

## بررسی عددی اثر فاصله‌ی شیار بر رفتار خمشی تیر بتنی تقویت شده به روش EBROG

مسعود محمودآبادی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

احسان خان احمدی

دانشجوی ترم آخر کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

سیده محمد رضا حسنی \*

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قم، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، قم، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر مسئله‌ی تقویت و ترمیم سازه‌های ضعیف و آسیب‌دیده در سطح وسیعی مطرح گردیده است. در این راستا روش تسلیح خارجی با نصب بر روی شیارهای طولی EBROG در سال‌های اخیر ایجاد شده است. نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته بر این روش نشان داده که با انتخاب عرض و عمق شیار معین می‌توان جداشدگی را به تعویق انداخت و یا آن را به‌طور کامل حذف نمود. در این مطالعه به منظور ارزیابی عوامل مؤثر بر روش EBROG، رفتار این روش به صورت مدل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل‌سازی عددی نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج نشان داده است که افزایش فاصله‌ی شیار در روش EBROG؛ میزان افزایش باربری نهایی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی تقویت نشده را تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش تعداد شیار در این روش باربری نهایی و جذب انرژی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: روش EBROG، جداشدگی، ورقه‌های FRP، روش اجزا محدود، تقویت ترمیم.

## ۱- مقدمه

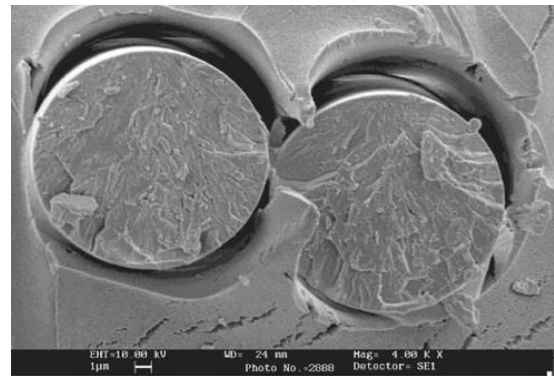
مواد FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند:

فایبر (Fiber) یا الیاف

رزین (Resin) یا ماده‌ی چسباننده.

الیاف که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در ماده FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع الیاف، قطر آن در محدوده ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد. رزین اصولاً به‌عنوان یک ماده چسباننده عمل می‌کند و این الیاف را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد [۱].

در شکل (۱)، تصویری میکروسکوپی از مقطع FRP نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویری میکروسکوپی از نحوه‌ی قرارگیری الیاف شیشه داخل رزین [۲].

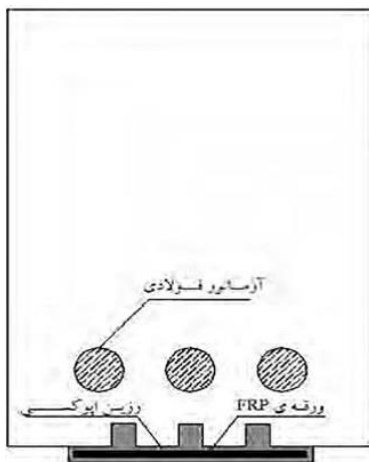
در راستای کنترل و به تأخیر انداختن گسیختگی جداشدگی، روش شیارزنی به نام تسلیح خارجی با نصب بر روی شیارهای طولی که همان EBROG<sup>۱</sup> می‌باشد در سال ۲۰۱۰ معرفی گردیده است [۱]. نتایج این تحقیقات نشان داده است که با انتخاب عرض و عمق شیار معین، می‌توان از جداشدگی ورق به‌طور کامل جلوگیری کرد و یا آن را تا حد زیادی به تعویق انداخت [۱] و [۴-۶].

از مزایای روش شیارزنی می‌توان به تأخیر انداختن وقوع پدیده جداشدگی نسبت به سایر روش‌های موجود و امکان استفاده حداکثر از ظرفیت ورق FRP، صرفه‌جویی در هزینه و وقت با حذف عملیات آماده‌سازی سطحی، سازگاری بیشتر این روش با محیط‌زیست با حذف عملیات آماده‌سازی سطحی و ارائه روشی مطمئن جهت تقویت سازه به‌وسیله ورق FRP با کاهش چشم‌گیر احتمال وقوع جداشدگی سطحی اشاره نمود.

مراحل تقویت خمشی تیر بتن آرمه به روش EBROG به شرح زیر است [۷]:

ابتدا در وجه کششی تیر، شیارهای طولی با طول، عرض و عمق مناسب ایجاد می‌شود. سپس سطح بتن و شیارهای ایجادشده به‌وسیله فشار هوا تمیز می‌گردد. در مرحله‌ی بعد شیارها به‌وسیله رزین اپوکسی مناسب پر می‌گردند. ورق FRP با استفاده از رزین اپوکسی مناسب عمل‌آوری شده و بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود. چسب اضافی از سطح بتن برداشته می‌شود.

شکل (۲) مقطع یک تیر تقویت‌شده به روش EBROG را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقطع یک تیر تقویت‌شده به روش [۸].

کامپوزیت‌های FRP به جهت نحوه‌ی ساخت و مواد تشکیل‌دهنده دارای خواصی نظیر دوام بالا، سبک‌وزن بودن و ضخامت کم، مقاومت و مدول الاستیسیته‌ی بالا، مقاومت در برابر عوامل محیطی، حمل‌ونقل راحت و نصب آسان می‌باشند و از این مواد جهت تقویت خمشی، تقویت برشی و یا تقویت هم‌زمان خمشی-برشی، در انواع سازه‌ها استفاده می‌شود. امروزه به علت خصوصیات منحصربه‌فرد مواد FRP، استفاده از آن‌ها به‌صورت میلگردهای درون سطحی و ورق‌های خارجی برای تقویت سازه‌های بتن آرمه، تبدیل به یکی از متداول‌ترین روش‌های مقاوم‌سازی شده است [۳]. گسیختگی در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت خمشی شده با استفاده از ورق FRP در حالت کلی به سه دسته ۱- گسیختگی، ۲- خمشی گسیختگی برشی و ۳- گسیختگی جداشدگی تقسیم می‌شود.

<sup>1</sup> Externally Bonded Reinforcement On Grooves

## ۲- پیشینه تحقیقات

نمودارهای طراحی برای تیرهای مقاوم شده به روش شیارزنی گزارش گردید [۱۰].

مستوفی نژاد و خزاعی در سال ۲۰۱۲، تأثیر سطح جانبی شیار بر رفتار تیرهای تقویت شده به روش شیارزنی را بررسی کردند. در این تحقیق با تعریف متغیر سطح جانبی شیار برای هر نمونه به مقایسه بار نهایی و شکل پذیری با در نظر گرفتن سطح جانبی شیار ایجاد شده روی وجه کششی تیر پرداخته شد. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، برای شیارهای با عمق ۲ میلی متر با ۲/۵ برابر شدن سطح جانبی شیارها، باربری نهایی تیرها ۱۸ درصد و شکل پذیری ۲۲ درصد افزایش یافته است. همچنین برای شیارهای با عمق ۱۰ میلی متر با ۳/۳ برابر شدن سطح جانبی شیارها، باربری نهایی تیرها ۴۳ درصد و شکل پذیری ۷۱ درصد افزایش یافته است [۶].

همان طور که ملاحظه شد، روش EBROG در ابتدای راه خود بوده و نیاز به تحقیقات بیشتری پیرامون این روش وجود دارد؛ در این پژوهش میزان تأثیر پارامتر فاصله‌ی شیار بر عملکرد روش EBROG در کنترل جداشدگی ورق FRP بررسی می‌شود.

## ۳- مدل سازی رفتار مصالح در نرم افزار Abaqus

### ۳-۱- رفتار بتن

مدل آسیب خمیری بتن که CDP می‌باشد (Concrete Damage Plasticity) مدل توانمندی است که برای بارگذاری‌های مختلف کاربرد داشته و بایان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار این ماده را به صورت واقعی تر بیان می‌کند. مدل معرفی شده برای بتن در حالت آسیب دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار پلاستیک بوده و دو مکانیسم اصلی خرابی در این مدل ترک‌های ناشی از کشش و خردشدگی در قسمت فشاری می‌باشد. در مدل مذکور فرض می‌گردد که پاسخ به کشش و فشار تک‌محوره به وسیله معیار خرابی پلاستیک کنترل می‌شود. در اثر کشش تک‌محوره منحنی تنش-کشش تا نقطه تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن مقارن است. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده درمی‌آیند که به شکل منحنی نرم شدگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می‌شوند. تحت فشار تک‌محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی

مستوفی نژاد و محمودآبادی در سال ۲۰۱۰ تحقیقاتی را در دانشگاه صنعتی اصفهان آغاز کردند که منجر به ابداع روش جدید شیارزنی گردید. در این تحقیقات از ۱۰۰ نمونه‌ی منشوری با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ استفاده شد. دسته‌ی اول نمونه‌ها فاقد ورق FRP بودند و دسته‌ی دوم شامل چهار گروه با آماده‌سازی سطحی، شیارهای طولی، شیارهای عرضی و شیارهای قطری بودند. برای مقاوم‌سازی تیرهای بتنی از ورق‌های CFRP با پهنای ۷۰ و طول ۳۶۰ میلی متر استفاده شد. تیرها تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. گروه‌هایی که مربوط به شیارهای عرضی و قطری بودند باربری به مراتب کمتری نسبت به شیارهای طولی از خود نشان داده‌اند. گروه‌هایی که مربوط به شیارهای طولی با عمق ۲ و ۱۰ میلی متر بودند بار خیلی بیشتری نسبت به گروه‌های دیگر برده‌اند [۱].

مستوفی نژاد و حاج رسولی‌ها در سال ۲۰۱۰؛ سه عمق شیار شامل ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ میلی متر، و سه عرض مختلف شیار ۴، ۶ و ۸ میلی متر در هر یک از مقاومت‌های فشاری ۲۵، ۴۰، ۵۵ و ۶۵ مگاپاسکال مورد بررسی قرار دادند. تعداد دو ردیف شیار و فاصله آن‌ها ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق از ۳۰ نمونه‌ی تیر استفاده شد. افزایش عمق شیارها از ۷/۵ به ۱۰ میلی متر سبب افزایش باربری شد، اما در عمق ۱۲/۵ میلی متر باربری نسبت به عمق ۱۰ میلی متر کاهش یافت. همچنین با افزایش عرض شیارها از ۴ تا ۸ میلی متر باربری افزایش یافت. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، بیشترین باربری برای تیرهای مقاوم شده با روش شیارزنی در عمق ۱۰ میلی متر و عرض ۸ میلی متر برای شیارها اتفاق افتاده است [۹]. مستوفی نژاد و ابراهیم پور در سال ۲۰۱۱ تحلیلی غیرخطی با روش اجزای محدود روی نمونه‌های با ابعاد واقعی انجام دادند. در این تحقیق ۴۸ تیر با طول بیش از ۳ متر مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای زیادی از جمله درصد تسلیح داخلی، تعداد لایه‌های ورق FRP، عرض و عمق شیارها و تعداد ردیف‌های شیارها بررسی گردید. برای شیارها عرض‌های ۵ و ۸ میلی متر و عمق‌های ۱۲ و ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده است، همچنین تعداد ردیف‌های شیار ۴ و ۶ و طول هر کدام ۲/۸ متر است. نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Abaqus تحت آزمایش چهار نقطه‌ای قرار گرفته و میزان باربری در لحظه‌ی گسیختگی به دست آمد. در نهایت نتایج تحت عنوان

به صورت الاستیک خواهد بود و در ناحیه پلاستیک رفتار عموماً به وسیله منحنی سخت شدگی بیان می شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی منحنی ها به صورت منحنی نرم شدگی در می آیند. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی، خصوصیات اصلی بتنی را ارضاء می کند. در این مدل از مدول الاستیسیته کاهش یافته استفاده می شود [۱۱].

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_s}{\tau_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_t}{\tau_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (2)$$

فرضیه گسترش خرابی چسب با توجه به انرژی آزاد شده، بیان شده است. توصیف مدل در کتابخانه مصالح نرم افزار آباکوس موجود است. در این نرم افزار، وابستگی انرژی شکست به مود ترکیبی بر اساس معیار گسیختگی BK (Benzaggah-Kenane) طبق رابطه (۳) تعریف شده است:

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_\varphi}{G_\psi} \right\}^\eta = G^c \quad (3)$$

که در آن،  $G_\varphi = G_s + G_t$  و  $G_\psi = G_n + G_s$  و  $\eta$  پارامترهای مصالح هستند.  $G_t, G_s, G_n$  به ترتیب، اشاره به کار انجام شده به وسیله کشش و جدایش هم زمان با آن در جهت عمودی، اولین و دومین جهت های کششی، دارند. این معیار، به ویژه هنگامی که انرژی های شکست بحرانی در طی تغییر شکل کلی در طول اولین و دومین جهت های تنش؛ یکسان هستند، سودمند است؛ یعنی:

$$G_s^c = G_t^c \quad (4)$$

مقادیر استفاده شده در این تحقیق عبارتند از:  $J/m^2$  همچنین مقدار  $G_s^c = G_t^c = 900 J/m^2$  و  $G_n^c = 111.52$  توصیه شده برای  $\eta = 1.45$  می باشد (۷) و مقدار  $G_n^c$  از روابط تجربی انرژی شکست، برابر با سطح زیر منحنی نرم شوندگی بتن طبق رابطه (۵) به دست آمده است:

$$G_F = 2.5\alpha_0 \left( \frac{f_c'}{0.051} \right)^{0.46} \left( 1 + \frac{d_a}{11.27} \right)^{0.22} \left( \frac{w}{c} \right)^{-0.3} \quad (5)$$

منحنی نرم شوندگی بتن تحت بارگذاری کششی تک محوری در شکل (۴) نمایش داده شده است که در آن،  $f_t'$  مقاومت کششی بتن است که شروع ترک های ریز در بتن را کنترل می کند،  $G_F$  کل انرژی شکست است که بنا بر تعریف؛ میزان انرژی لازم برای

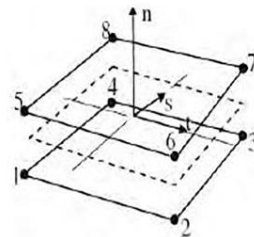
بخش خرابی به نرم افزار نیاز به تعریف بخش الاستیک و بخش خرابی چسب می باشد. با استفاده از مدل لو رفتار آغازین لایه چسب در شروع خرابی به شکل رفتار الاستیک خطی تعریف می شود [۱۲].

### ۳-۲- رفتار چسب

در نرم افزار، در بخش تعریف خصوصیات مکانیکی الاستیک، نوع کشش انتخاب می شود و می بایست بردار سختی اولیه برای آن تعریف شود. بردار سختی اولیه لایه چسب، در حالت غیر آسیب دیده، از رابطه (۱) به دست می آید [۱۳]:

$$K_{mm} = \frac{E}{t}, K_{tt} = \frac{G_1}{t}, K_{ss} = \frac{G_2}{t} \quad (1)$$

در روابط بالا،  $t$  ضخامت چسب،  $E$  مدول الاستیسیته چسب،  $G_1$  و  $G_2$  مدول برشی چسب در جهات دوم و سوم صفحه،  $K_{mm}, K_{tt}, K_{ss}$  مقدار سختی اولیه در جهات عمود و ۲ جهت اصلی دیگر با توجه به شکل (۳) است.



شکل ۳- المان Cohesive، ۸ گرهی سه بعدی؛ COH3D8

[۱۳].

تعریف بخش خرابی به نرم افزار، شامل رفتار آغاز خرابی و گسترش خرابی می باشد. برای تعریف رفتار شروع خرابی، پارامترهای  $\sigma_s, \sigma_t, \sigma_n$  که عبارتند از مقادیر حداکثر تنش های کششی و برشی ماکزیمم چسب و  $n$  و  $s$  و  $t$ ؛ جهت های مؤلفه های تنش در شکل بالا در محدوده الاستیک، معرفی

الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه را در نظر می‌گیرند. معیارهای شروع آسیب به صورت روابط (۶)، (۷)، (۸) و (۹) می‌باشند [۱۵]:  
کشش الیاف:

$$\hat{\sigma}_{11} \geq 0 \rightarrow F_f^t = \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (۶)$$

فشار الیاف:

$$\hat{\sigma}_{11} < 0 \rightarrow F_f^c = \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^G} \right)^2 \quad (۷)$$

کشش زمینه:

$$\hat{\sigma}_{22} \geq 0 \rightarrow F_m^t = \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (۸)$$

فشار زمینه:

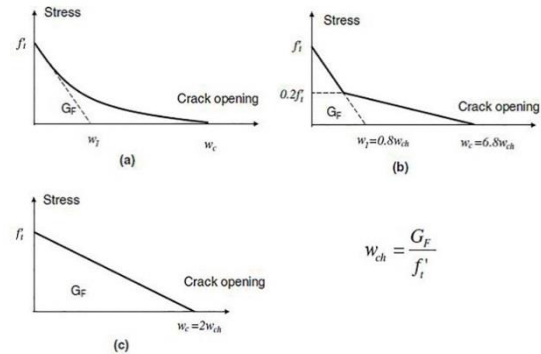
$$\hat{\sigma}_{22} < 0 \rightarrow F_m^c = \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y^c}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^c} + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (۹)$$

در معادلات فوق،  $X^T$  بیانگر استحکام کششی طولی،  $X^C$  بیانگر استحکام فشاری طولی،  $Y^T$  بیانگر استحکام کششی عرضی،  $Y^C$  بیانگر استحکام فشاری عرضی،  $S^L$  بیانگر استحکام برشی طولی،  $S^T$  بیانگر استحکام برشی عرضی هستند و  $\hat{\sigma}_{11}$ ،  $\hat{\sigma}_{22}$ ،  $\hat{\tau}_{12}$  مؤلفه‌های تانسور تنش مؤثر می‌باشند.

### ۳-۴- رفتار فولاد

فولادهای به کاررفته در اکثر سازه‌ها، در محدوده‌ای از خود رفتار الاستیک نشان می‌دهند و پس از آن وارد فاز پلاستیک و تغییرشکل‌های دائمی می‌شوند. در محدوده الاستیک مدول یانگ فولادهای سازه‌ای در حدود ۲۰۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون آن در حدود ۰/۳ می‌باشد. اطلاعات مربوط به رفتار فولاد، پس از نقطه تسلیم از تست‌های کشش به دست می‌آید. در این پژوهش اطلاعات مربوط به تنش و کرنش فولاد از نتایج تست کشش استخراج شده است. مسئله بسیار مهمی که در مدل کردن مصالح در محدوده پلاستیک مطرح می‌باشد؛ این است که در تست کشش نتایجی که از دستگاه به دست می‌آید، تنش و کرنش مهندسی یا نامی ماده است و برای تبدیل تنش و کرنش نامی به تنش و کرنش واقعی از روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود [۱۶]. برای شناساندن

شروع، گسترش و شکست کامل یک ترک در واحد سطح می‌باشد. در این رابطه مقاومت فشاری بتن  $f_c'$  برحسب مگاپاسکال، انرژی شکست بتن  $G_F$  برحسب نیوتن بر متر، حداکثر اندازه سنگ‌دانه و  $w/c$  نسبت آب به سیمان در اختلاط بتن است. زمانی که پارامترهای  $f_t'$  و  $G_F$  معلوم شوند، می‌توان منحنی نرم شوندگی را با استفاده از توابع خطی و یا دوخطی تخمین زد [۱۴].



شکل ۴- منحنی نرم شوندگی بتن در کشش: (الف) حالت کلی (ب) تقریب دوخطی (ج) تقریب خطی [۱۴].

### ۳-۳- رفتار ورق‌های FRP

هشین و روتن (Hashin and Rotem) در مقاله خود بیان می‌دارند که الیاف FRP در جهت طولی به سختی دارای رفتار غیرخطی هستند و رفتار آن‌ها به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مواد FRP تا لحظه گسیختگی (رسیدن به کرنش نهایی،  $\epsilon_u$ )، رفتار الاستیک و خطی دارند و در مقاومت نهایی خود دچار شکستی ترد می‌شوند [۱۵].

بنابراین در اینجا رفتار FRP به صورت ایزوتروپ مدل شده است. در این مدل مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی در جهت‌های مختلف الیاف به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

در اینجا پاسخ ماده سالم، الاستیک خطی فرض می‌شود و مدل به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که رفتار مواد تقویت‌شده با الیاف را پیش‌بینی کند بدون آنکه تغییرشکل قابل ملاحظه‌ی پلاستیکی در ماده دیده شود. معیارهای هشین برای پیش‌بینی شروع آسیب استفاده شده است و قانون رشد آسیب، بر پایه‌ی انرژی آزادشده در طول فرایند آسیب و نرم‌شوندگی خطی ماده می‌باشد.

شروع آسیب به کاهش در یک نقطه مادی منسوب است. معیارهای هشین چهار مکانیسم شروع آسیب متفاوت: کشش الیاف، فشار

#### ۴-صحت سنجی

رفتار پلاستیک ماده به نرم افزار حتماً باید تنش و کرنش واقعی ماده وارد شود.

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \quad (11)$$

که در آن  $\varepsilon_0$  و  $\sigma_0$  به ترتیب کرنش و تنش نامی و  $\varepsilon$  و  $\sigma$  به ترتیب کرنش و تنش واقعی است [۱۶]. با توجه به نکته فوق تنش و کرنش های به دست آمده از تست کشش به تنش و کرنش واقعی تبدیل شده و کرنش های پلاستیک واقعی از کم کردن کرنش تسلیم از کرنش واقعی طبق رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

$$\varepsilon_{plastic} = \varepsilon - \varepsilon_{yield} \quad (12)$$

#### ۴-۱-شرح مشخصات نمونه صحت سنجی

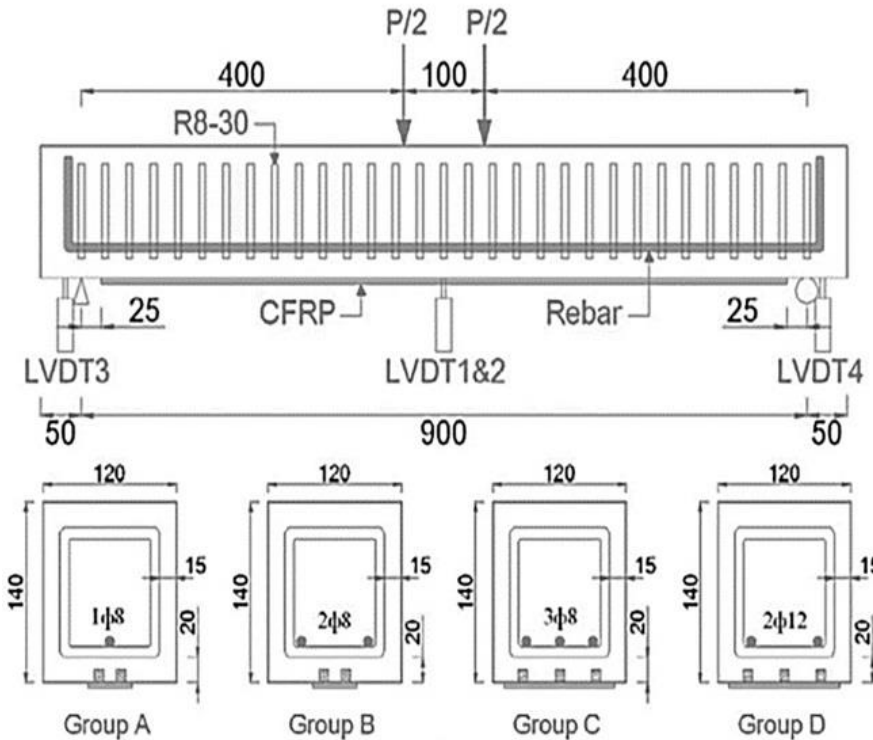
به منظور صحت سنجی نرم افزار، از مقاله مستوفی نژاد و مقدس؛ مرجع [۵]؛ استفاده شده است.

این مقاله با استفاده از نتایج نمونه های تهیه شده و تست شده در آزمایشگاه نوشته شده است. جهت صحت سنجی با توجه به مشخصات ذکر شده و با استفاده از نمونه A18G از تیرهای این مقاله، اقدام به مدل سازی عددی در نرم افزار Abaqus می شود و پس از تحلیل، نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

در جدول (۱)، مشخصات مقطع و در شکل (۵)، خصوصیات مقاطع تیرهای مورد آزمایش آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات مقاطع [۵].

نام نمونه	ابعاد مقطع (mm)			مشخصات میلگردهای			مشخصات ورق CFRP			EBROG
	عرض	ارتفاع	طول	عمق مؤثر	کششی (mm <sup>2</sup> )	برشی (A <sub>v</sub> /s)	مساحت (mm <sup>2</sup> )	تعداد لایه		
A18G	۱۲۰	۱۴۰	۱۰۰۰	۱۰۸	۵۰/۳	۳/۳۷	۴/۸	۱		



شکل ۵- خصوصیات مقاطع تیرهای مورد آزمایش [۵].

تیرها به وسیله کامپوزیت‌های FRP کربنی و دو نوع چسب اپوکسی مقاوم‌سازی شده‌اند. جدول (۲) مشخصات مصالح جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح [۵].

نوع	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)
الیاف Sika Wrap Hex230c	۰/۱۲	۴۱۰۰	۲۳۱	۱/۷
نوع	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)
چسب Epoxydur C300	۰/۴	۴۵	۳۵۰۰	۳۰۰۰
Epoxydur C31	۰/۴	۲۴/۸	۵۲۰۰	۶۹۰۰
نوع	تنش تسلیم (MPa)	کرنش تسلیم	تنش نهایی (MPa)	مدول کششی (GPa)
فولاد T8	۳۴۰	۰/۰۰۲۰	۷۰۲	۲۰۷
T12	۵۳۰	۰/۰۰۲۵	۶۸۰	۲۰۹

منحنی خط چین، نتیجه‌ی به دست آمده از تحلیل مدل عددی و خط ممتد مشکی رنگ، نمودار حاصله از تحلیل مدل آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به نتیجه‌ی به دست آمده مشاهده می‌شود که مدل به صورت مناسبی ایجاد شده است و نتایج حاصله از مدل‌سازی عددی دارای اختلاف اندکی با نتایج مقاله آزمایشگاهی هستند. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که مقادیر بیشینه جابجایی و بیشینه بار اختلاف اندکی باهم دارند. لذا مشخص می‌باشد که کلیت مدل‌سازی انجام شده درست بوده و برای کارهای عددی می‌توان از این مدل‌سازی بهره برد. بنابراین صحت مدل‌سازی به اثبات رسیده است.

جدول ۴- بیشینه بار و جابجایی در مدل اصلی و مدل صحت سنجی.

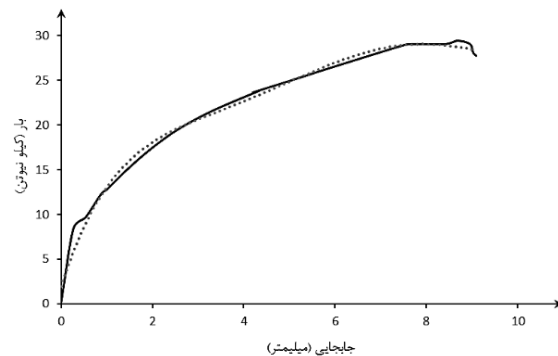
بیشینه بار (KN)	بیشینه جابجایی (mm)	
۲۹/۱۹۰	۸/۷۰۰	مدل اصلی مقاله
۲۸/۸۱۲	۸/۵۹۸	مدل صحت سنجی
۱/۳ درصد	۱/۲ درصد	درصد خطا

جدول ۳- خلاصه نتایج حاصله [۵].

گروه	شماره نمونه	بار نهایی (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)
A ( $f_c=42.5$ MPa)	A18C	۱۹/۲۱	۱۸/۸
	A18S	۲۴/۹۶	۵/۳
	A18G	۲۹/۱۹	۸/۷

#### ۴-۲- نتیجه صحت سنجی

نمودار حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار، به صورت شکل (۶) به دست آمده است:



شکل ۶- نتیجه به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس.

## ۵- تعریف مدل های جدید

در شکل فوق X نمایانگر فاصله شیار است که برای هر گروه در شش حالت به ترتیب برابر ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی متر می باشد. همچنین در هر دسته شیار، فاصله بین هر دو شیار برابر ۲۱ میلی متر می باشد. ضخامت ورق های FRP برابر ۰/۱۲ و ضخامت لایه چسب ۰/۴ میلی متر می باشد.

برای مدل سازی تیرها و چسب ها از المان Solid، برای مدل سازی ورق FRP از Shell و برای مدل سازی میلگردها از Truss بهره برده می شود. برای مدسازی چسب پرکننده از Epoxy C31 و برای اتصال تیر بتنی و ورق FRP از چسب Epoxy C300 استفاده شده است. برای مدل سازی خاموت ها از T8 و برای آرماتورهای طولی از T12 بهره برده شده است.

مشخصات دقیق مصالح به شرح زیر می باشد:

چسب: مشخصات چسب در جداول (۵) و (۶) آمده است.

### Epoxy C300

$$t = 0.4mm; \sigma_{tensile} = 45MPa; E_{tensile} = 3500MPa;$$

$$E_{flexural} = 3000MPa; b_p = 40mm; b_c = 120mm; \nu = 0.3$$

جدول ۵- مشخصات تعریف شده در نرم افزار برای چسب C300.

$\sigma_n$	$\sigma_s$	$\sigma_t$	$G_n^c$	$G_s^c$	$G_t^c$
۴۵	۴۵	۴۵	$94/77 \times 10^{-6}$	$900 \times 10^{-6}$	$900 \times 10^{-6}$

### Epoxy C31

$$t = 0.4mm; \sigma_{tensile} = 24.8MPa; E_{tensile} = 5200MPa;$$

$$E_{flexural} = 6900MPa; b_p = 40mm; b_c = 120mm; \nu = 0.3$$

جدول ۶- مشخصات تعریف شده در نرم افزار برای چسب C31.

$\sigma_n$	$\sigma_s$	$\sigma_t$	$G_n^c$	$G_s^c$	$G_t^c$
۲۴٫۸	۲۴٫۸	۲۴٫۸	$94/77 \times 10^{-6}$	$900 \times 10^{-6}$	$900 \times 10^{-6}$

ورق FRP: مشخصات ورق FRP کرنی با استفاده از مدل هشین

و روتنم به صورت جدول (۷) مدل شده است:

$$t=0.12mm; \sigma_{tensile}=4100MPa; E=231GPa; \epsilon_{tu}=1.7\%; \nu=0.26$$

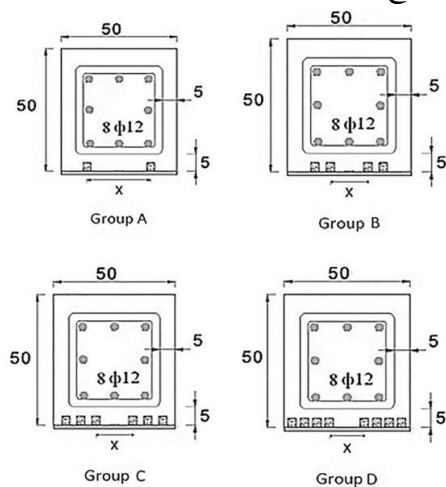
جدول ۷- مشخصات الاستیک ورق FRP

$E_1 (GPa)$	$E_2$	$U_{12}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23} (GPa)$
۲۳۱	۳۰/۸	۰/۲۶	۱۱	۱۱	۱۰/۸

به منظور بررسی عددی اثر فاصله شیار بر رفتار خمشی تیر بتنی تقویت شده به روش EBROG نیاز به ایجاد مدل های جدید با در نظر گرفتن متغیر فاصله شیار می باشد.

## ۱-۱- هندسه مدل های مورد بررسی

در این پژوهش چهار گروه نمونه بررسی می شود. نمونه ها با اسامی A, B, C, D مشخص شده اند. فاصله بین شیارها نیز در آخر نام نمونه ها بیان شده است. بر روی نمونه A دو شیار (دو دسته ی یک شیار)، B چهار شیار (دو دسته ی دو شیار)، C شش شیار (دو دسته ی سه شیار) و D هشت شیار (دو دسته ی چهار شیار) ایجاد شده است. تیر یک بار بدون شیار و بدون تقویت به وسیله FRP به منظور مقایسه با نمونه ها آنالیز شده است. مدل ها به صورت تیر با مقطع مربعی ۵۰۰ در ۵۰۰ میلی متری و به طول ۵۰۰۰ میلی متر می باشد. مقطع دارای ۸ آرماتور طولی با شماره ۱۲ است و همین طور دارای خاموت های به شماره ۸ به فاصله ۳۰۰ میلی متر در طول ۴۹۰۰ میلی متر می باشد. ابعاد خاموت ها برابر ۴۰۰ در ۴۰۰ میلی متر است. پوشش مقطع برابر ۵۰ میلی متر در هر سمت در نظر گرفته شده است. شیارها دارای عرض ۸ میلی متر و عمق ۱۰ میلی متر به طول ۵۰۰۰ میلی متر انتخاب شده است. براساس تحقیقات انجام شده توسط مستوفی نژاد و همکاران این بعد برای شیار بعد بهینه لحاظ شده است [۹]. ورق FRP کل قسمت زیرین تیر را دربر می گیرد و ابعادی برابر ۵۰۰ در ۵۰۰۰ میلی متر دارد. در شکل (۷) مشخصات مقاطع مدل سازی شده، آورده شده است.



شکل ۷- مقاطع گروه های مختلف مدل سازی شده اندازه به

سانتی متر.

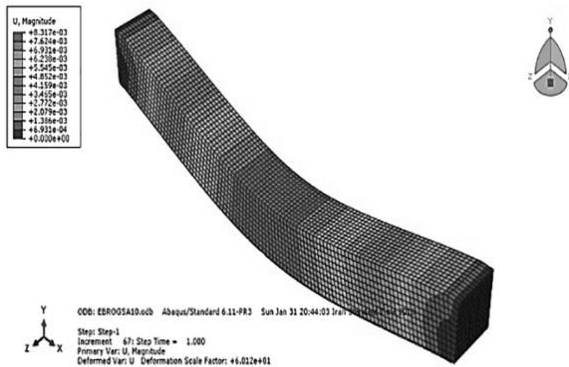


بررسی عددی اثر فاصله‌ی شیار بر رفتار خمشی تیر بتنی ...

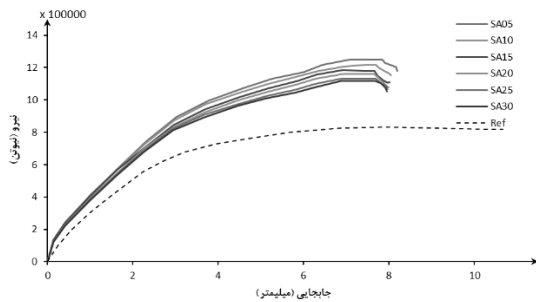
در ادامه جدول (۹) مبتنی بر بیشینه نیروی تحمل شده در هر نمونه ایجاد شده و در نمودار شکل (۱۰) مقایسه بیشینه نیرو در هر نمونه با تفکیک بر اساس فاصله شیار انجام شده است.

درصد افزایش باربری نسبت به حالت بدون تقویت در جدول (۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است.

در نمودار میله‌ای شکل (۱۱) نیز بیشینه جابجایی با تفکیک گروه و فاصله مقایسه شده است.



شکل ۸- تغییر مکان در مدل EBROGSA10



شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های گروه اول (SA).

بتن: مشخصات پلاستیک بتن در جدول (۸) آمده است.

$$Density = 2400 \frac{kg}{m^3}$$

$$E=20000, \nu=0.2$$

جدول ۸- پارامترهای پلاستیک بتن.

پارامتر ویسکوزیته	$K_c$	$f_{bo}/f_{co}$	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع $\psi$
۰/۰۰۱	۰/۶۶۶۶۶	۱/۱۶	۰/۱	۳۶/۳۱

برای تعریف مشخصات مصالح با توجه به تئوری‌های شرح داده شده و استفاده از مقاله صحت‌سنجی و برای مصالح FRP از مرجع [۱۷] استفاده شده است.

تمام اندرکنش‌ها به صورت tie انجام شده است و میلگردها نیز به صورت embedded، در بتن مدفون، مدل شده است. در تمامی مدل‌ها چسب به عنوان سطح slave می‌باشد.

## ۲-۵- نتایج حاصل از آنالیز مدل‌ها در نرم‌افزار

در شکل (۸) نمونه‌ای از مدل آنالیز شده دیده می‌شود. نمودارهای مربوط به نتایج حاصل برای هر گروه از نمونه‌ها به تفکیک رسم شده است. در این نمودارها هر منحنی بیانگر یک نمونه از آن گروه می‌باشد و نمونه بدون تقویت پایه Ref به منظور مقایسه با دیگر نتایج آورده شده است. شکل (۹) نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های گروه اول (SA) را نشان می‌دهد.

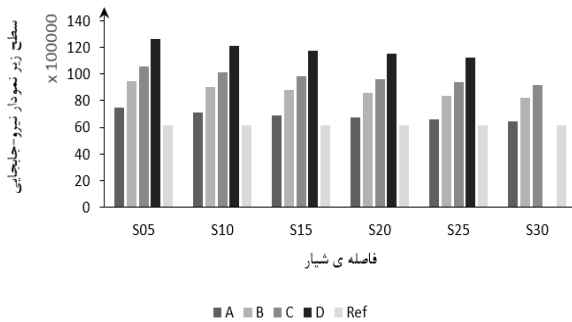
جدول ۹- حداکثر نیرو.

گروه اول	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	گروه دوم	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	گروه سوم	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	گروه چهارم	بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)
SA05	۱۲۵۰	SB05	۱۵۳۴	SC05	۱۷۶۱	SD05	۲۰۷۰
SA10	۱۲۱۷	SB10	۱۴۸۸	SC10	۱۷۲۰	SD10	۲۰۱۶
SA15	۱۱۸۵	SB15	۱۴۶۳	SC15	۱۶۸۱	SD15	۱۹۵۴
SA20	۱۱۶۰	SB20	۱۴۲۴	SC20	۱۶۵۴	SD20	۱۹۲۱
SA25	۱۱۳۴	SB25	۱۳۸۵	SC25	۱۶۲۳	SD25	۱۸۵۵
SA30	۱۱۱۷	SB30	۱۳۵۹	SC30	۱۵۹۲		

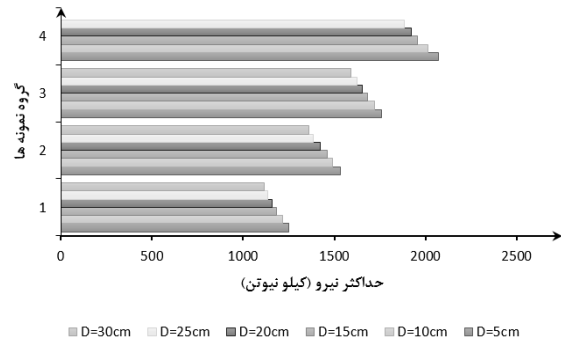
جدول ۱۰- درصد افزایش باربری نسبت به حالت بدون تقویت

گروه	درصد	گروه	درصد	گروه	درصد	گروه	درصد
اول		سوم		دوم		چهارم	
SA05	۵۰/۰۶	SC05	۱۱۱/۴۲	SB05	۸۴/۱۳	SD05	۱۴۸/۵۰
SA10	۴۶/۱۱	SC10	۱۰۶/۴۸	SB10	۷۸/۶۳	SD10	۱۴۱/۹۶
SA15	۴۲/۲۲	SC15	۱۰۱/۸۵	SB15	۷۵/۶۲	SD15	۱۳۴/۵۴
SA20	۳۹/۲۵	SC20	۹۸/۵۷	SB20	۷۰/۹۱	SD20	۱۳۰/۶۰
SA25	۳۶/۰۸	SC25	۹۴/۸۱	SB25	۶۶/۳۲	SD25	۱۲۶/۲۵
SA30	۳۴/۱۴	SC30	۹۱/۱۰	SB30	۶۳/۱۷		

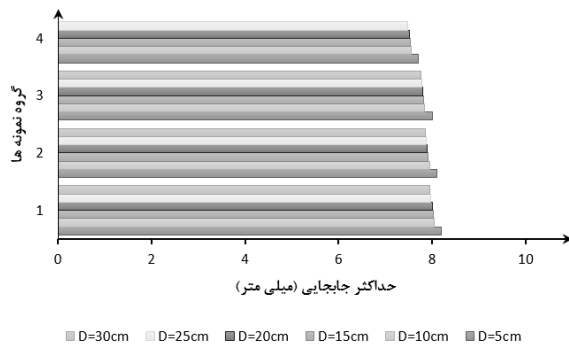
سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی



شکل ۱۲- مقایسه سطح زیر نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های مختلف به تفکیک فاصله‌ی شیار.



شکل ۱۰- مقایسه بیشینه نیرو در هر نمونه با تفکیک بر اساس فاصله شیار.



شکل ۱۱- مقایسه بیشینه جابجایی با تفکیک بر اساس فاصله شیارها.

سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان نمایشگر انرژی جذب شده توسط سیستم مورد آزمایش است.

در نمودار میله‌ای شکل (۱۲) سطح زیر نمودار برای نمونه‌های چهار گروه مورد بررسی، با تفکیک فاصله‌ی شیار، آورده شده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

چنانچه بخواهیم مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق را بیان کنیم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. در این پژوهش صحت‌سنجی از طریق مدل‌سازی یکی از تیرهای آزمایشگاهی تقویت‌شده با ورق FRP به روش EBROG، در نرم‌افزار آباکوس و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آزمایشگاهی، صورت گرفته است؛ وجود خطای ناچیز بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی؛ درستی روش مدل‌سازی و کارایی لازم نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

۲. در این تحقیق برای تمامی مصالح مشخصات آسیب‌تعریف‌شده است و نمونه‌ها وارد فاز پلاستیک و آسیب

۳. باتوجه به طیف گسترده الیاف FRP، اثرات استفاده از انواع مختلف این الیاف بر مقاوم‌سازی تیر بتن‌آرمه مورد بررسی قرار گیرد.

۴. اثرات استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر ورق FRP در هر مقطع بررسی شود.

۵. استفاده از این روش در تقویت دیگر اعضای سازه‌ای مانند ستون، دال، دیوار برشی و غیره مورد بررسی قرار گیرد.

## ۸- مراجع

- [1] Mostofinejad, D., Mahmoudabadi, E., (2010), "Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams", Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 14, No. 6, pp. 804-811.
- [2] Kumar, M. S., Raghavendra, K., Venkataswamy, M. A., & Ramachandra, H. V., (2012). "Fractographic analysis of tensile failures of aerospace grade composites". Materials Research, Vol.15, No.6, pp. 990-997.
- [3] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., (2002), "FRP Strengthened RC Structures", John Wiley & Sons Ltd., England
- [4] Mostofinejad, D. and Shamel, M., (2011), "Performance of EBROG Method under Multilayer FRP Sheets for Flexural Strengthening of Concrete Beams", Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 3176-3182.
- [5] Mostofinejad, D., Moghaddas, A., (2014), "Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams, Construction and Building Materials", Construction and Building Materials, Vol. 54, pp. 605-614.
- [6] Mostofinejad, D., Khozaei, K., (2015), "Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams", Construction and Building Materials, Vol. 93, pp. 110-120.
- [7] Banijamali, S. M., Esfahani, M. R., Nosratollahi, S., Sohrabi, M. R., Mousavi, S. R., (2015), "Reviewing the FRP Strengthening Systems", American Journal of Civil Engineering, Vol. 3, No. 2-2, pp. 38-43.

[۸] بنی جمالی، سید محمد؛ محمدرضا اصفهانی؛ شعیب نصرت الهی و روح ... موسوی، (۱۳۹۲)، ارزیابی تکنیک‌های تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با مصالح FRP، همایش ملی عمران و

می‌شوند؛ لذا از این منظر سعی شده است که رفتار مصالح به‌خوبی مدل‌سازی گشته و به رفتار واقعی هرچه بیشتر نزدیک شوند.

۳. با توجه به نتایج حاصله با افزایش فاصله‌ی شیارها از هم، مقدار بیشینه نیرو کاهش پیدا می‌کند.

۴. همان‌طور که از نمودارها قابل‌برداشت است، در هر گروه با زیاد شدن فاصله‌ی شیارها از هم از ۵ به ۳۰ سانتی‌متر؛ مقدار افزایش باربری در نمونه‌ها نسبت به نمونه بدون تقویت؛ در هر گروه حدود بین ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در هر گروه، نمونه‌ها با فاصله‌ی ۳۰ سانتی‌متر کمترین مقدار نیرو را تحمل می‌کنند. این موضوع ممکن است به دلیل محصورشدگی نسبی ایجادشده در یک منطقه باشد.

۵. با افزایش تعداد شیارها، مقدار بیشینه نیرو افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا با افزایش تعداد شیارها و ایجاد پیوستگی بیشتر بین ورق FRP و سطح بتن؛ بیشتر می‌توان از ظرفیت ورق استفاده نموده و از ایجاد ترک‌ها در سطح کششی تیر جلوگیری نمود.

۶. طبق نتایج حاصل مشاهده می‌شود که گروه دارای بیشترین تعداد شیار، گروه D، کمترین جابجایی را نسبت به سایر گروه‌ها داشته است و همین‌طور در هر گروه با افزایش فاصله شیارها از یکدیگر مقدار جابجایی کاهش یافته است.

۷. با بررسی سطح زیر نمودار برای نمونه‌های چهار گروه مورد بررسی مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله شیارها مقدار انرژی جذب‌شده قبل از شکست کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش تعداد شیارها مقدار جذب انرژی نیز بیشتر می‌شود.

## ۷- پیشنهادات

جهت تکمیل تحقیقات در این زمینه پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۱. باتوجه به زلزله‌خیزی کشورمان اثر بارگذاری لرزه‌ای بر رفتار این روش در نظر گرفته شود.
۲. باتوجه به اینکه امکان آتش‌سوزی به‌صورت موضعی در سازه‌ها وجود دارد. بررسی اثرات آتش بر مقاوم‌سازی با این روش توصیه می‌گردد.

توسعه پایدار با محوریت کاهش خطرپذیری در بلایای طبیعی، مشهد، موسسه آموزش عالی خاوران.

[۹] حاج رسولیها، م.ج.، (۱۳۸۹)، "بررسی تأثیر ابعاد در روش شیازنی بر جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

[۱۰] ابراهیم پور کومله، هومن.، (۱۳۹۰)، "تحلیل غیرخطی اجزای محدود تیرهای بتن آرمه تقویت‌شده با ورق FRP به روش تسلیح خارجی با نصب روی شیارهای طولی" (EBROG)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

[11] "Abaqus Theory Manual and user's manual", (2011), version 6.11.

[12] Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., & Jiang, J. J. (2005). "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete". *Engineering Structures*, Vol. 27, 920-937.

[۱۳] مستوفی نژاد، د.، حسینی، س. ج. (۱۳۹۲). "مدل‌سازی جداشدگی بین بتن و ورق FRP در تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده به روش اجزا محدود". روش‌های عددی در مهندسی عمران، ۳۲(۲)، ۱۵۱-۱۷۱.

[۱۴] سلیمانی کیا، آ.، وارسته پوره، ح. (۱۳۹۲). مدل‌سازی لایه چسب به منظور پیش‌بینی شکست زودرس در تیرهای بتنی تقویت‌شده با صفحات FRP. پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران. تهران.

[15] Hashin, Z., & Rotem, A. (1973). "A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials". *Journal of Composite Materials*, 7, 448-464.

[16] Romero, E. R. (2010). Finite element simulation of a bolted steel joint in fire using ABAQUS program. Tempere University of Technology. Tempere University of Technology.

[۱۷] رواجی، ب.، سروش‌نیا، س. (۱۳۹۲). کامل‌ترین مرجع کاربردی آباکوس (جلد دوم). تهران: نگارنده دانش.

## Numerical Investigation of Flexural Behavior of Concrete Beams with effect from the Distance between the Grooves on the EBROG Method

M. Mahmoudabadi

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Qom University

E. Khanahmadi

MSc. Student, Department of Civil Engineering, Qom University, Qom University

S.M.R. Hasani\*

Young Researchers and Elite Club, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran

### Abstract

By aging of steel and concrete structures in the world, structural retrofitting and strengthening has become among the major issues of engineering. several methods of strengthening have been developed by researchers for bonding the FRP sheet to the concrete surface until now, including the Externally Bonded Reinforcement (EBR), Near Surface Mounted (NSM) for non-prestressed or prestressed FRP rebars or strips, and also the new developed grooving method (GM) with two techniques of Externally Bonded Reinforcement on Grooves (EBROG) and Externally Bonded Reinforcement in Grooves (EBRIG). The results of the researchs on EBROG method showed that by choosing specified width and height for grooves, this method can considerably postpone the debonding and in some cases may completely eliminate it. This study has tried, to evaluate the factors affecting EBROG method, function of this method has been examined by using finite element model in Abaqus software. The results show the high accuracy of numerical modeling compared with the experimental specimens. Moreover, it examines the effect of the distance between the grooves on the function of specimens reinforced by EBROG method. The results show that the rate of increasing ultimate load in specimens compared to unreinforced specimen, reduces up to 30 percent with increasing the distance between the grooves. So that in each group, specimen with the largest distance between the grooves, has the lowest increase its ultimate load. Also, it is observed that the ultimate load and energy absorption in the samples have been raised by increasing the number of grooves in this method.

**Keywords:** EBROG Method, Debonding, FRP Lminate, Finite Element Model, Strengthening and Retrofitting.

---

\* Corresponding Author: smr.hasani@yahoo.com

