

مدلسازی تیرهای بتنی تقویت شده بوسیله ورقهای FRP کامپوزیت تحت اثر بارگذاری دینامیکی

امیر اردلان موسوی خندان، گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

سهیل محمدی*، گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

*تلفن: ۶۱۱۲۲۵۸، نمابر: ۶۴۰۳۸۰۸، پست الکترونیکی: smoham@ut.ac.ir

چکیده

این مقاله یک روش ترکیبی اجزاء محدود/اجزاء مجزا (combined finite element /discrete element) را برای بررسی رفتار خرابی تیرهای بتنی تقویت شده به منظور تحمل خمش بوسیله ورقهای FRP کامپوزیت تحت بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار می دهد، و نتایج حاصل از یک تحقیق آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از مدلسازی به منظور تائید روش، مورد مقایسه قرار می دهد. پیچیده بودن اندرکنش المانهای مختلف تماس در قالب روش المانهای مجزا، و در نظر گرفتن کلیه معیارهای خرابی، در بتن، جدایی لایه های FRP کامپوزیت از بتن وغیره، چنین تحلیلی را برای بررسی مکانیزم پیچیده خرابی کلی لازم می سازد. خرابی ناشی از جدایی در لایه چسبنده بین بتن و ورق FRP کامپوزیت مبتنی بر مفاهیم مکانیک شکست، نظریه مومسانی و الگورتم های مکانیک تماس می باشد. همچنین، استفاده از تکنیکهای ترکیبی المانهای محدود/المانهای مجزا امکان بررسی رفتار سازه را پس از ترک خوردگی شامل اندر کنش وجوه ترک بین لایه ای (نرمال و برشی) فراهم می سازد.

کلید واژه ها: کامپوزیت، بتن، مدلسازی، لایه چسبنده، المان

۱- مقدمه

از اواسط دهه شصت، سازه های بتنی موجود در اروپا، آفریقای جنوبی، ایالات متحده و ژاپن، بوسیله چسباندن ورقهای فولادی به وجوه پایینی وکناری تیرها و دالها تقویت شدند. Meier [۱] و Kim و Meier [۲] اولین مطالعات عملی در زمینه استفاده از CFRP (carbon fiber- reinforced polymer) جهت تقویت تیرهای پلها، به خصوص پلهای کابلی، معلق و همچنین موارد دیگری که نیاز به جایگزینی ورقهای تقویتی فولادی بوسیله پانلهای کامپوزیت بود آغاز کردند. اولین استفاده واقعی از مواد کامپوزیت برای افزایش ظرفیت باربری یک ساختمان بتنی به [۳] kaiser نسبت داده شده است. مطالعات [۴-۱۰] نشان داده است که تقویت تیرهای بتنی بوسیله پانلهای CFRP چسبانده شده با اپوکسی یک راه عملی برای افزایش ظرفیت باربری تیرها و پلها است و انتخاب یک اپوکسی مناسب برای چسباندن پانلهای CFRP به تیرها، جهت بهبود ظرفیت باربری تیریک امر ضروری میباشد. به هر حال نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی الکترو شیمیایی، شکل پذیری و

کارایی خوب جهت استفاده در مناطق با دسترسی سخت ، و مقاومت خستگی عالی ، مزایایی هستند که باعث شده اند در بسیاری موارد که مواد معمولی از کارایی مناسب برخوردار نمی باشند ، FRP بتواند یکی از انتخابهای اصلی باشد.

این مقاله به ارائه یک راه حل عددی مناسب برای مدل سازی گسیختگی در اثر جدایی ناشی از تمرکز تنش بین تیر بتنی و ورق CFRP در محیط سه بعدی با در نظر گرفتن اثر تمام مدهای گسیختگی موثر در این جدایی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی موجود میپردازد. روش پیشنهادی برای مدلسازی رفتار سه بعدی چنین سازه هایی تحت اثر بارگذاری دینامیکی کاملاً جدید بوده و نمونه آن در نشریات فنی مشاهده نگردیده است . اگر چه تحلیلهای اجزاء محدود بسیاری روی تیرهای بتنی مسلح تقویت شده با ورق [۱۱-۱۶] انجام شده است، اما بدلیل پیچیدگی مساله موفقیت کمی در مدلسازی گسیختگی های ناشی از جدایی ورق بدست آمده است .

۲- مبانی مدلسازی

بررسی مشاهدات تجربی از رفتار سازه های بتنی تقویت شده بوسیله FRP سه نوع رفتار شکست و گسیختگی را نشان داده اند [۱۷] : (۱) ترک خوردگی در بتن ، (۲) جدایی در وجه تماس بین بتن و ورق FRP ، (۳) گسیختگی FRP.

۲-۱- رفتار بتن

در این تحلیل، در مدلسازی سه بعدی به دلیل پیچیدگی زیاد مسأله فقط ناحیه فشاری تیر بتنی بوسیله مدل پلاستیسیته Drucker-Prager مدل سازی شده است [۱۸]. اما به منظور مدلسازی در محیط دو بعدی از مدل شکست رانکین برای مدلسازی بتن با بهره گیری از المانهای مجزا و مبانی مکانیک تماس و نظریه مومسانی استفاده شده است.

۲-۲- رفتار CFRP

رفتار CFRP تا رسیدن به مقاومت کششی فایبرها بصورت الاستیک خطی و اورتوتروپ فرض شده است ، بطوریکه در جهت عمود بر فایبرها مقاومت کششی ورق کمتر می باشد. در نقطه گسیختگی فایبرهای کربن پاره می شوند و گسیختگی بصورت ناگهانی اتفاق می افتد. در واقع ، مقاومت کششی ورقهای CFRP که فایبرها در آن در یک جهت قرار گرفته اند در جهت فایبرها بقدری زیاد است که پاره شدن آنها به ندرت اتفاق می افتد و عملاً در آزمایشهای انجام شده چنین موردی مشاهده نشد. بنابراین برای CFRP یک مدل الاستیک خطی اورتوتروپ بکار گرفته شد. [۱۵]

۲-۳- مدلسازی رفتار لایه چسبنده بین ورقهای FRP و بتن

جدایی در ناحیه ای که ورق FRP به بتن چسبیده شده است یکی از مهمترین رفتارهای گسیختگی در تیرهای بتنی تقویت شده بوسیله FRP میباشد. در عمل دو نوع جدایی مختلف در آزمایشها مشاهده شده است . نوع اول جدایی در لایه چسبنده ، میتواند به عنوان مد II گسیختگی فرض شود که در این مد تنش برشی در لایه چسبنده بسیار غالب تر از تنش نرمال است . نوع دوم مربوط به ریزترکهای قطری بتن در مجاورت لایه چسبنده هستند.

در این تحلیل تمرکز بیشتری بر روی مد جدایی اول قرار داده شده است که به این منظور از مدل پیشنهادی سه بعدی Hashin [۱۹] برای پیش بینی شروع جدایی بین لایه ای بتن و FRP استفاده شده است. مدل اولیه بر پایه پلاستیسیته مستقل از زمان به همراه نرم شدگی بنا نهاده شده است. سطح تسلیم نیز از بازنویسی معیار گسیختگی حاصل شده است.

با فرض کرنشهای کوچک ولی تغییر شکل‌های بزرگ، نرخ تانسور کرنش گرین-لاگرانژ شامل یک بخش الاستیک و یک بخش غیر الاستیک است. کرنشهای غیر الاستیک از یک قانون جریان مشترک تبعیت میکنند. مدل ماده مستقل از زمان بصورت زیر خلاصه شده است:

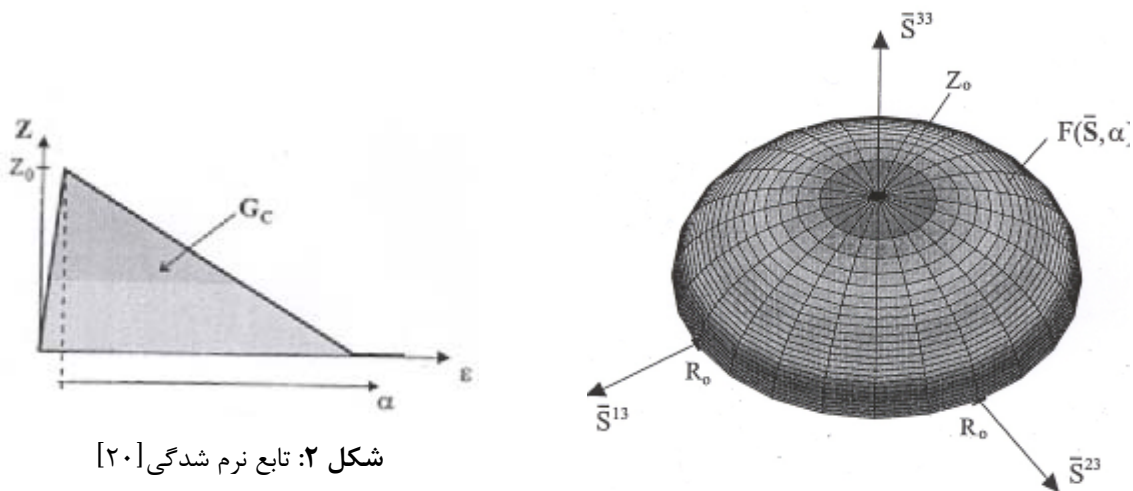
$$\begin{aligned}\dot{\bar{E}} &= \dot{\bar{E}}^{e1} + \dot{\bar{E}}^{in} \\ \dot{\bar{E}}^{e1} &= \bar{C} \dot{\bar{S}} \\ \dot{\bar{E}}^{in} &= \dot{\bar{E}}^{p1} = \lambda \frac{\delta F}{\delta \bar{S}}\end{aligned}\quad (1)$$

که در آن، \bar{C} تانسور الاستیسیته برای رفتار ایزوتروپیک صفحه ای ماده است. \bar{S} تانسور تنش، ضریب غیر الاستیک و F تابع تسلیم میباشد که در زیر تعریف شده است. مدل جدایی Hashin تابعی از تنشهای بین لایه ای \bar{S}^{23} ، \bar{S}^{13} و \bar{S}^{33} ، مقاومت کششی در جهت ضخامت Z_0 و مقاومت برشی R_0 لایه است.

$$\frac{(\bar{S}^{33})^2}{Z_0^2} + \frac{(\bar{S}^{13})^2 + (\bar{S}^{23})^2}{R_0^2} \leq 1 \quad (2)$$

نمایش هندسی معیار در شکل (1) نشان داده شده است. [۲۰] سطح تسلیم $F(\bar{S}, \alpha)$ بوسیله باز نویسی معیار جدایی فوق حاصل شده است.

$$F(\bar{S}, \alpha) = g(\bar{S}) - Z(\alpha) \leq 0 \quad (3)$$



شکل ۲: تابع نرم شدگی [۲۰]

شکل ۱: معیار جدایی هاشین [۲۰]

$$g(\bar{S}) = \sqrt{\bar{S}^T \bar{A} \bar{S}} \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{Z_0}{R_0}\right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{Z_0}{R_0}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$z(\alpha)$ یک تابع نرم شدگی خطی بصورت مقابل است:

$$z(\alpha) = z_0(1 - \mu\alpha) \quad (6)$$

که در شکل (۲) نشان داده شده است. متغیر α می تواند به عنوان کرنش معادل غیر الاستیک فرض شود. پارامتر μ شیب تابع نرم شدگی $z(\alpha)$ را نشان میدهد و یک خاصیت ماده است و میتواند از نرخ رهایی انرژی بحرانی G_c ، مقاومت کششی Z_0 و پارامتری که معرف طولی از المان است، حاصل گردد.

$$\mu \approx \frac{Z_0 \times l}{2G_c} \quad (7)$$

نرخ تغییر متغیر α بوسیله رابطه مقابل تعریف می شود:

$$(\lambda) \dot{\alpha} = -\dot{\lambda} \frac{\delta F}{\delta Z}$$

وگرادیان تابع تسلیم بصورت زیر میباشد:

$$\frac{\delta F}{\delta \bar{S}} = \frac{1}{g(\bar{S})} A \bar{S} = N, \quad \frac{\delta F}{\delta Z} = -1 \quad (9)$$

با جایگذاری معادلات بالا در معادله (۱) تا (۳) و استفاده از الگوریتم انتگرالگیری برگشتی اولر خواهیم داشت:

$$\bar{E}_{n+1} = \bar{C}^{01} \bar{S}_{n+1} + \bar{E}_n^{p1} + \frac{\lambda}{g(\bar{S}_{n+1})} A \bar{S}_{n+1} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{n+1} = \left[\bar{C}^{-1} + \frac{\lambda}{z(\alpha_{n+1})} A \right] \left[\bar{E}_{n+1} - \bar{E}_n^{p1} \right] \quad (11)$$

$$\bar{S}_{n+1} = P \bar{E}^{tr} \quad (12)$$

اندیس n مربوط به مقادیر در گام زمانی t_n و اندیس $n+1$ مربوط به مقادیر در گام زمانی t_{n+1} است. دوباره پارامتر α بوسیله یک انتگرال گیری برگشتی اولر بدست می آید.

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \lambda \quad (13)$$

پس از انجام مقداری محاسبات جبری، ماتریس سختی الاستوپلاستیک بصورت زیر بدست می آید.

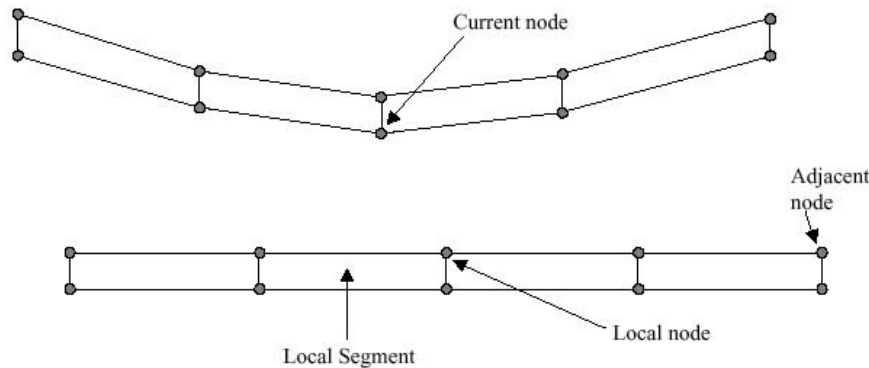
$$\bar{D} = P - \frac{PN(PN)^T}{N^T PN + H} \quad (14)$$

$$H = \frac{Z'}{1 - \lambda \frac{z'}{z}} \quad (15)$$

که در آن $Z' = -\mu$ است.

۳) محاسبه جابجاییهای نسبی قائم و مماسی بر اساس الگوریتمهای مکانیک تماس

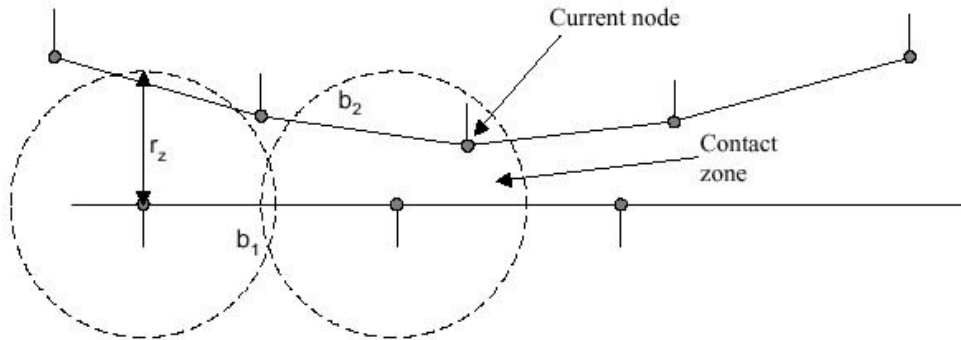
احتمال تماس گرههای برخوردی با رویه چیره نخست بصورت کلی (global search) با روندهایی چون «آزمون ردیابی ناحیه‌ای برخورد» (zonal contact detection test) و یا «ساختار درختی دودویی» (binary tree structure) بررسی



شکل ۳: تعریف واژگان پایه در مکانیک تماس محاسباتی

شده، قطعه برخوردی متناظر با گره کنونی با جستجوی موضعی تعیین می‌گردد. در روش آزمون ردیابی ناحیه‌ای برخورد که نمونه‌ای از آن برای حالت دو بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است، بررسی می‌گردد که گره کنونی در محدوده تماس کدامیک از گره‌های همسایه قرار دارد. محدوده تماس معمولاً بصورت دایره یا کره‌ای به مرکز گره همسایه و شعاع دلخواه r_z می‌باشد. توضیحات بیشتر درباره این روش جستجو در مرجع [۲۲] آمده است. پس از تعیین گره موضعی M متناظر با گره کنونی S ، همانگونه که در شکل ۴-۷ دیده می‌شود، در حالت سه بعدی چند قطعه یا المان همسایه پتانسیل تماس با گره S را دارا

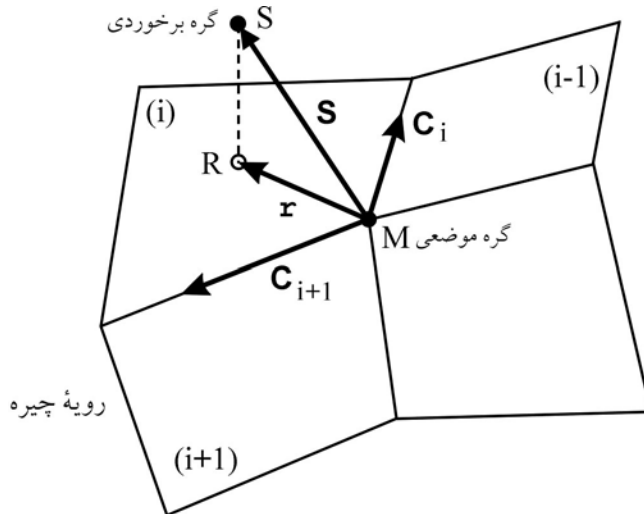
می‌باشند. برای آزمودن المان i -ام، نخست بردارهای C_i ، C_{i+1} در راستای اضلاع مشترک در گره M از این المان و سپس بردار r که گره M را به نقطه R ، تصویر گره S بر این المان، می‌پیوندد تعریف شده، رابطه زیر بکار می‌رود [۲۳]:



شکل ۴: نمونه‌ای از آزمون ردیابی ناحیه‌ای برخورد در حالت دوبعدی

$$(C_i \times r) \cdot (C_i \times C_{i+1}) > 0, (C_i \times r) \cdot (r \times C_{i+1}) > 0 \quad (16)$$

هرگاه رابطه بالا برقرار باشد، المان i -ام قطعه برخوردی خواهد بود. لازم به یادآوریست بردار r از رابطه زیر بدست می‌آید:



شکل ۵: یافتن قطعه برخوردی متناظر با گره کنونی پس از تعیین گره موضعی

$$r = S - (S \cdot n)n \quad \text{و} \quad n = \frac{C_i \times C_{i+1}}{|C_i \times C_{i+1}|} \quad (17)$$

با تعیین قطعه برخوردی متناظر با گره کنونی، جابجاییهای نسبی قائم و مماسی با بهره‌گیری از جبر بردارها محاسبه می‌شوند. در ادامه برای آشنایی بیشتر با روند محاسبه، نخست حالت ساده‌تر دو بعدی و سپس حالت سه بعدی تماس گره کنونی با قطعه

برخوردی معرفی می‌گردد.

محاسبه جابجاییهای نسبی در حالت سه بعدی: در این حالت، قطعه برخوردی بصورت روبه‌ای با $nnode$ می‌باشد. برای محاسبه جابجاییهای نسبی، نخست لازمست دستگاه مختصات بدون بعد (ξ, η) تعریف شده، مختصات هر نقطه روی قطعه برخوردی چون \mathbf{r} بامجموعه‌ای از توابع شکلی مناسب برحسب مختصات گره‌های آن تعیین می‌گردد:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^{nnode} h_i(\xi, \eta) \mathbf{x}_i \\ &= \mathbf{h}^T \mathbf{a}\end{aligned}\quad (18)$$

در رابطه بالا \mathbf{h} بردار در بردارنده توابع شکلی می‌باشد. شکل ۶ نمونه‌هایی از قطعه‌های برخوردی سه و چهار گرهی را همراه با نقطه برخوردی S و نیز دستگاه مختصات بدون بعد (ξ, η) نشان می‌دهد [۲۲]. بردار توابع شکل برای قطعه چهار گرهی بصورت رابطه ۱۹ و ۲۰ می‌باشد و برای قطعه سه گرهی به شکل رابطه ۲۱ و ۲۲ تعریف می‌شود.

هر چند قطعه سه گرهی پس از تغییر شکل یافتن همواره صفحه باقی می‌ماند، در حالت کلی قطعه‌های با تعداد گره بیشتر دچار

$$\mathbf{h} = [h_1, h_2, h_3, h_4]^T \quad (19)$$

$$h_1 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \quad , \quad h_2 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \quad (20)$$

$$h_3 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad , \quad h_4 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)$$

$$\mathbf{h} = [h_1, h_2, h_3]^T \quad (21)$$

$$h_1 = \xi \quad , \quad h_2 = \eta \quad , \quad h_3 = 1 - \xi - \eta \quad (22)$$

تابیدگی شده، شکل صفحه‌ای خود را از دست می‌دهند. برای نمونه، شکل ۷ نمونه‌ای از قطعه برخوردی چهار گرهی از یک المان حجمی را نشان می‌دهد که دچار تابیدگی شده است. از اینرو، بهترین معیار برای محاسبه جابجایی نسبی قائم عبارتست از کمترین فاصله میان گره برخوردی تا قطعه برخوردی متناظر. بدین منظور، بردار \mathbf{x}_{rs} که نزدیکترین نقطه قطعه موضعی را به گره برخوردی می‌پیوندد، در نظر گرفته شده (شکل ۸):

$$\mathbf{x}_{rs} = \mathbf{x}_s - \mathbf{r}(\xi, \eta) \quad (23)$$

تابع $A_{cp}(\xi, \eta)$ بصورت:

$$A_{cp}(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \mathbf{x}_{rs}^T \mathbf{x}_{rs} \quad (24)$$

برای یافتن (ξ_c, η_c) مختصات نزدیکترین نقطه (closest point) به گره برخوردی کمینه می‌گردد:

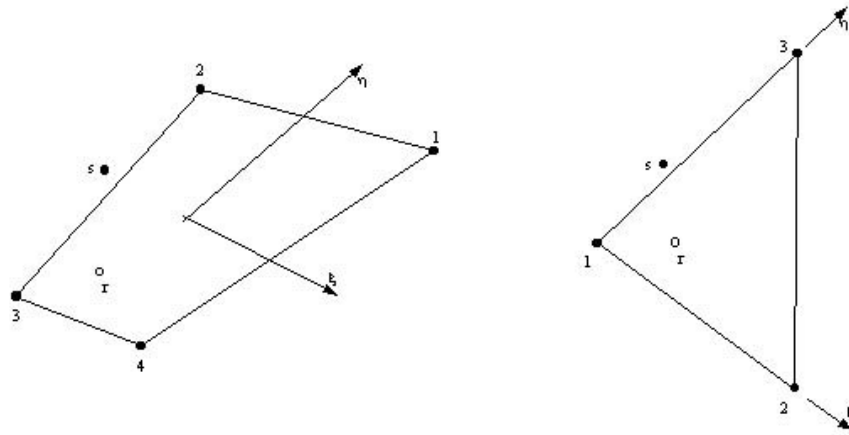
$$\nabla A_{cp}(\xi, \eta) = \mathbf{0} \quad (25)$$

روش حل دستگاه معادلات دو مجهولی (۲۵) در مرجع [۲۲] آمده است. با تعیین مختصات نزدیکترین نقطه، اندازه جابجایی نسبی قائم از رابطه زیر بدست می‌آید:

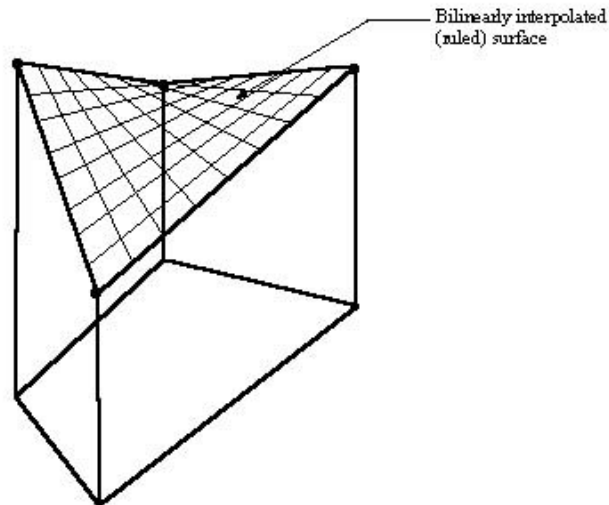
$$g_n = \sqrt{2A_{cp}(\xi_C, \eta_C)} \quad (26)$$

برای محاسبه بردار جابجایی مماسی، به بردارهای \mathbf{x}_s^0 ، \mathbf{a}_0 نیز که به ترتیب عبارتند از مختصات گره برخوردی و گره‌های قطعه برخوردی در وضعیت اولیه نیاز می‌باشد. پس از یافتن (ξ_C, η_C) مختصات نزدیکترین نقطه قطعه به گره کنونی (شکل ۹ الف))، موقعیت این نقطه در وضعیت اولیه تعیین شده (شکل ۹ ب)):

$$\mathbf{r}_C^0 = \mathbf{h}^T(\xi_C, \eta_C) \mathbf{a}_0 \quad (27)$$



شکل ۶: قطعه‌های برخوردی سه و چهار گرهی در فضای سه بعدی کلی. در این شکل S گره برخوردی و r نزدیکترین نقطه قطعه به گره برخوردی می‌باشد.



شکل ۷: نمونه‌ای از رویه چهار گرهی که بصورت درونیایی دو خطی مشخص می‌گردد.

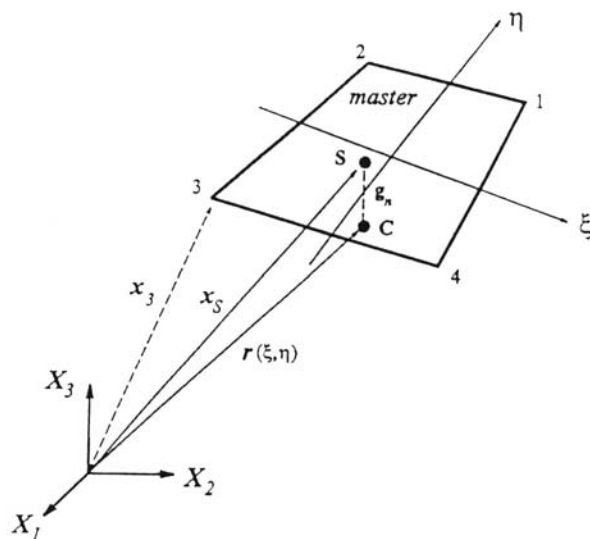
بردار جابجایی نسبی مماسی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathbf{g}_T = \mathbf{r}_C^0 - \mathbf{x}_s^0 \quad (28)$$

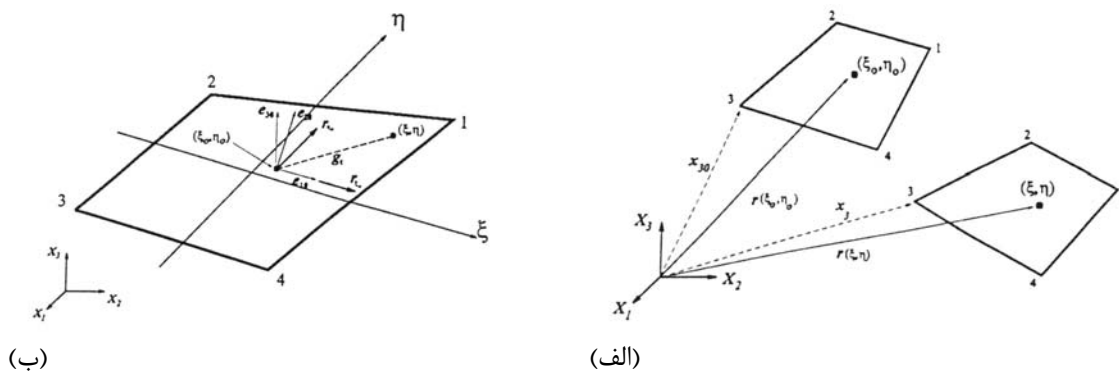
۴- کنترل الگوریتم و مدل سازی های عددی

۴-۱- تشریح کامل مسأله و مشاهدات تجربی

به منظور بررسی صحت جوابهای حاصل از الگوریتم فوق یک تست آزمایشگاهی که شامل بارگذاری دینامیکی روی تیرهای بتنی تقویت شده بوسیله CFRP بوده است [۱۵]، برای مدل سازی عددی انتخاب گردیده است. اندازه تیر با تکیه گاه مفصلی ساده



شکل ۸: موقعیت نزدیکترین نقطه قطعه موضعی به گره برخوردی

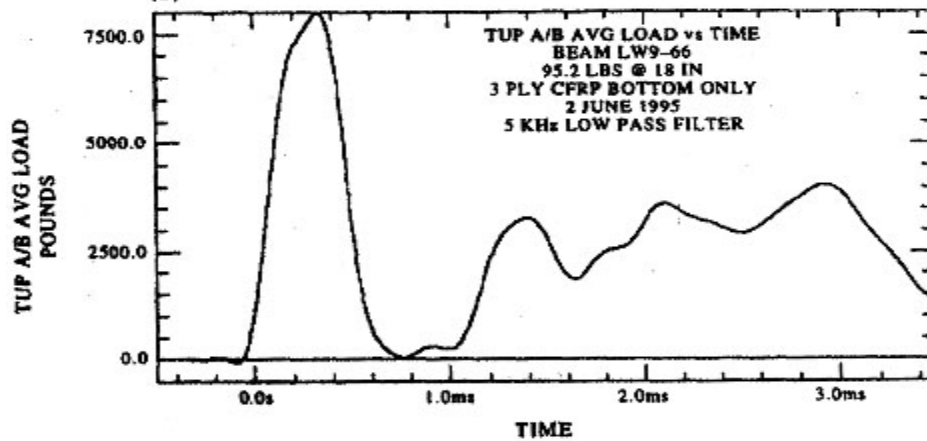


شکل ۹: مراحل محاسبه بردار جابجایی نسبی مماسی: (الف) مختصات تصویر گره برخوردی در وضعیت اولیه و کنونی (ب) موقعیت نزدیکترین نقطه به گره کنونی در وضعیت اولیه

استفاده شده در این آزمایش 3x3x30in (7.62x7.62x76.2cm) و بدون استفاده از هرگونه فولاد کششی بوده است، در عوض تیرها بوسیله CFRP، تقویت خارجی شدند. تمام پانلهای CFRP بصورت پانلهای با اندازه (7.62x76.2cm) و

بصورت سه لایه ای بودند و ماده چسبنده استفاده شده thixotropic اصلاح شده با دو بخش epoxy بود. برای تعیین رفتار دینامیکی تیرهای تقویت شده با پانلهای CFRP، از یک سری آزمایشهای drop-weight بصورت تک نقطه ای استفاده شد. منحنی بار گذاری دینامیکی اعمال شده، از یک سری سیگنال خروجی ولتاژ-زمان مربوط به کرنش سنج های با مقاومت الکتریکی بدست آمد که بصورت شکل ۱۳ می باشد.

همچنین خصوصیات بتن و ورقهای CFRP استفاده شده در این آزمایش در جدول (۱) و (۲) آمده است.



شکل ۱۰: منحنی بار-زمان استفاده شده برای مدلسازی تیر بتنی، با سه لایه CFRP در زیر آن [۱۵].

سر انجام مشاهدات بعمل آمده از این آزمایش نشان داد گسیختگی تیرهای تقویت شده با ورق کششی CFRP بصورت گسیختگی خمشی بتن در تقریباً "وسط دهانه تیر و به دنبال آن جدایی و گسیختگی ورقهای CFRP بود. [۱۵]

جدول ۲. خواص ماده ورق CFRP

2206.9Mpa	مقاومت کششی 0°
137.9Gpa	مدول کششی 0°
60%	حجم فایبر
0.4953mm	ضخامت ورق سه لایه عمل آمده
1577.25kg/m ³	ρ (جرم حجمی)

جدول ۱. پارامترهای مدل بتن

2.4x10 ⁴ Mpa	E_0 (مدول مماسی ابتدایی)
0.2	ν (ضریب پواسون)
4.35 Mpa	f_t (مقاومت کششی تک محوری)
46.4 Mpa	f_c (مقاومت فشاری حداکثر تک محوری)
39.5 Mpa	σ_{II} (مقاومت فشاری نهایی تک محوری)
1892.7 kg/m ³	ρ (جرم حجمی)

۴-۲- مدلسازی عددی و بررسی نتایج در محیط سه بعدی

با توجه به مقارن بودن هندسه و وضعیت بارگذاری نیمی از تیر با شرایط مرزی مناسب مطابق شکل (۴) مدلسازی شده است. برای مدلسازی ورق FRP و بتن از المانهای ۸ گرهی مکعبی سه بعدی استفاده شد. برای تیر بتنی مجموعاً از ۱۲۰۰ المان و برای ورق CFRP نیز از ۶۳۰ المان مطابق شکل ۱۴ استفاده شد. همچنین برای مدلسازی لایه چسبنده از الگوریتم شرح داده شده در قالب روش اجزاء مجزا استفاده شد.

مشخصات بتن و FRP استفاده شده در مدلسازی در جداول (۱) و (۲) ذکر گردیده است برای چسبنده اپوکسی، اطلاعات محدودی از آزمایشها در دسترس است. خواص مشخصه، مانند نرخ رهایی انرژی شکست در لایه تماس بین بتن و FRP در دو مد نرمال و مماسی هر دو 0.5 N/mm و مقاومت چسبندگی نهایی در هر دو مد ۴ Mpa در نظر گرفته شده اند.

بطوریکه در شکل (۵) مشاهده میشود جدایی ورق از زیر تیر بتنی تقریباً در ۴۷۰ μs و از وسط تیر آغاز شد و به سرعت به سمت تکیه گاه گسترش یافت بطوریکه در ۷۵۰ μs تقریباً یک سوم طول ورق از زیر تیر جدا شده بود. همانطور که از مشاهدات تجربی بر می آید گسیختگی تیر در ۷۳۰ μs اتفاق افتاده است [۱۵]، که تطابق خوبی را با نتایج مدلسازی ناشی از جدایی ورق نشان میدهد. بطوری که در این گام زمانی مشاهده میشود، بتن در وسط تیر نیز به حد پلاستیک رسیده و تنش اصلی حداکثر در وسط تیر از مقاومت کششی بتن فراتر رفته است که نشان دهنده وقوع ترکهای خمشی در وسط تیر است. با اتفاق افتادن جدایی ورقها تا تقریباً یک سوم طول آنها در حدود ۷۵۰ μs به همراه وقوع ترکهای خمشی، میتوان یک برداشت منطقی از گسیختگی تیر داشت که در تطابق خوبی با نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش میباشد.

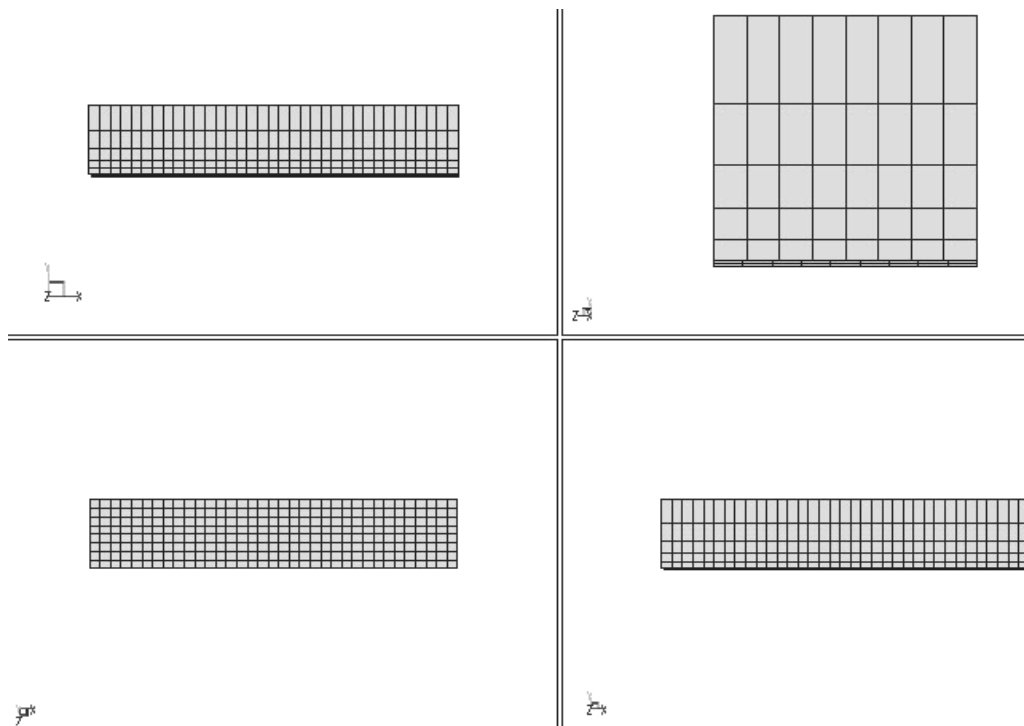
شکل (۱۸) تغییر مکان وسط دهانه تیر را در زمانهای مختلف تحلیل دینامیکی نسبت به تحلیلهای موجود مقایسه می نماید که نقاط دایره ای شکل نشان داده شده نتایج حاصل از مدلسازی انجام شده در این تحقیق است. با توجه به کمتر بودن تغییر مکانهای بدست آمده نسبت به تغییر مکانهای موجود میتوان نتیجه گرفت که تیر مدلسازی شده در این تحقیق دارای سختی بیشتری نسبت به تیر واقعی می باشد، که نتیجه رفتار کشسان بتن در محدوده کششی است. شکلهای (۱۵) و (۱۶) نیز محدوده جدادگی لایه FRP از بتن را در زمان های ۴۷۰ μs و ۷۵۰ μs نشان میدهند، که قسمت نشان داده شده با رنگ خاکستری روشن نمایانگر بخش جدا شده میباشد. همچنین شکل (۱۷) کنتور تنش اصلی حداکثر را در زمان ۷۵۰ μs نشان می دهد.

۴-۳- مدلسازی عددی و بررسی نتایج در محیط دو بعدی

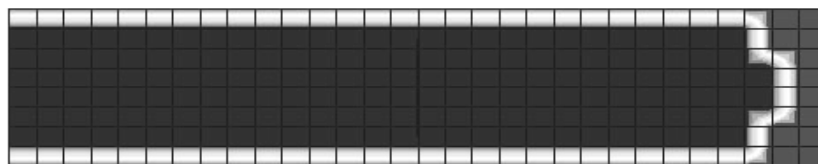
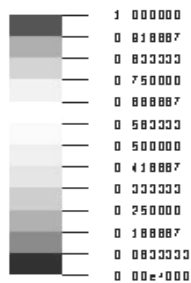
این مدلسازی در محیط دو بعدی صورت گرفته است. مدل مورد بررسی در این تحلیل همان تیر بتنی مدلسازی شده در بخش ۴-۲ بود. مشخصات بتن ورق کامپوزیت و لایه چسبنده در این مدل دقیقاً همانند مدل قبلی بود. آنالیز در یک محیط تنش دو بعدی صورت گرفت. خصوصیات مواد چسبنده از جمله مدول الاستیسیته، انرژی رهایی شکست و مقاومت چسبندگی مطابق بخش ۴-۲ در نظر گرفته شد. همچنین باز هم با توجه به تقارن هندسی تیر و وضعیت بارگذاری نیمی از تیر مدلسازی میشود. برای المان بندی تیر بتنی و ورق کامپوزیت از المانهای مثلثی استفاده شد. برای المانهای تیر بتنی از المانهایی با ابعاد متفاوت استفاده شد، بطوریکه المانهای مجاور لایه کامپوزیت دارای ابعاد ۰.۰۰۱ متر و المانهای فوقانی تیر دارای ابعاد ۰.۰۱ متر بودند و برای المانهای ورق کامپوزیت از المانهای به ابعاد ۰.۰۰۰۲۵ متر استفاده شد. نحوه المانهای بندی تیر در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

در این بخش باز هم رفتار ورق کامپوزیت در فاز الاستیک مورد بررسی قرار گرفت و برای رفتار ترک خوردگی بتن از مدل Rankine استفاده شد که این امر امکان ترک خوردگی و بررسی بهتر و صحیح تر مساله را فراهم میسازد.

بطوریکه از مدل‌سازی انجام شده مشاهده شد، در زمان $450\mu s$ ترک‌های خمشی از وسط و پائین ایجاد شد. سپس به تدریج در



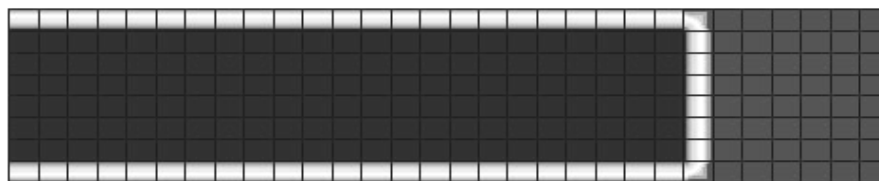
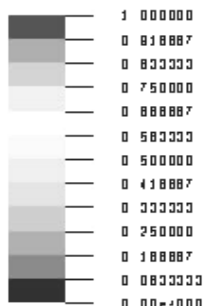
شکل ۱۱: نمایش نحوه مش بندی تیر در محیط سه بعدی



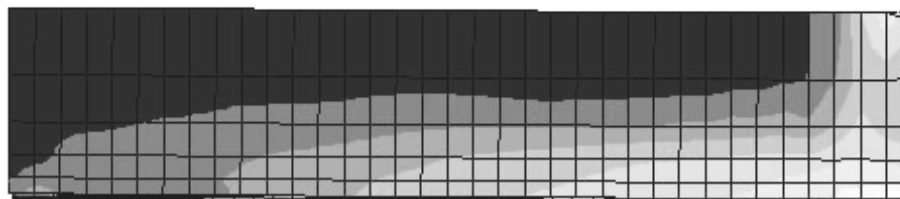
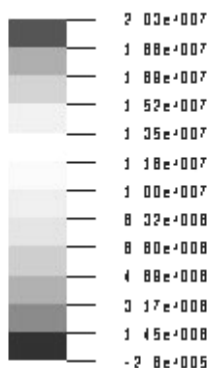
شکل ۱۲: نمایش میزان جدایی ورق از تیر بتنی در گام زمانی $t = 0.00047s$

فاصله زمانی $450\mu s$ تا $750\mu s$ شروع به گسترش به سمت بالای تیر کرد بطوریکه در $750\mu s$ به بالای تیر رسید. بطوری که

مشاهده شد، ترکهای خمشی در این مرحله از دو مبدأ مجزا که هر دو بسیار نزدیک به وسط تیر بودند شروع به گسترش کردند و به تدریج به طور مجزا به بالای تیر رسیدند. سپس در زمان $0.00113 S$ مشاهده شد که این ترکهای مجزا به یکدیگر متصل شدند.



شکل ۱۳: نمایش میزان جدایی ورق از تیر بتنی در گام زمانی $t = 0.000755 S$

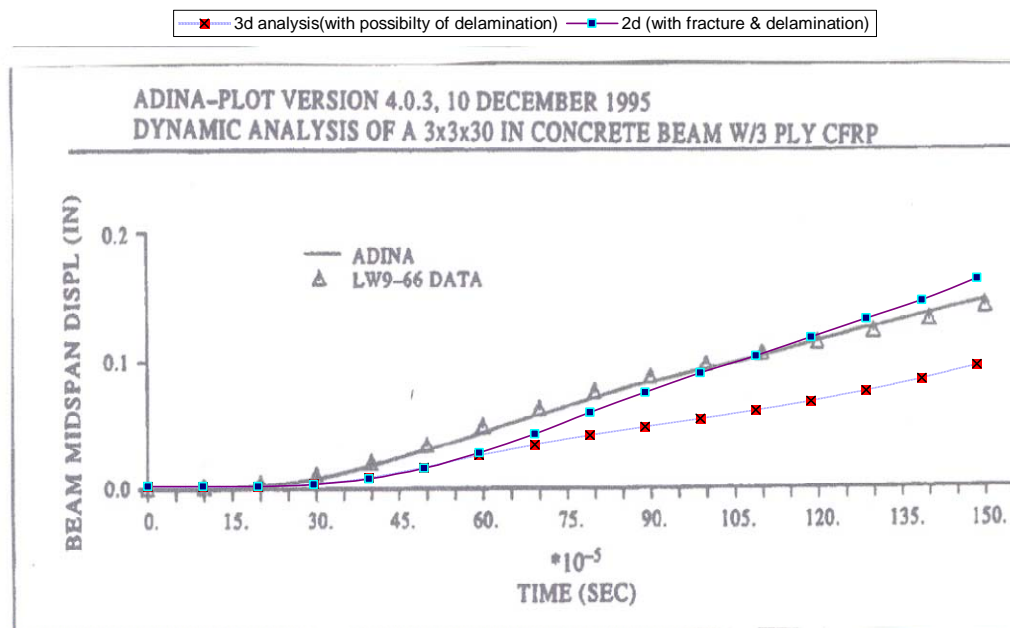


شکل ۱۴: نمایش کانتور تنش اصلی در جهت ۱ در گام زمانی $t = 0.000755 S$

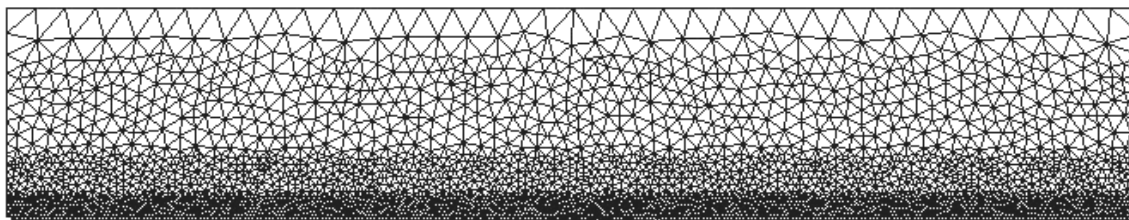
سپس در $0.00127 S$ نشانه هایی از جدایی ورق در پایین تیر مشاهده شد و به تدریج همانطور که در $0.00132 S$ مشاهده شد این جدایی شروع به گسترش نمود. در $0.00136 S$ باز هم ترکهای خمشی بیشتر به هم متصل شدند و دقیقاً به وسط تیر رسیدند.

در

S 0.00145 با هم پیوستگی بیشتر ترکها مشاهده شد و همچنان این پیوستگی افزایش یافت بطوریکه در 0.00165S این ترکهای خمشی مویی از وسط تیر شروع به گسترش به سمت چپ و پائین تیر کردند. گسترش این ترکها بصورت کاملاً مویی افزایش یافت. بطوریکه در 0.00171 ثانیه به پائین تیر رسیدند و در 0.00174 ثانیه گسترش آنها به سمت پایین تیر متوقف شد و نمایش



شکل ۱۵: نمایش میزان تغییر مکان وسط دهانه تیر در مدل‌های مختلف نسبت به زمان



شکل ۱۶: نمایش نحوه مش بندی تیر در محیط دو بعدی بوسیله المانهای مثلثی

کاملی از یک ترک خمشی به همراه ترکهایی مویی در پایین تیر را مشخص کرد. ضمن اینکه جدایی محل متوقف شدن این ترکها ظاهراً محلی بود که در آن جدایی ورق نیز متوقف گردید.

با توجه به منحنی بارگذاری و تغییر مبدأ زمانی 200µs نشان داده شده در شکل ۱۳ با زمانهای استفاده شده در این آنالیز میتوان مشاهده کرد که افزایش ترک خوردگیها در زمان اوج منحنی بارگذاری میباشد.

همانطور که در مرجع [۱۶] ذکر شده است مشاهده شد که ترکهای خمشی بین 400µs تا 500µs رخ دادند و تا 600µs به بالای تیر رسیدند که در تطابق با مدلسازی انجام شده میباشد. بطوریکه، یک کرنش سنج که در پایین تیر نصب شده بود تغییر ناگهانی در شیب منحنی زمان کرنش را در زمان 230µs ثبت کرد و یک کرنش سنج که در ارتفاع ۲.۷۵ اینچ از پایین تیر نصب شده بود

تغییر شیب در منحنی زمان- کرنش را در $555\mu s$ نشان داد که بیانگر حرکت ترک به سمت بالای تیر بود و ارزیابی خرابی تیر بعد از آزمایش نشان داده بود که یک ترک خمشی واحد در وسط تیر آغاز شده بود. همچنین تغییر مکان وسط دهانه تیر نیز با تغییر مکان اندازه گیری شده در آزمایش مقایسه شده است که علامتهای ضربدر بیانگر نتایج حاصل از تحلیل دو بعدی با مدل شکست رانکین برای بتن میباشند (شکل ۱۸). تطابق نسبی بین مدلسازی انجام شده و نتایج آزمایشگاهی بیانگر صحت این مدلسازی میباشد. با توجه به مدلسازی میتوان به این صورت برداشت کرد که با رسیدن ترکهای خمشی به بالای تیر در $750\mu s$ عملاً "گسیختگی تیر رخ داده است همانطور که در مرجع [۱۶] زمان گسیختگی تیر $730\mu s$ ذکر شده است.



شکل ۱۷: نمایش میزان ترک خوردگی تیر در گام زمانی $t=0.00046s$



شکل ۱۸: نمایش میزان ترک خوردگی تیر در گام زمانی $t=0.00075s$



شکل ۱۹: نمایش میزان ترک خوردگی تیر در گام زمانی $t=0.00165s$



شکل ۲۰: نمایش میزان ترک خوردگی تیر در گام زمانی $t=0.00174s$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ، روشی بر مبنای استفاده توأم از المانهای محدود/المانهای مجزا برای بررسی رفتار گسیختگی و جداسدگی لایه FRP از سازه بتنی پیشنهاد گردیده است . در این روش معیار هاشین برای شروع گسیختگی ناشی از جدایی ورق مورد استفاده قرار گرفته است . کنترل عملکرد برنامه بر مبنای مدلسازی یک تست واقعی نشان داده است که روش پیشنهادی بصورت قابل اطمینانی برای بررسی رفتار سازه های تقویت شده با FRP که تحت اثر بارهای دینامیکی قرار دارند ، قابل استفاده میباشد.

۶- مراجع

1. Meier , U., Bridge repair with high performance composite materials . Material und Technik (in German), 1978,4, 125-128.
2. Meier , U., Bridge repair with high performance composite materials . Material und Technik (in German), 1978,4, 125-128.
3. Kim, P. and Meier, U., CFRP cables for large structures. Advance Composite Materials in Civil Engineering Structures . In Proceedings of the Materials Division, ASCE, Las Vegas, NV, 1991, PP. 233-244.
4. Kaiser, H., Strengthening of reinforced concrete with epoxy-bonded carbon fiber plastics. Doctoral dissertation , ETH,1989 (in German).
5. Meier, U., Carbon fiber-reinforced polymers: modern materials in bridge engineering . Structural Engineering International 1992,January,7-12.
6. Meier, U., Deuring , M., Mier, H. and Schwegler , G., Strengthening of structures with CFRP laminates: research and application in Switzerland. In Advanced Composite Materials in Bridges and Structures , eds K. W. Neale and P. Labossiere ,CSCE,1992, pp. 243-251.
7. Deuring , M., External reinforcement of concrete structures with prestressed FRP. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and research, Report Number 224, Dubendorf , Switzerland ,1993 (in German).
8. Meier, U., Reinforcement of structures with fibrous composite materials . VDI Report Number 1080, Dubendorf, Switzerland ,1994 (in German).
9. Triantafillou, T. C., Kim, P. and Meier, U., Optimization of hybrid aluminum /CFRP box beams . International Journal of Mechanics and Science , 1991, 33, 729-739.
10. Triantafillou, T. C., Meier, U., Innovative design of FRP combined with concrete . In Advanced Composite Materials in Bridges and Structures ,eds K.W. Neale, and P. Labossiere . CSCE , 1992, pp. 491-500.
11. Triantafillou, T.C., Deskovic, N. and Deuring, M., Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets . American Concrete Institute Structural Journal , 1992,89. 235-244.
12. Zhang S, Raof M, Wood LA. Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded plates. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Struct Build 1997;122:493-6.
13. Ziraba YN. Computational model for reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates. Finite Elem Anal Des 1995;12(4):203-19.
14. Arduini M, Tommas AD, Manfroni O. In: Taerwe L, editor . Fracture mechanism of concrete beams bonded with composite plates. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures. E&FN Spon: RILEM ,1995.P. 484-91.
15. He JH, Pilakoutas K, Waldron P. Analysis of externally strengthening RC beams with steel and CFRP plates. Proc. 7th int conf. On structural faults and repairs 1997; Edinburgh, 83-92.
16. Jerome DM, Ross CA. Simulation of the dynamic response of concrete beams externally reinforced with carbon-fiber reinforced plastic. Comput struct 1997;64(5/6): 1129-53.
17. Rahimi R, Hutchinson A. Concrete beams strengthening with externally bonded FRP plates. ASCE J Compos Constr 2001;5(1):44-56.
18. Zhishen WU, Jun Yin , Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures , Engineering Fractures to (2003) 1339-1355.

19. Hedog NTV and Zhishen WU, Peeling off criterion for FRP-Strengthened R/C Flexural, FRP composite in Civil Engineering, J. G. Teng (Ed.) 2001.
20. Z.Hashin , Failure criteria for unidirectional composites, J. for Applied Mechanics 47 (1980) 329-334.
21. W.Sprenger , F. Gruttmann, W. Wagner, Delimitation growth analysis in laminated structures with continuum – based 3D –shell elements and a viscoplastic softening model comput. Methods Appl.Mech. Engrg.185(2000)123-139.
22. FEA (2000); “LUSAS User Manual”, Ver. 13.2, FEA Ltd.
23. Hallquist J.O., Goudreau G.L., Benson D.J. (1985); “Sliding interfaces with contact-impact in large-scale Lagrangian computations”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.51, pp.107-137.