



## رفتار لرزه‌ای تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو با ورق FRP

امیرحسین امیریان

مدرس مدعو موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران  
 amirhosein.amirian@khorasan.ac.ir

### چکیده

امروزه بسیاری از سازه‌های بتن مسلح موجود بنا به دلایلی از قبیل تغییرات کاربری، تغییرات الزامات آیین‌نامه‌ای نسبت به گذشته، افزایش بارهای وارد بر سازه، عدم طراحی درست و بی دقتی در اجرا دچار مشکل در ظرفیت باربری و بهره‌برداری می‌شوند. از آنجا که هزینه تخریب و ساخت ساختمان جدید بسیار سنگین و غیراقتصادی است، لذا استفاده از تکنولوژی‌های نوین نظیر FRP رونق یافته است. تیرها در جریان انتقال نیروهای ثقلی و جانبی دیافراگم به ستون نقش دارند، از این رو جزئی از سیستم سازه می‌باشند. شکست ترد در این اعضا منجر به خسارات گسترده‌ای در سازه می‌شود که باید از آن جلوگیری کرد. متأسفانه اغلب در سازه‌های موجود به علت عدم پیش‌بینی صحیح نیروهای وارد بر سازه از جمله نیروهای ناشی از زلزله، مشکل کمبود مقاومت در تیرها مشاهده می‌شود. در این پژوهش ابتدا سعی شد درک درستی از رفتار تیرهای عمیق با استفاده از تعاریف بنیادین بتن ارائه شود. سپس با توجه به شناخت صحیح بتن و خواص مصالح FRP به شبیه‌سازی تیر در محیط نرم-افزار ABAQUS پرداخته شده و نمونه‌ها تحت تحلیل تاریخچه زمانی و شتاب نگاشت زلزله ایمپریال والی مورد آنالیز واقع شد که بر اساس نتایج حاصل از آن ورق‌های CFRP عملکرد خوبی در کنترل رفتار لرزه‌ای از خود نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** تیر عمیق بتنی، الیاف FRP، بازشو، زلزله، روش‌های اجزاء محدود

### ۱- مقدمه

آیین‌نامه بتن ایران از تیر عمیق با عنوان اعضای خمشی با ارتفاع زیاد یا تیر تیغه‌ها نام برده است. طبق این آیین‌نامه ضوابط اعضای خمشی با ارتفاع زیاد برای تیرهایی قابل کاربرد است که دارای شرایط زیر است:

$$\frac{L_n}{d}$$

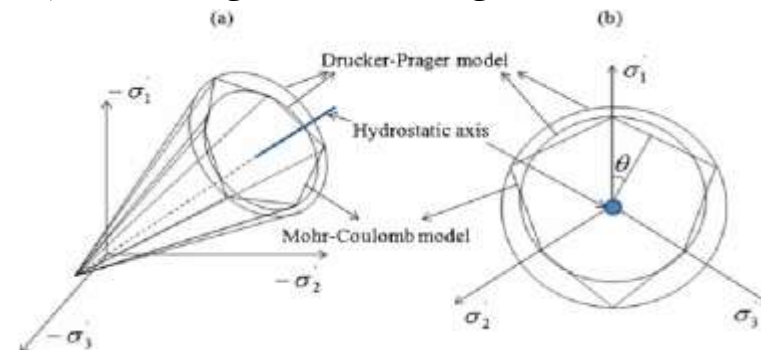
- نسبت طول دهانه ی آزاد به ارتفاع مؤثر،  $d$  در آنها کمتر از چهار باشد.
- بار روی تیر در وجه فشاری، مقابل وجهی که روی تکیه‌گاه می‌نشیند، وارد آید به گونه‌ای که امکان به وجود آمدن دستک-های فشاری از سمت بار به سمت تکیه‌گاه موجود باشد. تیرهای عمیق به عنوان شاه تیرهای حامل به کار می‌روند که بار را از ستون‌های بالایی گرفته و به ستون‌های تکیه‌گاهی انتقال می‌دهند. این شاه تیرها در محل‌هایی که حذف تعدادی ستون لازم

است، مثل ورودی پارکینگ‌ها قرار می‌گیرند. برای اجرای سرویس‌های اساسی مثل کانال‌های هوا، دسترسی به کابل‌های شبکه های الکتریکی و کامپیوتری، تاسیسات مکانیکی و یا رفت و آمد از اتاقی به اتاق دیگر، در جان تیرهای عمیق بتن مسلح بازشوهایی را اجرا می‌کنند. این بازشوها مسیر انتقال نیروهای فشاری از محل اعمال بار به تکیه گاه را قطع کرده و باعث به هم ریختگی آن می‌شوند و موجب کاهش شدیدی در مقاومت نهایی تیرهای عمیق می‌شوند. در این پژوهش به بررسی رفتار تیرهای عمیق دارای بازشو با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته شده است. هدف اصلی عبارتند از: بررسی اثر محل بازشو، اندازه‌ی بازشو، چیدمان آرماتور جان. برای مدل‌سازی نمونه‌ها از مدل پلاستیک آسیب نرم افزار Abaqus استفاده شده است، که در ادامه پارامترهای این مدل بررسی می‌شود.

## 2- مدل پلاستیک آسیب دیده بتن

مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، تعمیم دیده معیار شکست دراگر-پراگر میباشد. این معیار یک سطح شکست مخروطی مانند شکل دارد و یکی از تئوریهای قوی در مدل‌سازی شکست بتن مسلح می‌باشد. این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیر خطی بتن را بیان میکند. این مدل قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را داراست و شامل فرضیات زیر میباشد:

- ۱- قابلیت مدل‌سازی بتن در انواع مختلف سیستم‌های سازه‌ای مانند: المان تیر، خرپایی، پوسته و سه بعدی.
- ۲- قابلیت کاربرد در بتن مسلح و غیر مسلح
- ۳- قابلیت استفاده تحت بارگذاری‌های یکنواخت، نوسانی و دینامیکی.
- ۴- در نظر گرفتن حساسیت نمونه به نرخ کرنش.
- ۵- در نظر گرفتن تاثیرات بازیابی سختی الاستیک در بارگذاری‌های دوره‌ای.
- ۶- قابلیت استفاده از ویسکوالاستیک در معادلات اساسی برای رسیدن به همگرایی بهتر در بخش نرم شوندگی.



شکل (1) سطوح مرزی معیار دراگر-پراگر (a) شکل کلی (b) صفحه‌ی دوباتوریک

## 1-2 زاویه اتساع ( $\Phi$ )

زاویه اتساع کرنش پلاستیک، بر اثر برش در فاز بعد از الاستیک تعریف می‌نماید. هنگامی که  $\Phi = 0$  باشد، ماده هیچ گونه تغییر حجم کرنشی ندارد. در حقیقت زاویه اتساع رابطه بین حجم و کرنش برشی را مطابق رابطه‌ی زیر بیان می‌کند

(1)

$$\varphi = -\frac{\delta_{\epsilon V}}{\delta_{\gamma}}$$

$\epsilon V$ : کرنش حجمی،  $\delta_{\gamma}$ : کرنش برشی

برای بتن مسلح زاویه ی اتساع بین ۲۰ تا ۴۰° خواهد بود. هر چه مقدار این زاویه کوچک تر باشد رفتار مصالح ترد و هرچه این زاویه بزرگتر باشد ماده از خود رفتاری مانند مواد شکل پذیر نشان می دهد.

## 2-2 پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک

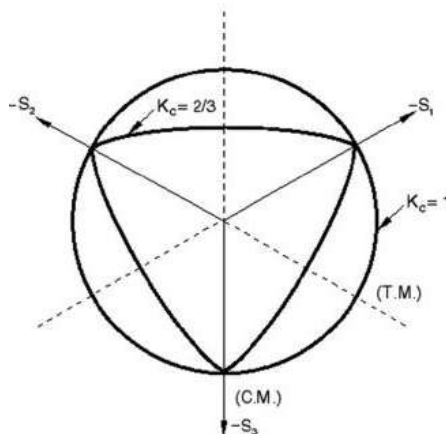
عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن می باشد. مقدار پیش فرض آن ۰/۱ است. وقتی که این عدد صفر باشد در واقع شکل مریدین تبدیل به یک خط راست می شود (معیار دراگر-پراگر کلاسیک)

## 3-2 پارامتر $f_{c0}$ $f_{b0}$

این پارامتر مشخصات تابع گسیختگی را بیان می کند. در برخی مقالات علمی این نسبت برابر با ۱/۱۷ در نظر گرفته شده است. اغلب منابع مقدار ۱/۱۶ و ۱/۲۵ را وابسته به مقاومت بتن و درجه ی محصور شدگی معرفی کرده اند.

## 4-2 پارامتر $K_C$

طبق اصلاً حصول پذیرفته در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، لزومی بر دایروی بودن صفحه ی دوباتوریک وجود ندارد و می تواند شکل دیگری نیز داشته باشد. شکل این صفحه با ضریب  $K_C$  تعیین می شود. این ضریب مقداری بیش از ۰/۵ دارد و وقتی مساوی یک باشد شکل دایره و یا همان معیار دراگر-پراگر بدست می آید. از لحاظ فیزیکی،  $K_C$  نسبت فاصله بین محور هیدرواستاتیک با مریدین فشاری و مریدین کششی می باشد. در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن مقدار پیش فرض مطابق شکل، ضریب ۲/۳ می باشد که بر اساس آزمایش های فشاری سه محوره و تحلیل های عددی پیشنهاد شده است.



شکل (2) صفحه دوباتوریک در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن

## 5-2 پارامتر ویسکوالاستیک

این پارامتر که در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن وجود دارد در واقع برای همگرایی بهتر گامها استفاده می شود و مقدار آن را بایستی با چند بار تحلیل بدست آورد. پارامتر ویسکوالاستیک کوچکترین عدد مثبتی است که باعث همگرایی بهتر تحلیل می شود. این پارامتر امکان خروج تدریجی از سطح پتانسیل پلاستیک را در شرایط ناهمگرایی های جزئی تحلیل فراهم می سازد.

## 3- روابط تنش- کرنش فشاری بتن

تنش های فشاری به صورت تابعی از کرنش های غیر الاستیک  $\epsilon_c^{in}$  قابل تعریف هستند. منحنی تنش-کرنش در ناحیه تنش-کرنش در ناحیه نرم شوندگی کرنش (بعد از تنش نهایی) قابل تعریف اند. مقادیر سخت شدگی به جای کرنش پلاستیک  $\epsilon_c^{pl}$



به صورت کرنش غیر الاستیک  $\varepsilon_c^{in}$  داده می‌شوند. کرنش غیر الاستیک فشاری بصورت تفاضل کرنش الاستیک مربوط به بتن آسیب دیده از کرنش کل تعریف می‌شود.

(2)

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{,c}^{el}$$

(3)

$$\varepsilon_{,c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E}$$

$\varepsilon_c^{in}$ : کرنش غیر الاستیک فشاری،  $\varepsilon_{oc}^{el}$ : کرنش الاستیک بتن آسیب ندیده،  $\varepsilon_c$ : کرنش کل،  $E_0$ : مدول الاستیسیته اولیه بتن،  $\sigma_c$ : تنش حداکثر فشاری نرم افزار آباکوس بصورت خودکار با استفاده از رابطه زیر، مقادیر کرنش غیر الاستیک را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می‌کند.

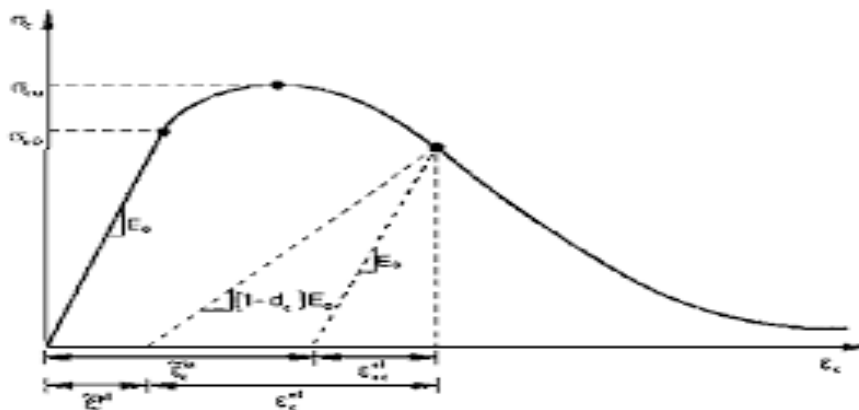
(4)

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E}$$

$\varepsilon_c^{pl}$ : کرنش پلاستیک

$d_c$ : پارامتر آسیب بتن در فشار

نرم افزار آباکوس در صورت منفی بودن مقادیر کرنش پلاستیک و یا کاهش آن با افزایش کرنش غیر الاستیک، پیغام خطا خواهد داد که نشان دهنده نادرست بودن منحنی‌های آسیب فشاری می‌باشد. در شکل، نمودار تنش بر حسب کرنش غیر الاستیک نشان داده شده است.



شکل 3 تعریف کرنش فشاری غیر الاستیک برای بیان سخت شدگی فشاری

همانطور که در شکل فوق دیده می‌شود در اثر باربرداری از نمونه در قسمت نرم شوندگی، شیب منحنی باربرداری کمتر از شیب منحنی الاستیک است که نشان دهنده آسیب دیدگی نمونه می‌باشد. در واقع در منحنی‌های تنش-کرنش تک محوره، آسیب بتن توسط دو متغیر  $d_c$  و  $d_t$  مشخص می‌شود. این متغیرهای آسیب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E = (1 - dt, c) E_0 \quad (5)$$

$E$ : مدول الاستیسیته بتن آسیب دیده

$d_t$ : پارامتر آسیب بتن در کشش

$d_c$ : پارامتر آسیب بتن در فشار  
 $E_0$ : مدول اولیه (آسیب ندیده) بتن.

#### 4- رابطه تنش- کرنش برای تعریف بتن در فشار به کمک منحنی هاگنستاد

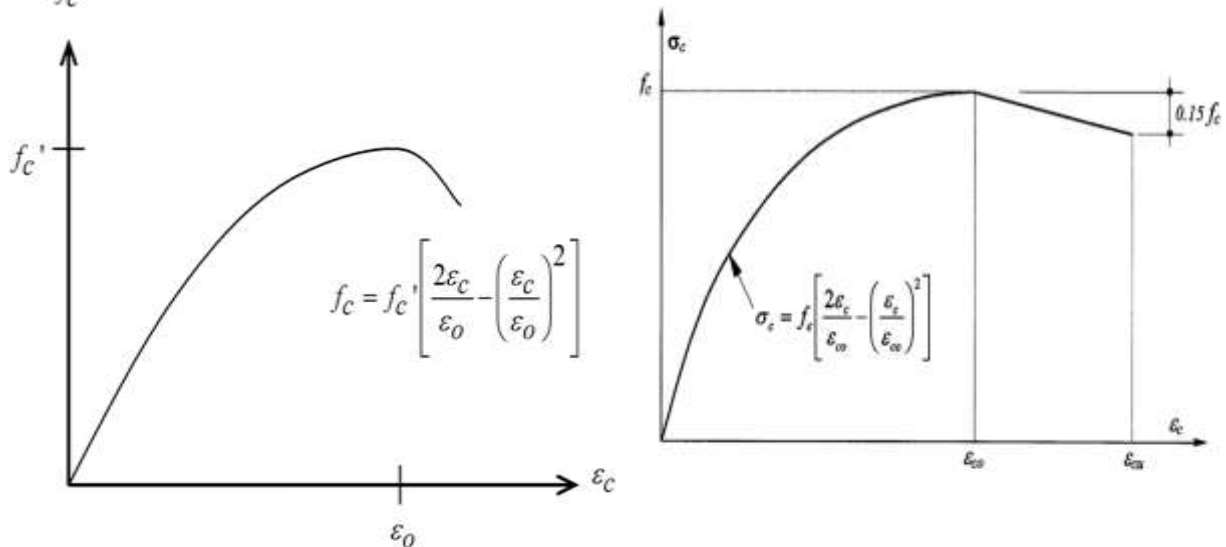
معرفی رابطه کرنش-تنش تک محوری بتن در فشار و کشش از پارامترهای مهم در معرفی در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن به نرم افزار می‌باشند. برای معرفی رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری تک محوره بتن به نرم افزار، از رابطه‌ی هاگنستاد اصلاح شده در شکل استفاده شده است. از روابط (۶) و (۷) به منظور معرفی تنش فشاری بتن بر حسب کرنش فشاری به نرم‌افزار استفاده می‌گردد. در این روابط  $\varepsilon_0$  کرنش نظیر تنش حداکثر است. در رابطه (۷)  $f_c''$  تنش حداکثر در عضو بتنی است. ضریب  $K_e$  را میتوان برای بتن‌های با مقاومت فشاری استوانه‌ای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و مساوی و بزرگتر از ۳۵ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۱، ۰.۹۵، ۰.۹۳، ۰.۹۲ در نظر گرفت. شاخه نزولی منحنی هاگنستاد اصلاح شده به صورت خطی است که از نقطه‌ی  $(\varepsilon_0, f_c'')$  تا نقطه‌ی  $(\varepsilon_u, 0.85f_c'')$  امتداد دارد. مقدار  $\varepsilon_u$  متناظر با کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن است، که برای انواع بتن از ۰.۰۰۳ تا بالاتر از ۰.۰۰۵ گزارش شده است. منحنی هاگنستاد اصلاح شده نزدیک به منحنی تنش-کرنش واقعی بتن است.

(6)

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

(7)

$$\frac{f_c''}{f_c} = k_s f_c'$$



شکل (4) منحنی هاگنستاد و هاگنستاد اصلاح شده بتن در فشار

#### 5- روابط تنش-کرنش کششی بتن

بطور کلی مشخص کردن رفتار پس از شکست کششی در بتن و بیان تنش‌های بعد از شکست بصورت تابعی از کرنش ترک خورده  $\varepsilon_t^{ck}$  می‌باشد. کرنش ترک خورده بصورت کرنش الاستیک بتن آسیب ندیده تعریف می‌شود.



(8)

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{.t}^{el}$$

(9)

$$\varepsilon_{.t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0}$$

$\varepsilon_t^{ck}$ : کرنش شکست یا کرنش ترک خورده

$\varepsilon_t$ : کرنش کل

$\varepsilon_{.t}^{el}$ : کرنش الاستیک بتن آسیب ندیده

$\sigma_t$ : حداکثر تنش کششی

$E_0$ : مدول الاستیسیته اولیه بتن

این برنامه به طور خودکار مقادیر کرنش ترک خورده را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می کند.

(10)

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{in} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0}$$

$\varepsilon_t^{pl}$ : کرنش پلاستیک

$d_t$ : پارامتر آسیب بتن در کشش

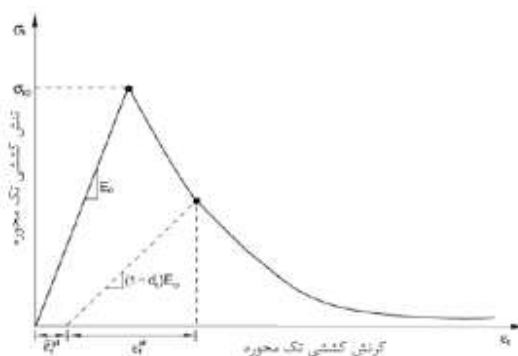
نرم افزار آباکوس در صورت منفی بودن مقادیر کرنش پلاستیک و یا کاهش آن با افزایش کرنش غیر الاستیک، پیغام خطا خواهد داد که نشان دهنده نادرست بودن منحنی های کششی است و برنامه آباکوس پیغام خطا صادر می کند. اگر نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمایش شکافت استوانه و یا کشش مستقیم در دسترس نباشد، برای بدست آوردن ماکزیمم تنش کششی می توان از رابطه زیر استفاده کرد.

(10)

$$\sigma_t = 0.3 \sigma_c$$

$\sigma_c$ : حداکثر تنش فشاری

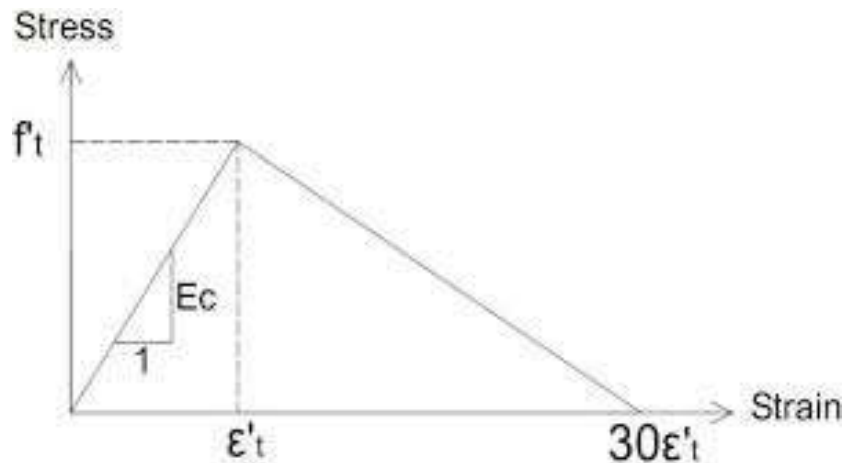
$\sigma_t$ : حداکثر تنش کششی



شکل 5 تعریف کرنش ترک خورده برای بیان سخت شدگی کششی

## 6- معرفی رابطه ی تنش- کرنش بتن کشش برای استفاده در آباکوس

معرفی رابطه تنش-کرنش بتن در کشش تنها به اثرات بعد از ترک خوردگی که در واقع معرف اثرات سخت شدگی است، اختصاص دارد. اثر سخت شدگی کششی بیانگر این مطلب است که سختی ماده پس از ترک خوردن ناگهان صفر نمی شود بلکه در اثر درگیری دانه ها و عمل فولادها، ماده قابلیت انتقال بار را از طریق فضای بین ترک ها دارا می باشد. در مدل سازی انجام شده در این مطالعه برای منحنی تنش-کرنش بتن بعد از ترک خوردگی، از رابطه ی توصیه شده توسط دستورالعمل نرم افزار استفاده شده است. این مدل رابطه تنش-کرنش بتن بعد از ترک خوردگی را به صورت خطی فرض می نماید که تا کرنش نهایی ۱۰ برابر کرنش ترک خوردگی ادامه دارد. شکل، رابطه ی تنش-کرنش بتن در کشش تک محوره را معرفی می نماید.



شکل (6) پاسخ بتن در کشش تک محوره توصیه شده در نرم افزار اجزا محدود

## 7- مشخصات تیر های شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس

### 1-7 مشخصات مصالح بتنی

(11)

$$f_c = 31.6 \text{ Mpa} \cdot v = 0.2 \cdot \rho = 2.4e - 5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

(12)

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{31.6} = 26420.52 \text{ Mpa}$$

### 2-7 مشخصات مصالح فولادی

(13)

$$F_y = 420 \text{ Mpa} \cdot F_u = 600 \text{ Mpa} \cdot E = 178000 \text{ Mpa} \cdot v = 0.3 \rho = 7.8e - 5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

### 3-7 مدل آسیب پلاستیسته نمونه ها

نرم افزار Abaqus برای بتن از المان هشت گره ای C3D8R معمولی استفاده می کند. انتگرال گیری عددی این المان به روش گوس انجام می پذیرد و بار را به صورت کنترل جابجایی اعمال می شود. برای معرفی قیود بین بتن و فولاد از قید embedded



# دانشگاه علمی تخصصی پاپا شهر



regions استفاده شده که درجات آزادی المان های فولادی را به درجات آزادی المان های بتن اطراف آن مقید می کند. المان مورد استفاده برای فولادها، المان T3D2 است. تحلیل از نوع دینامیکی (تاریخچه زمانی) است، طبق توضیحات و روابط ذکر شده، پارامتر های مدل پلاستیک آسیب دیده بتن به صورت زیر وارد می شود.

جدول (۱) پارامتر های مدل آسیب پلاستیک بتن

Dilation Angle	Eccentricity	Fb0/fc0	K	Viscosity parameter
36	0/1	1/16	0/667	0/05

## ۷-۴ محاسبه مشخصات مصالح فشاری بتن به کمک منحنی هاگنستاد

در سربرج compressive behavior طبق روابط زیر داده های ورود به نرم افزار را محاسبه می کنیم.

(۱۴)

$$f''_c = k_s f'_c$$

(۱۵)

$$f''_c = 0.93 * 31.6 = 29.388 \text{ Mpa}$$

(۱۶)

$$= 0.5 * f''_c = 0.5 * 29.388 = 14.694 \text{ Mpa}$$

(۱۷)

$$\varepsilon_c = 1.8 * \frac{f''_c}{E_c} = 1.8 * \frac{29.388}{26420.52} = 0.002$$

تنش فشاری بتن برای قسمت غیر خطی نمودار از رابطه زیر محاسبه می شود:

(۱۸)

$$f_c = f''_c \left( \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_c} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right)^2 \right) = 29.388 * \left( \frac{2\varepsilon_c}{0.002} - \left( \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right)^2 \right)$$

برای به دست آوردن تنش فشاری در قسمت غیر خطی منحنی هاگنستاد، کرنش ها با متغیر  $\varepsilon_c$  در رابطه بالا جایگزین می شوند و تنش متناظر با آن محاسبه می گردد.

جدول (۲) مقادیر تنش کرنش فشاری برای بتن ۳۱.۶ مگاپاسکال

stress	strain	$\varepsilon_c^{el}$	$\varepsilon_c^{in}$	$d_c$	$\varepsilon_c^{pl}$
16.69	0.00055	0.00055	0	0	0
16.04	0.00065	0.0006	0.000045	0	0.000045
17.88	0.00074	0.00067	0.000071	0	0.000071
19.58	0.00084	0.00074	0.00010	0	0.00010
15.21	0.00094	0.00080	0.00014	0	0.00014
22.58	0.00103	0.00085	0.00018	0	0.00018
23.84	0.00113	0.00090	0.00023	0	0.00023
25.03	0.00112	0.00094	0.00028	0	0.00028
26.05	0.00132	0.00098	0.00034	0	0.00034
26.93	0.00142	0.00101	0.00040	0	0.00040
27.68	0.00151	0.00104	0.00047	0	0.00047
28.29	0.00161	0.00107	0.00054	0	0.00054
28.77	0.00171	0.00108	0.00062	0	0.00062





# دانشگاه علمی تخصصی پاپا شهر



29.11	0.00180	0.00110	0.00070	0	0.00070
29.31	0.00190	0.00110	0.00079	0	0.00079
29.38	0.002	0.00111	0.00088	0	0.00088
26.44	0.0032	0.00100	0.0021	0/1	0.0020
23.51	0.0042	0.00088	0.0035	0/2	0.0032
20.57	0.0056	0.00077	0.0048	0/3	0.0044
17.63	0.0068	0.00066	0.0061	0/4	0.0056
14.69	0.008	0.00055	0.0074	0/5	0.0068
11.75	0.0092	0.00044	0.0087	0/6	0.0080
8.81	0.0104	0.00033	0.010	0/7	0.0092
5.87	0.0116	0.00022	0.011	0/8	0.0104
2.93	0.0128	0.00011	0.012	0/9	0.0116

## ۷-۵ محاسبه مشخصات مصالح کششی بتن

ماکزیم تنش کششی بتن

(۱۹)

$$\sigma_t = 0.3 * \sigma_c^{\frac{2}{3}} = 0.3 * (29.388)^{\frac{2}{3}} = 2.86 MPa$$

جدول (۳) مقادیر تنش کرنش کششی بتن

stress	strain	$\epsilon_{tt}^{el}$	$\epsilon_t^{ck}$	$d_t$	Plastic strain
2.86	0.000108	0.000108	0	0	0
2.53	0.000216	0.000096	0.00012	0.1	0.000108
2.22	0.000236	0.000084	0.000240	0.2	0.000216
1.90	0.000432	0.000072	0.000360	0.3	0.000324
1.58	0.000540	0.000060	0.000480	0.4	0.000432
1.26	0.000648	0.000048	0.00060	0.5	0.000540
0.95	0.000756	0.000036	0.000720	0.6	0.000648
0.63	0.000865	0.000024	0.000841	0.7	0.000765
0.31	0.000973	0.000012	0.000961	0.8	0.000865

## ۸- خصوصیات ارتوتروپیک CFRP

جدول (۴) خواص ارتوتروپیک CFRP

53000	$E_x$	مدول الاستیسیت، MPa
2650	$E_y$	
2650	$E_z$	
0.2	$\nu_{xy}$	ضریب پواسون
0.3	$\nu_{yz}$	
0.2	$\nu_{xz}$	
2038	$G_{xy}$	مدول برشی، MPa



1019	$G_{yz}$	
2038	$G_{xz}$	

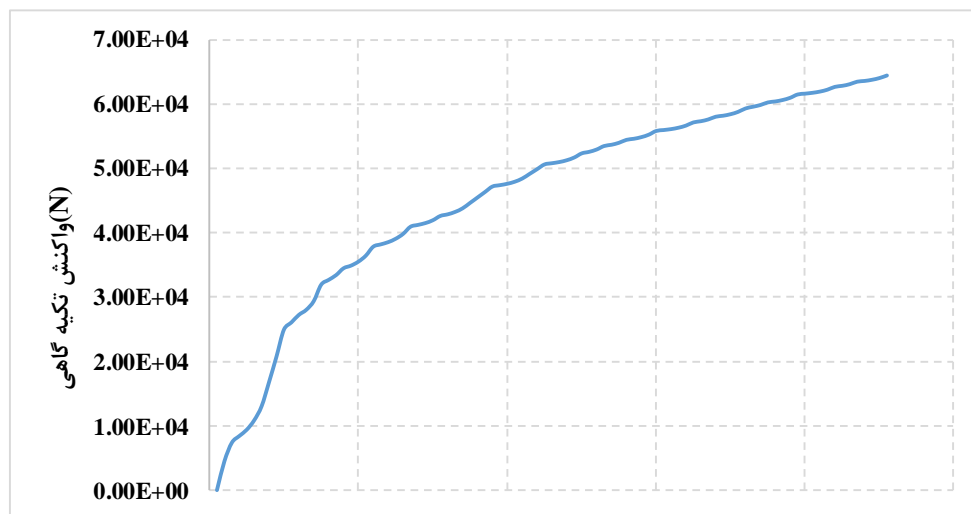
برای تعیین رفتار غیر خطی فولاد نیز از مدل پلاستیک کامل با رفتار دو خطی استفاده شده است.

جدول (۵) تنش کرنش پلاستیک فولاد

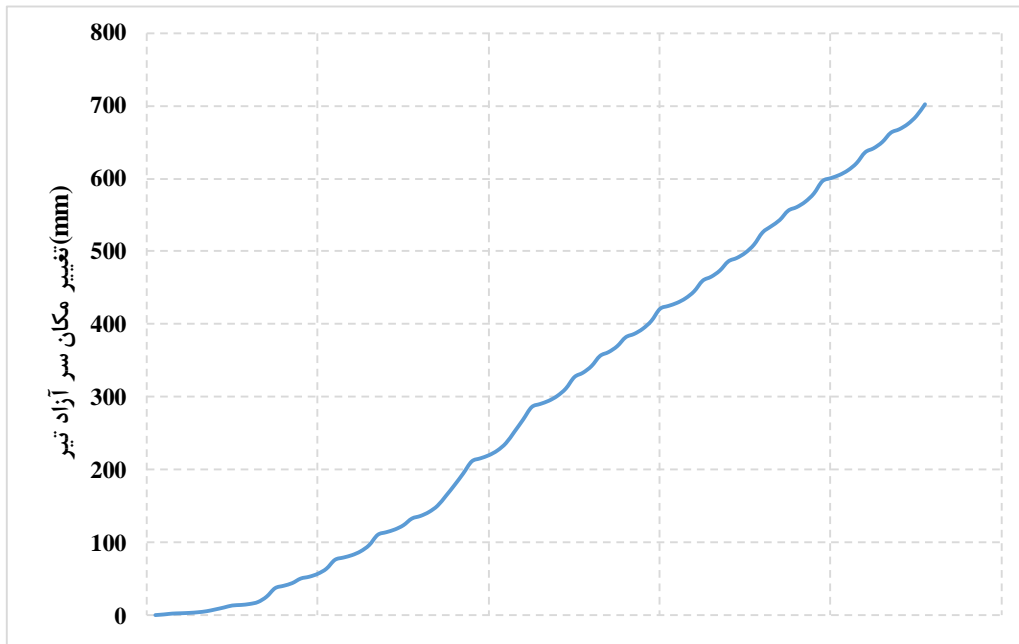
Stress	Plastic strain
420	0
600	0.1

## ۹- آنالیز:

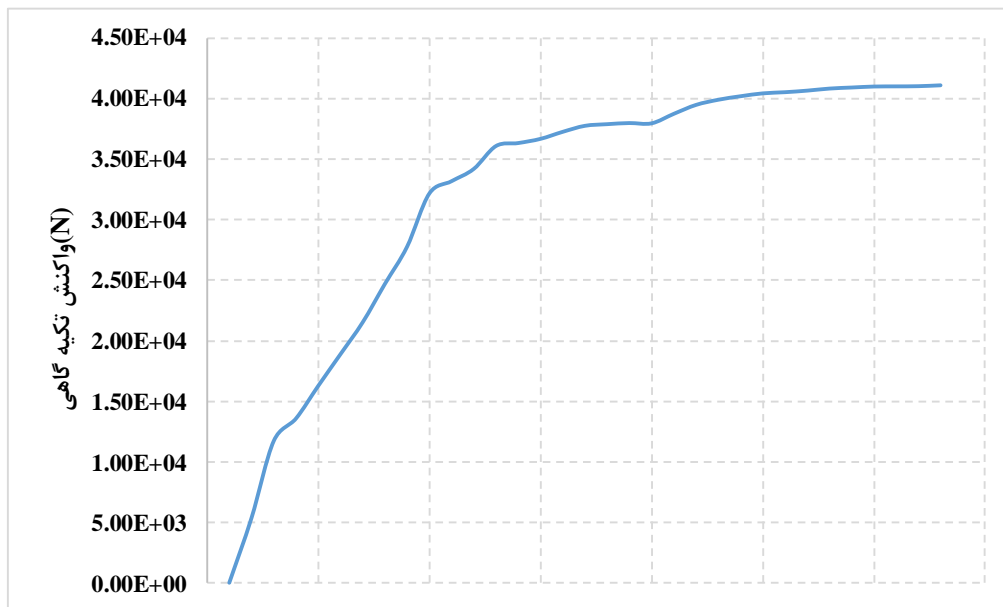
دو نمونه تیر عمیق دارای بازشو مدل سازی شد و تحت تحلیل تاریخچه زمانی مورد آنالیز قرار گرفت. شتاب نگاشت استفاده شده در پژوهش مربوط به زلزله ایمپریال والی انتخاب شد و نتایج حاصل از آنالیز به صورت نمودار در زیر آمده است:



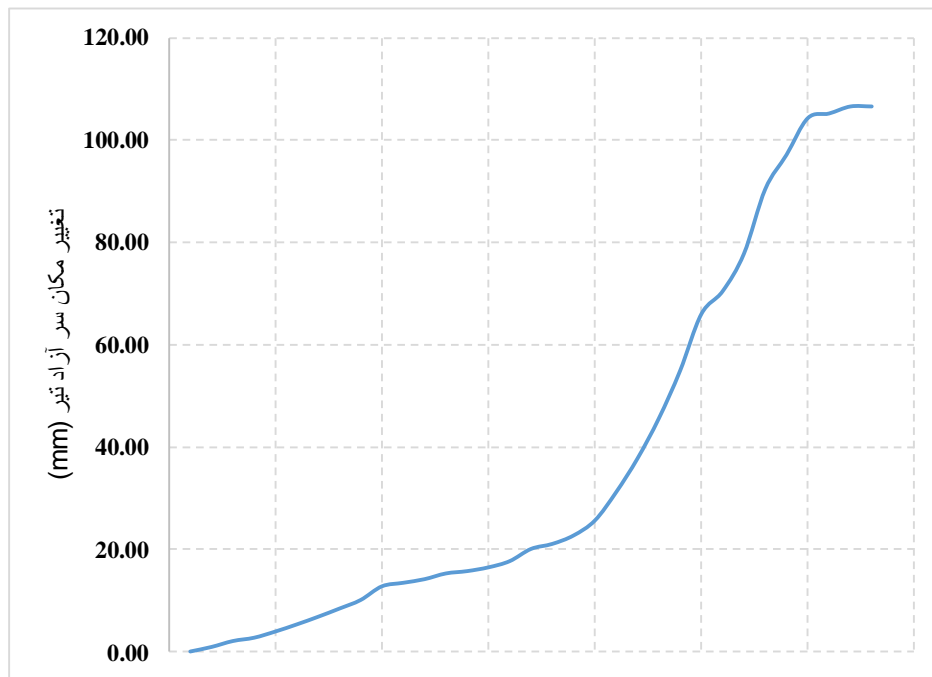
نمودار (۱) واکنش تکیه گاهی تیر بتنی نمونه بدون ورق FRP



نمودار (۲) تغییر مکان تیر نمونه



نمودار (۳) واکنش تکیه گاهی تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP



نمودار (4) تغییر مکان تیر مقاوم سازی شده با ورق CFRP

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش المان محدود به بررسی تاثیر ورق‌های FRP بر مقاومت تیرهای بتنی پرداخته شد. برای این کار ۲ نمونه تیر مختلف شبیه سازی شد که یکی از تیرها با ورق CFRP و تیر بدون ورق مورد شبیه سازی قرار گرفت. از آنالیز تیر بتنی ساده می‌توان دریافت که واکنش تکیه گاهی تیر ساده بعد از اتمام آنالیز تقریباً ۶۵ کیلو نیوتن می‌باشد. در حالی که واکنش تکیه گاهی بعد از پایان آنالیز در ۱ لایه CFRP مقدار ۴۲ کیلو نیوتن می‌باشد. همچنین می‌توان دریافت که میزان تغییر مکان سر آزاد تیر در تیر نمونه بعد از پایان دوره تحلیل تقریباً ۷۰۰ میلیمتر می‌باشد در حالی که در لایه‌های مختلف CFRP برابر است با ۱۱۰ که تاثیر مثبت خود را نشان می‌دهند. حال آنکه با توجه به اعداد و ارقام حاصله می‌توان دریافت که ورق‌های CFRP عملکرد خوبی را در کنترل رفتار لرزه‌ای تیرها از خود نشان می‌دهند.



## منابع

۱. رضا آزمون ، حمید وارسته پور (ارائه روش جدید برای تقویت برشی تیر بتن آرمه با الیاف CFRP) ۱۳۹۴
۲. دکتر محمدرضا قاسمی ، آرش شهریار احمدی ، دکتر محمد رضا توکلی زاده، (تحلیل عددی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با مواد کامپوزیتی FRP با استفاده از روش اجزای محدود)، ۱۳۹۵
۳. علیرضا نظری، محمدزمان کبیر ، حسین حسینی تودشکی، (ارزیابی بهبود در خصوصیات مکانیکی چندلایه های کامپوزیتی از جنس شیشه/وینیل استر تحت بار خمشی با کمک آنالیز خرابی پیشرونده) ۱۳۹۷
4. S.V. Chaudhari, M.A. Chakrabarti, (2012), Modeling of concrete for nonlinear analysis Using Finite Element Code ABAQUS
5. Mostofinejad D. Shameli S.M. and Hosseini A. (2012). Experimental study of the effectiveness of EBROG method for flexural strengthening of RC beams. Proceeding of the 6th international conference of FRP composite in Civil engineering. CICE 2012. Rome. Italy
6. M. Sudheer, Pradyoth K. R, Shashiraj Somayaji, (2015), Analytical and Numerical Validation of Epoxy/Glass Structural Composites for Elastic Models
7. Yunfu Ou 1, Deju Zhu, Huaian Zhang, Liang Huang, Yiming Yao, Gaosheng Li and Barzin Mobasher Vilnius, (2016) Mechanical Characterization of the Tensile Properties of Glass Fiber and Its Reinforced Polymer (GFRP) Composite under Varying Strain Rates and Temperatures
8. Victor Munoz<sup>1</sup>, Marianne Perrin, Marie-Laetitia Pastor, H el ene Weleman, Arthur Cantarel and Moussa Karama (2016) Determination of the elastic properties in CFRP composites: comparison of different approaches based on tensile tests and ultrasonic characterization
9. Collins, M.P.; Vecchio, F.J.(1982)“The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses”, University of Toronto,