ۴۰، د) ۵۰، ه) ۶۰، و) ۷۰ سانتی متر.



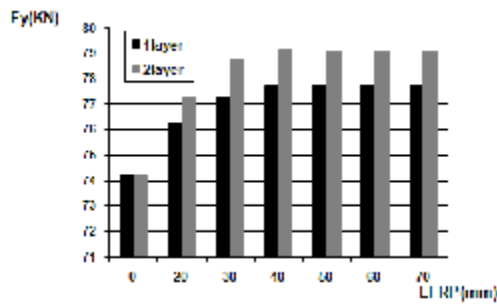
شکل ۴: کانتور میزان کرنش به وجود آمده در دو لایه دورپیچ CFRP (بازای طول های الف) ۲۰، ب) ۳۰، ج) ۴۰، د) ۵۰، ه) ۶۰، و) ۷۰ سانتی متر.

### بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر شکل پذیری جابجایی ستون بتن مسلح

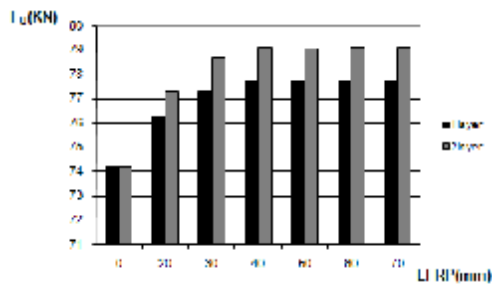
پس از کالیبره کردن نتایج نرم افزار با نتایج ارائه شده توسط Ozcan و گروهش در بخش قبل، در ادامه به بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ بر شکل پذیری ستون مورد نظر پرداخته می شود. بدین ترتیب که سه نمونه با شرایط بدون FRP، یک لایه دور پیچ CFRP به ضخامت ۰/۱۶۵ میلیمتر و دو لایه دور پیچ CFRP به ضخامت ۰/۳۳ میلیمتر در نظر گرفته شدند و در هر نمونه دور پیچ مذکور با طول های ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ سانتی متر توسط نرم افزار ABAQUS مدل شد. برای هر نمونه میزان کرنش به وجود آمده در دورپیچ استخراج گردید که در ادامه آورده شده است.

با توجه به خروجی های ارائه شده در شکل های (۳) و (۴)، مشاهده می شود با افزایش طول و ضخامت، میزان کرنش جانبی قابل تحمل در دورپیچ افزایش می یابد. شکل (۵)، این افزایش را با تأثیر پارامترهای مورد نظر نشان می دهد.

همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود، افزایش طول دورپیچ ها تأثیر چندانی بر سختی سازه نداشته و ظرفیت برشی سازه را افزایش داده است.



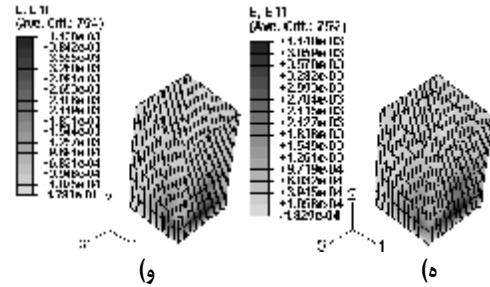
(الف)



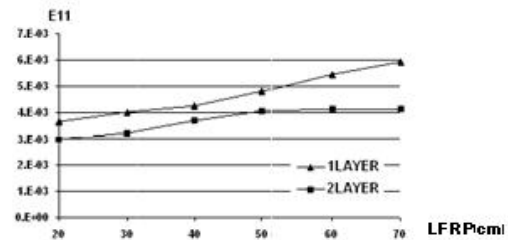
(ب)

شکل ۷: تأثیر طول و ضخامت دور پیچ بر (الف) بار تسلیم و (ب) بار ماکزیمم ایجاد شده در ستون.

همان طور که در جدول (۱) مشاهده می شود، افزایش تعداد لایه تا ۲۰ سانتی متر طول دورپیچ، تأثیری بر روی شکل پذیری جابجایی نخواهد داشت. ولی با افزایش طول دورپیچ بیشتر از ۲۰ سانتی متر، افزایش طول و ضخامت دور پیچ در افزایش شکل پذیری جابجایی مؤثر خواهد بود. همچنین افزایش طول یک لایه دورپیچ CFRP تا ۶۰ سانتی متر، می تواند در شکل پذیری جابجایی مؤثر باشد و با افزودن به این طول، افزایش قابل توجهی در شکل پذیری جابجایی مشاهده نمی شود. از طرفی افزایش ضخامت یا تعداد لایه از یک به دو، تا طول ۶۰ سانتی متر می تواند در شکل پذیری جابجایی مؤثر باشد و با افزایش این طول نیز افزایش قابل توجهی را در شکل پذیری جابجایی نخواهیم داشت. به عبارتی استفاده از ۶۰ سانتی متر دورپیچ CFRP به ضخامت دولایه می تواند بیشترین تأثیر را در افزایش شکل پذیری جابجایی ستون بتن مسلح مورد بررسی داشته باشد. نتایج شکل پذیری در شکل (۸) آورده شده است.

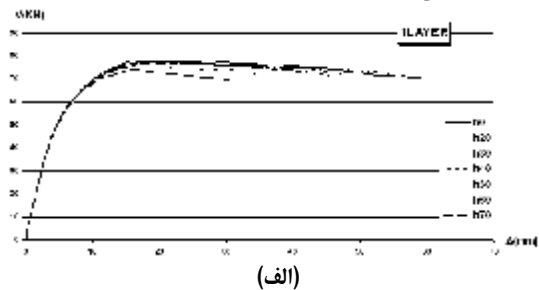


ادامه شکل ۴: کانتور میزان کرنش به وجود آمده در دو لایه دورپیچ CFRP بازای طول های (الف) ۲۰، (ب) ۳۰، (ج) ۴۰، (د) ۵۰، (ه) ۶۰ و ۷۰ سانتی متر.

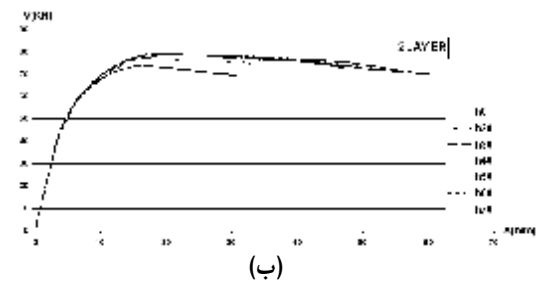


شکل ۵: مقایسه میزان کرنش به وجود آمده در دورپیچ CFRP بازای طول ها و ضخامت های مختلف دورپیچ.

در ادامه جهت بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر شکل پذیری ستون بتن مسلح، منحنی های برش پایه در مقابل تغییر مکان انتهای ستون، توسط نرم افزار استخراج گردید که در شکل (۶) آورده شده است.



(الف)

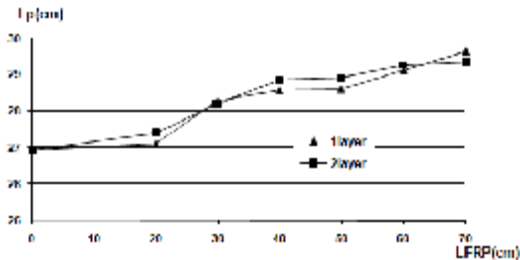


(ب)

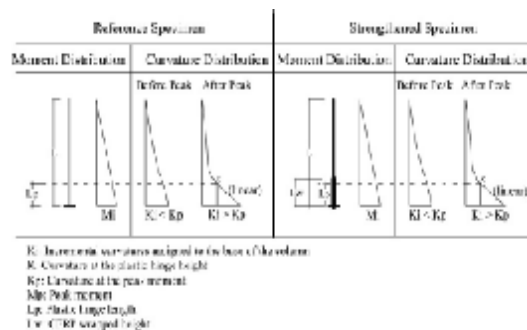
شکل ۶: منحنی برش پایه - تغییر مکان انتهای ستون بازای طول ها و ضخامت های مختلف دورپیچ.

همان‌طور که در شکل (۱۰) آورده شده است، در این روش طول مفصل پلاستیک از تفاوت طول متناظر با انحناء در لحظه لنگر ماکزیمم با انحناء در لحظه گسیختگی نهایی به دست می‌آید [۶].

مقادیر حاصله در جدول (۲) آورده شده است. با انتگرال‌گیری از مقادیر انحناء در طول ستون بازای پارامترهای مختلف، ارائه شده در بخش قبل، مقادیر دوران ستون قابل محاسبه می‌باشد.



شکل ۹: طول مفصل پلاستیک به روش Ozcan و گروهش.

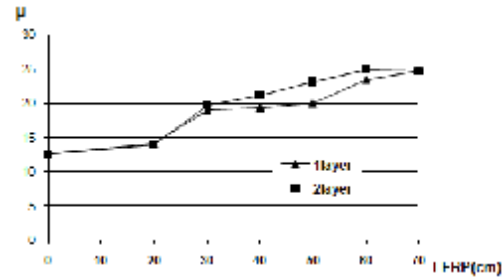


K<sub>0</sub>: Incremental curvature assigned to the base of the column.  
 K<sub>1</sub>: Curvature at the static hinge height.  
 K<sub>2</sub>: Curvature at the post-peak moment.  
 M<sub>0</sub>: Peak moment.  
 L<sub>0</sub>: Plastic hinge length.  
 L<sub>1</sub>: Plastic hinge length.  
 L<sub>2</sub>: CFRP wrapped height.

شکل ۱۰: مقادیر طول مفصل پلاستیک پای ستون بتن مسلح بازای تغییر در طول و ضخامت دور پیچ CFRP.

جدول ۲: خلاصه نتایج ظرفیت چرخشی و انحناء نهایی بازای تغییر در طول و ضخامت دور پیچ CFRP.

تعداد لایه ها	طول دور پیچ (cm) FRP	انحناء نهایی (1/m)Φ <sub>u</sub>	ظرفیت چرخشی θ <sub>p</sub>	طول مفصل پلاستیک (cm)	درصد افزایش طول مفصل پلاستیک
0	0	0.0842	0.0155	26.930	—
1	20	0.0929	0.0173	27.110	0.67
1	30	0.1129	0.0204	28.300	5.09
1	40	0.1187	0.0208	28.570	6.09
1	50	0.1384	0.0230	28.600	6.20
1	60	0.1664	0.0267	29.130	8.17
1	70	0.1932	0.0262	29.640	10.06
2	20	0.0900	0.0171	27.390	1.71
2	30	0.1124	0.0217	28.200	4.72
2	40	0.1423	0.0243	28.870	7.20
2	50	0.1648	0.0264	28.930	7.43
2	60	0.1775	0.0281	29.280	8.73
2	70	0.1791	0.0279	29.350	8.99



شکل ۸: تأثیر تغییر طول و ضخامت دور پیچ FRP بر شکل پذیری ستون بتن مسلح.

جدول ۱: خلاصه نتایج شکل پذیری و نیروهای قابل تحمل بازای تغییر در طول و ضخامت دور پیچ FRP.

تعداد لایه ها	طول دور پیچ (cm) FRP	بار تسلیم (kN)	تغییر مکان در بار تسلیم (mm)	ماکزیمم نیروی قابل تحمل (kN)	تغییر شکل پیشینه قبل از شکست (mm)	شکل پذیری μ = Δu/Δy
0	0	30.06	2.42	74.22	30.70	12.69
1	20	30.11	2.42	76.30	34.28	14.17
1	30	30.13	2.42	77.29	46.16	19.07
1	40	30.15	2.42	77.72	47.05	19.44
1	50	30.16	2.42	77.77	48.37	19.99
1	60	30.18	2.42	77.77	56.78	23.46
1	70	30.19	2.42	77.77	60.10	24.83
2	20	30.11	2.42	77.30	33.69	13.92
2	30	30.17	2.42	78.71	47.59	19.67
2	40	30.21	2.42	79.12	51.06	21.10
2	50	30.24	2.42	79.09	56.03	23.15
2	60	30.26	2.42	79.10	60.26	24.90
2	70	30.28	2.42	79.10	60.10	24.83

### بررسی تأثیر طول وضخامت دور پیچ CFRP

#### بر ظرفیت چرخشی ستون بتن مسلح

با توجه به میزان برش پایه به دست آمده توسط نرم افزار، میزان لنگر پای ستون در هر نمونه با کمک رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد. همچنین مقادیر انحناء در هر ستون در ترازهای مختلف آن با کمک رابطه (۲) بازای کرنش‌های ایجاد شده در دورترین المان‌های هر تراز که توسط نرم افزار ABAQUS به دست آمده، محاسبه گردید. در این روابط L طول ستون و x بُعد ستون می‌باشند [۷].

$$M = V \times L \quad (1)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_{su}}{x} \quad (2)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول و ضخامت دور پیچ مقادیر لنگر و انحنای نهایی ستون افزایش می‌یابد. به منظور محاسبه طول مفصل پلاستیک می‌توان از روش ارائه شده توسط Ozcan و گروهش استفاده کرد.



تلاقی با منحنی طلب است و به نقطه عملکرد نیز موسوم است، واقع می گردد. بدین منظور جهت تبدیل منحنی ظرفیت به طیف ظرفیت از روابط تبدیل برش پایه معادل به شتاب طیفی ارائه شده در ATC40 که در ادامه آورده شده است، استفاده می شود [۸].

$$S_a = \frac{V}{W} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، W معادل نیروی محوری وارد بر ستون است.

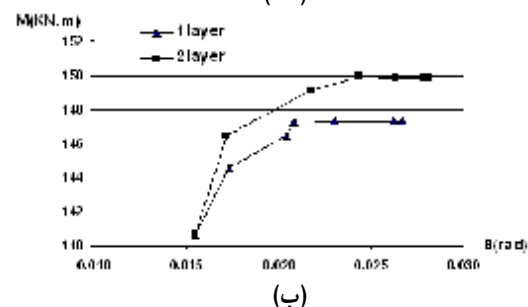
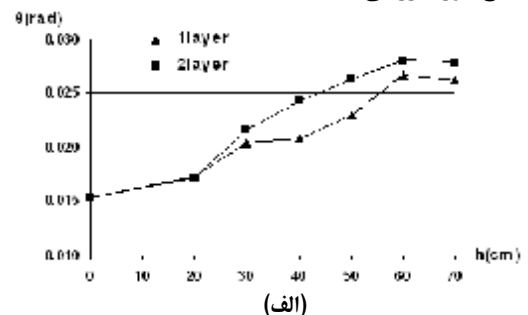
از آنجا که بررسی های ما بر روی ستون یکسر آزاد می باشد، جابجایی طیفی معادل با تغییر مکان انتهای آزاد در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب طیف ظرفیت ستون در مختصات ADRS با تأثیر طول و ضخامت دورپیچ، به دست می آید. با ورود سازه به تغییر شکل های غیرارتجاعی بسیار راحت تر است که از جابجایی جانبی برای نشان دادن چنین نیازی استفاده گردد. برای یک سازه و حرکت زمین مشخص طلب جابجایی، تخمینی از حداکثر واکنش مورد انتظار در سازه بر اثر حرکت زمین است. لذا در فرآیند جابجایی، نیاز زلزله به شکل حداکثر تغییر شکل سازه تحت اثر تحریک زلزله برآورد می گردد. لذا کاربرد طیف شتاب در تحلیل ارتجاعی به عنوان طلب و طیف جابجایی در یک تحلیل غیرخطی مرسوم می باشد.

با در نظر گرفتن یکسری فرضیات در ارتباط با نوع خاک محل و احتمال خطر زمین لرزه و ... طبق آئین نامه زلزله ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) می توان طیف طلب زلزله را به دست آورد. بدین ترتیب که با فرض زمین نوع I و منطقه با خطر لرزه خیزی نسبی خیلی زیاد ( $A=0.35g$ )، ضریب بازتاب سازه بر حسب پریود T حاصل می شود. با ضرب شتاب مبنای طرح (A) در ضریب بازتاب به دست آمده، طبق رابطه (۷)، طیف استاندارد  $S_a$  بر حسب T برای سازه مورد نظر به دست می آید که در شکل (۱۲) آورده شده است [۹].

$$S_a = A \times B \quad (۵)$$

هر نقطه بر روی منحنی طیف پاسخ، مربوط به یک شتاب طیفی  $S_a$ ، سرعت طیفی  $S_v$ ، جابجایی طیفی  $S_d$  و پریود T می باشد. جهت تبدیل شکل طیفی استاندارد آئین نامه ۲۸۰۰ ایران به شکل ADRS، لازم است مقدار  $S_{di}$  برای هر نقطه بر روی منحنی  $S_{di}-T_i$  با کمک رابطه (۶) به دست آید. بدین ترتیب طیف زلزله در مختصات ADRS

در اشکال (۱۱) مقایسه ای بین مقادیر لنگر و دوران پای ستون بازای طول ها و ضخامت های مورد بررسی دور پیچ FRP انجام گرفته است. همان طور که در شکل ها مشخص است، با افزایش طول دورپیچ تا ۶۰ سانتی متر، ظرفیت چرخشی افزایش می یابد. این افزایش ظرفیت چرخشی تا طول ۲۰ سانتی متر با افزایش دو برابر ضخامت لایه تفاوت چندانی ندارد ولی با افزایش طول دورپیچ بیشتر از ۲۰ سانتی متر، با افزایش ضخامت دورپیچ، ظرفیت چرخشی افزایش می یابد. به عبارتی استفاده از ۶۰ سانتی متر دورپیچ CFRP به ضخامت دولایه می تواند بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت چرخشی ستون بتن مسلح مورد بررسی داشته باشد.



شکل ۱۱: (الف) مقادیر ظرفیت چرخشی، (ب) مقادیر لنگر و دوران پای ستون بتن مسلح بازای تغییر در طول و ضخامت دور پیچ CFRP.

### بررسی تأثیر طول و ضخامت دورپیچ CFRP بر عملکرد ستون بتن مسلح

پس از تهیه منحنی ظرفیت، سؤال مطرح آن است که چه نقطه ای از منحنی که نشان دهنده رفتار سازه تحت برش زلزله است، متناظر با زلزله طرح می باشد. بر اساس روش انتخاب شده توسط ATC40، نقطه مورد نظر باید بر روی طیف طلب پاسخ مناسب که برای تأثیر رفتار غیر خطی تصحیح شده است، قرار گیرد. در واقع طلب جابجایی در این روش در نقطه ای بر روی طیف ظرفیت که محل

حاصل می شود.

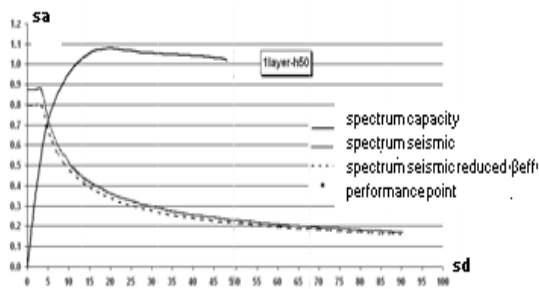
$$SR_A \approx \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \geq \quad (۹) \quad \text{مقادیر جدول (۳)}$$

$SR_A$  مقدار کاهش طیف در محدوده شتاب ثابت و  $SR_V$  مقدار کاهش طیف در محدوده سرعت ثابت می باشند.

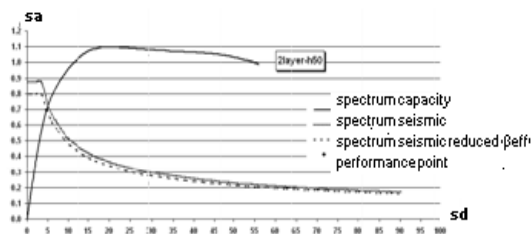
جدول ۳: مقادیر  $SR_A$  و  $SR_V$  بر اساس نوع رفتار سازه ای.

$SR_V$	$SR_A$	نوع رفتار سازه ای
۰/۵	۰/۳۳	نوع A یا عالی با حلقه های پسماند کامل
۰/۵۶	۰/۴۴	نوع B با حلقه های پسماند متوسط
۰/۶۷	۰/۵۶	نوع C با حلقه های پسماند ناقص

با در نظر گرفتن مطالب فوق، مقدار  $\beta_{eff}$  برابر ۶/۵۸ و مقادیر  $SR_A$  و  $SR_V$  بترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۹۳ به دست آمده و طیف طلب کاهش یافته جهت بحساب آوردن انرژی هدر رفته پسماند، قابل محاسبه می باشد. در ادامه با در نظر گرفتن طول ها و ضخامت های دورپیچ مورد تحقیق و با در نظر گرفتن طیف های ظرفیت و طلب کاهش یافته برای هر نمونه و تلاقی آنها، نقطه عملکرد برای هر کدام از نمونه ها به دست می آید. در شکل (۱۴) نحوه به دست آمدن نقطه عملکرد برای دو نمونه ستون با دورپیچ ۵۰ سانتیمتر در پای آن به ضخامت یک و دو لایه نشان داده شده است.



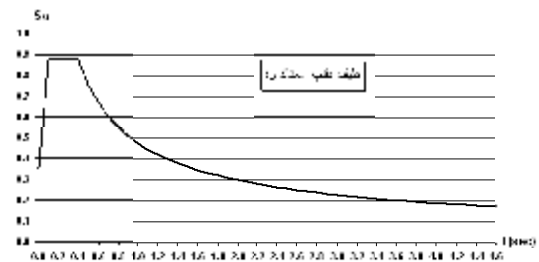
(الف)



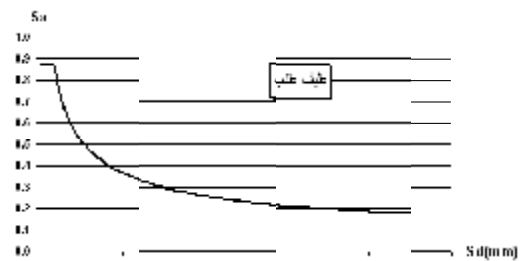
(ب)

شکل ۱۴: نقطه عملکرد ستون در مختصات ADRS برای الف) یک لایه دورپیچ به طول ۵۰ سانتی متر، ب) دو لایه دورپیچ به طول ۵۰ سانتی متر.

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g \quad (۶)$$



شکل ۱۲: طیف طلب استاندارد بر اساس آی بین نامه ۲۸۰۰ ایران.



شکل ۱۳: طیف طلب در مختصات ADRS.

نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد آن است که طیف طلب زلزله می باید بر اساس میرایی سیستم سازه ای محاسبه گردد. این میرایی شامل میرایی ذاتی یا ویسکوز و میرایی معادل تغییرشکل های غیر ارتجاعی است که بر اساس سطح داخل حلقه های پسماند ناشی از حرکات رفت و برگشتی زلزله محاسبه می گردد. میرایی اخیر که به میرایی پسماند نیز معروف است به شکل رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$\beta_{eff} = \kappa \beta_0 + 5 \quad (۷)$$

در رابطه ارائه شده جمله دوم نمایانگر ۵ درصد میرایی ویسکوز ذاتی سازه است که ثابت فرض می گردد. ضریب  $\kappa$  و درصد  $\beta_0$  نیز بستگی به رفتار سازه بعبارتی کیفیت سیستم سازه ای و مدت دوام حرکات زمین دارد. از میرایی ویسکوز معادل آورده شده در رابطه (۷) می توان ضرایب لازم برای کاهش مقادیر طیفی را محاسبه نمود. این ضرایب کاهش بصورت روابط (۸) و (۹) می باشند.

$$SR_V \approx \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \geq \quad (۸) \quad \text{مقادیر جدول (۳)}$$



تا حداکثر زاویه دوران خمیری در سطوح عملکردی را جهت تعیین معیار پذیرش برای ستون بتن مسلح دورپیچ شده با CFRP بازای پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، به دست بیآوریم. بدین منظور ابتدا بر اساس مشخصات هندسی ونیز با توجه به وجود آرماتورهای عرضی و میزان نیروی محوری، برش پایه و ظرفیت برشی ستون مورد نظر در حالتی که بدون دورپیچ می باشد با کمک جدول ارائه شده در دستورالعمل میزان حداکثر دوران خمیری تعیین می شود.

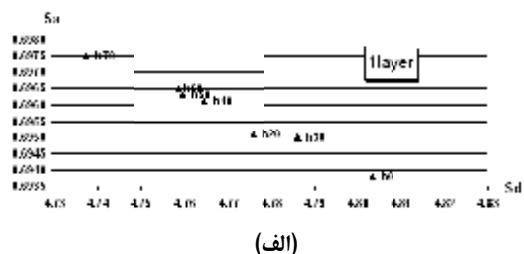
همانطور که در دستورالعمل FEMA-356 بیان شده است، میزان حداکثر دوران خمیری بر اساس حداکثر جابجایی انتهای ستون به دست می آید. به این ترتیب با توجه به حداکثر مقادیر جابجایی به دست آمده در لحظه گسیختگی، بر اساس نتایج حاصل از مدل سازی که در قبل آورده شده است، و با تقسیم آن بر طول ستون زاویه دوران خمیری در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش<sup>۱</sup> برای هر کدام از نمونه های مورد بررسی در این تحقیق حاصل می شود.

از طرفی از آنجا که نسبت میزان انرژی مستهلک شده تا جابجایی سطح عملکرد استفاده بی وقفه<sup>۲</sup> در حالت ستون دورپیچ شده با CFRP به ستون بدون دورپیچ برابر است با نسبت میزان انرژی مستهلک شده تا جابجایی سطح عملکرد آستانه فرو ریزش<sup>۱</sup> در حالت ستون دورپیچ شده با CFRP به ستون بدون دورپیچ، و با داشتن زاویه دوران خمیری در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش<sup>۱</sup> و قابلیت استفاده بی وقفه<sup>۲</sup> برای ستون بدون دورپیچ، حداکثر زاویه دوران خمیری در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه برای ستون دورپیچ شده با CFRP به دست می آید(رابطه (۱۰)).

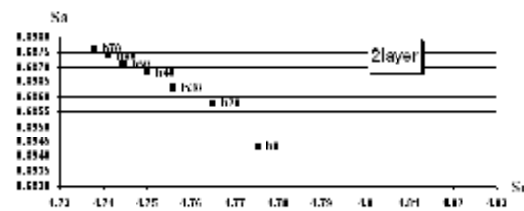
$$\frac{E_{10}}{E_{10}} = \frac{E_{CP}}{E_{CP}} \quad (10)$$

بدین ترتیب با تساوی نسبت میزان انرژی مستهلک شده تا جابجایی سطح عملکرد ایمنی جانی<sup>۳</sup> در حالت ستون دورپیچ شده با CFRP به ستون بدون دورپیچ با نسبت میزان انرژی مستهلک شده تا جابجایی سطح عملکرد آستانه فرو ریزش<sup>۱</sup> در حالت ستون دورپیچ شده با CFRP به ستون بدون دورپیچ، حداکثر زاویه دوران خمیری در سطح عملکرد ایمنی جانی<sup>۳</sup> نیز قابل محاسبه خواهد بود (رابطه (۱۱)).

شکل (۱۵) مقایسه ای بین نقاط عملکرد با تأثیر طول و ضخامت دورپیچ CFRP را نشان می دهند. همانطور که در شکلها مشخص است، در هر لایه با افزایش طول دورپیچ شتاب طیفی افزایش و جابجایی طیفی کاهش می یابد. همچنین با افزایش ضخامت لایه به دو برابر، ستون عملکرد بهتری را از خود نشان می دهد بدین ترتیب که در مورد مشابه طول دورپیچ، نقطه عملکرد آن با شتاب طیفی بیشتر و جابجایی طیفی کمتری معادل می گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵: مقایسه نقطه عملکرد ستون بازای طول های مختلف با (الف) یک لایه و (ب) دو لایه دورپیچ CFRP.

با توجه به طیف طلب زلزله و طیف ظرفیت ستون مورد تحقیق، می توان این طور استنباط کرد که ستون مورد نظر، با مقاومت زیاد در برابر حرکت زلزله متوسط می باشد و می تواند در سطح عملکردی قابلیت استفاده بی وقفه<sup>۲</sup> قرار گیرد.

### معیارهای کمی پذیرش برای روش های غیرخطی - ستون بتن مسلح دورپیچ شده با CFRP

در دستورالعمل FEMA-356 معیار کمی پذیرش برای هدف بهسازی در روشهای غیر خطی ستون های بتن مسلح بر اساس حداکثر زاویه دوران خمیری و سطوح عملکردی در جدول (۶-۸) دستورالعمل مشخص شده است [۱۰].

در این دستورالعمل تأثیر FRP بر این معیار کمی پذیرش مشخص نگردیده است. در این راستا برآن شدیم

### نتیجه گیری

در یک نگاه کلی، اهم نتایجی که نگارنده در این پژوهش به دست آورده است را می توان در موارد خلاصه شده ذیل مطرح نمود:

در بررسی انجام شده بر روی پارامتر طول لایه های دور پیچ و تأثیر آن بر رفتار ستون ها، مشاهده گردید افزایش طول دور پیچ ها تأثیر چندانی بر سختی سازه نداشته و ظرفیت برشی سازه را افزایش داده است.

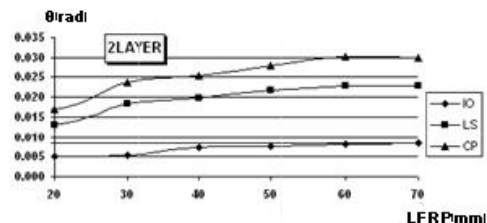
با استفاده از نتایج به دست آمده مشاهده شد افزایش طول دور پیچ تا ۱۰ درصد طول ستون، تأثیری بر روی شکل پذیری جابجایی نخواهد داشت. ولی افزایش طول دور پیچ تا حدود ۳۰ درصد طول ستون، باعث افزایش شکل پذیری جابجایی شده و با افزودن طول دور پیچ بیش از این مقدار، افزایش قابل توجهی در شکل پذیری جابجایی مشاهده نمی شود. از طرفی افزایش ضخامت یا تعداد لایه از یک به دو، می تواند در شکل پذیری جابجایی مؤثر باشد. در این حالت نیز افزایش ضخامت درحالتیکه طول دور پیچ بیشتر از ۳۰ درصد طول ستون باشد، تأثیر قابل توجهی در شکل پذیری جابجایی نخواهد داشت. به عبارتی استفاده از دور پیچ CFRP به طول حدود ۳۰ درصد طول ستون با ضخامت دولایه می تواند بیشترین تأثیر را در افزایش شکل پذیری ستون بتن مسلح مورد بررسی داشته باشد.

در بررسی منحنی های لنگر- انحنای حاصله از مدل سازی ها مشاهده شد که با افزایش طول و ضخامت دور پیچ ها، مقادیر انحنای نهایی ستون افزایش می یابد. همچنین در این راستا منحنی های لنگر- دوران پای ستون تهیه و ارائه گردیدند که نمایانگر افزایش ظرفیت چرخشی مقطع با افزایش طول لایه های دور پیچ بودند و در هر دو حالت تک لایه و دو لایه روند تأثیر گذاری مشابه بود. بطوری که بازای یک لایه به ارتفاع ۱۵ درصدی طول ستون، ظرفیت چرخشی، حدود ۳۲ درصد و بازای دو لایه ۴۰ درصد افزایش می یابد.

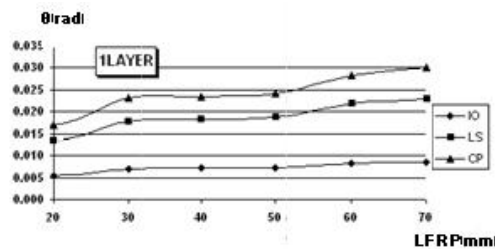
با توجه به بررسی های انجام شده بر روی نقطه عملکرد ستون ها، مشاهده گردید در صورت افزایش طول دور پیچ CFRP، میزان شتاب طیفی یا به عبارتی تحمل سازه در مقابل بار لرزه ای افزایش می یابد. و نیز مشخص گردید با افزایش طول دور پیچ میزان جابجایی طیفی که بیانگر حداکثر جابجایی سازه در مقابل زلزله طلب می باشد،

$$\frac{E_{LS}}{E_{CP}} = \frac{E_{CP}}{E_{LS}} \quad (11)$$

با تکرار این عملیات برای هر کدام از نمونه های مورد بررسی در این تحقیق، معیار کمی پذیرش مورد نظر بازای طول ها و ضخامت های دور پیچ CFRP در پای ستون بتن مسلح به دست می آید. نتایج مذکور در جدول (۴) و شکل های (۱۶) و (۱۷) آورده شده است.

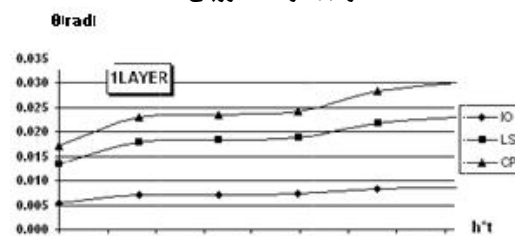


(الف)

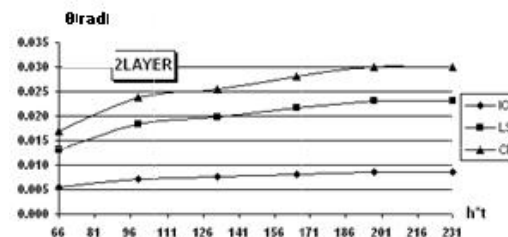


(ب)

شکل ۱۶: مقایسه معیارهای کمی پذیرش برای ستون های بتن مسلح دور پیچ شده بازای طول های مختلف دور پیچ برای الف) یک لایه و ب) دو لایه دور پیچ CFRP.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷: مقایسه معیارهای کمی پذیرش برای ستون های بتن مسلح دور پیچ شده بازای طول در ضخامت دور پیچ برای الف) یک لایه و ب) دو لایه دور پیچ CFRP.

حداکثر معیار کمی پذیرش ستون بتن مسلح مدل سازی شده، برای سطح عملکردی قابلیت استفاده بی وقفه<sup>۲</sup> برابر ۰/۰۸۵ (۷۰ درصد افزایش شکل پذیری نسبت به ۰/۰۰۵)، برای سطح عملکردی ایمنی جانی<sup>۳</sup> برابر ۰/۰۲۳ (۹۱/۶ درصد افزایش شکل پذیری نسبت به ۰/۰۱۲) و برای سطح عملکردی آستانه فروریزش<sup>۱</sup> برابر ۰/۰۳۰ (۸۷/۵ درصد افزایش شکل پذیری نسبت به ۰/۰۱۶) پیشنهاد می گردند.

کاهش می یابد که البته روند کند افزایش و کاهش این تغییرات بدلیل رفتار کشسان و کاملاً الاستیک CFRP و سختی زیاد آن می باشد.

در این مطالعه با کمک تساوی نسبت میزان انرژی مستهلک شده تا جابجایی سطح عملکرد مورد نظر در حالت ستون دورپیچ شده با CFRP به ستون بدون دورپیچ، با نسبت میزان انرژی مستهلک شده تا جابجایی سطح عملکرد آستانه فروریزش<sup>۱</sup> در حالت ستون دورپیچ شده با CFRP به ستون بدون دورپیچ در شرایط مشابه،

جدول ۴: معیارهای کمی پذیرش برای روش های غیرخطی-ستون های بتن مسلح دورپیچ شده با CFRP.

h	1LAYER(t=0.165)				2LAYER(t=0.33)			
	h.t	$\Theta_{IO}$	$\Theta_{LS}$	$\Theta_{CP}$	h.t	$\Theta_{IO}$	$\Theta_{LS}$	$\Theta_{CP}$
0	—	0.0050	0.0120	0.0160	—	0.0050	0.0120	0.0160
200	33.0	0.0055	0.0134	0.0171	66.0	0.0054	0.0131	0.0168
300	49.5	0.0070	0.0178	0.0231	99.0	0.0072	0.0183	0.0238
400	66.0	0.0071	0.0183	0.0235	132.0	0.0076	0.0198	0.0255
500	82.5	0.0073	0.0188	0.0242	165.0	0.0082	0.0217	0.0280
600	99.0	0.0082	0.0219	0.0284	198.0	0.0086	0.0230	0.0301
700	115.5	0.0085	0.0230	0.0300	231.0	0.0085	0.0230	0.0300

## مراجع

- 1 - ABAQUS, User's manual (2002). Version 6.3-1. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
- 2 - Shahawy, M., Mirmiran, A. and Beitelman, T. (2000). "Test and modeling of carbon-wrapped concrete columns." *Composites*, Part B, Vol. 31.
- 3 - Mirmiran, A., Kenneth Zagers and Wenqing Yuan. (2000). "Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites." *Finite Elements In Analysy and Design*, Vol. 35.
- 4 - Mohamed H. Harajli, (2006). "Axial stress-strain relationship for FRP confined circular & rectangular concrete columns." *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28.
- 5 - Shamim A. Sheikh and Yimin Li. (2006). "Design Of FRP confinement for square concrete columns." *Engineering Structures*.
- 6 - Okan Ozcan, Baris Binici. and Guney Ozcebe, (2007). "Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers." *Engineering Structures*.
- 7 - Zou, X. K., Teng, J. G., De Lorenzis, L. and Xia, S. H. (2006). "Optimal performance-based design of FRP jackets for seismic retrofit of reinforced concrete frames." *Composites*, Part B, Vol. 38, PP. 584-597.
- 8 - ATC (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. ATC40, Applied Technology Council, Redwood City.
- 9 - Standard No. 2800, *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*, 3rd. Edition.
- 10 - Federal Emergency Management Agency (FEMA), (1997). NEHRP provisions for the seismic rehabilitation of buildings. Rep FEMA 273 and FEMA 274, Washington, DC.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Collapse Prevention

2- Immediate Occupancy

3-Life Safety