

تحلیل عددی ستون‌های بتن مسلح تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری

سینا خوارزمی، علیرضا راسخی صحنه

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قشم، قشم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ فروردین ۱۳۹۶
بازنگری: ۳۰ غروردین ۱۳۹۷
پذیرش: ۱۷ تیر ۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۱۷ شهریور ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

مقاوم‌سازی
الیاف پلیمری
رفتار هیستریسیس
اجزای محدود
بارنهایی

چکیده: توان‌بخشی (بهسازی)، روند و شیوه تعمیرکردن یا اصلاح کردن یک سازه به منظور دستیابی به شرایط بهره‌برداری جدید و یا افزایش عمر مفید بهره‌برداری آن است. در واقع ما در طرح و اجرای مقاوم‌سازی به دنبال حصول شرایط جدید در سازه بتنی از نظر بهره‌برداری و یا بارگذاری می‌باشیم. عملیات مقاوم‌سازی می‌تواند به علل اشتباهات و مشکلات طراحی، مشکلات و اشتباهات اجرایی، تغییر در استانداردها و آیین‌نامه‌ها، افزایش عمر مفید بهره‌برداری، تغییر کاربری سازه، افزایش طبقات و بار وارده و دیگر موارد مورد نیاز باشد. همچنین خرابی در ستون‌های بتن آرمه می‌تواند باعث ایجاد خسارات شدید و غیرقابل جبران گردد لذا بررسی مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح به وسیله الیاف پلیمری و با چیدمان‌های مختلف الیاف از مواردی است که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد، جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی از مطالعه آزمایشگاهی مناسب استفاده شده است. سپس در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس با شبیه‌سازی چندین مدل متنوع به بررسی نحوه مناسب آرایش مقاوم‌سازی الیاف پلیمری پرداخته شده است. پس از مطالعه نمودارهای هیستریسیس بار-جابجایی، نمودار پوش بار-جابجایی، بار نهایی و سهم الیاف پلیمری مدل‌ها، مشخص شد، نمونه‌هایی که الیاف پلیمری دارند دارای قابلیت تحمل بار بیشتر و جذب استهلاک انرژی بیشتر (۸۲ درصد افزایش ظرفیت) نسبت به حالت بدون الیاف می‌باشند.

۱- مقدمه

در دسترس بودن مصالح، اقتصادی بودن و دیگر ویژگی‌های ورق‌های پلیمری، باعث شده که در میان متخصصان بیش از هر مصالح دیگری گزینه‌ای مناسب برای مقاوم‌سازی باشد و با توجه به این که بیشتر مناطق کشور ایران زلزله‌خیز است و این امکان وجود دارد که در طراحی بسیاری از سازه‌ها که در سال‌های گذشته انجام گرفته، نیروی زلزله به درستی در نظر گرفته نشده باشد لذا تعداد زیادی از سازه‌ها نیاز به تقویت و مقاوم‌سازی در برابر بارهای چرخه‌ای دارند. تقویت سازه برای مقابله با ارتعاشات و نیروهای وارده در اثر زلزله با روش‌های مختلف و جدید از مباحث نسبتاً تازه در مباحث علمی است. در این تحقیق سعی شده تا رفتار ستون‌هایی تحت بارهای چرخه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، از روش اجزای محدود استفاده به عمل آمده است. مطالعات فراوانی نیز در خصوص رفتار ستون‌های بتن مسلح انجام شده است. آویرام و همکارانش^۱ به بررسی و جمع‌آوری مطالعات انجام شده گذشته در خصوص رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری لرزه‌ای دو محوری پرداختند [۱].

بلال و همکارانش^۲ به بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های فولادی پرداختند. مطالعه انجام شده آزمایشگاهی و عددی می‌باشد

و جهت انجام مطالعه عددی این مطالعه از نرم‌افزار Ansys استفاده شده است. در کل ۶ نمونه ستون با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع بررسی شدند. کلیه ستون‌ها تحت اثر بارگذاری محوری قرار گرفتند و در نهایت نمودارهای جابجایی-بار حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی با یکدیگر مقایسه شدند [۲]. دسپریز و همکارانش^۳ به بررسی مدل خرابی ستون‌های تقویت شده با الیاف پلیمری تحت اثر بار محوری و بارگذاری لرزه‌ای پرداختند. یکی از راه‌های افزایش مقاومت ستون‌های بتنی استفاده از الیاف پلیمری می‌باشد. در تحقیق انجام شده توسط این محققین تاثیر استفاده از این الیاف در بارگذاری یک جهته و بارگذاری لرزه‌ای نشان داده شده است [۳].

مازاگو و همکارانش^۴ (۲۰۱۶) به بررسی عددی ستون‌های بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با الیاف کربن تحت اثر بارگذاری محوری پرداختند. در این تحقیق جهت انجام مطالعه از نرم‌افزار Abaqus استفاده کردند و در نهایت به بررسی کرنش محوری-تنش محوری پرداختند [۴]. راجندرا و همکارانش^۵ (۲۰۰۹) به بررسی رفتار عددی ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری مونوتونیک و بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. در این مطالعه درصد فولاد مصرفی و نحوه مقاوم‌سازی الیاف متغیر انتخاب شدند و در نهایت نمودارهای کرنش محوری-تنش محوری برای تمام نمونه‌ها با هم مقایسه شدند و مشاهده شد با افزایش درصد فولاد و الیاف کربن ظرفیت مقطع نیز

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nishtman@gmail.com

3 Desprez C. et. al.

4 Mazzucco G. et. al.

5 Rajendra K.V. et. al.

1 Aviram A. et. al.

2 Belal M.F.

مطالعه از S3 که از دسته المان‌های Shell است، برای مش بندی الیاف پلیمری استفاده شده است [۷ و ۸].

۴- رفتار بتن

به منظور معرفی رابطه تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن، از رابطه‌هاگستاد^۳ اصلاح شده استفاده شده است.

رابطه ۱ و ۲ معرف شاخه صعودی این منحنی تنش- کرنش است [۹].

$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$f_c'' = k_s \times f_c' \quad (2)$$

در این روابط ε_0 کرنش نظیر تنش بیشینه است که معمولاً از آزمایش به دست می‌آید. و در غیر اینصورت مقدار $\varepsilon_0 = 0.002$ مقداری منطقی برای بتن‌های معمولی است و f_c'' تنش بیشینه در عضو بتنی است. مقادیر k_s در جدول زیر ارائه شده است. مقدار k_s در مواردی که f_c' بزرگتر از ۳۵ مگا پاسکال باشد برابر ۰/۹۲ است. شاخه نزولی منحنی هاگستاد اصلاح شده خطی است که از نقطه‌ی $(\varepsilon_0, 0.85 f_c')$ امتداد دارد. مقدار ε_u متناظر با کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن است [۹].

جدول ۱: مقادیر k_s (مگا پاسکال) [۹]

Table. 1. K_s values(Mpa)

f_c'	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
k_s	۱	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۳

۵- رفتار فولاد و نحوه آرماتورگذاری

منحنی تنش کرنش فولاد در کشش و فشار یکسان است. نرم‌افزار برای در نظر گرفتن بخش غیرخطی فولاد سه نوع مدل ارائه می‌کند، مدل ایزوتروپیک، کینماتیک، و ترکیب ایزوتروپیک با کینماتیک به صورت غیرخطی در نظر می‌گیرد. مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی مدل‌های ساخته شده در جدول ۲ آورده شده است.

افزایش پیدا می‌کند. [۵]. ریلفونزو و ناپولی^۱ (۲۰۱۲) به بررسی ستون‌های بتنی تقویت شده با الیاف کربن تحت اثر بار لرزه‌ای پرداخته شده است. در این مدل آزمایشگاهی ۹ ستون مرجع و مقاوم‌سازی شده تحت اثر بار لرزه‌ای و بار محوری در آزمایشگاه دانشگاه سالرنو مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفتند. در نهایت نمودار سایکلک بار جانبی-جانبایی، منحنی پوش بار جانبی-جانبایی، درصد جانبایی نسبی-عکس‌العمل تکیه‌گاهی و جانبایی-کرنش الیاف کربن برای نمونه‌های مدل‌سازی شده ترسیم و با یکدیگر مقایسه گردید [۶].

۲- روش تحقیق

ابتدا جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس از مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط دسپریز^۲ و همکاران استفاده شده است، پس از صحت‌سنجی با ساختن مدل‌های پیشنهادی با آرایش‌های مختلف الیاف پلیمری به بررسی عددی رفتار این ستون‌ها توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز اجزای محدود آباکوس پرداخته شد [۳].

۳- المان‌های استفاده شده

نرم‌افزار آباکوس از یک المان سه بعدی، C3D10 (از دسته المان‌های Solid)، برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح ترد نظیر بتن استفاده می‌کند. این المان سه بعدی و هشت‌گره‌ای است. این المان از نوع Solid برای تحلیل تنش یا تغییر مکان است [۷ و ۸].

المان خرپایی (المان T3D2) یکی از المان‌های سازه‌ای معمول قابل استفاده در نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. المان خرپا عضوی است دو نیرویی که نیروها فقط در گره‌های آن اعمال شده و این گره‌ها تنها دارای درجه آزادی انتقالی می‌باشند. این المان‌ها فقط دارای مقاومت محوری می‌باشند. در این المان‌ها فقط گره‌ها نیرو را انتقال می‌دهند و لذا المان‌های خرپا مقاومت خمشی و برشی از خود نشان نمی‌دهند. در واقع المان‌های خرپا اعضای سازه‌ای هستند که فقط نیروی محوری را انتقال داده و ممان و برش را انتقال نمی‌دهند. از این المان‌ها برای مدل‌های اعضای سازه‌ای که تحت نیروهای محوری کششی یا فشاری قرار دارند مانند آرماتورها استفاده می‌شود.

برنامه المان محدود آباکوس قادر است که برای آنالیزهای مدل‌هایی با ساختار مرکب استفاده شود. در واقع توسط این برنامه می‌توان مدل‌هایی با ترکیب مواد مختلف ایجاد نمود و نیز بتوان با استفاده از توانایی‌های این برنامه رفتاری مناسب در قسمت مرزی بین دو ماده برقرار کرد. المان پوسته چهار گرهی چند منظوره (المان S3) قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرال‌گیری برای به حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان آنالیز را دارا می‌باشد. از آنجایی که اثر برش عرضی در این المان لحاظ شده است، می‌توان برای مدل‌های با ساختار باریک و ضخیم استفاده نمود. در این

1 Realfonzo R., Napoli A.

2 Desprez, C.

جدول ۲: مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی [۳]

Table. 2. Specifications for longitudinal and transverse reinforcements

شماره آرماتور	خصوصیات آرماتورها					
	مقاومت تسلیم (Mpa)	کرنش تسلیم (Mpa)	کرنش سخت-شوندگی (Mpa)	مقاومت نهایی (Mpa)	کرنش نهایی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)
Φ (۱۱/۵)	۴۷۰	۰/۰۰۲۱۹	۰/۰۱۹۹۸	۵۷۳	۰/۱۲۰۰۵	۲۱۴۷۰۲
Φ (۱۹/۵)	۴۱۵	۰/۰۰۲۳۱	۰/۰۰۰۷	۶۱۵	۰/۱۲۷۲۹	۱۷۹۳۱۲

FRP دارای مقاومت کششی بسیار بالایی بوده و رفتار تنش-کرنش آن‌ها به صورت خطی می‌باشد. الیاف تا لحظه گسیختگی رفتار خطی داشته به همین منظور رفتار این الیاف در نرم‌افزار بصورت خطی مدل شده است. در جدول ۳ مشخصات الیاف پلیمری استفاده شده در مدل‌ها آورده شده است [۴].

۷- نمونه‌های مورد بررسی

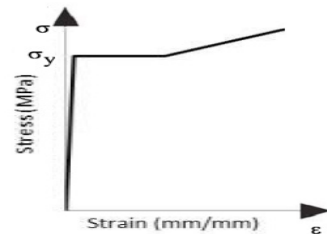
در این تحقیق یک نمونه ستون بتن مسلح که تحت اثر بارگذاری محوری و جابجایی جانبی قرار داشت جهت صحت‌سنجی مدلسازی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس که قبلاً توسط دسپریز^۱ و همکاران بررسی آزمایشگاهی شده بود در نظر گرفته شد. در نهایت ۸ نمونه دیگر با آرایش‌های الیاف پلیمری متفاوت پیشنهاد و مدل‌سازی شدند [۳].

مشخصات کلیه ستون‌های بررسی شده در جدول ۴ آورده شده است. نمونه P1 به عنوان نمونه مرجع می‌باشد و در کلیه نمونه‌ها فاصله آرماتورهای عرضی ۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. در کلیه نمونه‌ها نسبت بار محوری بر حاصل ضرب سطح مقطع ستون در مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۱۰ درصد می‌باشد (۲۴۳/۳ کیلونیوتن). نوع آرایش الیاف پلیمری در ستون دوم جدول ۴ آورده شده است که در دو حالت دورتادور ستون و بصورت سرتاسری، بصورت نوارهایی با عرض ۱۰۰ میلی‌متر و فاصله بین نوارها ۱۰۰ میلی‌متر دور تا دور ستون است. مقاومت فشاری نمونه‌ها ۳۲/۵ مگاپاسکال است. در شکل ۳ سطح مقطع ستون و نحوه بارگذاری و دستگاه آزمایش جهت صحت‌سنجی در نرم‌افزار نشان داده شده است.

۸- اتصال

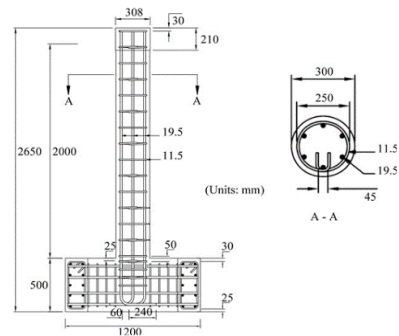
اتصال FRP به بتن برای تمامی المان‌ها از نوع قید tie است و با اعمال این نوع قید قطعات فارغ از نوع مش به یکدیگر می‌چسبند. برای تمامی نمونه‌های مدلسازی شده در برنامه از اتصال مذکور استفاده نمودیم.

در شکل ۱ منحنی تنش و کرنش الاستوپلاستیک فولاد و در شکل ۲ جزئیات آرماتورگذاری نشان داده شده است [۴].



شکل ۱: تنش

Fig. 1. Stress



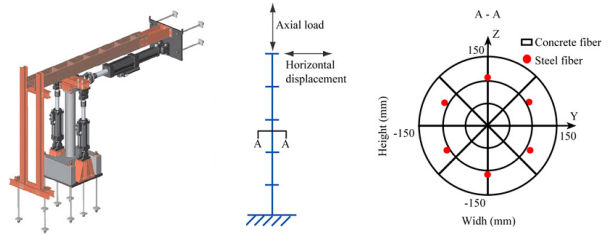
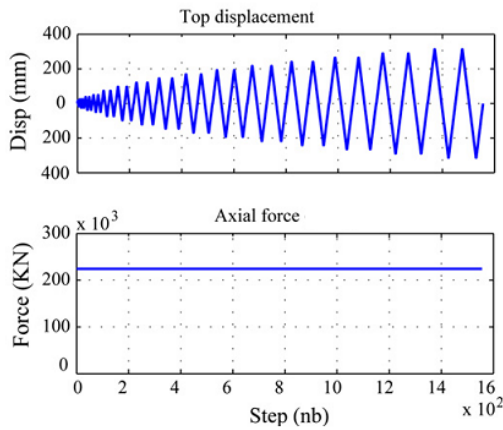
شکل ۲: کرنش

Fig. 2. Strain

۶- کامپوزیت‌های FRP

کامپوزیت‌های FRP به صورت یک لایه ارتوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. برای معرفی مشخصات مکانیکی FRP در نرم‌افزار آباکوس از گزینه Lamina استفاده شده است. شایان ذکر است که کامپوزیت‌های

¹ Desprez, C.



شکل ۳: سطح مقطع ستون و نحوه بارگذاری [۳]

Fig. 3. Column cross-section and loading method

شکل ۴: جابجایی جانبی و بارگذاری محوری [۳]

Fig. 4. Side displacement and axial loading

جدول ۴: مشخصات نمونه‌ها

Table 4. Sample specs

نام نمونه	نوع آرایش الیاف پلیمری	محل قرار گیری الیاف	تعداد لایه‌ها	تعداد نوارهای پلیمری
P1	بدون الیاف	---	---	---
P1-1	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	سرتاسری	۱	۵
P1-1-2L*	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	سرتاسری	۲	۵
P1-2	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	ابتدای ستون	۱	۳
P1-2-2L*	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	ابتدای ستون	۲	۳
P1-3	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	انتهای ستون	۱	۳
P1-3-2L*	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	انتهای ستون	۲	۳
P1-4	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	سرتاسری	۱	۱
P1-4-2L*	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	سرتاسری	۲	۱

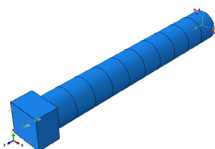
*-ضخامت دو برابر

جدول ۵: مقایسه بار نهایی ستون P1 با ابعاد المان متفاوت

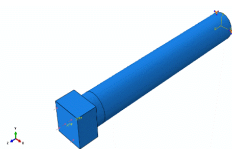
Table. 5. Comparison of the final load of column P1 with different element dimensions

element size	Pu(push) (kN)	Pu(pull) (kN)
۱۰۰×۱۰۰	۵۶/۵۸	۵۸/۰۷
۱۵۰×۱۵۰	۶۱/۱	۶۲/۷۱
۲۰۰×۲۰۰	۶۵/۸۷	۶۷/۶
۲۵۰×۲۵۰	۷۲/۴۵	۷۴/۳۶
Experimental result	۵۳	۵۲

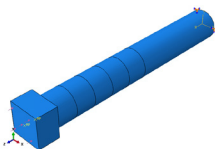
اشکال مختلف نمونه‌های پیشنهادی بصورت شکل‌های ذیل می‌باشند.



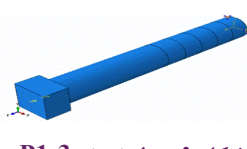
شکل ۸: مدل نمونه P1-2



شکل ۷: مدل نمونه P1-1



شکل ۱۰: مدل نمونه P1-3



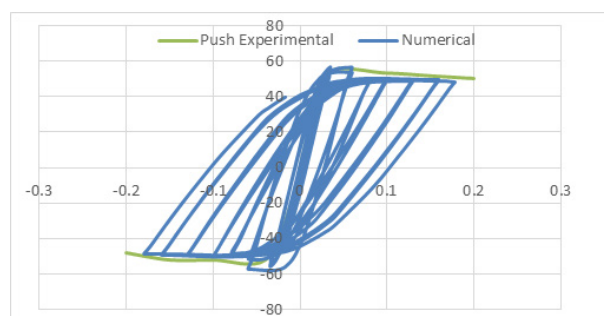
شکل ۹: مدل نمونه P1-3

۱۱- بررسی رفتار نمونه‌های پیشنهادی

با توجه به اینکه بار اعمال شده به سازه به صورت رفت و برگشتی می‌باشد، نمودار بار جابجایی بصورت هیسترسیس (حلزونی) است. نمودار هیسترسیس چون از جنس بار-جابجایی است لذا هرچه سطح زیر نمودار هیسترسیس بیشتر باشد انرژی که سازه جذب می‌کند، بیشتر است و میزان شکل‌پذیری سازه بیشتر است. در نمودار هیسترسیس تقارن نشان‌دهنده یکسان بودن رفتار نسبت به زلزله است. هرچه عضو لاغرتر باشد سطح زیر نمودار کمتر است و در تعداد سیکل کمتری گسیخته می‌شود. اشکال مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی و پوش بار-جابجایی حاصل از مطالعه

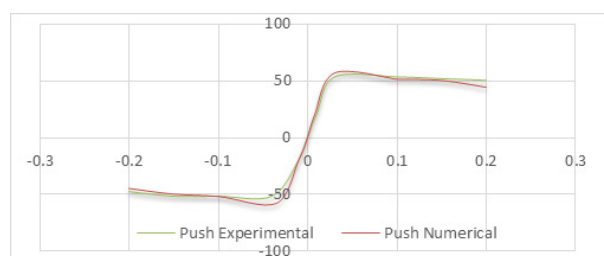
۹- بررسی رفتار ستون P1 جهت تایید مدل‌سازی

در شکل‌های ۵ و ۶ بترتیب منحنی هیسترسیس بار-جابجایی حاصل از مطالعه عددی در مقایسه با پوش بار-جابجایی حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه P1 و مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی حاصل از مطالعه عددی در مقایسه با پوش بار-جابجایی حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نمونه P1 نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 5. Comparison of displacement curve hysteresis

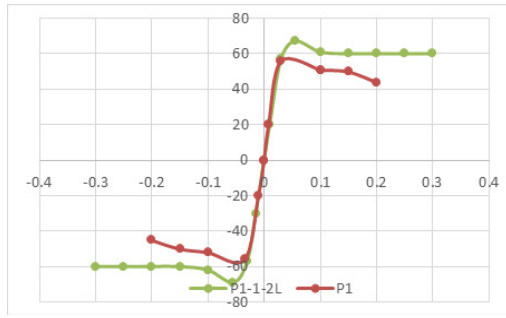


شکل ۶: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 6. Comparison of load curve displacement

۱۰- انتخاب ابعاد المان‌ها

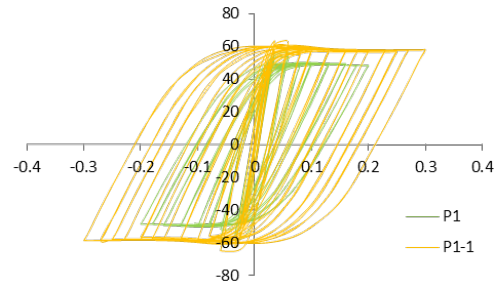
در جدول ۵ مقایسه بین بارنهایی ستون P1 با ابعاد المان متفاوت بصورت مثلی در مقایسه با نتایج مطالعه آزمایشگاهی آورده شده است. که در صورتی که ابعاد المان را کوچکتر از ۱۰۰ میلی‌متر باشد زمان تحلیل بسیار طولانی می‌گردد.



شکل ۱۴: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 14. Comparison of load curve displacement

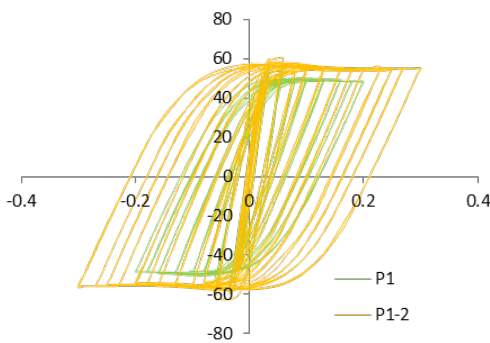
عددی نمونه‌های پیشنهادی و مقایسه منحنی هیترزیس بار-جابجایی نمونه P1 در مقایسه با منحنی هیسترسیس بار-جابجایی نمونه‌های پیشنهادی و مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی نمونه P1 در مقایسه با منحنی پوش بار-جابجایی نمونه‌ها آورده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

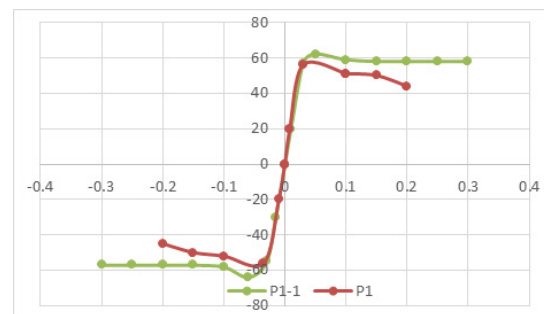
Fig. 11. Comparison of displacement curve hysteresis

همانطور که از مقایسه شکل ۱۱ مشخص است، سطح زیر نمودار هیسترسیس نمونه P1-1 بیشتر از نمونه P1 است، بنابراین انرژی که سازه P1-1 جذب می‌کند، بیشتر است.



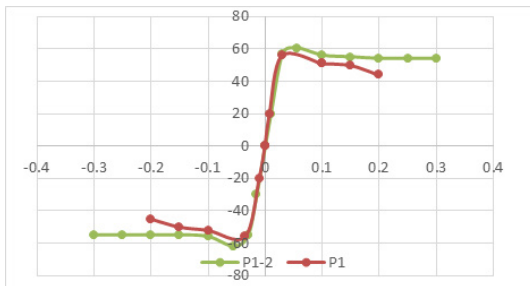
شکل ۱۵: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 15. Comparison of displacement curve hysteresis



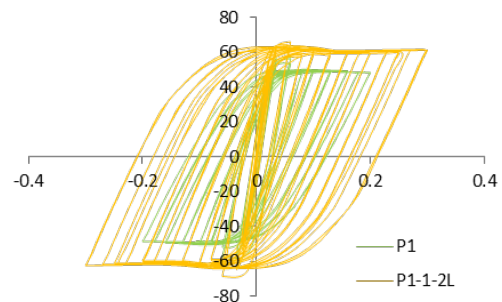
شکل ۱۲: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 12. Comparison of load curve displacement



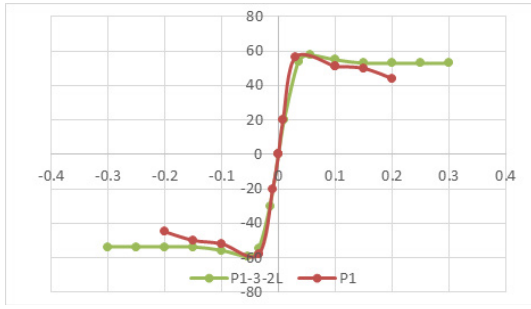
شکل ۱۶: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 16. Comparison of load curve displacement



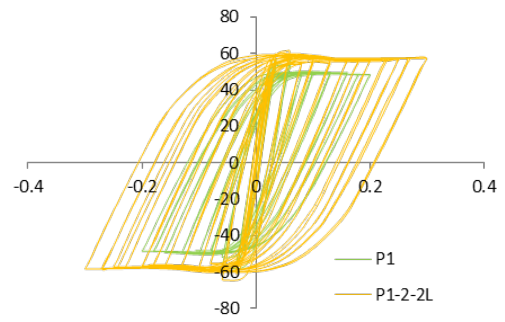
شکل ۱۳: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 13. Comparison of displacement curve hysteresis



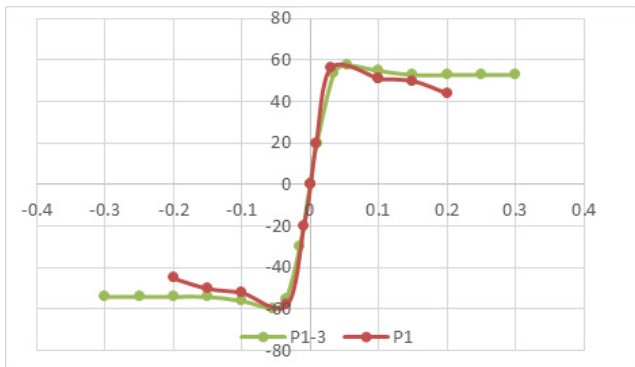
شکل ۲۰: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 20. Comparison of load curve displacement



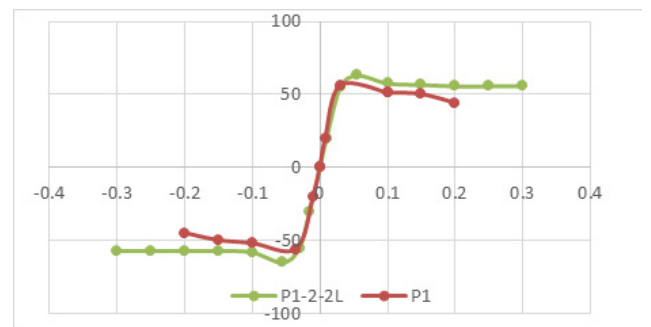
شکل ۱۷: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 17. Comparison of displacement curve hysteresis



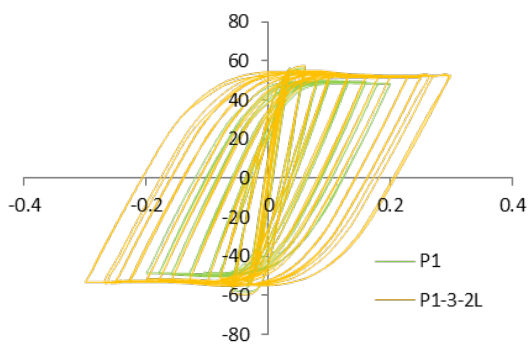
شکل ۲۱: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 21. Comparison of load curve displacement



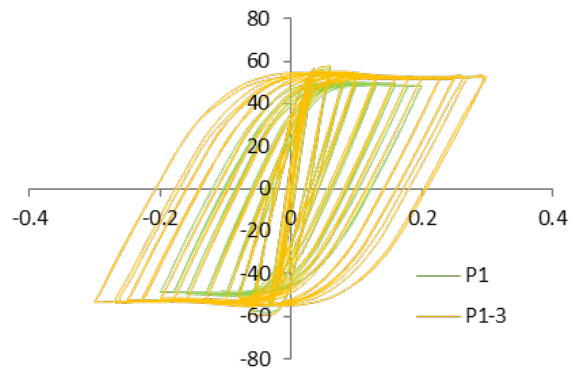
شکل ۱۸: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 18. Comparison of load curve displacement



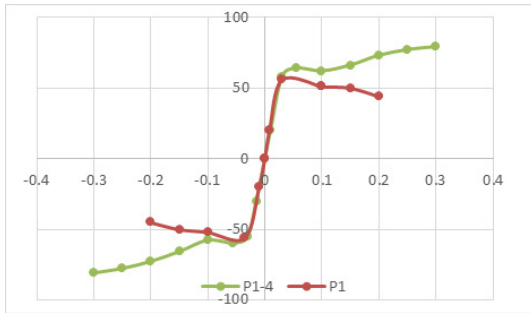
شکل ۲۲: مقایسه منحنی هیسترسیس بار-جابجایی

Fig. 22. Comparison of displacement curve hysteresis



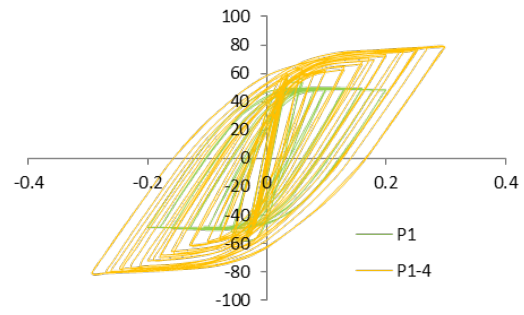
شکل ۱۹: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 19. Comparison of displacement curve hysteresis



شکل ۲۴: مقایسه منحنی پوش بار-جابجایی

Fig. 24. Comparison of load curve displacement



شکل ۲۳: مقایسه منحنی هیستریسیس بار-جابجایی

Fig. 23. Comparison of displacement curve hysteresis

جدول ۶: بار نهایی نمونه‌ها

Table. 6. The final load of samples

نام نمونه	نوع آرایش ییاف پلیمری	محل قرار گیری ییاف	تعداد نوارهای پلیمری	Push (KN)	Pull (KN)
P1	بدون ییاف	---	---	۵۶/۵۸	۵۸/۰۷
P1-1	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	سرتاسری	۵	۷۶/۱۲	۷۷/۶۷
P1-1-2L	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	سرتاسری	۵	۸۰/۵۷	۸۳/۴۴
P1-2	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	ابتدای ستون	۳	۷۰/۷۹	۷۲/۲۳
P1-2-2L	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	ابتدای ستون	۳	۷۶/۵۴	۷۹/۲۷
P1-3	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	انتهای ستون	۳	۵۸/۵۳	۵۹/۷۹
P1-3-2L	بصورت نوارهایی با عرض ۲۰۰ میلی متر و فاصله بین نوارها ۲۰۰ میلی متر دور تا دور ستون	انتهای ستون	۳	۶۰/۸۷	۶۲/۱۸
P1-4	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	سرتاسری	۱	۷۹/۱۱	۸۱/۱۷
P1-4-2L	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	سرتاسری	۱	۱۰۲/۸۱	۱۰۶/۱۶

جدول ۷: نسبت بار نهایی نمونه‌ها به نمونه P1

Table. 7. The ratio of final load of samples to sample P1

نمونه	محل قرار گیری الیاف	تعداد نوارهای پلیمری	Push (KN)	Pull (KN)	$P_{u\text{CFRP}}^{\text{Push}}$	$P_{u\text{CFRP}}^{\text{Pull}}$
P1	بدون الیاف	---	۵۶/۵۸	۵۸/۰۷	۱	۱
P1-1	سرتاسری	۵	۷۶/۱۲	۷۷/۶۷	۱/۳۴۵	۱/۳۳۸
P1-1-2L	سرتاسری	۵	۸۰/۵۷	۸۳/۴۴	۱/۴۲۴	۱/۴۳۷
P1-2	ابتدای ستون	۳	۷۰/۷۹	۷۲/۲۳	۱/۲۵۱	۱/۲۴۴
P1-2-2L	ابتدای ستون	۳	۷۶/۵۴	۷۹/۲۷	۱/۳۵۳	۱/۳۶۵
P1-3	انتهای ستون	۳	۵۸/۵۳	۵۹/۷۹	۱/۰۳۵	۱/۰۳
P1-3-2L	انتهای ستون	۳	۶۰/۸۷	۶۲/۱۸	۱/۰۷۶	۱/۰۷۱
P1-4	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	۱	۷۹/۱۱	۸۱/۱۷	۱/۳۹	۱/۳۹
P1-4-2L	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	۱	۱۰۲/۸۱	۱۰۶/۱۶	۱/۸۱۷	۱/۸۲۸

جدول ۸: سهم الیاف پلیمری از بار نهایی نمونه‌ها

Table. 8. The contribution of polymer fibers to the final load of samples

نمونه	محل قرار گیری الیاف	تعداد نوارهای پلیمری	Push (KN)	Pull (KN)	$P_{u\text{CFRP}}^{\text{Push}}$	$P_{u\text{CFRP}}^{\text{Pull}}$
P1	بدون الیاف	---	۵۶/۵۸	۵۸/۰۷	---	---
P1-1	سرتاسری	۵	۷۶/۱۲	۷۷/۶۷	۱۹/۵۴	۱۹/۶
P1-1-2L	سرتاسری	۵	۸۰/۵۷	۸۳/۴۴	۲۳/۹۹	۲۵/۳۷
P1-2	ابتدای ستون	۳	۷۰/۷۹	۷۲/۲۳	۱۴/۲۱	۱۴/۱۶
P1-2-2L	ابتدای ستون	۳	۷۶/۵۴	۷۹/۲۷	۱۹/۹۶	۲۱/۲
P1-3	انتهای ستون	۳	۵۸/۵۳	۵۹/۷۹	۱/۹۵	۱/۷۲
P1-3-2L	انتهای ستون	۳	۶۰/۸۷	۶۲/۱۸	۴/۲۹	۴/۱۱
P1-4	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	۱	۷۹/۱۱	۸۱/۱۷	۲۲/۵۳	۲۳/۱
P1-4-2L	دورتادور ستون و بصورت سرتاسری	۱	۱۰۲/۸۱	۱۰۶/۱۶	۴۶/۲۳	۴۸/۰۹

۱۲- نتیجه‌گیری

مراجع

۱. بار نهایی به دست آمده از تحلیل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای تطابق نسبتاً خوبی برای کلیه ستون‌ها (حدود متوسط ۴ درصد خطا) می‌باشد. و نمونه‌ها دارای نتایج تقریباً نزدیک با نتیجه‌ی آزمایشگاهی می‌باشند.
 ۲. نتایج عددی نشان داد که استفاده از مواد FRP سبب افزایش مقاومت نهایی در ستون‌های تقویت شده در مقایسه با ستون‌های تقویت نشده برای ستون‌هایی که از الیاف دورپیچ کامل استفاده شده تا ۸۲ درصد می‌گردد.
 ۳. حل‌های عددی نشان می‌دهد که نحوه قرارگیری الیاف تاثیر زیادی در افزایش مقاومت نهایی و جابجایی مربوطه دارد و استفاده الیاف پلیمری در پای ستون بیشترین تاثیر (۸۲ درصد) و در بالای ستون کمترین تاثیر (۷ درصد) را در میزان افزایش ظرفیت نمونه‌ها داشته است.
 ۴. نحوه قرارگیری الیاف پلیمری بصورت دورپیچ کامل و در سرتاسر ستون و با ضخامت دوبرابر بیشترین تاثیر را در بار نهایی دارد، به طوری که در نمونه P1-4-2L تا ۸۲ درصد افزایش ظرفیت باربری ایجاد شده است.
 ۵. همانطور که در شکل‌های مربوط به نمودارهای پوش مشخص است در مدلی که بیشترین دورپیچ را دارد، منحنی پوش جابجایی و بار بیشتری را نشان می‌دهد.
- [1] Aviram A., Stojadinovic B., Parra-Montesinos G.J., "High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Bridge Columns under Bidirectional Cyclic Loading", *ACI Structural Journal*, 2014, 303–312.
 - [2] Belal M.F., Mohamed H.M., Morad S.A., " Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket", *Housing and Building National Research Center*, 2015, 201-212.
 - [3] Desprez C, Mazars J, Kotronis P, Paultre P. Damage model for FRP-confined concrete columns under cyclic loading. *Engineering Structures* 2013; 48:519–531.
 - [4] Mazzucco G., Salomoni V.A., Majorana C.E., Pellegrino C., Ceccato C., "Numerical investigation of concrete columns with external FRP jackets subjected to axial loads", *Construction and Building Materials*, 2016, 590–599.
 - [5] Rajendra K.V., Barros J.A.O., Sena-Cruz J.M., "Numerical model for CFRP confined concrete elements subject to monotonic and cyclic loadings", *Composites*, 2009, 766–775.
 - [6] Realfonzo R, Napoli A. Results from cyclic tests on high aspect ratio RC columns strengthened with FRP systems. *Construction and Building Materials* 2012; 37:606-620.
 - [7] Abaqus Analysis User's Manual 2010.
 - [8] SAEDI Darian, Amir, Bahram Pour, H., Arab Zadeh, H., "ABAQUS Software Comprehensive Guide", published by Angizeh, first edition, 2011. (In Persian)
 - [9] Mousavi, Mir Naghi, Rafezi, B., Osman Zadeh, F., Ahani, A., To Determine the Model Parameters of Concrete Damage Plastic for Numerical Modeling Frames of Reinforced Concrete, the Seventh National Congress of Civil Engineering, 2013. (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Kharazmi, A. R. Rasekhi Sahneh, Comparative Study of the Improvement of Cyclic Reinforced Concrete Columns with Different Layouts of Polymer Fibers, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1177-1186.

DOI: 10.22060/ceej.2018.12720.5256

