

بررسی عددی روش جدید اتصال چسبی بین آلومینیوم و پانل ساندویچی

مهدی امیدعلی، محمد رضا خدمتی*، روح ا. هادیپور گودرزی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۱

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2015.7652](https://doi.org/10.22113/jmst.2015.7652)

چکیده

استفاده از چسب برای اتصال مواد غیر هم‌جنس به عنوان یک روش معمول در صنایع مختلف شناخته شده است. یکی از مواردی که در صنعت دریایی می‌توان از این روش استفاده کرد در اتصال روسازه به بدنه اصلی کشتی‌ها است. در تحقیقاتی که پیش از این انجام گرفته به بررسی اتصال تی‌شکل بین اجزای هم‌جنس کامپوزیتی پرداخته ولی مطالعه کمتری در زمینه اتصال بین ورق‌های آلومینیومی و پانل‌های ساندویچی انجام شده است. این تحقیق به تحلیل استحکام شکست این نوع از اتصالات با روش اجزای محدود پرداخته و در انتها نیز طرح هندسی جدیدی به منظور افزایش استحکام آن ارائه شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج حل عددی از نتایج منتشر شده تجربی استفاده شده و مقایسه آن‌ها تطابق مطلوبی را نشان می‌دهد که این امر بیانگر دقت نتایج حل عددی می‌باشد. در تحلیل عددی برای شبیه‌سازی رفتار ماده چسب و جدایش بین اجزای اتصال از المان‌های تماسی با رفتار ماده دو خطی به صورت قانون کشش-جدایش در مدل ناحیه چسبناک^۱ در انسیس استفاده شده و نتایج تحلیل‌ها نشانگر این نکته هستند که هندسه پیشنهادی اتصال تی‌شکل، سبب افزایش ۷/۲۵ برابری نیروی شکست اتصال خواهد شد. این افزایش استحکام در حالتی به دست می‌آید که به سبب ادغام شدن اجزای اتصال، ساخت آن نیز آسان‌تر خواهد شد.

واژگان کلیدی: اتصال چسبی، استحکام شکست، قانون کشش-جدایش، مدل ناحیه چسبناک، روش اجزای محدود.

۱. مقدمه

گرفته است (Dharmawan et al., 2006). در این تحقیق مکان‌های مختلف گسیختگی برای اندازه‌های مختلف اتصال در نظر گرفته شده که با اندازه‌گیری نرخ انرژی کرنشی آزاد شده در راس محل گسیختگی برای پیش‌بینی بارگذاری و شکست استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی از دقت بالایی برخوردار بوده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که تغییر زاویه بارگذاری تاثیر قابل توجهی بر شکست اتصال خواهد داشت.

در یک اتصال ایکس شکل ساندویچی برای شناورهای نظامی، استحکام فوم هسته و سطح مشترک لایه‌ها و هسته طی تحقیقی به صورت تجربی و حل عددی بررسی شد (Hayman et al., 2007). این تحقیق برای ارزیابی طول مورد نیاز بلوک‌های با استحکام بالا جهت جلوگیری از شکست در محل هسته پوسته‌های ساندویچی انجام شد. مقدار بار کششی قابل تحمل را می‌توان با اعمال لایه‌های اضافی تقویتی افزایش داده و بر استحکام اتصال چسبی افزود. این بررسی‌ها برای دو حالت بارگذاری فشاری و کششی بر روی دیواره‌های عمود بر صفحه عرشه با جنس اجزای اتصال کامپوزیتی انجام شده است. سازه در بارگذاری کششی به گونه‌ای عمل می‌کند که جدایی بین فیلت و لایه‌های تقویت‌کننده باعث خمیدگی لایه‌های تقویت‌کننده به سمت بیرون می‌شود (Dharmawan et al., 2004). در این تحقیق، اهمیت استفاده از فیلت در انتقال نیرو بین اجزای اتصال خاطر نشان شد.

عملکرد اتصال تی‌شکل پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی با استفاده از مدل عددی سه بعدی توسط (Zhou et al., 2008) ارزیابی گردید. در این تحقیق برای معتبر سازی نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی پیشین استفاده شده است. در بارگذاری دینامیکی این اتصال دو نوع مود خرابی به وجود آمد که عبارتند از: خرابی بین اورلمینیت و پانل

دستیابی به سرعت‌های بالای حرکت از نیازهای اساسی در طراحی و ساخت شناورهای تندرو می‌باشد. یکی از عواملی که در دستیابی به این خواسته همواره مانعی مهم بوده است، وزن سازه می‌باشد. بدین جهت طراحان به استفاده از مصالحی رو آورده‌اند که در عین سبکی دارای استحکام بالایی باشند. آلومینیوم و کامپوزیت از جمله موارد پرکاربرد هستند که همواره در شناورهای تندرو مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ترکیب این دو ماده در ساخت شناور می‌تواند باعث کاهش وزن شناور شده ولی استفاده از مواد غیر همجنس در یک سازه همواره چالش نحوه اتصال را روبروی طراحان قرار می‌دهد.

برای اتصال کامپوزیت و آلومینیوم مدت‌هاست که از پیچ و پرچ استفاده می‌شود ولی مشکلاتی از قبیل تمرکز تنش و خوردگی در پیچ و پرچ همواره در رسیدن به اتصالی ایده‌آل از نقاط ضعف این نوع اتصالات بوده است. در مقابل در سال‌های اخیر استفاده از چسب در اتصال این مصالح در محافل علمی دریایی مطرح شده است و سبب شده است که مؤسسات رده‌بندی همچون DNV و RINA به بررسی چسب‌های موجود و نحوه اتصال چسبی بپردازند و دستورالعمل‌هایی را در این زمینه تدوین کنند. اتصال چسبی می‌تواند دارای اشکال متفاوتی باشد. به طور عمومی این اتصالات را می‌توان به دو نوع درون صفحه‌ای و بیرون صفحه‌ای تقسیم کرد. اتصال درون صفحه‌ای شامل انواع حالت‌های لب به لب با شکل‌های مختلف می‌شود و اتصالات بیرون صفحه‌ای شامل اتصالاتی مانند تی‌شکل و یا ایکس شکل می‌باشند.

در مورد اتصالات خارج صفحه‌ای تحقیقات بسیار کمتری در مقایسه با اتصالات درون صفحه‌ای انجام گرفته است. رفتار شکست اتصال کامپوزیتی تی‌شکل در حالت وجود یک گسیختگی اولیه را تحت بارگذاری کششی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار

شناور گشت زنی استفاده شده است که در بخش ۲ به آن پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی چسب از المان‌های تماسی به همراه مدل ماده ناحیه چسبناک استفاده می‌شود تا بتوان گسیختگی چسب و جدایش اجزای اتصال از یکدیگر را به خوبی شبیه‌سازی کرد. یکی از روش‌های موجود برای ایجاد اتصال قوی تی‌شکل، استفاده از فیلت‌های مثلثی برای افزایش استحکام اتصال می‌باشد. در این مقاله ابتدا از این روش برای بررسی استحکام اتصال بین آلومینیوم و پانل ساندویچی استفاده شده است و سپس طرح جدید اتصال و نتایج حاصل از آن در بهبود استحکام اتصال بررسی می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

مشخصات یک شناور گشت زنی از جنس بدنه آلومینیوم توسط (Stenius et al., 2011) ارائه شده که برای تعیین گستره مدل هندسی اتصال از داده‌های آن استفاده شده است. بر اساس این داده‌ها و استفاده از آیین‌نامه DNV، مشخصات هندسی اتصال که در شکل (۱) و جدول (۱) نمایش داده شده است، تعیین گردیده است. علاوه بر داده‌های موجود در جدول (۱)، برای بررسی اثر زوایای متفاوت فوم، مشخصات هندسی به گونه‌ای محاسبه شده که مقدار چسب به کار رفته در تمامی هندسه‌های اتصال، ثابت باشد.

برای تحلیل عددی از نرم‌افزار انسیس (ANSYS 11) استفاده شده که یک نرم‌افزار تجاری شناخته شده در شبیه‌سازی‌های عددی می‌باشد. از آنجا که تمامی نیروها در یک صفحه وارد می‌شود و مدل به لحاظ بعد سوم در امتداد عمود بر صفحه ادامه می‌یابد، تحلیل عددی با فرض کرنش صفحه‌ای بوده و برای این منظور از المان‌های دو بعدی Plane82 برای مدل‌سازی تمامی قسمت‌های اتصال استفاده شده است.

برای مدل‌سازی جدایش چسب در محل اتصال از المان‌های دو بعدی Conta172 و Targe169 استفاده شده است که از نوع تماس سطح به سطح هستند.

پایه و مود دیگر، خرابی برشی در هسته پانل مبنا است. مقدار خرابی پیش‌بینی شده توسط روش عددی در حدود ۳۰ درصد مقدار روش تجربی محاسبه گردید. نیروی برشی موجود در هسته تأثیر بسیار زیادی بر خرابی داشته و وجود فیلت تأثیر مثبتی در افزایش استحکام اتصال خواهد داشت. همچنین افزایش شعاع فیلت سبب بهبود استحکام اتصال خواهد شد. شعاع فیلت و ضخامت لایه‌های تقویت کننده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد اتصال دارد (Shenoi et al., 1992, Dodkins et al., 1994). اثر جدایش لایه‌های تقویت کننده به روش اجزای محدود توسط (Phillips et al., 1998) بررسی گردید. همچنین (Blake et al., 2001) تأثیر استفاده از فیلت ویسکوالاستیک بر اتصال را بررسی کردند. آنان نشان دادند که برای استفاده از مزایای فیلت ویسکوالاستیک، باید ابعاد اتصال را افزایش داد.

به طور کلی بزرگ بودن شعاع فیلت و کم بودن ضخامت اورلمینیت، موارد بحرانی در عملکرد اتصال تی‌شکل تحت بار کششی ۴۵ درجه هستند. (Kumari et al., 2002 و Rispler et al. 1997) نتایج مشابهی برای این مسئله ارائه داده‌اند. (Khalili et al., 2011) به بررسی عددی اتصال تی‌شکل در پانل‌های ساندویچی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تغییر جنس هسته پانل ساندویچی علاوه بر تغییر مود شکست اتصال، باعث افزایش چشم‌گیر نیروی شکست اتصال می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد تمامی موارد تحلیل‌های انجام‌شده به اتصالات چسبی با اجزایی از جنس کامپوزیتی اختصاص داشته ولی اتصال چسبی روسازه کامپوزیتی به بدنه آلومینیومی که در ساخت شناورهای تندرو مرسوم است مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است. استفاده از چسب در این‌گونه اتصالات غیر هم‌جنس نیازمند بررسی دقیق بوده و از این‌رو این مقاله به بررسی و تحلیل این اتصال برای به دست آوردن نکات مورد نیاز در طراحی آن‌ها می‌پردازد. برای مدل‌سازی هندسی اتصال از داده‌های موجود یک

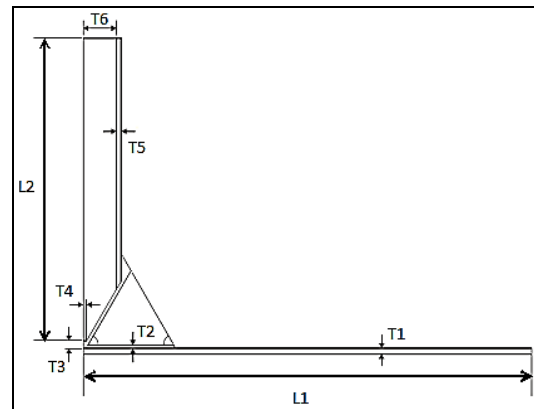
استفاده از این المان‌ها به منظور مدل‌سازی جدایش نیازمند تعریف مدل ناحیه چسبناک است.

شبهه‌سازی جدایش چسب در نرم‌افزار انسیس در سه مود قابل انجام است. در مود اول، جدایش زمانی اتفاق می‌افتد که تنش تماسی عمودی غالب باشد و فاصله لغزشی ایجاد شده در اثر اعمال بار بسیار کوچک‌تر از فاصله عمودی ایجاد شده باشد. در مود دوم عکس این حالت اتفاق می‌افتد و تنش‌های برشی و به طبع آن جابجایی لغزشی سبب جدایش می‌شود. در مود سوم ترکیبی از این دو مود برای مدل‌سازی جدایش مورد استفاده قرار می‌گیرد و دو تنش عمودی و برشی در تحلیل لحاظ می‌شوند. روابط تحلیلی رفتار جدایش بر حسب تنش عمودی و برشی به ترتیب و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P = K_n u_n (1 - d_m) \quad (1)$$

$$\tau_t = K_t u_t (1 - d_m) \quad (2)$$

در این روابط d_t پارامتر جدایش، K_n سختی تماسی عمودی، u_n فاصله جدایی عمودی، K_t سختی تماسی برشی، u_t لغزش برشی می‌باشد.



شکل ۱. طرح اتصال (به دلیل تقارن، نیمی از آن رسم شده است)

داده‌های مورد نیاز برای تعریف مدل رفتاری ماده چسب در جدول (۲) ارائه شده است. در شکل (۲. الف) رفتار دو خطی ماده چسب بر اساس مدل ناحیه چسبیده نشان داده شده است. انواع مدهای خرابی اتصال اعم از خرابی در چسب، اجزای متصل شده و یا سطح تماس در شکل (۲. ب) آورده شده

است. از اطلاعات جدول (۳) برای مدل‌سازی خواص مکانیکی مواد بکار رفته در استفاده شده است. علاوه بر این به منظور مدل‌سازی غیر خطی آلومینیوم، از نمودار تنش کرنش این فلز (شکل (۳)) استفاده شده است. در کلیه تحلیل‌های عددی رفتار غیرخطی مادی و هندسی با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ لحاظ شده است. شمای کلی اتصال به همراه شرایط مرزی بکار رفته در تحلیل عددی در شکل (۴) ارائه می‌گردد.

جدول ۱. مشخصات هندسی اتصال

متغیر	واحد	اندازه
L1	میلی متر	۶۰۰
L2	میلی متر	۲۷۰
T1	میلی متر	۴/۵
T2	میلی متر	۳
T3	میلی متر	۵
T4	میلی متر	۲
T5	میلی متر	۴
T6	میلی متر	۱۰

یکی از روش‌های مرسوم برای صحت‌گذاری نتایج تحلیل اجزای محدود استفاده از داده‌های آزمون‌های تجربی می‌باشد. در این مقاله، اتصال پانل ساندویچی با ورق آلومینیومی مورد تحلیل قرار گرفته ولی از آنجا که تاکنون آزمایش تجربی در این زمینه صورت نپذیرفته است لذا برای اعتبار سنجی، از نتایج آزمون مشابه به مدل مذکور که توسط (Toftgaard et al., 2005) منتشر شده، بهره‌برداری گردیده است. در این تحقیق، اتصال دو پانل ساندویچی با مشخصاتی که در جدول (۴) و شکل (۵. الف) مشاهده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این تحقیق تجربی، تست کشش در دستگاه کشش با سرعت ۱۰ میلی‌متر در دقیقه و بار کششی به پانل عمودی اتصال تی‌شکل اعمال و پانل پایه ثابت نگه داشته شده است. طول معلق تکیه‌گاه ۹۵۰ میلی‌متر بوده است.

در گام اول، مدل عددی فوق تشکیل و با شرایط پیش گفته به صورت غیرخطی تحلیل شده است. نتایج

جابجایی ۶۰ میلی‌متری، تمامی المان‌های مشخص شده در شکل (۶.ب) استحکام خود را از دست می‌دهند و هسته پانل ساندویچی و به طبع آن اتصال دچار شکست نهایی می‌شود.

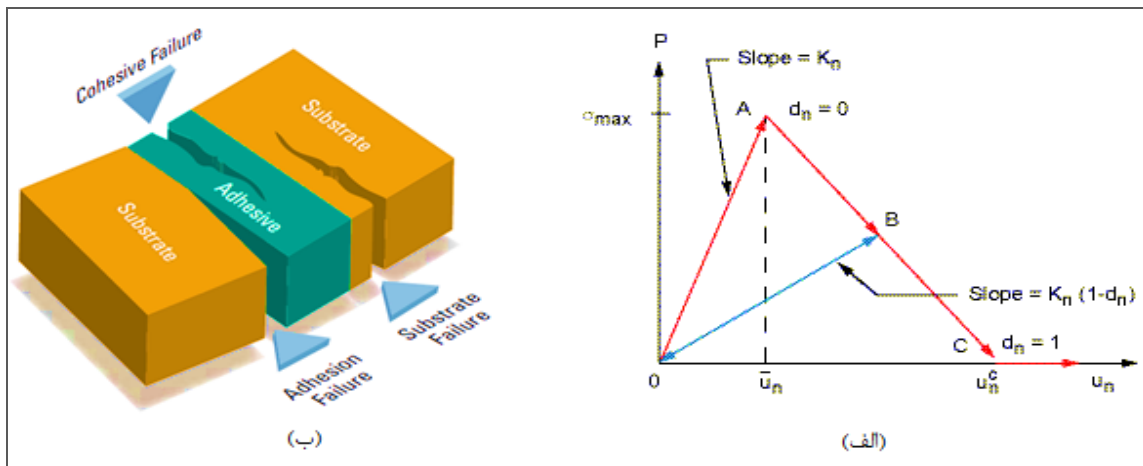
۳. نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد زاویه فوم یکی از عوامل بسیار تعیین‌کننده شکست اتصال می‌باشد از این‌رو تحلیل‌هایی به منظور بررسی استحکام اتصال در زوایای فوم ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه انجام شده است (شکل‌های ۷ و ۸). در این نمودارها عملکرد اتصال به صورت جابجایی اتصال در برابر نیروی عمودی که اتصال تحمل کرده است بیان شده است. در جدول (۵) مقدار نیروی شکست برای تمامی اتصال‌ها قابل مشاهده است.

حاصله در غالب نمودار جابجایی بر حسب نیرو استخراج شده که در مقایسه با نتایج آزمون تجربی، در شکل (۵.ب) ارائه می‌شود.

همان‌طور که در نمودار فوق مشخص است به استثنای بازه میانی نمودار که اختلاف بین نتایج افزایش می‌یابد، در بازه ابتدایی و انتهایی نتایج حاصل از دو روش تطابق مناسبی داشته به طوری که نیروی شکست اتصال در روش عددی، با ۸ درصد خطا نسبت به روش تجربی محاسبه شده است.

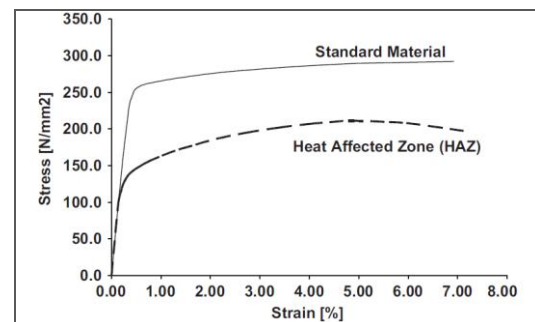
در مورد مد شکست اتصال، همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، تنش در المان‌های نزدیک محل اتصال در هسته پانل ساندویچی در جابجایی ۴۵ میلی‌متری به حد استحکام برشی هسته می‌رسند. این نکته در مورد تست تجربی که در نمودار بالا ارایه گردید نیز صادق است. از این مرحله به بعد به تدریج المان‌ها استحکام خود را از دست می‌دهند تا در نهایت در



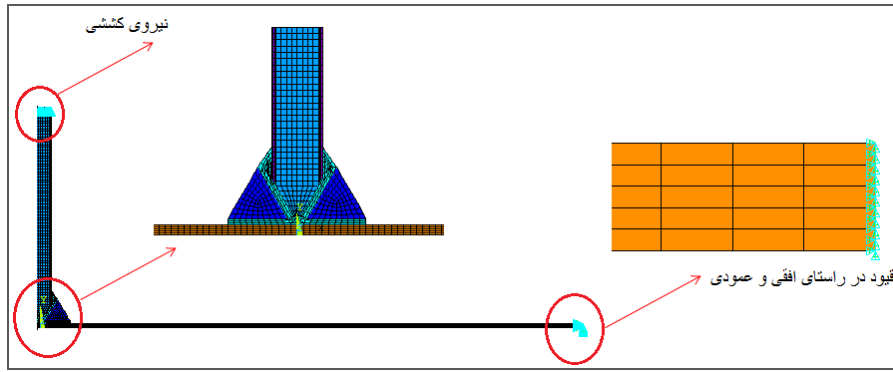
شکل ۲. (الف): منحنی کشش-جدایش برای مدل ماده چسبناک دو خطی، (ب): انواع مدهای شکست در اتصال چسبی (Scott Bader Company)

جدول ۲. مشخصات چسب (Zhou et al., 2008)

خواص چسب	
۱۹۰۰	چگالی بین لایه ای (kg/m^3)
۷۰	سفتی بین لایه ای (GPa)
۹	بیشترین تنش عمودی (MPa)
۳۱/۴	بیشترین تنش برشی (MPa)
۱۵۰	انرژی بحرانی شکست عمودی (J/m^2)
۳۰۰	انرژی بحرانی شکست برشی (J/m^2)



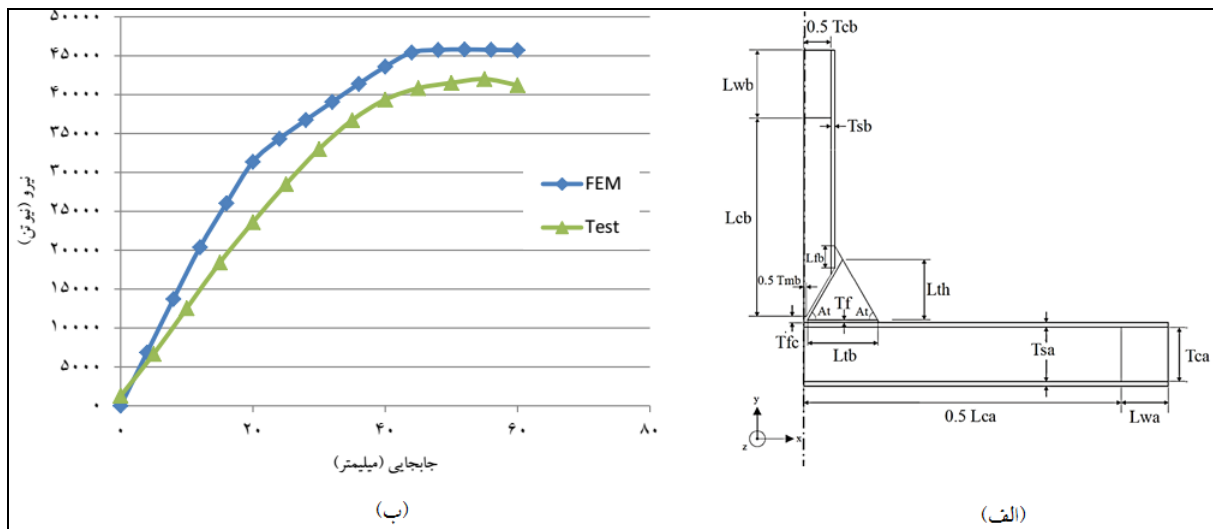
شکل ۳. نمودار تنش- کرنش آلومینیوم. (Aalberg et al. 1998)



شکل ۴. شرایط مرزی و بارگذاری

جدول ۳. خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در مدل سازی (Toftegaard et al., 2005)

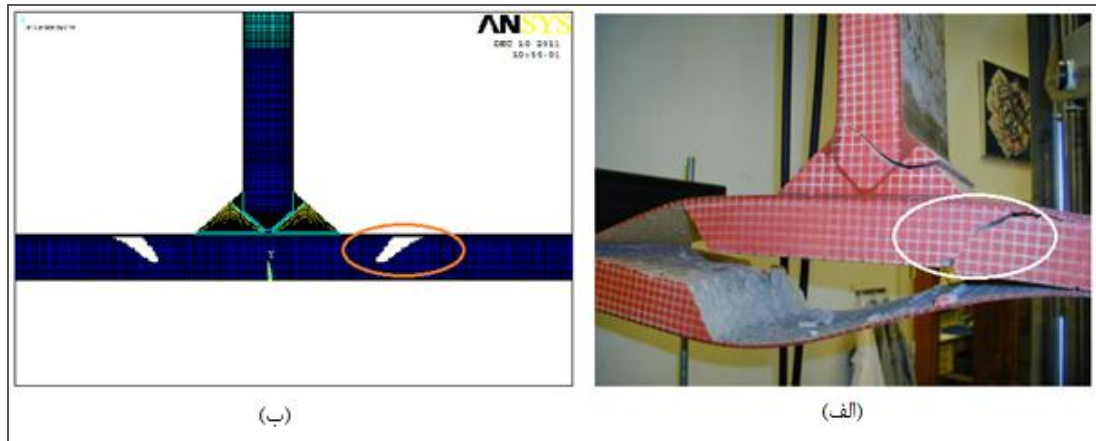
Vxy	S(Mpa)	Gxy(Mpa)	Y(Mpa)	Ey(Mpa)	X(Mpa)	Ex(MPa)	نوع مواد	اجزای اتصال
۰/۱۴	۳۱/۴	۴۴۰۰	۹	۱۱۵۰۰	۴۱۷	۲۶۱۰۰	L1 Vinylester infusion	پوسته صفحات ساندویچی
۰/۴۷	۸/۷	۱۷۰	۱۵	۵۰۰	۱۵	۵۰۰	Crestomer1152 PA	ماده پر کننده
۰/۳	۴/۱	۱۱۰	۶/۲	۲۸۰	۶/۲	۲۸۰	Divinycell HD250 PVC	فوم مثلثی
۰/۳	۱/۴	۴۰	۲/۴	۱۰۵	۲/۴	۱۰۵	Divinycell H100 PVC	هسته صفحات ساندویچی



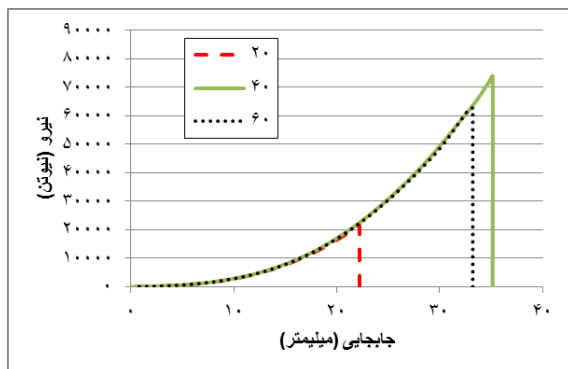
شکل ۵. (الف): ابعاد نمونه اتصال در تست تجربی (Toftegaard et al., 2005) (ب): نمودار مقایسه نتایج تست تجربی و مدل اجزای محدود

جدول ۵: نیروی شکست اتصال برای زوایای مختلف

زاویه فوم مثلثی (درجه)	۲۰	۳۰	۴۰	۴۵	۵۰	۶۰	۷۰
نیروی شکست اتصال (N)	۲۱۶۷۲	۲۲۷۲۴	۲۳۸۳۸	۱۲۲۷۶۴	۵۹۹۲۲	۶۲۸۳۴	۴۰۴۴۶



شکل ۶. (الف): محل شکست هسته در تست تجربی (Toftegaard et al., 2005)، (ب): محل شکست هسته در روش اجزاء محدود

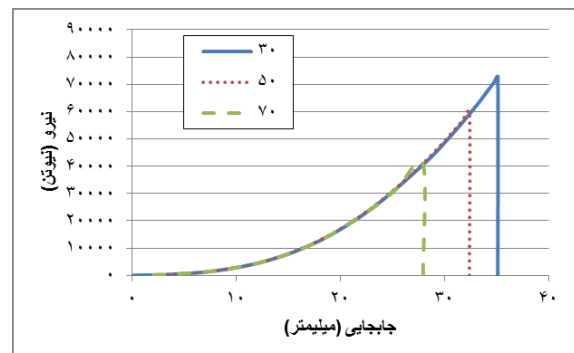


شکل ۸. نمودار نیرو-جابجایی برای زوایای مختلف فوم

سه مسیر برای المان‌های تماسی مطابق شکل (۹) تعریف شده و نمودار توزیع تنش در امتداد این مسیرها برای زاویه ۲۰ و ۷۰ درجه نیز در شکل (۱۰) ارائه شده است. از نتایج نمودارها واضح است که اتصال‌ها با زاویه فوم ۲۰ و ۷۰ درجه به دلیل اینکه توزیع تنش نامناسبی دارند کمترین نیرو را تحمل می‌کنند که این امر با توجه به شکل نامناسب اتصال در این زوایا قابل پیش‌بینی بود. مقایسه نتایج مربوط به این دو زاویه نشان می‌دهد که زاویه ۷۰ درجه در مقایسه با ۲۰ درجه نیروی بیشتری (حدوداً دو برابر) را تحمل می‌کند. دلیل این را می‌توان در توزیع تنش در این دو حالت که در شکل (۱۰) مشخص است، مشاهده کرد. شکل (الف.۱۰) کانتور تنش تماسی در مسیر ۱ برای زاویه ۷۰ درجه و شکل (ب.۱۰) برای زاویه ۲۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در زاویه ۷۰ درجه، توزیع تنش یکنواخت و مقدار

جدول ۴. ابعاد هندسی اتصال در تست تجربی (Toftegaard et al., 2005)

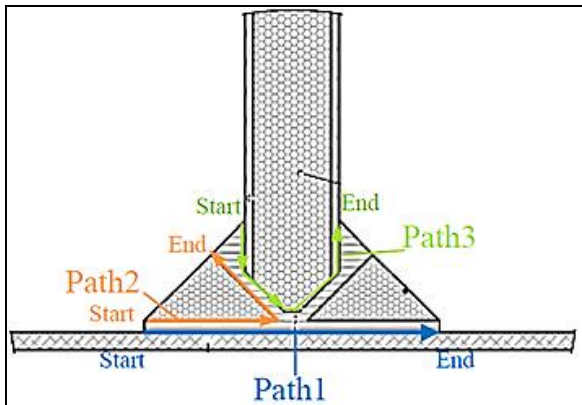
بخش	ابعاد	میلیمتر
اتصال‌تی‌شکل	عرض کلی اتصال	۲۵۰
	طول کلی اتصال	۱۰۰۰
	ارتفاع کلی اتصال	۳۵۰
فوم مثلثی	Tmb	۱۰
	Ltb	۹۰
	Lth	۴۵
	At=۴۵	-
پوسته کامپوزیتی	Tsa=Tsb	۴
هسته فومی پانل ساندویچی	Tca=Tc	۶۰
	Tf	۳
چسب	Tfc	۷
	Lfb	۲۸



شکل ۷. نمودار نیرو-جابجایی برای زوایای مختلف فوم

مسیر شماره ۱ بیشتر بوده و در نزدیکی لبه‌ها به چشم می‌خورد و در مسیرهای دیگر، جدایش چسب به این اندازه نمی‌باشد. این مسئله مسیر طراح را برای بهینه‌سازی اتصال مشخص می‌کند به عنوان مثال اگر طراح از زاویه ۴۰ درجه استفاده کند با دانستن این نکته که جدایش در مسیر شماره ۲ رخ می‌دهد با افزایش طول چسب و ضخامت چسب در این مسیر، می‌توان استحکام اتصال را به طور چشمگیری افزایش داد.

به دلیل وجود قید افقی در محل تکیه‌گاه، نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در جهت افقی نیز به وجود می‌آید (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). مقادیر کمینه و بیشینه برای زوایای مختلف همانند نمودارهای مربوط به نیروی عمودی بوده با این تفاوت که مقادیر این نیروها بسیار بیشتر بوده و نشان دهنده آن است که قیود در راستای افقی نیروی زیادی را تحمل می‌کند. با توجه به ساختار عرشه شناور، می‌دانیم که صلبیت ورق تقویت شده عرشه در راستای عمود بر آن بسیار کمتر از صلبیت در صفحه ورق تقویت شده است. این نکته دلیل زیاد بودن نیروی افقی در تکیه‌گاه را مشخص می‌کند.



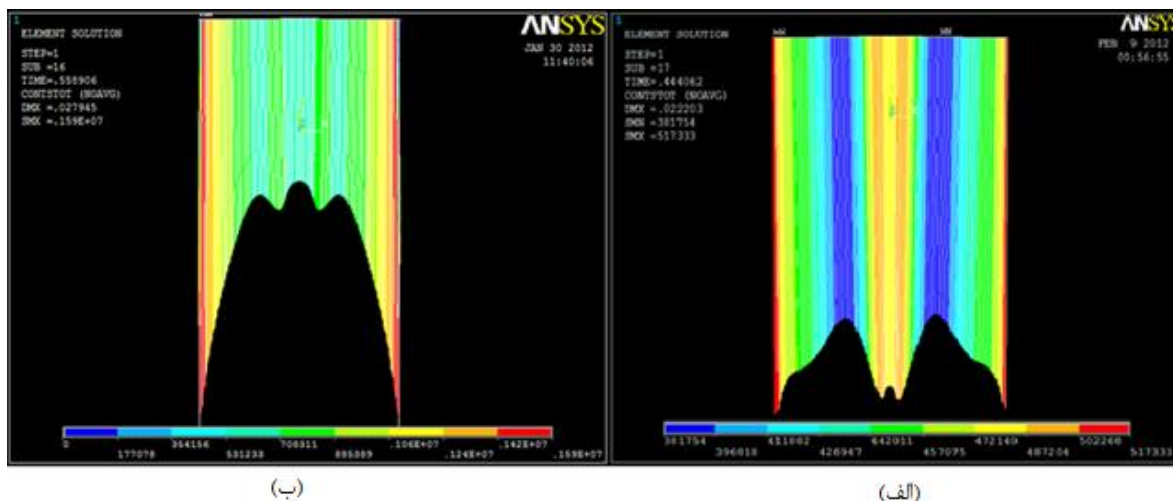
شکل ۹. مسیرهای امان‌های تماسی

آن کمتر بوده در حالی که در زاویه ۲۰ درجه تمامی تنش‌ها در لبه‌های مسیر متمرکز می‌باشد و این امر سبب شکست سریع اتصال شده است.

مورد دیگری که در بررسی نتایج به آن پرداخته شد، تنش مجاز در قسمت‌ها مختلف اتصال بود. در مورد پانل‌های آلومینیومی تقویت شده مسئله اصلی که باید مورد بررسی قرار گیرد استحکام ناحیه HAZ است. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است برای بررسی اثر این ناحیه در تحلیل‌ها، می‌بایست نمودار تنش-کرنش را تصحیح کرد. از این‌رو در تمامی تحلیل‌ها، ابتدا سطح تنش‌ها در ورق آلومینیوم بررسی و مشخص گردید که تنش‌ها حتی به حد تسلیم منطقه HAZ نمی‌رسد لذا نیازی نیست که در مناطق جوشکاری شده از مقادیر اصلاح شده نمودار تنش کرنش استفاده کرد و از طرفی نزدیکی محل اتصال چسبی به محل جوشکاری شده، اهمیت خود را از دست می‌دهد.

در مورد پانل ساندویچی نیز مقادیر تنش هم در هسته و هم در پوسته کامپوزیتی در محدوده ایمن بوده و با توجه به اینکه این قسمت از اتصال تنها نقش انتقال دهنده نیرو را به عهده دارد این امر از ابتدا قابل پیش‌بینی بود. در مورد فوم‌های مثلثی تقویت کننده هم نتایج حاکی از آن است که در زمان شکست اتصال دارای مقادیر تنش کمتر از حد شکست می‌باشند. این موارد حاکی از آن است که چنانچه مصالح بکار رفته در اتصال به ویژه ورق آلومینیومی پایه اتصال دارای استحکام بالایی باشند، مد شکست اتصال، در چسب و سطح تماس خواهد بود.

موضوع دیگری که با بررسی نتایج می‌توان به آن اشاره کرد، مدهای مختلف شکست در زوایای گوناگون اتصال می‌باشد. مقدار جدایش بر روی مسیر شماره ۲ در زاویه ۲۰ درجه بسیار بیشتر از زاویه ۴۰ درجه می‌باشد. در حالی که در اتصال ۴۰ درجه، جدایش در امتداد



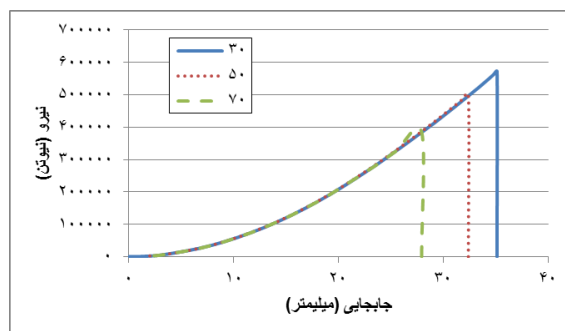
شکل ۱۰. (الف): کانتور تنش روی مسیر ۱ در زاویه ۷۰ درجه، (ب) کانتور تنش روی مسیر ۱ در زاویه ۲۰ درجه

اتصال می‌توان مشاهده کرد، سختی کار برای تنظیم ضخامت چسب در فرآیند ساخت می‌باشد زیرا این اتصال از اجزای متفاوتی تشکیل شده که برای تنظیم همزمان این اجزا برای رسیدن به خواسته‌های طراحی، پیچیدگی‌هایی برای ساخت خواهد داشت.

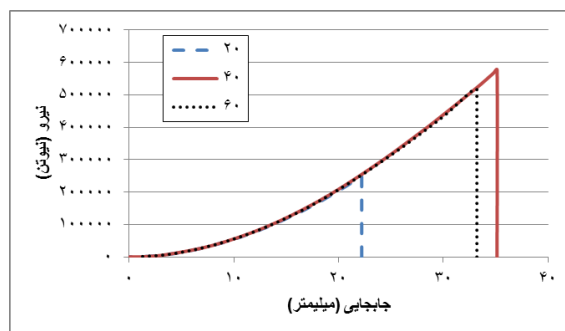
به طور معمول برای تهیه اتصال تی‌شکل دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش اول روشی است که در این مقاله در قسمت اول به آن پرداخته شد. ویژگی اصلی این روش سبک بودن آن است. روش دوم ساختن اتصال با استفاده از چسب به همراه لایه‌های کامپوزیت است. این روش دارای استحکام بالایی بوده ولی به لحاظ وزنی سنگین‌تر است. در روش جدیدی که در این بخش پیشنهاد می‌شود، سعی شده ویژگی‌های مثبت این دو روش حفظ شود تا اتصال در عین سبکی از استحکام بالایی نیز برخوردار باشد.

در شکل (۱۳)، شمای کلی طرح جدید اتصال نشان داده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است فیلتهای مثلثی با فوم پانل ساندویچی ادغام شده و برای تقویت اتصال از دو ورق ۲ میلی‌متری آلومینیومی استفاده شده است. شرایط مرزی و بارگذاری مشابه حالت قبل می‌باشد.

مقدار وزن چسب به کار رفته در این مدل سازی ۱۰ درصد کمتر از حالت قبلی می‌باشد. همان‌طور که مشخص است به دلیل اینکه فیلتهای مثلثی در پانل



شکل ۱۱. منحنی نیروی تکیه‌گاهی افقی-جابجایی در زوایای مختلف فوم



شکل ۱۲. منحنی نیروی تکیه‌گاهی افقی-جابجایی در زوایای مختلف فوم

با بررسی داده‌های حاصل از تحلیل‌های قبل مشخص شد که این نوع از اتصالات در محل لبه فیلتهای مثلثی و ورق پایه آلومینیومی ضعیف بوده و با تقویت این قسمت از اتصال، می‌توان استحکام را به نحو چشمگیری افزایش داد. نکته دیگری که در مورد این

مشابهی می‌باشد که برای استفاده در طراحی مناسب خواهد بود و این در حالی است که در طرح قبلی حداکثر استحکام کششی در زاویه فوم ۴۰ مشاهده شده و در محدوده ۳۰ الی ۴۰ درجه نیز تقریباً مشابه بوده است. با مقایسه نمودار شکل‌های ۸ و ۱۵ حداکثر جابجایی عمودی قابل تحمل نیز در طرح جدید در مقایسه با طرح اولیه به میزان سه برابر افزایش یافته است. نحوه شکست اتصال در طرح جدید به گونه‌ای است که به جز زاویه فوم ۳۰ درجه که شکست در محل اتصال ورق آلومینیومی و پانل افقی ساندویچی اتفاق می‌افتد در بقیه زوایا محل شکست مطابق شکل ۱۶ است.

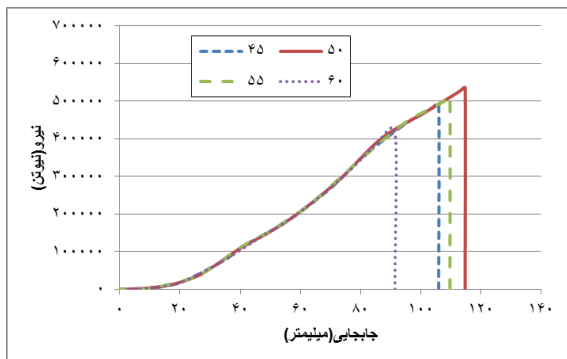
ساندویچی ادغام شده‌اند، ساخت این اتصال ساده‌تر بوده و تنظیم ضخامت‌های چسب نیز آسان‌تر خواهد بود.

تحلیل‌های اولیه نشان داد که پانل ساندویچی در برابر نیروی وارده استحکام لازم را نداشته و پیش از گسیختن اتصال، دچار شکست خواهد شد. از این رو جنس فوم تغییر کرده و ماده Divinycell HD250 PVC (مشخصات آن در جدول (۳) ارائه شده) جایگزین شده است. برای کامپوزیت‌ها نیز از داده‌های موجود در جدول (۶) استفاده شده و بقیه مصالح مشابه مواد اتصال قبلی بوده است.

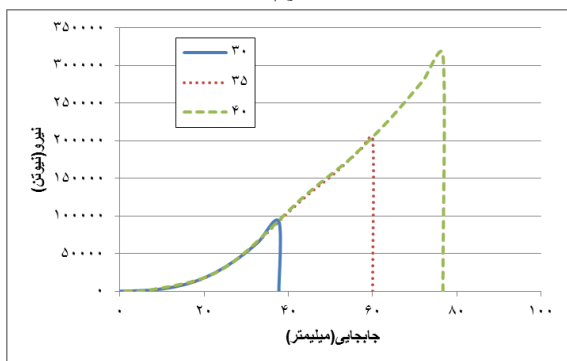
جدول ۶. خواص مکانیکی کامپوزیت در هندسه جدید

(Derewonko, 2009)

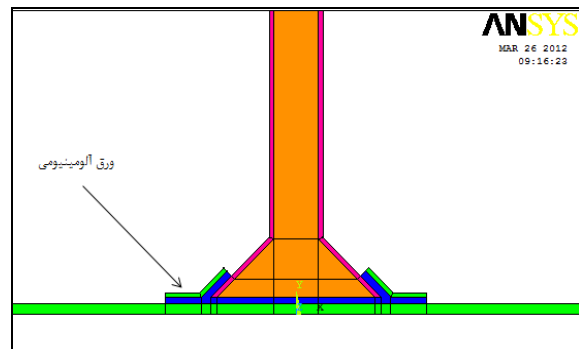
E_x (MPa)	E_y (MPa)	G_{xy} (MPa)	ν_{xy}
۵۸۰۹۳	۵۸۰۹۳	۳۵۴۵	۰/۰۱۵۴



شکل ۱۴. منحنی نیرو-جابجایی برای زوایای مختلف فوم



شکل ۱۵. منحنی نیرو-جابجایی در زوایای مختلف فوم



شکل ۱۳. هندسه جدید اتصال

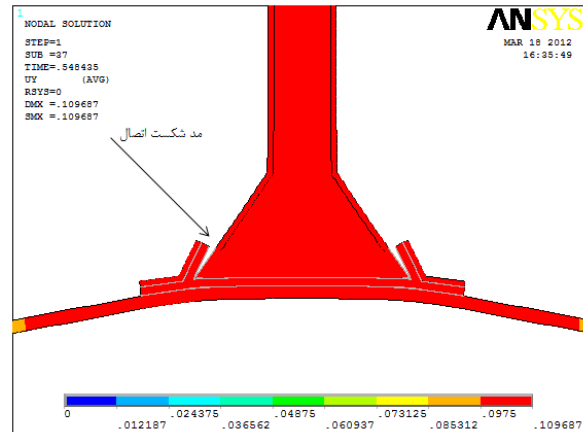
همان‌طور که مشاهده می‌شود در برابر نیروی کشش در پانل عمودی، استحکام اتصال به طور قابل توجهی افزایش یافته است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). مقایسه بیشترین نیروی عمودی قابل تحمل در این اتصال و اتصال قبلی، نشان می‌دهد که حداکثر نیروی قابل تحمل در طرح جدید به میزان ۷/۲۵ برابر بوده که این موضوع نشانگر موثر بودن این طرح در افزایش استحکام اتصال است. اتصال جدید با زاویه فوم ۵۰ درجه، دارای بالاترین حد تحمل نیرو بوده و در مجموع در بازه بین ۴۵ تا ۵۵ درجه دارای استحکام تقریباً

بررسی نمودار توزیع تنش و جدایش در سطوح مختلف نشان می‌دهد که استفاده از المان‌های تماسی برای درک رفتار جدایش چسب و بهینه کردن اتصال بسیار کارآمد می‌باشد زیرا به طور مشخص می‌توان فهمید که در کدام قسمت از اتصال می‌بایست مقدار چسب و طول سطح چسب را افزایش داد تا به استحکام مورد نیاز دست یافت.

پس از بررسی نتایج تحلیل عددی استحکام هندسه اولیه اتصال، روش جدیدی برای اتصال چسبی تی شکل ارائه گردید که در آن از ورق آلومینیومی به عنوان تقویت کننده رویه اتصال در ناحیه بین پانل افقی و فوم مثلثی با اتصال چسبی استفاده شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان دهنده افزایش استحکام این روش اتصال تا میزان $7/25$ برابر طرح اولیه می‌باشد. این افزایش استحکام در حالتی می‌باشد که مقدار وزن چسب استفاده شده، ۱۰ درصد کمتر از وزن حالت اولیه نیز بوده است. در عین حال در این طرح به علت ادغام فیلتهای مثلثی در پانل ساندویچی، فرآیند ساخت اتصال ساده تر و سبب کاهش هزینه ساخت نیز خواهد شد. البته ورق آلومینیومی اضافه شده به هندسه اتصال سبب افزایش وزن اتصال به میزان $0/5$ کیلوگرم به ازای هر متر از اتصال شده که در عمل مقداری ناچیز خواهد بود. این طرح اتصال با توجه به اهمیت استحکام و کاربرد اتصال تی شکل در اجزای سازه‌ای شناورهای کامپوزیتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۵. منابع

- Aalberg A., Langseth M., Malo K.A. 1998. Ultimate strength of stiffened aluminum plates. Norwegian University of Science and Technology, Department of Structural Engineering.
- ANSYS 11 User's Manual.
- Blake J.I.R., Sheno R.A., House J., Turton T. 2001. Progressive damage analysis of tee joints with viscoelastic inserts. Composites Part A. 32: 641-653.
- Dodkins A. R., Sheno R. A., Hawkins G. L. 1994. Design of joints and attachments in FRP ships structures. Marine Structures. 7: 365-398.



شکل ۱۶. محل شکست اتصال در زوایای ۳۵ الی ۶۰ درجه

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، استحکام اتصال چسبی بین ورق آلومینیومی و پانل ساندویچی با استفاده از روش عددی بر اساس مدل اجزای محدود دو بعدی و با فرض کرنش صفحه‌ای تحلیل و بررسی شده است. جدایش چسب با استفاده از المان‌های غیرخطی تماسی بر اساس رفتار مدل ناحیه چسبناک در نرم افزار انسیس مدل سازی شده است. در این مدل رفتاری، جدایش بین المان‌های چسبی زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی کشش و برش به حد معینی که بیانگر استحکام کششی و برشی چسب می‌باشد برسد. عامل مهم در میزان استحکام اتصال، زاویه فوم مثلثی بوده که در این مقاله برای هندسه اولیه زوایای ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته و در تمامی تحلیل‌ها نیز مقدار چسب مورد استفاده، ثابت نگه داشته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اتصال با زاویه فوم ۴۰ درجه از بیشترین استحکام برخوردار می‌باشد. همچنین بررسی توزیع تنش و جدایش در المان‌های تماسی نشان می‌دهد که تغییر زاویه فوم در مد جدایش چسب تأثیر بسزایی داشته به گونه‌ای که در زاویه ۴۰ درجه بیشترین جدایش در سطح تماس فوم‌های مثلثی و در لبه‌های اتصال به وجود می‌آید در حالی که در زاویه ۲۰ درجه، بیشترین جدایش در سطح تماس فوم مثلثی با پانل ساندویچی به وجود می‌آید.

- Dharmawan F., et al. 2004. Geometry and damage effects in a composite marine T-joint. *Composite Structures*. 66: 181-7.
- Dharmawan F., Li H. C. H., Herszberg I., John S. 2006. Fracture behavior of composite maritime T-joints. *Composite Structures*. 75: 339-50.
- Derewonko A. 2009. Prediction of the failure metal/composite bonded joints. *Computational Materials Science*. 45: 735-738.
- Hayman B., et al. 2007. Design of X-joints in sandwich structures for naval vessels. 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures Houston, Texas, United States of America.
- Kumari S., Sinha P. K. 2002. Finite element analysis of composite wing T-joints. *Reinforced Plastic Composites*. 21: 1561-1585.
- Khalili S. M. R., Ghaznavi A. 2011. Numerical analysis of adhesively bonded T-joints with structural sandwiches and study of design parameters. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 31: 374-356.
- Phillips H. J., Sheno R. A. 1998. Damage tolerance of laminated tee joints in FRP structures. *Composites Part A*. 29: 465-478.
- Rispler A. R., Steven G. P., Tong L. 1997. Failure analysis of composite T-Joints including inserts. *Reinforced Plastic Composites*. 16: 1642-1658.
- Sheno R. A., Hawkins G. L. 1992. Influence of material and geometry variations on the behavior of bonded tee connections in FRP ships. *Composites*. 23: 335-345.
- Stenius I., Rosen A., Kutteneuler J. 2011. On structural design of energy efficient small high-speed craft. *Marine Structure*. 24: 43-59.
- Scott Bader Company, Adhesive catalog.
- Toftegaard H., Lystrup A. 2005. Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships. *Composites Part A*. 36: 1055-1065.
- Zhou D. W., Louca L. A., Saunders M. 2008. Numerical simulation of sandwich T-joints under dynamic loading. *Composites Part B*. 39: 973-985.

Numerical Investigation on Novel Method for Adhesively Bonded T-joint Between Aluminum and Sandwich Panel

Mahdi Omidali; Mohammad Reza Khedmati* ; Roholah Hadipour Godarzi

Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, No. 424, Hafez Avenue, Tehran, Iran

Abstract

A common way to join dissimilar materials in industrial applications is to use adhesives. Marine industries use this kind of joints for attaching main hull to superstructure of the ships. Most previous researches have focused on composite-composite joints, while a few of them are devoted to aluminum- sandwich panel joints. This study focuses on the numerical static strength analysis of a typical aluminum-sandwich panel T-joints and improving its strength through a novel design. The results of numerical analyses are in a good agreement with those of the experimental tests and confirm the accuracy of numerical analyses. In analyzing the adhesive between joint elements, contact elements and cohesive zone model (CZM) in ANSYS as well as nonlinear analysis is used. Results show that change in joint geometry considered in this paper, caused a 7.25% increase in vertical failure load of the joint. This increase in strength of joint attained in a situation that because of the merging of the joined parts, the process of construction became easier.

Figure 1. Joint Geometry-Initial Design (half of model depicted)

Figure 2. (a) normal contact stress and contact gap curve bi-linear CZM material, (b) Failure modes in adhesive joints (Scott Bader Company)

Figure 3. Aluminum alloy stress-strain curve (Aalberg et al. 1998)

Figure 4. Loading condition and boundary condition

Figure 5. (A) Joint geometry of test model, (B) Comparison between FEM analysis and experimental (Toftegaard et al., 2005) for load-displacement curve

Figure 6. (A) Failure mode in experimental test (Toftegaard et al., 2005), (B) Failure mode in FEM analysis

Figure 7. Load-Displacement Curves for various fillet angles

Figure 8. Load-Displacement Curves for various fillet angles

Figure 9. Adhesion interface paths

Figure 10. (A) Stress along path 1 for fillet angle 700, (B) Stress along path 1 for fillet angle 200

Figure 11. Horizontal reaction force for various fillet angles

Figure 12. Horizontal reaction force for various fillet angles

Figure 13. General Overview of the new design configuration

Figure 14. Load Displacement Curves for new design for various angles

Figure 15. Load Displacement Curves for new design for various angles

Figure 16. Failure mode for new design 35 to 60 degree

Table 1 Joint Geometry Dimensions

Table 2 Adhesive Mechanical Properties (Zhou et al., 2008)

Table 3 Mechanical properties of the joint components (Toftegaard et al., 2005)

Table 4 Joint geometry of test model (Toftegaard et al., 2005)

Table 5 Failure load for various fillet angles

Table 6 Sandwich panel laminate mechanical properties in new design (Derewonko, 2009)

*Corresponding author E-mail: khedmati@aut.ac.ir