



بررسی اثر رطوبت بر مودهای جداشدگی CFRP در تیر بتنی تقویت شده با این مصالح با استفاده از مفهوم مکانیک شکست

فریدون رضایی^۱، احسان بیات^۲

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه بوعلی سینا، frezaie@basu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه بوعلی سینا همدان

چکیده

امروزه مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های بتنی به وسیله CFRP گسترش یافته و مطالعات زیادی بر روی رفتار کوتاه‌مدت آن به صورت جداشدگی صورت گرفته است. با این وجود تا کنون به مسئله‌ی رفتار بلندمدت و چگونگی دوام CFRP در رابطه با جداشدگی پاسخ درخوری داده نشده است. با توجه به ماهیت طبیعی CFRP، میزان تاثیر مقاوم‌سازی با CFRP تا حدود زیادی به ویژگی‌های سطح مشترک بین سه ماده CFRP، اپوکسی و بتن وابسته است. عوامل زیادی بر روی تخریب ویژگی‌های سطح مشترک این سیستم سه ماده‌ای تأثیرگذار می‌باشند، از جمله این عوامل می‌توان به قرارگرفتن در معرض شرایط محیطی اشاره داشت. در مفهوم مکانیک شکست برای جداشدگی CFRP دو مود گسیختگی به صورت جداشدگی کششی و برشی در نظر می‌گیرند. در این تحقیق با شبیه‌سازی المان محدود دو آزمون کششی و برشی به بررسی اثر رطوبت در مدهای جداشدگی و رفتار بار-تغییر مکان تیر بتنی تقویت شده با CFRP می‌پردازیم و نتایج را با آزمون‌های انجام شده در آزمایشگاه مقایسه می‌کنیم. مشاهده خواهد شد، همان‌گونه که در گذشته از نتایج آزمایشگاهی هم به دست آمده، با توجه به اثر تخریبی رطوبت بر روی چسبندگی لایه‌ی اپوکسی به بتن، ظرفیت تیرها در تحمل تغییر مکان اعمال شده‌ی آزمون‌ها کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: CFRP، تیر بتنی، اثر رطوبت، مکانیک شکست، مدل ناحیه چسبندگی

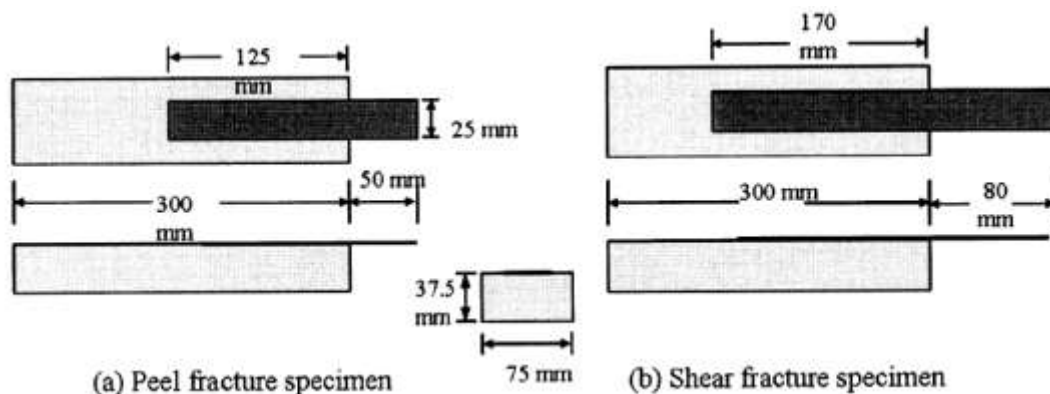
۱- مقدمه

به منظور به دست آوردن تنش‌های مماسی و بار نهایی مطالعات زیادی با استفاده از فرمول‌های تحلیلی و روش المان محدود بر روی رفتار مکانیکی و گسیختگی تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با CFRP، انجام گرفته است [1, 2, 3]. در روش المان محدود بتن را به ترتیب می‌توان با المان‌های دو یا سه بعدی و مدل کرد. مدل دقیق‌تری را می‌توان با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن ایجاد کرد. در این مدل رفتار تنش کرنش ابتدا به صورت خطی افزایش می‌یابد و پس از تسلیم مصالح به صورت غیرخطی ادامه می‌یابد. جهت بهبود محاسبات و افزایش دقت در آنالیز المان محدود، از المان‌های خاص هدف در شبیه‌سازی واضح‌تر رفتار ترک‌خوردگی مصالح بر اساس مفهوم مکانیک شکست، استفاده گردید. به عنوان مثال از مدل اندرکنش چسبندگی، بر اساس مدل ناحیه‌ی چسبندگی، به منظور شبیه‌سازی

رفتار گسیختگی ماده چسبنده تحت بارگذاری‌های کششی و برشی استفاده شد. در این مدل‌ها از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده مانند انرژی گسیختگی، مقاومت چسبندگی و بازشدن دهانه ترک در محاسبه پارامترهای مورد استفاده در تعرف اندرکنش چسبندگی استفاده شد. از آنجایی که در سال‌های اخیر مکانیک شکست در نرم‌افزارهای رایج المان محدود به کار گرفته شده است، استفاده از این مفهوم در پیش‌بینی گسیختگی به صورت جداشدگی برای طراحی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با CFRP کاربردی تر شده است.

۲- تعریف مسئله

در این تحقیق با شبیه‌سازی المان محدود دو آزمون کششی و برشی به بررسی اثر رطوبت در مدهای جداشدگی و رفتار بار-تغییر مکان تیر بتنی تقویت شده با CFRP می‌پردازیم و نتایج را با آزمون‌های انجام شده در آزمایشگاه [4, 5, 6] مقایسه می‌کنیم. به طوری که اثر رطوبت را برای شرایط رطوبتی صفر هفته‌ای (نمونه خشک و کنترلی)، دو هفته‌ای و چهار هفته‌ای در دو دمای 23°C و 50°C مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات هندسی نمونه‌های کششی و برشی در شکل ۱ نشان داده شده است.

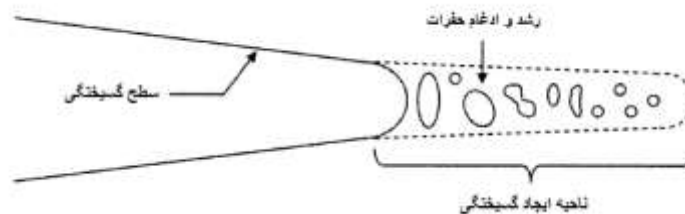


شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه گسیختگی کششی و برشی

۳- رویکرد مبتنی بر مکانیک شکست در بررسی گسیختگی به صورت جداشدگی - مدل ناحیهی چسبندگی

۱.۳- ایجاد مدل ناحیهی چسبندگی

مدل ناحیهی چسبندگی (CZM^۱) ابتدا به عنوان روشی در مطالعهی گسیختگی یا ایجاد حفره در مصالح نیمه ترد مانند بتن و سرامیک معرفی شد. CZM در مجموع بیش تر مکانیزمهای مربوط به گسیختگی را توصیف می کند. این مکانیزمها شامل تغییر شکل پلاستیک، ایجاد، رشد و ادغام حفرات در ناحیهی نزدیک نوک ترک می باشند (شکل ۲). با پیشرفت روشهای المان محدود، CZM به علت سهولت در کدنویسی المان محدود، در مطالعه بر روی روند گسیختگی رواج پیدا کرده است. در این مورد لایه ای از المانهای چسبندگی با استفاده از تعریف اندرکنش بین اپوکسی و بتن، ایجاد شد. CZM همچنین در مطالعهی موفقیت آمیز بر روی روند گسیختگی نرم در سایر مصالح مانند پلیمرها و سایر فلزات استفاده شده است.



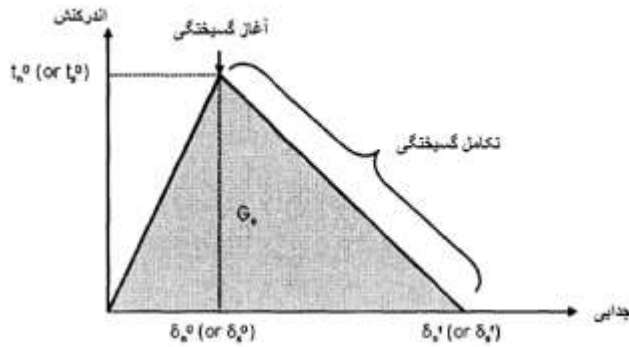
شکل ۲- ناحیهی ایجاد گسیختگی، مقابل نوک ترک

۲.۳- توصیف ساختاری CZM - قانون اندرکنش جدایی^۲

مدل مصالح تشکیل دهنده در توزیع ترکها باید قادر باشد فرآیند ایجاد آسیب دیدگی در نوک ترکها ناشی از ایجاد، رشد و ادغام حفرات را بیان کند. این فرآیندها به طور کلی قادر هستند که مدل پدیده شناختی موسوم به قانون اندرکنش جدایی، که رابطهی بین نیروی سطحی و جدایی مواد را بیان می کند، را توصیف کنند. هنگامی که تنشهای نرمال یا برشی به مقادیر بحرانی خود برسند (t_n^0 برای تنش نرمال بیشینه و t_s^0 برای تنش برشی بیشینه)، جدایی بین بتن و اپوکسی با شروع آسیب دیدگی در اندرکنش چسبندگی تعریف شده به وجود می آید. این آسیب دیدگی موجب از دست رفتن ظرفیت بارگذاری اندرکنش در کشش و برش می گردد که به صورت کاهش تنش و رفتار نرم شدگی به هنگام بارگذاری یکنواخت ظاهر می شود. قانون اندرکنش جدایی روشی است که این کاهش تنش را بیان می کند. رابطهی ساده خطی (شکل ۳) و منحنی نمایی رفتارهای مرسوم نرم شدگی مورد استفاده هستند. قانون اندرکنش جدایی را می توان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از آزمون گسیختگی بر روی نمونه های با اشکال مختلف [4, 5, 6] کالیبره کرد. آسیب دیدگی کامل اندرکنش چسبندگی در نزدیکی دهانه ترک فرضی (جایی که نیروی اندرکنش صفر می شود) به این معنی است که در حال حاضر گسیختگی به صورت جداشدگی در نمونه رخ داده است.

^۱ Cohesive Zone Model

^۲ Traction Separation Law



شکل ۳- رابطه‌ی خطی قانون اندرکنش جدایی به همراه تکامل خطی گسیختگی

۴- به کارگیری CZM در آنالیز المان محدود

۱.۴- قانون نیروی اندرکنش جدایی برای سطح تماس

در قانون اندرکنش جدایی ارتجاعی خطی رابطه‌ی بین بردار تنش اندرکنش اسمی t ، که خود شامل دو مولفه‌ی t_n و t_s (در صورتی که مدل سه بعدی باشد شامل سه مولفه می‌شود) و کرنش‌های متناظر آن‌ها ϵ_n و ϵ_s در سطح تماس است، به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$t = \begin{pmatrix} t_n \\ t_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \end{pmatrix} = K \epsilon \quad (1)$$

K در این رابطه ماتریس الاستیسیته است. اندرکنش‌ها به صورت مولفه‌ی نیرو تقسیم بر مساحت صفحه‌ی اصلی در هر نقطه‌ی انتگرال‌گیری تعریف شده‌اند. اگر رفتار نرمال و برشی با یکدیگر همراه نباشد، ممکن است مولفه‌های غیرقطری صفر باشند. کرنش‌ها می‌توانند به صورت میزان جدایی برشی و نرمال سطح تماس (δ_s و δ_n) تقسیم بر ضخامت لایه (T_0) تعریف شده باشند. هنگامی که این ضخامت برای مواد تشکیل‌دهنده یک در نظر گرفته شود، کرنش اسمی برابر با جدایی متناظر با آن می‌شود [6].

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده کردید، تحت بارگذاری یکنواخت نیروهای اندرکنش به صورت خطی متناسب با جدایش‌ها افزایش می‌یابند که قانون اندرکنش جدایی را بیان می‌کند. برخی ضوابط برای بیان آسیب‌دیدگی موجود می‌باشند. یکی از ساده‌ترین ضوابط، رابطه‌ی درجه دوم آسیب‌دیدگی است، و بر اساس آن فرض می‌شود که آسیب‌دیدگی در سطح تماس هنگامی آغاز می‌شود که رابطه‌ی زیر ارضا شود:

$$\left(\frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 + \left(\frac{t_n}{t_n^0} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

\bar{t}_n مقاومت کششی و \bar{t}_s مقاومت برشی سطح تماس در اوج بارگذاری در قانون اندرکنش جدایی می‌باشند. معادله‌ی (۳) نیز تأثیر اختلاط مود^۱ در مقاومت سطح تماس را در نظر می‌گیرد [6]. هنگامی که آسیب دیدگی در سطح تماس آغاز می‌شود، مدول الاستیسیته‌ی آن با توجه به رفتار خطی یا غیرخطی کاهش می‌یابد. این رفتار را سیر تکامل آسیب^۲ می‌نامند که معمولاً به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t_n = \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n & , \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n & , \bar{t}_n < 0 \end{cases} \quad (\text{under compression}) \quad (3)$$

$$t_s = (1-D)\bar{t}_s$$

\bar{t}_s و \bar{t}_n مولفه‌های اندرکنش به دست آمده توسط قسمت الاستیک قانون اندرکنش جداشدگی برای کرنش بدون آسیب موجود می‌باشند. متغیر عددی D نشان‌دهنده‌ی آسیب موجود در سطح تماس، به علت ترکیب همه‌ی مکانیزم‌های مربوطه، است. بنابراین برای المان چسب آسیب ندیده، $D = 0$ است. به همین ترتیب با افزایش بار پس از شروع آسیب، مقدار D به‌طور یکنواخت از ۰ به ۱ میل می‌کند. سیر تکامل D را می‌توان به گونه‌ای مشخص کرد که مساحت تحتانی نمودار اندرکنش جدایی برابر با انرژی گسیختگی سطح تماس گردد (G_{Ic} برای گسیختگی کششی و G_{IIc} برای گسیختگی‌های برشی).

۲.۴ - ضابطه‌ی گسیختگی در حالت اختلاط مود^۳

سیر تکامل آسیب در قانون اندرکنش جداشدگی، چگونگی کاهش سختی سطح تماس به علت اتلاف انرژی به هنگام گسیختگی سطح تماس در بین دو سطح بستر بیان می‌کند. به طور کلی، حالت اختلاط مود گسیختگی در طول سطح تماس دو ماده‌ی غیرمشابه را به علت عدم تطابق ارتجاعی^۴ بیان می‌کند. بنابراین سیر تکامل آسیب باید قادر به توصیف تأثیر حالت اختلاط مود حین گسترش ترک باشد. می‌توان شکل کلی از ضابطه‌ی گسیختگی تحت بارگذاری در حالت اختلاط مود را به صورت زیر در نظر گرفت [6]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\mu + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\nu = 1 \quad (4)$$

در این رابطه چهار پارامتر وجود دارد که باید آن‌ها را از آزمایش‌ها به دست آورد. توان‌های μ و ν را معمولاً ۱ یا ۲ در نظر می‌گیرند. مقادیر نرخ‌های آزادشده‌ی بحرانی، G_{Ic} و G_{IIc} ، را می‌توان از آزمون گسیختگی مود I (کششی) و II (برشی) به دست آورد. با این وجود، به دست آوردن آزمایشگاهی

^۱ Mode-mixity

^۲ Damage evolution

^۳ Mixed-Mode Fracture Criterion

^۴ Elastic mismatch

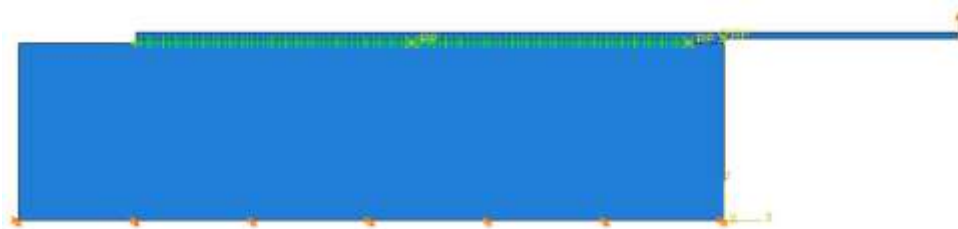
مقادیر G_{IIc} و G_{Ic} کار دشواریست زیرا به ندرت پیش می‌آید که در گسیختگی سطح تماس تنها حالت خالص مود I یا II ایجاد شود. به همین دلیل در این تحقیق به‌طور تقریبی از سختی گسیختگی سطح تماس در آزمون گسیختگی کششی و برشی [4] به‌جای نرخ‌های انرژی آزاد شده مود I و II استفاده شد.

۵- قانون اندرکنش جدایی و پارامترهای به‌دست آمده از آزمون گسیختگی کششی و برشی برای CZM

۱.۵- رفتار نمونه‌های گسیختگی کششی و برشی - بررسی مقدماتی

بتن، اپوکسی و ورق CFRP با استفاده از المان‌های چهارضلعی چهارگره‌ی کرنش صفحه‌ای^۱ با ضخامت کرنش صفحه‌ای^۲ ۷۵ میلی‌متر برای بتن، ۲۵ میلی‌متر برای لایه‌ی اپوکسی و ورق CFRP. مدل شدند. المان‌های ورق CFRP با قید مهار^۳ به المان‌های لایه‌ی اپوکسی متصل شدند. این نوع اتصال به دو ناحیه با مش‌بندی غیرمشابه اجازه‌ی حرکت هماهنگ را می‌دهد. با وجود قید مهار^۳، هر گره بر روی سطح فرعی^۴ (به عنوان مثال المان‌های اپوکسی)، دارای جابجایی و درجات آزادی حرکتی مشابهی با نقطه‌ی مجاور آن در سطح اصلی^۵ (به عنوان مثال المان‌های CFRP) می‌باشد. سطح اصلی به سطحی گفته می‌شود که سطح دیگر (سطح فرعی) را به آن مهار می‌کنند. سطح تماس بین بتن و اپوکسی با تعریف اندرکنش چسبندگی مدل شد. با استفاده از مش‌بندی یکنواخت در طول خط چسبندگی، این اندرکنش‌ها به گونه‌ای قرار داده شدند که لایه‌ی سطح تماس در انتهای ورق و نوک ترک اولیه سطح تماس (۱۱۷,۵ میلی‌متر و ۱۶۲,۵ میلی‌متر به ترتیب در طول نمونه‌های گسیختگی کششی و برشی)، خاتمه یابد.

برای شبیه‌سازی شرایط مرزی ایجاد شده توسط بارگذاری گسیختگی در طی انجام آزمایش، شرایط تغییر مکان مرزی در لبه‌های پایین و سمت راست بلوک بتنی اعمال شدند. در نمونه‌ی گسیختگی کششی، شرایط تکیه‌گاهی تغییر مکان‌های صفر در جهت‌های x و y بر لبه‌ی پایین بلوک بتنی قرار داده شد. در نمونه‌های گسیختگی برشی، لبه‌ی پایین بلوک بتنی در هر دو جهت x و y مهار شد در حالی که لبه‌ی پایین بازوی CFRP تنها در جهت y مهار شد. علاوه بر این شرایط تکیه‌گاهی تغییر مکان‌های مورد نظر در انتهای ورق CFRP اعمال شدند. اشکال ۴ و ۵ به ترتیب مدل المان محدود نمونه‌ی گسیختگی کششی و برشی را نشان می‌دهند.



شکل ۴- مدل المان محدود نمونه‌ی گسیختگی کششی

^۱ 4-node quadrilateral plane-strain elements

^۲ Plane-strain thickness

^۳ Tie constraint

^۴ Slave surface

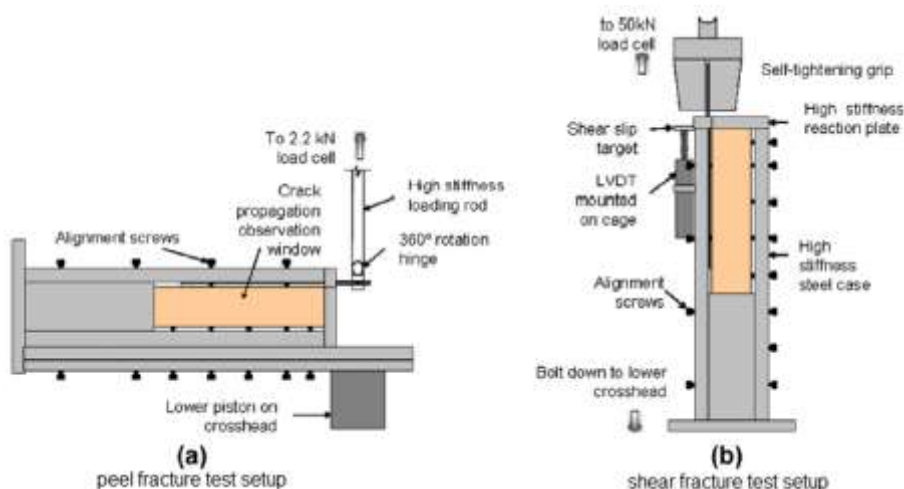
^۵ Master surface



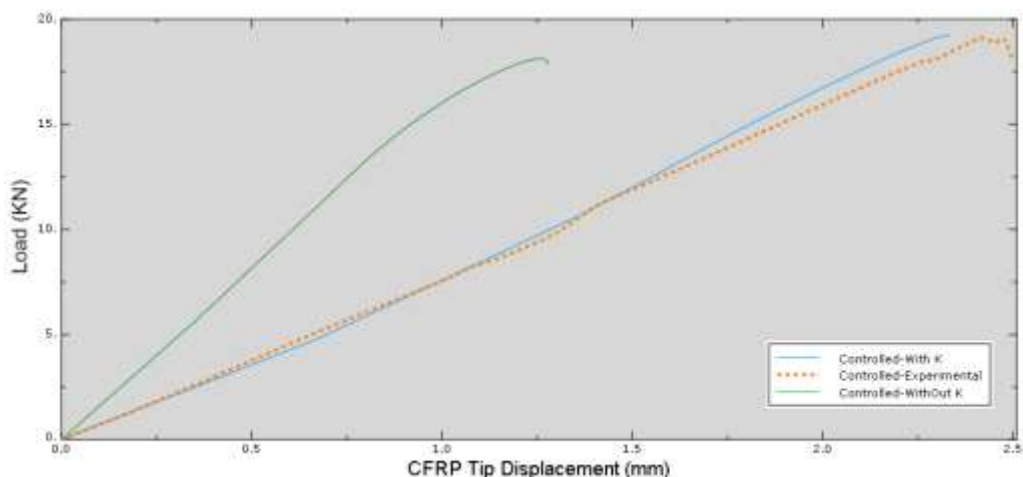
شکل ۵- مدل المان محدود نمونه‌ی گسیختگی برشی

۱.۱.۵- کالیبره کردن مدل المان محدود نمونه‌های گسیختگی کششی و برشی

به عنوان بررسی مقدماتی، مدل المان محدود نمونه‌های گسیختگی با مصالح دارای خواص ارتجاعی خطی برای بتن، اپوکسی و CFRP آزمایش شد تا با رفتار ارتجاعی اولیه‌ی حاصل از نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردد. از خواص مصالح در شرایط کنترلی یا خشک ($E_c = 35 \text{ GPa}$ ، $E_e = 1.5 \text{ GPa}$ ، $E_{CFRP} = 165 \text{ GPa}$) استفاده شد. با مقایسه‌ی منحنی بار-تغییر مکان مشاهده شد که شیب منحنی در قسمت ارتجاعی نمودار برای نمونه‌های المان محدود گسیختگی برشی، بزرگ‌تر از شیب قسمت مشابه از نتایج آزمایشگاهی [6] می‌باشد (شکل ۷). این اختلاف ممکن است به علت تغییر شکل کوچک گیره‌های نگهدارنده ورق تکیه‌گاه به جعبه‌ی فولادی (شکل ۶ را ببینید) و لغزش داخلی بین گیره‌ی نگهدارنده انتهای ورق CFRP و ورق قبل از گسیختگی نهایی باشد. به منظور در نظر گرفتن این انعطاف‌پذیری اولیه یک مولفه‌ی فنری با سختی K به انتهای ورق CFRP در مدل گسیختگی برشی اضافه شد.



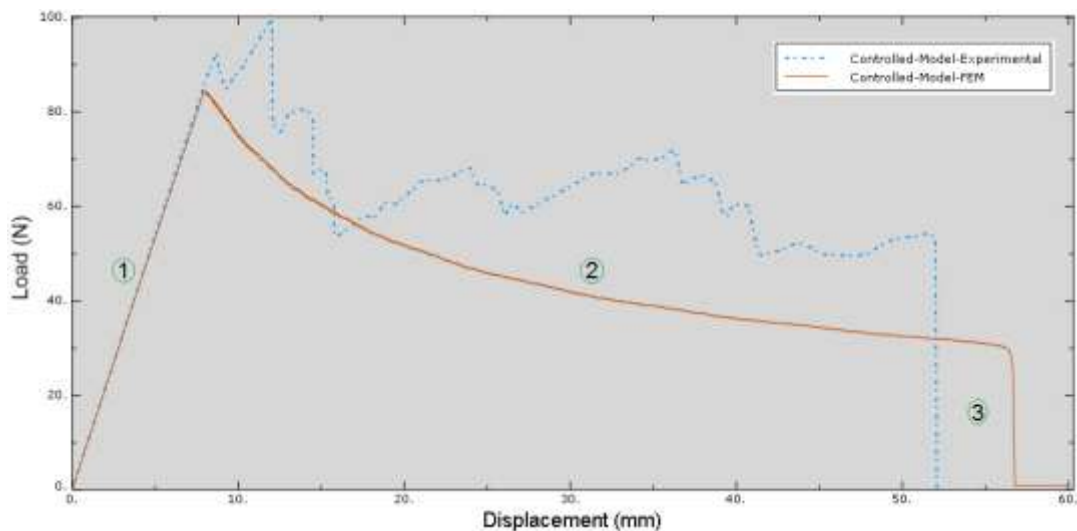
شکل ۶- نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌های کششی و برشی در آزمایشگاه [4]



شکل ۷- مقایسه بین نمودار بار-تغییر مکان نوک ورق CFRP بین نمونه آزمایشگاهی و نمونه‌های مدل شده با و بدون المان K

۶- نمونه‌ی گسیختگی کششی

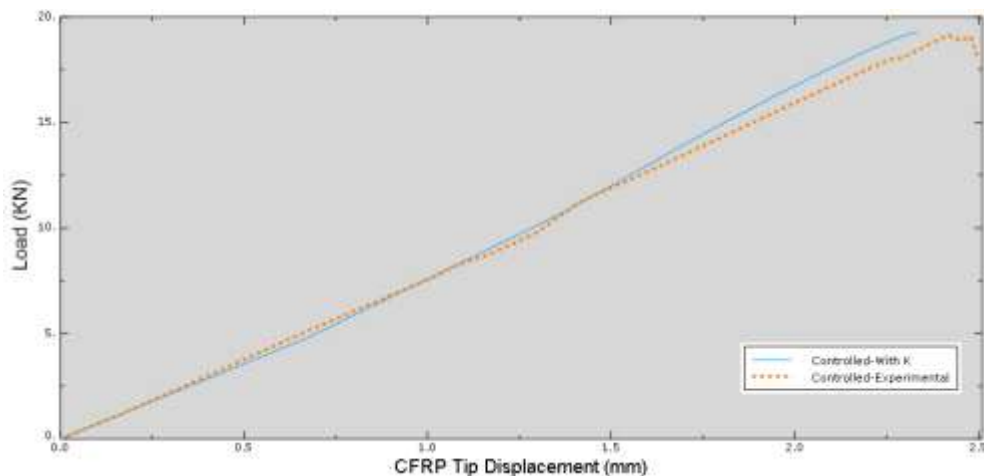
منحنی رفتار بار-تغییر مکان مدل نمونه گسیختگی کششی در شکل ۸ نشان داده شده است. این مدل تا نقطه‌ای که در آن اندرکنش نرمال (f_n^0) در سطح تماس از مقاومت سطح تماس بیشتر شود، رفتار خطی از خود نشان می‌دهد. رابطه‌ی به دست آمده از این مدل شبیه رابطه‌ی حاصل از نتایج آزمایشگاهی [5] است، با این تفاوت که قسمت نرم‌شدگی برای المان‌های چسبندگی استفاده شده در مدل المان محدود، صاف‌تر می‌باشد. هنگامی که اندازه‌ی بار وارده از مقدار بار نهایی کوچک‌تر باشد، با افزورده شدن سطح بار انداره‌ی ناحیه‌ی تکامل گسیختگی (FPZ) نیز افزایش می‌یابد. بار به صورت خطی افزوده می‌شود تا FPZ به طور کامل شکل بگیرد، سپس مقدار بار شروع به افت می‌کند تا در نقطه‌ای که نزدیک نوک ترک اولیه است صفر شود (آغاز مرحله‌ی دوم در شکل ۸). با پیش رفتن جدایی در سطح تماس، FPZ از ترک اولیه سطح تماس دور می‌شود و به تبع آن به دلیل بزرگ شدن بازوی لنگر ایجاد شده نیرو کاهش می‌یابد. هنگامی که سطح تماس سالم باقیمانده در مقایسه با FPZ خیلی کوچک باشد، جدایی کامل سطح تماس به طور ناگهانی حادث می‌شود (مرحله‌ی سوم در شکل ۸).



شکل ۸- منحنی بار-تغییر مکان نمونه گسیختگی کششی کنترلی

۷- نمونه‌ی گسیختگی برشی

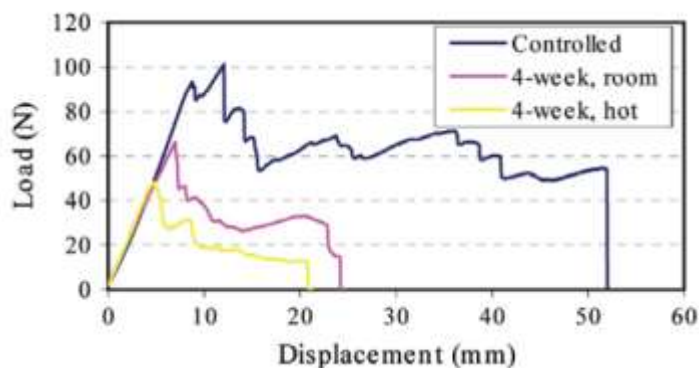
منحنی رفتار بار-تغییر مکان مدل گسیختگی برشی در شکل ۹ نشان داده شده است. رفتار مدل به گونه‌ای است که بار به صورت خطی افزایش می‌یابد تا جایی که اندرکنش برشی (t_s) در سطح تماس از مقاومت سطح تماس (t_s^0) بیش‌تر شود. در این مورد نسبت به نمونه‌ی گسیختگی کششی، قسمت غیرخطی در سطح باری نزدیک‌تر به پیشینه بار اتفاق می‌افتد. مشاهده می‌شود جدایی کامل سطح تماس به‌طور ناگهانی بعد از رسیدن به مقدار پیشینه بار حادث می‌شود.



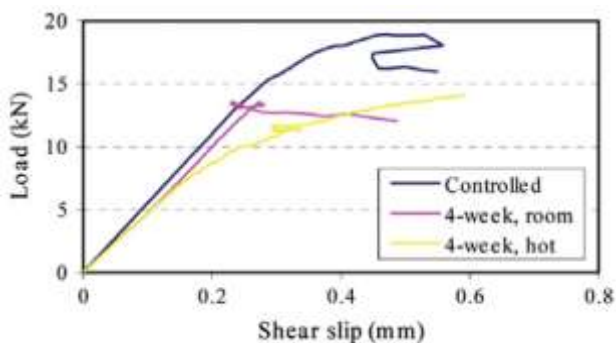
شکل ۹- منحنی بار-تغییر مکان نوک ورق CFRP نمونه گسیختگی برشی کنترلی

۸- بررسی اثر رطوبت

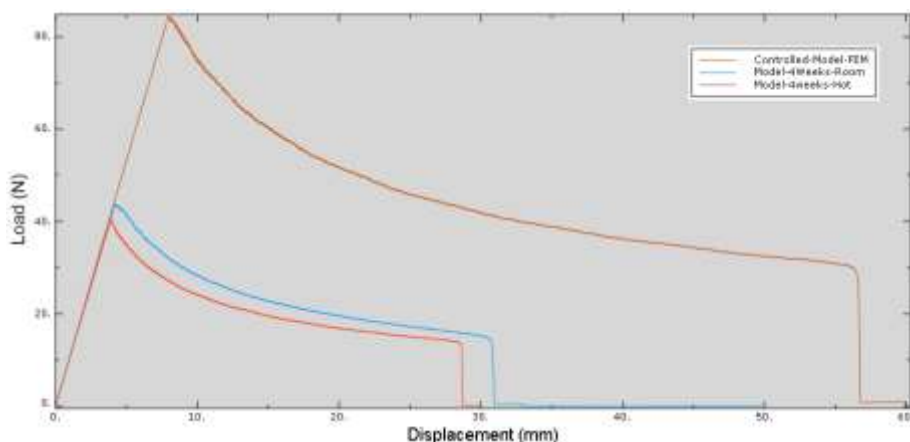
بعد از کالیبره کردن نمونه‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، نحوه‌ی تأثیر رطوبت بر رفتار بار-تغییر مکان نوک ورق CFRP مورد بررسی قرار گرفت. اشکال ۱۰ و ۱۱ به ترتیب رفتار بار-تغییر مکان نمونه‌های کششی و نمونه‌های برشی برای شرایط رطوبتی، که از آزمون‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، را نشان می‌دهند [5]. نتایج نمونه‌های مشابه مدل شده در نرم‌افزار را می‌توانید در اشکال ۱۲ و ۱۳ ببینید. بررسی انجام گرفته در آزمایشگاه نشان داده‌است که با توجه به اثر تخریبی رطوبت بر روی سختی گسیختگی و مقاومت سطح تماس بین بتن و اپوکسی، ظرفیت بارگذاری تیرهای بتنی کاهش می‌یابد.



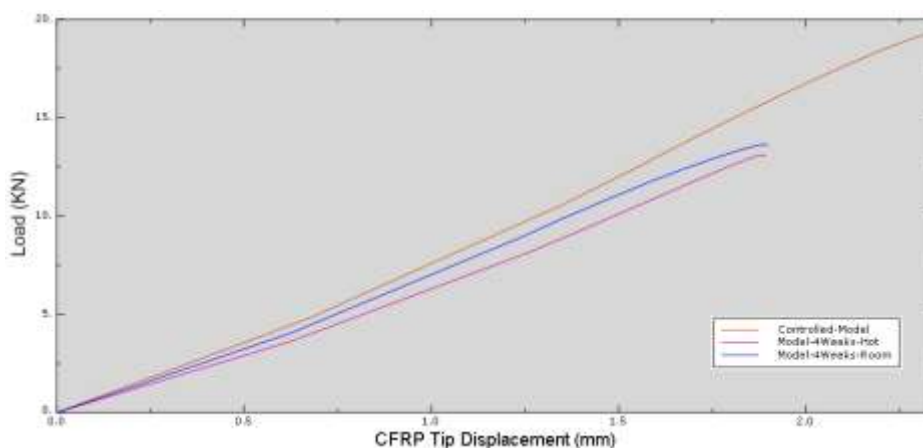
شکل ۱۰- منحنی بار-تغییر مکان نمونه گسیختگی کششی تحت شرایط رطوبتی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [5]



شکل ۱۱- منحنی بار-تغییر مکان نمونه گسیختگی برشی تحت شرایط رطوبتی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [5]



شکل ۱۲- منحنی بار-تغییر مکان نمونه گسیختگی کششی تحت شرایط رطوبتی مدل شده در نرم افزار



شکل ۱۳- منحنی بار-تغییر مکان نمونه گسیختگی برشی تحت شرایط رطوبتی مدل شده در نرم افزار

۹- نتیجه گیری

همان گونه که در شکل های ۱۲ و ۱۳ مشخص است با قرارگیری در شرایط رطوبتی ظرفیت بارگذاری تیرها کاهش یافته است. این امر را می توان با توجه به تأثیر مخرب رطوبت بر روی مقاومت و سختی گسیختگی چسبندگی سطح تماس بین اپوکسی و بتن توضیح داد. نتایج آزمایشگاهی نشان داده اند که با قرارگیری در شرایط رطوبتی و نفوذ رطوبت به سطح تماس بین بتن و اپوکسی سختی گسیختگی کاهش می یابد. با کاهش مقاومت و سختی گسیختگی سطح تماس ظرفیت تیرها در تحمل تغییر مکان اعمال شده به نوک ورق CFRP کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان داده اند که افزایش دما موجب افزایش تأثیر مخرب رطوبت بر روی چسبندگی بین بتن و اپوکسی خواهد شد.

- [1] Niu, H., and Karbhari, V. M.; “FE investigation of material and preload parameters on FRP strengthening performance of RC beams, I: Model development”; *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (5), (2008) 507-522.
- [2] Saxena, P., Toutanji, H. A., and Noumowe, A.; Failure Analysis of FRP-Strengthened RC Beams”; *J Compos Constr*, 12, (2008) 2-14.
- [3] Rosenboom, O., and Rizkalla, S.; “Modeling of IC debonding of FRP-strengthened concrete flexural members”; *J Compos Constr*, 12(2), (2008) 168-179.
- [4] Tuakta, C. and Büyüköztürk, O.; “Deterioration of FRP/concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanics”; *J Composites Part B: Engineering*, (2011) 145-154.
- [5] Gunes, O. Lau, D. Tuakta, C. and Büyüköztürk, O.; “Ductility of FRP–concrete systems: Investigations at different length scales”; *J Construction and Building Materials*, V49, (2013) 915-925.
- [6] Tuakta, C.; “Effects of moisture on debonding in FRP-Retrofitted concrete systems”; Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, (2011).