

# ارزیابی کارآیی اتصال چسبی با هندسه قوسی در کلاهدک یک مخزن کامپوزیتی

مهناز ذاکری<sup>۱</sup>، وحید دیندارلو<sup>۲</sup>

۱ استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی سازه‌های پیشرفته، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، m.zakeri@kntu.ac.ir

۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴

## چکیده

از جمله عوامل واماندگی اتصالات چسبی، تکینگی تنش است که اغلب در لبه آزاد انتهای اتصال رخ می‌دهد. برای کاهش تمرکز تنش در این مکان می‌توان از تغییر مدل هندسی انتهای اتصال استفاده کرد. در این پژوهش طرح جدیدی با عنوان مدل چسب قوسی برای اتصال چسبی کلاهدک یک مخزن کامپوزیتی چرخان پیشنهاد شده و رفتار آن با دو مدل هندسی متداول شامل مدل پایه و مدل هندسی با انتهای مقعر مقایسه می‌شود. با توجه به اهمیت مؤلفه‌های تنش برشی عرضی و تنش نرمال پوستگی<sup>۱</sup> در بررسی استحکام اتصال، تنش‌های موجود در انتهای آزاد اتصال برای هر سه مدل فوق با انجام تحلیل‌های عددی ارزیابی می‌شوند. همچنین تأثیر فرکانس چرخش مخزن بر تغییر این مؤلفه‌های تنش بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که مدل چسب قوسی می‌تواند سبب کاهش قابل توجه تنش برشی عرضی و تنش پوستگی در اتصال چسبی کلاهدک مورد نظر شود.

## واژگان کلیدی

مخزن کامپوزیتی، اتصال چسبی، مدل چسب قوسی، تنش برشی عرضی، تنش پوستگی

### ۱. مقدمه

صنایع گوناگون از جمله صنعت هوایی و فضایی، دریایی و خودروسازی شده است.

استفاده از چسب در صنعت هوافضا در اتصالات هواییها در بوئینگ ۷۸۷ و ایرباس A۳۵۰ به اوج خود رسید؛ به طوری که بیش از ۵۰ درصد اتصالات هر دو مورد شامل اتصال چسبی هستند [۱]. در اتصال چسبی، چسب با ایجاد یک لایه واسط بین دو قطعه مورد اتصال، آنها را به هم متصل می‌نماید. چسب‌های ساختاری مناسب برای چسباندن کامپوزیت‌های پلیمری شامل اپوکسی،

اتصالات در سازه‌ها به دلائی چون محدودیت در ابعاد قطعات، استفاده از مواد مختلف، ضرورت دسترسی و بازرسی و تعمیرات ایجاد می‌گردند. امروزه استفاده از اتصالات چسبی در سازه‌های مکانیکی به سرعت روبه گسترش است. این گونه از اتصالات در مقایسه با اتصالات مکانیکی دارای مزایای متعددی چون کاهش ضریب تمرکز تنش، کاهش وزن سازه، مقاومت بالا در برابر نیروهای برشی و مقاومت در برابر خوردگی می‌باشند. این ویژگی‌ها سبب جذب مهندسان به استفاده از اتصالات چسبی در

آکریلیک و پلی یورتان گرماسخت هستند. چسب‌های اپوکسی به‌عنوان مواد مستحکم مطرح‌اند. استحکام برشی این چسب‌ها می‌تواند از استحکام بین لایه‌های کامپوزیت‌ها بیشتر باشد.

اتصال چسبی در سازه‌های کامپوزیتی می‌تواند جهت اتصال دو قطعه کامپوزیتی یا اتصال قطعه کامپوزیتی به قطعه فلزی استفاده شود. مثلاً برای اتصال دم افقی هواپیماهای جنگنده F-14 و F-15 و همچنین اتصال ریشه بال هواپیماهای جنگنده F-18 و F-111 به‌ترتیب از اتصالات چسبی با هندسه پله‌ای و دولبه استفاده شده است [۲]. نخستین تلاش‌ها برای بررسی علمی اتصالات چسبی توسط ولکرسن [۳] در سال ۱۹۳۸ انجام شد. وی در اتصال چسبی تک‌لبه، لایه چسب را به‌صورت فنرهای پیوسته برشی مدلسازی نمود. در این مدل از اثر گشتاور خمشی ایجادشده (به‌علت غیر هم مرکز بودن مسیر بار) صرف‌نظر شد.

گولند و ریسن [۴] با مدل کردن لایه چسب به‌صورت دو فنر پیوسته و یکنواخت برشی و نرمال، روش ارائه‌شده توسط ولکرسن را تصحیح کردند. پس از آن تحقیقات گسترده‌ای توسط هارت اسمیت [۵-۷] در زمینه اتصالات چسبی صورت گرفت. وی روش‌هایی جهت بررسی اتصالات چسبی تک‌لبه، دولبه، پله‌ای و شیب‌دار برای مواد ایزوتروپیک ارائه نمود. او چسب را به‌صورت یک ماده الاستیک خطی مدلسازی کرد.

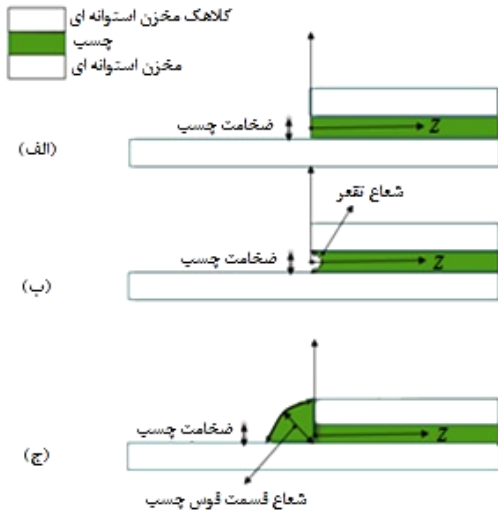
نخستین تلاش‌ها برای تحلیل اتصالات چسبی به روش اجزای محدود در سال ۱۹۸۷ م توسط آدمز و همکاران [۸] انجام شد. آنها تنش در اتصالات چسبی یک‌لبه، دولبه و دو پخ را با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل نمودند. در تحقیقی دیگر آدمز و هاریس [۹] با استفاده از تحلیل غیرخطی به‌کمک روش اجزای محدود به پیش‌بینی استحکام اتصال چسبی پرداختند. گوس و همکاران [۱۰] آزمایشات تجربی همراه با تحقیقات عددی بر روی اتصال تک‌لبه‌ای بین فلز و یک لوله کامپوزیتی تحت بار کشش و فشار محوری و بار خمشی انجام داده‌اند. آنها گزارش کردند که مود و اماندگی اولیه در اثر جدایش<sup>۲</sup> چسب در انتهای اتصال داخلی بوده است. این و اماندگی در ناحیه‌ای با بیشترین تنش پوستگی در اثر بارگذاری کششی و فشاری گزارش شده است. اتصالات لبه‌ای<sup>۳</sup> به‌طور مرسوم به‌عنوان تکنیک اتصالی برای ساختارهای لوله‌ای استفاده می‌شود. لاکین و رزنیر [۱۱] از محققان و پیشگامان مطالعه در زمینه اتصالات چسبی لوله‌ای می‌باشند. آنها پیشرفت تنش در یک اتصال چسبی را به‌صورت

تجربی بررسی کردند که بعدها آدمز و پیات [۱۲] آن را از طریق اجزای محدود مدل کردند. با پیشرفت در زمینه پیچش الیاف، تلاش برای مطالعه ساختار اتصال چسبی لوله‌ای افزایش یافت [۱۳]. اسماعیل و طاهری [۱۴] از یک مدل اجزای محدود برای بررسی تورق در اتصالات چسبی آلومینیم و لوله‌های کامپوزیتی استفاده کردند و یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثر پارامترهای هندسی و بارگذاری بر تنش پوستگی و تنش برشی در لایه چسب انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که بیشینه مقدار تنش پوستگی و برش درون لایه چسب پارامترهای بسیار مهمی برای استحکام اتصالات چسبی تلقی می‌شوند. در سال ۲۰۱۰ م، وی و کویگانک [۱۵] با استفاده از روش تفاضل محدود به این نتیجه رسیدند که مؤلفه‌های تنش در امتداد ضخامت لایه چسب ثابت نیست. به‌تازگی آرنود و همکاران [۱۶] رفتار مکانیکی چسب تحت بارهای کششی نامتناسب<sup>۴</sup> را نیز برای اثر شکل انتها بررسی کردند.

از آنجا که تمرکز تنش در انتهای آزاد اتصال معمولاً عامل آغاز و اماندگی اتصال است، تغییر مدل هندسی در انتهای اتصال یکی از روش‌های کاهش آسیب در این ناحیه خواهد بود. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی طرح جدیدی از اتصال برای کلاهک یک مخزن کامپوزیتی چرخان به‌کمک تحلیل اجزای محدود است. در ادامه، توزیع تنش در این اتصال با دو طرح هندسی متداول مقایسه می‌شود تا در نهایت مناسب‌ترین هندسه برای اتصال مورد نظر مشخص گردد.

## ۲. بیان مسئله

ناحیه انتهایی خطوط اتصال چسبی همیشه تحت تنش‌های زیادی قرار می‌گیرد که در نهایت می‌تواند سبب و اماندگی اتصال شوند. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در اتصالات چسبی، مؤلفه‌های تنش برشی عرضی و تنش پوستگی عوامل مهمی در بررسی استحکام اتصال هستند [۱۰، ۱۴]. استحکام برشی عبارت است از مقاومت چسب در برابر ایجاد لغزش لایه‌ها بر روی هم به‌علت اعمال نیروی برشی. استحکام پوستگی نیز بیانگر مقاومت چسب در برابر پوسته‌شدن به‌علت ایجاد تنش نرمال در بین لایه‌های چسب می‌باشد. البته برای یک مخزن استوانه‌ای در حال چرخش، تنش محیطی نیز قابل توجه است. از جمله روش‌های کاهش تمرکز تنش در انتهای اتصال، تغییر مدل هندسی چسب در این ناحیه است. در این پژوهش، انتخاب طرح مناسب برای اتصال

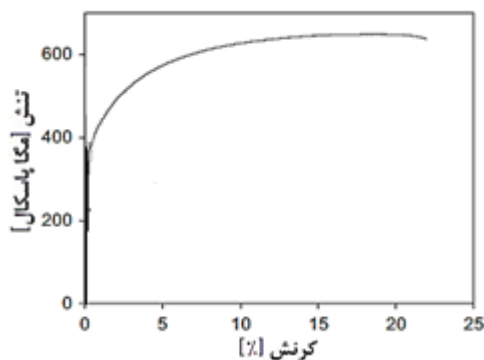


شکل ۲. نمای دوبعدی مدل‌های هندسی چسب در محل اتصال

(الف) هندسی پایه، (ب) هندسی با انتهای مقعر، (ج) هندسی چسب قوسی

### ۳-۱. صحنه‌گذاری

برای صحنه‌گذاری بر نتایج آنالیز اجزای محدود، از نتایج فسل و همکاران [۱۷] استفاده می‌شود. در این مرجع، مدلسازی در نرم‌افزار انسیس با المان‌های هشت گره‌ای 82 plane در حالت کرنش صفحه‌ای انجام شده‌است. ضخامت چسب و زیرلایه‌های فولادی به ترتیب به ۱۱ و ۸ المان تقسیم شده و در طول خط اتصال، ۱۵۰ المان در نظر گرفته‌اند. همچنین تنش مجاز برای زیرلایه‌ها ۴۰۰ مگاپاسکال است که این تنش نقطه تسلیم کششی اتصال طبق نتایج تجربی (شکل ۳) می‌باشد.



شکل ۳. منحنی تنش - کرنش مهندسی حاصل از تست نمونه فولاد [۱۷]

آنها نتایج تنش‌های برشی و نرمال را با استفاده از تنش برشی میانگین ۲۴ مگاپاسکال نرمالایز کرده‌اند. شرایط تکیه‌گاهی به این صورت است که یک انتهای اتصال گیردار و انتهای دیگر در تمام جهات به‌جز راستای اعمال نیرو (شکل ۴) مقید شده است. در این

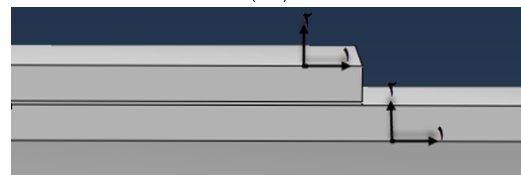
چسبی کلاهک به یک مخزن کامپوزیتی استوانه‌ای مورد نظر است. برای این منظور توزیع تنش در سه مدل هندسی، تحلیل می‌شود که شامل: مدل هندسی پایه، مدل هندسی با انتهای مقعر و نهایتاً مدل چسب قوسی می‌باشند. نحوه همپوشانی مخزن و کلاهک و همچنین هندسه اتصال این سه مدل به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده‌اند. محور Z در شکل ۲، همراستا با محور طولی مخزن است. ابعاد هندسی اجزای اتصال مورد نظر در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. حل عددی میدان تنش در اتصالات مورد نظر و بررسی تأثیر فرکانس چرخش بر هر یک از مؤلفه‌های تنش، به کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌گیرد. در ادامه، نحوه مدلسازی و نتایج حاصل از حل عددی بیان می‌شود.

جدول ۱. ابعاد هندسی اجزای سازه و اتصال

مقدار (میلی‌متر)	کمیت
۲۰	طول ناحیه همپوشانی
۰/۲	ضخامت چسب
۲	ضخامت قطعات کامپوزیتی
۲۳	شعاع داخلی مخزن استوانه‌ای
۲/۲	شعاع قسمت قوس چسب
۰/۴	شعاع انحنا در مدل هندسی با انتهای مقعر



(الف)



(ب)

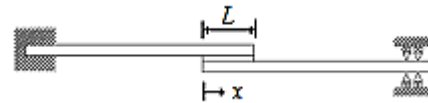
شکل ۴. نحوه همپوشانی کلاهک و بدنه مخزن در ناحیه اتصال

(الف) هندسه مخزن و کلاهک، (ب) نحوه همپوشانی در اتصال

### ۳. تحلیل اجزای محدود

قبل از ورود به معرفی و جزئیات مدلسازی و تحلیل المان محدود سازه مورد نظر، لازم است از صحت روند مدلسازی و نتایج حاصل از آباکوس اطمینان حاصل شود. در ادامه نحوه صحنه‌گذاری مدلسازی در نرم‌افزار آباکوس بیان می‌گردد.

مدلسازی رفتار چسب به صورت الاستیک خطی و زیرلایه‌ها از جنس فولاد (شکل ۳) به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند. خواص مواد و ابعاد اتصال در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود. به منظور صحت‌گذاری، مدل فوق در نرم‌افزار آباکوس مدلسازی شده و نتایج حاصل برای تنش برشی و تنش پوستگی مطابق شکل‌های ۵ و ۶ ترسیم شده‌اند. گفتنی است داده‌های مرجع منحنی تنش - کرنش شکل ۳، جهت استفاده در آباکوس با استفاده از نرم‌افزار پلات دیجیتالیزر<sup>۶</sup> استخراج شده‌اند.



شکل ۴. شرایط مرزی برای نمونه صحت‌گذاری [۱۷]

جدول ۲. خواص مواد برای نمونه صحت‌گذاری طبق مرجع [۱۷]

ماده	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	نسبت پواسون
فلز	۲۰۰	۴۰۰	۰/۳
چسب	۴/۶	-	۰/۴

جدول ۳. ابعاد اتصال برای نمونه مدل شده طبق مرجع [۱۷]

پارامتر	اندازه (میلی‌متر)
طول همپوشانی	۲۰
ضخامت چسب	۰/۲۵
ضخامت زیرلایه‌های فولادی	۱/۲
طول زیرلایه بیرونی (فاصله ناحیه همپوشانی با تکیه‌گاه)	۵۰

### ۳-۲. مدل‌های هندسی مورد بررسی

همان‌طور که در بخش قبل ملاحظه شد، نتایج حاصل از نمونه مدل شده در این پژوهش سازگاری بسیار خوبی با نتایج مرجع [۱۷] دارند. حال پس از اطمینان از صحت روند مدلسازی، در ادامه نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش با هندسه‌های معرفی شده در بخش ۲، مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

### ۳-۳. مواد و لایه‌چینی

مخزن استوانه‌ای و کلاهک آن به صورت چندلایه‌های متقارن از جنس کامپوزیت شیشه / اپوکسی و چسب از نوع اپوکسی AY103 مورد استفاده قرار گرفته است. خواص این ماده کامپوزیت در جدول ۴ و خواص چسب در جدول ۵ بیان شده‌اند. در این دو جدول اندیس ۱

بیانگر جهت الیاف اندیس ۲ جهت عرضی یا عمود بر الیاف و اندیس  $a$  مربوط به چسب است. تمام چندلایه‌های کامپوزیتی به صورت  $[90_2 / 0_2 / 90_2 / 0_2 / 90_2]$  لایه‌گذاری می‌شوند. رفتار مواد در مدلسازی اجزای محدود به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

### ۳-۴. شرایط مرزی و بارگذاری

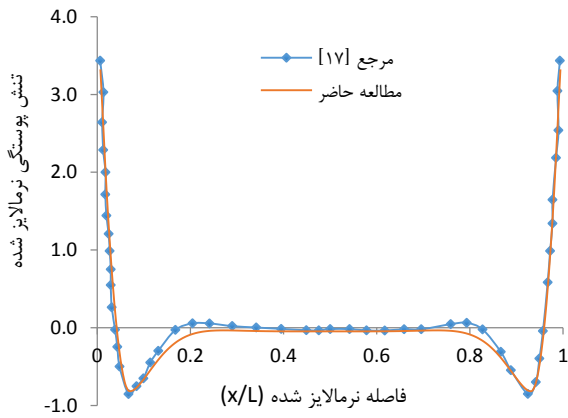
برای اعمال شرایط مرزی در دو انتهای سازه، یک گره از انتهای مخزن کامپوزیتی و یک گره از کلاهک که هر دو روی محور طولی استوانه قرار دارند انتخاب شده و هر دو نقطه در جهت محور استوانه مقید و بقیه درجات آزادی باز نگه داشته شده‌اند (شکل ۷). سپس بار چرخشی با فرکانس  $800 \text{ rev/sec}$  روی تمامی گره‌ها اعمال می‌شود.

### ۳-۵. المان‌بندی

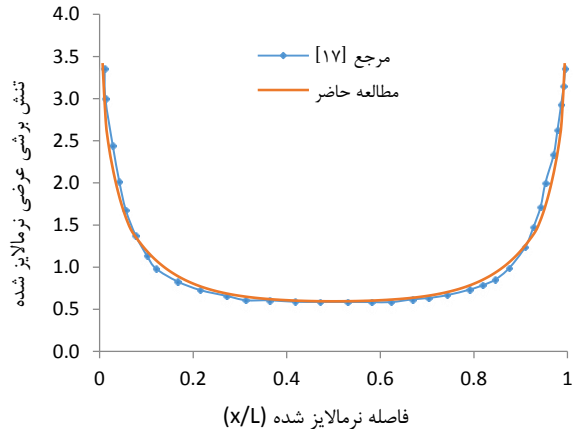
مدلسازی مجموعه سازه و اتصال چسبی در نرم‌افزار آباکوس  $6/12$  به صورت سه‌بعدی انجام می‌شود. برای کاهش تعداد المان‌ها و حجم محاسبات، به جای مدلسازی تمام مخزن به صورت استوانه کامل، فقط یک‌چهارم آن مدل شده (شکل ۷) و شرایط مرزی تقارن اعمال شده است. با توجه به اهمیت تنش برشی عرضی در استحکام اتصال چسبی، در این پژوهش از المان‌های توپر سه‌بعدی C3D8 استفاده و جهت افزایش دقت نتایج سعی شده است که با نزدیک‌تر شدن به ناحیه بحرانی؛ یعنی اطراف خط اتصال، اندازه المان‌ها ریزتر شود (شکل ۸). همچنین برای انتخاب مش‌ریزی مناسب و اطمینان از دقت نتایج حاصل از نرم‌افزار، همگرایی جواب‌ها بررسی شده است. در راستای ضخامت مخزن و کلاهک، با نزدیک شدن به قسمت چسب، المان‌ها کوچک‌تر شده‌اند؛ به طوری که نسبت اندازه بزرگترین المان به کوچکترین المان در هر قسمت برابر با ۳ است. چون قسمت چسب ناحیه بحرانی اتصال می‌باشد، المان‌بندی این قسمت حائز اهمیت بیشتری است. لذا در این ناحیه تعداد المان‌ها در راستای ضخامت چسب ۱۰ المان و در طول خط اتصال چسب ۵۰ المان انتخاب شده‌اند.

### ۴. نتایج حل عددی

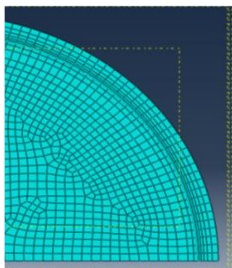
پس از مدل کردن هندسه‌های مختلف اتصال، تحلیل‌های عددی اجزای محدود با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فرکانس چرخش مخزن از صفر تا  $800 \text{ rev/sec}$  انجام می‌شود. برای ارزیابی عملکرد اتصال‌های مورد مطالعه، نتایج این تحلیل‌ها به صورت نمودارهایی ترسیم شده‌اند که در ادامه شرح داده می‌شود.



شکل ۶. مقایسه تنش پوستگی نرمالایز شده با مرجع [۱۷]



شکل ۵. مقایسه تنش برشی نرمالایز شده با مرجع [۱۷]

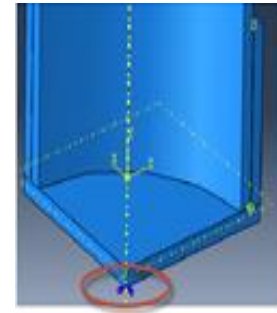
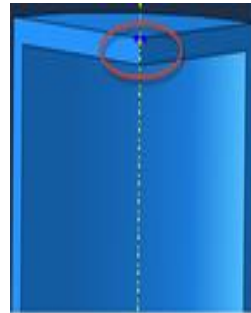


(ب)



(الف)

شکل ۸ نحوه المان بندی الف) بدنه، ب) انتهای کلاهک



شکل ۷. اعمال شرایط مرزی در یک گره از کلاهک و انتهای مخزن

جدول ۴. خواص کامپوزیت شیشه / اپوکسی [۱۸]

مقدار	کمیت
$E_1=36.8 \quad E_2=8.27 \quad E_3=8.27$	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
$G_1=4.14 \quad G_2=4.14 \quad G_3=3$	مدول برشی (گیگاپاسکال)
$\nu_{23}=0.38 \quad \nu_{12}=\nu_{13}=0.26$	ضریب پواسون
$\rho_s=1800$	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)

جدول ۵. خواص چسب اپوکسی مورد استفاده [۱۹]

مقدار	کمیت
$E_a=2.8$	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
$\nu_a=0.4$	ضریب پواسون
$\rho_a=1350$	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)

#### ۴-۱. توزیع تنش در طول خط اتصال

نمودارها، نقطه صفر در محور افقی، بیانگر لبه آزاد در انتهای چسب می‌باشد (شکل ۲). مشاهده می‌شود که انتهای اتصال در لبه آزاد نمونه‌های بررسی شده در معرض مقادیر بزرگی از تنش

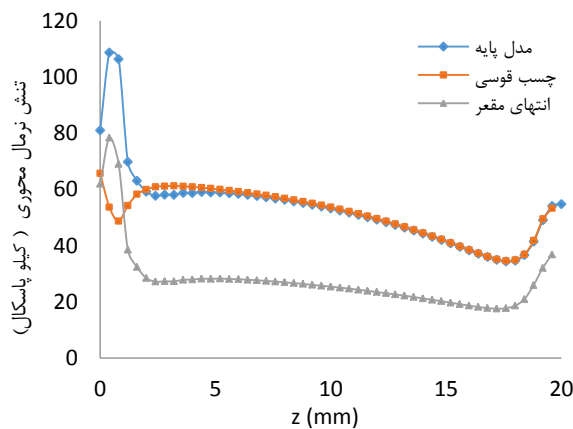
شکل‌های ۹ تا ۱۴ توزیع هر یک از مؤلفه‌های تنش در طول خط اتصال (شکل ۱۵) را برای هر یک از هندسه‌ها تحت سرعت زاویه‌ای ثابت ۸۰۰ دور بر ثانیه نشان می‌دهند. در تمام این

پوستگی ( $\sigma_{rr}$ )، تنش محیطی ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) و تنش برشی عرضی ( $\sigma_{rz}$ ) قرار دارد. چون استحکام مواد چسبی و کامپوزیتی برای تنش برشی عرضی و تنش پوستگی پایین تر است، این دو مؤلفه تنش به عنوان مهمترین فاکتورها برای انتخاب یک اتصال چسبی کارآمد استفاده می شوند. شکل های ۹ و ۱۲ نشان می دهند که استفاده از مدل چسب قوسی تأثیر بسیار مطلوبی بر کاهش این دو مؤلفه تنش در انتهای آزاد چسب دارد. اما مدل انتهای مقعر در مقایسه با مدل پایه، تأثیر قابل توجهی بر این مؤلفه های تنش نداشته است. در مورد سایر مؤلفه های تنش، گفتنی است که مدل هندسی چسب قوسی سبب کاهش تنش محوری (شکل ۱۰) و تنش برشی  $\sigma_{\theta z}$  (شکل ۱۳) در انتهای آزاد اتصال شده است. البته هندسه انتهای مقعر نیز سبب کاهش تنش های محوری و محیطی در تمام طول اتصال می شود. اما به طور کلی این دو مؤلفه تنش، عوامل تأثیرگذار بر استحکام یک اتصال چسبی نیستند و در طراحی هندسه چسب اولویت نخست را نخواهند داشت. همان گونه که در شکل های ۱۳ و ۱۴ ملاحظه می شود، مقادیر تنش های برشی  $\sigma_{rz}$  و  $\sigma_{r\theta}$  در مقایسه با سایر مؤلفه های تنش

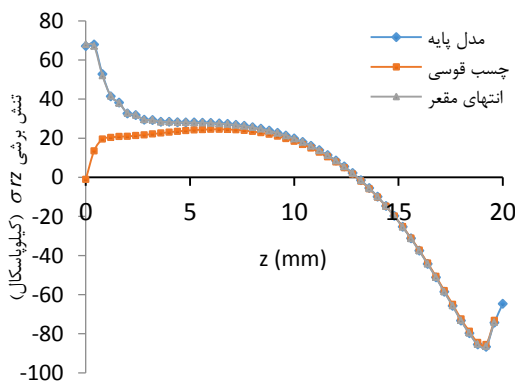
بسیار کوچک و قابل چشم پوشی هستند. به همین دلیل در ادامه، از ارائه منحنی مربوط به این مؤلفه های تنش خودداری شده است.

#### ۴-۲. اثر فرکانس چرخش بر مؤلفه های تنش

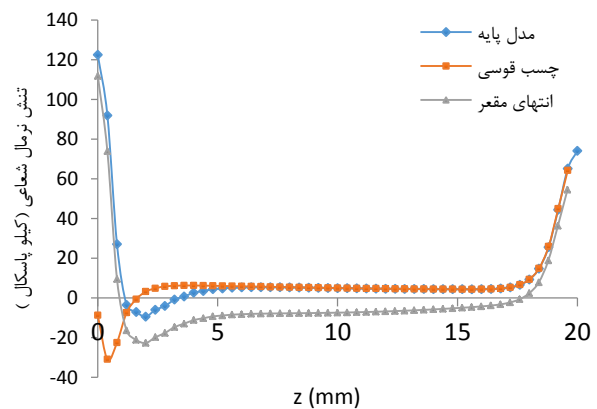
برای بررسی تأثیر فرکانس بر مقدار تنش در لبه آزاد انتهای خط اتصال هر یک از مدل های هندسی پایه، انتهای مقعر و چسب قوسی، فرکانس چرخش مخزن از صفر تا ۸۰۰ دور بر ثانیه افزایش داده می شود. شکل های ۱۶ تا ۱۹ اثر فرکانس را بر مؤلفه های مختلف تنش نشان می دهند. رابطه فرکانس با مؤلفه های تنش، رابطه ای غیرخطی است. افزایش فرکانس تأثیر مشابهی بر تنش پوستگی و تنش برشی عرضی دارد. با افزایش فرکانس در مدل های هندسی پایه و انتهای مقعر، این دو مؤلفه تنش در انتهای آزاد اتصال به سرعت رشد می کنند. اما در مدل چسب قوسی، میزان افزایش تنش بسیار اندک است. همچنین اثر فرکانس بر مؤلفه های تنش محیطی و محوری روند مشابهی دارد و با افزایش فرکانس، مؤلفه های تنش در هر سه مدل هندسی به سرعت افزایش می یابند.



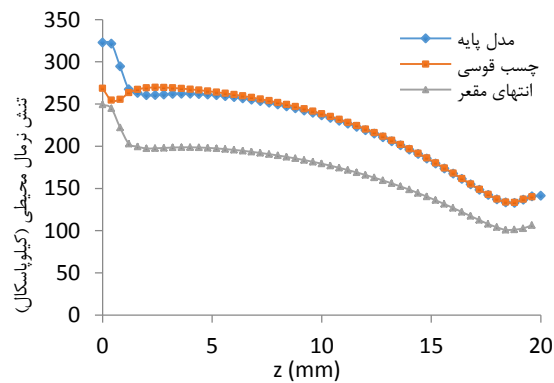
شکل ۱۰. تنش محوری  $\sigma_{zz}$  برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$



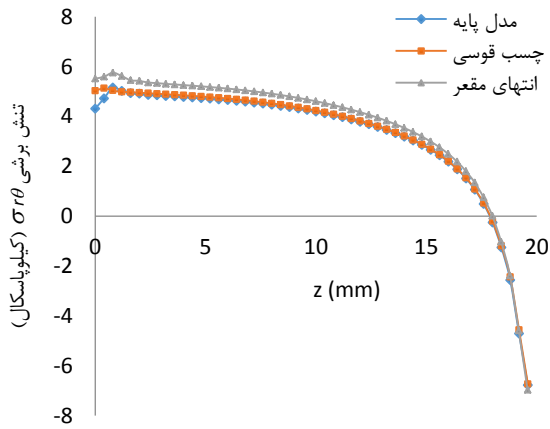
شکل ۱۲. تنش برشی عرضی  $\sigma_{rz}$  برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$



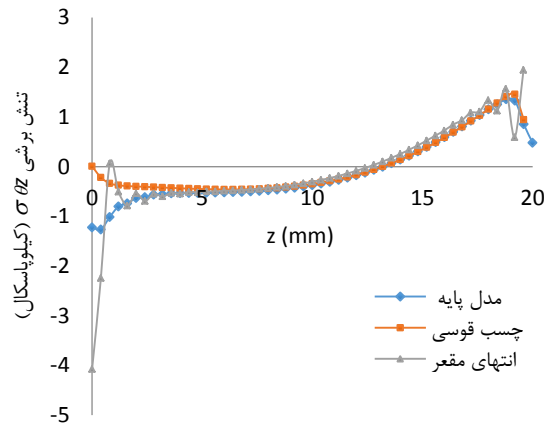
شکل ۹. تنش پوستگی  $\sigma_{rr}$  برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$



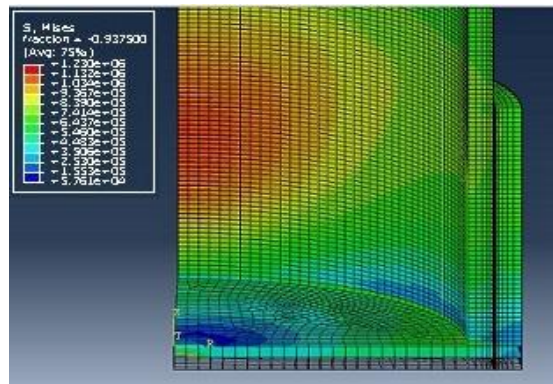
شکل ۱۱. تنش محیطی  $\sigma_{\theta\theta}$  برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$



شكل ۱۴. تنش برشى  $\sigma_{r\theta}$  برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$



شكل ۱۳. تنش برشى  $\sigma_{\theta z}$  برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$



شكل ۱۵. نمونه‌ای از توزیع تنش در محل اتصال

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

مؤلفه‌های تنش پوستگی و تنش برشی عرضی نقش مهمی در استحکام اتصالات چسبی و مواد کامپوزیتی دارند. در پژوهش حاضر، یک مدل هندسی جدید برای اتصال چسبی کلاهک مخزن کامپوزیتی چرخان مورد ارزیابی و مقایسه با دو مدل دیگر قرار گرفت. مهمترین نتایج پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱. انتهای اتصال در لبه آزاد نمونه‌های بررسی شده دارای بیشترین مقدار تنش برشی عرضی، تنش محیطی و تنش پوستگی است.

۲. استفاده از مدل هندسی چسب قوسی موجب ۹۲/۸ درصد کاهش در تنش پوستگی در انتهای اتصال تحت چرخش با فرکانس  $800 \text{ rev/sec}$  شده است. چون ماده چسب نسبت به این مؤلفه تنش حساس است، چنین کاهش در مقایسه با دو مدل هندسی دیگر بسیار قابل‌توجه و مفید است.

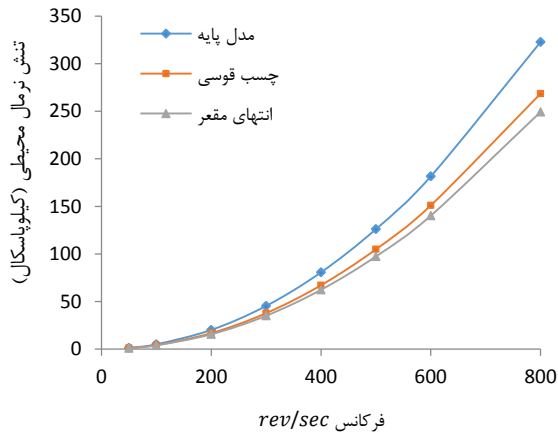
۳. استفاده از مدل هندسی با چسب قوسی مقدار ماکزیمم تنش برشی عرضی  $\sigma_{rz}$  در انتهای اتصال را به‌طور چشمگیری کاهش داده است. مقدار کاهش برای  $\omega = 800 \text{ rev/sec}$  به ۹۸ درصد می‌رسد و مقادیر این مؤلفه از تنش در انتهای آزاد، نزدیک به صفر هستند. اما مدل هندسی با انتهای مقعر تأثیری بر این مؤلفه تنش نداشته و رفتاری مشابه با مدل پایه نشان می‌دهد.

۴. مدل هندسی با انتهای مقعر تأثیر چندانی بر مقادیر تنش پوستگی در انتهای اتصال ندارد، اما در قسمت‌های میانی اتصال موجب کاهش این مؤلفه تنش شده است.

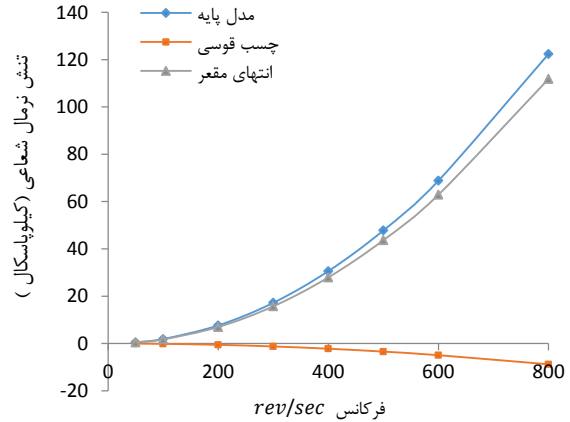
۵. انتهای اتصال دارای بیشترین تنش محیطی است. استفاده از مدل چسب قوسی فقط در انتهای آزاد اتصال سبب کاهش اندکی در تنش محیطی (۱۶/۸ درصد) شده است، اما در سایر قسمت‌های اتصال همانند اتصال پایه عمل کرده است. حال آنکه اتصال با انتهای مقعر در تمام اتصالات مقادیر کمتری از تنش محیطی را نشان می‌دهد. در انتهای آزاد اتصال، این هندسه سبب کاهش تنش محیطی تا ۲۲/۷ درصد شده است.

۶. مقدار تنش‌های برشی  $\sigma_{r\theta}$  و  $\sigma_{\theta z}$  در اتصال چسبی کلاهک مخزن استوانه‌ای تحت بار چرخشی بسیار کوچک و قابل صرف‌نظر است.

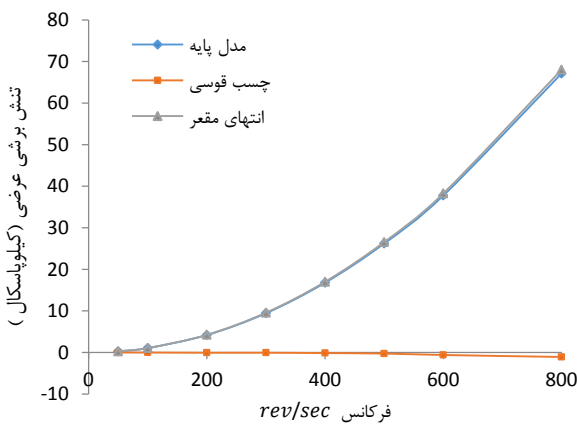
۷. چون مدل هندسی با چسب قوسی موجب کاهش هر دو مؤلفه تأثیرگذار تنش برشی عرضی و تنش پوستگی در انتهای اتصال چسبی تحت بار چرخشی می‌شود، استفاده از این مدل اتصال برای سازه مورد بررسی مناسب خواهد بود.



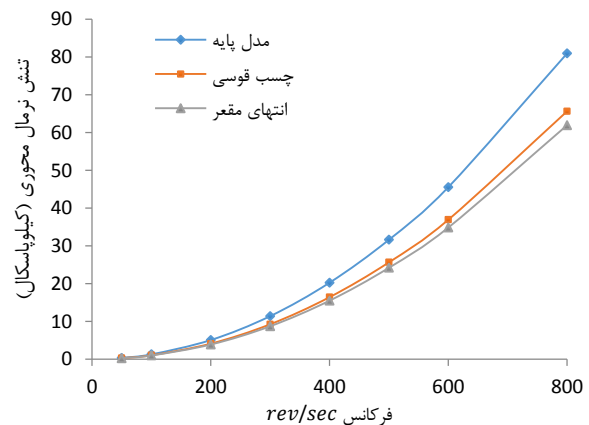
شکل ۱۷. اثر فرکانس بر تنش نرمال محیطی در انتهای آزاد اتصال



شکل ۱۶. اثر فرکانس بر تنش پوستگی در انتهای آزاد اتصال



شکل ۱۹. اثر فرکانس بر تنش برشی عرضی  $\sigma_{rz}$  در انتهای آزاد اتصال



شکل ۱۸. اثر فرکانس بر تنش نرمال محوری  $\sigma_{zz}$  در انتهای آزاد اتصال

## ۶. مآخذ

- [1] D. R. Speth, Y. Yang, G. W. Ritter, Qualification of adhesives for marine composite-to-steel applications, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 30 No. 2, pp.55-62, 2010
- [2] R. D. Adams, J. Comyn, W. C. Wake, *Structural adhesive joint in engineering*, 1<sup>st</sup> Edition, Chapman & Hall, London, 1997.
- [3] O. Volkersen, Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten lashedquers chnitten, *Luftfahrt-Forschung*, Vol. 15, pp.41-47, 1938.
- [4] M. Goland, E. Reissner, The stresses in cemented joints, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 15, pp.17-27, 1944.
- [5] L. J. Hart-Smith, Adhesive bonded double lap joints, *Technical report NASA CR 112237*, Douglas Aircraft Company, McDonnell Douglas Corporation, USA, 1973.
- [6] L. J. Hart-Smith, Adhesive bonded scarf and stepped lap joints, *Technical report NASA CR 112235*, Douglas Aircraft Company, McDonnell Douglas Corporation, USA, 1973.



- [7] L. J. Hart-Smith, Adhesive bonded single lap joints, *Technical report NASA CR 112236*, Douglas Aircraft Company, McDonnell Douglas Corporation, USA, 1973.
- [8] R. D. Adams, J. Coppedale, N. A. Peppiatt, Failure analysis of aluminum-aluminum bonded joints, *Journal of Adhesion*, Vol. 2, pp. 105-119, 1978.
- [9] I. A. Harris, R. D. Adams, Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 4, pp.65-78, 1984.
- [10] T. Guess, E. Reedy, A. Slavin, Testing composite – to – metal tubular lap joints, *J. Composites Technology and Research*, Vol.17, No. 2, pp. 117–24, 1995.
- [11] J. L. Lubkin, E. Reissner, Stress distribution and design data for adhesive lap joints between circular tubes, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 78, pp.1213–1221, 1958.
- [12] R. D. Adams, N. A. Peppiatt, Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints, *Journal of Adhesion*, Vol. 9, pp.1–18, 1977.
- [13] F. Mortensen, and O. T. Thomsen, Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach, *Composite Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1011–1031, 2002.
- [14] R. A. Esmael, F. Taheri, Stress analysis of tubular adhesive joints with delaminated adherend, *J. Adhesion Science and Technology*, Vol. 23, No.13-14, pp. 1827–44, 2009.
- [15] X. Wei, L. Guoqiang, Finite difference three dimensional solution of stresses in adhesively bonded composite joint subjected to torsion, *J. Adhesion*, Vol. 30, pp.191–199, 2010.
- [16] N. Arnaud, R. Créac'hacdec, J. Y. Cognard, A tension/compression–torsion test suited to analyze the mechanical behaviour of adhesives under non-proportional loadings, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 53, pp. 3-14, 2015
- [17] G. Fessel, J. G. Broughton, N.A. Fellows, J.F. Durodola, A. R. Hutchinson, Evaluation of different lap shear joint geometries for automotive applications, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 27, pp. 574–5, 2007.
- [18] S. W. Tsai, H. Thomas Hahn, *Introduction to composite materials*, 1<sup>st</sup> Ed., Technomic publishing company, 1980.
- [19] C. Collier, Consistent structural integrity and efficient certification with analysis, Vol. 2, Technical Report, Collier Research Corporation, 2005.

پی نوشت

- 
1. peeling stress
  2. debonding
  3. lap joints
  4. non-proportional
  5. substrates
  6. plot digitizer