

بررسی عددی تاثیر میلگردهای فشاری GFRP بر عملکرد تیرهای بتنی مسلح GFRP تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای

پگاه آقابزرگی^۱، علیرضا خالو^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف (p.aghabozorgi@gmail.com)

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف (khaloo@sharif.edu)

p.aghabozorgi@gmail.com

چکیده

آرماتورهای FRP با مقاومت قابل توجه در برابر خوردگی منجر به بهبود در عملکرد سازه‌های بتنی مسلح و کاهش قابل توجه هزینه‌ها می‌شوند. از دیگر ویژگی‌های آنها نسبت بالای مقاومت کششی به وزن، نارسانا و غیرمغناطیس بودن آن می‌باشد. آیین‌نامه‌های طراحی بین الملل اخیر از قبیل ACI ۴۴۰٫۱R-۱۵ استفاده از آرماتورهای FRP را در فشار مجاز ننموده‌اند و در محاسبات با بتن جایگزین می‌کنند. در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی اثر میلگردهای فشاری GFRP روی مقاومت خمشی و شکل‌پذیری تیرهای بتنی مسلح GFRP، سیزده نمونه تیر بتنی با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شدند. رفتار مصالح الاستوپلاستیک به کمک مدل پلاستیسیته خرابی بتن در نرم افزار تعریف شد. داده‌های تجربی از پژوهش‌های موجود، بعنوان معیار برای بررسی‌های عددی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج با استفاده از مدل‌سازی عددی صحت سنجی شدند. نتایج نشان دادند که منحنی‌های تغییرمکان- نیرو به‌دست آمده از تحلیل عددی مطابقت خوبی با منحنی‌های حاصل از آزمایشگاه دارند. طبق ارزیابی عددی، تیرهای بتنی مسلح GFRP، مقاومت خمشی بالاتری دارند؛ میانگین مقاومت خمشی تیرهای بتنی مسلح فولادی، ۹۰ درصد تیرهای بتنی مسلح GFRP محاسبه شد. هم‌چنین تیرهای بتنی مسلح GFRP شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان دادند. افزایش درصد میلگردهای فشاری GFRP، منجر به جذب انرژی بیشتر و در نهایت شکل‌پذیری بیشتر تیرهای بتنی GFRP شده‌است. نتایج نشان دادند که میلگردهای فشاری GFRP تاثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت خمشی تیرها ندارند.

کلمات کلیدی: GFRP، ABAQUS، تیرها، مقاومت خمشی، مدل پلاستیسیته آسیب بتن

۱- مقدمه

در طول دو دهه گذشته، میلگردهای FRP بدلیل غلبه بر خوردگی و دیگر مشکلات متداول میلگردهای فولادی به عنوان جایگزینی مناسبی برای این میلگردها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. CFRP, AFRP و GFRP متداول‌ترین گونه‌های FRP هستند که در این پژوهش با توجه به اینکه میلگردهای GFRP از شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بالایی برخوردار می‌باشند، به عنوان جایگزین خوبی برای میلگردهای فولادی انتخاب شده‌اند. آب‌های شور و محیط‌های خورنده، علت اصلی خوردگی میلگردگذاری فولادی و تخریب سازه‌های بتنی مسلح به فولاد می‌باشد که منجر به ترمیم و بازسازی پرهزینه و هم‌چنین کاهش قابل توجهی در طول عمر سازه می‌شود؛ بنابراین مقاوم کردن سازه‌هایی که در معرض این محیط‌ها قرار دارند باعث دوام و طول عمر بیشتر سازه خواهد شد. از دیگر کاربردهای میلگردگذاری FRP شامل بیمارستان‌ها و آزمایشگاه‌ها که خواص نارسایی و غیرمغناطیسی بودن این میلگردها، برای استفاده در مجاورت تجهیزات حساس، مناسب واقع می‌گردد. میلگردهای GFRP مدول الاستیک پایینی دارند و تمایل به گسیختگی بدون تسلیم شدن را دارند؛ بنابراین انتظار می‌رود بیشینه توزیع میلگردهای FRP در کرنش نهایی بتن (۰/۰۰۳۶) در مقایسه با فولاد کوچک باشد؛ پس این میلگردها به ملزومات متفاوتی در آیین‌نامه‌های طراحی نیاز دارند. با وجود مطالعات فراوان در خصوص استفاده موثر از میلگردگذاری FRP در فشار، آیین‌نامه‌های ۱۵-۱R, ۴۴۰-۱ACI [1], CAN/CSA [2] ۸۰۶, S, TR55 [3], ۱۰۴۰۶-۱ ISO [4] و fib [5] استفاده از میلگردگذاری FRP در محاسبات ظرفیت فشاری اعضا را توصیه نمی‌کنند. بدین سبب علاوه بر بررسی‌های آزمایشگاهی، نیازمند شبیه‌سازی‌های عددی به منظور صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی و ارزیابی دقیق‌تر، جهت پذیرفتن FRP بوسیله‌ی طراحان در دستورالعمل‌های جدید طراحی می‌باشیم.

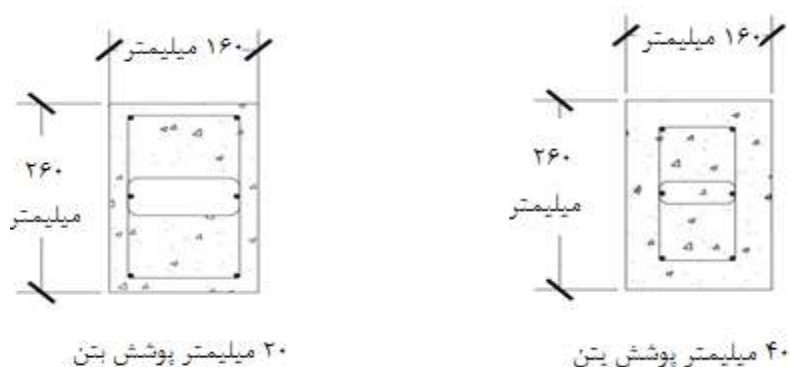
تیرها با اعمال بار سازه به ستون‌ها نقش قابل توجهی را در میان المان‌های سازه برعهده دارند، بنابراین بررسی اثر میلگردگذاری فشاری در ظرفیت باربری تیرها حائز اهمیت می‌باشد. در مطالعه اخیر با بررسی نمودارهای ممان-انحناء در ناحیه مفصل پلاستیک تیرهای موجود در قاب؛ به این نتیجه رسیدند که مقاطع مسلح به میلگردهای GFRP به طور خطی رفتار می‌کنند و ظرفیت خمشی بالاتری از مقاطع مسلح به میلگردهای فولادی فراهم می‌کنند. در این مطالعه، نسبت ظرفیت خمشی تیرهای مسلح GFRP به فولادی به طور میانگین ۱٫۳۳ برابر اندازه‌گیری شده‌است [6]. افایفای و همکارانش [7]، [8] در سال ۲۰۱۴ فهمیدند مقاومت فشاری نهایی میلگردهای GFRP تقریباً ۳۵ درصد مقاومت کششی نهایی می‌باشد؛ که این مقدار بیشتر از ۵۰ درصد مقدار اندازه‌گیری شده توسط دیتز می‌باشد. امیری و همکارانش [9] با استفاده از نرم افزار ABAQUS به پیش‌بینی پاسخ خمشی، خواص مکانیکی و الگوهای ترک یک تیر بتنی ژئوپلیمر پرداختند و تفاوت‌هایی در نتایج اجزاء محدود و آزمایشگاهی مشاهده کردند. نوین و همکارانش [10] تیر بتنی مسلح فولادی تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای شبیه‌سازی کردند و در مدلسازی عددی شیب بیشتری را در ناحیه الاستیک خطی مشاهده کردند. سان و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با ارایه یک روش خلاقانه به بررسی کاربرد آرماتور فولادی به همراه غلافی از FRP پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های عددی و کارهای آزمایشی نشان دادند که با استفاده از این روش شکل‌پذیری سازه بتن آرمه به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند [11].

تحقیقات بالا به خوبی نشان می‌دهد که مطالعات بیشتری جهت بررسی رفتار میلگردهای GFRP در فشار لازم است. این پژوهش خلاصه‌ای از نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آنها با نتایج اجزاء محدود نمونه‌های مسلح به GFRP و فولاد و هم‌چنین بررسی اثر میلگردهای فشاری در تیرها را فراهم می‌کند.

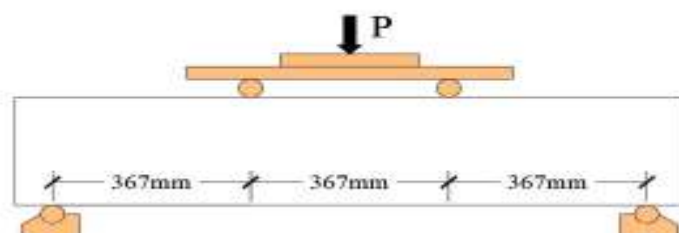
۲- مدل‌سازی با روش اجزاء محدود

به منظور بررسی رفتار مدل‌های ساخته شده توسط نرم‌افزار ABAQUS، ابتدا با مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌شده در یک آزمایش معتبر با نمودارهای به‌دست آمده از نرم‌افزار، صحت و دقت روش مدل‌سازی تعیین شده‌است و می‌توان به نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار اطمینان حاصل کرد و سپس به تحلیل نمودارهای پرداخت. در این پژوهش نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط چلکانی و همکاران [12] به عنوان نمونه مرجع جهت استفاده در صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفته شده‌است. در این پژوهش ۱۳ نمونه تیر بتنی به ابعاد مقطع عرضی ۱۲۰*۱۶۰ میلی‌متر، تحت بارگذاری خمش چهارنقطه‌ای و طول دهانه ۱۱۰۱ میلی‌متر شبیه‌سازی شده‌اند. مقطع تیرهای مسلح فولادی و GFRP در شکل ۱ نشان داده شده‌است و در شکل ۲ شماتیک و نحوه بارگذاری تیر بتنی ترسیم شده‌است. ۱۲ نمونه با میلگردها و خاموت‌های GFRP و یک نمونه دیگر با میلگردها و خاموت‌های فولادی مسلح شده‌اند. هر نمونه بتنی مسلح GFRP با شش میلگرد طولی به قطر ۴# به نسبت حجمی ۱٫۸۳ درصد و هر نمونه بتنی مسلح فولادی با شش میلگرد طولی N۱۲ به نسبت حجمی ۱٫۵۹

درصد مسلح شده‌اند. میلگردگذاری عرضی برای نمونه بتنی مسلح GFRP به قطر ۲# و برای نمونه‌های بتنی مسلح فولادی R۶ انتخاب شده و هم‌چنین فاصله میلگردگذاری عرضی در تمام نمونه‌ها ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. پوشش بتن برای نمونه‌های بتنی مسلح فولادی ۴۰ میلی‌متر و برای GFRP، ۲۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱ اتخاذ شده‌است.



شکل ۱: نمایی از مقطع تیر و نحوه آرایش میلگردها



شکل ۲: شماتیک تیر بتنی مسلح

مشخصات مصالح میلگرد و خاموت مصرفی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده‌است. هم‌چنین از بتنی با مقاومت ۳۲٫۷۵ مگاپاسکال در محاسبات استفاده شده‌است.

جدول ۱: خواص فیزیکی میلگردهای GFRP [12]

کرنش نهایی در کشش (بر حسب درصد)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیک کششی (گیگاپاسکال)	مساحت (میلی‌متر مربع)	قطر میلگرد (میلی‌متر)
۱٫۹	۷۸۴	۴۶٫۱	۳۱٫۷	۶٫۳۵
۱٫۷	۷۰۸	۴۶٫۳	۱۲۶٫۷	۱۲٫۷

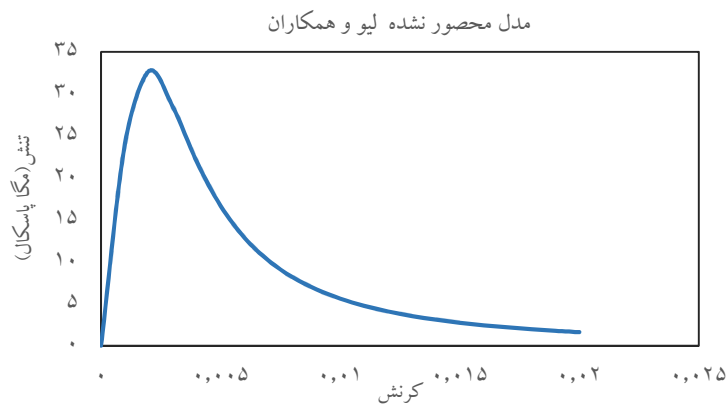
جدول ۲: خواص فیزیکی میلگردهای فولادی [12]

کشیدگی (درصد)	کرنش تسلیم (درصد)	مقاومت نهایی (مگاپاسکال)	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	مدول الاستیک (گیگاپاسکال)	مساحت (میلی‌متر مربع)	قطر میلگرد (میلی‌متر)
۵٪	۰٫۱۲۵٪	۲۷۰	۲۵۰	۲۰۰	۲۸	۶
۵٪	۰٫۲۵٪	۵۴۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۱۰	۱۲

۱-۲ مدل‌های ساختاری مصالح

۱-۱-۲ مدل بتن

در نرم افزار ABAQUS جهت معرفی مصالح طیف وسیعی از خصوصیات رفتاری غیرالاستیک وجود دارد که در این پژوهش مدل پلاستیسته-آسیب بر پایه مدل لیو و همکارانش [13]، مناسب ترین مدل برای توصیف رفتار بتن نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در این مدل دو مکانیزم گسیختگی ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری برای بتن فرض می‌شود. رفتار بتن تحت کشش نیز تا تشکیل ریز ترک‌های اولیه در تنش حداکثر (تنش گسیختگی) به صورت خطی و پس از آن تنش بر حسب کرنش ترک خوردگی و اعمال ضرایب آسیب کششی به منظور کاهش مدول الاستیسته در اثر ترک خوردگی تعریف می‌شود. نمودار تنش-کرنش بتن در فشار در شکل ۳ نشان داده شده‌است. نمودار تنش-کرنش برای بتن محصور نشده در فشار بر پایه روابط لیو و همکاران [13] ترسیم شده و مقادیر تنش بر حسب کرنش ترک خوردگی (پلاستیک) به نرم افزار وارد شده‌است.



شکل ۳: نمودار تنش-کرنش بتن در فشار

روابط تنش و کرنش بتن در ناحیه برگشت پذیر (الاستیک خطی) به صورت زیر می‌باشد:

مدول یانگ بتن با استفاده از معادله (۱) تعیین شده‌است. این معادله از ضوابط موجود در آیین نامه ۱۰-۳۶۳R ACI [14] پیروی می‌کند.

$$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \quad (1)$$

f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، ضریب پواسون به مقدار ۰٫۲ فرض می‌شود.

در ناحیه غیرالاستیک از مدل پلاستیسته-آسیب استفاده شده‌است. این مدل پنج مولفه رفتاری شامل: رفتار فشاری، آسیب فشاری، رفتار کششی، آسیب کششی و پلاستیسته را در برمی‌گیرد.

در این پژوهش، رفتار پلاستیسته به صورت زیر در نرم افزار تعریف شده‌است [15]:

$$\psi = 40 \quad (2)$$

$$\frac{f_{bo}}{f_c} = 1.5(f_c')^{-0.075} \quad (3)$$

$$K_c = \frac{5.5}{5+2(f_c')^{0.075}} \quad (4)$$

Ψ زاویه انبساط بتن، K_c ضریب شکل برای سطح تسلیم، f_{bo} تنش تسلیم فشاری دو محوره اولیه

به همین ترتیب روابط تنش- کرنش فشاری تک محوره بتن طبق معادلات (۵)، (۶)، (۷) و (۸) به نرم افزار وارد شد. این معادلات از روابط لیو و همکارانش [13] جهت مدلسازی رفتار تنش- کرنش بتن استفاده کرده‌اند.

$$\sigma_c = \frac{E_c \cdot \varepsilon_c}{1 + \left((R + R_e - 2) \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right) \right) - \left((2R - 1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right) + (R \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^3)} \quad (5)$$

$$R = \left(\frac{R_e}{3} \right) - 0.25 \quad (6)$$

$$R_e = \left(\frac{E_c}{E_0} \right) \quad (7)$$

$$E_0 = \left(\frac{f_c}{\varepsilon_{co}} \right) \quad (8)$$

σ_c تنش فشاری بتن، ε_c کرنش فشاری، ε_{co} کرنش فشاری در بار اوج می‌باشد. ε_{co} طبق رابطه مندر [16] برابر ۰,۰۰۲ فرض شده‌است. رفتار بتن در کشش همانند فشار در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک قرار می‌گیرد. تنش تسلیم کششی طبق معادله (۹) [17] در نرم‌افزار تعریف شده‌است.

$$f_{ct} = 0.4 \sqrt{f_c} \quad (9)$$

هم‌چنین تنش کششی از معادله (۱۰) توسط استونر [18] به‌دست آمده‌است.

$$f_t = \begin{cases} E_{co} \varepsilon_t & \text{If } \varepsilon_t < \varepsilon_{to} \\ f_{ct} \left(\frac{\varepsilon_{to}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4} & \text{If } \varepsilon_{to} < \varepsilon_t \end{cases} \quad (10)$$

تئوری مکانیک آسیب محیط‌های پیوسته، ایجاد ترک‌ها در پریود اولیه بدون بار، گسترش ترک‌ها در طول بارگذاری و بنابراین شروع افت مقاومت مصالح را در برمی‌گیرد. پارامتر آسیب تحت بارگذاری فشاری بتن d_c ، پارامتر آسیب تحت بارگذاری کششی بتن d_t به صورت زیر تعریف می‌شود [13]:

$$d_c = \frac{(1 - \eta_c) \varepsilon_c^{in} E_0}{\sigma_c + (1 - \eta_c) \varepsilon_c^{in} E_0} \quad (11)$$

$$\eta_c = \frac{\varepsilon^{pl}}{\varepsilon^{in}} \quad (12)$$

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (13)$$

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (14)$$

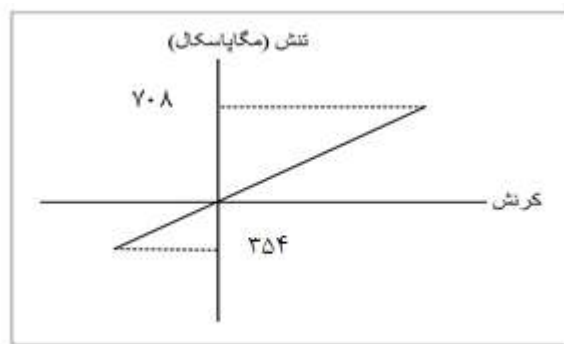
$$d_t = \frac{\eta_t \varepsilon_c^{in} E_0}{\sigma_c + \eta_t \varepsilon_c^{in} E_0} \quad (15)$$

در محاسبات η_t ، ۰,۶ و η_c ، ۰,۷ فرض شده‌است.

۲-۱-۲ مدل میلگرد GFRP

رابطه تنش-کرنش میلگردهای GFRP به صورت الاستیک خطی ایزوتروپیک فرض می‌شود. هیچ ضابطه آسیبی برای این میلگردها به کار نمی‌رود. خواص این میلگردها به مد بارگذاری (فشاری یا کششی) وابسته می‌باشد. در این پژوهش مدول یانگ در فشار و کشش یکسان فرض شده است و تنش فشاری نصف تنش کششی در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون ۰٫۲۵ می‌باشد. قابل ذکر است که در نرم افزار ABAQUS، رفتار میلگردهای GFRP به صورت مدل سه خطی تعریف شده‌اند.

شکل ۴ نمودار تنش-کرنش میلگردهای GFRP در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۴: رابطه تنش-کرنش میلگردهای GFRP در این پژوهش [15]

۳-۱-۲ مدل میلگرد فولادی

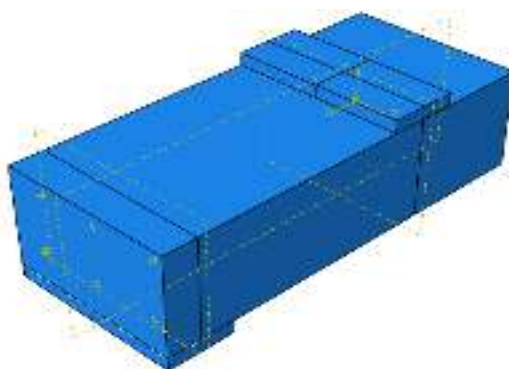
در این پژوهش جهت مدلسازی میلگردهای فولادی از مدل دو خطی الاستوپلاستیک کامل ایزوتروپیک استفاده شده است. رفتار این میلگردها در ناحیه الاستیک با مدول یانگ و ضریب پواسون و در ناحیه پلاستیک بر اساس معیار مایسز تعریف شده است. نمودار تنش-کرنش فولاد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار تنش-کرنش دو خطی فولاد

۲-۲ مدل‌های اجزاء محدود

به منظور مدل‌سازی نمونه‌های بتنی از المان سه بعدی همگن solid و جهت شبیه‌سازی میلگردهای طولی و عرضی از المان سه بعدی wire استفاده شده است. نوع المان بتن همه نمونه‌ها C³D⁸R می‌باشد که یک المان سه بعدی و هشت گره‌ای با یکپارچگی کاهش یافته، مناسب جهت تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی است و در ادامه از المان T³D² که یک المان خریای دو گرهی شکل‌پذیر می‌باشد، به منظور مدل‌سازی میلگردهای طولی و عرضی استفاده شده است. فراهم نمودن سختی محوری، علت اصلی استفاده از المان خریای می‌باشد. هندسه مدل‌های اجزاء محدود در شکل ۶ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار طبق اصل تقارن، نصف تیر مدل شده است.



شکل ۶: هندسه مدل اجزاء محدود نصف تیر بتنی در نرم‌افزار ABAQUS

در این پژوهش جهت مدل‌سازی رفتار غیرالاستیک بتن، مدل پلاستیسته-آسیب انتخاب شده است. در این مدل دو مکانیزم گسیختگی برای بتن فرض می‌شوند که عبارتند از: ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری. رفتار الاستیک-پلاستیک بتن در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور شبیه‌سازی سطح مشترک بین بتن و میلگردها، قید embedded در نرم‌افزار ABAQUS تعریف می‌شود. این قید نودهای میلگردگذاری را به درجات آزادی ناحیه میزبان متناظرشان (بتن) محدود می‌کند. بنابراین سطح مشترک میلگردها و خاموت‌ها با بتن شبیه‌سازی نمی‌شود بلکه میلگردها و خاموت‌ها در نرم‌افزار ABAQUS در ناحیه بتن مدفون می‌شوند و منجر می‌شوند که آرماتور به فضای بتنی اطراف خود چسبیده و با آن حرکت کند. هم‌چنین از لغزش بتن صرف نظر شده است. ورق‌های فولادی به بتن tie می‌شوند. در نتیجه تعریف قید tie بین سطح مشترک ورق فولادی و بتن، درجات آزادی آن‌ها به هم متصل شده و با هم حرکت می‌کنند و در نهایت از لغزش ورق فولادی روی سطح بتن جلوگیری می‌کند. این ورق‌ها منجر به توزیع برابر بارگذاری اعمال شده روی سطح مدل می‌شوند. همه نمونه‌های بتنی با ساینز تقریبی ۴۰ میلی‌متر در جهت طولی، عرضی و ضخامت مش‌بندی شده‌اند.

۳- نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار ABAQUS

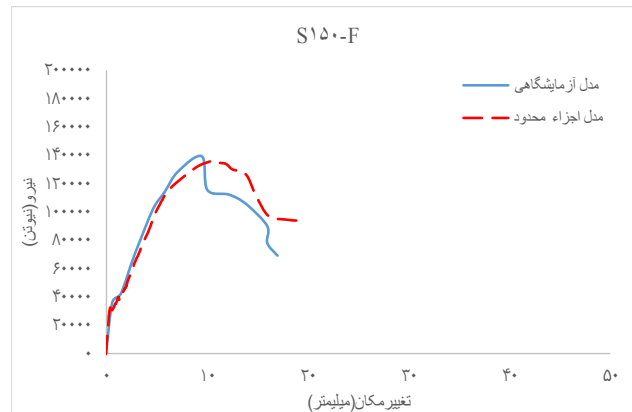
در این پژوهش ۱۰ نمونه تیر بتنی در نرم‌افزار مدل‌سازی شده که ۲ نمونه تیر بتنی صحت سنجی شده است و ۸ نمونه دیگر در نرم‌افزار ساخته شده‌اند. در همه نمونه‌ها، معیار پایان تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS با توجه به نوع خرابی ایجاد شده، ارزیابی می‌شود که این خرابی شامل جاری شدن میلگرد فولادی، خردشدگی بتن فشاری و گسیختگی میلگرد GFRP است. نحوه بارگذاری در تیرها کنترل جابه‌جایی می‌باشد؛ به عبارت دیگر با اعمال جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر روی دو خط متقارن به فاصله ۳۶۶ میلی‌متر انجام می‌گیرد. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی در نرم‌افزار مدل می‌شوند. در جدول ۳ مدل‌ها و مشخصاتشان نشان داده شده است.

جدول ۳: خواص مکانیکی نمونه‌ها

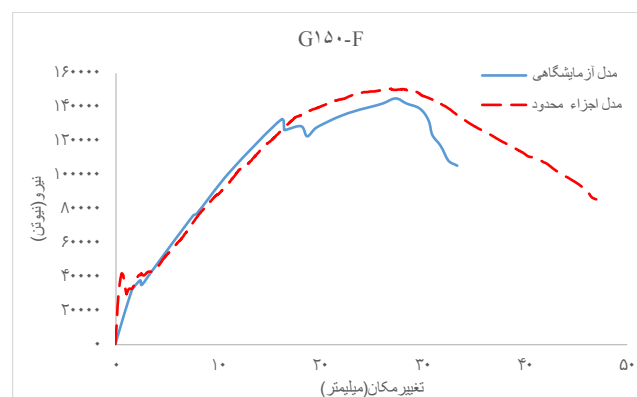
نمونه	نوع میلگرد	میلگردگذاری طولی				میلگردگذاری عرضی	
		قطر میلگرد در فشار (میلیمتر)	قطر میلگرد در کشش (میلیمتر)	نسبت میلگرد کششی به نسبت بالانس FRP (ρ/ρ_{fb})	درصد حجمی میلگرد فشاری (ρ)	فاصله (میلیمتر)	قطر (میلیمتر)
S150-F	فولادی	۱۲	۱۲	-	۰,۸۱۵۶	۶	۱۵۰
G150-F1	GFRP	۱۴,۲۲۵	۱۴,۲۲۵	۱,۸	۱,۱۴۶	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F2	GFRP	۱۰	۱۴,۲۲۵	۱,۸	۰,۵۷۳	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F3	GFRP	۰	۱۴,۲۲۵	۱,۸	۰	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F1	GFRP	۱۲,۷	۱۲,۷	۱,۴۳۴	۰,۹۱۳۵	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F2	GFRP	۸,۹۸	۱۲,۷	۱,۴۳۴	۰,۴۵۶۷	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F3	GFRP	۰	۱۲,۷	۱,۴۳۴	۰	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F4	GFRP	۱۱,۴۳	۱۱,۴۳	۱,۱۶۲	۰,۷۳۹۹	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F5	GFRP	۸,۰۸	۱۱,۴۳	۱,۱۶۲	۰,۳۶۹۹	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F6	GFRP	۰	۱۱,۴۳	۱,۱۶۲	۰	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F7	GFRP	۹,۵۲	۹,۵۲	۰,۸	۰,۵۱۴۴	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F8	GFRP	۶,۷۳۸	۹,۵۲	۰,۸	۰,۲۵۷۲	۶,۳۵	۱۵۰
G150-F9	GFRP	۰	۹,۵۲	۰,۸	۰	۶,۳۵	۱۵۰

۴- صحت سنجی نتایج نمونه آزمایشگاهی با روش اجزا محدود

در این بخش به مقایسه نتایج نمونه آزمایشگاهی الچلکانی [12] و نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود در نرم افزار می‌پردازیم. شکل ۸ رفتار نمونه‌های خمشی و تطابق مناسب نمودارهای نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های اجزاء محدود را در این پژوهش نشان می‌دهد. در این نمودارها، نیرو محوری، عکس العمل تکیه‌گاهی تیرها و تغییر مکان، همان خیز وسط دهانه تیر می‌باشد. همانطور که منحنی‌های نیرو-تغییر مکان تیرهای بتنی مسلح فولادی و GFRP نشان می‌دهند؛ نتایج اجزاء محدود خصوصاً در محدوده الاستیک به خوبی با نمودارهای به‌دست آمده از آزمایشگاه هم‌پوشانی دارند. در مدل آزمایشگاهی شاهد گسیختگی ناگهانی می‌باشیم در حالیکه این گسیختگی در مدل اجزاء محدود با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. طبق نتایج تحلیل آزمایشگاهی، ظرفیت خمشی تیرهای بتنی مسلح GFRP اندکی بیشتر از تیرهای بتنی مسلح فولادی می‌باشد که این مقدار افزایش در نمودارهای حاصل از تحلیل اجزاء محدود بیشتر است. در نمودار نمونه بتنی مسلح GFRP آزمایشگاهی دو نقطه اوج مشاهده می‌شود که نقطه دوم ظرفیت خمشی بالاتری را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش زیاد شکل‌پذیری در تیرهای بتنی مسلح GFRP در مقایسه با فولادی است. هم‌چنین در هر دو نمونه تیر بتنی، شاهد افزایش شکل‌پذیری در تحلیل اجزاء محدود در مقایسه با مدل آزمایشگاهی می‌باشیم و نمونه با شیب ملایم‌تری از مدل آزمایشگاهی گسیخته می‌شود. در نمونه تیر بتنی مسلح GFRP اجزاء محدود، بار اوج به میزان ۸ درصد در مقایسه با مدل آزمایشگاهی افزایش یافته که نشان‌دهنده دست بالا گرفتن تحلیل به روش اجزاء محدود در تیر بتنی GFRP می‌باشد. در حالیکه در تیر بتنی مسلح فولادی با اوج در تحلیل عددی به میزان ۳ درصد کاهش یافته که بیانگر دست پایین گرفتن تحلیل عددی در این گروه از تیرها می‌باشد.

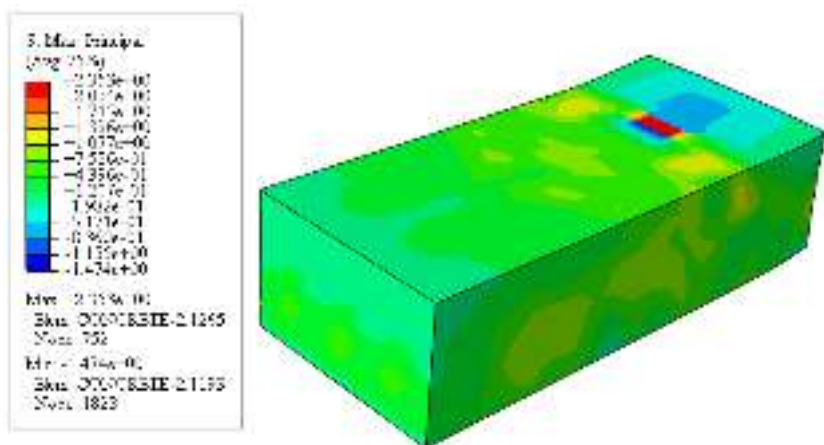


شکل ۷: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود برای تیرهای $S150-F$ و $G150-F$

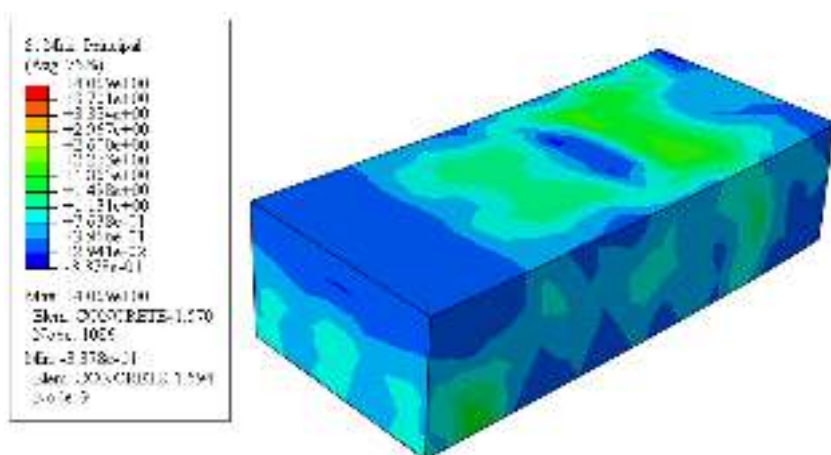


شکل ۸: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود برای تیرهای $S150-F$ و $G150-F$

مد شکست تیر بتنی در تحلیل اجزاء محدود، ترک خردگی بتن و خمش زیاد میلگردهای GFRP طولی تشکیل داده است. شکل ۹ و ۱۰ کانتور تنش مایسز نمونه‌های مدل شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹: کانتور تنش ماکزیمم تیر بتنی S



شکل ۱۰: کانتور تنش ماکزیمم تیر بتنی G

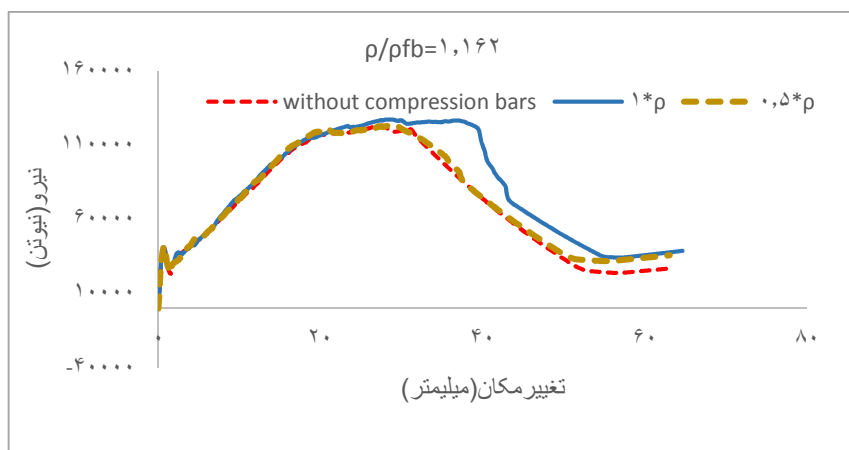
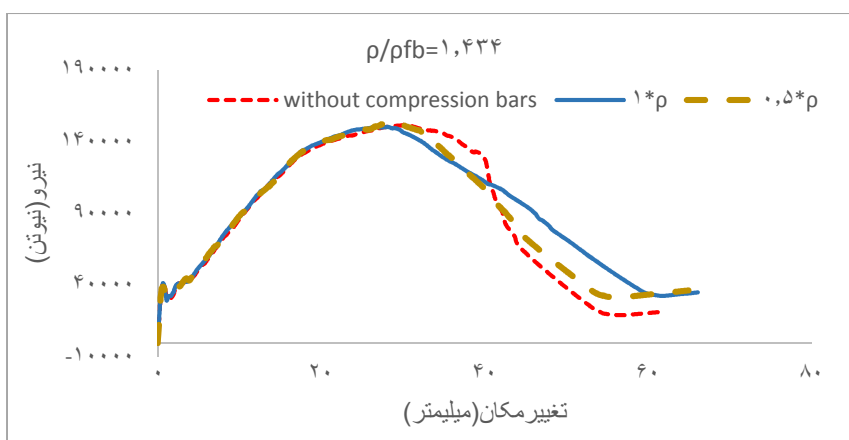
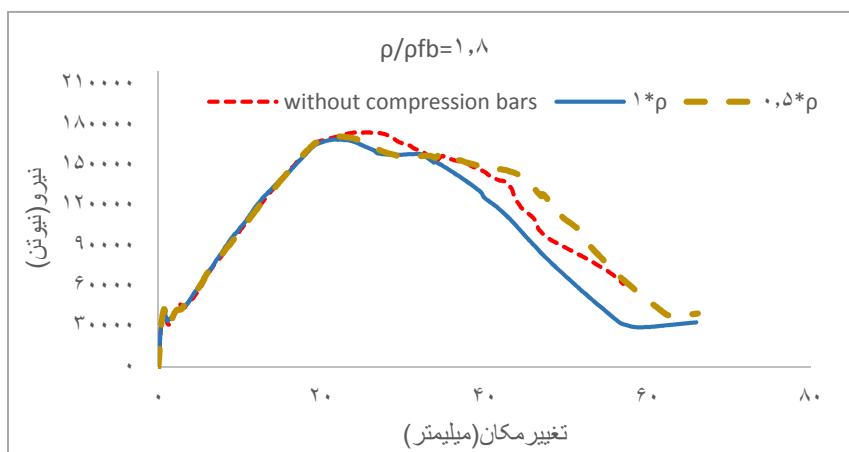
۵- نمونه‌های ساخته شده در نرم افزار

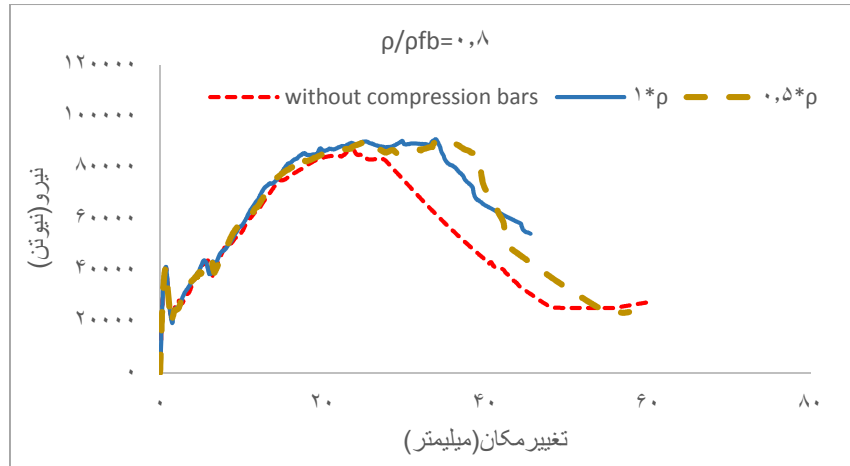
در این پژوهش ۱۱ نمونه تیر بتنی به منظور بررسی اثر میلگردهای فشاری روی ظرفیت محوری و شکل‌پذیری تیرهای بتنی مسلح در نرم افزار ساخته شده است. در این نمونه‌ها دو پارامتر، متغیر در نظر گرفته شده‌اند که پارامتر اول درصد میلگردهای کششی است و پارامتر دوم درصد میلگردهای فشاری است. مطابق با آیین نامه $ACI\ 408.1R-15$ [1] ظرفیت خمشی تیرهای مسلح به میلگردهای GFRP به دو مد شکست خردشدگی فشاری و گسیختگی FRP وابسته می‌باشد. حالت حدی کنترل با مقایسه نسبت میلگردگذاری FRP به حالت بالانس ($\frac{\rho}{\rho_{fb}}$) تعیین می‌شود. با به دست آوردن درصد میلگرد FRP بالانس طبق معادله (۱۶)، میلگردگذاری به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مقطع خمشی در سه ناحیه مختلف: ناحیه کنترل کششی ($\rho < \rho_{fb}$)، ناحیه گذار ($\rho_{fb} < \rho < 1.4\rho_{fb}$) و ناحیه کنترل فشاری ($\rho > 1.4\rho_{fb}$) قرار گیرد و سپس با تغییر درصد میلگرد فشاری که به ترتیب صفر، نصف درصد میلگرد کششی و برابر با میلگرد کششی، نمودارهای تغییر مکان- نیرو حاصل شوند. نمودار مقایسه تیرها در

شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این نمودارها پارامتر ρ بیانگر درصد میلگرد کششی و ρ_{fb} بیانگر درصد میلگرد بالانس FRP است. در ادامه به تشریح و بررسی این نمودارها پرداخته می‌شود.

$$\rho_{fb} = 0.85 \beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (16)$$

در این معادله f_{fu} مقاومت کششی FRP، E_f مدول الاستیسیته میله‌گردهای FRP، ϵ_{cu} کرنش نهایی بتن، ρ_{fb} نسبت میله‌گذاری FRP بالانس می‌باشد.

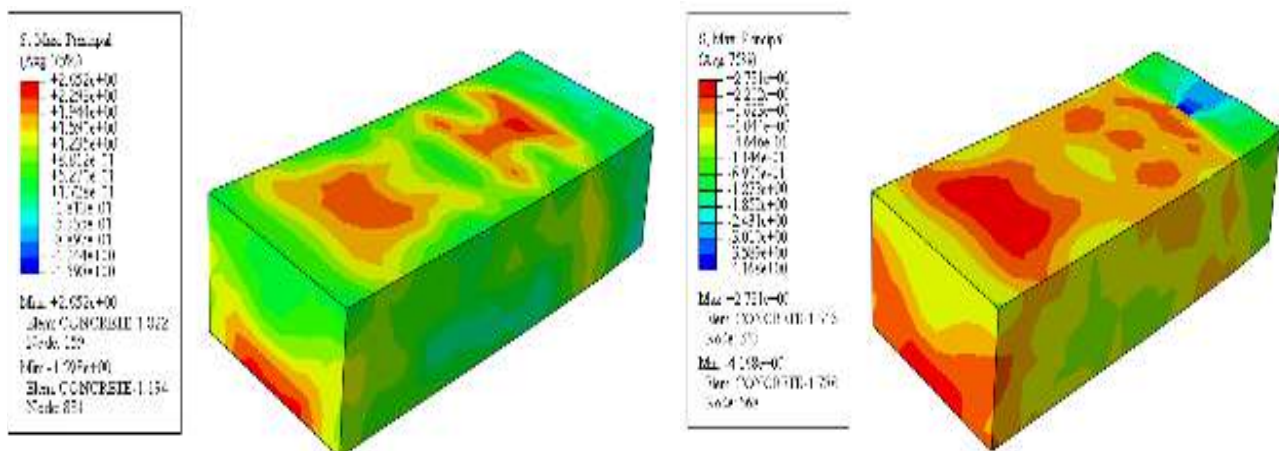




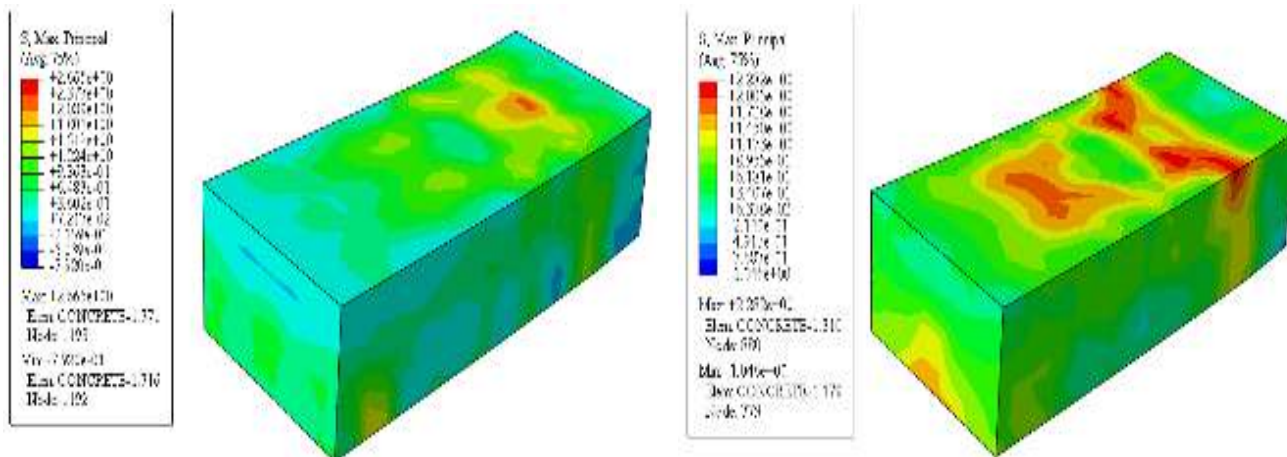
شکل ۱۱: مقایسه منحنی‌های تغییر مکان-نیرو برای تیر بتنی مسلح GFRP با نسبت‌های مختلف $\frac{\rho}{\rho_{fb}}$ و درصد میلگرد فشاری متغیر

با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های ساخته شده در نرم افزار، در همه تیرهای بتنی مسلح GFRP با نسبت‌های مختلف میلگرد گذاری FRP به حالت بالانس ($\frac{\rho}{\rho_{fb}}$)، با تغییر درصد آرماتور فشاری، مقاومت خمشی نمونه تقریباً ثابت مانده است و تغییرات، تنها در ناحیه غیر خطی پس از ناحیه اوج رخ می‌دهد؛ به عبارتی دیگر افزایش درصد حجمی میلگردهای فشاری منجر به افزایش شکل‌پذیری نمونه می‌شود، هر چند ستون‌های با نسبت $\frac{\rho}{\rho_{fb}} = 1.8$ از این قاعده پیروی نمی‌کنند. در همه ستون‌ها ناحیه پیش از اوج، هم‌پوشانی کامل دارند. با کاهش نسبت میلگرد گذاری FRP به حالت بالانس ($\frac{\rho}{\rho_{fb}}$)، از میزان ۱.۸ به ۰.۸ در مواردی که درصد حجمی میلگردهای فشاری و کششی برابر است ($\rho = \rho'$) مقاومت خمشی به میزان ۴۶.۱۵ درصد کاهش می‌یابد و در مواردی که درصد حجمی میلگردهای فشاری نصف درصد حجمی میلگردهای کششی است، مقاومت خمشی به میزان ۴۷.۳۸ درصد کاهش می‌یابد و در زمانی که میلگردهای فشاری حذف شوند، ۵۰.۲۴ درصد افت مقاومت خمشی داریم. بنابراین با کاهش درصد حجمی میلگردهای فشاری، شاهد افت مقاومت بیشتری در اثر کاهش نسبت $\frac{\rho}{\rho_{fb}}$ می‌باشیم.

شکل ۱۲، ۱۳ و ۱۴ کانتور تنش ماکزیمم مدل‌های ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: کانتور تنش تیر بتنی G_c : سمت راست، قطر میلگرد کششی، برابر با ۱۴.۲۲۵ میلیمتر و فاقد میلگرد فشاری و سمت چپ، قطر میلگرد کششی، برابر با ۱۲.۷ میلیمتر و فاقد میلگرد فشاری



شکل ۱۳: کانتور تنش تیر بتنی G سمت راست، قطر میلگرد کششی، برابر با ۱۱٫۴۳ میلیمتر و میلگرد فشاری و کششی با درصد حجمی برابر و سمت چپ، قطر میلگرد کششی، برابر با ۹٫۵۲ میلیمتر و درصد حجمی میلگرد فشاری نصف درصد حجمی میلگرد کششی

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش در ابتدا صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل اجزاء محدود در نرم افزار بررسی شد و سپس به بررسی اثر میلگردهای فشاری روی ظرفیت باربری و شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح GFRP پرداختیم و نتایج زیر حاصل از بررسی ها به دست آمد:

- ۱- با کاهش نسبت میلگرد گذاری FRP به حالت بالانس $(\frac{\rho}{\rho_{fb}})$ از ۱٫۸ به ۰٫۸، ظرفیت خمشی مقطع به طور میانگین ۴۷٫۹ درصد کاهش می یابد و افت شدید در شکل پذیری مقطع اتفاق می افتد.
- ۲- با تغییر درصد میلگردهای فشاری، ناحیه الاستیک کاملاً همپوشانی داشته و تغییرات در ناحیه پس از اوج شروع می شود. کاهش درصد میلگردهای فشاری (ρ) از میزان برابر با درصد میلگردهای کششی (ρ) تا مقدار صفر، تغییری در ظرفیت خمشی تیر ایجاد نمی کند؛ در حالی که منجر به کاهش شکل پذیری مقطع می شود خصوصاً در نسبت های پایین $\frac{\rho}{\rho_{fb}}$ می شود.
- ۳- مدل های اجزاء محدود به دقت رفتار نمونه های آزمایشگاهی را پیش بینی کردند و تفاوت جزئی مشاهده شده در نمودار نیرو-تغییر مکان به علت شکست های زود هنگام ناشی از باز شدن خاموت ها می باشد. هم چنین در تیرها شکست از نوع شکست قطری بحرانی می باشد.
- ۴- اغلب نمونه های مسلح به میلگردها و خاموت های GFRP در تحلیل اجزاء محدود دست بالا گرفته شده؛ حال آنکه نمونه های مسلح به میلگردهای فولادی اغلب دست پایین گرفته شده اند.
- ۵- جایگذاری میلگردهای فولادی با GFRP منجر به افزایش کلی در ظرفیت خمشی تیر می شود. هم چنین به علت اینکه میلگردهای GFRP در ناحیه فروپاشی پس از اوج، تغییر شکل خوبی از خود نشان می دهند؛ بنابراین با جذب انرژی بیشتر منجر به افزایش شکل پذیری خواهند شد.

- [١] ACI ٤٤٠,١R-١٥, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI ٤٤٠,١R-١٥)*, vol. ٢٢, no. ٤, ٢٠١٥.
- [٢] Canadian Standards Association, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S٨٠٦-٠٢)," *Csa S٨٠٦-٠٢*, no. Reaffirmed, p. ٢١٨, ٢٠٠٢.
- [٣] C. Arya, J. L. Clarke, E. A. Kay, and P. D. O'Regan, "TR ٥٥: Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials — A Review," *Struct. Eng. Mech. Comput.*, pp. ١٢٤٣-١٢٥٠, Jan. ٢٠٠١.
- [٤] I. Standard, "Iso ١٠٤٠٦-١," vol. ٢٠٠٨, ٢٠٠٨.
- [٥] fib TG ٩,٣, *fib Bulletin ٣٠: FRP reinforcement in RC structures*, no. ١٩٩٧, ٢٠٠٢.
- [٦] M. Aliasghar-Mamaghani and A. Khaloo, "Seismic behavior of concrete moment frame reinforced with GFRP bars," *Compos. Part B Eng.*, vol. ١٦٣, no. September ٢٠١٨, pp. ٣٢٤-٣٣٨, ٢٠١٩.
- [٧] M. Z. Afifi, H. M. Mohamed, and B. Benmokrane, "Axial Capacity of Circular Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars and Spirals," *J. Compos. Constr.*, vol. ١٨, no. ١, p. ٠٤٠١٣٠١٧, ٢٠١٤.
- [٨] M. Z. Afifi, H. M. Mohamed, and B. Benmokrane, "Strength and Axial Behavior of Circular Concrete Columns Reinforced with CFRP Bars and Spirals," *J. Compos. Constr.*, vol. ١٨, no. ٢, p. ٠٤٠١٣٠٣٥, Apr. 2014.
- [٩] A. M. Amiri, A. Olfati, S. Najjar, P. Beiranvand, and M. H. N. Fard, "STUDY ON FLEXURAL OF REINFORCED GEOPOLYMER CONCRETE BEAM," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. ١٠, no. ٣٠, pp. 89-95, 2016.
- [١٠] K. T. Nguyen, N. Ahn, T. A. Le, and K. Lee, "Theoretical and experimental study on mechanical properties and flexural strength of fly ash-geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. ١٠٦, pp. ٦٥-٧٧, Mar. 2016.
- [١١] Z. Sun, Y. Yang, W. Yan, G. Wu, X. H.-A. in C. Engineering, and undefined ٢٠١٧, "Moment-Curvature Behaviors of Concrete Beams Singly Reinforced by Steel-FRP Composite Bars," *hindawi.com*.
- [١٢] M. Elchalakani and G. Ma, "Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading," *Eng. Struct.*, vol. ١٥١, pp. ٩٣-١٠٤, ٢٠١٧.
- [١٣] L. W, X. M, and C. Z., "Parameters calibration and verification of concrete damage plasticity model of Abaqus," *J. Compos. Constr.*, vol. ١٩, no. ١, p. ٠٤٠١٤٠٢٤, Feb. ٢٠١٤.
- [١٤] A. ٣٦٣R-١٠, "Report on High-Strength Concrete," *Am. Concr. Inst.*, ٢٠١٠.
- [١٥] M. Elchalakani, A. Karrech, M. Dong, M. S. Mohamed Ali, and B. Yang, "Experiments and Finite Element Analysis of GFRP Reinforced Geopolymer Concrete Rectangular Columns Subjected to Concentric and Eccentric Axial Loading," *Structures*, vol. ١٤, no. ٢٠١٧, pp. ٢٧٣-٢٨٩, ٢٠١٨.
- [١٦] A. De Luca, F. Matta, A. N.-A. S. Journal, and undefined ٢٠١٠, "Behavior of full-scale glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete columns under axial load," *vrodbrunei.com*.
- [١٧] C. S. Standards Association of Australia. Committee BD-٠٠٢, *Concrete structures : AS ٣٦٠٠-٢٠٠٩* Standards Australia, ٢٠٠٩.
- [١٨] J. Stoner, "Finite Element Modelling of GFRP Reinforced Concrete Beams," Apr. ٢٠١٥.