

مدل‌سازی جداشدگی بین بتن و ورق FRP در تیرهای بتن مسلح تقویت شده به روش اجزای محدود

داود مستوفی نژاد و سید جلیل حسینی*
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۳/۰۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۲/۱۱)

چکیده -

ABAQUS

FRP

واژگان کلیدی:

Modeling FRP–Concrete Interface Debonding in Strengthened Reinforced Concrete Beams Using Finite Element Method

D. Mostofinejad and S. J. Hoseini

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: Reinforced concrete (RC) beams strengthened in flexure with a bonded fiber-reinforced polymer (FRP) plate may fail by debonding mechanism, in which the FRP plate is detached from the beam surface in lower levels of ultimate strain of FRP. This paper presents a new method based on the smeared crack approach for finite element simulation of debonding process. For this purpose, first the problems involved in numerical simulation of debonding were investigated. Then, a technique based

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: civil.hoseini@gmail.com

on cohesive elements implied in the software was used. To evaluate the proposed technique, 4 experimental RC beams strengthened with FRP plates were modeled. The results showed that the predicted ultimate loads and the whole behavior of the beams under the loads were in very good agreement with experimental data.

Keywords: Flexural strengthening, Debonding, Fiber reinforced polymer (FRP), Reinforced concrete, Finite element method.

تنش برشی در جهت s اعمالی روی دو سطح واقع شده در دو طرف جزء چسبیده	t_s (MPa)	عرض تیر بتنی	b_c (mm)
تنش برشی در جهت t اعمالی روی دو سطح واقع شده در دو طرف جزء چسبیده	t_t (MPa)	عرض ورق تقویتی	b_p (mm)
ضریب شکل ورق	β_w	تنش ترک خوردگی بتن	f_t (MPa)
تنش برشی ایجاد شده روی سطح ورق	τ (MPa)	انرژی گسیختگی واحد سطح	G_f (N/mm)
حداکثر تنش برشی ایجاد شده روی سطح ورق و تنش برشی وقوع جداشدگی	τ_{max} (MPa)	سطح زیر منحنی تنش-کرنش بتن	G_f^c (MPa)
حرکت نسبی عمودی دو سطح واقع شده در دو طرف جزء چسبیده نسبت به یکدیگر	δ_n (mm)	شیب نمودار تنش برشی-تغییر مکان نسبی قبل از جدا شدگی	k_{ss}
حرکت نسبی افقی در جهت s دو سطح واقع شده در دو طرف جزء چسبیده نسبت به یکدیگر	δ_s (mm)	تغییر مکان نسبی بین تیر و ورق	s (mm)
حرکت نسبی افقی در جهت t دو سطح واقع شده در دو طرف جزء چسبیده نسبت به یکدیگر	δ_t (mm)	حداکثر تغییر مکان نسبی ورق نسبت به تیر	s_f (mm)
		تغییر مکان نسبی متناظر با تنش برشی ماکزیمم در ورق	s_0 (mm)
		تنش عمودی اعمالی روی دو سطح واقع شده در دو طرف جزء چسبیده	t_n (MPa)

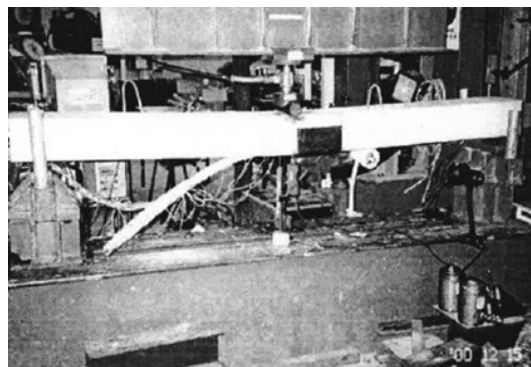
هست. بزرگترین عیب استفاده از این نوع ورق‌ها، وقوع مکانیسم‌های گسیختگی جدا شدگی است. منظور از جدا شدگی، جدا شدن ورق از تیر در مرحله‌ای از اعمال بار است که هیچ‌یک از اعضای عضو، شامل بتن و ورق، آسیب جدی ندیده‌اند و کماکان قابلیت باربری دارند، شکل (۱).

به‌طور کلی مکانیسم‌های جدا شدگی را می‌توان بر اساس محل آغاز، به دو دسته‌ی جدا شدگی انتهای دهانه و جدا شدگی وسط دهانه تقسیم بندی کرد. این دو دسته علاوه بر محل شروع جدا شدگی، در علل پیدایش نیز با یکدیگر تفاوت دارند.

علت وقوع گسیختگی انتهای دهانه، ظهور ترک‌های ایجاد شده بر اثر قطع یک‌باره‌ی ورق است. به عبارت دیگر، قطع

۱- مقدمه

نظر به این‌که، هم اکنون از عمر بسیاری از سازه‌های موجود بیش از ده‌ها سال می‌گذرد، مقاوم سازی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی مهندسان سازه، تبدیل شده است. برای مقاوم سازی روش‌های مختلفی وجود دارد که انتخاب از میان آن‌ها به موارد زیادی بستگی دارد؛ ولی به علت خصوصیات منحصر به فرد پلیمرهای مسلح کننده‌ی الیافی، استفاده از آن‌ها به‌صورت میلگردهای درون سطحی و ورق‌های خارجی برای تقویت سازه‌های بتن آرمه، تبدیل به یکی از متداول‌ترین روش‌های مقاوم سازی شده است [۱]. با وجود جنبه‌های مثبت استفاده از ورق‌هایی از جنس پلیمرهای مسلح کننده‌ی الیافی، استفاده از آن‌ها دارای نقاط ضعفی نیز



شکل ۱- وقوع جدا شدگی بین تیر و ورق [۱۱]

اول که روش ترک‌های مجزا^۱ نام دارد، روال کار بدین صورت است که اگر اجزا به شرایط ترک خوردگی رسید، جزء موازی با صفحه‌ی ترک خوردگی به دو قسمت تقسیم شده و در دو طرف، درجه‌های آزادی جدیدی تعریف می‌شود. در روش دوم، بر خلاف روش اول، جزء بعد از ترک خوردگی به قسمت‌های مجزا تقسیم نمی‌شود؛ اما سختی جزء کاهش می‌یابد و بدین ترتیب اثرات ترک خوردگی لحاظ می‌شود. این شیوه، روش ترک‌های هاله‌ای^۲ نام دارد [۳].

روش ترک‌های مجزا، نیاز به انجام شبکه بندی مجدد در طی حل دارد. به همین علت حجم محاسبات مورد نیاز این روش، بسیار زیاد است و در نتیجه استفاده از آن مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی زیادی است.

به علت وجود عواملی که در بالا مطرح شد، از روش ترک‌های مجزا معمولاً در مدل‌سازی کلی یک سازه استفاده نمی‌شود [۳]. ولی می‌توان از این روش در شبیه‌سازی جدا شدگی استفاده کرد [۳]. به عبارت دیگر، در بسیاری از مطالعات، با وجود این‌که ترک خوردگی بتن به صورت هاله‌ای در نظر گرفته می‌شود، در سطح بین ورق و بتن که سطح بین لایه‌ای نامیده می‌شود، از نوعی جزء خاص استفاده می‌شود که در شرایطی که از قبل تعریف شده، ارتباط بین درجات آزادی اجزای ورق و چسب را از بین می‌برد و جدا شدگی را در مدل القا می‌کند. در حقیقت، از روش ترک‌های جدا شده در محل خاصی از مدل استفاده می‌شود. مطالعات مختلف توانایی این روش را نشان داده، اما استفاده از ترک‌های جدا شده حتی در قسمت‌های محدودی از سازه، باز هم باعث ایجاد حجم محاسبات بالا و مشکلات عددی زیادی می‌شود. به همین علت در بعضی از مطالعات، جدا شدگی با کاهش سختی اجزای واقع در سطح بین لایه‌ای القا می‌شود [۳]. بدیهی است که ترک خوردگی سطح میانی که منجر به جدا شدگی می‌شود، در حالت اول به صورت ترک‌های جدا شده؛ و در حالت دوم به صورت ترک‌های هاله‌ای

کامل ورق در یک محل، باعث ایجاد تمرکز تنش شدیدی در انتهای ورق می‌شود؛ بر اثر این تمرکز تنش، ترک‌هایی شکل می‌گیرند که توسعه‌ی آن‌ها منجر به وقوع جدا شدگی می‌شود [۱].

به طور کلی هر دو نوع جدا شدگی در مطالعات تجربی به وفور دیده شده‌اند [۱ و ۲]. اما تمرکز اصلی این مطالعه بر جدا شدگی وسط دهانه است. زیرا به نسبت تحقیقات کم‌تری در این زمینه انجام شده است. علاوه بر این با توجه به ماهیت و نحوه‌ی ایجاد آن، به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی عددی این نوع مکانیسم به روش‌های معمول چالش مهندسی جدی‌تری است و نیاز به استفاده از تکنیک‌های پیچیده‌تری دارد. علت و رفتار وقوع این نوع جدا شدگی در قسمت چهارم مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی شبیه‌سازی

جدا شدگی در مدل سازی اجزای محدود

برای توضیح شیوه‌های شبیه‌سازی جدا شدگی به روش اجزای محدود، نیاز است که در ابتدا روش‌های شبیه‌سازی رفتار بتن در مدل‌سازی اجزای محدود به طور مختصر توضیح داده شود. همان‌طور که مشخص است؛ مهم‌ترین جنبه‌ی رفتاری بتن، ترک خوردگی آن تحت کشش است. به دو شیوه می‌توان اثرات ترک خوردگی را در مدل لحاظ کرد. در روش

شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه به مرور مطالعات هر دو دسته می‌پردازیم.

هو و همکاران در سال ۲۰۰۱ با استفاده از نرم افزار تجاری ABAQUS و با در نظر گرفتن معیار پلاستیسیته‌ی موهر-کولمب برای بتن و مدل سازی سطح بین لایه‌ای با استفاده از اجزایی که ترک خوردگی را به شیوه‌ی ترک‌های هاله‌ای در نظر می‌گرفتند (کاهش سختی)، جدا شدگی را شبیه سازی کردند [۴]. روش مورد استفاده توسط آن‌ها با وجود آن‌که به حجم محاسبات معقولی نیاز داشت، ولی در مقایسه با روش‌های دیگر دقت چندانی نداشت.

در همان سال رحیمی و هوتچینسون، با استفاده از نرم افزار تجاری LUSAS نمونه‌هایی را که خود مورد آزمایش قرار داده بودند، مدل سازی کردند. آن‌ها اولین نفراتی بودند که برای شبیه سازی رفتار بتن در تیرهای بتنی تقویت شده از روش پلاستیسیته‌ی آسیب^۳ استفاده کردند. برای سطح میانی نیز از اجزایی استفاده کردند که جدا شدگی را با استفاده از کاهش سختی مدل‌سازی می‌کرد (ترک‌های هاله‌ای) [۵].

کاماتا و همکاران در سال ۲۰۰۴ با در نظر گرفتن اجزای خاصی در سطح بین لایه‌ای و مناطق خاصی از مدل، در تحلیل اجزای محدود غیر خطی تیرهای تقویت شده، موفق به شبیه سازی جدا شدگی شدند. این اجزاء مطابق روش ترک‌های جدا شده عمل می‌کنند؛ بدین صورت که با رسیدن به وضعیت تنش معرفی شده توسط کاربر، ارتباط درجات آزادی دو طرف اجزا از بین می‌رود و ترک واقعا شکل می‌گیرد [۶].

در سال ۲۰۰۵ وو و همدان با استفاده از نرم افزار تجاری DIANA و با در نظر گرفتن معیار پلاستیسیته‌ی دراگر-پراگر برای بتن، سعی در مدل سازی جدا شدگی ورق و بتن کردند. اجزای مورد استفاده برای سطح میانی به صورت یک بعدی بودند. به عبارت دیگر بین اجزای بتن و ورق، در سه راستای عمود بر هم سه فنر قرار می‌گیرند که سختی آن‌ها با رسیدن تنش به تنش حداکثر تعیین شده، صفر می‌شود؛ و ورق و تیر از یک‌دیگر جدا می‌شوند [۶].

در همان سال آرام و همکاران در تحلیل اجزای محدود، چسب بین تیر و ورق را با استفاده از جزء با رفتار بتن مدل-سازی کردند. تنش ترک خوردگی این لایه، برابر با تنش تحمل‌پذیر بتن معرفی شد. طبیعی است که این لایه در حداکثر تنش قابل تحمل چسب ترک می‌خورد و سختی خود را از دست می‌دهد و بدین ترتیب جدا شدگی شبیه سازی می‌شود [۷].

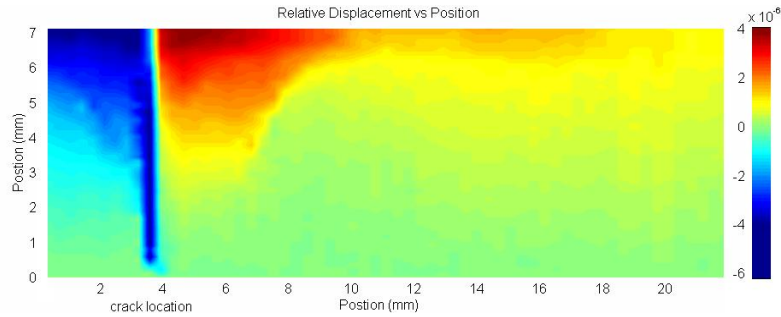
لو و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از نرم افزار تجاری MSC.MARC سعی در مدل‌سازی جدا شدگی کردند. شیوه‌ی کار آن‌ها برای مدل‌سازی سطح میانی مانند روش هو و همدان، استفاده از فنرهایی در راستاهای عمود بر هم در سطح میانی است. رفتار این فنرها از رابطه‌ای که لو برای تعیین رفتار سطح میانی ارائه کرده است، تعیین می‌شود [۸].

در سال ۲۰۰۸ عبدال باکی تنها با مدل سازی بتن به شیوه‌ی ریز صفحه^۴ و بدون در نظر گرفتن جزء خاصی برای سطح بین لایه‌ای، توانست جدا شدگی را به صورت دقیق شبیه سازی کند. در شبیه سازی رفتار بتن با استفاده از ریز صفحه، رفتار ماده بر مبنای روش ترک‌های جدا شده شبیه سازی می‌شود؛ بنابراین طبیعی است که نیاز به انجام محاسبات بسیار زیادی است [۹].

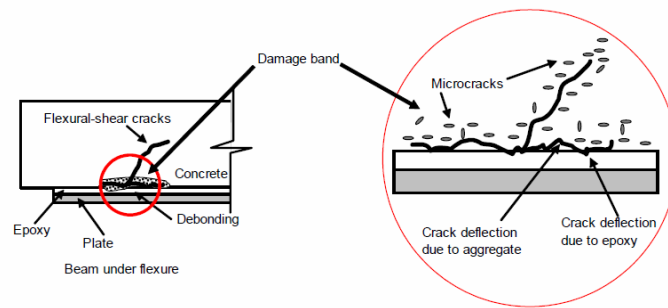
در سال ۲۰۱۰ لو و ایوب، با توسعه‌ی یک جزء تیر غیر خطی که قادر به لحاظ کردن رابطه غیر خطی تنش برشی بین لایه‌ای-لغزش (تغییر مکان نسبی ورق FRP و بستر تیر بتنی) توانستند با دقت قابل قبولی بار و تغییر مکان وقوع جدا شدگی را پیش بینی کنند. آن‌ها ثابت کردند که پارامترهایی نظیر مقاومت چسبندگی بین بتن و ورق FRP، مقاومت بتن، ابعاد ورق، مدول الاستیسیته‌ی FRP بر بار و تغییر شکل وقوع جدا شدگی تاثیر گذارند [۱۰].

۳- سازوکار وقوع جدا شدگی وسط دهانه

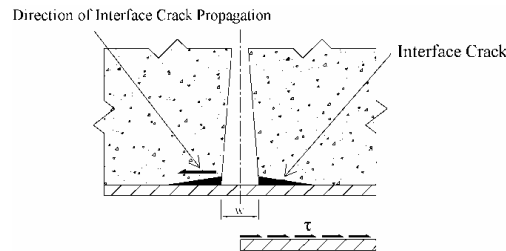
جدا شدگی وسط دهانه معمولا از یک ترک خمشی و یا یک ترک خمشی- برشی آغاز می‌شود و به طرف انتهای تیر



شکل ۲- طیف تغییر مکان افقی نقاط در محل یک ترک [۱۰]



شکل ۳- ساز و کار ایجاد ترک میانی [۱۰]



شکل ۴- گسترش ترک سطح میانی

برابر مقاومت برشی بتن است، و معمولاً چسب چند میلی‌متر در بتن نفوذ می‌کند، این تمرکز تنش برشی باعث ایجاد ریز ترک‌هایی در بستر تیر و در نزدیکی سطح میانی چسب و بتن می‌شود شکل (۳) با گسترش و به هم پیوستن این ریز ترک‌ها در سطح میانی بتن و ورق، ترکی موازی محور تیر شکل می‌گیرد، شکل (۴). این ترک با افزایش بار گسترش می‌یابد تا نهایتاً به انتهای تیر برسد و باعث جدا شدگی کامل ورق از

ادامه می‌یابد. در شکل (۲) وضعیت جا به جایی نسبی نقاط در جهت افقی در موقعیت یک ترک که به کمک پردازش تصویر به دست آمده، نمایش داده شده است [۱۰]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در محل ترک بر اثر باز شدگی آن، شاهد تغییر مکان شدیدی هستیم. این تغییر مکان باعث به وجود آمدن تمرکز تنش شدیدی در سطح میانی بتن و چسب می‌شود. به علت این‌که تنش برشی نهایی چسب چند

بستر تیر بتنی شود. با توجه به توضیحات بالا، محل تشکیل ترک مورد بحث چند میلی‌متر از سطح میانی بالاتر است. به همین دلیل بعد از جدا شدگی معمولاً مشاهده می‌شود که یک لایه بتن با ضخامتی در حدود ۳ میلی‌متر به ورق چسبیده است [۱۱]. به باری که در آن ترک سطح میانی پدیدار می‌شود، بار آغاز جدا شدگی؛ و به باری که در آن ورق به صورت کامل از تیر جدا می‌شود، بار نهایی جدا شدگی اطلاق می‌شود. اختلاف این دو بار بستگی به کیفیت چسبندگی بین بتن و ورق دارد؛ اما معمولاً این دو بار بسیار به هم نزدیک‌اند [۱۲].

مکانیسم‌های گسیختگی جدا شدگی وسط دهانه بر اساس ماهیت ترک‌های ایجاد کننده، به دو دسته‌ی جدا شدگی بر اثر ترک خمشی میانی^۵ و جدا شدگی بر اثر ترک قطری بحرانی^۶ تقسیم بندی می‌شوند [۱]. واضح است که ترک ایجاد کننده‌ی مکانیسم‌های دسته‌ی اول، تنها بر اثر تنش‌های محوری؛ و ترک ایجاد کننده‌ی دسته‌ی دوم مکانیسم‌ها، به علت بر هم کنش تنش‌های محوری و برشی شکل گرفته‌اند [۱].

۴- روش پیشنهادی شبیه سازی جدا شدگی

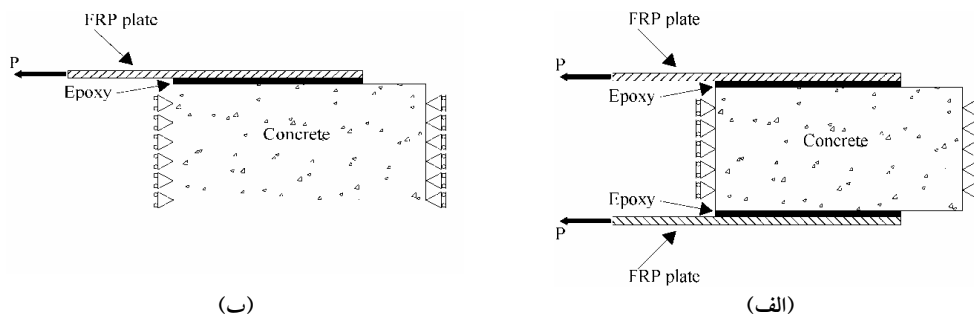
برای این‌که جدا شدگی ورق مانند آنچه که در واقعیت رخ می‌دهد، در مدل سازی عددی نیز شبیه سازی شود، مطابق بحث گذشته، باید در اجزای بتن مجاور لایه چسب، ترکی موازی با محور تیر و در فاصله‌ی حدود ۳ میلی‌متری از مرز بتن و چسب پدیدار شود و وابستگی بین درجات آزادی اجزای ورق را با درجات آزادی بتن از بین ببرد. بنابراین باید روشی پیدا کنیم که ترک مورد بحث به موقع و در مکان مناسب ظاهر شود.

مطابق بحث‌های قبل، برای شبیه سازی جدا شدگی باید در مدل اجزای محدود دو شرط عمده برقرار باشند. اول این‌که تنش‌هایی که بر سطح بین لایه‌ای وارد می‌شوند و عامل ایجاد ترک بین لایه‌ای هستند، به درستی در مدل اجزای محدود ایجاد شوند؛ و دیگر این‌که رفتار سطح بین لایه‌ای در

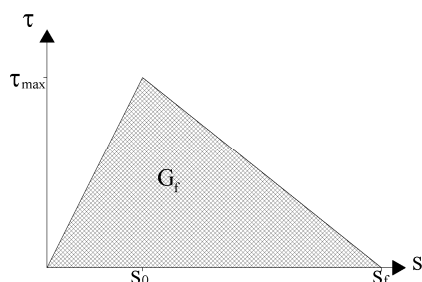
مقابل این تنش‌ها حقیقی باشد و ترک بین لایه‌ای به موقع شکل بگیرد. حال باید به بررسی روش‌های برقراری این شروط پردازیم.

بر اساس مباحثی که در قسمت قبل مطرح شد، تنش‌هایی که باعث ایجاد جدا شدگی می‌شوند، بر اثر باز شدن ترک‌های خمشی و خمشی- برشی ایجاد می‌شوند. بنابراین اگر باز شدگی ترک به صورت صحیح به وقوع بپیوندد، تنش‌های اعمالی بر سطح بین لایه‌ای نیز مطابق با واقعیت خواهند بود. بر اساس مطالعات چن و عبدل باکی، برای صحیح بودن شبیه سازی باز شدگی ترک در مدل اجزای محدود بتن به روش ترک‌های هاله‌ای، اندازه‌ی اجزا ۱ باید از سه برابر اندازه‌ی متوسط سنگ دانه‌ها کوچک‌تر باشد [۹ و ۱۱]. در نتیجه برای مدل‌سازی صحیح جدا شدگی، در نظر گرفتن این موضوع الزامی است. به همین دلیل در مطالعه‌ی حاضر بزرگ‌ترین بعد اجزا به ۲۵ میلی‌متر محدود شده است. البته لازم به توضیح است که در شبیه سازی رفتار بتن به روش‌های دیگر (نظیر شیوه‌ی ترک‌های جدا شده) ممکن است نیازی به در نظر گرفتن این شرط نباشد.

شرایط برای برقراری شرط دوم بسیار پیچیده‌تر از شرط اول است. مطابق مطالعات انجام گرفته در مرجع [۱۳]، در مدل‌های اجزای محدودی که برای مدل سازی رفتار بتن از روش ترک‌های هاله‌ای استفاده می‌کنند، این شرط برقرار نیست و برای شکل‌گیری ترک بین لایه‌ای باید تمهیدات خاصی در نظر گرفته شود. علت این موضوع وابستگی شکل‌گیری ترک بین لایه‌ای به خواص ریز سازه‌ای بتن است. به عبارت دیگر ترک خوردن سطح بین لایه‌ای تابعی از ساختار ریز سازه‌ای و خواص میکروسکوپی بتن است، در حالی که پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی بتن در شبیه سازی اجزای محدود به روش ترک‌های هاله‌ای، مانند تنش ترک خوردگی، نمودار تنش- کرنش تحت فشار و ... همگی جز پارامترهای ماکروسکوپی‌اند. طبیعی است که این روش مدل‌سازی قادر به شبیه سازی رفتار میکروسکوپی بتن نیست



شکل ۵- (الف) آزمایش کشش مستقیم یک لایه؛ (ب) آزمایش کشش مستقیم دو لایه [۱۳]



شکل ۶- رابطه $\tau-s$ دو خطی

علت اصلی جدا شدگی وسط دهانه، صرف‌نظر از نوع آن، تمرکز تنش برشی شدید ایجاد شده در سطح بین لایه‌ای به علت باز شدگی ترک‌هاست. بنابراین برای مدل‌سازی، رفتار سطح بین لایه‌ای تحت برش باید مورد مطالعه قرار گیرد. مهم‌ترین جنبه رفتار برشی سطح بین لایه‌ای، رابطه بین تنش برشی اعمالی (τ) و حرکت نسبی سطح بین لایه‌ای و ورق (s) است که اصطلاحاً لغزش نامیده می‌شود.

این رابطه را می‌توان با استفاده از آزمایشات برش مستقیم تعیین کرد، شکل (۵). نحوه انجام آزمایش بدین صورت است که بلوک بتنی ثابت نگاه داشته می‌شود و در هر پله زمانی تغییر مکان انتهای ورق افزایش می‌یابد (آزمایش به-صورت کنترل جابه‌جایی انجام می‌شود)؛ تا نهایتاً ورق از بلوک بتنی جدا شود. در این آزمایش نیز مانند نمونه‌های تحت خمش، یک ترک به موازات ورق در نزدیک سطح چسب به وجود می‌آید که گسترش آن منجر به جدا شدگی

و در نتیجه مدل توانایی شبیه‌سازی پدیده‌هایی که منشاء آن‌ها ساختار ریز سازه‌ای بتن هستند را ندارد. بنابر بحث بالا برای شبیه‌سازی جدا شدگی در مدل اجزای محدود معمولی بتن، رفتار سطح بین لایه‌ای باید به صورت مصنوعی و مستقل از رفتار بتن و چسب در محاسبات القا شود. به عبارت دیگر به جای مدل‌سازی چسب و چند میلی‌متر بتن مجاور آن (منظور همان ضخامتی از بتن است که همراه با ورق جدا می‌شود) که در بخش‌های قبلی سطح بین لایه‌ای نامیده شد، به شیوه معمول، باید از جزیی استفاده کرد که رفتار آن مطابق رابطه واقعیت باشد. در نرم افزار ABAQUS جزیی وجود دارد که این مسئله را ممکن می‌سازد؛ این جزء که جزء چسبیده^۷ نامیده می‌شود، در واقع رفتار دو سطح را نسبت به یکدیگر تعریف می‌کند [۱۴].

۱-۵- رفتار سطح بین لایه‌ای

با توجه به بحث‌های گذشته می‌توان گفت که در واقع

$$\beta_w = \sqrt{\frac{(2.25 - \frac{b_p}{b_c})}{(1.25 + \frac{b_p}{b_c})}} \quad (چ-۱)$$

۵-۲- اجزای چسبنده و مقادیر مناسب برای

پارامترهای مربوطه

اجزای چسبنده بین دو سطح متفاوت قرار می‌گیرند و باعث ایجاد تنش روی سطوح، در صورت وجود تغییر مکان نسبی می‌شوند. خاصیت مهم این اجزا این است که می‌توان صریحاً رابطه بین تنش به وجود آمده و تغییر مکان نسبی را تعریف کرد. به علاوه این جزء قابلیت مدل سازی جدا شدگی بین سطوح را نیز داراست.

بدیهی است که دو سطح متفاوت نسبت به هم می‌توانند در یک جهت عمودی و دو جهت موازی مستقل حرکت کنند. این دو سطح در صورتی که در جهت عمودی حرکت کنند، بر هم تنش نرمال؛ و اگر در دو جهت موازی حرکت کنند، به هم تنش برشی اعمال خواهند کرد. به همین علت رفتار اجزای چسبنده در سه جهت به‌طور مستقل تعیین می‌شود. رابطه تنش و تغییر مکان نسبی در حالت خطی به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴]:

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (۲)$$

در رابطه بالا δ_n ، δ_s و δ_t تغییر مکان‌های نسبی دو سطح به ترتیب در جهت عمود و دو جهت موازی هستند. t_n ، t_s و t_t نیز به ترتیب تنش نرمال و تنش‌های برشی به وجود آمده در سطح بر اثر تغییر مکان نسبی اند. جهت s و t بر اساس قانون دست راست تعیین می‌شود؛ به صورتی که بردار یکه در جهت n از ضرب خارجی بردار یکه در جهت s در بردار یکه در جهت t به دست می‌آید. لازم به توضیح است که در این مطالعه، ورق تقویتی به گونه‌ای مدل سازی می‌شود که جهت الیاف در جهت s باشد، شکل (۷).

کامل ورق می‌شود. بنابراین در این آزمایش نیز عامل اصلی جدا شدگی، ترک به وجود آمده در لایه بین سطحی است [۱۱].

محققان مختلف با انجام تحلیل آماری روی نتایج این آزمایشات، سعی کرده‌اند که مدل‌هایی برای رابطه بین تنش برشی اعمالی (τ) و حرکت نسبی سطح بین لایه‌ای و ورق (s) ارائه دهند. این روابط به طور کلی از یک شاخه صعودی و یک شاخه نزولی تشکیل شده‌اند. بدیهی است که شاخه صعودی مربوط به قبل از جدا شدگی و شاخه نزولی مربوط به آغاز و تکمیل جدا شدگی است. بنابراین چهار پارامتر اساسی رابطه τ - s را توصیف می‌کنند. این پارامترها عبارت‌اند از تنش برشی حداکثر، τ_{max} ، لغزش آغاز جدا شدگی، s_0 ، لغزش نهایی، s_f ، و انرژی گسیختگی واحد سطح، G_f . این پارامترها برای یک رابطه دو خطی در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند. مطابق تحقیقات عبدل باکی و ساکسنا، رابطه پیشنهادی لو در میان بقیه روابط از دقت بهتری برخوردار است [۱۱ و ۱۳]. به همین دلیل در مطالعه‌ی حاضر از این رابطه استفاده می‌شود. این رابطه به صورت زیر مطرح می‌شود [۳]. در این روابط منظور از f_t ، b_c و b_p به ترتیب تنش ترک خوردگی، عرض تیر بتنی و عرض ورق تقویتی است. در این روابط واحد لغزش و طول میلی‌متر؛ واحد تنش و مدول الاستیسیته، مگا پاسکال؛ و واحد انرژی گسیختگی واحد سطح، نیوتن بر میلی‌متر است:

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_0} \right) \quad \text{if } s \leq s_0 \quad (۱-الف)$$

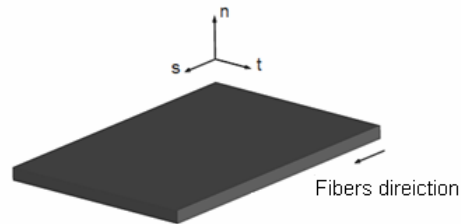
$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s_f - s}{s_f - s_0} \right) \quad \text{if } s > s_0 \quad (۱-ب)$$

$$\tau_{max} = 1.5 \beta_w f_t \quad (۱-پ)$$

$$s_0 = 0.0195 \beta_w f_t \quad (۱-ت)$$

$$G_f = 0.308 \beta_w^2 \sqrt{f_t} \quad (۱-ث)$$

$$s_f = \frac{2G_f}{\tau_{max}} \quad (۱-ج)$$



شکل ۷- معرفی جهات t, n, s

است. مطابق تحقیقات کرونادو رفتار در این جهت مستقیماً بر اساس رفتار بتن ارزیابی می‌شود [۱۱]، و در نتیجه مقدار k_{tm} برابر با مدول الاستیسیته‌ی بتن خواهد بود.

مشخص است که رابطه (۲) تا زمانی که جدا شدگی آغاز نشده، خطی است. بعد از آغاز فرایند جدا شدگی، مانند شکل (۸) رفتار دیگر خطی نیست و با افزایش تغییر مکان نسبی بین دو سطح، تنش کاهش پیدا می‌کند؛ تا این‌که نهایتاً تنش در تغییر مکان نهایی صفر شود و دو سطح از یک‌دیگر به‌صورت کامل جدا شوند.

برای القای جدا شدگی در محاسبات، نیاز است که دو دسته پارامتر برای این نوع جزء تعریف شود. دسته اول معیار آغاز جدا شدگی و دسته دوم سیر تکامل آن را تعیین می‌کنند [۱۴]. در این‌جا به‌طور خلاصه این دو دسته پارامتر را معرفی می‌کنیم.

الف) پارامترهای معرف معیار آغاز جدا شدگی: این دسته از پارامترها در واقع بیانگر شرطی هستند که تا قبل از وقوع آن رفتار خطی است؛ اما بعد از تحقق آن منحنی تنش-تغییر مکان نسبی وارد شاخه‌ی نزولی خود می‌شود. به دو روش می‌توان این شرط را معرفی کرد:

الف-۱) معیار تنش به‌صورت مستقل: در این روش فرایند جدا شدگی در هر جهت، زمانی آغاز می‌شود که تنش اعمالی در آن جهت به تنش حداکثر معرفی شده توسط کاربر برای آن جهت برسد [۱۴]:

$$\begin{cases} \frac{\langle t_t \rangle}{t_t^0} = 1 \\ \frac{|t_n|}{t_t^0} = 1 \\ \frac{|t_s|}{t_t^0} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه بالا t_t^0 ، t_t^0 و t_n^0 به ترتیب تنش‌های حداکثر معرفی شده در جهات نرمال و برشی هستند. علامت $\langle \rangle$ نمایش دهنده‌ی براکت ماکولای^۱ است که به‌صورت $\langle t_n \rangle = (t_n + |t_n|) / 2$ تعریف می‌شود [۱۴]. علت استفاده از

اگر مقادیر k_{nt} ، k_{st} و k_{ns} مساوی با صفر نباشند، تغییر مکان در یک جهت باعث ایجاد تنش در جهت دیگر خواهد شد. به‌عنوان مثال اگر ورق نسبت به بستر بتنی لغزش داشته باشد، در جهت عمودی نیز ورق به تیر تنش اعمال خواهد کرد. به همین علت این پارامترها برابر صفر منظور می‌شوند. مقدار k_{ss} نشان‌دهنده‌ی شیب نمودار تنش برشی-تغییر مکان نسبی قبل از جدا شدگی است؛ این پارامتر بر اساس مدل لو که در رابطه (۱) معرفی شد، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

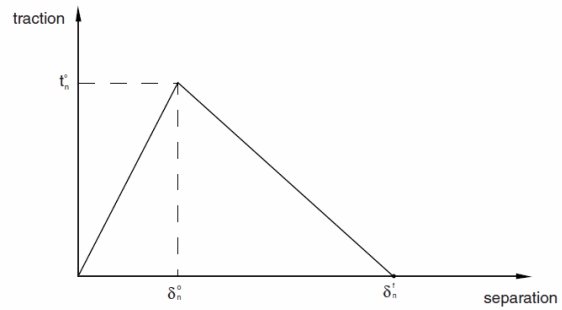
$$k_{ss} = \frac{\tau_{max}}{s_0} \quad (3)$$

تحقیقات چندانی برای رفتار در جهت t انجام نگرفته است. زیرا تنش‌های برشی ایجاد شده در این جهت بسیار کم هستند و تاثیر چندانی بر رفتار کلی مدل ندارند. در این مطالعه، رفتار در این جهت نیز مطابق رفتار در جهت s در نظر گرفته می‌شود.

لازم به توضیح است که در محاسبات بدون توجه به ضخامت هندسی این اجزا، ضخامت آن‌ها برابر واحد فرض می‌شود. بنابراین کرنش در جهت عمودی که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، برابر تغییر مکان نسبی عمودی خواهد بود [۱۴]:

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{t} \quad (4)$$

بدین ترتیب، در محاسبات مربوط به اجزای چسبنده منظور از تغییر مکان نسبی در جهت n (δ_n) همان کرنش محوری در جهت n (ε_n) است. بنابراین k_{mn} معرف شیب نمودار تنش محوری بین سطحی-کرنش محوری قبل از ترک خوردگی



شکل ۸- رابطه تنش بین سطحی - تغییر مکان نسبی با شاخه نزولی خطی [۱۳]

گرفته می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، مطابق مطالعات کرونا دو در جهت عمودی، رفتار سطح بین لایه‌ای مطابق با رفتار بتن است. بنابراین مقدار t_n^0 باید برابر با تنش ترک خوردگی بتن در نظر گرفته شود.

ب) پارامترهای معرف کاهش سختی جزء بعد از آغاز جدا شدگی: این پارامترها شامل دو دسته‌ی پارامتر سنجش کاهش سختی و پارامتر تعیین کننده‌ی الگوی کاهش سختی هستند [۱۴].

ب-۱) پارامتر سنجش کاهش سختی: اولین موردی که درباره‌ی کاهش سختی جزء باید به نرم افزار معرفی شود، پارامتری است که کاهش سختی جزء بر اساس آن سنجیده می‌شود. برای این موضوع دو پارامتر تغییر مکان نسبی و کار انجام شده توسط تنش‌های بین سطحی در نظر گرفته شده است که کاربر باید از بین آن‌ها یکی را انتخاب کند. در حالت اول، کاهش سختی جزء متناسب با تغییر مکان نسبی انجام می‌گیرد؛ بدین صورت که بعد از برقراری شرط آغاز جدا شدگی، با افزایش تغییر مکان نسبی، سختی جزء کاهش می‌یابد تا نهایتاً در تغییر مکان نسبی حداکثر معرفی شده توسط کاربر برابر با صفر شود، شکل (۸). در حالت دوم روش کار بدین صورت است که متناسب با افزایش کار انجام شده توسط تنش‌های بین سطحی (که از ضرب مقدار تنش در تغییر مکان نسبی متناظر آن به دست می‌آید)، سختی جزء کاهش می‌یابد تا نهایتاً موقعی که کار انجام شده به انرژی گسیختگی معرفی شده توسط کاربر رسید؛ سختی جزء به صفر برسد [۱۴]. بدیهی است که در حالت اول تغییر مکان نسبی نهایی، و در حالت دوم انرژی گسیختگی بین سطحی که برابر با سطح زیر نمودار تنش تغییر مکان نسبی است؛ باید توسط کاربر معرفی شود.

لازم به توضیح است که برای هر یک از جهات سه گانه می‌توان تغییر مکان نسبی نهایی در حالت اول و یا انرژی گسیختگی در حالت دوم را به صورت مستقل معرفی کرد. در این مطالعه از حالت اول یعنی کار انجام شده توسط

براکت ماکولای، عدم جدا شدن دو سطح از یکدیگر تحت فشار عمودی است.

الف-۲) معیار تغییر مکان نسبی به صورت مستقل: در این روش، جداشدگی در هر جهت زمانی آغاز می‌شود که تغییر مکان نسبی در آن جهت به تغییر مکان نسبی حداکثر معرفی شده توسط کاربر برای آن جهت برسد:

$$\begin{cases} \frac{\langle \delta_n \rangle}{\delta_n^0} = 1 \\ \frac{\langle \delta_s \rangle}{\delta_s^0} = 1 \\ \frac{\langle \delta_t \rangle}{\delta_t^0} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه بالا δ_n^0 ، δ_s^0 و δ_t^0 به ترتیب حداکثر تغییر مکان نسبی معرفی شده در جهات نرمال و برشی هستند. علامت $\langle \rangle$ در اینجا نیز نمایش دهنده‌ی براکت ماکولای است.

در مطالعه‌ی حاضر از بین دو حالتی که می‌توان معیار آغاز جدا شدگی را تعریف کرد، از معیار اول که در رابطه (۵) معرفی شد، استفاده می‌شود. مطابق این رابطه مقادیر t_n^0 ، t_s^0 و t_t^0 ، تنش‌هایی هستند که اگر تنش بین لایه‌ای از آن‌ها تجاوز کند، رفتار غیر خطی اجزای چسبنده آغاز می‌شود. مقدار t_t^0 و t_s^0 بر اساس مدل لو برابر با τ_{max} در نظر

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه‌های شبیه سازی شده

نمونه	طول (میلی متر)	عرض (میلی متر)	ارتفاع (میلی متر)	طول ورق (میلی متر)	عرض ورق (میلی متر)	ضخامت ورق (میلی متر)	فولاد کششی	فولاد فشاری	فولاد برشی
فدرال	۲۴۰۰	۲۵۰	۱۵۰	۱۹۶۰	۵۰	۱/۲	۳Φ ۸	۳Φ ۸	Φ ۶@۱۵۰
رحیمی	۲۳۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۹۳۰	۱۵۰	۱/۸	۲Φ ۱۰	۲Φ ۸	Φ ۶@۷۵
وو	۲۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۷۰۰	۱۵۰	۰/۱۱	۲Φ ۱۶	۲Φ ۱۳	Φ ۱۰@۲۴
یائو	۱۱۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۰۰۰	۵۰	۱/۲	۴Φ ۱۰	-	-

جدول ۲- مشخصات بتن نمونه‌های شبیه سازی شده

شناسه‌ی نمونه	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	تنش ترک خوردگی (مگا پاسکال)
فدرال	۲۷/۵	۳۹/۲	۳/۴
رحیمی	۲۵/۰۷	۴۳	۴/۰
وو	۳۵/۱	۴۹/۳	۴/۵
یائو	۲۲/۸۱	۲۷	۲/۸

جدول ۳- مشخصات فولاد در نمونه‌های شبیه سازی شده

شناسه‌ی نمونه	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	تنش نهایی (مگا پاسکال)	کرنش نهایی (%)
فدرال	۲۱۰	۴۸۵	۶۲۳	۱۲
رحیمی	۲۱۰	۵۷۵	۷۷۵	۵/۲۵
وو Φ ۱۶	۲۱۰	۳۶۴	۵۴۶	۶
Φ ۱۳	۲۱۰	۳۵۱	۵۳۷	۶
یائو	۲۰۸	۳۴۳	۵۴۳	۱۶

تنش-کرنش تحت کشش بتن است. بر اساس توصیه دستورالعمل نرم افزار مقدار این انرژی به صورت زیر به دست خواهد آمد [۱۴]:

$$G_f^c = \frac{5f_t^2}{E_c} \quad (۷)$$

در این رابطه f_t و E_c به ترتیب تنش ترک خوردگی و مدول الاستیسیته‌ی بتن هستند. برای جهات t و s مقدار انرژی گسیختگی از مدل لو و بر اساس رابطه (۱-ث) به دست می‌آید.

تنش‌های بین سطحی یعنی t_n ، t_s و t_t به عنوان معیار کاهش سختی جزء استفاده می‌شود. بنابراین هر گاه کار انجام شده توسط تنش‌های بین سطحی به انرژی گسیختگی که توسط کاربر معرفی می‌شود برسد، جزء سختی خود را از دست خواهد داد. بدیهی است که در این حالت باید انرژی گسیختگی در هر جهت تعریف شود. در جهت n انرژی گسیختگی برابر با انرژی گسیختگی بتن تحت کشش است. بدیهی است که این انرژی برابر با سطح زیر نمودار منحنی

جدول ۴- مشخصات ورق تقویتی در نمونه‌های شبیه سازی شده

شناسه‌ی نمونه	مدول الاستیسیته در جهت الیاف (گیگا پاسکال)	مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف (گیگا پاسکال)	مقاومت کششی در جهت الیاف (مگا پاسکال)
فدرال	۱۵۵	۹	۲۷۰۰
رحیمی	۳۶	۳	۱۰۷۴
وو	۲۳۰	۱۲	۴۱۰۰
یائو	۱۵۰	۸	۲۸۰۰

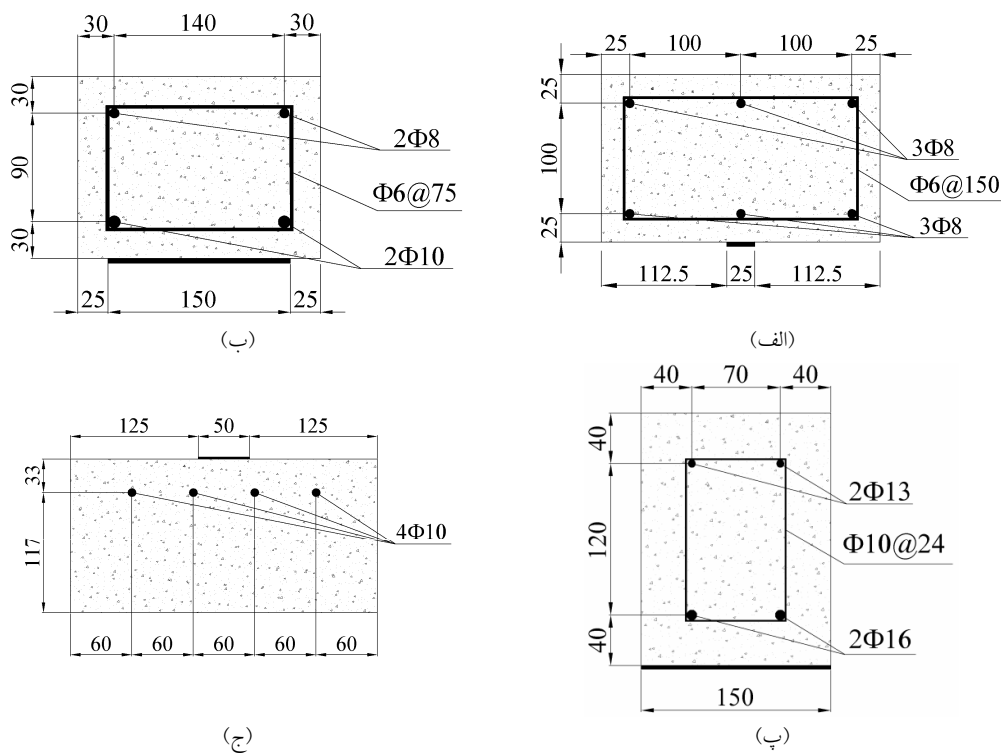
ب-۲) پارامتر تعیین الگوی کاهش سختی: برای تعیین شکل شاخه‌ی نزولی منحنی تنش - تغییر مکان نسبی که در واقع نشان دهنده‌ی کاهش سختی جزء است، سه حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول رابطه تنش - تغییر مکان نسبی به‌طور خطی در نظر گرفته می‌شود، شکل (۸). در حالت دوم رابطه تنش تغییر مکان نسبی به‌صورت نمایی در نظر گرفته می‌شود. اما در حالت سوم این رابطه به‌صورت مستقیم توسط کاربر تعیین می‌شود. در این مطالعه با توجه به مدل لو شکل شاخه‌ی نزولی به‌صورت خطی تعریف می‌شود.

۶- بررسی صحت روش پیشنهادی

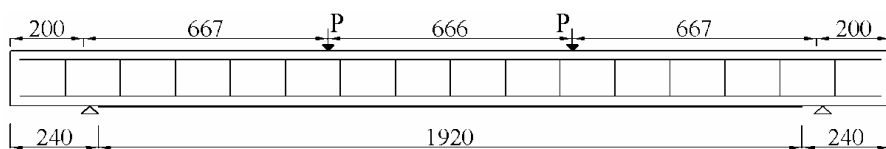
برای اثبات درستی و قابل اعمال بودن روش پیشنهادی برای نمونه‌های تحت خمش، از میان نمونه‌های موجود در ادبیات فنی چهار نمونه انتخاب شد. این نمونه‌ها توسط آزمایشگاه فدرال سوئیس در سال ۱۹۹۶ [۱۵]، رحیمی و هوتچینسن در سال ۲۰۰۱ [۵]، وو و کورکاووا در سال ۲۰۰۲ [۱۶] و یائو در سال ۲۰۰۴ [۱۷] آزمایش شدند. نمونه‌های رحیمی و آزمایشگاه فدرال سوئیس تحت خمش چهار نقطه‌ای، نمونه و تحت خمش سه نقطه‌ای، و نمونه‌ی یائو تحت بارگذاری طره‌ای قرار دارند. مشخصات هندسی و ماده‌ای این نمونه‌ها در جداول (۱) تا (۴)، و شکل‌های (۹) تا (۱۳) ارائه شده است. رفتارهای غیر خطی بتن مانند ترک خوردگی و محصور شدگی با استفاده از نظریه پلاستیسیته‌ی آسیب لی و فنوس در نظر گرفته شد. این نظریه

در کتابخانه مواد از پیش تعریف شده‌ی نرم افزار مورد استفاده موجود است. توضیح این نظریه از حوصله بحث خارج است که برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مرجع [۱۴] مراجعه کرد. برای بتن، ورق‌های فولادی و ورق FRP از اجزای سه بعدی هشت وجهی هشت گره‌ای خطی (با ۲۴ درجه آزادی) و برای میلگردهای طولی و خاموت‌ها از جزء خرابایی استفاده می‌شود. برای حل معادلات غیر خطی از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. دقت شود با توجه به این‌که در این مقاله از اجزای سه بعدی هشت وجهی خطی استفاده می‌شود، درجات آزادی تنها شامل جابه‌جایی‌ها (درجات آزادی انتقالی) بوده و دوران‌ها جزو درجات آزادی نیستند. بر این اساس برای ایجاد تکیه‌گاه‌های مفصلی بایستی درجات آزادی انتقالی یک خط مقید شود. بدیهی است در این صورت دوران حول این خط آزاد خواهد بود. به همین ترتیب برای اعمال تکیه‌گاه گیردار باید درجات آزادی انتقالی نقاط روی سطح مورد نظر مقید شوند. مشخص است که در این حالت هیچ یک از این نقاط اجازه دوران نخواهند داشت. بر این اساس در این تحقیق برای اعمال تکیه‌گاه‌های مفصلی تغییر مکان-های لبه‌های ورق‌های تکیه‌گاهی و برای اعمال تکیه‌گاه گیردار تمامی درجات آزادی سطح جانبی تیر مورد نظر مقید شد.

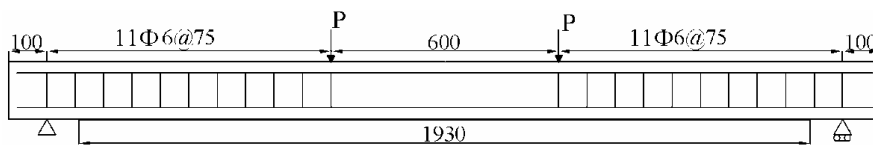
با توجه به توضیحات قسمت‌های قبل در باره‌ی شبکه‌بندی، سعی شد که در تمامی نمونه‌ها اجزا به‌صورت مکعب‌های ۲۵×۲۵×۲۵ میلی‌متری باشند. اجزای ورق و چسبنده نیز به‌ترتیب به‌صورت یک مکعب با ابعاد ضخامت



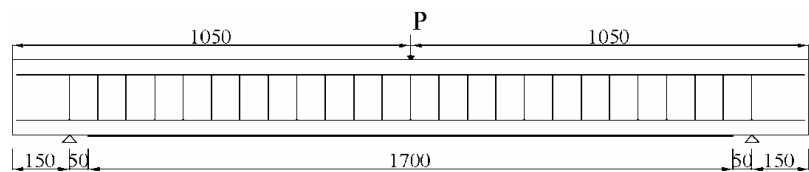
شکل ۹- مقطع عرضی الف) نمونه آزمایشگاه فدرال سوئیس [۱۶] ب) نمونه رحیمی [۴] پ) نمونه وو [۱۷] ج) نمونه یائو [۱۲] (ابعاد به میلی‌متر)



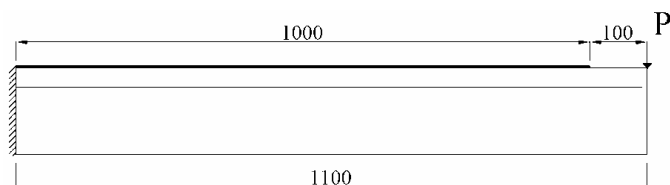
شکل ۱۰- مقطع طولی نمونه آزمایشگاه فدرال سوئیس (ابعاد به میلی‌متر) [۱۶]



شکل ۱۱- مقطع طولی نمونه رحیمی (ابعاد به میلی‌متر) [۴]



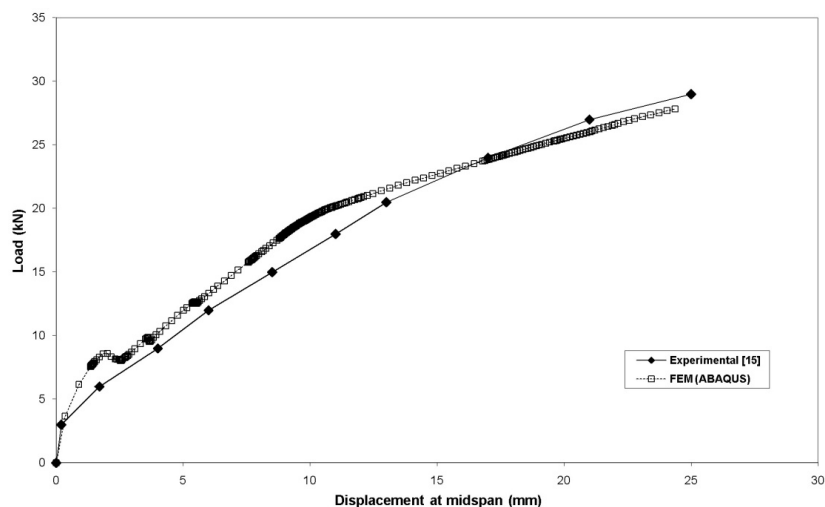
شکل ۱۲- مقطع طولی نمونه وو (ابعاد به میلی متر) [۱۷]



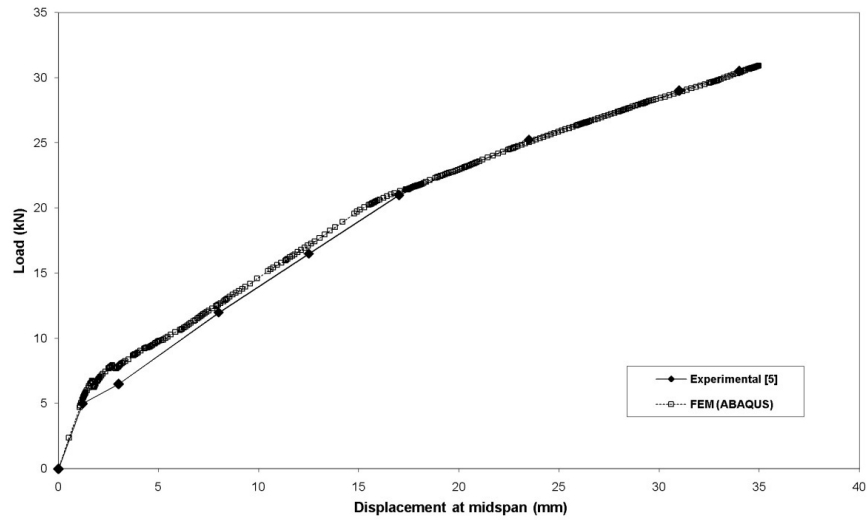
شکل ۱۳- مقطع طولی نمونه ی یائو(ابعاد به میلی متر) [۱۲]

جدول ۵- ابعاد اجزای مورد استفاده در شرایط هندسی خاص

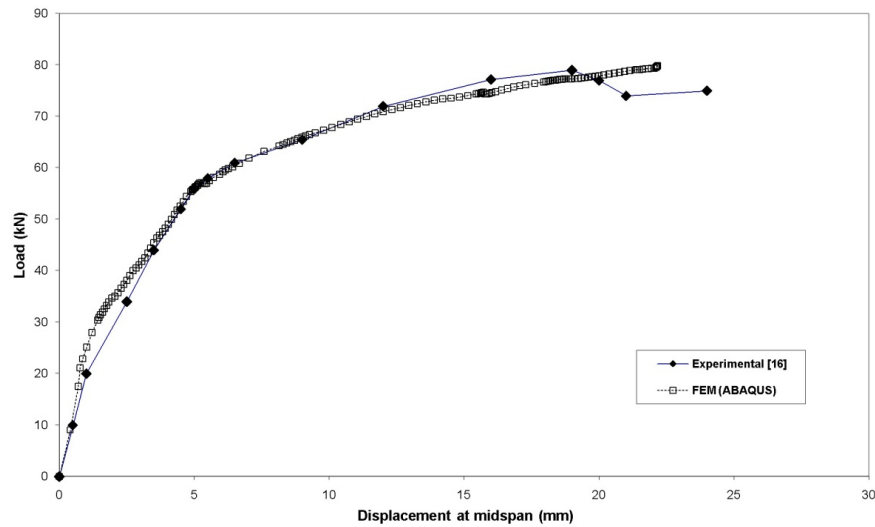
اجزای چسبنده	ابعاد اجزای ورق و چسبنده در محل اعمال بار (میلی متر)		ابعاد اجزای بتن (میلی متر)		شناسه ی نمونه
	اجزای ورق	اجزای چسبنده	در محل اعمال بار	در محل تکیه گاه	
۲۵×۰/۵×۲۰	۲۵×۱/۲×۲۰	۲۵×۱۹×۲۰	۲۰×۱۹×۲۰	۲۰×۱۹×۲۰	فدرال
۲۵×۲×۲۵	۲۵×۰/۶×۲۵	۲۵×۲۵×۲۵	۲۵×۲۵×۱۰	۲۵×۲۵×۲۰	رحیمی
۱۹×۰/۵×۲۰	۱۹×۰/۱۱۱×۲۰	۱۹×۲۰×۲۰	۱۹×۲۰×۱۲/۵	۱۹×۲۰×۱۲/۵	وو
-	-	۲۵×۲۵×۲۵	۲۵×۲۵×۲۵	۲۵×۲۵×۲۰	یائو



شکل ۱۴- مقایسه منحنی بار-تغییر مکان تجربی و تحلیلی برای نمونه آزمایشگاه فدرال سوئیس



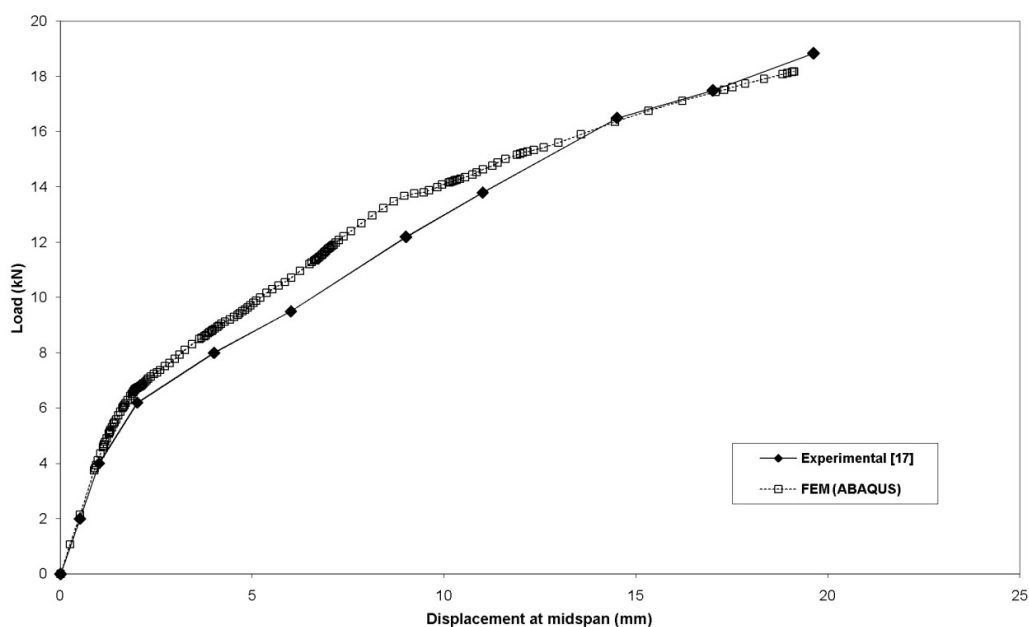
شکل ۱۵- مقایسه منحنی بار-تغییر مکان تجربی و تحلیلی برای نمونه رحیمی



شکل ۱۶- مقایسه منحنی بار-تغییر مکان تجربی و تحلیلی برای نمونه وو

خواهند بود. ابعاد اجزای مورد استفاده در این محلها در جدول (۵) آورده شده است. ابعاد ارائه شده در این جدول نیز به ترتیب در جهت x ، y و z هستند. به عنوان مثال، منظور از $۱۹ \times ۲۰ \times ۱۲/۵$ مکعبی با طول ۱۹ میلی متر در جهت x ، عرض ۲۰ میلی متر در جهت y و ارتفاع ۱۲/۵ میلی متر در جهت z است.

ورق ۲۵×۲۵ و ضخامت چسب ۲۵×۲۵ خواهند بود. البته در نمونه رحیمی به علت ضخامت نسبتاً زیاد ورق، ضخامت اجزای ورق برابر با یک سوم ضخامت ورق در نظر گرفته شد. در محل اعمال بار، محل تکیه گاه و در روی ورق، به علت شرایط هندسی، ابعاد جزء با بقیه مکانها متفاوت



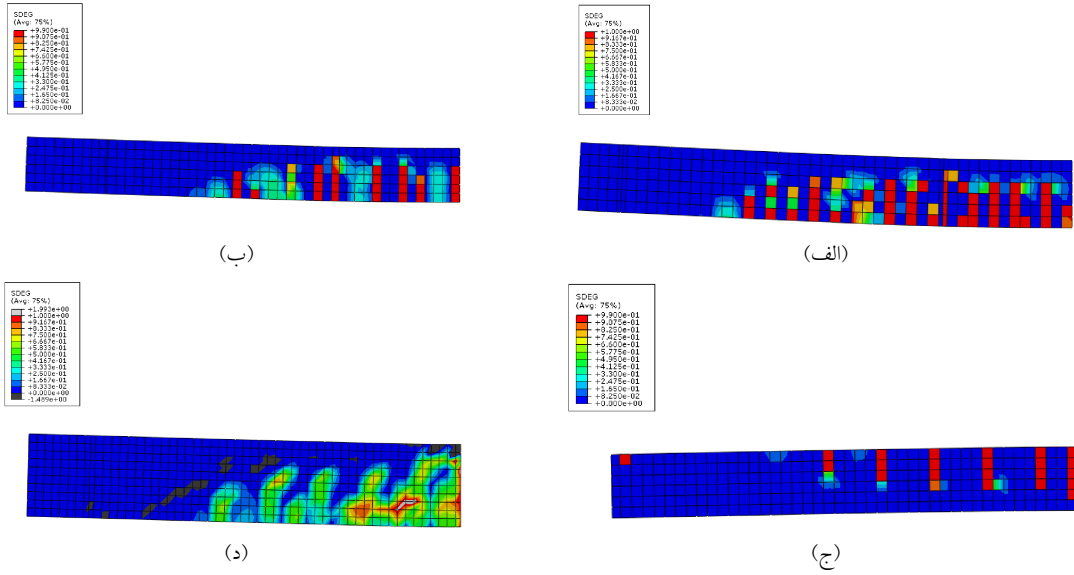
شکل ۱۷- مقایسه منحنی بار-تغییر مکان تجربی و تحلیلی برای نمونه یائو

جدول ۶- نتایج تجربی نمونه‌های شبیه سازی شده

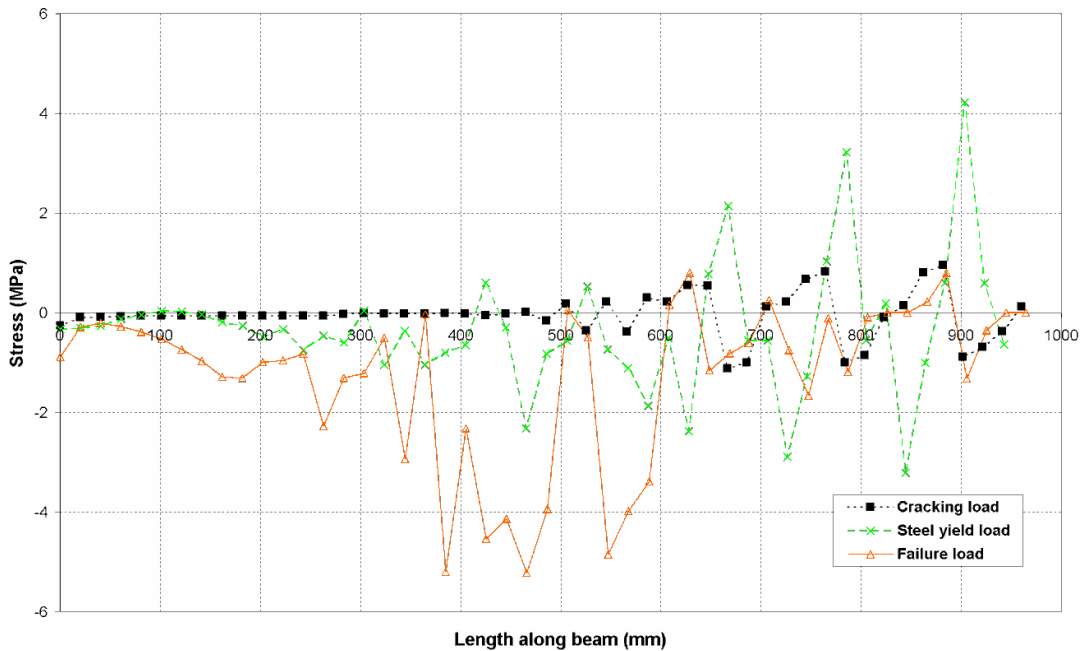
کرنش ورق (میکرو)	بار و جابه‌جایی نظیر تسلیم فولاد کششی		بار و جابه‌جایی نظیر گسیختگی		شناسه‌ی نمونه
	جابه‌جایی (میلی‌متر)	بار (کیلو نیوتن)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	بار (کیلو نیوتن)	
۷۶۴۰	۹	۱۹/۵	۲۵	۲۹/۵	فدرال
۱۰۱۰۰	۱۵/۵	۲۱	۳۴	۳۰/۵	رحیمی
۱۶۶۰۰	۵/۵	۵۸	۱۹	۷۹	وو
۵۴۲۰	۱۴/۱	۹/۲	۱۸/۸۴	۱۹/۶۲	یائو

جدول ۷- نتایج تحلیلی نمونه‌های شبیه سازی شده

کرنش ورق (میکرو)	بار و جابه‌جایی نظیر تسلیم فولاد کششی		بار و جابه‌جایی نظیر گسیختگی		شناسه‌ی نمونه
	جابه‌جایی (میلی‌متر)	بار (کیلو نیوتن)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	بار (کیلو نیوتن)	
۷۴۱۹	۸/۲۷	۱۸/۱۳	۲۴/۳۸	۲۸/۶۵	فدرال
۹۷۴۲	۱۴/۴۹	۲۰/۱۹	۳۳/۱۷	۳۰/۷۷	رحیمی
۱۶۸۷۰	۵/۲۵	۵۷/۰۳	۲۲/۱۶	۷۹/۹۸	وو
۵۵۱۷	۱۳/۶۸	۸/۹۵	۱۹/۱۱	۱۸/۱۸	یائو



شکل ۱۸- نحوه تغییرات پارامتر SDEG در نیمرخ عرضی مدل اجزای محدود در لحظه گسیختگی (چگونگی توزیع ترک‌های کششی) الف) نمونه رحیمی (وسط دهانه سمت راست است) ب) نمونه فدرال (وسط دهانه سمت راست است) ج) نمونه یانو (انتهای گیردار سمت راست است) د) نمونه وو (وسط دهانه سمت راست است)



شکل ۱۹- نمودار تغییرات تنش برشی روی خط عبوری از وسط عرض ورق تقویتی در سطح فوقانی آن (سطح متصل به بستر تیر بتنی) در نمونه فدرال

شدگی در پی آن به درستی در مدل القا شده است.

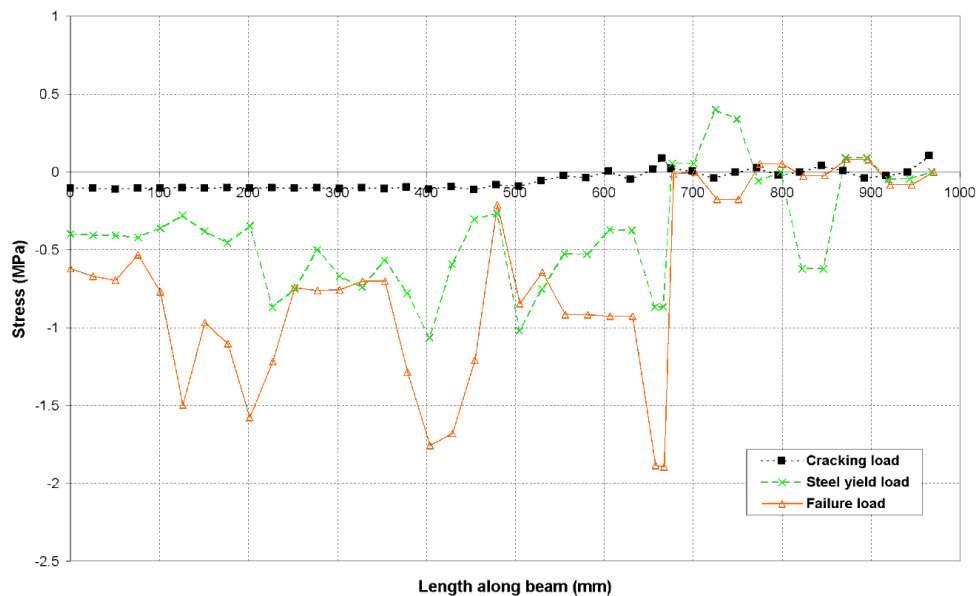
۶- خلاصه و نتیجه گیری

هدف این مقاله ارائه‌ی راهکاری منطقی و کاربردی برای شبیه سازی جدا شدگی وسط دهانه ورق تقویتی در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق‌های خارجی FRP است. بدین منظور در ابتدا مطالعات انجام گرفته در این زمینه مورد بررسی قرار گرفتند؛ در ادامه ساز و کار وقوع جدا شدگی بررسی شد و مشکلات موجود در زمینه‌ی شبیه سازی عددی این پدیده و شرایطی که بایستی در مدل اجزای محدود برقرار باشد تا جدا شدگی به شکل واقعی به وقوع بپیوندد مشخص شد. برای برقراری این شرایط در مدل اجزای محدود، بایستی ابعاد اجزای بتن از سه برابر اندازه‌ی متوسط سنگ دانه‌ها کوچک‌تر باشند و همچنین رفتار سطح بین لایه‌ای نیز مطابق واقعیت باشد. منظور از سطح بین لایه‌ای، چسب و حدود سه میلی‌متر بتن اطراف آن است، که همراه با چسب از سطح تیر جدا می‌شود. یکی از دقیق‌ترین مدل‌هایی که در مراجع فنی برای بیان رفتار سطح بین لایه‌ای وجود دارد مدل خطی لو است. برای القای رفتار سطح بین لایه بر پایه‌ی مدل لو، در شبیه سازی عددی از اجزای چسبنده استفاده شد. در انتها با مدل‌سازی چهار نمونه با مشخصات و ابعاد متفاوت موجود در مراجع فنی صحت روش پیشنهادی کنترل شد. موارد زیر را می‌توان به عنوان نتایج این مطالعه بر شمرد:

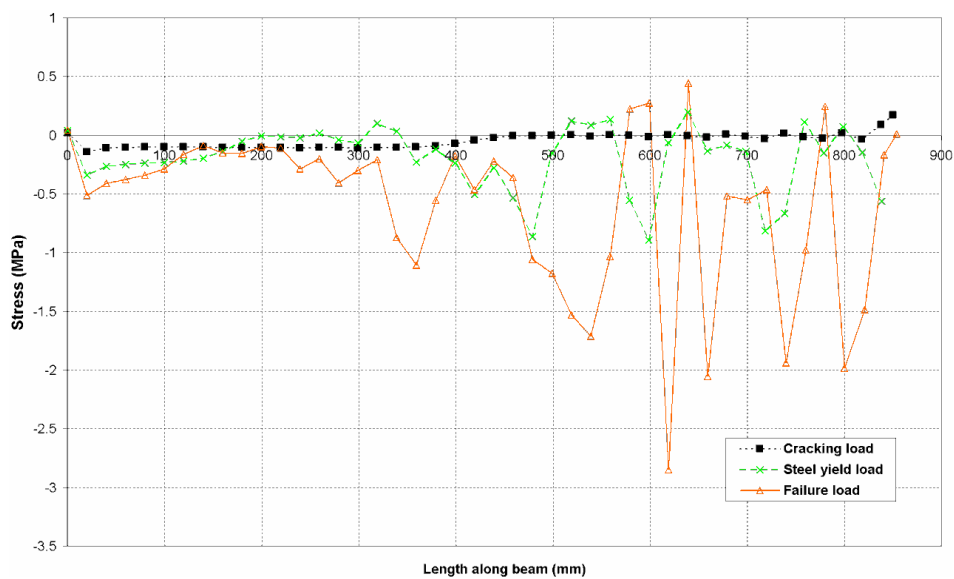
۱. برای شبیه سازی جدا شدگی وسط دهانه‌ی ورق تقویتی در مدل سازی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده لازم است تنش‌های اعمالی به سطح بین لایه‌ای واقعی بوده و هم چنین رفتار سطح بین لایه‌ای در مقابل این تنش‌ها مطابق واقعیت باشد. بدین منظور لازم است که باز شدگی ترک‌های خمشی و خمشی-برشی در مدل اجزای محدود به درستی به وقوع بپیوندد. به همین دلیل مناسب است اندازه‌ی اجزای بتن از سه برابر ابعاد متوسط بزرگ‌ترین سنگ دانه کوچک‌تر باشد.

در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) و جداول (۶) و (۷)، نتایج تجربی و تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج نظریه و تحلیلی از هم‌خوانی بسیار خوبی با یکدیگر برخوردارند. بر این اساس به نظر می‌رسد که این روش برای پیش بینی جدا شدگی دارای دقت کافی است. در شکل (۱۸) وضعیت توزیع ترک‌های کششی در لحظه‌ی گسیختگی ترسیم شده است. این شکل در واقع وضعیت تغییر پارامتر SDEG^۹ در نیم رخ طولی نمونه‌هاست. این پارامتر نشان دهنده‌ی میزان کاهش سختی اجزا بر اثر ترک خوردگی است؛ بدین مفهوم که اگر در جزیی مقدار این پارامتر برابر با یک باشد جزء مورد بحث سختی خود را بر اثر ترک خوردگی کامل از دست داده و مقدار صفر این پارامتر به مفهوم عدم وقوع ترک خوردگی جزء است [۱۴]. متأسفانه الگوی ترک خوردگی در مقالات مرجع ارائه نشده و در نتیجه امکان مقایسه با نتایج تجربی وجود ندارد. ولی زاویه ترک‌ها و هم‌چنین الگوی ترک خوردگی حاصله با نظریه‌های کلاسیک بتن آرمه هم‌خوانی داشته و به نظر منطقی می‌رسند.

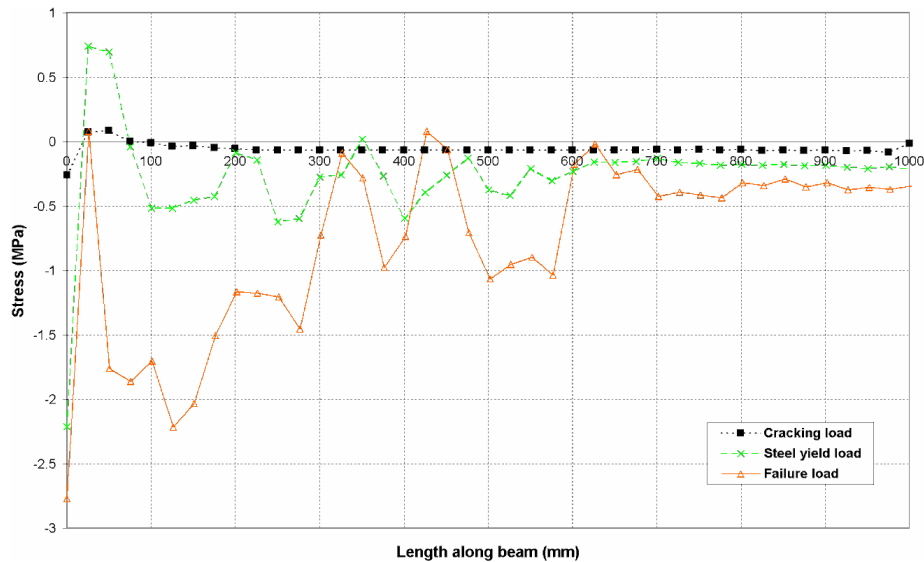
در شکل‌های (۱۹) تا (۲۲) نمودار تغییر تنش برشی در طول ورق تقویتی در سه بار ترک خوردگی، تسلیم فولاد کشش و گسیختگی به ترتیب برای نمونه‌های فدرال، رحیمی، وو و یائو رسم شده است. در تمامی نمودارها به جز نمودار شکل (۲۲) طول از محل قطع ورق اندازه گیری شده است. بدین مفهوم که صفر روی محور افقی نشان دهنده‌ی محل قطع ورق است. در نمودار شکل (۲۲) که مربوط به نمونه طره‌ای یائو است طول از محل تکیه‌گاه گیردار اندازه گیری شده است. اگر این نمودارها با الگوهای ترک خوردگی که در شکل (۱۸) نمایش داده شد، مقایسه شوند، مشخص می‌شود که تمرکز تنش برشی بر محل وقوع ترک‌ها منطبق است. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که تمرکز تنش برشی ایجاد شده بر اثر باز شدگی ترک‌ها ایجاد شده است؛ بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که روش مورد استفاده صحیح بوده و تمرکز تنش برشی ایجاد شده بر اثر باز شدگی ترک‌ها و جدا



شکل ۲۰- نمودار تغییرات تنش برشی روی خط عبوری از وسط عرض ورق تقویتی در سطح فوقانی آن (سطح متصل به بستر تیر بتنی) در نمونه رحیمی



شکل ۲۱- نمودار تغییرات تنش برشی روی خط عبوری از وسط عرض ورق تقویتی در سطح فوقانی آن (سطح متصل به بستر تیر بتنی) در نمونه وو



شکل ۲۲- نمودار تغییرات تنش برشی روی خط عبوری از وسط عرض ورق تقویتی در سطح تحتانی آن (سطح متصل به بستر تیر بتنی) در نمونه یانو

از اجزای چسبنده موجود در نرم افزار ABAQUS استفاده کرد. رفتار این اجزا بر مبنای دو دسته پارامتر مجزا، مربوط به تعیین رفتار قبل از آغاز جدا شدگی (رفتار خطی) و آغاز و تکمیل جدا شدگی تعیین می‌شود می‌توان آن‌ها را مطابق مدل لو تنظیم کرد.

۲. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مدل پیشنهادی لو برای رابطه تنش برشی- لغزش سطح بین لایه‌ای در شبیه سازی اجزای محدود می‌تواند منجر به پیش بینی صحیح و منطقی مود گسیختگی جدا شدگی شود.
۳. به منظور القای رابطه لو در مدل اجزای محدود، می‌توان

واژه‌نامه

- | | | |
|----------------------------|--|---------------------------------|
| 1. discrete crack approach | 5. flexural intermediate crack debonding | 8. Macaulay bracket |
| 2. smeared crack approach | 6. critical diagonal crack debonding | 9. scalar stiffness degradation |
| 3. damage Plasticity | 7. cohesive elements | |
| 4. micro Plane | | |

مراجع

1. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., *FRP Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons Ltd., England, 2002.
2. Teng, J. G., Zhang, J. W., and Smith, S. T., "Interfacial Stresses in Reinforced Concrete Beams Bonded with a Soffit Plate: a Finite Element Study", *Construction and Building Materials*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-14, 2002.
3. Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., and Jiang J. J., "Bond-Slip Models for FRP Sheets/Plates Bonded to Concrete", *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 6, pp. 920-937, 2005.
4. Hu, H. T., Lin, F. M., and Jan, Y. Y., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fiber Reinforced Plastics", *Composites for Construction*, No. 63, pp. 271-281, 2001.

5. Rahimi, H., and Hutchinson, A., "Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates", *Composites for Construction*, Vol. 5, No. 1, pp. 44-56, 2001.
6. Wu, Z., and Hemdan, S., "Debonding in FRP-Strengthened Flexural Members with Different Shear-Span Ratios", *Proceeding of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Composite Reinforcement for Concrete Structures*, Michigan, USA, Vol. 1, pp. 411-426, 2005.
7. Niu, H., and Wu, Z., "Effects of FRP-Concrete Interface Bond Properties on the Performance of RC Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded FRP Sheets", *Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 723-731, 2006.
8. Lu, X. Z., Teng, J.G., Ye, L.P., and Jiang J. J., "Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Beams: FE Analysis and Strength Model", *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 2, pp. 161-174, 2007.
9. Abdelbaky, H., "Nonlinear Micromechanics-Based Finite Element Analysis of the Interfacial Behavior of FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Sherbrooke University, 2008.
10. Lu, F., and Ayoub, A., "Evaluation of Debonding Failure of Reinforced Concrete Girders Strengthened in Flexure with FRP Laminates Using Finite Element Modeling", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 4, pp. 1963-1979, 2011.
11. Coronado, C., "Characterization, Modeling and Size Effect of Concrete-Epoxy Interfaces", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, 2006.
12. WhaBai, J., "Seismic Retrofit for Reinforced Concrete Building Structures", Consequence Based engineering (CEB) Institute Final Report, Texas University, 2003.
13. Saxena, P., "Interfacial Bond Behavior Between FRP and Concrete Substrate", Master Thesis, The Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alabama, 2006.
14. ABAQUS Inc., ABAQUS/Theory User Manual, Version 6.7, 2007.
15. Aram, M. R., Czaderski, C., and Motavalli, M., "Debonding Failure Modes of Flexural FRP-Strengthened RC Beams", *Composites: Part B*, No. 39, pp. 826-841, 2008.
16. Wu, Z. S., and Kurokawa, T., "Strengthening Effects and Effective Anchorage Method for Flexural Members with Externally Bonded CFRP Plates", *JSCE Journal of Material, Concrete Structures and Pavements*, No. 56, pp. 1-13, 2002.
17. Yao, J., "Debonding Failures in RC Beams and Slabs Strengthened with FRP Plates", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, 2004.