

تحلیل عددی تنش‌های لایه چسب

در اتصال چسبی تکیه نامتوازن آلومینیوم/ کامپوزیت

کامران کاظمی
کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد تبریز
kazemi_ka565@yahoo.com

حسن بیگلری*
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تبریز
hbiglari@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۸

چکیده

سازه‌های مهندسی معمولاً با استفاده از اتصال مواد فلزی به هم برپا می‌شوند. با این وجود، با افزایش کاربرد مواد پایه پلیمری، طراحی اتصالاتی که ترکیبی از کامپوزیت‌ها و فلزات می‌باشند، روزبه‌روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد تا بتوان از مزایا و ویژگی‌های دو ماده مختلف به‌طور همزمان استفاده کرد. لذا ضروری است با بررسی و طراحی درست اتصالات نامتوازن، عملکرد بهینه‌ای برای هر دو قسمت چسبنده به‌دست آورد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس به تحلیل تنش‌های ایجادشده در یک اتصال چسبی تکیه نامتوازن آلومینیوم/کامپوزیت پرداخته شده است. اتصال چسبی تحت کشش می‌باشد و مدلسازی به‌صورت سه‌بعدی صورت گرفته است. در این بررسی، اثر چیدمان لایه‌ها در چسبنده کامپوزیتی، طول اتصال، ضخامت متفاوت چسبنده‌ها و جنس چسب بر توزیع تنش لایه چسب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد توزیع تنش نرمال و برشی در امتداد لایه چسبی نامتوازن بوده و بیشترین اختلاف تنش‌ها برای حالت‌های مختلف بررسی‌شده، در لبه‌های لایه چسب اتفاق می‌افتد. همچنین بهترین توزیع تنش در لایه چسب زمانی روی می‌دهد که سفتی خمشی دو چسبنده برابر باشند.

واژگان کلیدی: اتصال کامپوزیت/آلومینیوم، اتصال چسبی تکیه نامتوازن، تحلیل المان محدود

۱. مقدمه

لایه چسب از اهمیت خاصی برخوردار است. در فضای مطالعاتی در این حوزه، دو گروه تحقیقاتی با علاقمندی‌های مختلف مشغول به تحقیق می‌باشند. گروه اول توزیع تنش در میان لایه چسب را وقتی تغییر شکل‌ها کوچک باشند، مورد مطالعه قرار می‌دهند. گروه دوم اما بار شکست بحرانی

اتصالات چسبی تکیه، به‌دلیل کاربردهای فراوانی در صنعت، به‌صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از مهم‌ترین عوامل خرابی لایه چسب، تنش نرمال جانبی^۱ و تنش برشی می‌باشند. لذا بررسی توزیع تنش نرمال جانبی و برشی در



را با استفاده از روش‌های تجربی و عددی مورد مطالعه قرار می‌دهند تا بدین ترتیب بتوانند استحکام اتصال، شروع لحظه ترک‌برداشتن و انتشار آن را با استفاده از مفاهیم اساسی مکانیک شکست تعیین کنند.

سای و مورتون تحلیل سه‌بعدی تنش برای حالت تغییر شکل یک اتصال تک‌لبه متقارن را انجام داده‌اند [۱]. برای این کار از تحلیل المان محدود الاستیک خطی استفاده شده است که آثار غیرخطی هندسی را روی شرایط مرزی در نظر گرفته‌اند. زو و همکاران حل تحلیلی اتصالات تک‌لبه متقارن را ارائه کرده‌اند [۲]. حل پیشنهادی برای آنالیز اتصالات متقارن فلزی یا کامپوزیتی، که تحت بارهای کششی و یا ممان‌های خمشی هستند، مناسب است. هوانگ و پارویسین به‌صورت حل عددی اتصالات هیبریدی چسب/پیچ با لایه چسب انعطاف‌پذیر را بررسی کرده‌اند [۳]. اتصالات مقید تک‌لبه و هیبریدی با چسب‌های انعطاف‌پذیر در حالت کرنش صفحه‌ای دوبعدی و در حالت سه‌بعدی با استفاده از کد المان محدود SAMCEF شبیه‌سازی شده است. چادگانی و باترا به تحلیل اتصال چسبی تک‌لبه، که شامل ترک‌های سطحی و حفره می‌باشد، پرداخته‌اند [۴]. در این مقاله از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول صفحه^۲ برای تحلیل تنش در لایه‌ها استفاده شده است. شو گو و همکاران به بررسی تأثیر شرایط مرزی و همراه با جداکننده^۳ در اتصال تک‌لبه تحت بارگذاری کششی و فشاری پرداخته‌اند [۵]. جداکننده به‌منظور کاهش خطاهای انطباق در تحلیل استفاده شده است. داس و پرادان تحلیل المان محدود برای تحلیل استحکام اتصالات چسبی در سازه‌های کامپوزیتی لوله‌ای را ارائه کرده‌اند [۶]. پانیگراهی مطالعه‌ای را در مورد طراحی ساختاری اتصال تک‌لبه با چسبنده‌های کامپوزیتی متورق انجام داده که برای این منظور از اصول مکانیک شکست استفاده شده است [۷]. تانگ و همکاران رفتار خستگی و استاتیک یک اتصال تک‌لبه با کامپوزیت‌های بین‌لایه‌ای با لایه چسب ضخیم به‌صورت آزمایشگاهی و عددی را مورد بررسی قرار داده‌اند

[۸]. مطالعات انجام‌شده روی اتصالات چسبی نامتوازن فلز/کامپوزیت بسیار اندک است. در این مقاله با استفاده از روش المان محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار آباکوس تنش‌های نرمال و برشی ایجادشده در لایه چسبی یک اتصال نامتوازن آلومینیوم/کامپوزیت با شرایط مرزی گیردار - ساده، که تحت کشش است، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تحلیلی اتصالات نامتقارن بسیار مشکل می‌باشد. به‌همین دلیل در این مقاله از بررسی عددی استفاده شده است. در همین رابطه، برای بررسی حالات حدی، اتصال فلز/فلز و کامپوزیت/کامپوزیت و همچنین صحنه‌گذاری به‌صورت عددی و نیز حل تحلیلی اتصالات تک‌لبه همگن نیز ارائه شده است. هدف از این مقاله، بررسی تأثیر پارامترهای مهم اتصال از جمله سفتی خمشی چسبنده‌ها، طول اتصال، ضخامت چسب، جنس چسب و جز این‌ها بر توزیع تنش لایه چسب می‌باشد.

۲. تحلیل المان محدود

در این بخش، نحوه مدلسازی المان محدود به‌منظور بررسی رفتار تنش‌های به‌وجود آمده در یک اتصال چسبی تک‌لبه نامتوازن تشریح می‌شود. معمولاً در نرم‌افزار آباکوس این نوع مسائل با یکی از دو نوع حل استاتیکی عمومی یا حل دینامیکی صریح انجام می‌شود. در این تحلیل، دو تیر از جنس آلومینیوم و کامپوزیت چندلایه و یک‌لایه چسب مدلسازی شده است که پارامترهای هندسی آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

آلومینیوم به‌صورت یک ماده ایزوتروپیک الاستیک - پلاستیک مدل شده و مدول یانگ، ضریب پواسون و داده‌های سفتی ایزوتروپیک آنها در جدول ۲ ذکر شده است. از طرفی، کامپوزیت چندلایه نیز به‌صورت یک ماده الاستیک ارتوتروپیک مدل شده است. خواص الاستیک کامپوزیت نیز در جدول ۲ آمده است. لایه‌چینی کامپوزیت شامل سه لایه $[\theta/\text{chopped}/\theta]$ می‌باشد که لایه وسط از الیاف خرد با جهات تصادفی تشکیل شده است. به‌کارگیری

الیاف خرد به منظور کاهش تنش بین لایه‌ای می‌باشد. فرض بر این است که انتهای سمت چپ اتصال گیردار بوده و کشش می‌باشد. انتهای سمت راست آن دارای تکیه‌گاه غلظتی بوده و تحت کشش می‌باشد.

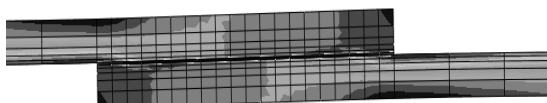
جدول ۱. پارامترهای هندسی دو تیر چسبنده و لایه چسبی آنها

طول لایه چسب (میلی‌متر)	ضخامت چسب (میلی‌متر)	عرض چسبنده (میلی‌متر)	ضخامت چسبنده (میلی‌متر)	طول چسبنده (میلی‌متر)
۱۵۰	۰/۳	۵۰/۸	۶/۳۵	۲۳۵

جدول ۲. خواص چسبنده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی و لایه چسبی

چسبنده	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	ضخامت (میلی‌متر)
الیاف پیوسته	۷/۲ و ۱۵	۰/۲۴ و ۰/۱۲	۱/۹۲۸
الیاف خورد	۸/۵	۰/۱۴	۲/۴۹۴
آلومینیوم	۷۵	۰/۳۳	۶/۳۵
چسب	۲	۰/۳۱	۰/۳

و ۲ است. در شکل ۱ نمونه‌ای از تحلیل میدان تنش توسط نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۱. نمونه‌ای از میدان تنش در تحلیل المان محدود

۳. بحث و بررسی

در ابتدا به منظور صحت‌گذاری مدلسازی، نتایج حاصل از تحلیل المان محدود با نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه می‌شود. در مرجع [۲] نتایج تحلیلی برای اتصال چسب تک‌لبه متوازن میان دو چسبنده کامپوزیتی ارائه شده است. در این اتصال، دو چسبنده کامپوزیتی مشابه که هر کدام ضخامت ۵ و طول ۱۵۰ میلی‌متر دارا می‌باشند، مدل شده‌اند. همچنین یک لایه چسب نیز به ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر میان این دو چسبنده قرار دارد. طول اتصال برابر با ۵۰ میلی‌متر بوده و اتصال در دو سر خود تحت نیروی

برای مدل کردن قسمت آلومینیومی از المان‌های جامد^۴ استفاده می‌شود. برای تحلیل استاتیکی از مدل المان غیرسازگار (C3D8I) و برای تحلیل دینامیکی صریح از مدل المان (C3D8R) استفاده می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به نوع مسئله، فرض تنش صفحه‌ای برای ورق کامپوزیتی می‌تواند به کار رود. بنابراین، هر دو نوع المان جامد و پوسته^۵ قابل استفاده خواهد بود. با این حال مهم است که در راستای ضخامت که چسبنده‌ها و لایه چسب سطح مشترک دارند، دقت مناسبی در محاسبات المان محدود لحاظ شود. این خواسته با به کارگیری المان جامد یا المان پوسته پیوسته به دست خواهد آمد. برای لایه چسب از المان چسب (Coh3d8) استفاده شده است. پاسخ الاستیکی برحسب قانون کشش - جدایش^۶ تعریف شده است که میان مؤلفه‌های برشی و نرمال رفتار مجزایی ارائه می‌کند. ماتریس الاستیک لایه چسب با استفاده از معکوس ضخامت واقعی آن مقیاس‌بندی می‌شوند. تعداد المان‌ها در راستای طول، ضخامت و پهنا چسب به ترتیب برابر ۷، ۳۰ و ۳

کششی ۱۰۰ نیوتن بر میلی‌متر قرار دارد. در بخش‌های الف و ب از شمل ۲ مقایسه میان تنش برشی و نرمال جانبی به‌دست آمده در کار حاضر و نتایج مرجع [۲] نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حداکثر تنش برشی و تنش نرمال در لبه‌های چسب رخ می‌دهد. نتایج به‌دست آمده با نتایج مرجع [۲] مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. البته، هرچند حداکثر تنش نرمال به‌دست آمده از حل عددی با حل تحلیلی مرجع [۲] تطابق بسیار خوبی دارد، در پیش‌بینی حداکثر تنش برشی اختلاف ۱۴ درصدی میان دو روش حل وجود دارد. این اختلاف به‌دلیلی ناتوانی تئوری‌های تحلیلی تیر در پیش‌بینی صحیح تنش برشی جانبی می‌باشد.

علت آنکه تنش برشی در لبه‌ها حداکثر است این است که وظیفه تنش برشی انتقال نیروی کشش محوری از چسبندۀ بالایی به چسبندۀ پایینی می‌باشد. برای این منظور مطابق بخش الف از شکل ۲، ابتدا در لبه راست لایه چسب تنش برشی شکل گرفته و هرچه به داخل لایه چسب پیش رفته شود، تنش برشی تبدیل به تنش محوری کششی می‌شود. لذا از شدت تنش برشی کاسته و به تنش کششی محوری افزوده می‌شود. در لبه سمت چپ لایه چسب، سازوکار انتقال نیرو برعکس بوده و با نزدیک‌شدن به انتهای لبه چسب از شدت تنش کششی محوری و بر تنش برشی افزوده می‌گردد. لذا تنش برشی در لبه‌ها حداکثر است. از طرفی مطابق قسمت ب از شکل ۳، در اتصال تک‌لبه، هر چسبندۀ در انتهای خود همزمان تحت تأثیر نیروی کشش محوری و خمش قرار دارد. این خمش سبب می‌شود تا لایه در دو لبه خود تحت تنش نرمال جانبی قرار بگیرد. ترکیب تنش نرمال جانبی و تنش برشی در لبه‌های لایه چسب از اصلی‌ترین عوامل خرابی لایه چسب می‌باشند.

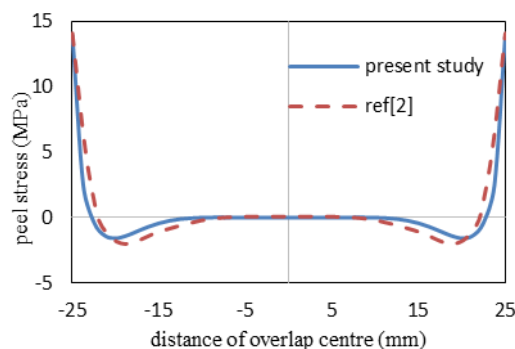
در بخش‌های الف و ب از شکل ۴، توزیع تنش برشی و نرمال جانبی در یک اتصال نامتوازن آلومینیوم/کامپوزیت برای سه لایه‌چینی مختلف چسبندۀ کامپوزیتی در یک نمودار نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل مشخص

است، تنش برشی و نرمال جانبی به ازای تغییر چیدمان لایه‌ها در بیشتر نقاط قسمت رویهم افتادگی تغییر چندانی نمی‌کنند و فقط در دو انتهای آن مقادیر حداکثر تنش با هم متفاوت است. براساس قسمت الف از شکل ۴، تنش برشی در لبه سمت کامپوزیت برای چیدمان [45/chopped/45-] از دو حالت دیگر بیشتر است. در این چیدمان حداکثر تنش برشی ۲۵ درصد بیشتر از چیدمان [0/chopped/0] می‌باشد. علت این امر، تفاوت در سفتی برشی دو لایه‌چینی می‌باشد.

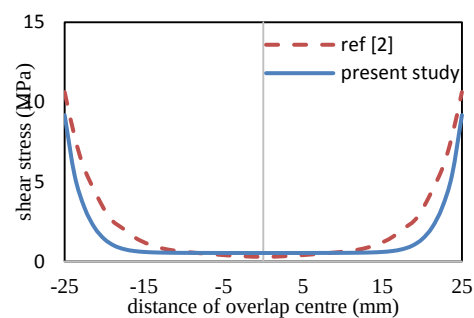
همچنین مطابق بخش ب از شکل ۴، در انتهای لبه سمت آلومینیوم تنش‌های نرمال چیدمان [0/chopped/0] از دیگر لایه‌چینی‌ها بیشتر می‌باشد. علت این امر آن است که سفتی خمشی این لایه‌چینی نسبت به دیگر لایه‌چینی‌ها بیشتر است. در بخش الف و ب از شکل ۵ اثر طول اتصال بر تنش برشی و نرمال جانبی لایه چسب بررسی شده است. در این شکل‌ها، تنش‌های برشی و نرمال مربوط به طول اتصال ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر در کنار هم نمایش داده شده‌اند. شکل الف ۵ نشان می‌دهد که الگوی توزیع تنش برشی در لایه چسب ثابت است. مطابق شکل، وقتی طول اتصال ۳۳ درصد کاهش می‌یابد، مقدار حداکثر تنش برشی در لبه سمت کامپوزیت ۲۵ درصد دچار کاهش و در لبه سمت آلومینیوم ۲۰ درصد دچار افزایش شده است. همچنین شکل ب ۵ گویای این مطلب است که تنش نرمال در لبه سمت آلومینیوم ۳۲ درصد دچار افزایش شده است، در حالی‌که تنش لبه سمت کامپوزیت با ۲۰ درصد کاهش روبرو شده است. لذا کاهش یا افزایش طول چسب اثر دوگانه‌ای بر کاهش یا افزایش تنش‌های برشی و نرمال جانبی لایه چسب دارد. در این قسمت، اثر ضخامت متفاوت چسبندۀها بر تنش‌های برشی و نرمال جانبی لایه چسب بررسی می‌شود. برای این بررسی، مابقی شرایط هندسی و جنس چسبندۀها و لایه چسب بدون تغییر باقی می‌ماند. نسبت ضخامت چسبندۀ آلومینیومی به کامپوزیتی در سه مقدار ۲، ۱ و ۰/۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل الف ۶ و

ب ۶ تنش برشی و نرمال جانبی لایه چسب را برای این سه حالت نمایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر افزایش ضخامت در دو انتهای لایه چسب متفاوت است. با افزایش دو برابری ضخامت آلومینیوم نسبت به کامپوزیت، تنش برشی در لبه سمت آلومینیوم دچار ۲۰ درصد کاهش و در لبه سمت کامپوزیت دچار ۱۴ درصد افزایش شده است. این مطلب برای حالت دوم که ضخامت آلومینیوم نصف ضخامت کامپوزیت است، برعکس می‌باشد. شکل ب ۶ اثر نسبت ضخامت چسبنده‌ها روی تنش نرمال

جانبی لایه چسب نمایش داده است. مطابق شکل، اثر تغییر ضخامت چسبنده‌ها بر تنش نرمال جانبی لایه چسب بیشتر از تنش برشی است. همان‌طور که مشخص است برای حالت $t_{Al}/t_{comp}=2$ تنش‌های نرمال جانبی در هر دو لبه لایه چسب دچار کاهش شده است. البته در لبه سمت آلومینیوم این کاهش کمتر می‌باشد. برای حالت $t_{Al}/t_{comp}=0.5$ تنش‌های نرمال در هر دو لبه لایه چسب افزایش یافته که باز هم افزایش در لبه سمت آلومینیوم کمتر می‌باشد.

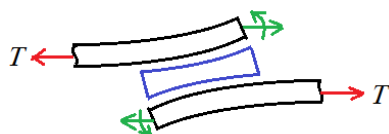


(ب)

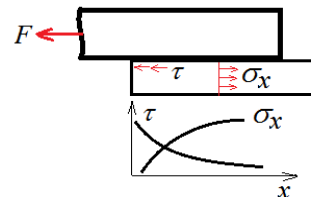


(الف)

شکل ۲. مقایسه میدان تنش در امتداد لایه چسب با نتایج [۲] برای اتصال تک‌لبه متوازن کامپوزیت/کامپوزیت؛ (الف) تنش برشی، (ب) نرمال

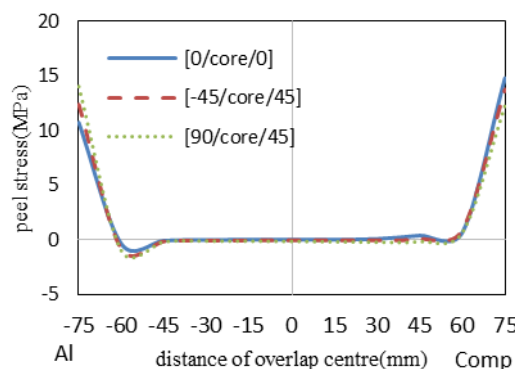


(ب)

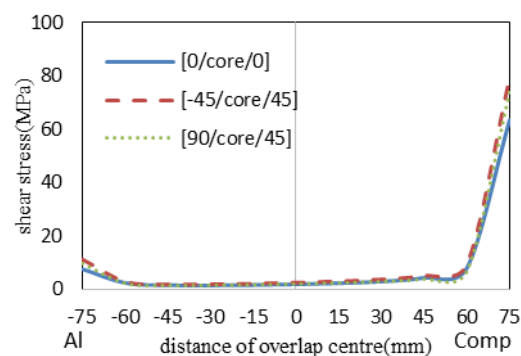


(الف)

شکل ۳. سازوکار شکل‌گیری میدان تنش در لایه چسب؛ (الف) تنش برشی، (ب) تنش نرمال جانبی

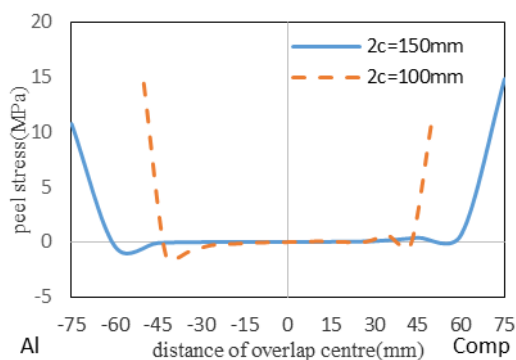


(ب)

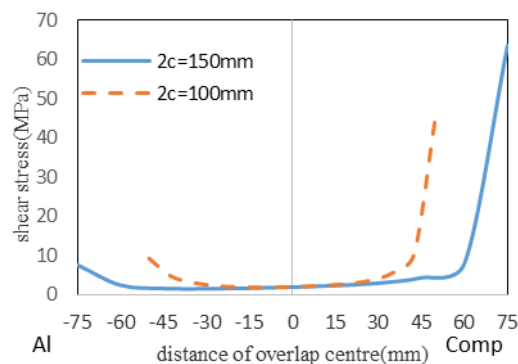


(الف)

شکل ۴. مقایسه توزیع تنش در اتصال تک‌لبه نامتوازن آلومینیوم/کامپوزیت برای سه لایه چینی متفاوت؛ (الف) تنش برشی، (ب) تنش نرمال جانبی



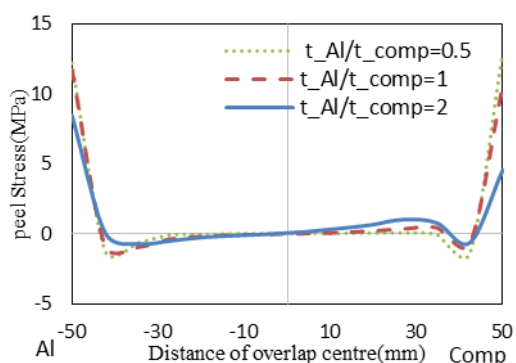
(ب)



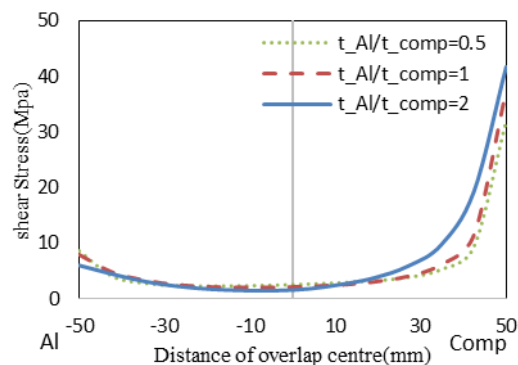
(الف)

شکل ۵. بررسی اثر طول اتصال بر تنش اتصال تک‌لایه نامتوازن برای اتصال آلومینیوم/کامپوزیت [0/chopped/0]

الف) تنش برشی، ب) تنش نرمال جانبی



(ب)



(الف)

شکل ۶. بررسی اثر ضخامت چسبنده‌ها بر میدان تنش لایه چسب اتصال تک‌لایه نامتوازن در اتصال آلومینیوم/کامپوزیت [0/core/0]

با $E_a = 0.85 \text{ GPa}$ و $2c = 100 \text{ mm}$



۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اتصال تک‌لایه چسبی میان دو چسبنده آلومینیومی و کامپوزیتی با استفاده از روش المان محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته شد. این اتصال نامتوازن تحت کشش است. اثر پارامترهایی چون چیدمان لایه‌های چسبنده کامپوزیتی، طول قسمت چسب و ضخامت متفاوت چسبنده‌ها روی تنش‌های لایه چسب بررسی و نتایج زیر حاصل گردید:

اولاً تنش‌های برشی و نرمال جانبی لایه چسب در امتداد طول چسب تغییر چندانی ندارد. اما نزدیک لبه‌ها تغییر

تنش‌ها شدید است. با کاهش طول چسب، تغییرات حداکثر تنش‌های برشی و نرمال جانبی در لبه‌های لایه چسب دارای رفتار دوگانه می‌باشد. همچنین افزایش ضخامت چسبنده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی باعث کاهش حداکثر تنش‌های برشی و نرمال جانبی در لبه‌های چسب می‌شود. این کاهش در تنش نرمال جانبی محسوس‌تر است. نهایتاً اینکه مقادیر تنش برشی و نرمال در دو انتهای طول اتصال در لایه‌چینی با زوایای مختلف، دارای مقادیر مختلف می‌باشند.

- [1] Tsai, M. Y., J. Morton. "Three-dimensional deformations in a single-lap joint." *J Str Anal* 29(1): 1994, pp. 137-145.
- [2] Zou, G. P., K. Shahin, F. Taheri, "An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints." *Comp Struct* 65, 2004, pp. 499-510.
- [3] Hoang-Ngoc, C. T., E. Paroissien. "Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive." *Int J Adhesion & Adhesives* 30, 2010, pp. 117-129.
- [4] Chadegani, A, R. C. Batra, "Analysis of adhesive-bonded single-lap joint with an interfacial crack and a void." *Int J Adhesion & Adhesives* 31, pp. 455-465.
- [5] Guoa, S., D. A. Dillard, Plaut, R. H. "Effect of boundary conditions and spacers on single-lap joints loaded in tension or compression." *Int J Adhesion & Adhesives* 26, pp. 629-638.
- [6] Das, R. R., B. Pradhan. "Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites." *Int J Adhesion & Adhesives* 30, pp. 425-438.
- [7] Panigrahi, S. K. "Structural design of single lap joints with delaminated FRP composite adherends." *Comp Part B* 51, 2013, pp. 112-120.
- [8] Tang, J. H., I. Sridhar, N. Srikanth. "Static and fatigue failure analysis of adhesively bonded thick composite single lap joints." *Comp Sci Tech* 86, 2013, pp. 18-25.

-
1. peeling stress
 2. FSDT
 3. spacers
 4. solid
 5. shell
 6. traction-separation

