تاثیر افزایش لایه‌های CFRP بر بهبود رفتار اتصال پیچی بین ورق فولادی سردساخت و ورق فولادی گرم‌نورد تحت بار برش استاتیکی در نرم اجزاءمحدود

مانیا رحیمیان، پرهام معمارزاده، شهاب‌الدین حاتمی
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده عمران
۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده عمران
۳- استادیار، دانشگاه یاسوج، دانشکده عمران
Mania.rahimian@hotmail.com

چکیده

در سالهای اخیر مقاوم‌سازی سازه‌های فلزی با استفاده از الیاف پلیمری تقویت شده (FRP) بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق اتصال پیچی با یک پیچ بین ورق نازک فولادی سردساخت و ورق گرم‌نورد در نرم‌افزار اجزاءمحدود تحت بار برش استاتیکی، مدل و صحت‌سجی گردید. به دلیل اینکه ورق سردساخت در اتصال، تا قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی، گسیخته می‌شود، برای بهبود رفتار اتصال تحت برش استاتیکی به تقویت ورق نازک با ورق CFRP در نرم‌افزار پرداخته شد. در نهایت تأثیر افزایش تعداد لایه‌های CFRP در افزایش تحمل بار اتصال مورد بررسی عددی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: ورق فولادی سردساخت، اتصال پیچی، مقاوم‌سازی، نرم‌افزار اجزاءمحدود، لایه‌های CFRP.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر دیوار برشی فولادی به عنوان یکی از راه‌حل‌های روز دنیا برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی زلزله و باد مورد توجه قرار گرفته است. معمولاً در طبقات فوقانی ساختمان‌های بلند، ضخامت ورق‌های فولادی مورد استفاده برای دیوار برشی نازک بدست می‌آید. در ابتدا درطراحی دیوارهای برشی، از ظرفیت پس از کمانش ورق‌های فولادی صرف‌نظر می‌شد؛ اما سال‌های زیادی است که محققین پی‌برده‌اند که کمانش الاستیک به معنای اتمام تحمل بار ورق‌های برشی نمی‌باشد و با طراحی صحیح، ظرفیت پس از کمانش ورق‌های برشی نازک می‌تواند تا چندین برابر ظرفیت الاستیک باشد [۱]. در نتیجه استفاده از ورق های فولادی سردساخت، که معمولاً ضخامت کمی دارند، یکی از گزینه‌های پیش‌رو است. برای اتصال دیواربرشی (ورق فولادی سردساخت) به قاب اطراف آن، از ورق اتصال[1] (از جنس ورق فولادی گرم‌نورد) استفاده می‌شود؛ در صورت استفاده از اتصال پیچی در نصب دیوار برشی، این اتصال بین ورق فولادی سردساخت و ورق مربوط به ورق اتصال (ورق فولادی گرم‌نورد) انجام می‌گیرد. در اتصال بین دو ورق، ورق نازک تا قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی، پاره یا لهیده می‌شود؛ در نتیجه عوامل مؤثر بر پارگی زود هنگام ورق فولادی سردساخت در اتصالات پیچی و ممانعت

[1] Fish plate

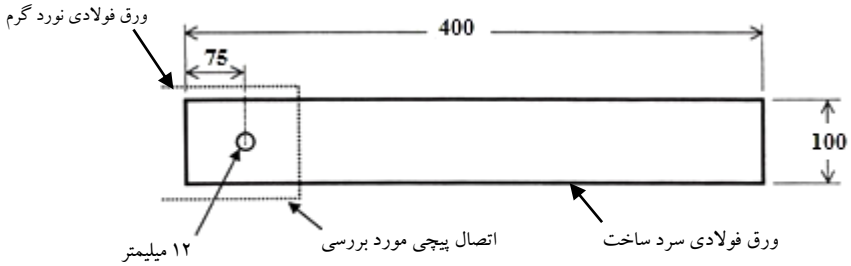
از پارگی زود هنگام ورق نازک (در محل اتصال پیچ) مستلزم انجام تحقیق می‌باشد و مقاوم‌سازی آن می‌تواند در بهبود رفتار اتصال مؤثر باشد. فراوانی تحقیقات عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی رفتار اتصال، مقاومت نهایی، تغییرشکل و توزیع تنش در ورق‌های اتصال نیز گویای اهمیت این موضوع می‌باشد. در این تحقیق برای ممانعت از پارگی زود هنگام ورق فولادی سردساخت در محل اتصال پیچ مقاوم‌سازی آن با ورق CFRP[1] در نرم‌افزار اجزاءمحدود انجام می‌شود و با افزایش لایه‌های CFRP افزایش تحمل باربری اتصال تحت بار برش استاتیکی بررسی می‌شود.

۲. مدل اجزاءمحدود

در این پژوهش نرم‌افزار اجزاءمحدود ABAQUS (نسخه 6.11) برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار سازه یا اتصال به کار برده شده است. نرم‌افزار ABAQUS قابلیت تحلیل سازه‌ها در اشکال هندسی متفاوت و در حالات مختلف بارگذاری را دارد. دستگاه اندازه‌گیری انتخاب شده SI (mm) می‌باشد.

۲-۱. مدل از لحاظ هندسی

در این تحقیق اتصال بین دو ورق با یک پیچ تحت برش استاتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جزییات و ابعاد مدل مورد مطالعه در شکل ۱ و جدول ۱ مشاهده می‌شود (ابعاد به میلیمتر).



شکل ۱- اتصال مدل شده در نرم افزار اجزاءمحدود [۴]

جدول ۱- ابعاد و ضخامت اجزای اتصال [۴]

اجزای اتصال	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
ورق سردساخت	۴۰۰	۱۰۰	۱/۶
ورق نوردگرم	۲۰۰	۱۵۰	۲۵
پیچ	۳۵	–	–
واشر	–	–	۲/۳

[1] Carbon fiber-reinforced polymer

به دلیل تقارن نمونه تنها نصف آن در نرم افزار اجزاء محدود مدل می‌شود. در این مدل از المان Solid برای ورق نازک فولادی سردساخت، پیچ و واشر استفاده می‌شود. ورق فولادی گرم‌نورد به دلیل ضخامت زیادش (۲۵ میلیمتر) نسبت به ورق سرد ساخت (به ضخامت ۱٫۶ میلیمتر)، صلبیت دارد و در نتیجه صلب مطلق در نظر گرفته شده است.

۲-۲. خواص مواد

خواص مدل مطابق با نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط چانگ و همکاران در جدول ۲ آورده شده است [۴]. ورق نازک فولادی سردساخت به اسم G550 مطابق با نمونه آزمایشگاهی چانگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بدست آوردن خواص ورق، چانگ نمونه‌هایی از G550 را مورد آزمایش‌کشش قرار داد [۴]. آزمایش کشش و منحنی تنش-کرنش مهندسی حاصل از آن برای مشخص کردن خواص مکانیکی ماده نظیر استحکام، چکش‌خواری و مدول‌الاستیسیته آن لازم است.

جدول ۲ - خواص اجزای اتصال پیچی بکار رفته در تحلیل اجزاء محدود [۴]

اجزای اتصال پیچی	مدول الاستیسیته (kN/mm2)	مقاومت تسلیم (N/mm^2)	استحکام کششی (N/mm^2)	فرمول‌بندی المان‌ها
ورق سرد ساخت از نوع G550	۲۱۶/۵	۶۲۰/۷	۶۳۸/۴	ماده و هندسی غیرخطی
پیچ و واشر	۲۰۵	-	-	الاستیک خطی
ورق نوردگرم شده	-	-	-	صلب مطلق

رفتار مصالح در ناحیه پلاستیک یا غیرخطی به وسیله نقاط منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش در نرم‌افزار معرفی می‌شود. اما باید در نظر داشت منحنی بدست‌آمده از آزمایش‌کشش، منحنی تنش- کرنش مهندسی یا اسمی می‌باشد که بایستی به منحنی تنش-کرنش حقیقی تبدیل شود (روابط ۱ و ۲ و ۳ و۴) [۳].

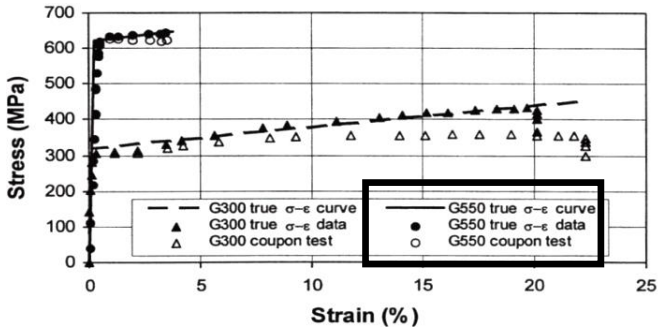
$$\sigma=P/A_0 \quad (۱)$$

$$e= (l-l_0)/l_0 \quad (۲)$$

$$\sigma_{true}=\sigma(1+e) \quad (۳)$$

$$\varepsilon_{true}=\ln(1+e) \quad (۴)$$

که در آن P بار وارد شده نمونه، A_0 سطح مقطع اولیه نمونه، l طول لحظه‌ای نمونه، l_0 طول اولیه نمونه، σ و ε به ترتیب تنش و کرنش مهندسی، σ_{true} و ε_{true} تنش وکرنش حقیقی نمونه می‌باشد.



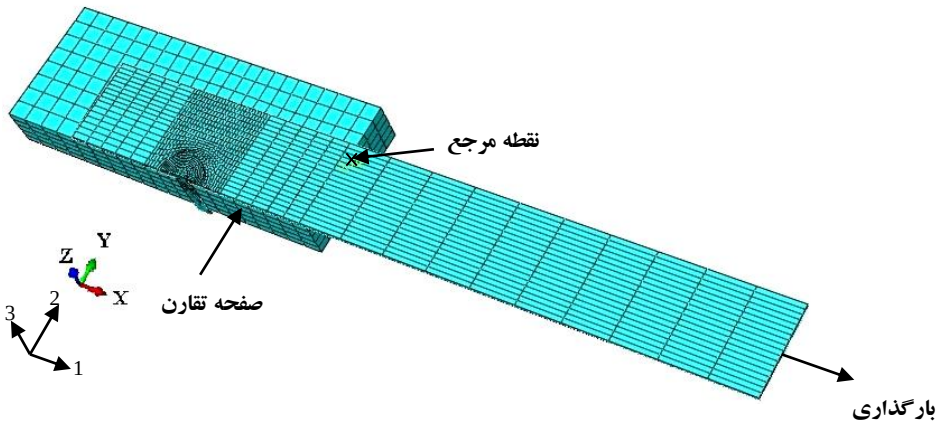
شکل ۲- منحنی تنش-کرنش مهندسی و حقیقی بدست آمده از آزمایش کشش [۴]

۲-۳. شبکه بندی و شرایط مرزی

در این مدل از المان Solid (C3D8R) که المانی سه‌بعدی با هشت‌گره است، برای ورق نازک فولادی سردساخت، پیچ و واشر استفاده می‌شود؛ المان Solid (R3D4) برای ورق فولادی گرم‌نورد انتخاب شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به دلیل تقارن موجود تنها نصف نمونه مدل شده است؛ در نتیجه در امتداد صفحه تقارن (صفحه ۱-۳) شرایط مرزی (u2,UR1,UR2=0) برقرار می‌باشد. در این مدل نیرو به صورت جابه‌جایی به انتهای سمت راست ورق G550 در جهت محور ۱ وارد می‌شود. نقطه مرجع جسم صلب (ورق نوردگرم) که در شکل با علامت + نشان داده شده است در همه جهات بسته شده و دوران حول تمام محورهای مختصات صفر می‌باشد.

u1:	تغییرمکان در جهت محور ۱	UR1:	دوران حول محور ۱
u2:	تغییرمکان در جهت محور ۲	UR1:	دوران حول محور ۲
u3:	تغییرمکان در جهت محور ۳	UR1:	دوران حول محور ۳



شکل ۳- بارگذاری مدل اجزاءمحدود اتصال پیچی

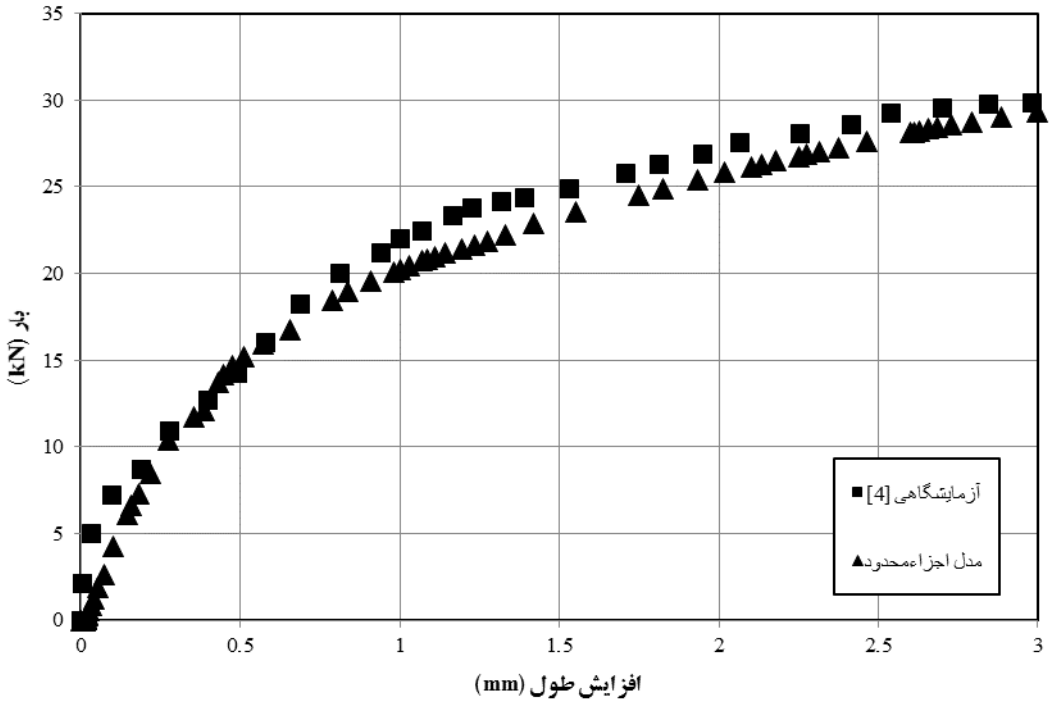
۳. تحلیل عددی و صحت سنجی مدل اجزاء محدود

از تحلیل عددی مدل اجزاءمحدود ساخته شده، منحنی بار–افزایش‌طول ورق سردساخت استخراج می‌شود و برای صحت‌سنجی با منحنی بار–افزایش‌طول حاصل از آزمایش انجام شده توسط چانگ [۴] مقایسه می‌شود (شکل۴). با توجه به همپوشانی منحنی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و اجزاءمحدود و همچنین مقایسه بار مجاز در افزایش‌طول‌های یک، دو و سه میلیمتر (حاصل از نتایج آزمایشگاهی [۴] و عددی)، صحت مدل اجزاءمحدود سنجیده می‌شود.

ضریب اصطکاک یکی از پارامترهای مهم در رفتار ورق نازک و در نتیجه آن اتصال پیچی می‌باشد. در آباکوس با سعی و خطا و تحلیل حساسیت ضریب اصطکاک ۰,۲ برای این مدل در نرم‌افزار انتخاب شد و نزدیکترین نتیجه را با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داد.

جدول ۳- مقایسه بار مجاز بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی اتصال پیچی در سه افزایش‌طول متفاوت

تحلیل	نمونه	بار مجاز (kN) تحت افزایش‌طول		
		۱ mm	۲ mm	۳ mm
آزمایشگاهی [۴]	(میانگین)	۲۰,۱٤	۲۶,۱٤	۲۸,۹
عددی	S1	۲۰,۲۳	۲۵,۸۰	۲۹,۳۳



شکل ۴- منحنی بار- افزایش‌طول بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی ورق فولادی G550 برای صحت‌سنجی

۴. مقاوم‌سازی توسط ورق CFRP در نرم‌افزار

با توجه به تأیید صحت مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار اجزاءمحدود، می‌توان از مدل‌های ساخته شده برای مقاوم‌سازی ورق سردساخت با ورق CFRP در نرم‌افزار استفاده کرد و رفتار ورق را به صورت عددی مورد مطالعه قرارداد.

در این قسمت باید دو ماده CFRP و چسب در نرم‌افزار اضافه شود. معمولاً زمانی که جهت الیاف موازی با تنش‌های اصلی باشند، یک رفتار الاستیک خطی ایزوتروپیک (با وجود رفتار ارتوتروپیک FRP) برای مدل کردن رفتار ورق CFRP در نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود [۵]. مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و استحکام‌کششی ورقCFRP و رزین مورد استفاده برای معرفی خاصیت ماده به نرم افزار در جدول ۳ آورده شده است [۵].

جدول ۴- خواص دو ماده CFRP و چسب [۵]

	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)	کرنش کششی	ضریب پواسون
CFRP	۲۱۵	۱۷۱۰	۰/۰۰۸	۰/۲۸
چسب	۱/۹	۳۲	۰/۰۴	۰/۲۱

طول، عرض و ضخامت ورق CFRP مصرفی به ترتیب ۱۵۰، ۵۰ و ۰/۱۷۶ میلیمتر می‌باشد. طول و عرض چسب همانند CFRP و ضخامت هر لایه آن ۰/۲۲۴ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. روش اتصال ورق CFRP و چسب به نمونه‌ی صحت‌سنجی شده، مشابه روش به کار برده شده توسط فاوزیا و همکارانش در مرجع [۵] می‌باشد. معمولاً دو دسته المان های صفحه‌ای و المان‌های حجمی برای مدل‌سازی آن‌ها استفاده می‌گردد. مرجع [۶] بیان می کند که المان‌های صفحه‌ای برای مدل‌سازی به دقت المان‌های حجمی جواب نمی‌دهند. زیرا المان‌های صفحه‌ای دارای ضخامت واقعی نمی‌باشند، بنابراین تنش و کرنش به‌دست آمده در سطوح ورقه‌های FRP می‌تواند دچار خطا گردد [۶]. در نتیجه برای مدل‌سازی کامپوزیت و لایهٔ چسب از المان Solid (C3D8R) که المانی سه‌بعدی با هشت‌گره است به منظور ساختن مدل FRP و رزین استفاده می‌شود. به علت جلوگیری از جدا شدن ورق تقویت و عدم وقوع لغزش در سطح تماس ورق تقویت و ورق فولادی، کل ماده مرکب FRP و چسب به صورت یک حجم مدل شدند [۵].

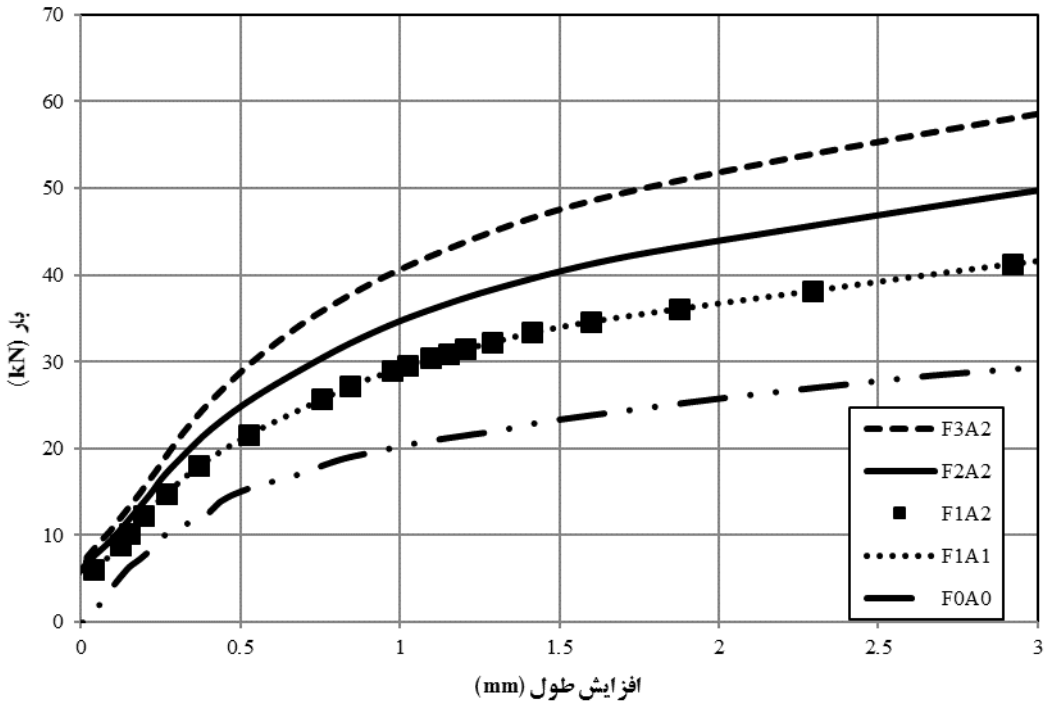
تقویت مدل اجزاءمحدود با یک، دو و سه لایه CFRP انجام شد (جدول ۵).

جدول ۵- تعداد لایه‌ها ی CFRP و چسب به کار برده شده برای تقویت اتصال پیچی

نمونه	تعداد لایه‌های CFRP	تعداد لایه‌های چسب
F3A2	۳	۲
F2A2	۲	۲
F1A2	۱	۱
F1A1	۱	۱
F0A0	تقویت نشده	تقویت نشده

۴-۱. تحلیل عددی نمونه تقویت شده

نتایج تحلیل عددی اتصال تقویت شده (نمودار بار-افزایش‌طول ورق G550) در شکل ۵ مطابق با نام‌گذاری جدول ۵ نمایش داده شده است. نمودارهای بدست آمده از نرم‌افزار تنها تا رسیدن ورق CFRP به استحکام‌کششی بیان شده در جدول ۴ قابل تجزیه و تحلیل می‌باشد. در شکل ۵ نمودارها در افزایش طول ۳ میلیمتر نشان داده شده‌اند که در این افزایش طول ورق CFRP هنوز گسیخته نشده و افزایش ظرفیت باربری اتصال قابل قبول می‌باشد.



شکل ۵- منحنی بار-افزایش‌طول نمونه اجزاءمحدود تقویت نشده و تقویت شده با CFRP (متفاوت در تعداد لایه‌ها)

جدول ۶- میزان تقریبی درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده با افزایش لایه‌های CFRP نسبت به نمونه تقویت نشده

نمونه	میزان تقریبی درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه نسبت به نمونه نمونه تقویت نشده)
F3A2	۱۰۰
F2A2	۷۰/۵
F1A2	۴۱/۵

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله اتصال پیچی با یک پیچ، مابین ورق فولادی سردساخت G550 و ورق فولادی گرم‌نورد تحت برش استاتیکی در نرم‌افزار اجزاءمحدود مدل‌سازی شد و صحت مدل‌ها توسط نتایج آزمایشات (منحنی بار–افزایش‌طول ورق سردساخت) موجود در مرجع [چانگ] سنجیده شد. سپس تقویت ورق فولادی نازک توسط ورق CFRP در نرم افزار اجزاءمحدود با تعداد لایه های متفاوت به اجرا در آمد.

۱) با تقویت مدل اجزاء محدود توسط ورق CFRP، افزایش ظرفیت حمل بار و در نتیجه آن افزایش مقاومت نهایی اتصال بدست می‌آید.

۲) افزایش لایه‌های CFRP (یک لایه، دو لایه و سه لایه) به منظور تقویت اتصال، به ترتیب باعث افزایش ظرفیت حمل بار اتصال پیچی به میزان تقریبی ۴۱/۵ ، ۷۰/۵ و ۱۰۰ درصد می‌گردد (جدول ۵ و ۶ و شکل ۵)

۳) افزایش لایه‌های چسب در دو مدل تقویت شده (F1A1, F1A2) تأثیر بسیار ناچیزی در افزایش ظرفیت باربری اتصال دارد (جدول ۵ و شکل ۵).

۱۲. مراجع

۱. علی‌نیا، محمدمهدی؛ تئوری صفحات و پوسته ها، ویرایش دوم، انتشارات آشیان، تهران، ۱۳۸۹.

۲. *Camata, G. et al, Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates. Composites: Part B. 2007, 38: 277-288.*

۳. *Cook RD. et al, Concepts and applications of finite element analysis. 3rd ed. John Wiley and Sons, 1989.*

۴. *Chung, K. F. et al, Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading, Journal of Engineering Structural, 2000, 22, pp. 1271-1284.*

۵. *Fawzia, S. et al, Experimental and finite element analysis of double strap joint between steel plate and normal modules CFRP, Journal of Composite Structure, 2006, 75, pp. 156-162.*

۶. *Kachlakev, D. et al., "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates," Final Report for Oregon Department of Transportation Research Group, Internet File, 2001.*