

مدل سازی لایه چسب به منظور پیش بینی شکست زودرس در تیرهای بتنی تقویت شده با صفحه های CFRP

حمید وارسته پور
استادیار موسسه آموزش عالی صنعت آب و برق
آمنه سلیمانی کیا*
کارشناس ارشد سازه موسسه آموزش عالی صنعت آب و برق

چکیده

اتصال پلیمرهای مسلح شده به الیاف (FRP) توسط چسب Epoxy به عنوان یک تکنولوژی مقاوم سازی جدید و پشرفته و اقتصادی در پاسخ به نیاز روز افزون برای تعمیر و تقویت سازه های بتن آرمه پدید آمده و در دهه گذشته گسترش یافته است. اگر چه اتصال صفحه FRP توسط لایه چسب دارای مزایای بسیاری است، اما بیشتر حالت های گسیختگی تیرهای تقویت شده با این روش، قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی مورد انتظار و به صورت ترد رخ می دهد. شایع ترین حالت های وقوع این گسیختگی های زودرس، شکافته شدن پوشش بتن و جداشدگی سطح مشترک بتن و صفحه ی تقویتی هستند. بیشتر تحقیقاتی که در زمینه رفتار سازه های تقویت شده صورت گرفته، از تأثیر رفتار لایه چسب چشم پوشی شده است، و در نتیجه، ظرفیت خمشی تخمین زده شده از این روش ها دقت کافی را دارا نمی باشد. پیش بینی ظرفیت خمشی واقعی تیرهای بتنی تقویت شده با صفحات FRP در حالت گسیختگی زود رس، به طراحی اقتصادی و مناسب این تیرها کمک خواهد نمود.

در این مقاله نتایج آزمایشگاهی حاصل از ۶ تیر تقویت شده، با روش اجزاء محدود تحلیل و صحت سنجی شده اند. این تیرها تحت بارگذاری خمشی ۴ نقطه ای قرار گرفته اند و در دو گروه A و B تقسیم بندی شده اند. در هر گروه تیرها دارای ابعاد سطح مقطع و طول های یکسان تیر و لایه FRP هستند اما ضخامت لایه CFRP در آنها متفاوت می باشد.

در این مقاله از نرم افزار Abaqus برای تحلیل اجزاء محدودی استفاده شده است. مدل سازی صورت گرفته، با ارائه تئوری و معیارهای شکست لایه چسب و روشی برای مدل سازی آن، صورت گرفته و نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار، با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده اند. نتایج آنالیز بیانگر این هستند که مدل FE، بخوبی و به طور قابل قبولی نتایج آزمایشگاهی بار-جابجایی و کرنش های CFRP و بارهای نهایی و حالت های گسیختگی در تیرهای تقویت شده را پیش بینی نموده است که این امر صحت مدل سازی صورت گرفته برای لایه چسب را تأیید می نماید.

واژگان کلیدی: شکست زودرس تیرها، ظرفیت خمشی، CFRP، لایه چسب، Abaqus.

*نویسنده مسئول: amene.kia@gmail.com

۱- مقدمه

میان تیر. شایع ترین آن‌ها، شکافته شدن پوشش بتن و جداسازی سطح مشترک بتن و صفحه تقویتی^۱ گزارش شده‌اند.

گسیختگی زودرس عمدتاً با باز شدن ترک‌های خمشی و برشی آغاز می‌شود. مکانیسم جداسازی به دلیل تمرکز تنش‌ها در انتهای صفحه FRP و یا در ناحیه بین صفحه FRP و آرماتورهای خمشی داخل بتن پیش می‌رود. این حالات گسیختگی عمدتاً به دلیل تمرکز تنش‌های برشی و نرمال سطح اتصال بتن و صفحه FRP در نقاط کنده شدن FRP و همچنین گسترش ترک‌های خمشی در طول تیر رخ می‌دهند. از آنجا که شکست زودرس مانع از رسیدن یک‌المان به ظرفیت نهایی تئوری محاسبه شده‌ی آن است و همچنین باعث کاهش شکل‌پذیری می‌شود، پیش‌بینی بار نهایی در لحظه گسیختگی زودرس ضرورت می‌یابد.

اگرچه محققان نشان داده‌اند که برای جلوگیری از جداسازی انتهای صفحه FRP می‌توان از سیستم‌های مهاربندی استفاده کرد، و یا برای تعویق آن روش‌های شیارزنی (تسلیح خارجی با نصب بر روی شیارهای طولی، EBROG) به کار گرفته شود، اما هنوز هم عمدتاً طراحی‌ها مبتنی بر این روش‌ها صورت نمی‌پذیرد [۱]. علاوه بر این، عدم تعیین راه‌بهنه برای کاربرد FRP، افزایش هزینه قابل توجهی را به همراه خواهد داشت. بنابراین، برای توانایی پیش‌بینی شکست زودرس نیاز به بهبود درک فرایند جداسازی می‌باشد.

مطالعات موجود نشان داده‌اند که یکی از عوامل مهم مؤثر بر رفتار سازه‌های تقویت شده، مقاومت چسب در سطح مشترک بین صفحه FRP و سطح بتن است. بنابراین، برخی مطالعات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار لایه اتصال با استفاده از مجموعه‌ای از آزمایش‌ها مانند آزمایش‌های برشی، آزمایش‌های برشی دابل و یا آزمایش‌های تیرهای اصلاح شده در خمش صورت پذیرفته‌اند.

همچنین در سال‌های اخیر برخی محققین تحقیقاتشان را به صورت عددی و به‌طور ویژه بر روی مدل‌سازی لایه چسب متمرکز نموده‌اند.

برخی از محققین برای شبیه‌سازی رفتار سطح مشترک FRP/ بتن، رفتار مکانیکی لایه چسب را به صورت الاستیک خطی

تقویت و مرمت عناصر اصلی سازه‌ها، مسئله مهم و مطرح در دنیای امروز است زیرا جای‌گزینی سازه‌های فرسوده و ضعیف هزینه‌ی هنگفتی را در بر خواهد داشت. در سال‌های اخیر، با ظهور مصالح FRP و هم‌زمان با توسعه و تولید چسب اپوکسی قوی، تکنولوژی مقاوم‌سازی جدید و پیشرفته‌ای در پاسخ به نیاز روز افزون برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتن آرمه پدید آمده است. مصالح FRP به دلیل نسبت بالای مقاومت به وزن، سختی به وزن، مقاومت در برابر خوردگی و کاهش هزینه‌های ناشی از سهولت جابه‌جایی و اجرای سریع، به مصالح ساختمانی بسیار مطلوبی تبدیل شده‌اند و برای تعمیر و تقویت انواع سازه‌های فولادی و بتنی رواج یافته‌اند.

برای مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتنی، صفحه FRP به وجه کششی آن‌ها اتصال می‌یابد. صفحه تقویتی اتصال یافته به تیر موجب افزایش عملکرد تحت بارهای سرویس و کاهش جابه‌جایی‌ها و ترک‌خوردگی‌ها می‌شود و مقاومت خمشی نهایی را افزایش می‌دهد.

از اوایل دهه نود، تحقیقات گسترده‌ای بر روی رفتار سازه‌ای تیرهای تقویت شده با صفحات FRP در سطح کششی تیر تحت شرایط نهایی یا سرویس صورت پذیرفته‌اند. این تحقیقات نشان می‌دهند که اگر چه کاربرد مواد کامپوزیت در اجرا حین عملیات مقاوم‌سازی با موفقیت مورد استفاده قرار می‌گیرد، در اکثریت قریب به اتفاق این سازه‌ها، قبل از رسیدن سازه به ظرفیت نهایی تئوری محاسبه شده برای آن، گسیختگی‌های تردی روی می‌دهد که می‌تواند مزایای این روش تقویت را محدود کند و موجب حوادث فاجعه‌آمیزی گردد. این گسیختگی‌ها به اصطلاح گسیختگی‌های زودرس نام گرفته‌اند.

در اتصال FRP به بتن، سه ماده (FRP، چسب، و بتن) و دو رابط (FRP/ چسب و بتن/ چسب) وجود دارد. گسیختگی می‌تواند به شکل از هم گسیختگی مواد و یا گسیختگی سطح مشترک مواد ظاهر شود. هفت حالت برای گسیختگی تیرهای تقویت شده با صفحه FRP را شناسایی شده است که عبارتند از: پارگی صفحه FRP، خرد شدن بتن تحت فشار، گسیختگی برشی، کنده شدن پوشش بتن، جداسازی انتهای صفحه FRP در سطح مشترک FRP/ بتن، ایجاد ترک خمشی و یا خمشی- برشی در

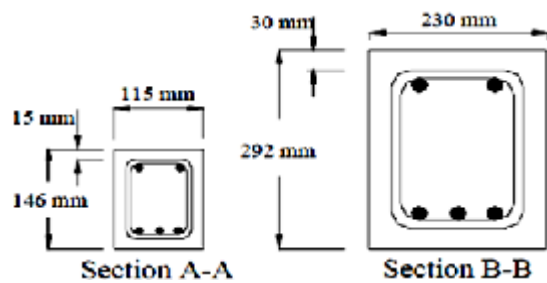
^۱ Debonding

جدول ۱- مشخصات و ابعاد تیرهای بتنی [۲]

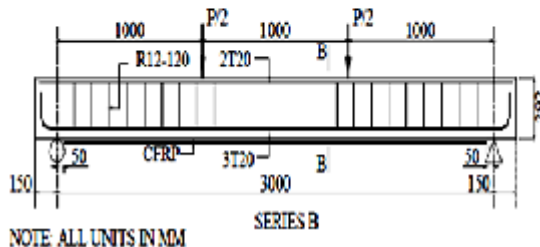
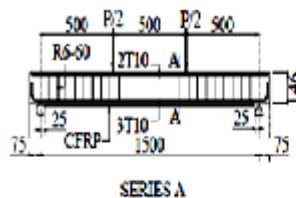
CFRP	تعداد ضخامت لایه ها ورق	مدول الاستیسیته بتن	مقاومت فشاری بتن	مقاومت کششی بتن	(mm)						تیر	سری
					a	S	L	d	h	b		
		E_c	f'_c	f'_t								
		(MPa)	(MPa)	(MPa)								
۰	۰	۲۴۸۷۰	۲۸	۳/۱۷	۵۰۰	۶۰	۱۵۰۰	۱۲۰	۱۴۶	۱۱۵	A1	A
۰/۱۶۵	۱	۲۴۸۷۰	۲۸	۳/۱۷	۵۰۰	۶۰	۱۵۰۰	۱۲۰	۱۴۶	۱۱۵	A2	
۰/۳۳	۲	۲۴۸۷۰	۲۸	۳/۱۷	۵۰۰	۶۰	۱۵۰۰	۱۲۰	۱۴۶	۱۱۵	A3	
۰	۰	۲۴۸۷۰	۲۸	۳/۱۷	۱۰۰۰	۱۲۰	۳۰۰۰	۲۴۰	۲۹۲	۲۳۰	B1	B
۰/۳۳	۲	۲۴۸۷۰	۲۸	۳/۱۷	۱۰۰۰	۱۲۰	۳۰۰۰	۲۴۰	۲۹۲	۲۳۰	B2	
۳/۱۷	۴	۲۴۸۷۰	۲۸	۳/۱۷	۱۰۰۰	۱۲۰	۳۰۰۰	۲۴۰	۲۹۲	۲۳۰	B3	

تعریف نموده اند. که ضعف این روش در عدم تعیین معیاری برای شکست در لایه چسب می باشد.

در این مقاله از نرم افزار Abaqus برای مدل سازی تیرهای تقویت شده با صفحه FRP به کمک لایه چسب، و تحلیل اجزاء محدودی آن استفاده شده است. از آنجا که بررسی خرابی های



شکل ۱- جزییات مقاطع برای گروه های A و B [۲]



NOTE ALL UNITS IN MM

شکل ۲- جزییات آرماتور گذاری نمونه های Leong Kok [۲]

زودرس حاصل از جداشدگی صفحه FRP و بتن وابسته به اضافه کردن مدل سطح مشترک FRP/ بتن به مدل کلی است، مدل سازی صورت گرفته، با ارائه تئوری و معیارهای شکست لایه چسب و روشی برای مدل سازی آن، صورت گرفته است. یکی از راه های مدل سازی جداشدگی، در نظر گرفتن المانی برای لایه چسب و تعریف خصوصیات و رفتار لایه چسب است. روش دیگر، تعریف خصوصیات و رفتار لایه چسب به صورت رفتار سطح تماس بین بتن / FRP می باشد. که در این تحقیق روش اول به کار گرفته شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- داده های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق از تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP آزمایش شده توسط Leong Kok استفاده شده است [۲]. مشخصات هندسی و بارگذاری و تکیه گاه ها در شکل (۱) و (۲) و جدول (۱) نشان داده شده است. خصوصیات مدل و مصالح تعریف شده در این نرم افزار، بدین صورت می باشند: تیرها به ۲ گروه A و B تقسیم بندی شده اند. مقدار پوشش بتن به ترتیب ۱۵ و ۳۰ میلیمتر بوده است. در هر گروه ۳ آزمایش با مقدار درصد متفاوت ورق

جدول ۲- مشخصات ورق تقویتی FRP [۱]

نوع فیبر	σ_p (MPa)	E_p (GPa)
کربن	۳۵۵۰	۲۳۵

جدول ۳- مشخصات چسب بکار رفته

در تقویت تیرهای بتنی تقویت شده [۲]

E_a (MPa)	G_a (MPa)	t_a (mm)
۱۸۲۴	۶۲۲	۰/۶۳۶

جدول ۴- مشخصات فولادهای مصرفی [۲]

گروه	فولاد	قطر (mm)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	E (GPa)
A	R6	۶	۳۴۷	۰/۱۷	۴۶۰	۲۳۷
	T10	۱۰	۵۴۷	۰/۳۵	۵۸۴	۱۸۰
B	R12	۱۲	۳۲۴	۰/۱۷	۴۸۸	۱۹۹
	T20	۲۰	۵۴۴	۰/۳۵	۶۴۴	۱۸۳

در شکل (۳) منحنی‌های بار- تغییر مکان تیرهای تقویت شده و تیرهای کنترلی (بدون تقویت) نمایش داده شده است [۲]. تقویت تیرها به کمک CFRP و افزایش ضخامت آن، موجب افزایش مقاومت تیرها شده است. کلیه تیرهای تقویت شده در آزمایشگاه با حالت شکست زودرس صفحه FRP گسیخته شده‌اند.

۲-۲ - شبیه‌سازی رفتار مصالح

در مدل‌سازی، رفتار تیرهای بتن آرمه تحت خمش چهار نقطه‌ای به روش اجزاء محدود (FEM) و به صورت حل غیرخطی، با در نظر گرفتن المان چسب برای مدل‌سازی رفتار سطح مشترک بتن و FRP مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲-۱ - بتن

بتن بنابر طبیعتش ماده‌ای با رفتار پیچیده است و حتی در سطوح تنش پایین هم رفتاری کاملاً غیرخطی دارد. از میان تئوری‌هایی که برای توضیح رفتار بتن ارائه شده‌اند، دو تئوری پلاستیسیته و مکانیسم خرابی بیشترین تطابق را با رفتار واقعی بتن دارند. کامل‌ترین مدل برای شبیه‌سازی رفتار بتن، مدلی باشد که پلاستیسیته و خرابی را ترکیب نماید [۳]. در این تحقیق از مدل

بتن آسیب‌دیده پلاستیک یا مدل CDP^۱ برای مدل‌سازی بتن استفاده شده است. در این مدل دو مکانیسم گسیختگی برای بتن که عبارتند از ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری فرض می‌شود. هر دوی این پدیده‌ها ناشی از شروع و گسترش ترک‌ها می‌باشند. رفتار تنش - کرنش بتن تحت فشار تک محوری بعد از ناحیه الاستیک باید به صورت تنش بر حسب کرنش غیر الاستیک تعریف شود. فرض می‌شود که رفتار بتن تحت کشش تک محوری تا تشکیل ترک‌های ریز اولیه در تنش حداکثر به صورت خطی است [۴].

رفتار بتن بعد از شکست باید به صورت تنش بر حسب کرنش ترک خوردگی تعریف گردد. این رفتار اجازه می‌دهد تا بتوان اثرات اندرکنش بتن و آرماتور را یافت. برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش بین بتن و میلگرد مانند پیوستگی - لغزش^۲ بتن با میلگردها و اثر میخ پرچی^۳ می‌توان خواص ناشی از این اثرات را به صورت تقریبی و ساده شده با معرفی سخت‌شدگی کششی در مدل بتن در نظر گرفت و با دقتی نسبی اثر باز توزیع تنش‌های بتن پس از ترک خوردگی را وارد محاسبات نمود [۵].

برای معرفی رفتار کامل بتن باید علاوه بر پارامترهای الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون)، با مدل CDP مقادیر عددی پنج پارامتر پلاستیک و پارامترهای اختصاصی معرف رفتار بتن در کشش و فشار به نرم‌افزار داده شوند که به شرح زیر هستند: ۱- زاویه اتساع^۴ ϕ ، که نسبت تغییرات حجم به کرنش برشی است. بزرگتر شدن مقادیر ϕ بتن را شکل‌پذیرتر می‌سازد. ۲- خروج از محوریت^۵ ϵ ؛ که سرعت نزدیک شدن تابع پتانسیل پلاستیک به مجانبش را به دست می‌دهد و هرچه مقدار آن بیشتر باشد انحنا در پتانسیل‌های کم، بیشتر می‌گردد. مقدار این خروج از محوریت به عنوان پیش‌فرض در نرم‌افزار 0.1 در نظر گرفته شده است. ۳- f_{b0}/f_{c0} ؛ که نسبت تنش تسلیم دو جهته فشاری به تنش تسلیم یک جهته فشاری است که در آزمایش‌ها معمولاً عددی بین 1.1 تا 1.16 به دست می‌آید. مقدار پیش‌فرض این پارامتر بدون بعد در نرم‌افزار 1.16 است.

¹ Concrete Damaged Plasticity

² Bond-Slip

³ Dowel Action

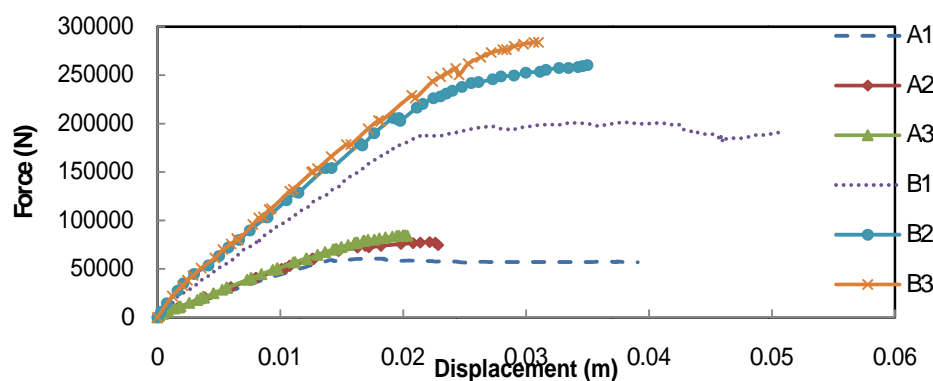
⁴ Dilation Angle

⁵ Eccentricity

۴- پارامتر k ؛ که شکل سطح تسلیم را مشخص می‌سازد و می‌تواند مقداری بین 0.5 تا 1.0 داشته باشد. مقدار پیش‌فرض k در نرم‌افزار تعیین شده است که بنا به اتفاق نظر مراجع موجود [۶] برای مدل‌سازی بتن تیر مناسب خواهد بود. ۵- پارامتر ویسکوزیته، μ ؛ که زمان آسودگی سیستم ویسکوپلاستیک را نشان می‌دهد. بعضی از مشکلات عدم همگرایی را می‌توان با استانداردسازی و تنظیم ویسکوپلاستیک معادلات رفع نمود و بدین وسیله اجازه داد تنش‌ها از سطح تسلیم خارج شوند. پارامترهای معرف رفتار پلاستیک بتن در جدول (۵) نمایش داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای مورد نیاز مدل CDP بتن در تعریف رفتار پلاستیک بتن [۴]

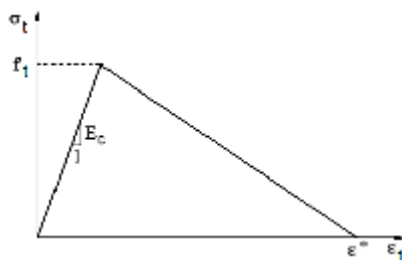
Dilation angle	Eccentricity	f_{b0}/f_{c0}	k	Viscosity Parameter
۳۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۶۷	۰/۰۱



شکل ۳- منحنی‌های بار- تغییر مکان تیرهای تقویت شده و تیرهای کنترلی [۲]

۲-۲-۱-۲. رفتار کششی بتن

زمانی که ترک در بتن مسلح بوقوع می‌پیوندد باز هم قادر به تحمل مقداری کشش در جهت عمود به ترک می‌باشد که این پدیده سختی کششی باقی‌مانده نام دارد (شکل ۵). برای معرفی رفتار کششی بتن به نرم‌افزار از روش کرنش‌ها استفاده شده و از مدل ساده خطی جهت مدل کردن رفتار کششی بتن استفاده شده که در شکل زیر نشان داده شده است [۹].



شکل ۵- منحنی رفتاری بتن در کشش [۹]

۲-۲-۱-۱. رفتار تنش-کرنش پس از شکست

به‌طور کلی مشخص کردن رفتار پس از شکست در بتن و بیان تنش‌های بعد از شکست به صورت تابعی از کرنش ترک خورده ϵ_{cr} می‌باشد. کرنش ترک خورده^۱ به‌صورت کرنش کل منهای کرنش الاستیک بتن ترک‌نخورده تعریف می‌شود. با داشتن اطلاعات مربوط به باربرداری، منحنی‌های آسیب کششی در Abaqus به‌صورت $(d_t - \epsilon_{cr})$ قابل حصول است. این برنامه به‌طور خودکار، مقادیر کرنش ترک خورده را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می‌کند. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، می‌توان با داشتن مقادیر تنش و کرنش فشاری بتن، پارامترهای خرابی و مدول الاستیسیته بتن، کرنش‌های پلاستیک معادل را به دست آورد [۶]. برای محاسبه منحنی تنش کرنش فشاری از روابط هاگنستاد اصلاح شده استفاده شده است (شکل ۴).

^۱ Cracking strain

جدول ۷- مشخصات تنش و کرنش ترک خوردگی بتن در

کشش و پارامتر خرابی آن

پارامتر خرابی	کرنش کششی (ϵ_{cr})	تنش کششی (MPa)
۰	۰	۳/۱۷
۰/۹	۰/۰۰۱۲۸	۰

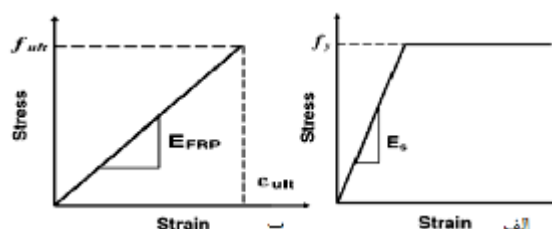
در این روش رفتار فولاد تا رسیدن به تنش تسلیم، الاستیک می باشد. در این نقطه فولاد تحت بار ثابت جاری می شود (شکل ۶ الف). پارامترهای مورد نیاز این مدل، ضریب کشسانی فولاد (E_s)، نسبت پواسون (ν) و تنش تسلیم (f_y) می باشند.

CFRP - ۳-۲-۲

الیاف پلیمری مسلح کننده در جهت طولی به سختی دارای رفتار غیرخطی هستند و رفتار آن ها را به صورت خطی در نظر گرفته می شود. همچنین با بارگذاری های عرضی درون صفحه انحراف از رفتار غیرخطی مشاهده شده است. اما میزان غیرخطی شدن با برش درون صفحه ای قابل مقایسه نیست. معمولاً این رفتار غیرخطی را که با بارگذاری های عرضی توأم است می توان نادیده گرفت. بنابراین مواد FRP تا لحظه گسیختگی (رسیدن به کرنش نهایی، ϵ_{ult}) رفتار الاستیک و خطی دارند و در مقاومت نهایی خود دچار شکستی ترد می شوند (شکل ۶ ب). بنابراین رفتار مواد FRP را می توان با معرفی یک رفتار خطی الاستیک معرفی نمود [۲].

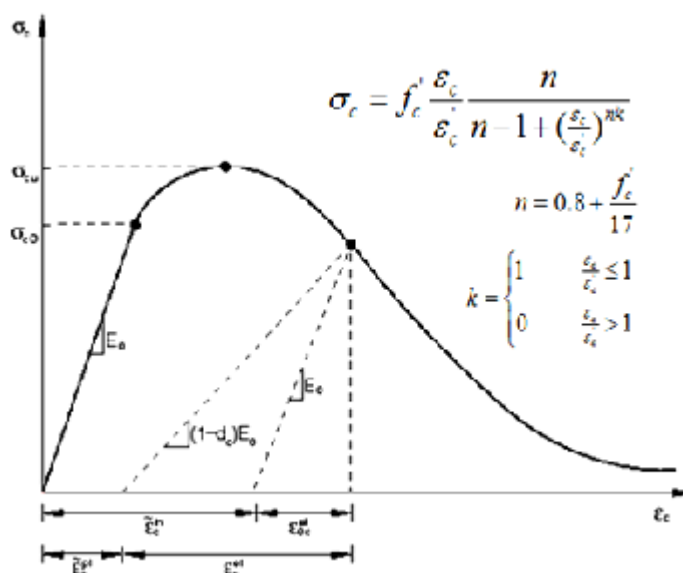
۲-۲-۲ - فولاد

برای کاهش زمان آنالیز و جلوگیری از مشکلات عدم همگرایی، در این مقاله از منحنی ایده آل سازه شده فولاد برای مدل سازی استفاده شده [۵] بدون اینکه تاثیر خاصی در دقت جواب ها حاصل گردد و رفتار کششی و فشاری این ماده یکسان فرض شده است.



شکل ۶- الف) منحنی تنش - کرنش فولاد ب) منحنی تنش -

کرنش FRP [۸]



شکل ۴- تعریف کرنش غیرالاستیک در منحنی پاسخ بتن تحت بارگذاری تک محوره فشاری [۴]

جدول ۶- مشخصات تنش و کرنش ترک خوردگی بتن در فشار و پارامتر خرابی آن

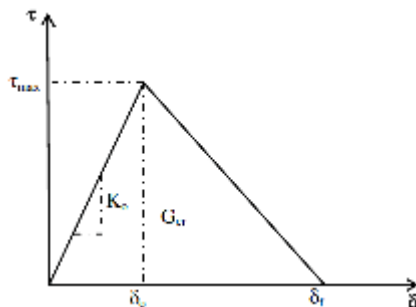
پارامتر خرابی	کرنش فشاری غیر الاستیک	تنش فشاری (MPa)
۰	۰/۰۰۰۰۰	۱۳/۳۹
۰	۰/۰۰۰۰۶	۱۷/۶۴
۰	۰/۰۰۰۱۲	۲۱/۰۱
۰	۰/۰۰۰۳۱	۲۵/۷۲
۰	۰/۰۰۰۸۰	۲۸/۰۰
۰/۱	۰/۰۰۱۹۷	۲۲/۸۹
۰/۴	۰/۰۰۳۱۷	۱۶/۸۲
۰/۷	۰/۰۰۵۴۰	۹/۴۱
۰/۹	۰/۰۰۷۴۶	۵/۹۱

جدول ۸- تعریف CFRP در نرم افزار

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
۲۳.۵	۲۲.۶	۰/۳۸	۱۱/۱	۱۱/۱	۷/۴۹

دو حالت پروسه‌ی؛ از بین رفتن چسبندگی، و رابطه الاستیک خرابی، بین تنش مماسی (یا کشش) (I) و جابه جایی نسبی ناشی از لغزش (δ) در میان لایه چسب را شامل می شود. شکل (۷) نمایش رفتار مدل کشش - جدایی است که توسط پارامترهای مؤثر کشش (I) و جابه جایی نسبی ناشی از جداشدگی (δ) بوجود آمده است. در این مدل مقدار نهایی جابه جایی نسبی (δ_f) و مقدار ترک خوردگی اولیه (δ_0) به پارامترهای ورودی زیر بستگی دارند: [۶]

$$k_0 = \frac{\tau_{\max}}{\delta_0}, \quad \delta_f = \frac{2G_{cr}}{\tau_{\max}} \quad (1)$$



شکل ۷- رفتار لایه چسب [۶]

نکته ای که در اینجا مهم است، نشان دادن دقیق نقطه گسیختگی است، که پس از آن تمام ظرفیت باربری ماده بدون ورود به مرحله پلاستیک به یکباره از بین خواهد رفت. Obaidat در سال ۲۰۰۹ طی مقاله ای نشان داد که تفاوت چشم گیری بین مدل های مختلف ایزوتروپیک و ارتوتروپیک برای FRP نیست [۷]. بنابراین در این تحقیق رفتار FRP به صورت ایزوتروپ و Lamina مدل شده است. در این مدل مدول الاستیسته و تنش گسیختگی در جهات مختلف الیاف به نرم افزار معرفی می شود (جدول ۸).

۲-۲-۴ - سطح مشترک بتن / CFRP (لایه چسب)

بررسی خرابی های زودرس حاصل از جداشدگی منوط به اضافه کردن مدل سطح واسط به مدل کلی است. که در این تحقیق این امر با مدل سازی لایه چسب و تعریف خصوصیات و رفتار مکانیکی این لایه انجام شده است. رفتار چسب در نرم افزار به صورت مدل کشش - جدایی^{*} تعریف شده است. این مدل هر

* Traction-Separation

فرضیه گسترش خرابی چسب با توجه به انرژی آزاد شده، بیان شده است [۴]. در Abaqus، وابستگی انرژی شکست به مود براساس معیار گسیختگی BK* تعریف شده است:

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_\phi}{G_\psi} \right\}^\eta = G^c \quad (۸)$$

که در آن، $G_\psi + G_n = G_s + G_\phi$ و $G_\phi = G_s + G_t$

پارامترهای مصالح هستند. G_n ، G_s و G_t به ترتیب، اشاره به کار انجام شده به وسیله کشش و جدایش همزمان با آن در جهت عمودی، اولین و دومین جهت‌های کششی، دارند. این معیار، بویژه هنگامی که انرژی‌های شکست بحرانی در طی تغییر شکل کلی در طول اولین و دومین جهت‌های تنش؛ یکسان هستند، سودمند است. یعنی $G_t^c = G_s^c$.

مقادیر استفاده شده در این تحقیق عبارتند از: $G_n^c = 111.52 \text{ J/m}^2$ و $G_t^c = G_s^c = 900 \text{ J/m}^2$. همچنین $\eta = 1.45$ بوده [۸] و مقدار G_n^c از روابط تجربی انرژی شکست، برابر با سطح زیر منحنی نرم‌شوندگی بتن به دست آمده است [۱۱]:

$$G_F = 2.5\alpha_0 \left(\frac{f'_c}{0.051} \right)^{0.46} \left(1 + \frac{d_a}{11.27} \right)^{0.22} \left(\frac{w}{c} \right)^{-0.3} \quad (۹)$$

منحنی نرم‌شوندگی بتن تحت بارگذاری کششی تک محوری در شکل (۸) نمایش داده شده است که در آن، f'_t مقاومت کششی بتن است که شروع ترکهای ریز در بتن را کنترل می‌کند، G_F کل انرژی شکست است که بنابر تعریف؛ میزان انرژی لازم برای شروع، گسترش و شکست کامل یک ترک در واحد سطح می‌باشد. در رابطه (۹)، مقاومت فشاری بتن f'_c (MPa) = 28، انرژی شکست بتن G_F (N/m)، برای سنگدانه‌های گوشه‌دار و شکسته $\alpha_0 = 1.44$ ، حداکثر اندازه سنگدانه d_a (mm) = 9 و نسبت آب به سیمان در اختلاط بتن $w/c=0.5$ است. زمانیکه پارامترهای f'_t و G_F معلوم شوند، می‌توان منحنی نرم‌شوندگی را با استفاده از توابع تخمین زد (شکل ۸) [۱۰].

رفتار لایه چسب با تعریف دو بخش الاستیک و بخش خرابی چسب صورت می‌گیرد. رفتار آغازین لایه چسب در شروع خرابی به شکل رفتار الاستیک-خطی بوده (شکل ۷) و می‌بایست بردار سختی اولیه برای آن تعریف شود:

$$K_{nn} = \frac{E}{t}, \quad K_{tt} = \frac{G_1}{t}, \quad K_{ss} = \frac{G_2}{t} \quad (۲)$$

در روابط بالا، E ضخامت چسب، E مدول الاستیسیته چسب، G_1 و G_2 مدول برشی چسب در جهات دوم و سوم صفحه، K_{nn} و K_{ss} مقدار سختی اولیه در جهات عمود و ۲ جهت اصلی دیگر با توجه به شکل (۹) می‌باشد.

تعریف بخش خرابی به نرم‌افزار، شامل رفتار آغاز خرابی و گسترش خرابی می‌باشد. در فرضیه خرابی چسب، آغاز خرابی هنگامی روی می‌دهد که معادله‌ی کشش درجه دو شامل نسبت‌های تنش اصلی به عدد یک برسند؛

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_n}{\tau_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_t}{\tau_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (۳)$$

پارامترهای σ_n ، σ_t و σ_s عبارتند از مقادیر حداکثر تنش‌های کششی و برشی ماکزیمم چسب و n و s و t جهت‌های مؤلفه‌های تنش در شکل (۷) در محدوده الاستیک می‌باشند.

مقادیر این پارامترها به صورت $\sigma_n = f_{ct}$ ، $\sigma_s = \sigma_t = \tau_{max}$ پیشنهاد شده است [۷]. که در آن f_{ct} تنش برشی ماکزیمم بتن است و مقدار تنش برشی ماکزیمم، τ_{max} ، از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\tau_{max} = 1.5\beta_w f_{ct} \quad (۴)$$

$$\beta_w = \sqrt{(2.25 - \frac{b_f}{b_c}) / (1.25 + \frac{b_f}{b_c})} = 0.75 \quad (۵)$$

مقدار $\frac{b_f}{b_c}$ در تیرهای تقویت شده، برابر عدد ۱ می‌باشد؛ b_f عرض صفحه FRP، b_c عرض بتن و f_{ct} مقاومت کششی بتن می‌باشند. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده‌اند که این مقدار برای تنش برشی ماکزیمم بسیار زیاد می‌باشد و به جای آن مقدار $\frac{\tau_{max}}{2}$ جایگزین شده است [۷]. مقادیر مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از [۶ و ۷]:

$$\tau_t^0 = \tau_t^0 = \frac{\tau_{max}}{2} = 1.78 \text{ MPa} \quad (۶)$$

$$\sigma_n^0 = f_{ct} = 3.17 \text{ MPa} \quad (۷)$$

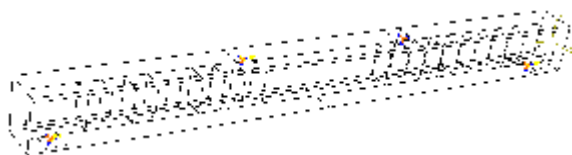
* Benzaggah-Kenane

structure و برای لایه چسب از تکنیک sweep در مش بندی استفاده شده است. آنالیز حساسیت سنجی مش بندی برای تیرهای کنترلی (تقویت نشده) A1 و B1 انجام شده اند و نتایج آن ها برای تیرهای تقویت شده A2، A3، B2، B3 استفاده شده است. در مش بندی تیرها با ریزتر شدن دانه بندی، شکل ترک خوردگی ها و خرابی ها دقیق تر نمایان می شود لیکن سرعت تحلیل را بطور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. در نهایت به ترتیب از مش ۱۵ و ۲۰ میلی متر به ترتیب در مش بندی تیر A1 و B1 استفاده شده است.

۲-۵ - مدل سازی مدل

در این تحقیق با در نظر گرفتن قلاب انتهایی و وجود تنش های محصورکنندگی می توان اطمینان داشت که پیوستگی بین بتن و میلگردها تا مقدار زیادی تأمین شده است. استفاده از مدل ها پیچیده لغزش در این مطالعه که رفتار کلی تیر بتن مسلح را دنبال می کند، تحقیق را بدون رسیدن به بهره چندانی از هدف ساده سازی مدل دور می سازد. از این رو با فرض پیوستگی کامل، به همان میزان اندرکنش فولاد و بتن که در رفتار سخت شدگی کششی بتن تعریف شده اکتفا می شود. بنابراین قفس میلگرد به صورت مدفون و محاط* در بتن مدل شده است [۵].

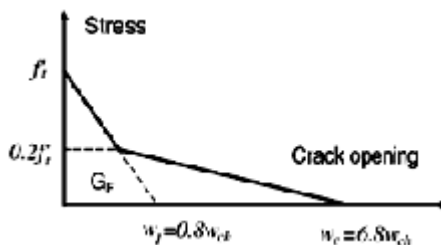
همچنین در راهنمای نرم افزار توصیه شده است که اتصال بتن/چسب/FRP با توجه به ضخامت کم لایه چسب به صورت گره[†] شدن المان های بتن با چسب و همچنین المان های چسب با FRP صورت پذیرد. شرایط بارگذاری تیر تقویت شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نمایی از تیر بارگذاری شده

در تحلیل غیرخطی یک سازه، رابطه نیرو- تغییر مکان به صورت غیرخطی بوده و سختی سازه تابعی از تغییر مکان خواهد بود.

* Embedded
† Tie



شکل ۸- منحنی نرم شوندگی بتن در کشش با تقریب دو خطی

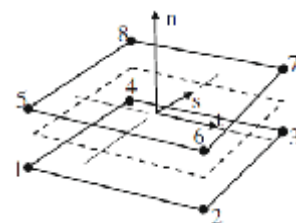
جدول ۹- تعریف بخش پلاستیک رفتار لایه چسب

۳/۱۷e۶	۱/۷۸e۶	۱/۷۸e۶	۱۱۱/۵۲	۹۰۰	۹۰۰

۲-۳ - المان های به کار رفته در تحلیل عددی

برای مدل سازی بتن به دلیل رفتار سه بعدی آن از المان C3D8R، برای فولادهای کششی و فشاری و خاموت ها از المان T3D2 و برای صفحه CFRP از المان Shell از نوع S4R که یک المان ۴ گرهی با ۶ درجه آزادی (سه درجه انتقالی و سه درجه دورانی) در هر گره می باشد، استفاده شده است. برای صفحه لایه چسب از المان COH3D8 (المان لایه چسب، سه بعدی و ۸ گرهی با ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره) استفاده شده است.

المان های لایه چسب شامل دو سطح جدا شده به فاصله ضخامت لایه چسب هستند (شکل ۹). حرکت نسبی سطوح بالایی و تحتانی المان چسب، که در طول جهت ضخامت چسب اندازه گیری می شود، نمایانگر رفتار تنش عمودی در المان چسب می باشد.



شکل ۹- المان Cohesive، ۸ گرهی سه بعدی؛ COH3D8 [۴]

۲-۴ - آنالیز حساسیت سنجی مش بندی

در مدل سازی برای المان تیر بتنی و لایه چسب، مش بندی به شکل Hex و برای صفحه CFRP و صلب از Quad استفاده شده است. برای المان های بتن و FRP و صفحه صلب از تکنیک

جدول ۱۰- مقایسه مقادیر بار نهایی تیرهای گروه A و B

تیر	تقویت	ضخامت FRP (mm)	بار ماکزیمم آزمایشگاهی (N)	بار ماکزیمم مدل FEM (N)	درصد افزایش ظرفیت تیر تقویت شده	درصد خطای مدل
A1	بدون FRP	۰	۶۰/۵۴۶	۶۰/۷۶۳	-	-۰/۳۶
A2	۱ لایه FRP	۰/۱۶۵	۷۶/۶۲۷	۷۶/۶۱۳	۲۶/۰۸	۰/۰۲
A3	۲ لایه FRP	۰/۳۳	۸۷/۳۷۹	۸۴/۲۹۰	۳۸/۷۲	۳/۵۳
B1	بدون FRP	۰	۲۰۱/۳۷۰	۲۰۷/۹۳۲	-	-۳/۲۶
B2	۲ لایه FRP	۰/۳۳	۲۵۷/۴۵۲	۲۴۰/۸۹۴	۱۵/۸۵	۶/۴۳
B3	۴ لایه FRP	۰/۶۶	۲۸۴/۰۰۰	۵۶۴/۵۰۵	۲۷/۲۱	۶/۲

برای حل این گونه معادله‌ها نمی‌توان بار وارده را یکباره به سازه اعمال نمود. بلکه با تقسیم آن به نمو‌های کوچک به حل مسأله پرداخته می‌شود. هر چه نمو بارها کوچک تر باشند باعث نزدیکی حالت مفروض با واقعیت موجود خواهد شد و شرط وقوع هم‌گرایی در جواب‌ها کوچک بودن نمو بارها است. در این مطالعه روش تکرار نیوتن رافسون برای دستیابی به هم‌گرایی به کار گرفته شده است. برای جلوگیری از مشکل عدم همگرایی، تنظیمات نمو‌ها به صورت اتواتیک و توسط نرم‌افزار انجام شده است.

۲-۳ - حالت‌های گسیختگی

حالات گسیختگی در تیرهای A1 و B1 (بدون تقویت)، به صورت انهدام بتن در ناحیه زیر جک‌های بارگذاری بوده است. در شکل (۱۲) خرابی فشاری و کششی بتن نمایش داده شده است. گسترش ترک‌های خمشی و برشی در ناحیه‌ی کششی تیر در بار نهایی در شکل (۱۲) ب) نشان داده شده است. گسیختگی در سایر تیرهای تقویت‌شده با CFRP به صورت گسیختگی زودرس ناشی از انتشار ترک خمشی و ترک‌های خمشی-برشی در ناحیه‌ی کششی تیر رخ داده است. شکل (۱۳) این حالت گسیختگی نمایش داده شده است. در شکل (۱۳) الف) گسترش ترک‌های خمشی و برشی در ناحیه‌ی کششی تیر در بار نهایی قابل مشاهده است. با گسترش و بازشدگی این ترک‌ها، رفتار چسب در این نواحی از ناحیه الاستیک خود عبور کرده و رفتار خرابی آن آغاز می‌شود، در این مرحله شیب منحنی در نمودار بار-جابه‌جایی میانه دهانه تیر رو به کاهش می‌رود (شکل ۱۳ ب). با گسترش ترک‌ها در ناحیه کششی بتن، رفتار خرابی چسب در این نواحی گسترش می‌یابد (۱۳ ج) که کنده شدن FRP در این نواحی را سبب شده است و به گسیختگی زودرس تیر تقویت شده به صورت زودرس و ناشی از انتشار ترک خمشی و ترک‌های خمشی-برشی در ناحیه‌ی کششی تیر منجر شده است.

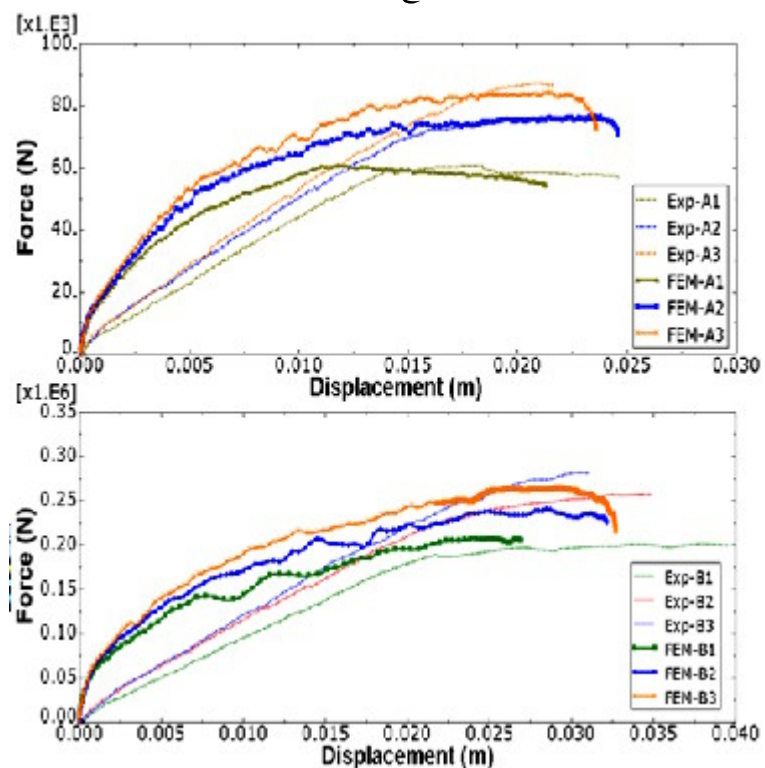
۳ - نتایج و تفسیر

۳-۱ - منحنی‌های بار-جابه‌جایی

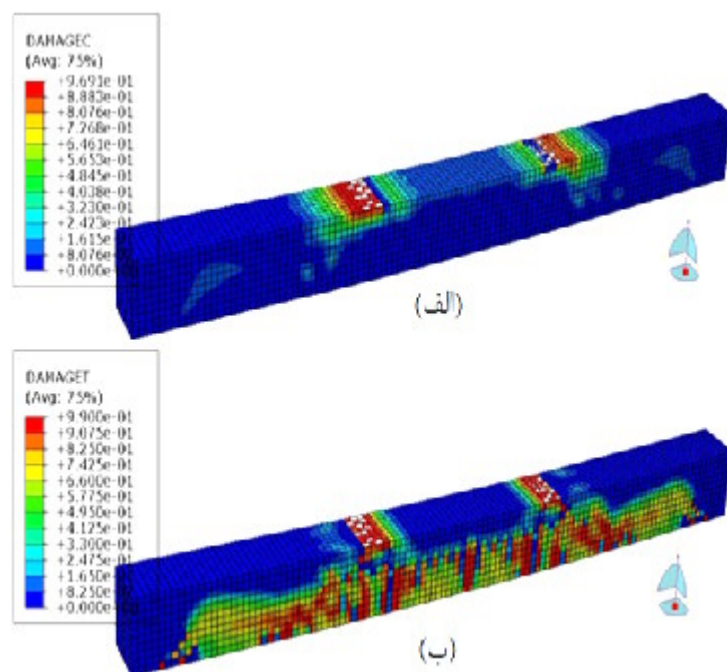
از خروجی‌های مدل، منحنی‌های بار (نیرو)-جابه‌جایی، برای تیرهای کنترلی و تیرهای تقویت شده با CFRP توسط نرم‌افزار در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند که در آن‌ها، مقادیر جابه‌جایی، تغییر مکان‌های عمودی وسط دهانه تیرها می‌باشند. با مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی عمودی وسط دهانه تیر حاصل از تحلیل، تیر در نرم‌افزار و همچنین نتایج آزمایشگاهی میزان دقت و صحت مدل سازی با نرم‌افزار سنجیده شده است.

برای کلیه تیرها، مشاهده شده است که این مقادیر، بجز در ناحیه الاستیک، بخوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند. این اختلاف با جواب تجربی در ناحیه الاستیک که به صورت کرنشهای کمتر در منحنی مدل ظاهر شده است و نمایانگر سختی بیشتر تیر و در واقع شکل‌پذیری کمتر مدل است را می‌توان ناشی از خطای آزمایش و یا در نظر نگرفتن لغزش بین بتن و آرماتورها و همچنین نحوه تعریف رفتار بین تیر با جک هیدرولیکی و تیر با

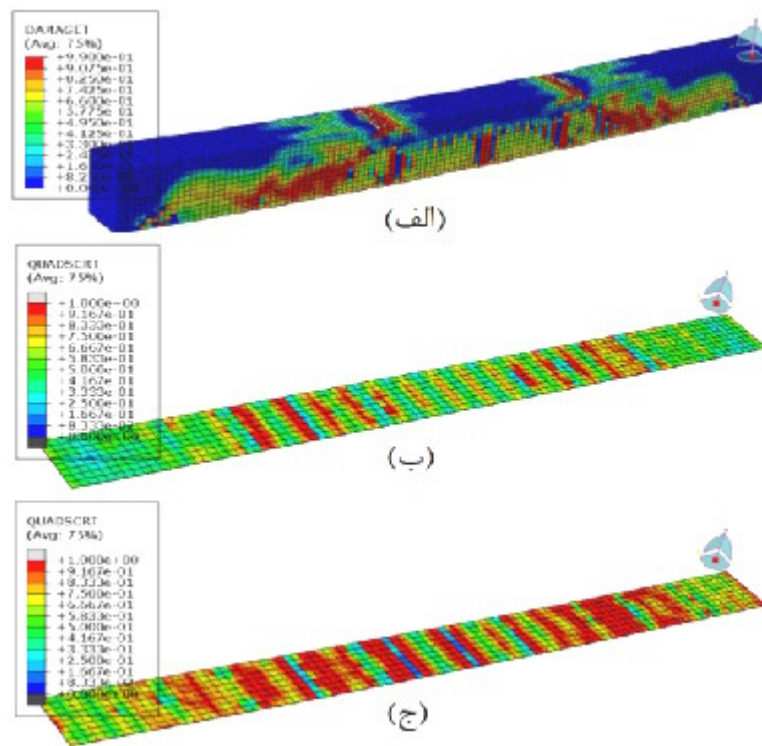
حالات گسیختگی تیرهای تقویت‌نشده و تقویت‌شده با نتایج آزمایشگاهی انطباق مناسبی داشته‌اند.



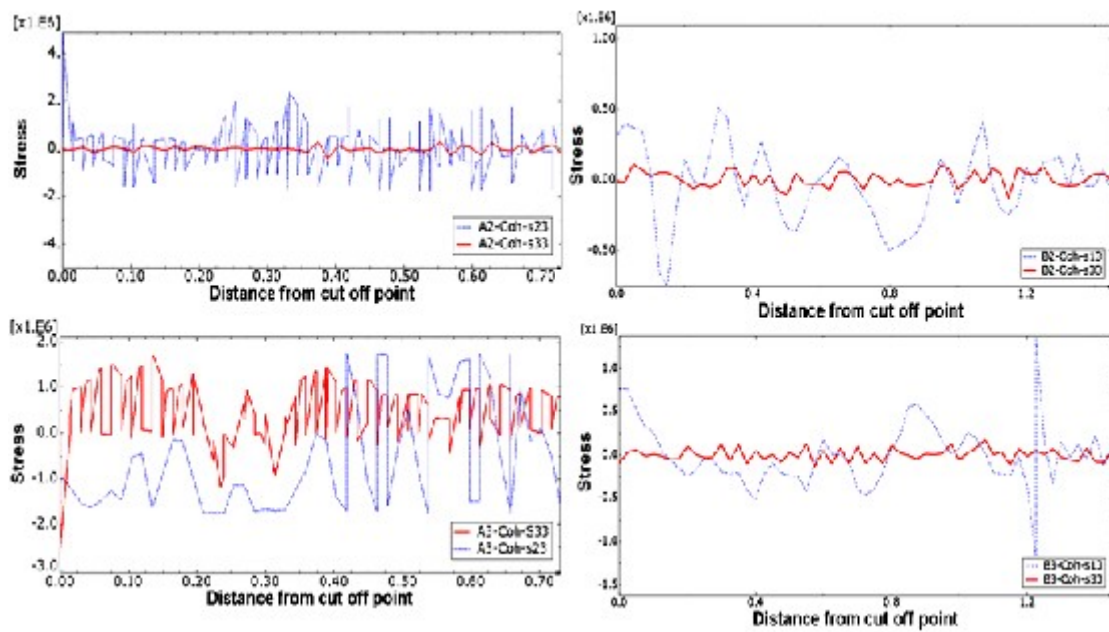
شکل ۱۱- منحنی نیرو- جابه‌جایی (تغییر مکان وسط دهانه) تیرهای گروه A و B



شکل ۱۲- نحوه گسیختگی در تیرهای تقویت‌نشده (A1 و B1 الف) خرابی فشاری بتن (ب) خرابی کششی بتن



شکل ۱۳- نحوه گسیختگی در تیرهای تقویت شده (A2, A3, B2 و B3)



شکل ۱۴- توزیع تنش برشی در لایه چسب در CFRP در تیرهای سری A و B در لحظه بار ماکزیمم

۳-۳- تنش های نرمال و برشی در لایه چسب

با مقایسه ی نمودارهای تنش نرمال و برشی در لایه چسب (شکل ۱۴) مشاهده می شود که مقادیر تنش برشی به خصوص در نقاط ترک خوردگی ها بسیار بیشتر از مقادیر تنش نرمال است. در محل ترک خوردگی ها، منحنی های تنش نرمال و برشی دارای اعوجاج زیادی می باشند. بررسی "خرابی ها" از Abaqus در نقاط بار نهایی نشان می دهد که ترک ها به طور گسترده ای بر روی سطح تیر شکل گرفته اند که ناشی از تنش های برشی، در محل جداشدگی صفحه CFRP می باشند.

۳-۴- توزیع تنش و کرنش کششی

در شکل (۱۵) توزیع کرنش کششی در CFRP در بار نهایی، حاصل از نتایج آنالیز اجزاء محدود (FEA) و کرنش های اندازه گیری شده CFRP در آزمایشات را با یکدیگر نشان می دهند. کرنش کششی CFRP، کرنش در راستای طولی CFRP در میانه ی عرضی و در جهت الیاف طولی آن است. مقادیر کرنش کششی بدلیل تقارن برای نیمی از CFRP در شکل CFRP (۱۵) ترسیم شده است. به طور کلی، دیده می شود که FEA، نتایج آزمایشگاهی را به طور رضایت بخشی پیش بینی کرده است. همچنین شکل ها نشان می دهد که کرنش های CFRP در ناحیه ی با خمش ثابت، دارای بالاترین مقادیر و تقریباً ثابت می باشند - بدلیل ممان خمشی ثابت؛ $\epsilon(x) \propto M(x)$ - و با نزدیک شدن به انتهای صفحه CFRP این مقدار کاهش می یابد تا به عدد صفر برسد. نحوه توزیع تنش کششی (تنش در راستای الیاف) در CFRP در امتداد صفحه CFRP در نقطه بار نهایی، در شکل (۱۶) نشان داده شده است. شکل (۱۷) توزیع متقارن این تنش ها

در صفحه CFRP را نمایش می دهد، به این منظور توزیع این تنش ها در نمودارهای رسم شده تا میانه دهانه تیر نمایش داده شده است. مقادیر تنش کششی CFRP از لبه ی صفحه به سمت میانه ی تیر افزایش می یابد و در مناطق خمشی خالص این مقادیر مقدار تقریباً ثابتی دارند. بطور خلاصه از آنالیزهای عددی و صحت سنجی آن ها با نتایج آزمایشگاهی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با صفحه CFRP در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شده است:

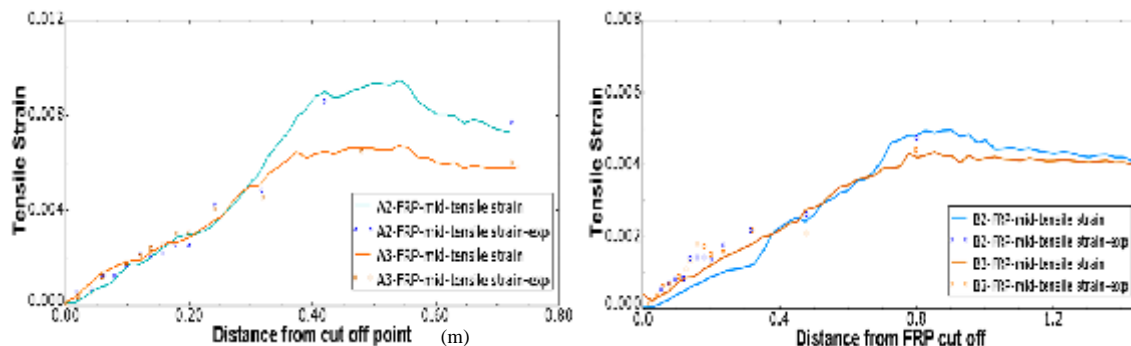
- از مهمترین نتایج حاصل از مدلسازی لایه چسب در این تحقیق، ارائه مدلی برای پیش بینی ظرفیت خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با صفحات CFRP در حالت گسیختگی زودرس با درصد خطای قابل قبول می باشد.

- همچنین مدل ارائه شده قادر به پیش بینی رفتار سطح مشترک بتن/CFRP در ناحیه پلاستیک بوده است.

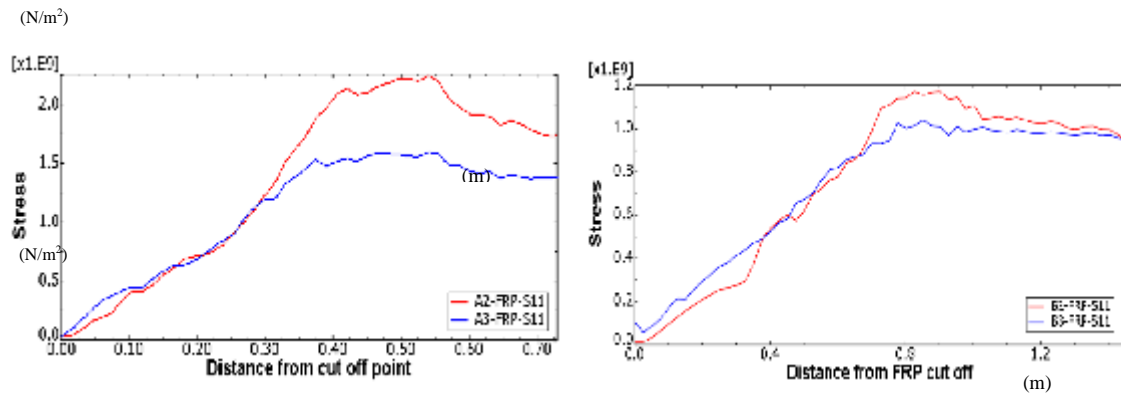
- مدل ارائه شده، به خوبی بارهای نهایی و حالات گسیختگی تیرها را نموده است.

- یا تعریف رفتار چسب برای سطح مشترک FRP و بتن، مدل FE ارائه شده قادر به نمایش توزیع تنش ها و کرنش ها در چسب می باشد.

- مقادیر تنش برشی مخصوصاً در نقاط ترک خوردگی ها بسیار بیشتر از مقادیر تنش نرمال بوده است. بررسی خرابی ها از Abaqus در نقاط بار نهایی نشان می دهد که ترک ها به طور گسترده ای بر روی سطح تیر شکل گرفته اند که ناشی از تنش های برشی، در محل جداشدگی صفحه CFRP می باشند.



شکل ۱۵- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و FEM توزیع کرنش کششی تیرهای سری A و B در لحظه بار ماکزیمم



شکل ۱۶- نمایش توزیع متقارن تنش کششی در صفحه CFRP در تیرهای گروه A و B



شکل ۱۷- نمایش توزیع متقارن تنش کششی در صفحه CFRP

۴ - مراجع

- [8]. Morita, S., Kaku, T. "Local bond stress-slip relationship under repeated loading" Symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated load, Preliminary report, international association of bridge structure engineering, Lisbon symposium, 221-227, 1993.
- [۹]. نوذرتاش، فرهود، دانشگری، فارس "بررسی مدل اجزای محدود کامپیوتری تقویت خارجی تیرهای بتن مسلح با ورقه های کامپوزیت FRP"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.
- [۱۰]. محمدی، طیه، اصفهانی، محمدرضا "بررسی رفتار تیرهای خمشی بتن مسلح تقویت شده با ورقهای FRP با استفاده از مدل آسیب دیدگی پلاستیک بتن"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [11]. Lu XZ, Ten JG, Ye LP, Jaing JJ "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete" Eng Struct, 24(5), 920-37, 2005.
- [1]. Mukhopadhyaya, P. Swamy, RN. "Interface shear stress: a new design criterion for plate debonding", Journal of Composites Construct, ASCE, 5, 35-43, 2001.
- [2]. Kok, L. "Effect of beam size & FRP thickness on interfacial shear stress concentration & failure mode in FRP strengthened beam" MS thesis, Singapor, 2004.
- [3]. Hansen, E., Willam, K., Carol, I. "A two-surface anisotropic damage/plasticity model for plain concrete" Proc. Francos-4 Conf. Paris Fracture Mechanics of Concrete Materials, 549-556, Rotterdam, 2001.
- [4]. Abaqus Theory manual and user manual and Example Manual Version 6.10. Providence, 2010.
- [5]. Taqieddin, ZN. "Elasto-Plastic and Damage Modeling of Reinforced Concrete" Ph.D. dissertation, Dept. Civil & Environmental Engineering, Louisiana State Univ. Baton Rouge LA, 2008.
- [6]. Abaqus V6.10 Manuals Providence, Dassault Systemes. 2010
- [7]. Obaidat, Y.T., Heyden, S., Dahlblom, O. "The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modeling retrofitted RC beams with FEM" Journal of Composite Structures, 92, 1391-1398, 2010.

The Modeling of Epoxy Layer for Prediction of Debonding at FRP-Strengthened Rc Beams

H. Varastehpor

Assistant professor of Civil Engineering, Institute for Energy & Hydro Technology

A. Soleimanikia*

Civil structural engineer, Institute for Energy & Hydro Technology

(Received: 2014/6/9 - Accepted: 2015/4/29)

Abstract

Bonding of fiber reinforced polymers (FRP) with epoxy layer has considered as a new structural strengthening technology in response to need for repair and strengthening of reinforced concrete structures and propagated in the last decade. Although epoxy bonding of FRP has many advantages, there is a common problem; before receiving the expected flexural capacity, most of the failure modes of these beams occur in a brittle manner, without any serious indication. The most commonly reported failure modes include ripping of the concrete cover and interfacial debonding. In the most researches who have studied the behavior of retrofitted structures, the effect of the interfacial behavior has been ignored. Proper prediction of flexural capacity of FRP strengthened of concrete beams in debonding modes is led to economical benefits in projects.

In this article, the results have been verified with 6 beams in laboratory that have been loaded in two symmetric points load and divided to groups A and B. The beams had the same section, length and number of CFRP layer in each group, but thickness of CFRP was different. A nonlinear modeling with Finite Element (FE) method with the help of Abaqus is done, for investigation of real behavior of CFRP strengthened concrete beams and interfacial shear stresses concentration at CFRP cut off region, with presenting the failure theory and criterion and a method for cohesive layer simulation. Moreover the FE results are verified with an accurate experimental test results. The FEM results agreed well with the experiments, when using the cohesive model regarding failure modes, load capacity, force-displacement curves results and CFRP strains.

Keywords: Flexural capacity, Debonding, FRP, Epoxy layer, Abaqus

* Corresponding author: amene.kia@gmail.com