ابوالفضل عربزاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ، ایران رامی عبدالصمد، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

فرهاد دانشجو، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: aarabzade@modares.ac.ir

دريافت: ۹۰/۱۲/۱۰ پذيرش: ۹۱/۰۳/۲۰

چکیدہ

نتایج آ زمایشگاهی نشان میدهند که تقویت خمشی تیرهای بتنی با پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربنی CFRP رضایت بخش است. در این مقاله از روش چسباندن خارجی (EB) و جایگذاری نزدیک سطح (NSM) برای تقویت تیرهای بتن مسلح در پلها استفاده شده است و میزان کار آمدی روشهای نامبرده بر افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی یی که تحت بارهای یکنواخت قرار گرفتهاند، ارزیابی شده است. ابتدا، نتایج آزمایشگاهی سه تیر دارای ویژگیهای مختلف با نتایج به دست آمده از مدل عددی و نتایج محاسبه شده بر اساس آیین نامه ACI مقایسه شده است. نتایج، ساز گاری مناسبی با نتایج مدلهای ساخته شده توسط Ansys دارند. سپس تاثیر نحوه آرایش، تعداد لایهها، مقدار ورق CFRP در روش EB، و تعداد شیارها و ابعاد شیار در روش NSM و تاثیر مقاومسازی بر سازههای پیش بار گذاری شده، بر روی شاه تیرهای بتنی واقعی پل ٤٢ سالهای Interstate که توسط Aidoo و همکارانش، به نام نمونه کنترل و نمونههای تقویت شده به روش EB و NSM تحت بار یکنواخت تا مرحله شکست، مورد آزمایش قرار گرفته بودند، به وسیله مدلهای رایانه ای، ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان میدهند که نمودار بار – تغییر مکان با نتایج آزمایشهای گزارش شده تطابق خوبی دارند، وبا افزایش نسبت CFRP در مقطع، ظرفیت باربری نمونهها تا ۲۰٪ افزایش یافته، ولی با تغییر تدریجی تعداد لایه های ورقCFRP از ٤ لایه در وسط تا یک لایه در نواحی تکیه گاه در طول تیر نسبت به تیر کنترل افزایش مقاومت برابر ۳۲/۳ ٪ است. همچنین با افزایش یک نسبت یکسان از CFRP، تیرهای تقویت شده به روش NSM، به مقاومت نهایی بیشتری(٪۱۰) نسبت به تیرهای تقویت شده به روش EB رسیدهاند. د*ر* ضمن مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده به پیش بار گذاری تیرها وابسته نیست.

واژههای کلیدی: بتن مسلح، پل، تقویت خمشی، CFRP، چسباندن خارجی، جایگذاری نزدیک سطح.

۱. مقدمه

عوامل و دلایل متعددی از جمله اصلاح خطاهای موجود در طراحی و ساخت پل، جلوگیری از خرابی ناشی از عوامل طبیعی و محیطی، نیروهای ناشی از زمین لرزه، یا مقاومسازی سازهای پل برای تحمل بارهای بیشتر، نیاز به تقویت پل را افزایش میدهد. مقاومسازی معمولاً بر عنصری خاص در پل اعمال می شود، مثلاً پی، ستون، سرستون تیر و عرشه، هر یک ممکن است مورد مقاومسازی قرار گیرند. همچنین از دیدگاه اقتصادی مقاوم سازی پلها در مقایسه با گزینه تعویض و نوسازی عموماً ترجیح داده می شود و در همین رابطه فنون طراحی واجرایی توسط Ryall در سال ۱۹۹۵ [Ryall, 1995] ارایه شده است. در سال ۱۹۹۵، Picard و همکارانش مطالعات یارامتری گسترده ای انجام دادند که بر اهمیت مقاومت فشاری بتن تأکید کردند. در حالی که An و همکارانش در سال ۱۹۹۱ بر روی مقدار آرماتورهای فولادی تأكيد كرده اند. مطالعاتي توسط Challal وBenmokrane درسال ۱۹۹٦ برروی مقاومت خمشی تیرهای دارای میلگردهای FRP انجام پذیرفته است. در این مطالعات نشان داده شد که بااستفاده از میلگردهای FRP می توان ترک موجود در تیرها را کاهش و مقاومت را افزایش داد. افزون بر آن چسبندگی خوبی بین میلگردهای فوق و بتن مشاهده شد. نتایج آزمایشگاهی توسط Ross و Jerome در سال ۱۹۹۹ نشانگر آنست که مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده با لایه های FRP بین ۳۰٪ تا ۷۰٪ افزایش می یابد، اما شکل پذیری حدود ۲۰٪ کم می شود. - Pe dhari و همکارانش در سال ۲۰۰۸ نشان دادند یکی از روشهای نوینی که در سالهای اخیر به علت محاسن زیادی که نسبت به سایر روشها دارد بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است مقاومسازی سازههای موجود با استفاده از مواد مرکب است. در این زمینه تحقیقات بسیاری صورت گرفته است و آیین نامههای مقدماتی توسط Oehlers و همکارانش در سال ۲۰۰۷ تهیه شده است [Oehlers, Liu and Seracino, 2007]

از مطالعات انجام شده توسط Smith و Teng در سال ۲۰۰۲ مشاهده می شود که تیرهای بتنی که به منظور تحمل خمش تقویت

شدهاند، ممكن است تحت اثر عوامل گوناگونی مانند گسیختگی فولاد، پارگی ورق کامپوزیتی، خرد شدن بتن در منطقه فشاری، ترک خوردگیهای خمشی و برشی در بتن و یا جدایی ورق از زیر تیر بتنی، تخریب شوند. بنابراین دستیابی به یک مدلسازی صحیح از رفتار خرابی یک تیر بتنی تقویت شده با الیاف مرکب مستلزم در نظر گرفتن عوامل متعددی است. در این مقاله به ایجاد یک مدل سه بعدی مناسب برای تیرهای بتنی تقویت شده به وسیله دو روش: چسباندن خارجی ورق FRP و جایگذاری نزدیک سطح پرداخته شده است. همچنین در این مقاله شاه تیرهای بتنی واقعی بکار رفته در پل که توسط Aidoo و همکارانش در سال ۲۰۰۶ تحت عنوان نمونه شاهد و نمونه های تقویت شده با ورق CFRP به روش چسباندن خارجی و جایگذاری نزدیک سطح مورد آزمایش قرار گرفتند، با استفاده از نرم افزار Ansys,۲۰۰۵، به روش اجزاء محدود مدل سازی شدهاند، و در ناحیه خطی و غیرخطی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتهاند. سپس با مدلسازی ورقهای CFRP بر روی مدل عددی تیر تأثیر نحوه آرایش، تعداد لایهها و مقدار ورق CFRP در روش چسباندن خارجی، و همچنین تعداد شیارها و عرض شیار در روش جایگذاری نزدیک سطح و تاثیر مقاومسازی بر سازههای پیشبار گذاری شده بر میزان افزایش ظرفیت خمشی تغییر مکان و مقاومت نهایی تیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. مطالعات تحليلي

نحوه محاسبه تقویت خمشی یک عضو بتنی مسلح با اضافه کردن لایههای FRP در ناحیه کششی آن، به گونه ای که راستای الیاف آن در جهت تنش اصلی کششی عضو خمشی باشد، بر اساس روابط آییننامه ACI440.2R-02، ۲۰۰۹ بررسی میشود. بهعلت سادگی محاسبات بعضی از فرضیات که در محاسبه تقویت خمشی مقطع بتنی به وسیله ورق FRP بکار میروند، عبارتند از:

- کرنشها در بتن و مصالح FRP خطی و متناسب با فاصله آنها از محور خنثی است.

IPAI مهند سلی محملا و نقل / سال سوم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۱

شده با FRP از رابطه (۲) بهدست می آید.

$$M_{u} = \psi.M_{n} = \psi \begin{bmatrix} A_{s}f_{s}\left(d-\frac{a}{2}\right) \\ +\psi_{f}A_{frp}\left(E_{frp}\varepsilon_{frp}\right)\left(h-\frac{a}{2}\right) \end{bmatrix}$$
(۲)

نکته ۱: در صورت جاری شدن فولاد، در روابط فوق مقدار $_{s}^{1}$ با f_{y} جایگزین می شود. نکته ۲: در صورت جاری شدن FRP، در روابط فوق مقدار \mathcal{F}_{frp} با با \mathcal{F}_{frpu} جایگزین می شود. FRP جایگزین می شود. به حد جاری شدن نرسیده کرنش در FRP از رابطه (۳) محاسبه به حد جاری شدن نرسیده کرنش در $\mathcal{F}_{frpe} = (\mathcal{F}_{a})(\beta_{1}h - a) - \varepsilon_{bi}$ (۳) a می شود. نکته ٤: مقدار a با حل معادله درجه دوم رابطه (٤) نسبت به a به دست می آید.

$$0.85 f_c ba^2 + \left[A_{jrp} E_{jrp} \left(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{bi} \right) - A_s f_y \right] a \qquad (\xi)$$
$$- \beta_l A_{jrp} E_{jrp} \varepsilon_{cu} h = 0$$



شكل ٢. نمودار ممان- انحنا [Branson,1996]

۲–۱ مقاومت نهایی تیرهای بتنی مستطیل

شکل (۱) تنش و کرنش بتن، FRP و فولاد مقطع مستطیلی تحت خمش را در حالت حدی نهایی نشان میدهد.



شکل ۱. نمودار تنش-کرنش مقطع مستطیلی تحت خمش [Benmorkrane, Chaallal and Masmoudi,1996]

نمودار تنش فشاری بتن را می توان با قبول بیشینه تغییر شکل نسبی بتن، در دورترین تار فشاری برابر با ۰/۰۰۳، بهوسیله توزیع تنش مستطیلی معادل با مشخصات زیر تأمین کرد: الف: تنش برابر با معادل، که بهطور یکنواخت روی یک ناحیه فشاری معادل، که بهکنارههای مقطع و خطی بهموازات

محور خنثی به فاصله β₁x از دورترین تار فشاری محدود میشود، اثر میکند.

ب: فاصله تیر نظیر بیشینه تغییر شکل نسبی از محور خنثی، X، در امتداد عمود بر محور خنثی اندازهگیری می شود.

ج: ضریب β₁ برای بتن با مقاومت فشاری مشخصه تا MPa۳۰، برابر ۸۵/۰ است. برای مقاومتهای بیشتر به ازای هر مگاپاسکال افزایش مقاومت فشاری مشخصه بتن، مقدار β₁ بهصورت خطی به اندازه ۰/۸۰۰ کاهش مییابد. حداقل مقدار به ۲۵/۰ محدود میشود. رابطه (۱) عبارت فوق را توصیف میکند:

$$0.65 \le \beta_1 = 1.09 - 0.008 f_c \le 0.85 \tag{1}$$

با حل معادلات تعادل مقطع، مقاومت حدى مقطع مستطيل تقويت

 M_{cr} در این مرحله بار متناظر با ممان ترک خوردگی M_{cr} مرحله ۱: در این منظور ممان و تغییر شکل مربوطه محاسبه می شود که برای این منظور ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته ترک نخورده بکار گرفته شد. در شکل (۳) مقطع تبدیل یافته ترک نخورده نشان داده که در محاسبات، از چسب چشم پوشی شده است.



شکل۳. مقطع تبدیل یافته ترک نخورده

در این محاسبات، از ممان اینرسی موثر مقطع که برابر با ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته ترک نخورده است، استفاده شد. $I_{un} = I_{gt} = \frac{bh^3}{12} + bh(\overline{y} - \frac{h}{2})^2$ (٥) $+ (n_s - I)A_s (d - \overline{y})^2 + n_f A_f (d_f - \overline{y})^2$ $Z_b \text{ cr} \tilde{I}$ (٦)

$$\overline{y} = \frac{(bh^2/2) + (n_s - I)A_sd + n_fA_fd_f}{bh + (n_s - I)A_s + n_fA_f} \tag{V}$$

و ممان لحظه ترک خوردگی از رابطه (۸) محاسبه می شود $M_{cr} = \frac{I_{gt} f_r}{\frac{Y_t}{y_t}}$

$$y_t = h - \overline{y} \tag{4}$$

$$f_r = 0.62\sqrt{f_c^{(N/mm^2)}}$$
 (1.)

مرحله ۲: در این مرحله بار متناظر با ممان $\mathbf{M}_{a}^{\mathrm{II}} e$ و تغییر شکل مربوطه محاسبه می شود. در این مرحله، ترک خوردگی شروع و در بتن منتشر می شود، به این معنی که پس از این لحظه رفتار ارتجاعی نبوده و ممان اینرسی موثر مقطع کاهش می یابد. مقدار ممان اینرسی ترک خوردگی به صورت زیر تعیین می شود: $I_{cr} = \frac{bc^{3}}{3} + n_{s}A_{s}(d-c)^{2} + n_{f}A_{f}(d_{f}-c)^{2}$ (۱۱) (Branson (۱۹٦٥) برای محاسبه ممان اینرسی موثر از فرمول ۱۹٦۵)

استفاده می شود که در رابطه (۱۲) آمده است.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_{gt} + \left[I - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr}$$
(۱۲)

مرحله ۳:

در این مرحله بار متناظر با ممان ^{III} و تغییر شکل مربوطه محاسبه می شود. در این مرحله پس از تشکیل ترکهای فراوان در طول تیر لنگر مقطع به لنگر تسلیم _۷ میرسد. برپایه مطالعات (۲۰۱۰) Said لنگر موثر در این مرحله بر حسب رابطه (۱۳) محاسبه می شود.

$$I_{e}^{III} = I_{cr,sh} / \left[I - \left(I - I_{cr,sh} / I_{e,y} \right) \left(\frac{M_{y}}{M_{a}^{III}} \right)^{2} \right]$$
(17)

$$\sum_{k=1}^{n} I_{cr,sh} / \left[I - \left(I - I_{cr,sh} / I_{e,y} \right) \left(\frac{M_{y}}{M_{a}^{III}} \right)^{2} \right]$$

$$\sum_{k=1}^{n} I_{cr,sh} / \left[I - \left(I - I_{cr,sh} / I_{e,y} \right) \left(\frac{M_{y}}{M_{a}^{III}} \right)^{2} \right]$$

$$\sum_{k=1}^{n} I_{cr,sh} / \left[I - \left(I - I_{cr,sh} / I_{e,y} \right) \left(\frac{M_{y}}{M_{a}^{III}} \right)^{2} \right]$$

$$\sum_{k=1}^{n} I_{cr,sh} / \left[I - \left(I - I_{cr,sh} / I_{e,y} \right) \left(\frac{M_{y}}{M_{a}^{III}} \right)^{2} \right]$$

$$\sum_{k=1}^{n} I_{cr,sh} / \left[I - \left(I - I_{cr,sh} / I_{e,y} \right) \left(\frac{M_{y}}{M_{a}^{III}} \right)^{2} \right]$$

در می شود، با این تفاوت که به جای قیمانند روش محاسبه ی \mathbf{r}_{cr} نعین استفاده می شود و می شود، با این تفاوت که به جای $\mathbf{E}_{s,sh}$ از $\mathbf{E}_{s,sh}$ استفاده می شود و در صورت دسترسی نداشتن به اطلاعات کافی درباره A، مقدار (۱۰) به عنوان یک تقریب مقبول بکار گرفته می شود. پس از محاسبه ممان اینرسی موثر مقطع، افت در وسط دهانه تیر پس از محاسبه ممان اینرسی موثر مقطع، افت در وسط دهانه تیر پس از محاسبه ممان اینرسی موثر مقطع، افت در وسط دهانه تیر پس از محاسبه ممان اینرسی موثر مقطع، افت در وسط دهانه تیر پس از محاسبه ممان اینرسی موثر مقطع، افت در وسط دهانه تیر پس از محاسبه ممان اینرسی موثر مقطع، افت در وسط دهانه تیر بر اساس فرمول الاستیک (رابطه ۱۵) که توسط (۱۵) ماریک می می شود.

۸. مدل سازی عددی ۳. المانهای برگزیده

بررسی رفتار سازههای مرکب به دلیل رفتارهای غیرهمسان، غیرهمگن و غیرخطی آنها بسیار دشوار است. بنابراین برای انجام چنین بررسی پیچیدهای، استفاده از برنامههای آنالیز عددی جامع Ansys مورد نیاز است. در این مقاله از برنامه Ansys نگارش ۱۲ (۲۰۰۹) استفاده شده است. فرضیات ساده کننده که برای مدل عددی در نظر گرفته شده است، عبارتند از: – از لایه چسبنده در مدل تیرهای بتنی تقویت شده به روش چسباندن خارجی چشم پوشی میشود. – برای مدل کردن ترکها از روش پخش ترک^۳ استفاده شده است. – بارگذاری، شرایط تکیه گاه، محل اعمال بارها و فاصله بارها از

iPD.irگهاندمایلی الحمال و نقل / سال سوم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۱

 $E_{c} = 4733 \sqrt{f_{c}}$

 $f = 0.3 f_c^{'} \Longrightarrow E_c = \frac{f}{c}$

 $\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{F}$

خو اهد شد.

(10)

(17)

(1V)

 $(\Lambda \Lambda)$

یکدیگر کاملا مشابه آزمایشهاست.

جهت مدل سازی بتن از المان SOLID65 که یک المان سه بعدی هشت گرهی است و هر گره المان دارای سه درجه آزادی انتقالي U, , U, U, است، استفاده شده است (شكل ٤-الف). این المان قابلیت ترکخوردگی در کشش و خردشدگی در فشار را دارد. اگرچه در این المان می توان میلگردها را به صورت نسبت حجم آنها به حجم بتن مدل کرد، ولی برای مدل سازی میلگردها از المان LINK۸ که یک المان دو گرهی که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی است (شکل ٤–ب)، و برای مدلسازی تکیهگاهها و محل اعمال بار در تیرها، و چسب ایوکسی در مدل تیرهای تقویت شده با روش NSM از المان SOLID45 (شکل ٤-ج) که یک المان از نوع ٨ گرهي که هر گره داراي سه درجه آزادی جابجایی در جهات محورهای اصلی است، و برای ورقهای FRP از المان SOLID46 استفاده شده است (شکل ٤-د). این المان همانند المان SOLID65 از نوع ۸ گرهی، که هر گره دارای سه درجه آزادی جابجایی در جهات محورهای اصلی است، و می توان به راحتی تا ۱۰۰ لایه مواد گوناگون با خواص اورتوتروييک را مدل کرد.

۳–۲ خواص مواد بکار گرفته شده
۲–۲ نین
۵۰ در نرم افزار (۸۰۰۵)Ansys، به رابطه تنش-کرنش فشاری
۱۰ در بتن نیاز است. در این تحقیق روابطی که توسط Desayi و
۲۰۰۵ در سال ۱۹٦٤ بر اساس آزمایشهای مختلف ارایه

شده است مورد استفاده قرار گرفته است. برای ساخت منحنی





شکل ۵ ساده شده منحنی تنش-کرنش در مقاومت فشاری (۲۰۰۵) ACI مقاومت کششی در بتن را میتوان توسط معادلات پیشنهادی توسط Kachlakev, ۲۰۰۱ به دست آورد:

 $f_r = 0.623 \sqrt{f_c'} \tag{19}$

ضریب پواسون بر اساس آزمایشهای صورت گرفته توسط - Ba



شکل٤. شکل هندسی و موقعیت گرههای المان [٥] الف) Solid٤، ب) Link۸، ج) Solid٤ و د) Solid٤ و د

 $f = \frac{E_c \varepsilon}{I + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}$

که: f :تنش مقابل کرنش E

کرنش فشاری نهایی در بتن: \mathcal{E}_0

مقاومت فشارى نهايى

شکل (۵) ساده شده رابطه تنش و کرنش در مقاومت فشاری بتن را نشان می دهد.

تنش – کرنش در بتن از روابط (۱۵)، (۱۲)، (۱۷) و (۱۸) استفاده

(Mpa)

gash، (۱۹۸۹) برابر ۲/۲ در نظر گرفته می شود، ضریب انتقال برش β, بستگی به ترکهای ایجاد شده در بتن و وضعیت قرار گیری آنها دارد. مقدار این ضریب، بین صفر و یک متغیر است. وقتی که عدد صفر استفاده می شود، به آن مفهوم است که سطح بتن صاف و بدون انتقال برش، وقتى عدد يک اختيار شود به اين مفهوم است که ترکهای ایجاد شده بسیار درشت هستند و انتقال برش وجود دارد. مقدار که در بررسی سازههای بتنی استفاده می شود، بین ۰۵/۰ تا ۰/۲۵ متغیر است. با استفاده از روشها و آزمایشهای گوناگونی که توسط يژوهشگران براي به دست آمدن ضريب انتقال برش انجام شده است، یک عدد پیشنهاد شد. همگرایی مسئله سبب خواهد شد که ضریب انتقال برش کمتر از ۲/۰ اعمال شود، بنابراین ضریب انتقال برش در این مقاله متوسط مساوی با ۰/۲ در نظر گرفته می شود. معیار شکست مورد استفاده نرمافزار برای بررسی رفتار چند محوره بتن معیار ویلیام- وارنک (۱۹۷۵) است [.William and Warnke 1975] . در اينجا قابليت خردشدگي اين المان ناديده گرفته شده و ترک خوردگی در بتن، شکست را کنترل می کند.

۳-۲-۲ فولاد میلگردها و ورق فولادی

در مدل المان محدود فرض می شود که رفتار در کشش و فشار الاستیک- پلاستیک کامل باشد، شکل (٦).



K –] شکل ۲ منحنی تنش-کرنش فولاد میلگردهای پیشنهادی توسط [chlakev,2001

برای مدل سازی ورقهای فولادی تکیهگاهها، فرض شده که این ورقها دارای رفتار الاستیک- خطی هستند.

FRP الياف كامپوزيتي FRP

الیاف FRP از نوع مواد هستند که خصوصیات آنها در همه جهات یکسان نیست و همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، ورقههای تک جهتی هستند که خصوصیات این مواد نسبت به سه صفحه متعامد تقارن دارند (صفحات XY,YZ,XZ). محورهای X,Y,Z با محورهای مواد جابجا می شوند، یا به عبارتی از محورهای مختصات متناسب با مواد استفاده می شود، جایی که محور X همان جهت الیاف است و محورهای Y,Z عمود بر راستای X هستند.



شکل ۷. شماتیک از ترکیبات FRP پیشنهادی توسط [- Kachla] [ev,2001]

۳-۲-3 چسب اپوکسی چسب اپوکسی دارای رفتار الاستیک خطی تا مرحله شکست است. بعضی از خواص مکانیکی اپوکسی که در برنامه تعریف میشود، عبارتند از: مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و کرنش نهایی.

۳-۳ هندسه المانها و نحوه مدلسازي

در این مقاله پیوند کامل بین مصالح فرض شده است. برای انجام این کار المان لینک بین گرههای هر المان بتن مجاور بسته میشود. با فرض اینکه چسب اپوکسی موجب چسبیدن کامل لایههای FRP به بتن میشود، نقاط مختلف الیاف با المان بتن به یکدیگر بسته میشوند. به عبارت دیگر هر دو المان در مرز تماسی خود دارای یک تنش و کرنش خواهند بود.

نرمافزار (Ansys(۲۰۰۵ برای تحلیل از روش -Newton

iP.ir مهند سلی محملا و نقل / سال سوم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۱

Raphson استفاده می کند. در این روش در انتهای هر گام نیاز به تأمین همگرایی تیر در حدود تلرانس است، که در اینجا ۰/۵ ٪ برای کنترل نیرو و ٪۵ برای کنترل تغییر مکان در نظر گرفته شده است.

٤. مقايسه نتايج

برای کنترل نتایج روش تحلیلی و نتایج حاصل از مدل اجزای محدود (۲۰۰۵)Ansys نتایج این دو روش با برخی از نتایج

آزمایشگاهی موجود در مقالات مقایسه شده است. مشخصات این تیرها در جدول (۱) آمده است. با استفاده از اطلاعات موجود در مقالات، ترک خوردگی، بار تسلیم، بار نهائی، و افت وسط تیر مربوط به بار تسلیم و بار نهایی توسط رابطههای آیین نامه ACI(۲۰۰٦) م و رابطه (۱٤) انجام شده است که در جدول (۲) با نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی و نتایج ناشی از (۲۰۰۵)- A sys مقایسه شده است.

نمونهها	مشخصات	.١	جدول
---------	--------	----	------

ε _{frpu}	E_{frp}	A_{frp}	E_s	A_s	f_y	f_c	طول×عرض×ار تفاع	روش	نمونه
	(GPa)	(mm ²)	(GPa)	(mm ²)	(MPa)	(MPa)	(mm×mm×mm)	تقويت	
•/• \V	٦٢	1870	۲	1779	٤١٠	۱۳/۷٥		EB	[11] 1
•/•137	101	٣٢	۲۱.	۲۳.	٥٣٢	٣٥	10.×٣×٣٢	NSM	[18] 7
•/•71	۲۳۰	٧٠	۲	070	٤٠٠	۲٥	7 • • × ٣ • • × 7 7 • •	EB	[10]٣
•/•17	190	٨٤	۲	070	٤٠٠	٢٥	7 • • × ٣ • • × ۲ 7 • •	NSM	٤ [١٥]

جدول۲. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی و تجربی

تغييرمكان نهايي	تغييرمكان تسليم	بار نھایی	بار تسليم فولاد	بار ترک خوردگی	مدل	نمه نه
(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	•	-94
21/14	۲ • /۳	٦. V/Y	00.	१ ९/४	عددی	
Y 1/V	۲•/۸۸	091/2	٥٨٣/٥	٩٦/٣	تحليلي	١
٣•/٤٨	-	7A9/V	-	٩٦/٥	آزمایشگاهی	
3175	۲/۲	۱۰٥/۸	75/7	18/37	عددى	
۲۸/۱	11/•٣	٧٩/٤	٥٨/١	10/08	تحليلي	۲
22/27	10/79	٩٩/٨	V•/٦	١٦/٥	آزمایشگاهی	
۲۳/٤٣	0/77	189/3	117/70	22/9	عددى	
۱•/٦٨	0/7	178/5	171/1	23/2	تحليلي	٣
١٤/٥٨	0/77	129/97	110	١٩/٨	آزمایشگاهی	
25/25	0/20	107/7	١١٣	1 2/90	عددی	
۱ • / ٦٦	٥/٧٧	178/9	170/0	۲٣/٣	تحليلى	٤
$V/\cdot A$	٥/٠٩	107/7	11./0	۱۹/۸	آزمایشگاهی	

با مقایسه نتایج می توان گفت که نتایج مدلهای عددی در مقایسه با نتایج تحلیلی تا مرحله II با نتایج آزمایشگاهی به خوبی مطابقت می کند، اما در ناحیه III نتایج مدل عددی با دقت بیشتری با نتایج حاصل از آزمایش تطبیق دارد.

در حل تحلیلی، فرض شده که مد جداشدگی در مقطع مقاوم شده رخ ندهد و به علت دسترسی نداشتن به اطلاعات کافی درباره مدول ارتجاعی بعد از تسلیم فولاد، ممکن است نتیجه در مرحله III با نتایج آزمایشی تفاوت داشته باشد.

۸. بررسی نتایج حاصل از تحلیل شاهتیرهای پل ۹-۱ مشخصات تیرها

پل مورد مطالعه دارای پنج دهانه ساده ۹۱٤۰ mm است که هر دهانه دارای پنج تیر بوده و فاصله بین تیرها ۱۹۸۰ mm است (شکل ۸). تیر مورد نظر دارای ارتفاع ۳۳۸۲۸ (شامل mm ۱۳۵ ارتفاع عرشه)، عرض عرشه ۳۳۹۳ است. شکل(۹) موقعیت آرماتورها و ابعاد تیر اصلی را نشان میدهد.

			US	
	NS	CS		
<u> </u>	- <u>-</u>		_	9140 (typ.)

شکل ۸. ابعاد پل و موقعیت تیرهای آن Aidoo و همکارانش، (۲۰۰۹). برای تقویت تیرها با CFRP از دو روش زیر در آزمایشها استفاده شده است:

۱- روش چسباندن خارجی (EB) (شکل ۱۰ الف).
 ۲- روش جایگذاری نزدیک سطح (NSM)(شکل ۱۰ ب). لازم
 به یاد آوری است در هر دو روش از مقدار مساوی CFRP
 استفاده شده است.





٥-٢ نحوه مدل سازى تيرها

با استفاده از تقارن تیرها، فقط یک چهارم تیر مدل شده است. برای مدل سازی تقارن، گرههای واقع بر سطوح تقارن در جهت عمود بر آن سطوح مقید شدند. نحوه چیدن المانهای Solid٦٥ برای مدلسازی بتن و المانهای Solid٤٥ برای مدل سازی تکیهگاه و محل اعمال بار در شکل (۱۱) مشاهده میشود. در شکل (۱۲) آرایش و نحوه مدل سازی میلگردها با استفاده از المان Link۸ در نرم افزار در تطبیق با تیر آزمایش شده، مشاهده میشود. شکل (۱۳) نحوه مدل سازی ورق فولادی در محل اعمال بار و تکیهگاه را نشان می دهد.







شکل ۹. موقعیت آرماتورها و ابعاد تیر Aidoo و همکارانش، (۲۰۰۹)

stD.irگهنالیلاله الحمال و نقل / سال سوم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۱

Archive of SID

بررسی اجزای محدود رفتار تیرهای بتنی تقویت شده یلها با مواد کامیوزیتی



شکل ۱۲. نحوه مدل کردن میلگردها



(الف)

شکل1۳. نحوه مدل سازی ورق CFRP در روش (الف) EB و (ب) .NSM



شکل ١٤. نحوه مدل سازی ورق فولادی برای: (الف) محل اعمال بار (ب) تکیه گاه.

٥-٣ مشخصات مصالح مشخصات مصالح نمونه های واقعی در جدول (۳) آورده شده است. الياف CFRP استفاده شده است در اين تحقيق از نوع فیبر کربنی که زاویه قرارگیری الیاف صفر درجه در راستای محور طولی، محصول شرکت (Fyfe(۲۰۰۰) است مشخصات این مصالح در جدول (٤) آمده است.

٥-٤ كاليبر اسيون مدلها

پس از مدلسازی تیر کنترل EX-CB و تحلیل آن در نرمافزار جهت بررسی میزان مقاومت و افت وسط دهانه، نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه آن در کنار نمودار بار – افت تیر کنترل رسم شده است، (شکل۱۵). انطباق بسیار قابل قبولی، هم در میزان بارنهایی، و هم در تغییر مکان وسط دهانه تیر به گونه ای آشکارمشاهده می شود، به طوری که حداکثر خطای موجود میان مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در مقاومت نهایی حدود ٪۸/. است.

تیرهای EX-EB و EX-NSM تقویت شده با ورقهای CFRP با نرمافزار (Ansys(۲۰۰۵ مدلسازی شده است و تا مرحله شکست مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مرحله نیز همانطور که از نمودار بار- تغییرمکان شکل (١٦) و شکل(١٧) مشاهده می شود، شیب نواحی سهگانه به خوبی با نتیجه آزمایش سازگار است. اگرچه شیب مرحله سوم

	V _{epoxy}	€ _{ерохуи}	E _{epoxy} (GPa)	vy	<i>f</i> _y (MPa)	<i>E_s</i> (GPa)	<i>f_r</i> (MPa)	<i>f</i> _c ' (MPa)	<i>Е</i> _с (МРа)	
-	• /٣٧	•/• * *	۳۲۰۰	• /٣	۳	۲۰۰	٤/١٨	٤٥	31100	
			Fyfe(7 • •	رکت (+	FI محصول ش	شخصات RP	جدول ٤. مث			
عامت لايه (mm)	ضخ)	مدول برشی (MPa)		ش نھايي	كرن	ريب پواسون	نه ضر	مدول الاستيسين (MPa)		FRP
١/٢٥		$G_{xy} = \forall \forall \forall \cdot$ $G_{xz} = \forall \forall \lor \cdot$ $G_{yz} = 1 \land 1 \cdot$		7.1/A		$v_{xy} = \cdot / \gamma \gamma$ $v_{xz} = \cdot / \gamma \gamma$ $v_{yz} = \cdot / \gamma$		$E_x = 1 \dots E_y = \epsilon \dots E_z = \epsilon \dots$	بن)	الياف كر FRP

-			0.0				
	اپوكسى	و	فولاد	بتن و	مصالح	مشخصات	ېدول۳.

ابوالفضل عربزاده، رامی عبدالصمد، فرهاد دانشجو



شکل ۱۵. نمودار بار تغییرمکان وسط دهانه مدل آزمایشگاهی تیر کنترل و نمونه مدل شده در نرم افزار

در دو روش تطبیق خوبی دارند، ولی بار نهایی و تغییر مکان در روش عددی بیشتر از نتیجه آزمایش به دست آمده است. همچنین بیشینه تفاوت میان مقاومت نهایی درمدل آزمایشگاهی و مدل عددی حدود ۲٪ است.

٥-٥ شكل گيرى تركها

در نرمافزار (Ansys(۲۰۰۵ ترک خوردگی بتن با علامت دایره نشان داده شده است که شامل ترک عمودی خمشی، ترک دایرهای فشاری و ترک قطری کششی است. اولین ترکها در تیرهای مدل شده، ترکهای خمشی در وسط دهانه است. این ترکها در باری





حدود ۸۱۰ kN به وجود می آید. زمانی که تنشهای کششی اصلی از کشش قابل تحمل توسط المان بتن تجاوز کنند دوایر ترک به صورت خطهای عمودی در راستای تنشهای اصلی ظاهر می شوند. در نرم افزار، ترکهای ایجاد شده در هر گام بارگذاری ثبت می شوند. هنگامی که بر میزان بار افزوده می شود، ترک عمودی به صورت افقی از وسط تیر به سوی تکیهگاه گسترش می یابد. سپس در بارهای بیشتر، ترکهای قطری کششی پدیدار می شوند. با افزایش بارگذاری تعداد ترکهای خمشی و کششی قطری افزایش می یابد. سرانجام ترهای فشاری در نزدیکی محل اعمال بار ظاهر می شوند.



EX-NSM و نمونه مدل شده در نرم افزار



(الف) تير تقويت شده روش EB

(ب) تير کنترل

شکل ۱۸. گسترش ترکهای تیر کنترل و تیر تقویت شده

نحوه ترک خوردگی در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

۵-۵ مقایسه عملکرد تیرهای بتنی تقویت شده با دو روش EB و NSM

همان طور که از نمودار بار-تغییرمکان شکل (۱۹) نشان داده شده، با تغییر آرایش ورقهای CFRP در مدل عددی، با وجود ثابت نگهداشتن مقدار CFRP استفاده شده، مقاومت و تغییرمکان تیرهای مدل شده تغییر میکند. با توجه به شکل (۱۹)، مشاهده می شود بیشترین افزایش در بار نهایی مربوط به تیری است که با روش NSM تقویت شده است، که با توجه به جدول(۵) میزان افزایش نسبت به تیر کنترل ٪/۱۰ است، درحالی که در تیر تقویت شده با روش EB این افزایش به ٪/۱۰/ رسیده است.

جدول ۵ . مقایسه نتایج مدلهای عددی تقویت شده به روش EB و NSM.

اختلاف در	اختلاف در	بار نھایی	تغييرمكان	تير
بار نهایی ٪	افت ٪	(kN)	(mm)	
-	-	V91/87	711/V	CB-Ansys
۱۰/٥	٤٤/١	AVE/r	٣٠٥	EB-Ansys
10/0	30	912/7	۲۸٥/۸	NSM-Ansys

۵–۷ مطالعات پارامتریک ۵–۷–۱ تأثیر تعداد لایههای ورق CFRP در روش چسباندن روی سطح

برای بررسی تأثیر تعداد لایههای ورق CFRP در روش چسباندن روی سطح تیر، تیر Ansys-EB که دارای یک ورق لایه ورق CFRP بوده، به عنوان مدل EB۱Layer در نظر گرفته شد. سپس سه مدل اجزای محدود دیگر از همان تیر، با این تفاوت که به ترتیب با دو، سه و چهار لایه ورق CFRP تقویت شده بودند ساخته شده است. و هر کدام از آنها تا تحلیل در نرم افزار واگرا شود، بارگذاری شده است. نتایج حاصل از تحلیلها در جدول (۲) و شکل (۲۰) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج ارایه شده در شکل (۲۰) و جدول (۲)، ظرفیت باربری تیرها، با افزودن تعداد لایههای ورق CFRP، افزایش پیدا میکند و محدوده این افزایش باربری نسبت به تیر کنترل از ۱۰/۵ تا ۲۹/۷ ٪ است، ولی تغییر مکان وسط دهانه تیر به دلیل افزودن CFRP و ترد شدن، باید کمتر شود. دلیل این که برنامه و نمودار تغییر مکانهای غیر واقعی (بزرگ تر) را نشان میدهند، ممکن است به دلیل محدودیت های برنامه که مد گسیختگی CFRP و چسب اپوکسی را نشان نمیدهد، باشد.

ابوالفضل عربزاده، رامی عبدالصمد، فرهاد دانشجو



شکل ۱۹. نمودار بار- تغییرمکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده به روش EB و NSM

اختلاف در افت ٪	اختلاف در بار نهایی ٪	بار نهایی (kN)	تغييرمكان (mm)	تير
-	-	V91/87	711/V	CB-Ansys
٤٤١١	1 • / 0	AVE/T	٣.0	EB1Layer
۱ • ۱/۹	۲ • /۹	907/0	٤٢٧/٥	EB2Layer
٤٢/٢	۲۲/۳	٩٦٨	۳۱۱/۱	EB3Layer
٧٠/٨	79/V	1.17/7	٣٦١/٦	EB4Layer

لابههاي مختلف	یت شدہ یا	نبرهای تقو	مدلهای عددی ز	مقايسه نتايج	جدول ۲.
u	• •	., , ,.		<u>.</u>	



شکل ۲۰. نمودار بار تغییرمکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده با لایههای مختلف

۵-۷-۲ تأثیر نحوه آرایش ورقهای CFRP، در تقویت تیرهای برای بررسی تأثیر نحوههای آرایش ورقهای CFRP، در تقویت تیرهای بتن مسلح، تیرکنترل مورد نظر را با مقدار یکسان ورق CFRP ولی با آرایشهای مختلف، در نرمافزار Ansys مدل سازی شده است، و تا مرحله شکست تحت بارگذاری قرار گرفته است. چگونگی آرایش ورقهای CFRP در مدل های ساخته شده در شکل (۲۱) آورده شده است. اما تغییرمکان تیرهای تقویت شده متناسب با بار نهایی تیر کنترل (kNv۹۱/۳۲) به ترتیب نسبت به تعداد لایهها (۲۷/٦۸، ۵۷/٤۵، ۶۸/٦٩ و ۲۵ mm) است. بنابراین میتوان نتیجه گرفت تا حدودی افزودن FRP باعث افزایش مقاومت و کم شدن تغییر مکان وسط تیر میشود.

Archive of SID

بررسی اجزای محدود رفتار تیرهای بتنی تقویت شده پلها با مواد کامپوزیتی



شکل ۲۱. آرایش ورقهای CFRP در روش EB در مدل (الف)-دو لایه در وسط،EB-Ansys (ب)دو لایه روی هم به صورت نامتقارن، EB-NoSym (ج) چهار EBT-Layer1 (د) دو لایه روی هم در وسط، EBT-Layer۲

·/ .1	·/	بار نهایی	تغييرمكان	-
اختلاف در بار تهایی ۸	اختلاف در افت ./	(kN)	(mm)	لير
-	_	V91/27	711/V	CB-Ansys
1 • / 0	٤٤/١	AVE/Y	٣٠٥	EB-Ansys
٩/١	٥٥/٩	Γ	۳۳۰/۱	EB-NoSym
۱ • /٦	J)/V	٨٧٥/١	327/2	EB2Layer1
۱۰/۸	०٦	٨٧٦/٤	٣٣٠/٢١	EB2Layer2

جدول ۷. مقایسه نتایج تیرهای تقویت شده با آرایشهای مختلف و مقدار یکسان از CFRP



شکل ۲۲. نمودار بار تغییرمکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده با آرایشهای مختلف و مقدار یکسان از CFRP

بر اساس نتایج ارایه شده در جدول (۷) و شکل (۲۲)، افزایش ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده به صورت متقارن و دارای مقدار یکسانی از ورق CFRP (مقدار ثابت در طول و عرض تیر) تقریبا ثابت باقی میماند، و این افزایش باربری نسبت به تیر کنترل حدود ۲۰/۱ ٪ است. اما تیر تقویت شده به صورت نا متقارن پیش از سایر تیرها تسلیم شده و برای آن افزایش باربری نسبت به تیر کنترل حدود ۹/۱ ٪ است. علت آن است که در حالت نامتقارن بودن محل CFRP در مقطع، بار کمتری به CFRP می رسد و در نتیجه در این حالت در مقایسه با حالت متقارن ورقهای CFRP نیروی محوری کمتری تحمل می کنند.

۵-۷-۳ تأثیر پیش بارگذاری بر رفتار تیرهای تقویت شده. برای بررسی چگونگی تأثیر پیش بارگذاری بر میزان ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورقهای CFRP با روش EB، چهار مدل در نرم افزار Ansys ساخته شده که پس از اعمال بارهای ۲۰۰، ۲۰۰، ۷۰۰ و ۲۷۷۰ که بار سرویس همین تیرهای قبل از تقویت با ورقهای CFRP بوده است، با یک لایه ورق CFRP تقویت شده و تا واگرا شدن تحلیل بارگذاری شدند. منحنی بار – تغییرمکان تیرهای اخیر و تیری که پیش بارگذاری را تجربه نکرده است (Ansys) در شکل (۲۳) آمده است. در واقع هدف از این مطالعه بررسی عملکرد تیرهای تقویت شده، بعد از ترک خوردن تحت بار سرویس بوده است.





شکل ۲۳. نمودار بار تغییرمکان وسط دهانه تیرهای پیش بارگذاری شده در مقایسه با تیر پیش بارگذاری نشده

بر اساس نتایج ارایه شده در نمودار بار – تغییر مکان شکل (۲۳)، مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده با ورق CFRP وابسته به پیش بارگذاری نیست. با توجه به نمودار بار تغییرمکان شکل (۲۳) مشاهده میشود که سختی همه تیرها در نواحی سهگانه یکسان است، بهجز تیری که پس از پیش بارگذاری تسلیم شده تقویت شده است، این تیر در مرحله پیش بارگذاری تسلیم شده و سختی آن همانند تیر کنترل، کمتر از سختی بقیه تیرها در آن مرحله است، ولی بعد از تقویت با ورق CFRP بر سختیاش افزوده شده و به مانند بقیه تیرها رفتار میکند.

۵–۷–٤ تأثیر تعداد شیارها در روش NSM

برای بررسی تأثیر تعداد شیارها در روش جایگذاری نزدیک سطح، تیر Ansys-NSM که دارای چهار شیار است به عنوان مدل NSM-EG در نظر گرفته شد. سپس دو مدل اجزای محدود دیگر از همان تیر، با این تفاوت که به ترتیب با پنج و شش شیار تقویت شده بودند ساخته شد، شکل (۲٤). و هر یک از آنها تا واگرا شدن تحلیل بارگذاری شد. نتایج حاصل از تحلیلها در

جدول (۸) و شکل (۲۵) آمده است. با توجه به پیشنهاد Kang و همکارانش (۲۰۰۵) برای تقویت تیر نمی توان بیشتر از شش شیار استفاده کرد، به عبارت دیگر فاصله بین شیارها نباید کمتر از ۴. مستقل رفتار کند و فاصله ۳. مستقل رفتار کند و فاصله سیار تا لبه تیر باید بیشتر از ۴۰ mm باشد تا از جدا شدگی بتن اطراف جلوگیری شود.



بر اساس نتایج ارایه شده در شکل (۲۵) و جدول (۸)، بر ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با افزایش تعداد شیارهای مقاومسازی افزوده می شود و این افزایش باربری نسبت به تیر کنترل در محدوده ۱۵/۵ تا ۲۷/۶ ٪ است. با توجه به شکل (۲۵) مشاهده می شود سختی همه تیرها درناحیه اول و دوم یکسان است، ولی در ناحیه سوم که با تسلیم میلگردها آغاز می شود، نمودارها اندک اندک از هم فاصله می گیرند تا آنجا که مقاومت نمونه تقویت

-	تغييرمكان	بار نھایی	اختلاف	·/ 1.: 1 . :No: 1
فير	(mm)	(kN)	در افت ٪	اختلاف در بار نهایی ٪
CB-Ansys	711/V	771/197	-	_
NSM-4G	۲۸٥/۸	912/7	٣٥	10/0
NSM-5G	٣•٦/٥	907/1	٤٤/٨	۲ • /٤
NSM-6G	Y 1 A/ 1	۱•۸٦/۹	۲/٥	WV/E

جدول ۸ . مقایسه نتایج مدلهای عددی تیرهای تقویت شده به روش NSM با شیارهای مختلف

74.

شده با ۲ شیار مقاومتی حدود ۲۱/۹ ٪ بیشتر از مقاومت نمونه تقویت شده با ٤ شیار می شود. از مقایسه منحنی های بار – تغییر مکان وسط دهانه تیر تقویت شده با ٥ شیار با تیر تقویت شده با ٤ شیار، دیده می شود که مقاومت تیر NSM-5G فقط ۶/۹ ٪ بیش از مقاومت تیر NSM-4G است و با توجه به مطالعات [– A بیش از مقاومت تیر doo, 2006] علت آن است که ایجاد شیار زیر محل قرار گیری میلگردهای فولادی به تشکیل سطح افقی ضعیفی زیر طبقه میلگرد می انجامد که بر احتمال گسیختگی در آن منطقه می افزاید.



شکل ۲۵. نمودار بار تغییر مکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده به روش NSM با شیارهای مختلف

۵–۷–۵ تأثیر ابعاد شیار در روش NSM

برای بررسی تأثیر ابعاد شیار در تقویت تیرهای بتن مسلح به روش NSM، تیرکنترل با استفاده از همان مقدار ورق CFRP و همان تعداد شیارها، ولی با ابعاد مختلف در ۸۰۰۵، Ansys مدل شده و تا واگرا شدن تحت بارگذاری قرار گرفت. مقطع تیرهای

مدل شده با شیارهایی با ابعاد مختلف در شکل (۲٦) نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیلها در جدول(۹) و شکل(۲۷) آمده است.

همانند سایر مقایسه ها، بررسی جدول (۹) و شکل (۲۷) نشان می دهد، که در ناحیه اول و دوم، مقاومت و افت وسط دهانه هر سه مدل یکسان بوده است. با توجه به این که در دو ناحیه مزبور ترک خوردگی بتن و تسلیم فولاد رخ می دهد، بنابراین تقویت با ورقهای CFRP چندان مؤثر نیست. در ناحیه سوم تیرهای دارای شیار عریض تر تغییر مکان و مقاومت نهایی بیشتری از خود نشان می دهند، به گونه ای که برای تیر دارای عریض ترین شیار در مقایسه با تیر کنترل، مقدار افزایش ظرفیت باربری ۸/۲۵٪ و مقدار افزایش تغییر مکان و سط دهانه ۱/۸۷٪ است، در حالی که در تیر دارای باریک ترین شیار در مقایسه با تیر کنترل، مقدار افزایش طرفیت باربری ۵/۵٪ و مقدار کاهش تغییر مکان ۸/۱۰ است. نتایج دارای باریک ترین شیار در مقایسه با تیر کنترل، مقدار افزایش عرض شیار کمتر از ۳ برابر عرض نوار باشد، تأیید می کند. [– Pa عرض شیار کمتر از ۳ برابر عرض نوار باشد، تأیید می کند. آ

٦. نتيجه گيري

۱- برای تیرهای تقویت شده با CFRP، مقایسه نمودارهای بار تغییر شکل مدلهای عددی و تحلیلی و آزمایشگاهی، نشان میدهد
 که در ناحیه ارتجاعی و ارتجاعی – خمیری به خوبی با یکدیگر و
 با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند، اما در ناحیه خمیری، نتایج





ابوالفضل عربزاده، رامی عبدالصمد، فرهاد دانشجو

اختلاف در بار نهایی ٪	اختلاف در افت ٪	بار نهایی (kN)	تغييرمكان (mm)	تير
-	-	V91/TT	711/V	CB-Ansys
10/0	٣٥	912/7	۲٨٥/٨	NSM-Ansys
۲٥/٩	AV/N	997/7	347/1	NSM-WG
٤/٥	-۲۸/۱	ATV	107/3	NSM-NG

جدول ۹. مقایسه نتایج مدلهای عددی تیرهای تقویت شده با NSM با شیارهای با ابعاد مختلف



شکل ۲۷. نمودار بار تغییر مکان وسط دهانه تیرهای تقویت شده به روش NSM با شیارهای با ابعاد مختلف

حاصل از مدل عددی در مقایسه با نتایج مدل تحلیلی با دقت بیشتری با نتایج حاصل از آزمایش تطبیق دارد. علت این امر ممکن است این باشد که در حل تحلیلی، فرض شده است مد جداشدگی در مقطع مقاوم شده رخ نمیدهد و یا دسترسی نداشتن به اطلاعات کافی درباره مدول ارتجاعی، بعد از تسلیم فولاد باشد. ۲- با ثابت نگهداشتن مقدار CFRP استفاده شده، بار نهایی مربوط به تیر تقویت شده با روش NSM بیشتر از بار نهایی مربوط به تیر تقویت شده با روش EB بوده است که میزان افزایش نسبت به تیر کنترل ۱۰/۵٪ است، در حالی که در تیر تقویت شده با روش EB به ۱۰/۵٪ رسیده است، این امر به دلیل دارا بودن سطح تماس بیشتر ورق CFRP در روش NSM است.

۳- افزودن CFRP تا حدودی، ۳۰٪ مقاومت نهایی را افزایش میدهد، پس از آن، نه تنها مقاومت افزایش نیافته بلکه به دلیل ترد شدن بیش از حد، شکست زود رس به وجود خواهد آمد که این شکست مورد علاقه طراحان و مهندسین محاسب سازهای نیست. ٤- در صورت ثابت نگهداشتن مقدار CFRP و تغییر آرایش آن

به صورت متقارن، تغییر قابل توجهی در افزایش باربری تیر به وجود نمی آید، و این افزایش باربری نسبت به تیر کنترل حدود ۰/۰٪ است، اما تیر تقویت شده به صورت نامتقارن زودتر از سایر تیرها تسلیم شده و افزایش باربری نسبت به تیر کنترل حدود ۹٪ است.

 ٥- مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده با ورق CFRP وابسته به پیش بارگذاری نیست.

۲- با رعایت مقررات، افزایش تعداد شیارهای مقاومسازی بر ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده افزوده می شود و این افزایش باربری نسبت به تیر کنترل حدود ۱۵/۵٪ تا ۳۷/۶٪ است.

۷- به دلیل آنکه با افزایش ابعاد شیار، تنش برشی در لایه چسب و تنش کششی در ورق CFRP کاسته می شود، تیرهای دارای شیار عریض تر، تغییر مکان و مقاومت نهایی بیشتری از خود نشان می دهند به گونهای که برای تیر دارای عریض ترین شیار در مقایسه با تیر کنترل، مقدار افزایش ظرفیت باربری حدود ۲۲٪ و مقدار افزایش تغییر مکان وسط دهانه حدود ۸۷٪ است. در حالی که تیر

۹. مراجع

- Aidoo, J., Harries, K. and Petrou, M. (2006) "Fullscale experimental investigation of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials", Journal of Bridge Engineering, ASCE 11(3), pp. 350-358.

- Ansys (2009) "Ansys User's Manual Release 12.0" Ansys, Inc.

- American Concrete Institute Technical Committee 440, (20020) "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI 440.2R-02.

- American Concrete Institute, ACI (2005) "Building code requirements for structural concrete and commentary", ACI 318M-05.

- Bangash, M.Y. H. (1989) "Concrete and Concrete structures: Numerical modeling and applications", Elsevier Science Publishers Ltd, London, England.

- Benmorkrane, B., Chaallal, O. and Masmoudi, R. (1996) "Flexural response of concrete beam reinforced with FRP reinforceing bars", ACI Structural

دارای باریکترین شیار در مقایسه با تیر کنترل، مقدار افزایش ظرفیت باربری ٪٤/٥ و مقدار کاهش تغییرمکان حدود ٪۲۸ است.

۷. پی نوشتها

1- Externally Bonded
 2- Near Surface Mounted
 3- Smeared Crack

۸. علايم و نشانهها a: ارتفاع بلوک فشاری بتن FRP سطح مقطع مصالح: Afrn A: سطح مقطع کل آرماتور کششی c: محل تار خنثی d: فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح فولاد کششی .fRP فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز ورق id E: مدول الاستىسىتە ىتن FRP: مدول الاستيسيته مصالح E_{frp} .E: مدول الاستىسىتە فولاد E. مدول مرحله سخت شدگی فولاد FRP: تنش کششی در مصالح frp f: مقاومت کششی بتن f: تنش کششی در فولاد کششی f: تنش فشاری در فولاد فشاری f; مقاومت جارى شدن فولاد h: ارتفاع کل مقطع M: ممان ناشی از بار اعمال شده _M: ممان لحظهي ترک خوردگي M: لنگر خمشی مقاوم اسمی .M: لنگر خمشی مقاوم نهایی Mٍ: ممان تسليم تير x: فاصله تار خنثی از دورترین تار فشاری B: نسبت عمق مستطيل تنش معادل به عمق تير خنثي B: ضريب انتقال برش

- Ross, A., Jerome, M. and Tedesco, J. (1999) "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates", ACI Srtructural Journal, Mar-Apr, pp. 212-220.

- Pendhari, S., Kant, T. and Desai, Y.M. (2008) "Application of polymer composites in civil construction: A general review", Composite Structures, 84, pp. 114–124.

- Said, H. (2010) Deflection prediction for FRPstrengthened concrete beams", ASCE J. Composite Cpnstruction 14(2), pp. 244–248.

- Smith, S.T. and Teng, J. G. (2002) "FRP-strengthened RC beams. I. Review of debonding strength models", Engineering Structures, 24, pp. 385–395.

- Teng, J. G., De Lorenzis, L., Wang, B., Rong, L., Wong, T.N. and Lam, L. (2006) "Debonding failures of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP strips", J. Composite Construction, ASCE 10(2), pp. 92–105.

- William, K. J. and Warnke, E. P. (1975) "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete", Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, ISMES, Bergamo, Italy. Journal, Jan-Feb, pp. 46-55.

- Branson, D.E. (1965) "Instantaneous and timedependent deflections of simple and continuous reinforced concrete beams", Alabama Highway Dept., Bureau of Public Roads HPR Rep. No. 7, Dept. of Civil Engineering and Auburn Research Foundation, Auburn Univ., Part 1.

- Desayi, P. and Krishnan, S.(1964) "Equation for the stress-strain curve of concrete," ACI Materials Journal, Vol. 61, pp. 345–350.

- Fyfe Company (2000) "LLC Fyfe, Tyfo systems product literature", Fyfe Company, LLC, San Diego.

- Gee-Joo, H., Yun-Yong, K. and Chang-Geun, C. (2008) "Groove and embedding techniques using CFRP trapezoidal bars for strengthening of concrete structures", Engineering Structures, 30, pp.1067–1078.

- Kachlakev, D. (2001) "Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates-final Report", Oregon Department of Transportation, [1] Ryall M.J., "Bridge Management", Butterworth-Heinemamann.

- Kang, J. Y., Park, Y. H., Park J. S., You, Y. J. and Jung, W. T.(2005) "Analytical evaluation of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP laminates", 7th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-7, Kansas City, MO, USA, pp.2005: 779-794

- Oehlers, D. J., Liu, I. and Seracino, R. (2007) "A generic design approach for EB and NSM longitudinally plated RC beams", Construction and Building Materials, 21, pp. 697–708.

- Parretti, R. and Nanni, A.(2004) "Strengthening of RC members using near surface mounted FRP composites: design overview", Advanced Structural Engineering, 7(6), pp. 469–83.

- Picard, A., Massicotte, B. and Boucher, E. (1995) "Strengthening of reinforced concrete beam with composite materials: Theoretical study", Composite Structures, Vol 33, pp. 63-75.