

تحلیل تاثیر میزان نیروی پیش کشش پیچ بر رفتار اتصال ترکیبی چسبی-مکانیکی کامپوزیتی

احسان سلاحي

selahi@miau.ac.ir

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی تاثیرگذاری میزان نیروی پیش کشش وارد بر پیچ و گشتاور پیچشی ناشی از آن بر رفتار اتصالات ترکیبی چسبی و پیچی با قطعات کامپوزیتی لایه‌ای پرداخته شده است. بدین منظور با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزا محدود انسیس اتصال ترکیبی تک‌لایه کامپوزیتی به صورت سه بعدی شبیه‌سازی گردید. در ابتدا جهت انتخاب تعداد المان مناسب رفتار همگرایی اتصال انتخابی بررسی گردید. سپس در تحلیل‌های مختلف و با تغییر در مقدار نیروی پیش کشش پیچ و دنبال آن تغییر در گشتاور پیچشی وارد بر پیچ، تاثیرگذاری آن بر مولفه‌های تنش پیچ و مهره، لایه‌های کامپوزیتی و لایه چسب و به دنبال آن بر چگونگی گسیختگی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تحقیقات انجام گرفته توسط سایر محققین، اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی ارائه شده مورد تایید قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این می‌باشد که افزایش نیروی پیش کشش تا زمانی که گسیختگی در پیچ و مهره رخ ندهد، موجب افزایش ظرفیت تحمل بار می‌شود.

واژگان کلیدی: اتصال ترکیبی، نیروی پیش کشش، پیچ و مهره، چسب، کامپوزیت لایه‌ای.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۵

۱- مقدمه

یکی از مهمترین چالش‌ها و گلوگاه‌های طراحی و ساخت سازه‌های کامپوزیتی، اتصال دو سازه به یکدیگر است. به طور کلی اتصال، یکی از عوامل اصلی در کاهش ظرفیت تحمل نیرو و افزایش وزن سازه می‌باشد. بنابراین حالت ایده‌ال در طراحی یک سازه کامپوزیتی، ساخت یک تکه و فاقد اتصال آن است که در اکثر موارد به علت محدودیت‌های ابعادی که در بسیاری از پروسه‌های ساخت قطعات بزرگ وجود دارد و همچنین محدودیت ابعادی در حمل و نقل سازه از محل ساخت به محل نصب، امکان ساخت یکپارچه قطعات وجود ندارد. بنابراین باید قطعات را در ابعاد کوچکتر تولید و سپس در محل نصب آنها را به یکدیگر اتصال داد.

علاوه بر این، تعمیر یک سازه آسیب دیده کامپوزیتی نیز به صورت اتصال دو قطعه است که در آن ناحیه آسیب دیده به صورت کامل برداشته می‌شود و سپس وصله مناسب به محل فوق چسبانده می‌شود.

در سازه‌های کامپوزیتی به طور معمول از اتصال چسبی استفاده می‌شود. در اتصالات چسبی دو نوع تنش برشی (مماس بر لایه چسب) و تنش پوسته‌شدگی (عمود بر لایه چسب) ایجاد می‌شود. اتصالات چسبی مقاومت خوبی در برابر بارهای برشی دارند، اما مقاومت آنها در برابر پوسته‌شدگی نسبتاً ضعیف است. بنابراین این ایده ایجاد گردید که با اضافه نمودن اتصال پیچ و مهره‌ای در محل اتصال چسبی، بتوان مقاومت در برابر پوسته‌شدگی را تقویت نمود [۱].

در زمینه اتصالات چسبی تحقیقات زیادی انجام گرفته است که اهم آن‌ها به شرح زیر می‌باشند:

اولین تلاش برای بررسی اتصالات چسبی توسط ولکرسن [۲] در سال ۱۹۳۸ انجام گرفت. وی در اتصال چسبی یک لبه، لایه چسب را به صورت فنرهای پیوسته برشی مدلسازی نمود. در این مدل از اثر گشتاور خمشی ایجاد شده (ناشی از غیر هم مرکز بودن مسیر بار) صرف نظر شده است. پس از آن گولاند و رایزنر [۳] با مدلسازی لایه چسب به صورت دو فنر پیوسته و یکنواخت برشی و نرمال، روش ارائه شده توسط ولکرسن را بهبود بخشیدند.

هارت اسمیت [۴-۵] روش‌هایی جهت مدلسازی اتصالات چسبی یک لبه، دو لبه، پله‌ای و شیبدار برای مواد

ایزوتروپیک ارائه نمود. در این مدل چسب به صورت یک ماده الاستیک خطی مدلسازی شده بود. اولین تلاش برای تحلیل اتصالات چسبی به روش اجزاء محدود توسط آدامز و همکارانش [۶] انجام گرفت، آنها اتصالات چسبی یک لبه، دو لبه و دو پخ را با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل تنش نمودند.

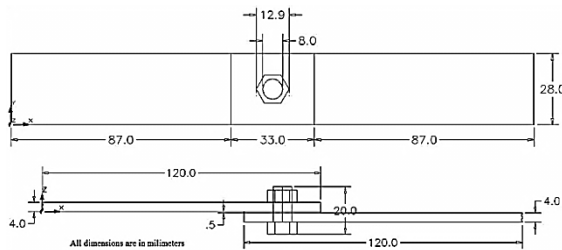
بگدانویچ و کیژاکتارا [۷] با استفاده از روش اجزاء محدود اتصال چسبی دو لبه کامپوزیتی را به صورت سه بعدی مدلسازی و تحلیل نمودند. اخیراً سلاخی و همکارانش [۸-۱۳] با انجام مدلسازی‌های ریاضی خطی و غیرخطی، رفتار انواع اتصالات چسبی لب به لب و عمودی را با قطعات مورد اتصال کامپوزیتی و همچنین پارامترهای موثر بر این رفتار را مورد بررسی قرار دادند.

در زمینه اتصالات ترکیبی چسبی- مکانیکی تحقیقات اندکی انجام گرفته است که تمامی آنها هم محدود به اتصالات لب به لب بوده است، که غالباً هم بر اساس تحقیقات تجربی می‌باشند. در ادامه به اختصار به معرفی این تحقیقات پرداخته خواهد شد.

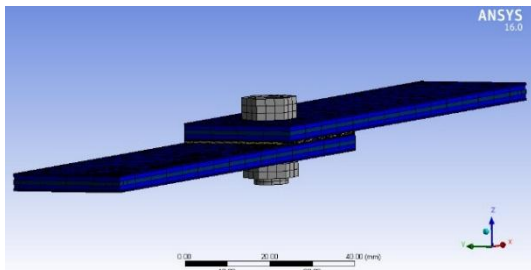
چان و یدگیری [۱۴] با استفاده از روش اجزاء محدود، توزیع تنش در قطعات مورد اتصال تعمیر یافته توسط اتصالات ترکیبی مکانیکی و چسبی را شبیه‌سازی نمودند. کلی [۱۵] با مدلسازی اجزاء محدود سه بعدی، انتقال نیرو در اتصال کامپوزیتی یک لبه ترکیبی را مورد بررسی قرار داد. داناسیکار و دینگ [۱۶] با شبیه‌سازی اجزاء محدود سه بعدی به بررسی رفتار اتصال ترکیبی دو باند با قطعات فلزی پرداختند.

پارویسین و همکارانش [۱۷]، مدل ریاضی دو بعدی جهت تحلیل اتصالات ترکیبی تک لبه مورد استفاده در سازه‌های هوایی ارائه نمودند. ماتسوزاکی و همکارانش [۱۸]، به صورت تجربی و با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های اتصال تک لبه ورقه شیشه به آلومینیوم، افزایش مقاومت برشی در اتصال ترکیبی نسبت به اتصال چسبی را اثبات نمودند.

باروت و مادنجی [۱۹] با مدلسازی ریاضی توزیع تنش برشی و پوسته‌شدگی در لایه چسب و توزیع تنش در پیچ را در اتصال تک لبه ترکیبی تحت بارهای محوری و عرضی مورد بررسی قرار دادند. هوآنگ-نگوک و پارویسین [۲۰] با شبیه‌سازی اجزاء محدود دو بعدی و سه بعدی، توزیع



شکل (۱) ابعاد نمونه اتصال ترکیبی لب به لب تک لبه
 قطعات مورد اتصال چیدمانی از سه نوع کامپوزیت
 لایه‌ای، الیاف شیشه-اپوکسی تک جهته، الیاف کربن-
 اپوکسی تک جهته و پارچه بافته شده کربن-اپوکسی با
 ترتیب چیدمانی زیر تشکیل شده است.
 $[Carbon Uni/Carbon Woven/Glass Uni]_{sym}$
 پیچ و مهره‌ها، فولادی و لایه چسب از جنس رزین
 اپوکسی است. در جدول ۱ خواص مکانیکی کامپوزیت‌های
 لایه‌ای، پیچ و مهره و لایه چسب آورده شده است.



شکل (۲) تصویر مدل اجزا محدود اتصال ترکیبی تک لبه

جدول (۱) خواص مکانیکی قطعه، پیچ و مهره و چسب [۲۶]

قطعه	خواص مکانیکی
کربن- اپوکسی تک جهته	$E_{11} = 123.3 \text{ GPa}, E_{22} = E_{33} = 7.78 \text{ GPa}$ $G_{12} = G_{13} = 5.0 \text{ GPa}, G_{23} = 3.08 \text{ GPa}$ $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.27, \nu_{23} = 0.42$ $S_{ut-1} = 1632 \text{ MPa}, S_{ut-2} = S_{ut-3} = 34 \text{ MPa}$ $S_{uc-1} = -704 \text{ MPa}, S_{uc-2} = S_{uc-3} = -68 \text{ MPa}$ $S_{sh-12} = S_{sh-13} = 80 \text{ MPa}, S_{sh-23} = 55 \text{ MPa}$ $\rho = 1518 \text{ kg/m}^3, t = 0.5 \text{ mm}$
پارچه بافته شده کربن- اپوکسی	$E_{11} = E_{22} = 59.16 \text{ GPa}, E_{33} = 7.5 \text{ GPa}$ $G_{12} = 17.5 \text{ GPa}, G_{13} = G_{23} = 2.7 \text{ GPa}$ $\nu_{12} = 0.04, \nu_{13} = \nu_{23} = 0.3$ $S_{ut-1} = S_{ut-2} = 513 \text{ MPa}, S_{ut-3} = 50 \text{ MPa}$ $S_{uc-1} = S_{uc-2} = -437 \text{ MPa}, S_{uc-3} = -150 \text{ MPa}$ $S_{sh-12} = 120 \text{ MPa}, S_{sh-13} = S_{sh-23} = 55 \text{ MPa}$ $\rho = 1451 \text{ kg/m}^3, t = 1.0 \text{ mm}$

تنش برشی و پوسته‌شدگی در لایه چسب و انتقال نیرو در
 پیچ و همچنین ضرایب تمرکز تنش در اتصال را بررسی
 نمودند.

دوک‌های و ماتسیوشی [۲۱] با شبیه‌سازی اجزا
 محدود و تست نمونه‌های اتصال ترکیبی فولاد به
 کامپوزیت لایه‌ای با الیاف کربن و شیشه، رفتار نیرو
 جابجایی و توزیع تنش را مورد بررسی قرار دادند.
 ونکاتشوارلو و راجاسخار [۲۲] با مدلسازی توسط نرم‌افزار
 انسیس به تحلیل تنشی در اتصال کامپوزیتی ترکیبی
 پرداختند. بدجونا و همکارانش [۲۳] با شبیه‌سازی
 اجزای محدود و تست نمونه اتصالات ترکیبی لب به لب، رفتار
 نیرو-جابجایی و توزیع نیرو را در پیچ را بررسی نمودند. به
 تازگی نیز سلاخی [۲۴] با بکارگیری نرم‌افزار اجزا محدود
 انسیس و انجام شبیه‌سازی سه بعدی، گسیختگی اتصالات
 ترکیبی چسبی-مکانیکی کامپوزیتی تک لبه و دو لبه در
 معرض بارگذاری‌های محوری، برشی و عمودی را مورد
 بررسی قرار داد.

عملکرد و کارایی اتصالات ترکیبی چسبی و مکانیکی
 نیز تحت تاثیر نیروی پیش کشش ایجاد شده در پیچ
 می‌باشد که چگونگی این تاثیرگذاری در اتصالات ترکیبی
 تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این
 مقاله به بررسی چگونگی تاثیرگذاری میزان نیروی پیش
 کشش وارد بر پیچ و گشتاور پیچشی ناشی از آن بر رفتار
 اتصالات ترکیبی چسبی و پیچی با قطعات کامپوزیتی
 لایه‌ای پرداخته شده است.

۲- مبانی و روش‌ها

مشخصات هندسی نمونه اتصال لب به لب در برگرفته
 شده از استاندارد ASTM D5961 [۲۵] است. در شکل
 ۱ ابعاد هندسی نمونه اتصال ترکیبی لب به لب تک لبه و
 در شکل ۲ نیز تصویری از مدل المان‌بندی شده اتصال
 ترکیبی تک لبه بکار گرفته شده در مدلسازی نشان داده
 شده است. المان‌های بکار گرفته شده همگی، المان‌های
 جامد و سه‌بعدی مکعبی ۲۰ گره‌ای انتخاب شده‌اند. در
 تمامی تحلیل‌های انجام گرفته یک سر اتصال در گیر و
 سر دیگر آزاد می‌باشد و به سر آزاد، نیروی محوری اعمال
 می‌شود.

در جدول ۲، نتایج حاصل از بررسی همگرایی بر رفتار اتصال که سر آزاد آن در معرض نیروی محوری 1300 N قرار گرفته، ارائه شده است. گفتنی است که در این جدول منظور از درصد اختلاف، درصد اختلاف با حالت بیشترین تعداد المان (ردیف آخر) است.

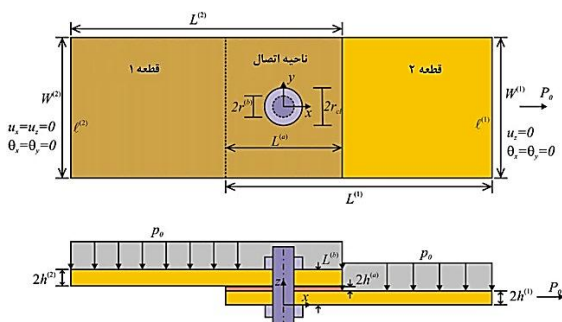
جدول (۲) بررسی همگرایی در اتصال ترکیبی تک لبه ترکیبی

حالت	تعداد المان	$\delta_{t-\max}$ (mm)	$\sigma_{x-\max}$ (MPa)	بیشینه معیار گسیختگی
1	1233	5.85	130.77	0.458
2	3953	5.81	148.6	0.618
3	7826	5.874	169.6	0.56
4	10478	5.858	170.27	0.546

از مقایسه نتایج بدست آمده از حالت سوم با حالت چهارم مشاهده می‌گردد که مقادیر بیشینه جابجایی کل، بیشینه تنش محوری و بیشینه معیار گسیختگی بسیار نزدیک به حالت چهارم است. بنابراین برای بررسی رفتار اتصال ترکیبی تک لبه، حالت سوم (مدلسازی با ۷۸۲۶ المان) انتخاب می‌شود.

۳-۲- اعتبارسنجی

در این بخش جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، نمودار توزیع تنش‌های برشی و پوسته‌شدگی در لایه چسب واقع در خط میانی عرضی در اتصال ترکیبی تک لبه ارائه شده در مرجع [۱۹]، با مدلسازی اجزا محدود انجام گرفته، مورد مقایسه و بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۳، شماتیکی از این اتصال ترکیبی و در جدول ۳، مشخصات هندسی قطعات کامپوزیتی، پیچ فولادی و لایه چسب آورده شده است.



شکل (۳) اتصال ترکیبی مدلسازی شده در [۱۹]

شیشه-اپوکسی تک‌جهته	$E_{11} = 45 \text{ GPa}, E_{22} = E_{33} = 10 \text{ GPa}$ $G_{12} = G_{13} = 5.0 \text{ GPa}, G_{23} = 3.85 \text{ GPa}$ $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.3, \nu_{23} = 0.4$ $S_{ut-1} = 1100 \text{ MPa}, S_{ut-2} = S_{ut-3} = 35 \text{ MPa}$ $S_{uc-1} = -675 \text{ MPa}, S_{uc-2} = S_{uc-3} = -120 \text{ MPa}$ $S_{sh-12} = S_{sh-13} = 80 \text{ MPa}, S_{sh-23} = 46 \text{ MPa}$ $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3, t = 0.5 \text{ mm}$
لایه چسب اپوکسی	$E = 3780 \text{ MPa}, G = 1400 \text{ MPa}, \nu = 0.35$ $S_{ut} = 54.6 \text{ MPa}$ $\rho = 1160 \text{ kg/m}^3, t = 0.5 \text{ mm}$
پیچ و مهره فولادی	$E = 200 \text{ GPa}, G = 77 \text{ GPa}, \nu = 0.3$ $S_{ut} = 460 \text{ MPa}, S_y = 250 \text{ MPa}$ $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3, D_b = 8 \text{ mm}$

در مدلسازی انجام گرفته شرایط تماسی بین سطوح لایه‌های کامپوزیتی با سطوح لایه چسب و سطوح لایه‌های کامپوزیتی با یکدیگر به صورت اتصال پیوسته می‌باشد و فرمولاسیون در تحلیل تماسی، روش قیود چند نقطه‌ای (MPC) می‌باشد. همچنین شرایط تماسی بین سطوح دیواره حفره ایجاد شده با پیچ و سطوح لایه‌های کامپوزیتی با سر پیچ و مهره به صورت اصطکاکی (با ضریب اصطکاک ۰٫۱) انتخاب شده است. فرمولاسیون بکار رفته در تحلیل تماسی، روش Pure Penalty می‌باشد.

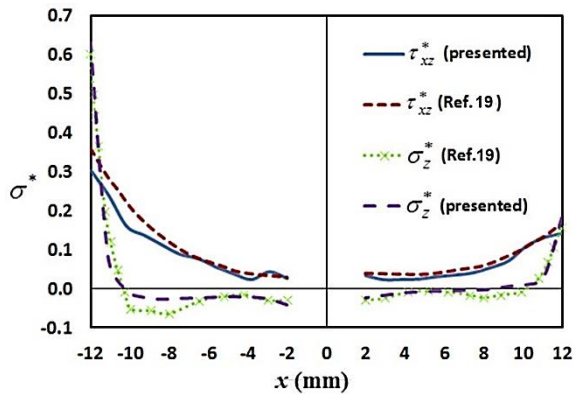
در شبیه‌سازی‌ها، تغییر شکل‌ها الاستیک و بزرگ در نظر گرفته شده است که در آن ماتریس سفتی به دلیل تغییر هندسه و یا دوران مدل تغییر می‌کند. در تحلیل‌های انجام گرفته یک سر اتصال (سمت چپ اتصال) درگیر و سر دیگر (سمت راست) آزاد می‌باشند. تمامی شبیه‌سازی‌ها شامل سه مرحله:

- ۱) اعمال نیروی پیش کشش و گشتاور پیچشی آن
- ۲) قفل کردن جابجایی‌ها
- ۳) اعمال نیروی محوری به سر آزاد نمونه

۳- نتایج

۳-۱- بررسی همگرایی

جهت انتخاب تعداد المان مناسب برای مدلسازی اتصال ترکیبی، در این بخش رفتار همگرایی اتصال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور با ریز نمودن المان‌ها (افزایش تعداد المان‌ها)، میزان حساسیت رفتار اتصال ترکیبی تک لبه بر مقادیر بیشینه جابجایی، بیشینه تنش محوری و بیشینه معیار گسیختگی، مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۴) مقایسه توزیع تنش برشی و پوسته شدگی بدست آمده با نتایج مرجع [۱۹]

۳-۳- اثر نیروی پیش کشش پیچ

در تحقیق دوک‌های و ماتسیوشی [۲۱] مقدار نیروی پیش کشش ۱۰۰۰ N در نظر گرفته شده بود. بنابراین در این تحقیق جهت انتخاب نیروی پیش کشش بهینه، با تغییر نیروی پیش کشش حول این مقدار، یعنی از ۵۰ N تا ۲۰۰۰ N و به دنبال آن تغییر گشتاور پیچشی اعمالی ناشی از پیش کشش مطابق رابطه (۱)، تاثیر این پیش نیرو بر رفتار اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

$$T = \mu FD \quad (1)$$

در رابطه بالا T گشتاور ناشی از نیروی پیش کشش، F نیروی پیش کشش، μ ضریب اصطکاک و D قطر پیچ است. در جدول ۵، تاثیرگذاری مقدار نیروی پیش کشش و گشتاور پیچشی ناشی از آن بر بیشینه مقدار جابجایی کل، بیشینه تنش محوری و بیشینه معیار گسیختگی اتصال ترکیبی تک لبه در معرض نیروی محوری ۱۳۰۰ N، مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۵) تاثیر مقدار نیروی پیش کشش و گشتاور ناشی از آن بر رفتار اتصال ترکیبی تک لبه

نیروی پیش کشش (N)	δ t-max (mm)	σ_x -max (MPa)	بیشینه معیار گسیختگی
50	5.925	169.9	0.56
100	5.919	169.6	0.56
200	5.912	169.1	0.56
500	5.892	167.75	0.559
1000	5.874	166.26	0.557
2000	5.846	163.93	0.555

مشاهده می‌گردد که با افزایش نیروی پیش کشش

جدول (۳) مشخصات هندسی نمونه اتصال ترکیبی مرجع [۱۹]

قطعه	مشخصات
قطعات کامپوزیتی	$L_1 = L_2 = 84mm$ $W_1 = W_2 = 24mm$ $h_1 = h_2 = 2mm$
لایه چسب	$L_a = W_a = 24mm$ $t_a = 0.2mm$
پیچ و مهره	$r_b = 2mm, r_{cl} = 3mm$

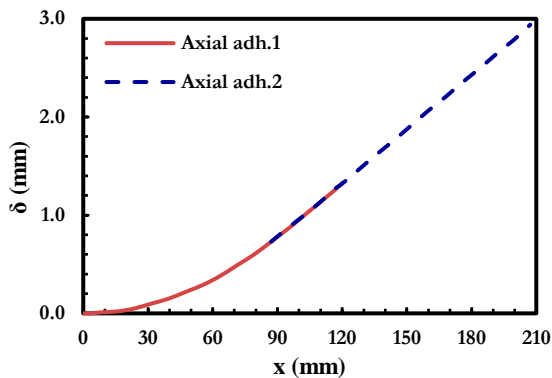
قطعات مورد اتصال یک چند لایه کامپوزیتی است که به صورت ماده شبه ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. پیچ و مهره از جنس فولاد و چسب به صورت یک ماده ایزوتروپیک با خصوصیات مکانیکی نشان داده شده در جدول ۴، مدلسازی شده است. در اینجا اندیس L بیانگر خواص در جهت طولی و اندیس T بیانگر خواص در جهت عرضی است.

جدول (۴) خواص مکانیکی اجزا اتصال ترکیبی [۱۹]

قطعه	خواص مکانیکی
قطعات کامپوزیتی	$E_L = 180 GPa, E_T = 10.3 GPa$ $G_{LT} = 7.17 GPa, \nu_{LT} = 0.28$
لایه چسب	$G = 414 MPa, \nu = 0.34$
پیچ و مهره	$E = 193 GPa, \nu = 0.3$

اتصال نشان داده شده در معرض نیروی محوری $P_0 = 24 kN$ و فشار عرضی $p_0 = 500 kPa$ قرار گرفته است. در نمودار شکل ۴، توزیع تنش برشی و پوسته شدگی حاصل از مدلسازی با نتایج بدست آمده در مرجع [۱۹]، مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد که نمودارهای توزیع تنش حاصل از شبیه‌سازی انجام گرفته به صورت قابل توجهی منطبق با نتایج بدست آمده از مرجع [۱۹] می‌باشد. گفتنی است که وجود ناپیوستگی در وسط نمودارها ناشی از ایجاد حفره در محل قرار گیری پیچ است.

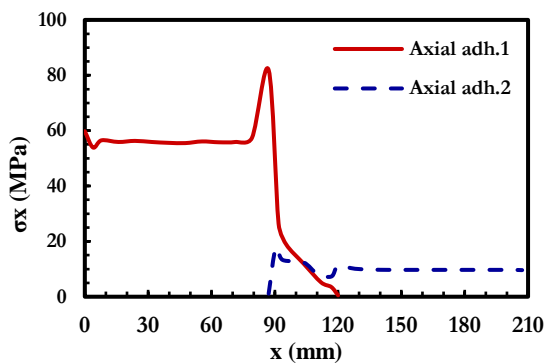
گشتاور خمشی وجود دارد، مقادیر تنش نیز بیشینه می‌باشد. در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمودار تغییرات جابجایی کل و تنش محوری در لایه کربن-اپوکسی تک جهته، بر حسب موقعیت محوری و در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودارهای توزیع تنش برشی و پوسته‌شدگی در طول لایه چسب نشان داده شده است.



شکل (۶) نمودار تغییرات جابجایی کل در لایه کربن-اپوکسی تک جهته، بر حسب موقعیت محوری

با توجه به نمودار شکل ۷، مشاهده می‌شود که در محل ایجاد حفره به دلیل ایجاد تمرکز تنش، تغییرات تنش محوری بسیار زیاد است. بگونه‌ای که بیشترین مقادیر تنش در قطعات کامپوزیتی لایه‌ای در محل حفره ایجاد می‌شود.

همچنین با توجه به کانتور شکل ۵ و نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده می‌گردد که مطابق انتظار و مشابه با اتصال چسبی، بیشینه تنش‌های برشی و پوسته‌شدگی در دو انتهای لایه چسب ایجاد می‌شود.



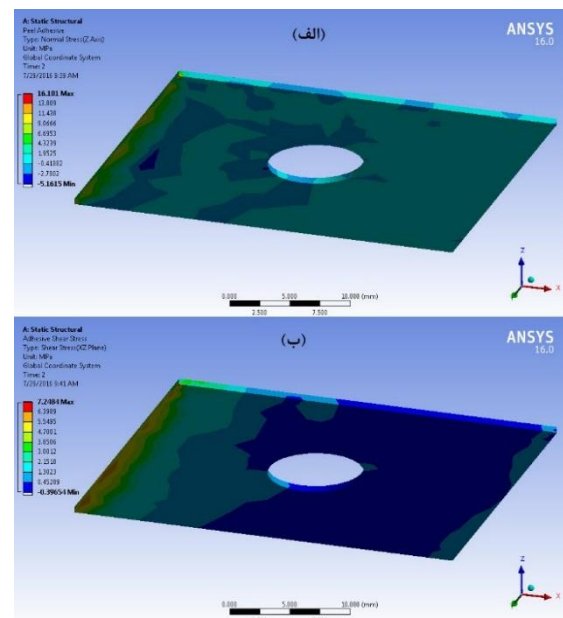
شکل (۷) نمودار تغییرات تنش محوری در لایه کربن-اپوکسی تک جهته، بر حسب موقعیت محوری

مقادیر جابجایی، تنش محوری و معیار گسیختگی کاهش می‌یابد. البته در مقدار پیش کشش ۲۰۰۰ N مقدار تنش معادل فون میزز در پیچ برابر با ۳۱۰ MPa می‌شود که بیشتر از تنش تسلیم آن است. همچنین در اتصال تک لبه ترکیبی مورد بررسی، عامل غالب در ایجاد تنش در پیچ و مهره، نیروی پیش کشش و گشتاور پیچشی ناشی از آن است.

بنابراین در مثال مورد بررسی نیروی پیش کشش ۱۰۰۰ N به عنوان نیروی پیش کشش بهینه انتخاب می‌گردد و در ادامه نتایج جابجایی، تنش و معیارهای گسیختگی حاصل از این تحلیل (با اعمال نیروی پیش کشش ۱۰۰۰ N و گشتاور پیچشی حاصل از آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۳- نتایج تحلیل اتصال ترکیبی تک لبه

در این بخش رفتار اتصال ترکیبی تک لبه در بارگذاری محوری، به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور به انتهای آزاد اتصال نیروی محوری ۶۵۰ N اعمال می‌گردد. در شکل ۵، کانتور تنش‌های پوسته‌شدگی و برشی در لایه چسب نشان داده شده است.



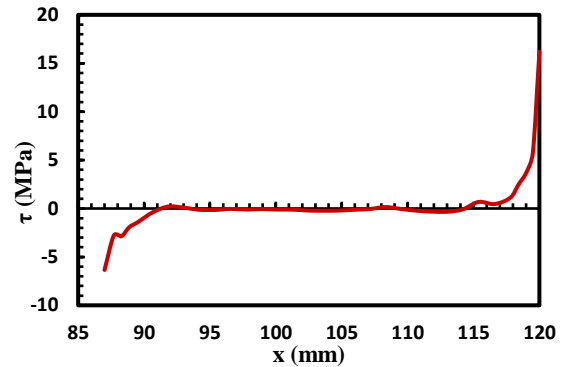
شکل (۵) کانتورهای الف) تنش پوسته‌شدگی و ب) تنش برشی در لایه چسب

مشاهده می‌شود که در انتهای لایه چسب که بیشترین

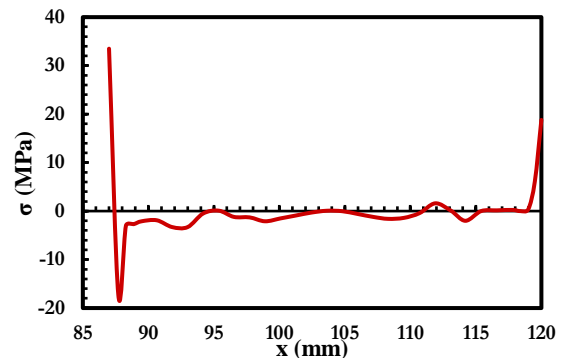
- بیشترین مقادیر تنش در قطعات کامپوزیتی لایه‌ای در ناحیه اتصال رخ می‌دهد.
- بیشینه مقادیر تنش‌های برشی و پوسته‌شدگی در لایه چسب در ابتدا و یا انتهای ناحیه اتصال رخ می‌دهد و نه در محل قرارگیری پیچ.

۶- منابع

- [1] Sun, C. T. Kumar, B. Wang, P. and Sterkenburg, R. D. "Development of improved hybrid joints for composite structures", Purdue University, USA.
- [2] Volkersen, O. "Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten niet ver bindungen mit konstanten lashenquers chnitten", Luftfahrt-Forschung. Vol. 15, pp. 41-47, 1938.
- [3] Goland, M. and Reissner, E. "The stresses in cemented joints", Journal of Applied Mechanics. Vol. 15, pp. A17-A27, 1944.
- [4] Hart-Smith, L. J. "Adhesive bonded scarf and stepped lap joints", Technical report NASA CR 112235, Douglas Aircraft Company. McDonnell Douglas Corporation: USA, 1973.
- [5] Hart-Smith, L. J. "Adhesive bonded single lap joints", Technical report NASA CR 112236, Douglas Aircraft Company. McDonnell Douglas Corporation: USA, 1973.
- [6] Adams, R. D. Coppedale, J. and Peppiatt, N. A. "Failure analysis of aluminum-aluminum bonded joints", Journal of Adhesion. Vol. 2, pp. 105-119, 1978.
- [7] Bogdanovich, A. E. and Kizhakkethara, I. "Three dimensional finite element of double lap composite adhesive bonded joint using submodeling approach", Journal of Composites. Part B: Engineering. Vol. 30, pp. 537-571, 1999.
- [8] Selahi, E. Rajabi, I. Behzadi, M. and Kadivar, M. H. "Analysis of adhesive double lap joint for composite materials", International Conference on Recent Advances in Composite Materials. Varanasi, India, pp. 232-235, 2004.
- [9] Selahi, E. Rajabi, I. Jamali, M. J. and Kadivar, M. H. "Analysis of adhesive double strap joint for composite materials", International Conference on Recent Advances in Composite Materials. Varanasi, India, pp. 208-213, 2004.
- [10] Selahi, E. Rajabi, I. and Kadivar, M. H. "Mathematical modeling of composite single scarf adhesive joint", 13th International



شکل (۸) نمودار توزیع تنش برشی در طول لایه چسب



شکل (۹) نمودار توزیع تنش پوسته‌شدگی در طول لایه چسب

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیرگذاری میزان نیروی پیش کشش وارد بر پیچ و گشتاور پیچشی ناشی از آن بر رفتار اتصالات ترکیبی چسبی و پیچی با قطعات کامپوزیتی لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور اتصال ترکیبی تک‌لبه کامپوزیتی به صورت سه بعدی توسط نرم‌افزار اجزا محدود انسیس شبیه‌سازی گردید.

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین، اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی ارائه شده مورد تایید قرار گرفت. در گام بعد جهت انتخاب تعداد المان مناسب رفتار همگرایی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت چگونگی تاثیرگذاری مقدار نیروی پیش کشش پیچ و نتایج تفصیلی حاصل از شبیه‌سازی اتصال ترکیبی تک‌لبه ارائه گردید.

اهم نتایج حاصل از انجام این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- افزایش نیروی پیش کشش تا زمانیکه گسیختگی در پیچ و مهره اتفاق نیافتد موجب افزایش در ظرفیت تحمل بار اتصال خواهد شد.

- International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol. 30, pp. 117–129, 2010.
- [21] Duc-Hai, N. and Mutsuyoshi, H. "Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates", Construction and Building Materials. Vol. 30, pp. 347–359, 2012.
- [22] Venkateswarlu, S. and Rajasekhar, K. "Modelling and analysis of hybrid composite joint using fem in Ansys". IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol. 6, No. 6, pp. 1-6, 2013.
- [23] Bodjona, K. Raju, K. Lim, G. H. and Lessard, L. "Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part I: model development and validation", Composite Structures. Vol. 129, pp. 268–275, 2015.
- [24] . Selahi, "Failure study of hybrid bonded-bolted composite single and double lap joints", J. Stress Anal., 3 (2), 37-46 (2019).
- [25] Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates. ASTM D5961. <http://www.astm.org/Standards/D5961>.
- [26] ANSYS Workbench V. 16, Engineering data Sources.
- Mechanical Engineering Conference. Isfahan, Iran, 2005.
- [11] Selahi, E. and Elahyari, S. M. R. "Performance investigation of different types of adhesive T-joints under axial and transverse loading, in composite structures", 16th. Annual (International) Conference on Mechanical Engineering-ISME2008. Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 2008.
- [12] Selahi, E. Tahani, M. and Yousefsani, S. A. "Analytical solutions of stress field in adhesively bonded composite single-lap joints under mechanical loadings", International Journal of Engineering. Vol. 27, pp. 475-486, 2014.
- [13] Selahi, E. and Kadivar, M. H. "Non-linear analysis of adhesive joints in composite E structures", International Journals of Advanced Design and Manufacturing Technology. Vol. 9, No. 1, pp. 101-110, 2016.
- [14] Chan, W. S. and Vedhagiri, S. "Analysis of composite bonded/bolted joints used in repairing", Journal of Composite Materials. Vol. 35, pp. 1045-1061, 2001.
- [15] Kelly, G. "Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints", Composite Structures. Vol. 69, pp. 35-43, 2005.
- [16] Ding, K. and Dhanasekar, M. "Flexural behaviour of bonded-bolted butt joints due to bolt looseness", Advances in Engineering Software. Vol. 38, pp. 598–606, 2007.
- [17] Paroissien, E. Sartor, M. Huet, J. and Lachaud, F. "Hybrid (bolted/bonded) joints applied to aeronautic parts: analytical two-dimensional model of a single-lap joint", Journal of Aircraft. Vol. 44, No. 4, pp. 573–582, 2007.
- [18] Matsuzaki, R. Shibata, M. and Todoroki, A. "Improving performance of GFRP/aluminum single-lap joints using bolted/co-cured hybrid method", Composite Part A. Vol. 39, No. 2, pp. 154–163, 2008.
- [19] Barut, A. and Madenc, E. "Analysis of bolted–bonded composite single-lap joints under combined in-plane and transverse loading", Composite Structures. Vol. 88, No. 4, pp. 579–594, 2009 .
- [20] Hoang-Ngoc, C. T. and Paroissien, E. "Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive",