تخمین پارامترهای اثرگذار بر رفتار غیرخطی ستونهای دورپیچ شده با CFRP به روش اجزاء محدود

فخر الدین دانش[۱]، سید بهرام بهشتی اول[۲]، مهناز شاهرودی [۳]
۱و۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

e.shahroudi@gmail.com

خلاصه

خسارتهای مشاهده شده در ساختمانها و پلها طی زلزله های اتفاق افتاده در طی سالیان، نیاز مبرم به مقاوم سازی آنها را نشان می دهد. ستونهای بتنی مسلح اعضای کلیدی مقاوم در برابر بارهای افقی و قائم سازه های بتنی به شمار می آیند. لذا مقاوم کردن ستونها در برابر نیروهای زلزله می تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد کل سازه ایفا کند. در چند دهه اخیر استفاده از مواد کامپوزیت CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) برای تقویت عملکرد لرزه ای در کل دنیا مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مشکلات محاسبات سازه ای این سیستم ها، مشکل بودن مدلسازی کامپیوتری آنها در قالب اجزاء محدود می باشد. از طرف دیگر بخاطر تنوع در پارامترهای مختلف تأثیر گذار بر رفتار آنها، کاربرد روش آزمایشگاهی را به جهت صرف هزینه و زمان زیاد با مشکل مواجه می کنند. گواینکه بسیاری از واکنشها از جمله توزیع تنشها و تغییرشکلهای داخل اعضاء با مشکلات فراوانی مواجه است. به این منظور ابتدا برای صحت سنجی نحوه مدلسازی، نمونه هایی از کارهای معتبر آزمایشگاهی با بار محوری ثابت و بار جانبی رفت و برگشتی (cyclic) با نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مدلسازی شده اند. 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 و یکپارچه کردن مقطع استفاده نشده است. نتایج بدست آمده، تطابق قابل قبولی با کارهای آزمایشگاهی دارد. سپس تأثیر تعداد و طول لایه های CFRP در شکل پذیری و ظرفیت چرخشی ستون مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: CFRP، اجزاء محدود، شکل پذیری، ظرفیت چرخشی.

۱. مقدمه

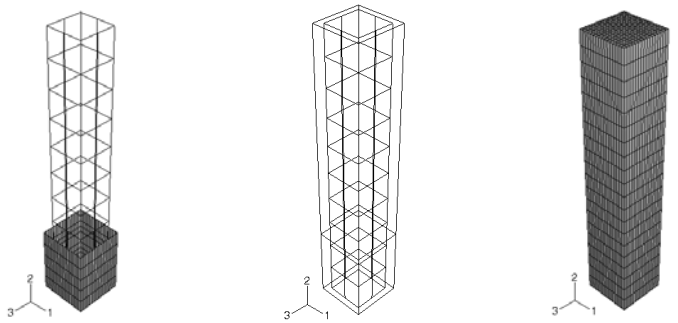
سیستمهای غیر خطی نسبت به خطی از نقطه نظر تحمل نیروهای زلزله دارای مزیتهایی از جمله محدودیت نیروها، محدودیت شتابها، کنترل پخش آسیب و ... می باشند. هدف از اعمال روش تحلیل لرزه ای غیر ارتجاعی پیش بینی واقعی رفتار سازه در برابر حرکات زلزله های آتی می باشد. همچنین گسترش روش عملکردی در بهسازی ساختمانهای موجود و طراحی ساختمانهای جدید سبب شده تا طراح جهت تشخیص سطح عملکردی از میزان آسیب به اجزاء سازه ای و غیر سازه ای اطلاع داشته باشد. از آنجا که آسیب به ذات خود سبب رفتار غیر ارتجاعی می شود، لذا فرآیند تحلیل و طراحی مرسوم با استفاده از روش ارتجاعی خطی نمی تواند اطلاعات صریح و روشن از میزان آسیب را گزارش نماید و لذا برآورد عملکرد بصورت ضمنی انجام می یابد. 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 دقیق تری از آن باشد. یک سازه تحت اثر زلزله های 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 بارافزون معروف است. این منحنی با اعمال بار افزاینده 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 مقاله 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. از آنجا که در یک ستون تحت تغییر مکان جانبی، مفصل پلاستیک در پای ستون تشکیل می گردد، بر آن شدیم تا در این ناحیه به بررسی دقیق تر تأثیر طول و ضخامت دورپیچ CFRP بر رفتار

لرزه ای ستون از جمله شکل پذیری و ظرفیت چرخشی بپردازیم. در این راستا مدل اجزای محدود ستون مورد نظر با نتایج آزمایشگاهی کالیبره گردید. پس از اطمینان از صحت مدل سازی، با تغییر در پارامترهای مورد نظر، برای هر نمونه منحنی برش پایه- تغییر مکان استخراج گردیده و به بررسی تأثیر طول و ضخامت دورپیچ CFRP بر شکل پذیری ستون بتن مسلح پرداخته شد. و با توجه به تأثیر پارامترها، میزان انحناء و دوران پای ستون مورد بررسی قرار گرفت.

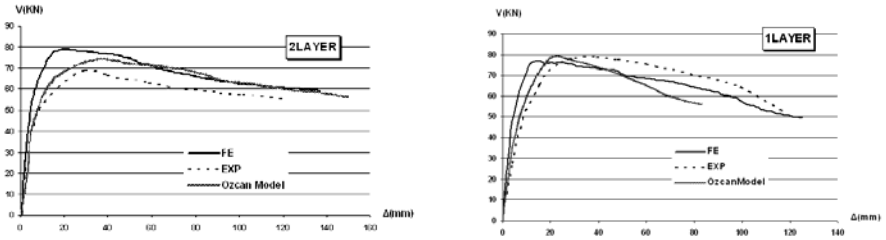
۲. مدلسازی ستون بتنی با در نظر گرفتن CFRP

جهت بررسی دقیق رفتار CFRP، مدل کاملی از ستون بتن مسلح با آرماتورهای طولی و خاموتهای عرضی و دورپیچ الیافCFRP در محدودهٔ پایین ستون توسط نرم افزار ABAQUS ، ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفت. بمنظور کالیبره کردن نتایج، از مقاله ارائه شده توسط Ozcan و گروهش استفاده شد. نمونه ها به ابعاد ۲۰۰۰*۳۵۰*۳۵۰ میلیمتر با آرماتورهای طولی 8φ18 و خاموتهای φ10@200 در تمام ارتفاع ستون، می باشند. همچنین الیاف CFRP مورد استفاده در نمونه ها دارای ضخامت ۰/۱۶۵ میلیمتر(یک لایه)و۰/۳۳ میلیمتر(دو لایه) و مدول الاستیسیته ۲۳۰۰۰۰ مگاپاسکال می باشند.[۱]در این تحقیق برای بررسی رفتار ستون تحت بار محوری و cyclic توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، آرماتورهای طولی، خاموتها، الیاف CFRP و محدودهٔ دورپیچ آن دقیقاً مطابق نمونه مدلسازی شده است و نحوه مش بندی و ابعاد مش ها بگونه ای در نظر گرفته شد که به همگرایی جوابها کمک کند. [۲]



(ج) (ب) (الف)

شکل۱- الف) نحوه مش بندی وب) نحوه چیدمان آرماتورهای طولی و خاموتها و ج) محل قرارگیری الیاف CFRP در مدل اجزای محدود.



(ب) (الف)

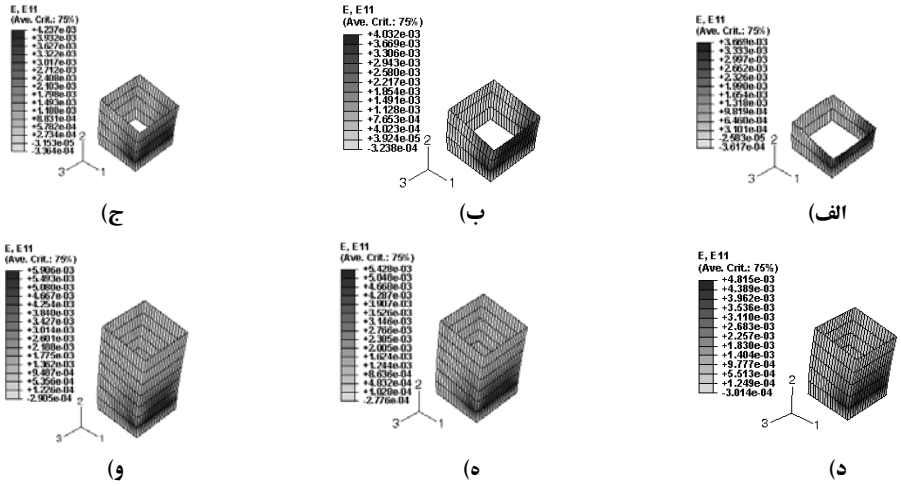
شکل۲- مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایشات Ozcan و گروهش برای نمونه با الف) یک لایه CFRP وب) دو لایه CFRP .

جهت کالیبره کردن نتایج، منحنی های نیرو-تغییر مکان برای دو نمونه استخراج گردیده و سپس با نتایج ارائه شده توسط Ozcan و گروهش مقایسه شد. ازآنجا 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 می دهد. با توجه به منحنی های بدست 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.

۳. بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر شکل پذیری 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 FRP به ضخامت ۰/۱۶۵ میلیمتر و دو لایه دور پیچ FRP به ضخامت ۰/۳۳ میلیمتر در نظر گرفته شدند و در هر نمونه دور پیچ مذکور با طولهای ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و۵۰ و۶۰ و۷۰ سانتیمتر توسط نرم افزار ABAQUS مدل شد. برای هر نمونه میزان کرنش بوجود آمده در دورپیچ استخراج گردید که در ادامه آورده شده است.

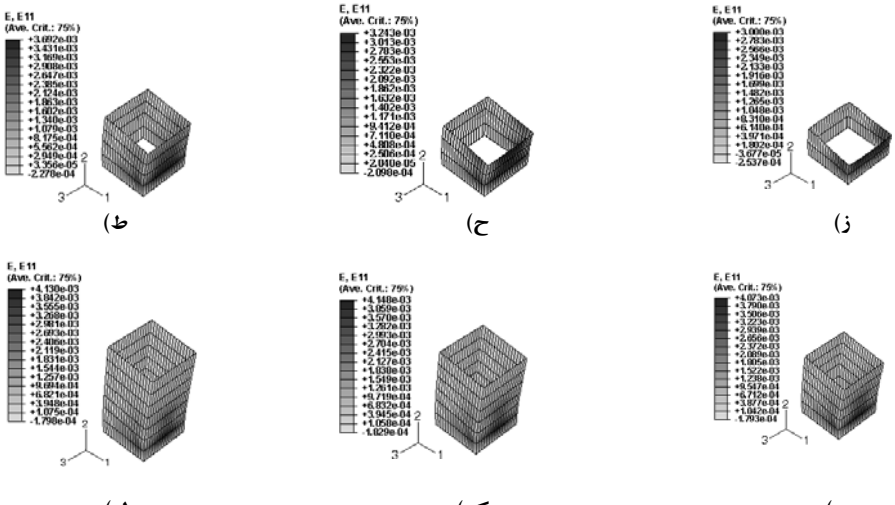
با توجه با خروجی های ارائه شده در شکل(۳)و(۴)، مشاهده می شود که با افزایش طول و ضخامت ، میزان کرنش جانبی قابل تحمل در دورپیچ افزایش می یابد. شکل (۵)، این افزایش را با تأثیر پارامترهای مورد نظر نشان می دهد.



الف) ب) ج)

د) ه) و)

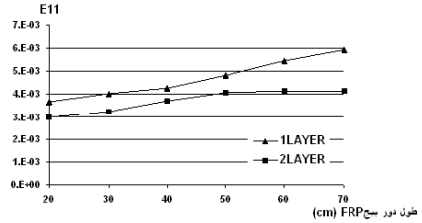
شکل۳- کانتور میزان کرنش بوجود آمده در یک لایه دورپیچ CFRP بازای طولهای: الف)۲۰، ب)۳۰، ج)۴۰، د)۵۰، ه)۶۰، و)۷۰ سانتیمتر.



ز) ح) ط)

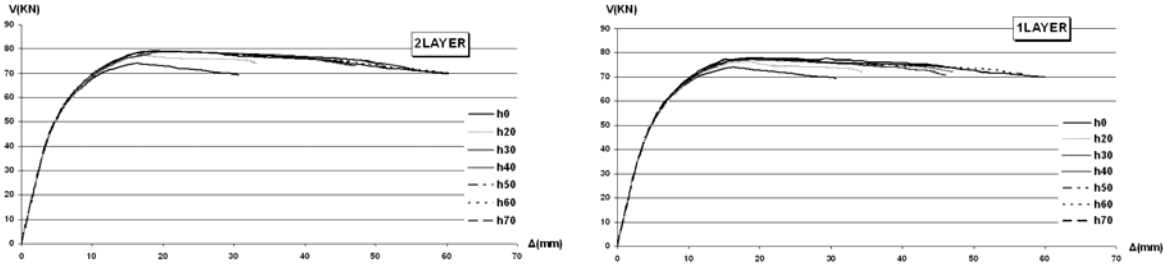
ی) ک) ل)

شکل۴- کانتور میزان کرنش بوجود آمده در دو لایه دورپیچ CFRP بازای طولهای: الف)۲۰، ب)۳۰، ج)۴۰، د)۵۰، ه)۶۰، و)۷۰ سانتیمتر.



شکل۵- مقایسه میزان کرنش بوجود آمده در دورپیچ CFRP بازای طولها و ضخامتهای مختلف دورپیچ.

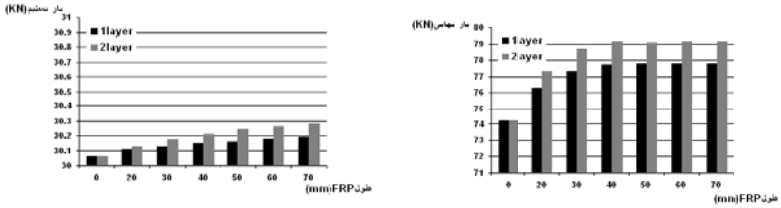
در ادامه جهت بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر شکل پذیری ستون بتن مسلح، منحنیهای برش پایه در مقابل تغییر مکان انتهای ستون، توسط نرم افزار استخراج گردید که در شکل (۶) آورده شده است.



(ب) **(الف)**

شکل۶- منحنی برش پایه- تغییر مکان انتهای ستون بازای طولها و ضخامتهای مختلف دورپیچ.

همانطور که در شکل(۷) مشاهده می شود، افزایش طول FRP تأثیر چندانی بر بار تسلیم نداشته و فقط بار ماکزیمم سازه را افزایش داده است و باعث افزایش نسبی انعطاف پذیری رفتار سازه می گردد.

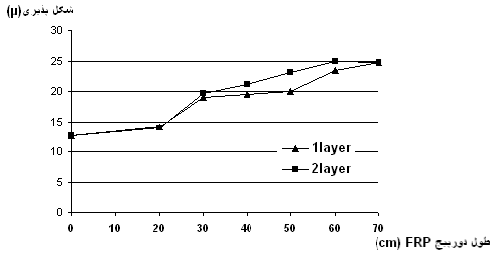


شکل۷- تأثیر طول و ضخامت دور پیچ بر بار تسلیم و بار ماکزیمم ایجاد شده در ستون.

جدول۱- خلاصه نتایج شکل پذیری و نیروهای قابل تحمل بازای تغییر در طول و ضخامت دورپیچ FRP .

تعداد لایه	طول دورپیچ FRP (cm)	بار تسلیم (KN)	تغییر مکان در بار تسلیم (mm)	ماکزیمم نیروی قابل تحمل (KN)	تغییر شکل بیشینه قبل از شکست (mm)	شکل پذیری μ = Δu/Δy	درصد افزایش نیروی قابل تحمل
۰	۰	۳۰/۰۶	۲/۴۲	۷۴/۲۲	۳۰/۷۰	۱۲/۶۹	—
۱	۲۰	۳۰/۱۱	۲/۴۲	۷۶/۳۰	۳۴/۲۸	۱۴/۱۷	۲/۸۰
۱	۳۰	۳۰/۱۳	۲/۴۲	۷۷/۲۹	۴۶/۱۶	۱۹/۰۷	۴/۱۴
۱	۴۰	۳۰/۱۵	۲/۴۲	۷۷/۷۲	۴۷/۰۵	۱۹/۴۴	۴/۷۲
۱	۵۰	۳۰/۱۶	۲/۴۲	۷۷/۷۷	۴۸/۳۷	۱۹/۹۹	۴/۷۸
۱	۶۰	۳۰/۱۸	۲/۴۲	۷۷/۷۷	۵۶/۷۸	۲۳/۴۶	۴/۷۸
۱	۷۰	۳۰/۱۹	۲/۴۲	۷۷/۷۷	۶۰/۱۰	۲۴/۸۳	۴/۷۸
۲	۲۰	۳۰/۱۱	۲/۴۲	۷۷/۳۰	۳۳/۶۹	۱۳/۹۲	۴/۱۵
۲	۳۰	۳۰/۱۷	۲/۴۲	۷۸/۷۱	۴۷/۵۹	۱۹/۶۷	۶/۰۵
۲	۴۰	۳۰/۲۱	۲/۴۲	۷۹/۱۲	۵۱/۰۶	۲۱/۱۰	۶/۶۰
۲	۵۰	۳۰/۲۴	۲/۴۲	۷۹/۰۹	۵۶/۰۳	۲۳/۱۵	۶/۵۶
۲	۶۰	۳۰/۲۶	۲/۴۲	۷۹/۱۰	۶۰/۲۶	۲۴/۹۰	۶/۵۸
۲	۷۰	۳۰/۲۸	۲/۴۲	۷۹/۱۰	۶۰/۱۰	۲۴/۸۳	۶/۵۸

همانطور که در جدول(۲) مشاهده می شود، نیروی قابل تحمل توسط ستون با افزودن یک لایه ۲۰ سانتیمتری دور پیچ FRP حدود۳ درصد و با افزودن یک لایه ۳۰ سانتیمتری دور پیچ FRP حدود ۴ درصد افزایش می یابد. در حالیکه اگر از دو لایه دور پیچ استفاده گردد این در صد نیروی قابل تحمل توسط ستون بترتیب حدود ۴ و ۶ در صد خواهد بود. همچنین شکل پذیری ستون با افزودن یک لایه ۲۰ سانتیمتری دور پیچ FRP حدود۱۲ درصد و با افزودن یک لایه ۳۰ سانتیمتری دور پیچ FRP حدود ۵۰ درصد افزایش می یابد. در صورتی که اگر از دو لایه دور پیچ استفاده گردد، بترتیب حدود ۱۰ و ۵۵ درصد تغییر را خواهیم داشت. نتایج شکل پذیری در شکل (۸) آورده شده است.



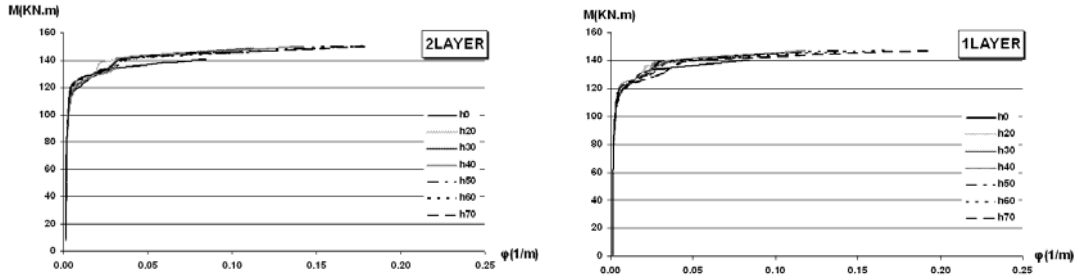
شکل۸- تأثیر تغییر طول و ضخامت دورپیچ FRP بر شکل پذیری ستون بتن مسلح .

۴. بررسی تأثیر طول و ضخامت دور پیچ CFRP بر میزان انحناء و دوران ستون بتن مسلح

با توجه به میزان برش پایه بدست آمده توسط نرم افزار ، میزان لنگر پای ستون در هر نمونه با کمک رابطه (۱) قابل محاسبه می باشد. همچنین مقادیر انحناء در هر ستون در ترازهای مختلف آن با کمک رابطه (۲) بازای کرنش های ایجاد شده در دورترین المانهای هر تراز که توسط نرم افزار ABAQUS بدست آمده، محاسبه گردید. این مقادیر در شکل(۹) آورده شده است. در این روابط L طول ستون و x بُعد ستون می باشند.

$$M = V \times L \qquad (۱)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{tu}}{x} \qquad (۲)$$



(ب) **(الف)**

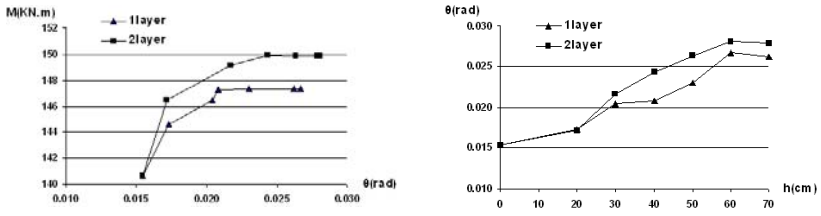
شکل ۹- مقادیر استخراج شده لنگر- انحنای ستون بتن مسلح دور پیچ شده با CFRP ، توسط نرم افزار ABAQUS.

همانطور که مشاهده می شود، با افزایش طول و ضخامت دور پیچ مقادیر لنگر و انحنای نهایی ستون افزایش می یابد. با انتگرال گیری از مقادیر انحناء در طول ستون بازای پارامترهای مختلف، ارائه شده در بخش قبل، مقادیر دوران ستون قابل محاسبه است. مقادیر مذکور در جدول (۲) آورده شده است. همچنین درشکل(۱۰) مقایسه ای بین مقادیر لنگر و دوران پای ستون بازای طولها و ضخامتهای مورد بررسی دور پیچ FRP انجام گرفته است. همانطور که در شکلها مشخص است، با افزایش ضخامت دورپیچ، ظرفیت چرخشی افزایش می یابد. این افزایش بازای یک لایه دورپیچ ۲۰ سانتیمتری حدود ۱۲ درصد و بازای یک لایه دور پیچ ۳۰ سانتیمتری حدود ۳۲ درصد می باشد. بعد از آن با افزایش هر ۱۰ سانتیمتر طول تا طول۶۰ سانتیمتر، حدود ۰/۱ تا

۰/۵ درصد به میزان ظرفیت چرخشی افزوده خواهد شد ولی با افزایش بیشتر از ۶۰ سانتیمتر عملاً افزایشی نخواهیم داشت. همچنین بازای دو لایه دور پیچ ۲۰ سانتیمتری حدود ۱۱ درصد و بازای یک لایه دور پیچ ۳۰ سانتیمتری حدود ۴۰ درصد می باشد. بعد از آن با افزایش هر ۱۰ سانتیمتر طول تا طول ۶۰ سانتیمتر، همانطور که رفتار یک لایه نشان می دهد، حدود ۰/۱ تا ۰/۵ درصد به میزان ظرفیت چرخشی افزوده خواهد شد ولی با افزایش بیشتر از ۶۰ سانتیمتر عملاً افزایشی مشاهده نمی شود.

جدول۲-خلاصه نتایج ظرفیت چرخشی و انحناء نهایی بازای تغییر در طول و ضخامت دور پیچ CFRP .

ظرفیت چرخشی θ_p	انحناء نهایی Φ_u	طول دورپیچ FRP(cm)	تعداد لایه ها
۰/۰۱۵۵	۰/۰۸۴۲	۰	۰
۰/۰۱۷۳	۰/۰۹۲۹	۲۰	۱
۰/۰۲۰۴	۰/۱۱۲۹	۳۰	۱
۰/۰۲۰۸	۰/۱۱۸۷	۴۰	۱
۰/۰۲۳۰	۰/۱۳۸۴	۵۰	۱
۰/۰۲۶۷	۰/۱۶۶۴	۶۰	۱
۰/۰۲۶۲	۰/۱۹۳۲	۷۰	۱
۰/۰۱۵۵	۰/۰۸۴۲	۰	۰
۰/۰۱۷۱	۰/۰۹۰۰	۲۰	۲
۰/۰۲۱۷	۰/۱۱۲۴	۳۰	۲
۰/۰۲۴۳	۰/۱۴۲۳	۴۰	۲
۰/۰۲۶۴	۰/۱۶۴۸	۵۰	۲
۰/۰۲۸۱	۰/۱۷۷۵	۶۰	۲
۰/۰۲۷۹	۰/۱۷۹۱	۷۰	۲



(ب) (الف)

شکل۱۰- الف) مقادیر ظرفیت چرخشی و ب) مقادیر لنگر و دوران پای ستون بتن مسلح بازای تغییر در طول و ضخامت دور پیچ CFRP.

۵. نتیجه‌گیری

در بررسی انجام شده بر روی پارامتر طول لایه های دور پیچ و تأثیر آن بر روی رفتار ستونها مشاهده گردید با افزایش پارامتر طول لایه های دورپیچ، میزان ظرفیت ستون در تحمل تغییر مکان و برش پایه افزایش می یابد همچنین در این راستا مشخص گردید افزایش طول دورپیچها تأثیر چندانی بر بار تسلیم نداشته و فقط بار ماکزیمم سازه را افزایش داده است و به این ترتیب باعث افزایش انعطاف پذیری رفتار سازه می گردد.

با استفاده از نتایج بدست آمده مشاهده شد در یک نگاه کلی گرچه تأثیر لایه ها بر روی برش پایه قابل تحمل توسط ستون چندان قابل توجه نبوده است لیکن تأثیر تعداد لایه ها بر روی نیروی قابل تحمل توسط ستون بیشتر از تأثیر طول لایه ها بوده است به عنوان مثال با افزودن یک لایه۲۰ سانتیمتری دور پیچ FRP حدود۳ درصد و با افزودن یک لایه۳۰ سانتیمتری دور پیچ FRP حدود ۴ درصد افزایش می یابد. در حالیکه در حالت استفاده از دو لایه دور پیچ این در صد افزایش نیروی قابل تحمل توسط ستون بترتیب حدود ۴ و ۶ در صد خواهد بود. همچنین نشان داده شد شکل پذیری ستون نیز با افزایش قابل توجهی همراه است لیکن استفاده از دو لایه دورپیچ بجای یک لایه دور پیچ افزایش نسبی زیادی در شکل پذیری ستون ایجاد نمی کند این نتیجه در مورد تغییر شکل بیشینه قبل از شکست نیز صادق است.

در بررسی منحنی های لنگر- انحنای حاصله از مدلسازیها مشاهده شد که با افزایش طول و ضخامت دور پیچها هم مقادیر لنگر نهایی ستون و هم مقادیر انحنای نهایی آن 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 بطوریکه بررسیها نشان داد این افزایش بازای یک لایه دور پیچ ۲۰ سانتیمتری حدود ۱۲ درصد و بازای یک لایه دور پیچ ۳۰ سانتیمتری حدود ۳۲ درصد می باشد. بعد از آن با افزایش هر ۱۰ سانتیمتر طول تا طول ۶۰ سانتیمتر،حدود ۰/۱ تا ۰/۵ در صد به میزان ظرفیت چرخشی افزوده می گردد ولی با افزایش بیشتر از ۶۰ سانتیمتر عملاً افزایشی دیده نمی شود. همچنین بازای دو لایه دور پیچ ۲۰ سانتیمتری حدود ۱۱ درصد و بازای یک لایه دور پیچ ۳۰ سانتیمتری حدود ۴۰ درصد افزایش دیده شد و بعد از آن با افزایش هر ۱۰ سانتیمتر طول تا طول ۶۰ سانتیمترحدود ۰/۱ تا ۰/۵ در صد به میزان ظرفیت چرخشی افزوده گردید ولی با افزایش بیشتر از ۶۰ سانتیمتر عملاً افزایشی مشاهده نمی شود.

۱۲. مراجع

[۱].Okan Ozcan, Baris Binici, Guney Ozcebe ”Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers”, Engineering Structures, October 2007.
[۲].ABAQUS, User`s manual; version 6.3-1. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.2002.