

تأثیر حالت‌های محصورشدگی حاصل از کامپوزیت CFRP بر مقاومت و شکل‌پذیری ستون بتن مسلح لاغر دایروی بر اساس نتایج تحلیل غیرخطی

داود مستوفی نژاد^{۱*}، حسن سعادت‌مند^۲

۱- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲- مربی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد خوراسگان (اصفهان)

*اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

dmostofi@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: فروردین ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

چکیده- در این تحقیق نتایج تحلیل غیرخطی انجام شده برای ستونهای بتن مسلح محصور در کامپوزیت FRP در موقعیتهای مختلف پوشش کامپوزیت در ارتفاع ستون، برای نسبتهای مختلف نیروی جانبی به بار محوری، مطالعه می‌شود. برای ارزیابی افزایش مقاومت در حالت‌های مختلف محصور بودن ارتفاع ستون، با استفاده از تحلیلهای انجام شده، نمودارهای بار - لنگر نمونه‌های مختلف بررسی شده است. نسبت سطح کل به سطح قسمت خطی نمودار لنگر - دوران در هر نمونه به‌عنوان معیار شکل‌پذیری تعریف شده است. بر این اساس، شکل‌پذیری نمونه محصور در پوشش کامپوزیتی نسبت به شکل‌پذیری ستون بتن آرمه متداول - که فقط هسته آن در آرماتور ماریچ محصور شده - در وضعیت متوازن نمونه‌ها برای پوشش کامل ارتفاع ستون برابر ۳/۰۶ و برای حالتی که پوشش FRP فقط در نواحی پلاستیک ستون انجام شده، برابر ۱/۰۹ به‌دست آمده است. این در حالی است که نسبت سطح کل زیر نمودار لنگر - دوران برای این دو نمونه نسبت به ستون بتن آرمه متداول و در وضعیت متوازن نمونه‌ها، به‌ترتیب برابر ۵/۹۹ و ۳/۷۵ است. همچنین در تحقیق حاضر با تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن اثر تغییر شکلهای بزرگ، تأثیر محصورشدگی حاصل از کامپوزیت FRP، بر بار کماتش ستون ارزیابی شد. برای این منظور، ستون تحت بار محوری همزمان با بار جانبی بسیار اندک بارگذاری شد تا مرحله‌ای که تغییر مکان جانبی بزرگی به‌طور ناگهانی در ستون ایجاد شود. بر این اساس، محصور کردن تمام ارتفاع ستون در پوشش FRP، سبب افزایش ۶۴/۴٪ بار کماتش می‌شود.

کلید واژگان: ستون بتن مسلح، محصورشدگی، کامپوزیت CFRP، بار کماتش، تحلیل غیرخطی، شکل‌پذیری.

۱- مقدمه

جانبی انجام شده است. در دسته اول، ستونهای بتن مسلح تحت بار محوری ثابت در ترازهای مختلف، تحت تأثیر بارگذاری جانبی متناوب قرار گرفته‌اند [۱] تا [۳]؛ در دسته دوم بار محوری خارج از محور اعمال شده است [۴، ۵]. در برخی از

در سالهای اخیر براساس نحوه بارگذاری، دو دسته تحقیقات آزمایشی در زمینه تأثیر محصورشدگی حاصل از کامپوزیت FRP بر ستونهای بتن مسلح در شرایط ترکیب بار محوری و

که کل ارتفاع آن در پوشش کامپوزیتی محصور شده، بررسی شده و در کنار بار کماتش ستون غیرمحصور، ارائه شده است. در این زمینه، بر اساس نتایج تحلیل غیرخطی ستونهای بتنی محصور در حالت‌های گوناگون محصورشدگی حاصل از کامپوزیت FRP و آرماتور دورپیچ، برای ترکیبهای بار جانبی (F) و بار محوری (P) با نسبت‌های گوناگون F/P ، به شیوه نوینی مدلسازی شده است [۶]، منحنیهای اثر توأم بار - لنگر برای هر نمونه تعیین شده است. در این تحقیق همچنین منحنیهای لنگر- دوران و انحنای نظیر گسیختگی در ارتفاع ستون در وضعیت متوازن نمونه‌ها، ارائه و مقایسه شده است. صحت نتایج ارائه شده در [۶] اثبات شده است.

۳- نمونه‌های تعریف شده در ارزیابی نحوه اعمال محصورشدگی بر ستون

ستون بتن آرمه مدل شده دارای ارتفاع برابر ۳ متر و قطر برابر ۴۰۰ میلی‌متر با $f'_c = 32 \text{ MPa}$ و آرماتور طولی با $\rho = 1/5$ ، دارای شرایط تکیه‌گاهی یک سر گیردار و یک سر گیردار هدایت شده است. سه نوع ستون برای بررسی اثر اعمال محصورشدگی در حالت‌های مختلف، معرفی می‌شود: (۱) ستون بتن مسلح که هسته آن در آرماتور مارپیچ محصور شده - به‌عنوان ستون بتن مسلحه متداول شناخته می‌شود و با S-a نامگذاری شده است؛ (۲) ستون بتن آرمه متداول (شماره ۱) که سرتاسر ارتفاع آن در پوشش کامپوزیت CFRP با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر محصور شده و با C-a نامگذاری شده است؛ (۳) ستون بتن مسلحه متداول که فقط در یک ششم ارتفاع در بالا و پایین ستون با نام نواحی پلاستیک، با کامپوزیت CFRP به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر محصور شده و با H-a نامگذاری شده است. پارامتر a در نامگذاریهای فوق، معرف نسبت F/P اعمال شده بر ستون است. همچنین نتایج ستون بتن مسلح متداول بدون محصورشدگی که فقط برای مقایسه ارائه شده، با

این تحقیقات، پوشش کامپوزیتی در سرتاسر ارتفاع ستون، و در برخی دیگر، پوشش کامپوزیتی در ناحیه پلاستیک ستون اعمال شده، اما تاکنون تحقیق جامعی به‌منظور مقایسه تأثیر پوشش کامل و پوشش در نواحی پلاستیک ستون در شرایط یکسان انجام نشده است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی ستون [۶] و همچنین نتایج آزمایشگاهی [۴]، در ستونهایی که تمام ارتفاع آن با FRP محصور شده، با افزایش نسبت بار جانبی به بار محوری (افزایش نسبت F/P) - که متناظر با کاهش بار محوری مقاوم است - کرنش نهایی جانبی FRP کاهش می‌یابد. لذا در این ستونها، فشار محصورشدگی حاصل از FRP با افزایش بار محوری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در ستونهایی که فقط در نواحی مفصل پلاستیک با کامپوزیت محصور شده‌اند، با افزایش F/P و تغییر وضعیت باربری ستون از بار محوری خالص تا بار نظیر حالت متوازن در مقطع ستون، کرنش حلقوی نهایی در پوشش FRP افزایش می‌یابد و در مقابل، با کاهش بیشتر بار محوری مقاوم (یعنی در حالتی که $P < P_b$)، کرنش حلقوی نهایی کامپوزیت کاهش می‌یابد. لذا محصور کردن نواحی مفصل پلاستیک ستونهایی که در معرض بار محوری بسیار زیاد و لنگر خمشی اندک قرار دارند، تأثیر چندانی بر افزایش محصورشدگی بتن در این نواحی ندارد [۶].

۲- هدف تحقیق

بررسی تأثیر محصور شدن ستون بتن مسلح در کل ارتفاع و تأثیر محصور شدن محدود (فقط در نواحی پلاستیک نزدیک به اتصال در پوشش کامپوزیت CFRP)، هدف این تحقیق است. برای نیل به این هدف بر اساس تحلیل غیرخطی ستونهای بتن مسلحی که تحت تأثیر شیوه‌های متفاوت محصورشدگی قرار گرفته‌اند، منحنیهای بار- لنگر و لنگر- دوران برای هر نمونه به‌دست آمده و با استفاده از آنها، تأثیر حالت‌های مختلف محصورشدگی بر مقاومت و شکل‌پذیری ستون بررسی می‌شود. همچنین بار کماتش ستون بتن مسلحی

ستون در نیمی از ارتفاع آن، نوشته شده است:

$$e_1 = F/P \times L/2 \quad (1)$$

$$e_2 = \delta/2 \quad (2)$$

در شکل‌های ۱- الف و ۲- الف، خطوط مربوط به روند افزایش بار و لنگر تکیه‌گاه تا رسیدن به بار نظیر مقاومت مقطع ستون، به ترتیب برای نمونه‌های C-a و H-a مشاهده می‌شود. با تقسیم کردن محورهای مربوط به بار و لنگر، به ترتیب بر h^2 و h^3 ؛ شیب خطوط مذکور برابر نسبت e/h است (h قطر ستون است). با توجه به لاغر بودن ستون، تغییر مکان جانبی ایجاد شده در حین بارگذاری، افزایش قابل توجهی را در نسبت e/h ایجاد می‌کند. چنانچه ستون غیر لاغر (با نسبت L/r کوچک) بررسی شود، نسبت e/h در حین بارگذاری تقریباً ثابت می‌ماند. با بررسی نواحی ۱ و ۲ در این دو شکل، تفاوت و نحوه محاسبه لنگر اولیه و لنگر ثانویه اعمال شده بر ستون لاغر مشخص می‌شود.

در شکل ۱- ب منحنی اثر توأم بار - لنگر برای نمونه‌ای که در پوشش کامل کامپوزیت FRP قرار دارد (نمونه‌های C-a) و در شکل ۲- ب برای نمونه‌ای که فقط در نواحی پلاستیک در FRP محصور شده (نمونه‌های H-a)، با منحنی اثر توأم ستون بتن مسلحی که فقط تحت فشار محصورکنندگی آرماتور ماریچ قرار گرفته (نمونه‌های S-a)، و همچنین منحنی اثر توأم ستون بتن مسلح بدون در نظر گرفتن اثر محصورشدگی (نمونه‌های B-a)، ارائه و مقایسه شده است. در این دو شکل دو نمودار بار - لنگر برای ستون بتن مسلح متداول - که هسته آن در آرماتور ماریچ محصور شده - رسم شده است. یکی از نمودارها برای رفتار بتن محصور با استفاده از مدل محصورشدگی ماندن [۷] محاسبه و ترسیم شده است. نمودار دیگر با استفاده از نتایج تحلیل غیرخطی ارزیابی و ارائه شده است. نحوه مدلسازی در [۶] آورده شده است. مقایسه این دو منحنی بیانگر دقت در مدلسازی غیرخطی است. بر اساس نتایج تحلیل غیرخطی، بار محوری نظیر وضعیت

نام B-a معرفی شده است. کامپوزیت استفاده شده دارای مدول الاستیسیته در جهت الیاف برابر $17GPa$ است که بر اساس معیار شکست تسای - وو، برای نمونه دوم دارای کرنش پارگی حلقوی برابر 0.0078 است. نحوه مدلسازی اجزای محدود این سه نمونه، و نحوه تعیین پارامترهای مورد نیاز برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن در شرایط مختلف محصورشدگی در [۶] بیان و اثبات شده است.

۴- منحنی اثر توأم بار محوری - لنگر تکیه‌گاهی

برای به دست آوردن منحنیهای اثر توأم بار- لنگر، هر نمونه با نسبت‌های گوناگون F/P تحلیل شده است. در آخرین مرحله همگرا شدن تحلیل در مراحل بارگذاری، لنگر تکیه‌گاه و عکس‌العمل محوری آن تعیین شده است. بر این اساس زوج بار و لنگر مقاوم قابل تحمل مقطع ستون لاغر محصور به دست می‌آید.

با توجه به نحوه بارگذاری، لنگر ایجاد شده در تکیه‌گاه شامل دو جزء است؛ یکی لنگر اولیه (M_1) که حاصل تأثیر نیروی جانبی F در ارتفاع ستون است و دیگری لنگر ثانویه (M_2) که بر اثر نیروی محوری P بر تغییر مکان جانبی (δ) ایجاد شده در ستون، به وجود آمده است (اثر $P - \delta$). با توجه به در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ در نمونه‌های مدلسازی شده، عکس‌العمل لنگر تکیه‌گاه (M) در نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی برابر $M_1 + M_2$ به دست آمده است.

چنانچه نسبت لنگر تکیه‌گاه به بار محوری را برابر e در نظر بگیریم، بار ترکیبی حاصل از نیروی جانبی F و بار محوری P ، همان لنگری را ایجاد می‌کند که بار محوری P با خروج از مرکزیت e نسبت به مرکز سطح مقطع ستون ایجاد کرده است. بر این اساس خروج از مرکزیت e - شامل مقادیر e_1 و e_2 به ترتیب متناظر با لنگر اولیه و لنگر ثانویه - با توجه به شرایط گیرداری دو سر ستون، با جمع کردن روابط (۱) و (۲) حاصل می‌شود. توجه شود که این روابط بر اساس مدلسازی

تحلیل غیرخطی نمونه که در ادامه آنها را شرح می‌دهیم.

۵-۱- محاسبه بار کمانش بر مبنای روابط آیین‌نامه‌ای

مطابق آیین‌نامه ACI 318، بار کمانش (P_{cr}) ستون با استفاده از رابطه اولر یعنی رابطه (۳) و در نظر گرفتن روابطی برای محاسبه سختی مؤثر ستون به دست می‌آید. در این رابطه برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن، سختی مؤثر (EI_e) بدون توجه به اثر محصورشدگی بتن با استفاده از رابطه (۴) یا رابطه (۵) محاسبه می‌شود. در این روابط I_s و I_g به ترتیب ممان اینرسی مقطع بتنی و ممان اینرسی آرماتورهای طولی مقطع نسبت به محور مرکزی مقطع است. β_d در رابطه (۴) به منظور در نظر گرفتن اثر خزش به کار رفته و برابر $0/6$ در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته فولاد (E_s) در نمونه مورد بررسی، برابر 211250 MPa و مدول الاستیسیته بتن (E_c) بر اساس پیشنهاد احمد و شاه [۸] با $f'_c = 32 \text{ MPa}$ ، برابر 22345 MPa ($\sqrt{f'_c}$) است. با توجه به $\rho = 1/5$ ، بر اساس رابطه (۴)، برابر $P_{cr} = 792 \text{ MN}$ و بر اساس رابطه (۵)، برابر $P_{cr} = 7/69 \text{ MN}$ محاسبه شده است:

$$P_{cr} = \pi^2 EI_e / (kL)^2 \quad (3)$$

$$EI_e = (0/2 E_c I_g + E_s I_s) / (1 + \beta_d) \quad (4)$$

$$EI_e = 0/25 E_c I_g \quad (5)$$

۵-۲- محاسبه بار کمانش با استفاده از تحلیل غیرخطی

برای محاسبه بار کمانش به روش اجزای محدود، از تعریف بار کمانشی استفاده شده است. بدین منظور بار محوری همراه با بار جانبی بسیار اندک با نسبت F/P برابر 10^{-6} به ستون اعمال می‌شود. در مرحله‌ای از بارگذاری، نیروی جانبی اندک، سبب ایجاد تغییر شکل بسیار بزرگی در ستون می‌شود؛ بار محوری نظیر این مرحله، به عنوان بار بحرانی ستون معرفی می‌شود.

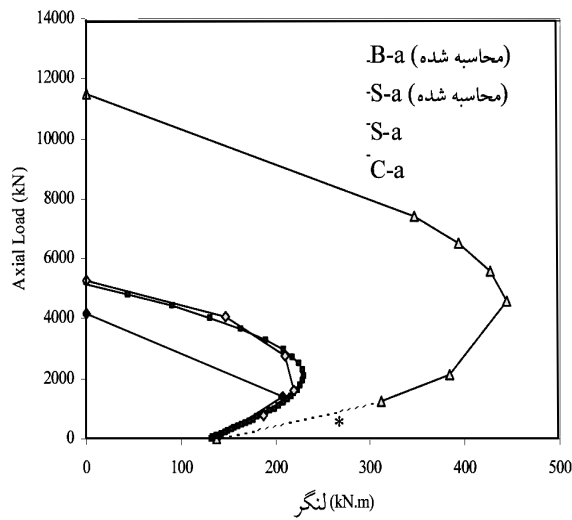
متوازن ستون برای ستون با پوشش کامل در ارتفاع و برای ستون با پوشش در نواحی پلاستیک، به ترتیب $3/3$ و $2/19$ برابر بار محوری نظیر وضعیت متوازن ستون بدون در نظر گرفتن محصورشدگی به دست آمده است.

لازم است ذکر شود که در تعیین نقطه مربوط به خمش خالص در منحنی اثر توأم بار - لنگر، بر اساس نتایج آزمایش‌های سایر محققان [۵، ۸، ۹] - که برای محصورشدگی از نوع غیرفعال ارائه شده - و همچنین روند کاهش کرنش حلقوی مشاهده شده از تحلیل غیرخطی ستون [۶]، فرض شده که محصورشدگی بتن ناحیه فشاری در وضعیت خمش خالص، بسیار اندک بوده و از آن صرف نظر می‌شود. لذا نقطه مربوط به خمش خالص برابر با مقاومت خمشی ستون ساده، در نظر گرفته شده است.

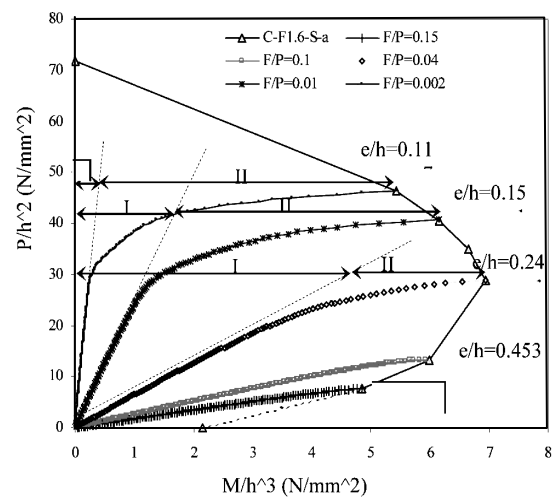
۵-۳- تأثیر محصور کردن کل ارتفاع ستون

در پوشش FRP بر بار کمانش ستون

برای بررسی اثر محصورشدگی بر بار کمانش، دو نمونه بررسی شده است. یکی نمونه B که مربوط به ستون بدون آرماتور ماریچ و بدون کامپوزیت FRP است، یعنی ستون بتن مسلح بدون محصورشدگی؛ و دیگری نمونه C که هسته آن، بتن مسلح محصور در آرماتور ماریچ بوده و همچنین کل ارتفاع ستون در کامپوزیت FRP با ضخامت $1/6$ میلیمتر محصور است. بر اساس آیین‌نامه ACI 318، در حالت با حرکت جانبی، ستون با kL/r بزرگتر از ۲۲ به عنوان ستون لاغر شناخته می‌شود. k ضریب طول مؤثر بوده و مقدار آن برای ستون یک سر گیردار و یک سر گیردار هدایت شده برابر ۱ است. L طول آزاد ستون در اینجا برابر ۳ متر و r شعاع ژیراسیون مقطع ستون که مطابق آیین‌نامه برای مقطع دایروی برابر یک چهارم قطر و برای این نمونه برابر $0/1$ متر است. برای ستون بتن مسلح با ابعاد مذکور، ضریب لاغری برابر ۳۰ است. بار کمانش ستون به دو روش محاسبه شده است. یکی با استفاده از روابط ارائه شده در آیین‌نامه و دیگری با استفاده از



(ب)



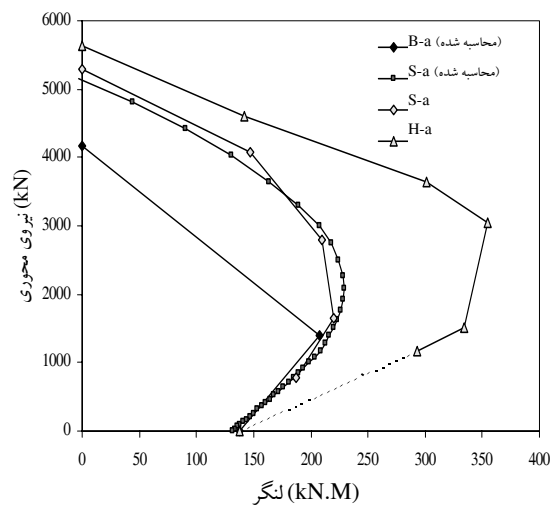
(الف)

* این قسمت از منحنی بر مبنای عدم تأثیر محصورشدگی بر رفتار خمشی خالص، ترسیم شده است.

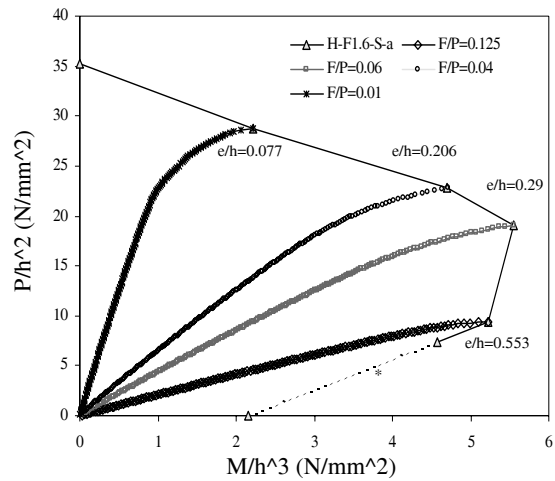
^I متناظر با لنگر اولیه مقاوم ستون است.

^{II} متناظر با لنگر حاصل از تأثیر نیروی محوری بر تغییر مکان جانبی ستون است.

شکل ۱ نمودار اثر توأم بار- لنگر تکیه‌گاهی نمونه C-a؛ (الف) نمودار نرمالیزه همراه با خطوط e/h ؛ (ب) مقایسه با نمودارهای نمونه فقط محصور در آرما تور مارییج و نمونه غیرمحصور



(ب)



(الف)

* این قسمت از منحنی بر مبنای عدم تأثیر محصورشدگی بر رفتار خمشی خالص، ترسیم شده است.

شکل ۲ نمودار اثر توأم بار- لنگر تکیه‌گاهی نمونه H-a؛ (الف) نمودار نرمالیزه همراه با خطوط e/h ؛ (ب) مقایسه با نمودارهای

نمونه فقط محصور در آرما تور مارییج و نمونه غیرمحصور

۳- ب تغییرات انحنا در ستون و تغییر مکان متناظر را در لحظه کمانش ستون نشان می‌دهد:

$$EI_e = M/\phi \quad (6)$$

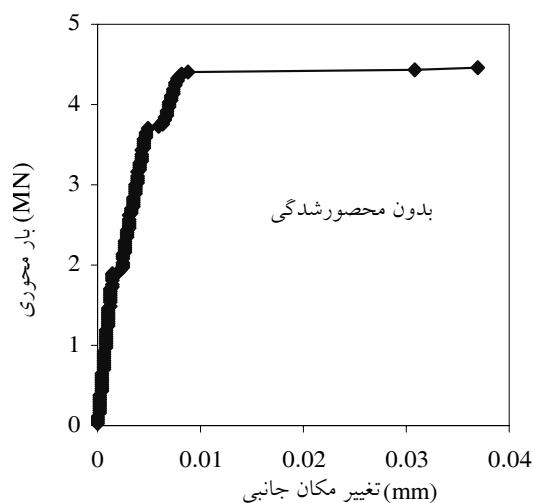
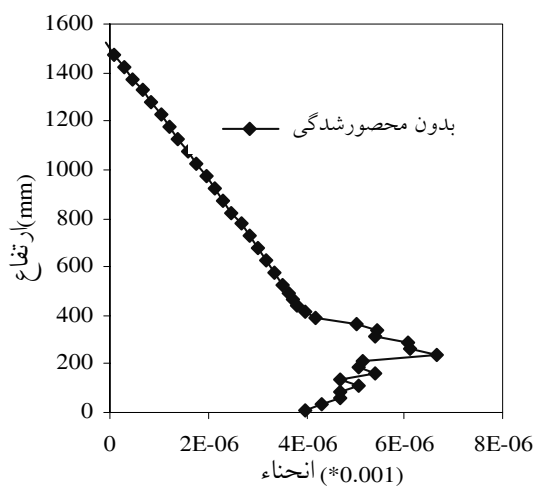
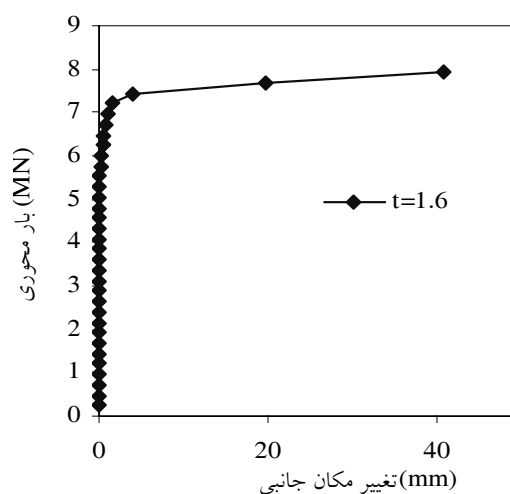
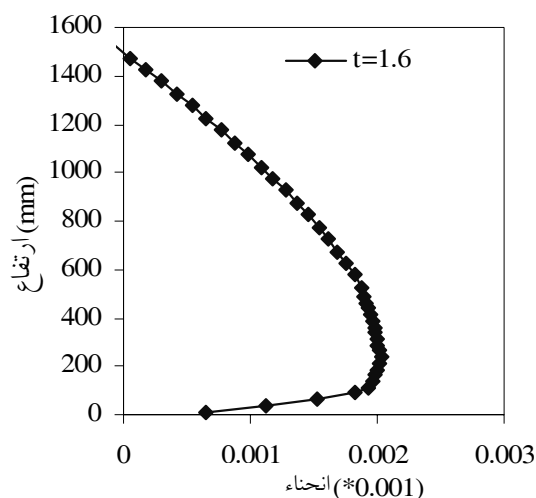
با استفاده از سختی محاسبه شده و رابطه اولر، بار کمانش محاسبه شده است. نحوه محاسبه انحنای مقاطع در ارتفاع ستون در ادامه بیان می‌شود. بر این اساس بار کمانش نمونه C برابر $7/9MN$ ، و برای نمونه بدون اعمال محصورشدگی (نمونه B) برابر $4/57MN$ تعیین شده است. این مقادیر که با استفاده از رابطه اولر و محاسبه سختی مؤثر بر مبنای تحلیل غیرخطی محاسبه شده، با بار بحرانی که به‌طور مستقیم از تحلیل غیرخطی بر اساس منحنیهای بار - تغییر مکان به‌دست آمده، در جدول ۱ مقایسه شده که نزدیک بودن مقادیر بار بحرانی مذکور، بیانگر دقت محاسبه بار بحرانی به روش اجزای محدود است. در این جدول، همچنین بار بحرانی محاسبه شده از روابط آیین‌نامه‌ای ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که محصور کردن ستون در $1/6$ میلیمتر از پوشش کامپوزیتی CFRP و با در نظر گرفتن محصورشدگی حاصل از آرماتور مارپیچ، سبب افزایش ۶۰ درصدی بار بحرانی ستون بتن مسلح بدون در نظر گرفتن اثر محصورشدگی بر بتن شده که افزایش قابل ملاحظه‌ای است.

بر اساس منحنیهای بار محوری - تغییر مکان جانبی شکل ۳- الف - که حاصل بارگذاری ستون به روش مذکور است - بار بحرانی برای ستون محصور در کامپوزیت FRP با ضخامت $1/6$ میلیمتر، یعنی نمونه C-a، برابر $7/44MN$ است. نحوه در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن محصور شده، در [۶] ارائه شده است. برای نمونه B-0 که ستون بدون آرماتور مارپیچ و بدون کامپوزیت FRP است، تنها بر اساس رفتار بتن با مقاومت تک‌محوره $32MPa$ ، بار بحرانی برابر $4/57MN$ به‌دست آمده است. در این منحنیها نقطه مربوط به آغاز تغییر شکل پلاستیک در رفتار آرماتور و رفتار بتن محصور و غیرمحصور، با اندکی کاهش، در شیب نمودار بار - تغییر مکان منحنی مشخص شده است. این تغییر شکل اندک، ناشی از رفتار غیرخطی مصالح ستون است و نباید با بار بحرانی اشتباه شود.

برای این دو نمونه همچنین سعی شد بار بحرانی با استفاده از رابطه اولر رابطه (۳) نیز محاسبه شود. تنها مجهول این رابطه، سختی مؤثر ستون (EI_e) است که لازم است با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی، EI_e در لحظه کمانش برای دو نمونه مذکور به‌دست آید. بر این اساس در مرحله‌ای از بارگذاری که بر اثر بار جانبی اندک، تغییر مکان جانبی بزرگی در ستون آغاز شده، انحنای حداکثر (ϕ) ایجاد شده در ستون و لنگر ایجاد شده در مقطع مربوط به انحنای حداکثر، محاسبه شده است. آنگاه با استفاده از رابطه (۶)، سختی مؤثر ستون تعیین شد. شکل

جدول ۱ مقایسه بار کمانش به‌دست آمده از تحلیل غیرخطی، محاسبه شده بر اساس رابطه اولر با استفاده از انحنای به‌دست آمده از تحلیل غیرخطی و محاسبه شده بر اساس آیین‌نامه (اعداد برحسب MN است)

نمونه	تحلیل غیرخطی	رابطه اولر و انحنا	آیین‌نامه	
			رابطه (۲)	رابطه (۳)
C	۷/۴۴	۷/۹	-	-
B	۴/۴	۴/۵۷	۶/۹۲	۷/۶۹



(ب)

(الف)

شکل ۳ الف) تغییر مکان ناگهانی ایجاد شده در بار بحرانی؛ ب) تغییرات انحنای در نیمه از ارتفاع در لحظه کمانش ستون

دوران وسط ستون، نسبت به ابتدای آن است. به دلیل صفر بودن دوران در ابتدای ستون، این مقدار برابر با دوران وسط ستون در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه انحنای (ϕ) برای هر مقطع در ارتفاع ستون در مرحله نهایی بارگذاری، از کرنش ایجاد شده در آرماتورهای طولی مقطع استفاده شده است. از آنجاکه نمودار تغییرات کرنش در آرماتورهای طولی مقطع

۶- نحوه محاسبه تغییرات انحنای مقطع در ارتفاع ستون

منحنی تغییرات انحنای در ارتفاع ستون، یکی از نمودارهایی است که به منظور بررسی رفتار ستون مفید است. سطح زیر این نمودار از ابتدا تا وسط ستون، معادل تغییر مکان جانبی وسط ستون است و لنگر اول سطح آن نسبت به وسط ستون برابر با

$$\theta = \frac{\Delta}{l} \quad (۸)$$

در جدول ۲ دوران وسط ارتفاع ستون در وضعیت متوازن برای سه نمونه C-۰/۰۴، H-۰/۰۶ و S-۰/۰۸ با مقادیر سطح زیر نمودار انحنا نظیر همان وضعیت بارگذاری که از شکل‌های ۵-الف تا ۵-ج به دست آمده، مقایسه شده است. دوران محاسبه شده بر اساس سطح زیر نمودار انحنا ارتفاع ستون، در حدود ۴٪ کمتر از دورانی است که مستقیماً محاسبه شده. دلیل این خطای اندک، دقت خوب تحلیل غیرخطی است.

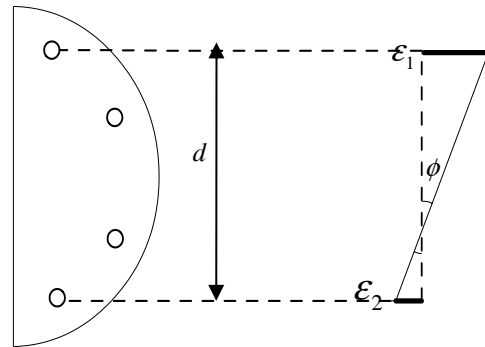
جدول ۲ مقادیر دوران در وضعیت متوازن ستون

نمونه	محاسبه دوران به روش مستقیم (rad)	دوران بر اساس سطح زیر نمودار انحنا (rad)
C-۰/۰۴	۰/۰۳۵۲۴	۰/۰۳۴۶
H-۰/۰۶	۰/۰۲۷۶	۰/۰۲۷۱
S-۰/۰۸	۰/۰۱۲۴۷	۰/۰۱۲۰

۸- تعریف معیار شکل‌پذیری

تعامل بار و لنگر اعمال شده به ستون، سبب شده تا نتوان از تعاریف رایج شکل‌پذیری - که برای اعضای دارای نقطه تسلیم در آرماتور کششی به کار می‌رود - استفاده کرد. به عنوان مثال در وضعیت متوازن ستون، شکل‌پذیری انحنایی، دورانی و جابه‌جایی - که حاصل تقسیم حداکثر انحنا، دوران و جابه‌جایی بر مقادیر آنها در لحظه تسلیم آرماتور کششی است - همواره برابر یک است؛ یا به بیان دیگر در محدوده انهدام فشاری ستون، هرگز آرماتور تسلیم کششی نمی‌شود. بر این اساس برای تعریف معیار شکل‌پذیری، از مفهوم انرژی جذب شده استفاده کرده و شکل‌پذیری را برابر با نسبت سطح کل زیر نمودار لنگر - دوران به سطح زیر قسمت خطی این نمودار در نظر می‌گیریم.

خطی است، لذا با محاسبه شیب این نمودار، انحنا را می‌توان با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید. در این رابطه ϵ_1 و ϵ_2 مقادیر کرنش نهایی ایجاد شده در دو آرماتور متقابل در امتداد اعمال نیروی جانبی و d فاصله بین این دو آرماتور است. شکل ۴ نحوه محاسبه انحنا را در مقطع ستون نشان می‌دهد.



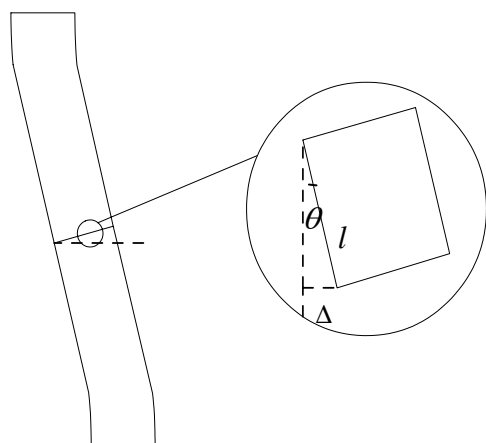
شکل ۴ نحوه محاسبه انحنا مقطع

$$\phi = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{d} \quad (۷)$$

در شکل‌های ۵-الف تا ۵-ج، انحنا را ایجاد شده در مقاطع مختلف در ارتفاع ستون برای بارگذاری F/P متناظر با وضعیت متوازن نشان داده شده است. در این منحنی‌ها تراز ارتفاعی که از تکیه‌گاه ستون تا آن ارتفاع، آرماتور کششی تسلیم می‌شود مشخص شده است.

۷- محاسبه دوران حداکثر ستون

با توجه به شرایط مرزی و نحوه بارگذاری در دو انتهای ستون، دوران حداکثر در وسط ستون ایجاد می‌شود و در دو انتهای ستون برابر صفر است. همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده، با تقسیم جابه‌جایی نسبی (Δ) دو گره بالا و پایین المان قرار گرفته در وسط ارتفاع ستون، بر فاصله این دو گره - که برابر بعد المان (l) است - دوران حداکثر (θ) از رابطه (۸) به دست می‌آید:

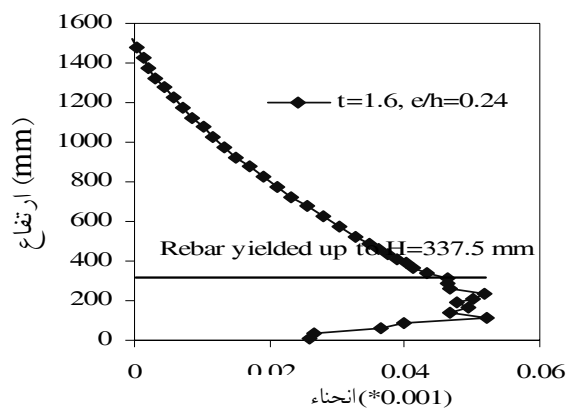


شکل ۶ نحوه محاسبه دوران حداکثر ستون از المان قرار گرفته در وسط ارتفاع

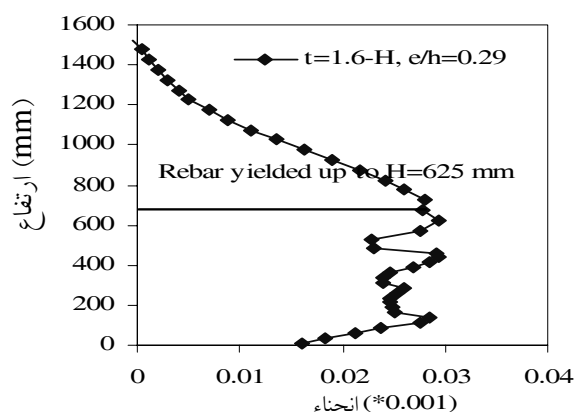
دوران حداکثر ستون در هر لحظه از بارگذاری - که در وسط ستون ایجاد شده - به روش مستقیم بخش قبل به دست می آید. لنگر حداکثر - که در هر مرحله از بارگذاری به وسیله تکیه گاه ستون متناظر با دوران حداکثر تحمل می شود - مشتمل است بر لنگر اولیه و لنگر ثانویه. لنگر، حاصل تأثیر نیروی جانبی و بار محوری وارد شده بر ارتفاع ستون و تغییر مکان جانبی آن است.

به منظور بررسی تأثیر محصور کردن کل ارتفاع ستون در پوشش FRP با ضخامت ۱/۶ میلیمتر و همچنین بررسی تأثیر محصور کردن نواحی مفصل پلاستیک در پوشش کامپوزیتی، شکل پذیری متناظر با وضعیت متوازن ستون نمونه های مذکور، با شکل پذیری نمونه ای که فقط در آرماتور مارپیچ محصور شده، مقایسه شده است. شکل های ۷- الف تا ج به ترتیب، نمودارهای لنگر- دوران وضعیت متوازن نمونه های C، H و S را نشان می دهد. در این نمودارها سطح در نظر گرفته شده به عنوان قسمت خطی نمودار نیز مشخص شده است.

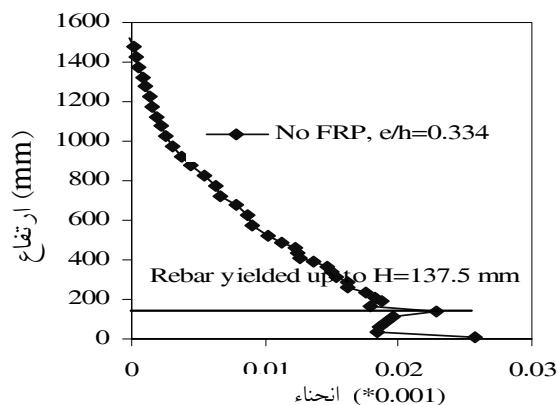
در جدول ۳ مقادیر مربوط به شکل پذیری (نسبت سطح کل به سطح قسمت خطی نمودار لنگر- دوران) مشخص شده است. بر این اساس شکل پذیری در



(الف)

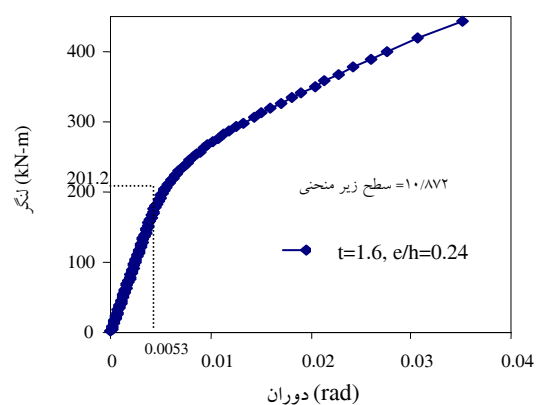


(ب)

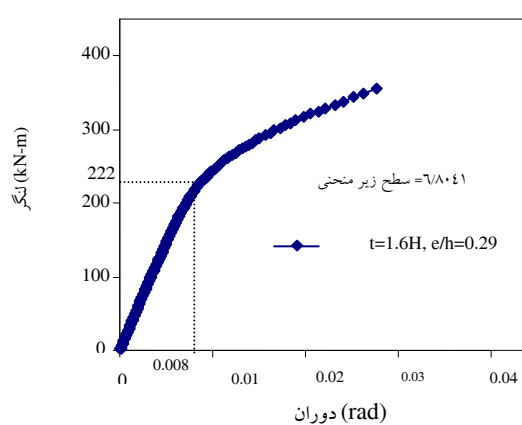


(ج)

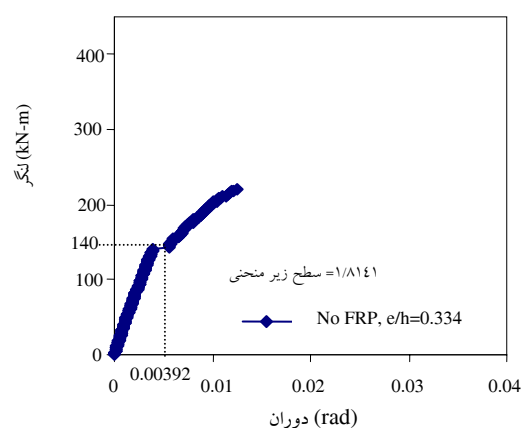
شکل ۵ تغییرات انحنا در ارتفاع ستون در وضعیت متوازن نمونه ها؛ الف) نمونه C-۰/۰۴؛ ب) نمونه S-۰/۰۸؛ ج) نمونه H-۰/۰۶



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷ نمودار لنگر- دوران در وضعیت متوازن ستون؛

(الف) نمونه C؛ (ب) نمونه H؛ (ج) نمونه S

وضعیت متوازن نمونه‌هایی که کل ارتفاع ستون آنها در کامپوزیت FRP به ضخامت ۱/۶ میلیمتر محصور شده و همچنین نمونه‌ای که فقط نواحی مفصل پلاستیک آن در ۱/۶ میلیمتر کامپوزیت FRP محصور شده، به ترتیب ۳/۰۶ و ۱/۰۸۵ برابر شکل‌پذیری نمونه‌ای است که فقط هسته آن در آرماتور مارپیچ محصور شده.

در جدول ۴، سطح کل زیر نمودار لنگر- دوران به‌عنوان ظرفیت جذب انرژی در این سه نمونه، با یکدیگر مقایسه شده است. از این مقایسه نتیجه می‌شود که سطح کل زیر نمودار لنگر- دوران در دو نمونه C و H در وضعیت متوازن ستون به ترتیب ۵/۹۹ و ۳/۷۵ برابر سطح کل زیر نمودار لنگر- دوران وضعیت متوازن نمونه S است.

جدول ۳ مقایسه شکل‌پذیری در وضعیت متوازن ستون

نمونه	شکل‌پذیری	نسبت شکل‌پذیری هر نمونه به شکل‌پذیری نمونه S-a
C-۰/۰۴	۱۹/۳۷۷	۳/۰۶
H-۰/۰۶	۶/۸۶۷	۱/۰۸۵
S-۰/۰۸	۶/۳۲۹	۱

جدول ۴ مقایسه سطح زیر نمودار لنگر- دوران در وضعیت متوازن ستون

نمونه	سطح کل زیر نمودار $M-\theta$ (N.mm)	نسبت سطح زیر نمودار هر نمونه به سطح زیر نمودار نمونه S-a
C-۰/۰۴	۱۰/۸۲۷۵۶	۵/۹۹
H-۰/۰۶	۶/۸۰۴۱۵۶	۳/۷۵
S-۰/۰۸	۱/۸۱۴۵۶	۱

۹- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق، نتایج تحلیل غیرخطی ستون بتن مسلح در شرایط گوناگون ترکیب بار جانبی و بار محوری، با در نظر گرفتن اثر محصورشدگی بتن بیان شده است. محصورشدگی در نظر گرفته شده برای بتن، حاصل تأثیر آرماتور ماریچ بر ستون و تأثیر پوشش کامپوزیتی CFRP در دو حالت پوشش در کل ارتفاع و پوشش فقط در نواحی پلاستیک ستون است. نتایج تحلیل با هدف مقایسه تأثیر دو شیوه مذکور محصور کردن ستون با پوشش CFRP، بر شکل پذیری و مقاومت ستون، ارائه شده که نتایج آن به شرح زیر است:

۱- بر اساس نتایج مدلسازی ستون بتن مسلح با مشخصات معین - که کل ارتفاع ستون در کامپوزیت CFRP با ضخامت ۱/۶ میلیمتر و با مشخصات مکانیکی معرفی شده در این تحقیق محصور شده - بار محوری و لنگر خمشی نظیر وضعیت متوازن ستون، نسبت به مقاومت نظیر وضعیت متوازن ستون بدون در نظر گرفتن اثر محصورشدگی، به ترتیب به اندازه ۲۳۰٪ و ۱۱۴٪ افزایش می یابد. همچنین این مقادیر نسبت به مقاومت نظیر وضعیت متوازن ستون با در نظر گرفتن اثر محصورشدگی حاصل از آرماتور ماریچ، به ترتیب به اندازه ۱۴۰٪ و ۹۴/۶٪ افزایش می یابد.

۲- تحلیل غیرخطی ستون بتن مسلح با مشخصات معین، که در آن فقط یک ششم ارتفاع به عنوان نواحی پلاستیک، در کامپوزیت CFRP با ضخامت ۱/۶ میلیمتر با مشخصات مکانیکی معرفی شده، محصور است، نشان داد که بار محوری و لنگر خمشی نظیر وضعیت متوازن ستون، نسبت به مقاومت نظیر وضعیت متوازن ستون بدون در نظر گرفتن اثر محصورشدگی به ترتیب به اندازه ۱۱۹٪ و ۷۱٪ افزایش می یابد. همچنین این مقادیر نسبت به مقاومت نظیر وضعیت متوازن ستون با در نظر گرفتن اثر

محصورشدهگی حاصل از آرماتور ماریچ، به ترتیب به اندازه ۵۹/۲٪ و ۵۵/۵٪ افزایش می یابد.

۳- انجام تحلیل غیرخطی (با در نظر گرفتن هر دو رفتار غیرخطی مادی و غیرخطی هندسی) ستونهای مدل شده در این تحقیق با نسبتهای گوناگون نیروی جانبی به بار محوری، تحت تأثیر تعامل بار و لنگر اعمال شده بر ستون، تأیید می کند که سطح زیر نمودار انحنای تکیه گاه تا وسط ارتفاع ستون، با ۴٪ اختلاف، برابر با دوران ایجاد شده در وسط ستون است.

۴- با بررسی نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی، وضعیت متوازن نمونه ای که در سرتاسر ارتفاع ستون در ۱/۶ میلیمتر کامپوزیت CFRP محصور شد، و همچنین نمونه ای که فقط در نواحی پلاستیک در ۱/۶ میلیمتر کامپوزیت CFRP محصور شد، استنتاج می شود که سطح زیر نمودار لنگر - دوران در این دو نمونه به ترتیب به اندازه ۵۰۰٪ و ۲۷۵٪ نسبت به سطح زیر نمودار لنگر - دوران وضعیت متوازن نمونه تنها با هسته محصور در آرماتور ماریچ، افزایش داشته است.

۵- نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی نشان داد که در صورتی که نسبت سطح کل زیر نمودار لنگر - دوران به سطح قسمت خطی این نمودار به عنوان شکل پذیری تعریف شود، شکل پذیری در وضعیت متوازن ستون بتن مسلحی که در سرتاسر ارتفاع آن با ۱/۶ میلیمتر CFRP محصور شده، نسبت به شکل پذیری در وضعیت متوازن ستون بتن مسلح با هسته فقط محصور در آرماتور، تا ۲۰۶٪ افزایش داشته است؛ اما محصور کردن فقط یک ششم ارتفاع به عنوان نواحی پلاستیک ستون بتن مسلح در ۱/۶ میلیمتر CFRP، علی رغم افزایش قابل ملاحظه سطح کل زیر نمودار لنگر - دوران، شکل پذیری با تعریف مذکور را فقط ۸/۵٪ افزایش داده است.

۶- بر اساس تحلیل غیرخطی ستون بتن مسلح بدون

- Eccentric Loading”, *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction*; The University of Surrey; April 2004, pp. 203-212.
- [5] Li J., Hadi M. N. S.; “Behavior of Externally Confined High-Strength Concrete Columns under Eccentric Loading”, *Composite Structures*; Vol. 66, 2003, pp. 145-153.
- [6] مستوفی‌نژاد داود، سعادت‌مند حسن؛ «بررسی تأثیر پوشش ستون بتن مسلح با ورقه FRP بر رفتار ستون تحت تأثیر بار محوری و لنگر خمشی»؛ اولین همایش کاربرد کامپوزیت‌های FRP در بهسازی و ساخت سازه‌ها؛ ۱۵ اردیبهشت ۱۳۸۳، صص ۶۱-۸۰.
- [7] Mander J. B., Priestley M. J. N., and Park R.; “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *Journal of Structural Engineering*; Vol. 114, No. 8, August 1988, pp. 1804-1826.
- [8] Ahmad S. H., Shah S. P.; “Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement”, *ACI Journal*; Vol. 79, No. 6, 1982, pp. 484-490.
- [9] Fam Amir Z., Riskalla Sami H.; “Flexural Behavior of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Circular Tubes”, *Journal of Composites for Construction*; Vol. 6, No. 2, May 2002, pp. 123-13.
- اعمال محصورشدگی و با ابعاد و مشخصات معرفی شده در این تحقیق و همچنین بر اساس تحلیل غیرخطی ستون بتن مسلح که سرتاسر ارتفاع آن در کامپوزیت CFRP به ضخامت ۱/۶ میلیمتر محصور شده، نتیجه شد که بار محوری نظیر کماتش ستون نسبت به بار محوری نظیر کماتش، بدون در نظر گرفتن اثر محصورشدگی بر ستون، به اندازه ۶۴/۴٪ افزایش پیدا می‌کند.

۱۰- منابع

- [1] Sheikh S. A., Yau Grace; “Seismic Behavior of Concrete Columns Confined with Steel and Fiber-Reinforced Polymers”, *ACI Structural Journal*; Vol. 99, No. 1, January-February 2002, pp. 72-80.
- [2] Nanni A., Norris Michael S.; “FRP Jacketed Concrete under Flexure and Combined Flexure-Compression”, *Construction and Building Materials*; Vol. 9, Issue 5, October 1995, pp. 273-281.
- [3] Gould Nathan C., Harmon Thomas; “Confined Concrete Columns Subjected to Axial Load, Cyclic Shear, and Cyclic Flexure-Part II: Experimental Program”, *ACI Structural Journal*; Vol. 99, No. 1, January-February 2002, pp. 42-50.
- [4] Tao Zhong, Teng J. G., Han Lin-Hai, and Lam L.; “Experimental Behavior of FRP-Confined Slender RC Columns under

