

Numerical Investigation on Effects of Compression GFRP Reinforcement on Flexural Strength and Ductility of Reinforced Concrete Beams

*Pegah Aghabozorgi**

M.Sc. Earthquake Engineering, Sharif University of Technology

p.aghabozorgi@gmail.com

Alireza Khaloo

Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

ABSTRACT:

Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars with significant resistance against the corrosion lead to an improvement in the performance of concrete structures and a significant reduction in costs. High ratio of tensile strength to weight, being non-conductive, and non-magnetic are other features of them. Recent international design standards, such as ACI 440.1R-15 do not recommend including FRP reinforcement in compression and replace them by concrete in calculations. In this study, due to the prediction of the effect of the GFRP compression bars on the flexural strength and ductility of GFRP reinforced concrete beams, the thirteen concrete specimens were modeled using finite element software, ABAQUS. Concrete elastoplastic behavior after the peak was defined using the concrete damaged plasticity model in software. Experimental data from previous studies were used as a criterion for numerical investigations and the model results were validated using numerical modeling. The results demonstrated that the displacement-force graphs, obtained from numerical analysis, were in good agreement with the respective curves obtained from the laboratory analysis. According to the numerical evaluation, GFRP reinforced concrete beams included higher flexural strength, i.e., the average flexural strength of steel-reinforced concrete beam was about 90% of the GFRP reinforced concrete beam. Also, the ductility of GFRP concrete beam specimens was greater than that for the steel beam specimen. Increasing the percentage of GFRP compression reinforcement resulted in higher energy absorption and ultimately higher ductility of the GFRP concrete beams. The numerical results indicated that GFRP compression reinforcement does not significantly increase the flexural strength of beams.

Keywords: *GFRP, ABAQUS, Beams, Flexural strength, Concrete damaged plasticity*

بررسی عددی تاثیر میلگردهای فشاری GFRP بر مقاومت خمشی و شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح

دریافت مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۰۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۱۰-۰۲

پگاه آقابزرگی*

کارشناس ارشد زلزله، دانشگاه صنعتی شریف

p.aghabozorgi@gmail.com

علیرضا خالو

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

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، نارسا و غیرمغناطیس بودن آن می‌باشد. آیین‌نامه‌های طراحی بین الملل اخیر از قبیل ACI 440.1R-15 استفاده از آرماتورهای FRP را در فشار مجاز نموده‌اند 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 پلاستیسیت 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.

واژه‌های کلیدی: GFRP، ABAQUS، تیرها، مقاومت خمشی، مدل پلاستیسیت آسیب بتن.

در طول دو دهه گذشته، میلگردهای FRP به دلیل غلبه بر خوردگی و دیگر مشکلات متداول میلگردهای فولادی، به عنوان جایگزینی مناسبی برای این میلگردها، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. 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. CFRP، AFRP و GFRP متداول‌ترین گونه‌های FRP هستند. 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. 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 [1] ACI 440.1R-15، [2] CAN/CSA S806، [3] TR55، [4] ISO10406.1 و [5] fib استفاده از میلگردگذاری FRP را در محاسبات ظرفیت فشاری اعضا توصیه نمی‌کنند. بدین سبب علاوه بر بررسی‌های آزمایشگاهی، نیازمند شبیه‌سازی‌های عددی به منظور صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی و ارزیابی دقیق تر، 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]. الفایفای و همکارانش [7]، [8] در سال ۲۰۱۴ پی بردند که مقاومت فشاری نهایی میلگردهای GFRP تقریباً ۳۵ درصد مقاومت کششی نهایی می‌باشد؛ که این مقدار بیشتر از ۵۰ درصد مقدار اندازه‌گیری شده توسط دیتز^۲ 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^۴ [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^۵ 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.

1 Alfifi et al.

2 Deitz

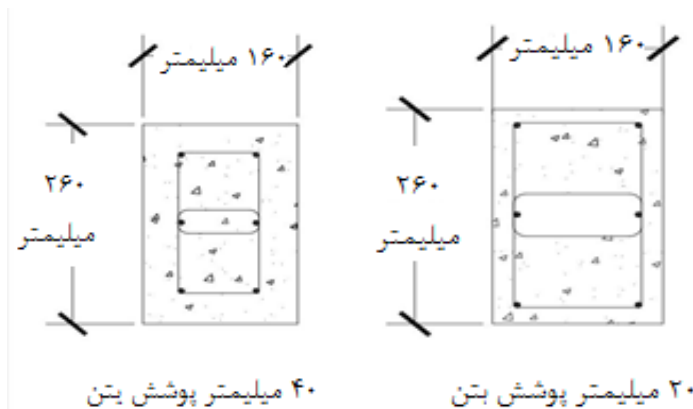
3 Amiri et al.

4 Nguyen et al.

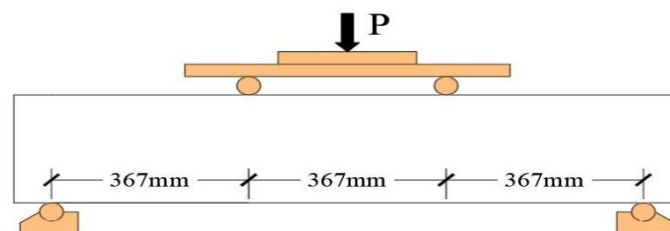
5 Sun et al.

۲-مدل سازی با روش اجزاء محدود

به منظور بررسی رفتار مدل های ساخته شده توسط نرم افزار ABAQUS، ابتدا با مقایسه نتایج اندازه گیری شده در یک آزمایش معتبر با نمودارهای به دست آمده از نرم افزار، صحت و دقت روش مدل سازی تعیین شده است و می توان به نتایج پیش بینی شده توسط نرم افزار اطمینان حاصل کرد و سپس به تحلیل نمودارها پرداخت. در این پژوهش نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط الچلکانی و همکاران^[12] به عنوان نمونه مرجع جهت استفاده در صحت سنجی نتایج مدل سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این پژوهش ۱۳ نمونه تیر بتنی به ابعاد مقطع عرضی ۱۲۰*۱۶۰ میلی متر، تحت بارگذاری خمشی چهارنقطه ای و طول دهانه ۱۱۰۱ میلی متر شبیه سازی شده اند. مقطع تیرهای مسلح فولادی و GFRP در شکل ۱ نشان داده شده است و در شکل ۲ شماتیک و نحوه بارگذاری تیر بتنی ترسیم شده است. ۱۲ نمونه با میلگردها و خاموت های GFRP و یک نمونه دیگر با میلگردها و خاموت های فولادی مسلح شده اند. 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 N12 به نسبت حجمی ۱٫۵۹ درصد مسلح شده اند. میلگردگذاری عرضی برای نمونه بتنی مسلح GFRP به قطر ۲# و برای نمونه های بتنی مسلح فولادی R6 انتخاب شده و همچنین فاصله میلگردگذاری عرضی در تمام نمونه ها ۱۵۰ میلی متر می باشد. پوشش بتن برای نمونه های بتنی مسلح فولادی ۴۰ میلی متر و برای GFRP، ۲۰ میلی متر مطابق شکل ۱ اتخاذ شده است.



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 شده است. همچنین از بتنی با مقاومت ۳۲٫۷۵ مگاپاسکال در محاسبات استفاده شده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی میلگردهای GFRP[12]

کرنش نهایی در کشش (برحسب درصد)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیک کششی (گیگاپاسکال)	مساحت (میلی متر مربع)	قطر میلگرد (میلی - متر)
۱,۹	۷۸۴	۴۶,۱	۳۱,۷	۶,۳۵
۱,۷	۷۰۸	۴۶,۳	۱۲۶,۷	۱۲,۷

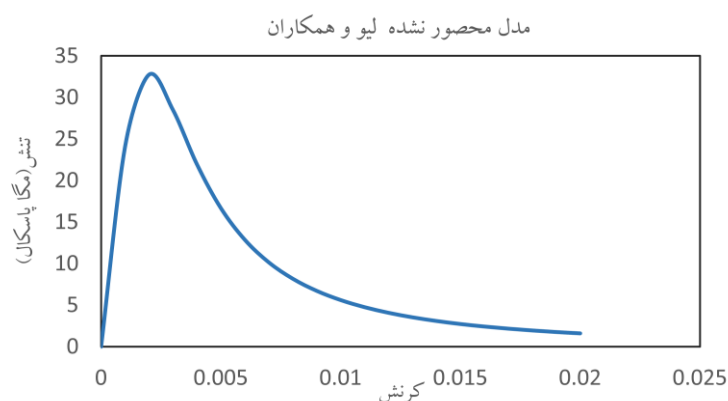
جدول ۲: خواص فیزیکی میلگردهای فولادی [12]

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

۲-۱ مدل های ساختاری مصالح

۲-۱-۱ مدل بتن

در نرم افزار ABAQUS جهت معرفی مصالح طیف وسیعی از خصوصیات رفتاری غیرالاستیک وجود دارد که در این پژوهش مدل پلاستیسیته-آسیب بر پایه مدل ليو و همکارانش [13]، مناسب ترین مدل برای توصیف رفتار بتن نمونه های آزمایشگاهی می باشد. در این مدل دو مکانیزم گسیختگی ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری برای بتن فرض می شود. رفتار بتن تحت کشش نیز تا تشکیل ریز ترک های 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 الاستیسیته در اثر ترک خوردگی تعریف می شود. نمودار تنش-کرنش بتن در فشار در شکل نشان داده شده است. نمودار تنش-کرنش برای بتن محصور نشده در فشار بر پایه روابط ليو و همکاران [13] ترسیم شده و مقادیر تنش بر حسب کرنش ترک خوردگی (پلاستیک) به نرم افزار وارد شده است.



شکل ۳: نمودار تنش-کرنش بتن در فشار

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

مدول یانگ بتن با استفاده از معادله (۱) تعیین شده است. این معادله از ضوابط موجود در آیین نامه ACI 363R-10 [14] پیروی می کند.

$$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \quad (۱)$$

f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، ضریب پواسون به مقدار ۰٫۲ فرض می شود. در ناحیه غیر الاستیک از مدل پلاستیسیته-آسیب استفاده شده است. این مدل پنج مولفه رفتاری شامل: رفتار فشاری، آسیب فشاری، رفتار کششی، آسیب کششی و پلاستیسیته را در برمی گیرد. در این پژوهش، رفتار پلاستیسیته به صورت زیر در نرم افزار تعریف شده است [15]:

$$\psi = 40 \quad (۲)$$

$$\frac{f_{bo}}{f_c} = 1.5 (f_c)^{-0.075} \quad (۳)$$

$$K_c = \frac{5.5}{5 + 2(f_c^{0.075})} \quad (۴)$$

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 ليو و همکارانش [13] جهت مدلسازی رفتار تنش-کرنش بتن استفاده کرده اند.

$$\sigma_c = \frac{E_c * \varepsilon_c}{1 + \left((R + R_e - 2) * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right) \right) - \left((2R - 1) * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right) + (R * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^3)} \quad (۵)$$

$$R = \left(\frac{R_e}{3} \right) - 0.25 \quad (۶)$$

$$R_e = \left(\frac{E_c}{E_o} \right) \quad (۷)$$

$$E_o = \left(\frac{f_c}{\varepsilon_{co}} \right) \quad (۸)$$

σ_c تنش فشاری بتن، ε_c کرنش فشاری، ε_{co} کرنش فشاری در بار اوج می باشد. ε_{co} طبق رابطه مندر [16] برابر ۰٫۰۰۲ فرض شده است.

رفتار بتن در کشش همانند فشار در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک قرار می گیرد. تنش تسلیم کششی طبق معادله (۹) [17] در نرم افزار تعریف شده است.

$$f_{ct} = 0.4 \sqrt{f_c} \quad (۹)$$

هم چنین تنش کششی از معادله (۱۰) توسط استونر [18] به دست آمده است.

$$f_t = \begin{cases} E_{co} \varepsilon_t & \text{If } \varepsilon_t < \varepsilon_{to} \\ f_{ct} \left(\frac{\varepsilon_{to}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4} & \text{If } \varepsilon_{to} < \varepsilon_t \end{cases} \quad (۱۰)$$

ε_t کرنش بتن و ε_{to} کرنش کششی دو بار اوج می باشد از دیگر مشخصه های مدل پلاستیسیته آسیب بتن، مکانیزم آسیب می باشد. پارامتر آسیب تحت بارگذاری فشاری بتن d_c ، پارامتر آسیب تحت بارگذاری کششی بتن d_t به صورت زیر تعریف می شود [13]:

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

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

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

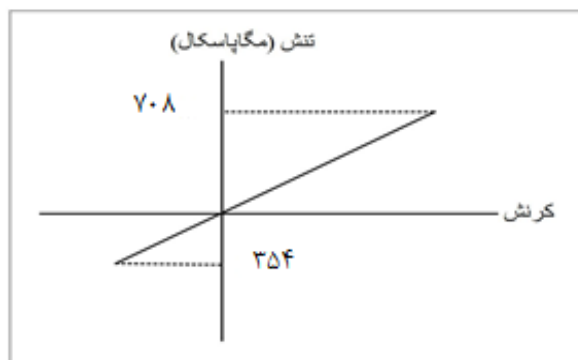
$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_o} \quad (14)$$

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

در محاسبات η_t ، ۰٫۶ و η_c ، ۰٫۷ فرض شده است.

۲-۱-۲ مدل میلگردهای GFRP

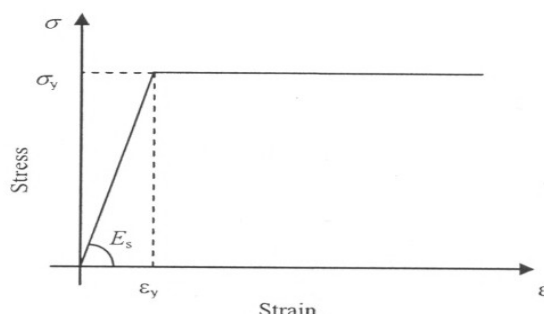
رابطه تنش-کرنش میلگردهای GFRP به صورت الاستیک خطی ایزوتروپیک فرض می شود. هیچ ضابطه آسیبی برای این میلگردها به کار نمی رود. خواص این میلگردها به مد بارگذاری (فشاری یا کششی) وابسته می باشد. در این پژوهش مدول یانگ در فشار و کشش یکسان فرض شده است و تنش فشاری نصف تنش کششی در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون ۰٫۲۵ می باشد. قابل ذکر است که در نرم افزار ABAQUS، رفتار میلگردهای GFRP به صورت مدل سه خطی تعریف شده اند. شکل نمودار تنش-کرنش میلگردهای GFRP در این پژوهش را نشان می دهد.



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

۳-۱-۲ مدل میلگرد فولادی

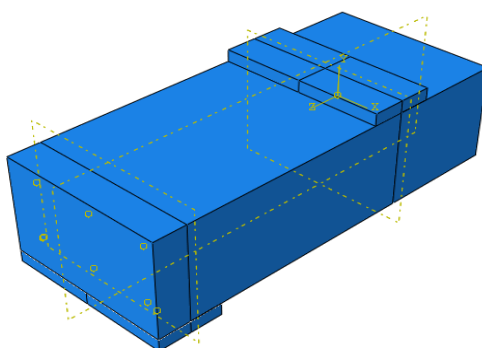
در این پژوهش جهت مدلسازی میلگردهای فولادی از مدل دو خطی الاستوپلاستیک کامل ایزوتروپیک استفاده شده است. رفتار این میلگردها در ناحیه الاستیک با مدول یانگ و ضریب پواسون و در ناحیه پلاستیک بر اساس معیار مایسز تعریف شده است. نمودار تنش- کرنش فولاد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار تنش-کرنش دو خطی فولاد

۲-۲ مدل های اجزاء محدود

به منظور مدلسازی نمونه های بتنی از المان سه بعدی همگن solid و جهت شبیه سازی میلگردهای طولی و عرضی از المان سه بعدی wire استفاده شده است. نوع المان بتن همه نمونه ها C3D8R می باشد که یک المان سه بعدی و هشت گره ای با یکپارچگی کاهش یافته، مناسب جهت تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی است و در ادامه از المان T3D2 که یک المان خریپای دو گره ای شکل پذیر می باشد، به منظور مدلسازی میلگردهای طولی و عرضی استفاده شده است. فراهم نمودن سختی محوری، علت اصلی استفاده از المان خریپا می باشد. هندسه مدل های اجزاء محدود در شکل ۶ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در نرم افزار طبق اصل تقارن، نصف تیر مدل شده است.



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

در این پژوهش جهت مدلسازی رفتار غیرالاستیک بتن، مدل پلاستیسیته-آسیب انتخاب شده است. در این مدل دو مکانیزم گسیختگی برای بتن فرض می شوند که عبارتند از: ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری. رفتار الاستیک-پلاستیک بتن در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور شبیه سازی سطح مشترک بین بتن و میلگردها، قید embedded در نرم افزار ABAQUS تعریف می شود. این قید نودهای میلگردگذاری را به درجات آزادی ناحیه میزبان متناظرشان (بتن) محدود می کند. بنابراین سطح مشترک میلگردها و خاموت ها با بتن شبیه سازی نمی شود بلکه میلگردها و خاموت ها در نرم افزار ABAQUS در ناحیه بتن مدفون می شوند و منجر می شوند که آرماتور به فضای بتنی اطراف خود چسبیده و با آن حرکت کند. هم چنین از لغزش میلگردهای فولادی در بتن صرف نظر شده است.

۳- نمونه‌های مدل شده در نرم افزار ABAQUS

در این پژوهش ۱۰ نمونه تیر بتنی در نرم افزار مدل‌سازی شده که ۲ نمونه تیر بتنی صحت سنجی شده‌است و ۸ نمونه دیگر در نرم افزار 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 شده‌است.

جدول ۳: خواص مکانیکی نمونه‌ها

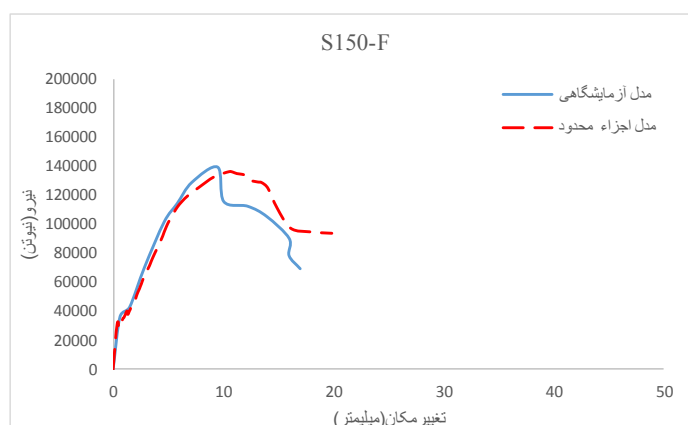
نمونه	نوع میلگرد	میلگردگذاری طولی				میلگردگذاری عرضی	
		قطر میلگرد در فشار (میلی‌متر)	قطر میلگرد در کشش (میلی‌متر)	نسبت (p/fbp) میلگرد کششی به نسبت بالانس FRP	درصد حجمی میلگرد فشاری (ρ_f)	فاصله (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)
S150-F	فولادی	۱۲	۱۲	-	۰,۸۱۵۶	۶	۱۵۰
G150-F1	GFRP	۱۴,۲۲۵	۱۴,۲۲۵	۱,۸	۱,۱۴۶	۶,۳۵	۱۵۰
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 اجزاء محدود

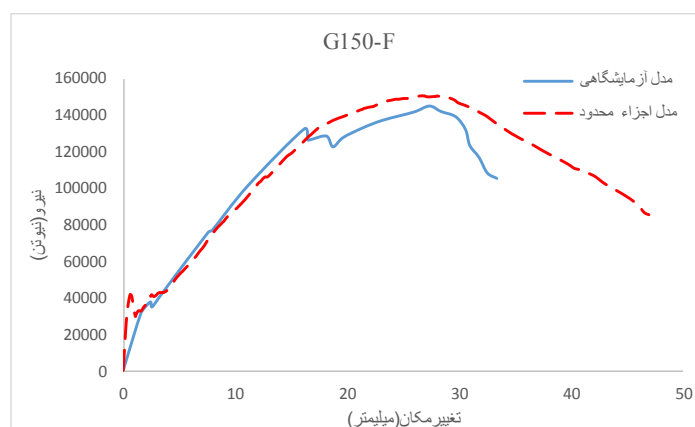
در این بخش به مقایسه نتایج نمونه آزمایشگاهی چلکانی [12] و نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود در نرم افزار می‌پردازیم. شکل ۸ رفتار نمونه‌های خمشی و تطابق مناسب نمودارهای نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های اجزاء محدود را در این پژوهش نشان می‌دهند. در این نمودارها، نیرو محوری، عکس العمل تکیه‌گاهی 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.

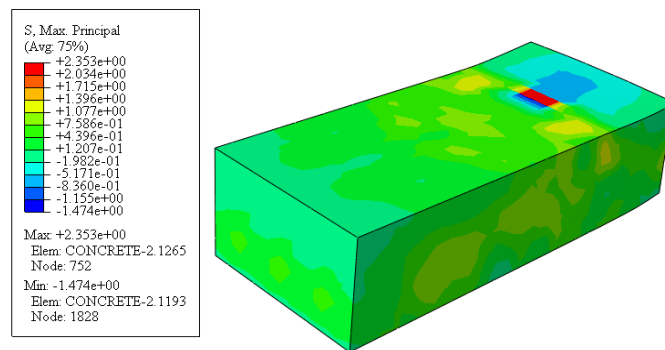


شکل ۷: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود برای تیرهای S150-F و G150-F

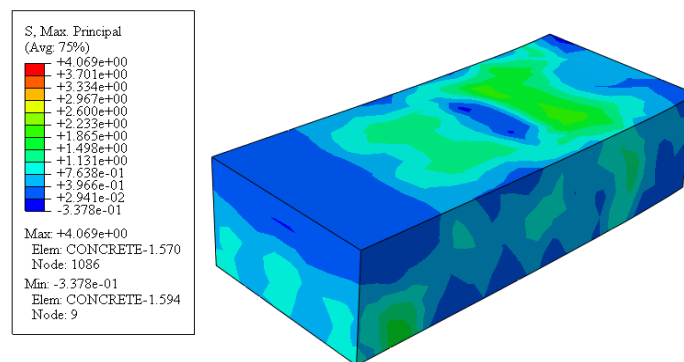


شکل ۸: مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود برای تیرهای S150-F و G150-F

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



شکل ۹: کانتور تنش ماکزیمم تیر بتنی *S150-F*



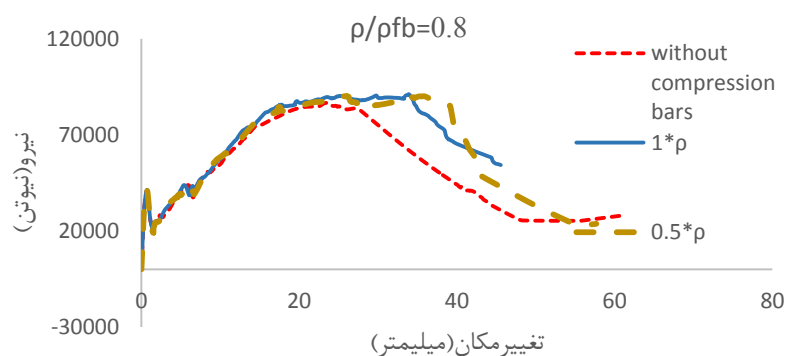
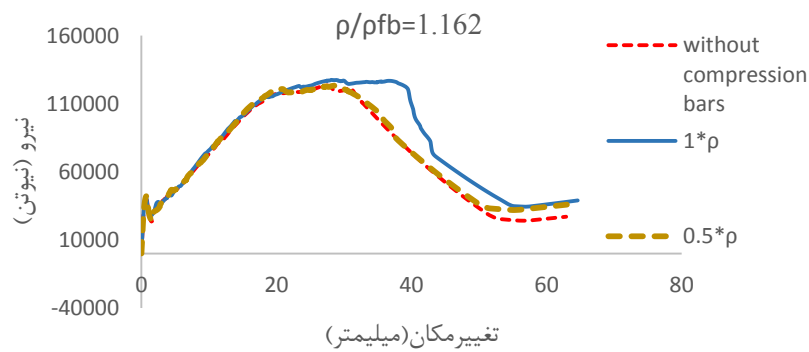
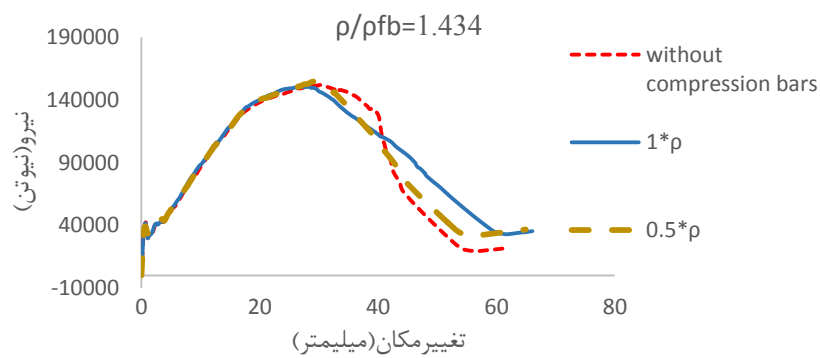
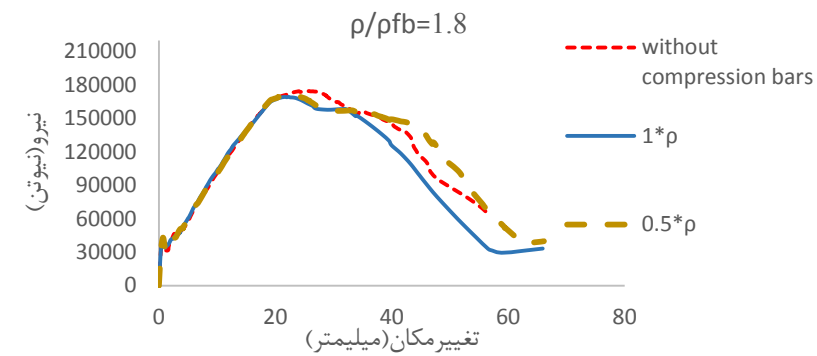
شکل ۱۰: کانتور تنش ماکزیمم تیر بتنی *G150-F*

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 شده‌است. 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 ACI440.1R [15] 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 تغییرمکان- نیرو حاصل شوند. نمودار مقایسه تیرها در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. 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.

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

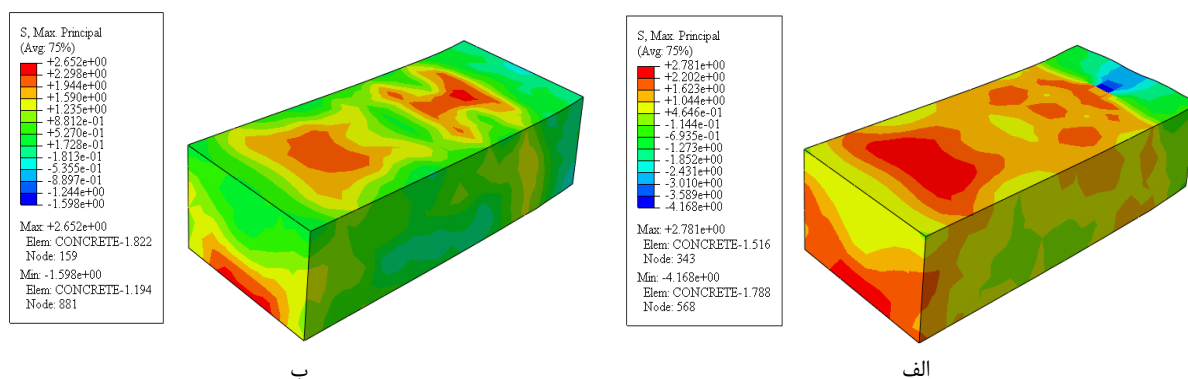
در این معادله f_{fu} مقاومت کششی FRP، E_f مدول الاستیسیته میلگردهای FRP، ϵ_{cu} کرنش نهایی بتن، ρ_{fb} نسبت میلگردگذاری FRP بالانس می‌باشد.



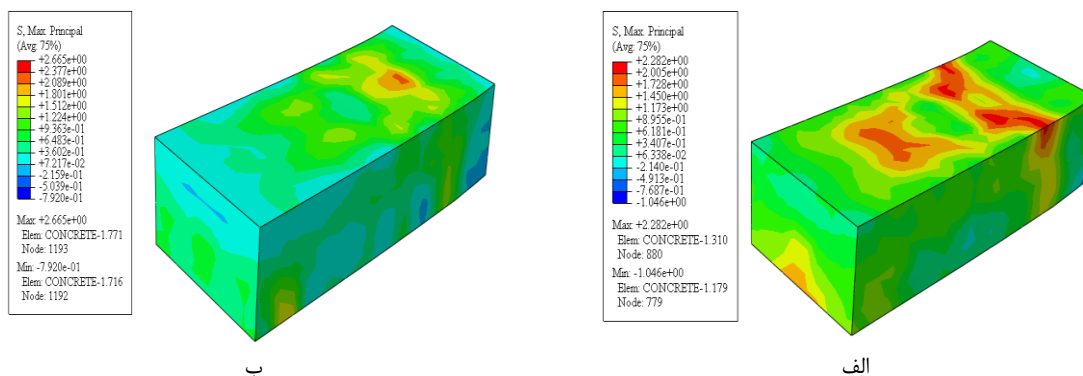
شکل ۱۱: مقایسه منحنی‌های تغییر مکان-نیرو برای تیر بتنی مسلح GFRP با نسبت‌های مختلف $\frac{\rho}{\rho_{fb}}$ و درصد میلگرد فشاری متغیر

با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های ساخته شده در نرم افزار، در همه تیرهای بتنی مسلح با GFRP با نسبت های مختلف میلگردگذاری 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 شکل پذیری 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 میلگردگذاری 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 و ۱۳ کانتور تنش ماکزیمم مدل‌های ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: کانتور تنش تیر بتنی $G150-F$: 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 $G150-F$: 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 میلگردگذاری 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 هم پوشانی 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- با توجه به بیشتر بودن مدول الاستیسیته GFRP نسبت به فولاد، جایگذاری میلگردهای فولادی با GFRP منجر به افزایش مشخصی در ظرفیت خمشی تیر نمی 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.

۷- مراجع

[1] ACI 440.1R-15, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI440.1R-15)*, vol. 22, no. 4. 2015.

[2] Canadian Standards Association, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S806-02)," Csa S806-02, no. Reaffirmed, p. 218, 2002.

[3] C. Arya, J. L. Clarke, E. A. Kay, and P. D. O'Regan, "TR 55: Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials — A Review," *Struct. Eng. Mech. Comput.*, pp. 1243–1250, Jan. 2001.

[4] I. Standard, "Iso 10406-1," vol. 2008, 2008.

[5] fib TG 9.3, *fib Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*, no. 1997. 2002.

[6] M. Aliasghar-Mamaghani and A. Khaloo, "Seismic behavior of concrete moment frame reinforced with GFRP bars," *Compos. Part B Eng.*, vol. 163, no. September 2018, pp. 324–338, 2019.

[7] 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. 18, no. 1, p. 04013017, 2014.

[8] 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. 18, no. 2, p. 04013035, Apr. 2014.

- [9] 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. 10, no. 30, pp. 89–95, 2016.
- [10] 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. 106, pp. 65–77, Mar. 2016.
- [11] Z. Sun, Y. Yang, W. Yan, G. Wu, X. H.-A. in C. Engineering, and undefined 2017, "Moment-Curvature Behaviors of Concrete Beams Singly Reinforced by Steel-FRP Composite Bars," *hindawi.com*.
- [12] M. Elchalakani and G. Ma, "Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading," *Eng. Struct.*, vol. 151, pp. 93–104, 2017.
- [13] L. W, X. M, and C. Z., "Parameters calibration and verification of concrete damage plasticity model of Abaqus.," *J. Compos. Constr.*, vol. 19, no. 1, p. 04014026, Feb. 2014.
- [14] A. 363R-10, "Report on High-Strenght Concrete," *Am. Concr. Inst.*, 2010.
- [15] 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. 14, no. 2017, pp. 273–289, 2018.
- [16] A. De Luca, F. Matta, A. N.-A. S. Journal, and undefined 2010, "Behavior of full-scale glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete columns under axial load," *vrodbrunei.com*.
- [17] C. S. Standards Association of Australia. Committee BD-002, *Concrete structures : AS 3600-2009*. Standards Australia, 2009.
- [18] J. Stoner, "Finite Element Modelling of GFRP Reinforced Concrete Beams," *Apr.* 2015.